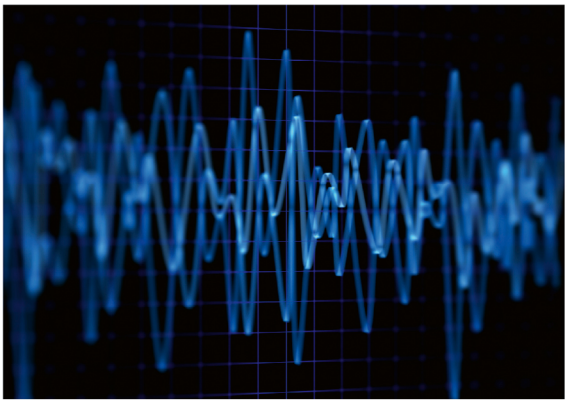


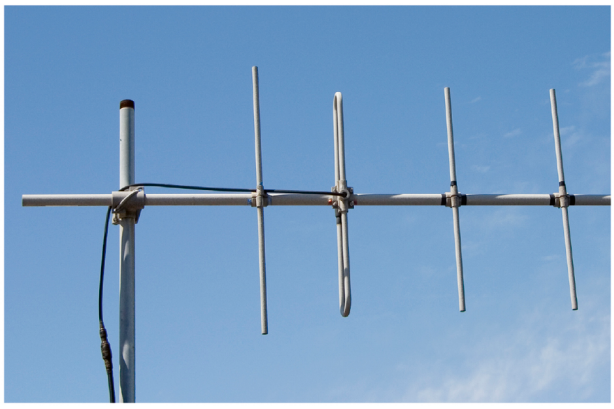
HAM RADIO · ERP · ANTENNENBAU



BETRIEBSART · DIGITALFUNK · MORSEN



SOFTWARE DEFINED RADIO · DARC



FREQUENZ · SENDER · MODULATION





Harald Zisler DL 6 RAL
Thomas Lauterbach DL 1 NAW

Amateurfunk

Das umfassende Handbuch

- Vom Software Defined Radio bis zur eigenen Funkstation
- Elektrotechnik, Digitalfunk, Antennen, Messtechnik
- Das Technikwissen der Funkamateure: für die Prüfungsvorbereitung

4., aktualisierte und erweiterte Auflage
zum Fragenkatalog 2024

Rheinwerk Computing

Liebe Leserin, lieber Leser,

ich freue mich sehr, dass Sie sich für dieses Buch entschieden haben. Sie können mit ihm die ersten Schritte in die Welt des Amateurfunks wagen oder Ihr Fachwissen im technischen Bereich vertiefen. Harald Zisler und Prof. Dr. Thomas Lauterbach liefern Ihnen dazu fundierte und anschauliche Erklärungen, mit denen Sie die technischen und physikalischen Hintergründe grundlegend verstehen.

Bei der Konzeption dieses Buchs war es uns jedoch besonders wichtig, dass nicht nur die technischen und theoretischen Aspekte des Funkens behandelt werden, sondern dass auch die Funkpraxis nicht zu kurz kommt. Sie finden daher auch Hinweise, wie Sie nach bestandener Prüfung Ihre eigene Funkstation einrichten, wie Sie selbst Antennen konstruieren oder moderne Formen des Digitalfunks nutzen – kurz: Hier erwartet Sie die komplette Bandbreite des Amateurfunks.

Wenn Sie dieses Buch für den Amateurfunk begeistern konnte, liegt natürlich der nächste Schritt nahe: Gehen Sie selbst auf Sendung und werden Sie als Funkamateur oder Funkamateurin Mitglied im DARC. Weitere Informationen dazu finden Sie auf den folgenden Seiten.

Abschließend noch ein Wort in eigener Sache: Dieses Werk wurde mit großer Sorgfalt geschrieben, geprüft und produziert. Sollte dennoch einmal etwas nicht so funktionieren, wie Sie es erwarten, freue ich mich, wenn Sie sich mit mir in Verbindung setzen. Ihre Kritik und konstruktiven Anregungen sind jederzeit willkommen.

Ihr Christoph Meister
Lektorat Rheinwerk Computing

christoph.meister@rheinwerk-verlag.de
www.rheinwerk-verlag.de
Rheinwerk Verlag · Rheinwerkallee 4 · 53227 Bonn

Auf einen Blick

1 Erlebnis Amateurfunk 29

TEIL I Amateurfunktechnik

2 Fachrechnen 59
3 Bauteilkunde 85
4 Physikalische Grundlagen 89
5 Die Welt der Widerstände 115
6 Elektrische Leistung 151
7 Wechselstrom/Signale 155
8 Das elektrische Feld (elektrostatische Feld) 177
9 Magnetisches Feld und Induktivitäten 197
10 R, C und L im Wechselstromkreis 229
11 Die Halbleiterdiode 267
12 Der Transistor und seine Grundschaltungen 281
13 Die Elektronenröhre 319
14 Schaltungskunde: Stromversorgung 323
15 Grundlagen der elektronischen Schwingungserzeugung 341
16 Sende- und Empfangstechnik 353
17 Digitale Sende- und Empfangstechnik 451
18 Antennen 489
19 Übertragungsleitungen 527
20 Stehwellen und Leistungsrückfluss 541
21 Mantelwellen 547
22 Anpassung, Transformation und Symmetrierung 553
23 Das elektromagnetische Feld 563
24 Leistung und Feldstärke 581
25 Messungen und Messgeräte 591
26 Störungen und andere Probleme 629
27 Sicherheit 639

TEIL II Praxis und Projekte

28 SDR-Empfang mit dem SDRplay RSP2pro 653
29 Die Amateurfunkprüfung 661
30 Nach bestandener Prüfung – Stationsaufbau 663
31 Antennenbau für Einsteiger 693
32 Funkbetrieb außerhalb der eigenen vier Wände 713
33 Amateurfunk digital 743
34 Remote-Funkbetrieb 767
35 Morsen 773

Impressum

Dieses E-Book ist ein Verlagsprodukt, an dem viele mitgewirkt haben, insbesondere:

Autoren Harald Zisler, Thomas Lauterbach
Lektorat Christoph Meister
Fachgutachten
Copy-Editing
Typografie & Layout Vera Brauner
Satz E-Book SatzPro, Krefeld
Herstellung E-Book Denis Schaal
Covergestaltung Silke Braun
Coverbild iStock: 96920905 © Sparky2000, 172224070 © enot-poloskun, 492198113 © PeopleImages, 511664991 © deimagine, 639471568 © JanJutamas, 856909472 © Nordroden; Shutterstock: 115893523 © Francisco Javier Gil

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über *http://dnb.dnb.de* abrufbar.

ISBN 978-3-367-11533-4

4., aktualisierte Auflage 2026
© Rheinwerk Verlag, Bonn 2026

Rheinwerk Verlag GmbH • Rheinwerkallee 4 • 53227 Bonn
service@rheinwerk-verlag.de

Informationen zu unserem Verlag und Kontaktmöglichkeiten finden Sie auf unserer Verlagswebsite *www.rheinwerk-verlag.de*. Dort können Sie sich auch umfassend über unser aktuelles Programm informieren und unsere Bücher und E-Books bestellen.

Inhalt

Materialien zum Buch 21
Vorwort 23
Geleitwort des DARC e. V.: Eine faszinierende Welt – der Amateurfunk 27

1 Erlebnis Amateurfunk 29

1.1 Amateurfunk, Freenet, PMR und CB-Funk 29
1.2 Funken? 30
1.3 Funkern zugehört 31
1.3.1 Buchstabieren 32
1.3.2 Q-Gruppen 34
1.3.3 Weitere betriebliche Abkürzungen 38
1.3.4 Rufzeichen 39
1.3.5 Was hört man? 39
1.4 Funkübertragung 40
1.5 Amateurfunk mithören 44
1.5.1 SDR-Empfang per Internet 44
1.5.2 SDR-Empfänger am PC 49
1.5.3 Klassische Empfangsgeräte 50
1.5.4 Bausätze 51
1.5.5 Antennen für den Empfang 51
1.6 Funkamateure persönlich kennenlernen 54
1.7 Technik als Erlebnis 56

TEIL I Amateurfunktechnik

2 Fachrechnen 59

2.1 Basisgrößen des SI-Einheitensystems 59
2.2 Dezibelrechnung für Verstärkung und Dämpfung (Leistung) 66
2.2.1 Berechnung des Leistungs- oder Dämpfungsfaktors 69
2.2.2 Berechnung der Verstärkung in dB aus dem Leistungsfaktor 69
2.2.3 Wichtige dB- und Leistungsfaktorwerte 69

2.3 Rechnen mit Dezibelwerten ... 70
2.4 Dezibelrechnung für Verstärkung und Dämpfung (Spannung) ... 71
2.4.1 Wichtige dB- und Spannungsfaktorwerte ... 72
2.5 Dezibelrechnung: Leistungspegel ... 73
2.5.1 Wichtige Leistungspegel ... 74
2.6 Dezibelrechnung: Spannungspegel ... 75
2.7 S-Meter und dB ... 76
2.8 Zahlensysteme ... 78
2.8.1 Umrechnen von Dualzahlen ... 78
2.8.2 Umrechnen von Hexadezimalzahlen ... 81

3 Bauteilkunde 85

4 Physikalische Grundlagen 89

4.1 Der Stromkreis ... 89
4.1.1 Schaltelemente und Schaltzeichen im Stromkreis ... 90
4.1.2 Schalter und Taster ... 91
4.1.3 Relais ... 93
4.1.4 Der Kurzschluss – Supergau im Stromkreis ... 94
4.1.5 Die Sicherungen ... 95
4.2 Spannung als Ursache ... 99
4.3 Strom ... 102
4.4 Ladungsmenge ... 104
4.5 Stromleitverhalten verschiedener Stoffe ... 105
4.5.1 Leiter ... 105
4.5.2 Halbleiter ... 106
4.5.3 Nichtleiter, Isolatoren ... 109
4.5.4 Zusammenfassung ... 110
4.6 Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit ... 112

5 Die Welt der Widerstände 115

5.1 Schaltzeichen ... 116

5.2 Widerstände als Bauelement ... 117
5.2.1 Bauausführungen von Widerständen ... 117
5.2.2 Wertangaben für SMD-Widerstände ... 120
5.2.3 Manuell veränderbare Widerstände ... 123
5.2.4 Widerstandsreihen ... 125

5.3 Berechnung von Widerständen, Spannung, Strom, Leistung ... 126
5.3.1 Widerstandsberechnungen im Detail (Strom und Spannung) ... 127
5.3.2 Widerstandsberechnungen und Leistung ... 128

5.4 Innenwiderstand von Strom- und Spannungsquellen ... 131

5.5 Leistungsanpassung ... 132

5.6 Serienschaltung (Reihenschaltung) von Widerständen, Spannungsteiler ... 132

5.7 Parallelschaltung von Widerständen (verzweigter Stromkreis) ... 135

5.8 Gemischte Schaltung von Widerständen ... 137
5.8.1 Berechnungen mit variablen Widerständen ... 139
5.8.2 Gemischte Schaltung: Symmetrisches Dämpfungsglied ... 140

5.9 Experimentieren und simulieren ... 142
5.9.1 Steckplatine ... 143
5.9.2 Aufbau des Stromkreises und Experimente mit Widerständen ... 143
5.9.3 Simulation am Rechner ... 147

6 Elektrische Leistung 151

6.1 Wirkungsgrad ... 152

6.2 Elektrische Arbeit ... 153

7 Wechselstrom/Signale 155

7.1 Schwingungsformen ... 160

7.2 Berechnung der Frequenz ... 161

7.3 Berechnung der Periodendauer ... 162
7.4 Berechnung der Frequenz aus der Periodendauer ... 163
7.5 Berechnung der Wellenlänge ... 164
7.6 Berechnung des Effektivwerts ... 165
7.7 Spannungsmessung mit dem Oszilloskop ... 166
7.8 Zeigerdarstellung sinusförmiger Signale ... 167
7.9 Phasendifferenzen ... 168
7.10 Nichtsinusförmige Signale ... 169

8 Das elektrische Feld (elektrostatische Feld) 177

8.1 Das elektrische Feld als Bauelement: Der Kondensator ... 180
8.1.1 Vom Dielektrikum zum Bauelement ... 180
8.1.2 Zusammenschaltung von Kondensatoren ... 191
8.1.3 Ladung und Entladung eines Kondensators im Gleichspannungskreis ... 194

9 Magnetisches Feld und Induktivitäten 197

9.1 Das magnetische Feld ... 197
9.1.1 Der Skin-Effekt und Wirbelströme ... 198
9.2 Induktivität (Spulen und Transformatoren) ... 199
9.3 Schaltzeichen für Induktivitäten ... 200
9.4 Induktivitäten selbst bauen ... 200
9.5 Induktivitäten (Bauelemente) ... 201
9.6 Grundlagen der Induktivität ... 206
9.7 Eigenschaften von Induktivitäten ... 207
9.7.1 Experimente ... 207
9.8 Vertiefung mit Berechnungen ... 208
9.8.1 Spulenberechnungen ... 208
9.8.2 Die magnetische Feldstärke ... 211
9.8.3 Magnetische Flussdichte ... 213

9.9 Zusammenschaltung von Induktivitäten 214

9.10 Die Spule im Gleichstromkreis 214

9.11 Transformatoren und Übertrager 216

9.11.1 Allgemeines zu Transformatoren und Übertragern 217

9.11.2 Verhältnis von Spannungen zu Windungszahlen 221

9.11.3 Verhältnis von Strömen zu Windungszahlen 222

9.11.4 Stromdichte bei Transformatorenwicklungen 223

9.11.5 Übertrager, Impedanzen und die Übersetzung von Widerstandsverhältnissen 224

9.11.6 Balun – balanced-unbalanced 226

10 R, C und L im Wechselstromkreis 229

10.1 Ohmscher Widerstand 229

10.2 Kondensator im Wechselstromkreis 230

10.2.1 Kondensatorverluste, Verlustwiderstand, Auswahl des Dielektrikums 232

10.3 Induktivität einer Spule 233

10.3.1 Spulenverluste, Güte 235

10.3.2 Induktivitäten in Schaltungen und Geräten 235

10.4 Zusammenfassung 235

10.4.1 Experimente 236

10.5 Reihenschaltung von Kondensator und Widerstand 237

10.6 Reihenschaltung von Spule und Widerstand 237

10.7 Tief- und Hochpassfilter für den Audiobereich 237

10.7.1 Tief- und Hochpassfilter aus R und C oder L berechnen 238

10.7.2 Ermitteln der Spannungsverhältnisse 240

10.8 Schwingkreise mit Spulen und Kondensatoren 240

10.8.1 Schwingung im LC-Kreis 241

10.8.2 Schwingungsarten 242

10.8.3 Der Reihenschwingkreis 243

10.8.4 Parallelschwingkreis 246

10.8.5 Die Resonanzfrequenz von Schwingkreisen 247

10.8.6 Frequenzändernde Eingriffe am Schwingkreis 249

10.8.7 Bandbreite und Güte von Schwingkreisen 250

10.9 Bandfilter ... 257
10.9.1 Schwingquarze als Bandfilter ... 260
10.9.2 Hoch- und Tiefpassfilter mit Spule und Kondensator ... 261
10.10 Probleme in Hochfrequenzschaltungen ... 265
10.10.1 Experimente ... 265

11 Die Halbleiterdiode 267

11.1 Schaltzeichen ... 267
11.2 Dioden (Bauelemente) ... 267
11.3 Diodentypen und Eigenschaften ... 270
11.4 Spannungsabfall an Dioden ... 272
11.4.1 Experiment: Messung des Spannungsabfalls an einer Siliziumdiode 1N4001 ... 272
11.5 Dioden in Schaltungen ... 274
11.5.1 LED mit Vorschaltwiderstand ... 274
11.5.2 Z-Diode zur Spannungsstabilisierung ... 275
11.5.3 Kapazitätsdiode ... 277
11.5.4 Spannungsbegrenzer mit antiparallelen Dioden ... 277
11.5.5 Entkopplung von Spannungsquellen ... 278

12 Der Transistor und seine Grundschaltungen 281

12.1 Schaltzeichen ... 281
12.2 Transistoren (Bauelemente) ... 282
12.2.1 Aufbau und Funktion von bipolaren Transistoren ... 283
12.2.2 Aufbau und Funktion von Feldeffekttransistoren ... 300
12.3 Integrierte Schaltkreise ... 306
12.3.1 Analoge ICs: Der Operationsverstärker ... 307
12.3.2 Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC) ... 312
12.3.3 Digitale ICs: Logische Schaltungen ... 312

13 Die Elektronenröhre 319

14 Schaltungskunde: Stromversorgung 323

14.1 Schaltnetzteil vs. klassische Längsregelung ... 323
14.2 Berechnung einfacher Versorgungsschaltungen ... 323
14.3 Gleichrichtung ... 324
14.4 Gleichspannungsrückgewinnung bzw. Spannungsvervielfacher ... 329
14.5 Spannungsglättung ... 331
14.6 Spannungsregelung ... 333
14.7 Spannungsregelung mit Festspannungsreglern ... 335
14.8 Die Funktionsweise von Schaltnetzteilen ... 337
14.9 Rückwirkungen in das Stromnetz, Störungen ... 338
14.10 Hochspannungsgleichrichter ... 338
14.11 Fernspeisung, BIAS-T ... 339

15 Grundlagen der elektronischen Schwingungserzeugung 341

15.1 Oszillator (Schwingungserzeuger) ... 341
15.1.1 Rückkopplung als Grundlage der Schwingungserzeugung ... 342
15.1.2 Der richtige Messpunkt an Oszillatoren ... 347
15.1.3 Zusammenfassung zu Oszillatoren ... 347
15.2 Phasenregelkreise (PLL) ... 348
15.2.1 Der Phasenvergleicher ? ... 349
15.2.2 Der Teiler ... 350
15.2.3 Der VCO ... 350
15.2.4 Der Tiefpassfilter ... 351
15.3 Direkte digitale Synthese (DDS) ... 351

16 Sende- und Empfangstechnik 353

16.1 Sendearten, Modulation ... 353
16.1.1 Sendearten und deren Kennzeichnung ... 354
16.1.2 Eigenschaften verschiedener Modulationsarten ... 355
16.1.3 Intermodulation und Kreuzmodulation ... 366

16.1.4 Vertiefung zu Modulationsarten ... 367
16.1.5 Praktische Darstellung von modulierten Signalen ... 368
16.1.6 Morsetelegrafie (CW) ... 369

16.2 Betriebsarten ... 370
16.2.1 Richtungsangaben in der Kommunikation ... 370
16.2.2 Übersicht der Betriebsarten im Amateurfunk ... 371

16.3 Modulator und Demodulator ... 380
16.3.1 Amplitudenmodulation (AM) ... 380
16.3.2 Einseitenband, Single Sideband (SSB) ... 384
16.3.3 Frequenzmodulation (FM) ... 388
16.3.4 Phasenmodulator ... 393

16.4 Die Arbeit mit Blockschaltbildern ... 394

16.5 Die Arbeitsweise von Empfängern ... 396
16.5.1 Digitale Signalverarbeitung in Empfängern und Sendern ... 415
16.5.2 Die Bedienung von Empfängern, Sendern und Funkgeräten ... 415

16.6 Sendetechnik ... 424
16.6.1 Einzelne Senderbaugruppen ... 424
16.6.2 Transverter (»Nachsetzer«) ... 430
16.6.3 (Leistungs-)Verstärker in Sendern ... 431
16.6.4 Details zum SSB-Sender ... 436
16.6.5 Details zum VHF-FM-Sender ... 439
16.6.6 Senderschaltungen mit Transistoren ... 440
16.6.7 Senderschaltungen mit Röhren ... 443
16.6.8 Leistungsmessung ... 444
16.6.9 Leistungsangaben ... 445

16.7 Unerwünschte Aussendungen vermindern ... 446

17 Digitale Sende- und Empfangstechnik ... 451

17.1 Die digitale Darstellung von Signalen ... 451
17.1.1 Digitalisierung analoger Signale ... 451
17.1.2 Analog-Digital-Wandlung ... 454
17.1.3 Digital-Analog-Wandlung ... 456
17.1.4 Über- und Unterabtastung ... 457

17.2 Digitale Signalverarbeitung ... 457
17.2.1 Signale im Zeit- und Frequenzbereich, Spektrum und Wasserfalldiagramm ... 457
17.2.2 Elemente digitaler Signalverarbeitung ... 460

17.3 Die Codierung digitaler Signale (Quellencodierung) ... 464

17.4 Funkübertragung digitaler Signale ... 466

17.4.1 Funkkanäle, Kanalkapazität ... 467

17.4.2 Kanalcodierung ... 470

17.5 Digitale Funkübertragungsverfahren ... 476

17.5.1 Digitale Modulationsverfahren ... 476

17.5.2 Digitale Sendertechnik ... 481

17.5.3 Empfang digitaler Signale ... 482

17.6 Software Defined Radio (SDR) ... 483

17.7 Kanalzugriffsverfahren ... 485

17.8 Glossar zur Digitaltechnik ... 486

18 Antennen 489

18.1 Antennenformen ... 489

18.2 Der Korrekturfaktor (Verkürzungsfaktor) ... 492

18.3 Der Dipol und seine Varianten ... 493

18.3.1 Horizontales und vertikales Strahlungsdiagramm ... 494

18.3.2 Strom- und Spannungsverteilung beim Halbwellendipol ... 495

18.3.3 Außermittig gespeiste Halbwellenantennen ... 497

18.4 Dipol-Weiterentwicklungen: Trapantennen und W3DZZ ... 501

18.4.1 Die W3DZZ-Antenne ... 501

18.4.2 Trapantennen allgemein ... 502

18.5 Die G5RV-Antenne ... 503

18.6 Der Faltdipol ... 504

18.7 Die Delta-Loop (Dreiecksschleife) ... 504

18.8 Die Quadantenne ... 505

18.9 Praxis: Drahtantennen bauen ... 505

18.10 Richtantennen ... 506

18.10.1 Aufbau von Yagi-Antennen ... 507

18.10.2 Details zu Yagi- und Richtantennen ... 507

18.10.3 Parabolspiegelantennen ... 512

18.11 Vertikalantennen und Rundstrahlantennen ... 513

18.12 Praxis: Besondere Antennenformen ... 518

18.12.1 Magnetische Ringantennen ... 518
18.12.2 Aperiodische Antenne: die T2FD (Tilted Terminated Folded Dipole) ... 522
18.13 Verkürzung von Antennen ... 523
18.14 Polarisation von Antennen ... 524
18.15 Installation von Sendeantennen ... 526

19 Übertragungsleitungen 527

19.1 Allgemeines zu Übertragungsleitungen ... 527
19.2 Paralleldrahtleitung ... 528
19.3 Koaxialkabel ... 530
19.3.1 Der Aufbau von Koaxialkabeln ... 530
19.3.2 Berechnung des Wellenwiderstands Z ... 530
19.3.3 Verminderte Ausbreitungsgeschwindigkeit ... 531
19.3.4 Der Verkürzungsfaktor k ... 532
19.3.5 Kabeldämpfung ... 533
19.4 Übersicht über Koaxialkabel ... 536
19.5 Steckverbinder für Koaxialkabel ... 537

20 Stehwellen und Leistungsrückfluss 541

21 Mantelwellen 547

22 Anpassung, Transformation und Symmetrierung 553

22.1 Die ?/4-Leitung ... 553
22.2 Die ?/2-Leitung ... 556
22.3 Symmetrierung ... 557
22.4 Grundschaltungen von Antennenanpassgeräten ... 559

23 Das elektromagnetische Feld 563

23.1 Polarisation von Antennen ... 563

23.2 »Von der Antenne in den Äther« ... 564

23.3 Die Wellenausbreitung der Kurzwelle ... 567

23.3.1 Bodenwellenausbreitung ... 568
23.3.2 Vorgänge in der Ionosphäre ... 568
23.3.3 Sonnenfleckentätigkeit und Ionosphäre ... 569
23.3.4 Partikelstrom, Sonnenwind ... 570
23.3.5 Schichten der Ionosphäre (Übersicht) ... 570
23.3.6 Kritische Frequenz, MUF und Co. im Detail ... 572

23.4 UKW-Ausbreitung ... 577

23.4.1 Normales Ausbreitungsverhalten ... 577
23.4.2 Troposphärische Überreichweiten ... 578
23.4.3 Sporadic-E ... 579
23.4.4 Aurora ... 579
23.4.5 Meteorscatter ... 580
23.4.6 Rainscatter ... 580
23.4.7 Aircraft-Scatter ... 580

24 Leistung und Feldstärke 581

24.1 Effektiv abgestrahlte Leistung am Dipol (ERP) und am isotropen Strahler (EIRP) ... 581

24.2 Errechnung der EIRP aus Sendeleistung und Antennengewinn dBi ... 583

24.3 EIRP/ERP des Rückverhältnisses bei Richtantennen ... 583

24.4 Feldstärkeberechnungen ... 584

24.5 Personenschutz, Berechnung von Schutzabständen ... 585

25 Messungen und Messgeräte 591

25.1 Arten der Messwerke ... 592

25.1.1 Drehspulmesswerke ... 593
25.1.2 Dreheisenmesswerke ... 594
25.1.3 Einbaulagen analoger Messinstrumente ... 595
25.1.4 Digitale Messinstrumente ... 596

25.2 Messbereichserweiterungen ... 597
25.3 Arbeiten mit dem Multimeter/Vielfachmessgerät ... 598
25.4 Widerstandsmessung ... 603
25.5 Empfindlichkeit und Innenwiderstand von Messinstrumenten für Strom- und Spannungsmessungen ... 604
25.6 Die Genauigkeit von Messinstrumenten ... 605
25.7 Details zu Strom- und Spannungsmessungen ... 607
25.7.1 Bestimmung der Eingangsleistung ... 607
25.8 Berücksichtigung des Innenwiderstands der Messgeräte bei Messungen ... 608
25.9 Hilfsschaltungen für Messaufgaben ... 610
25.9.1 Künstliche Antenne (Dummy Load) ... 610
25.9.2 HF-Tastkopf ... 611
25.9.3 Leistungsmesskopf ... 612
25.10 Der Absorptionsfrequenzmesser ... 614
25.11 (Einfacher) Feldstärkeanzeiger ... 615
25.12 Das Dipmeter ... 615
25.13 Das Stehwellenmessgerät (SWR-Meter) ... 618
25.14 Das Oszilloskop ... 621
25.15 Der Frequenzzähler ... 626
25.16 Antennen mit dem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) messen ... 627

26 Störungen und andere Probleme 629

26.1 Störungen des Empfangs ... 629
26.2 Einströmungen ... 631
26.3 Einstrahlungen in Geräte ... 633
26.4 Empfangsstörungen durch Korrosion an Antennenanschlüssen ... 634
26.5 Einstreuungen in das Stromnetz ... 634
26.6 Störungen beim Sendebetrieb vermeiden ... 635
26.7 Vorgehensweise im Störungsfall ... 636
26.7.1 Vorbereitung ... 636

26.7.2 Vorgehen beim Nachbarn ... 636
26.7.3 Zusammenarbeit und ein gutes Verhältnis sind entscheidend ... 637

27 Sicherheit 639

27.1 Gefahren durch Stromschlag ... 639
27.2 Gefahren durch Hochfrequenzeinwirkung ... 639
27.3 Im Notfall ... 640
27.4 Unfallverhütung für Funkamateure ... 641
27.5 Adernkennfarben ... 644
27.6 Die Sicherheit von Antennen ... 645
27.7 Sicherer Amateurfunk im Kraftfahrzeug ... 648

TEIL II Praxis und Projekte

28 SDR-Empfang mit dem SDRplay RSP2pro 653

29 Die Amateurfunkprüfung 661

29.1 Wo wird eine Amateurfunkprüfung abgelegt? ... 661
29.2 Anmeldung zu einer Amateurfunkprüfung ... 661
29.3 Der Ablauf der Amateurfunkprüfung ... 661

30 Nach bestandener Prüfung – Stationsaufbau 663

30.1 Funkgeräte – Typenkunde ... 663
30.1.1 Handfunksprechgeräte ... 663
30.1.2 Portabelfunkgeräte ... 666
30.1.3 Mobilgerät, im Kraftwagen, portabel und als Feststation ... 668
30.1.4 Geräte für den stationären Einsatz ... 670
30.1.5 Zusammenfassung ... 670
30.1.6 Wichtiges Zubehör: Das Netzteil ... 671

30.2 Aufbewahrung und Funkmöbel ... 673

30.3 Die Antennenwahl ... 675

30.3.1 Wenn gar nichts geht 675

30.3.2 Was nehmen? ... 675

30.3.3 Zuleitungen ... 678

30.4 Musteraufbau – die BEMV-Erklärung ... 678

31 Antennenbau für Einsteiger 693

31.1 Projekt: Ein Dipol für das 10-m-Band ... 693

31.1.1 Bauteile ... 693

31.1.2 Berechnung ... 696

31.1.3 Zurichten der Teile ... 696

31.1.4 Erster Aufbau ... 697

31.1.5 Abgleich ... 697

31.2 Drahtantennen richtig spannen ... 700

31.3 Die »magnetische Antenne« – eine Sonderform unter den Antennen ... 701

31.3.1 Materialbedarf ... 701

31.3.2 Maße und Material für den Rahmen ... 701

31.3.3 Abstimmbox (Gehäuse und Kondensator) ... 702

31.3.4 Fernabstimmung ... 704

31.3.5 Koppelschleife ... 707

31.3.6 Aufgebaut! ... 708

31.4 Aufbau von industriell hergestellten Antennen ... 711

31.5 Von Masten und Rotoren ... 712

32 Funkbetrieb außerhalb der eigenen vier Wände 713

32.1 Stromversorgung ... 714

32.1.1 Kabelverbindungen ... 714

32.1.2 Energiequellen ... 716

32.1.3 »Strom verpackt« ... 719

32.1.4 Spannungs- und Strommessgerät im Eigenbau ... 723

32.1.5 Laderegler ... 730

32.1.6 Quellen für den Ladestrom ... 732

32.2 Funkkoffer ... 735
32.3 Antennen für den Portabeleinsatz ... 736

33 Amateurfunk digital 743

33.1 Textbasierte Verfahren ... 744
33.1.1 Funkfernschreiben ... 744
33.1.2 »Weak-Signal«-Modes ... 746
33.2 Digitale Sprachübertragung ... 750
33.2.1 DMR, BrandMeister-Netz, DMR+ ... 752
33.2.2 D-STAR ... 756
33.2.3 C4FM ... 756
33.2.4 FreeDV ... 756
33.2.5 M17 ... 758
33.3 Datenfunk ... 758
33.3.1 Packet Radio ... 758
33.3.2 Das HAMNET ... 759
33.4 Digitale Bild- und Fernsehübertragung ... 760
33.4.1 Digitale Bildübertragung ... 760
33.4.2 Digitales Amateurfunk-Fernsehen ... 760
33.5 Funkgerät und PC verbinden ... 761
33.5.1 Programmierung des Funkgeräts ... 761
33.5.2 Steuerung des Funkgeräts ... 761
33.5.3 Digitaler Funkverkehr mit PC und Funkgerät ... 762

34 Remote-Funkbetrieb 767

34.1 Verbindung der Funkanlage mit dem Netzwerk ... 767
34.2 Remote-Funkbetrieb innerhalb der eigenen Grundstücksgrenze ... 768
34.3 Remote-Funkbetrieb weltweit ... 769

35 Morsen 773

35.1 Morsezeichen 774

35.2 Ablauf einer Morseverbindung 776

35.3 Welche Taste? 779

35.4 Morsen lernen 781

Index 783

Materialien zum Buch

Die amtlichen Fragenkataloge beziehen Sie über die Internetseite der Bundesnetzagentur:

https://www.bundesnetzagentur.de

Viele Informationen bietet zudem das Portal 50 Ohm:

https://50ohm.de/

Die Zuordnung der Buchinhalte mit dem Prüfungsmaterial finden Sie unter:

https://www.rheinwerk-verlag.de/amateurfunk_6297/

Vorwort

Man sieht sie nicht, man spürt sie nicht und man hört sie nicht – und trotzdem existieren die Funkwellen.

Funken – das ist ein altes Wort für drahtlose Kommunikation. Was steckte dahinter? »Naja, da sind so Wellen … die gehen irgendwo hin.«

Wie genau das funktioniert, erfahren Sie hier samt den physikalischen Grundlagen. Sie lernen, wann und warum überhaupt Strom fließt, welche Grundbauteile es gibt und wie man misst. Schließlich erfahren Sie einiges über die Grundlagen des Funkempfangs, der Sendetechnik und der Ausbreitung der Funkwellen. Sie erfahren aber auch einiges über den Amateurfunk.

Der Amateurfunk ist hierzulande die legale Möglichkeit, sich mit Sendetechnik zu befassen und ist eine sehr spannende Beschäftigung. Grund genug, diesen Funkdienst hier aus technischer Sicht ebenso genauer vorzustellen.

In früheren Zeiten nannte man Menschen, die sich in ihrer Freizeit mit Elektronik und Funktechnik befassten, *Radiobastler*. Heute führen diese Tradition die *Maker* fort, sie erkunden die technischen Möglichkeiten der modernen, auch rechnergestützten Elektronik. Funkamateure zählen zu ihnen.

Funkamateure betreiben aktiv Völkerverständigung. Dies geschieht in transparenter Weise. Jedermann darf den Gesprächen der Funkamateure zuhören. Bei den großen, überregionalen Veranstaltungen (z. B. HAM-Radio in Friedrichshafen) treffen sich oftmals die Gesprächspartner, die aus allen Ländern und Kontinenten stammen. Dabei lernt man sich noch besser kennen und schätzen. Im Äther ist es egal, woher jemand stammt und welchen Beruf man ausübt. Hier zählen nicht Alter, Hautfarbe, körperliche Einschränkungen, Geschlecht, sondern vor allem Fairness und freundliches Auftreten. Kommt noch eine kleine Portion technisches Verständnis hinzu, bewegt man sich schon sicher durch die Funkbänder.

Der Amateurfunk fasziniert seit Jahrzehnten die Menschen. Und trotz Handy und Internet ist in letzter Zeit das Interesse an dieser Freizeitbeschäftigung wieder stark gestiegen.

Es hat einen sehr hohen Reiz, »auf Sendung« zu gehen. Und dafür bietet der Amateurfunkdienst weltweit den legalen Rahmen für alle, die dies nicht beruflich dürfen.

Für viele Menschen öffnet die Beschäftigung mit der Funktechnik auch neue berufliche Möglichkeiten. Die im Amateurfunk gewonnenen technischen Kenntnisse helfen in vielen Fachgebieten weiter.

Der gesellschaftliche Stellenwert des Amateurfunks ist je nach Nation unterschiedlich. Es gibt Länder, in denen ist der Amateurfunkdienst mit seinen Teilnehmern

hoch angesehen und in Aufgaben der Daseinsvorsorge fest einbezogen wird. Im Katastrophenfall stellen diese Menschen dann lebenswichtige Nachrichtenverbindungen sicher – wenn Handy und Internet schon längst nicht mehr funktionieren. Auch hierzulande wurde dies von der Politik erkannt und es gibt entsprechende Rahmenvereinbarungen zwischen den Amateurfunkvereinigungen und den Ministerien.

Manche Funkamateure schaffen technische Neuentwicklungen, die später der Allgemeinheit zugutekommen. Das können z. B. neuartige digitale Übertragungsverfahren oder neue Antennenformen sein. Die Menschen hinter diesen Forschungsarbeiten und Erfindungen verfügen oft über viel Herzblut für ihr Projekt. Es gibt sogar die eine oder andere Hochtechnologiefirma, auch hier in Deutschland, die von Funkamateuren geleitet wird.

Sportliche Funkamateure nehmen an Peilwettbewerben teil. Hier müssen die durchtrainierten Läufer gut versteckte Kleinsender (»Füchse«) innerhalb kürzester Zeit im Gelände finden und dazu noch eine mehr oder weniger lange Strecke im Sprint zurücklegen.

Eine weitere Hochleistungsdisziplin bilden Telegrafiemeisterschaften. Hier kommt es auf gute Konzentration an. Rasend schnell gegebene Morsetexte müssen fehlerfrei mitgeschrieben werden.

Das wichtigste aber: Es macht verdammt viel Spaß zu funken! Man kann auf mehr oder weniger hohe Berge steigen und mit seiner kleinen, tragbaren Ausrüstung Kontakte in alle Welt herstellen! Sie können sich im kalten Novembernebel von zuhause aus mit einer Station im brasilianischen Busch über die jeweiligen Lebensumstände austauschen und so Ihre Fremdsprachenkenntnisse wieder reaktivieren! Sie können Antennen und Geräte aufbauen und diesen Erfolg genießen. Mithilfe des Computers kommunizieren Sie per Funk mit der ganzen Welt, und das sogar mit geringen Sendeleistungen und bei schlechter Empfangslage. In ganz besonderen Situationen können Sie sogar Menschenleben retten. Sie können spannende Experimente durchführen und die Gesetze der Physik selbst am Objekt erfahren! All dies gehört zum Amateurfunk - und schafft Freude!

Was dieses Buch leistet

Dieses Buch führt Sie allgemein in die physikalischen und technischen Grundlagen der Funktechnik und des Amateurfunks ein. Dabei werden keine besonderen Vorkenntnisse vorausgesetzt. Sie erfahren, was es alles zu entdecken gibt. Das Buch steht als Bindeglied zwischen den Maker-Publikationen und der weiterführenden Fachliteratur. Zusätzlich soll es auch helfen, Funkamateuren auf dem Weg zur Prüfung zu unterstützen. Und nach der Prüfung geht es um die technischen Details der eigenen Funkstation.

Auch in der 4. Auflage wurden die neuen Inhalte der Amateurfunkprüfungen berücksichtigt, die ab Juni 2024 gelten. Die Digitaltechnik hat schon lange im Amateurfunk ihren festen Platz. Die entsprechenden Beiträge wurden von Prof. Dr. Thomas Lauterbach, DL 1 NAW, erstellt.

Egal, ob Sie nun einfach verstehen möchten, was Funk überhaupt ist, oder das Buch als ergänzende Literatur zur Vorbereitung auf die Amateurfunkprüfung und der Zeit danach nutzen möchten, wünschen wir Ihnen viel Spaß mit der Beschäftigung dieses spannenden Bereichs.

Wir bedanken uns bei allen, die zum Gelingen dieses Werkes beigetragen haben, insbesondere bei Jörg Rippel, DJ 4 WD, Prof. Henrik Schulze, Dr. Matthias Zisler und Simon Braun, DL 6 SZ und Thomas Weller, DK 3 TU.

Harald Zisler, DL 6 RAL
Prof. Dr. **Thomas Lauterbach**, DL 1 NAW,
Freudenberg und Nürnberg, im Januar 2026

Geleitwort des DARC e. V.: Eine faszinierende Welt – der Amateurfunk

Als im frühen 20. Jahrhundert Menschen begannen, sich mit Funktechnik zu beschäftigen, haben sie noch nicht ahnen können, welchen Weg die Menschheit mit den frisch gewonnenen Erkenntnissen einschlagen würde. Die Zeit zeigte, dass die Funktechnik weit mehr ist, als sie nur rein kommerziell anzuwenden. So gab es schon immer Menschen, die auch privat von der Funktechnik in den Bann gezogen waren. Dieses Erbe bewahrt der Amateurfunkdienst bis in die heutige Zeit in einer einzigartigen Form. Grundlage ist das *Amateurfunkgesetz* (AFuG). Dieses Buch unterstreicht die Definition in § 1 Abs. 2. So wird der Amateurfunkdienst von »Funkamateuren untereinander, zu experimentellen und technisch-wissenschaftlichen Studien, zur eigenen Weiterbildung, zur Völkerverständigung und zur Unterstützung von Hilfsaktionen in Not- und Katastrophenfällen wahrgenommen«.

Wir freuen uns daher sehr, dass Harald Zisler mit diesem Buch allen eine hervorragende Hilfestellung bietet, die sich für den Amateurfunk interessieren und Teil unserer Gemeinschaft werden wollen. Er gibt Ihnen nicht nur einen ersten Einblick in die Funkpraxis, sondern geht auch ausführlich auf die technischen Grundlagen ein und vermittelt Ihnen das Wissen, mit dem Sie sich auf die Prüfungen vorbereiten können.

Doch Amateurfunk bietet viel mehr als nur eine rein technische Komponente. So werden Sie beim näheren Hinsehen feststellen, dass es auch eine gesellschaftliche und soziale Komponente gibt. Die Technik? Ganz klar, hier geht es um die Entwicklung und den Betrieb fortschrittlicher Sende- und Empfangstechnik. So waren es Funkamateure, die schon früh auf Software Defined Radio (SDR) gesetzt haben. Neuerdings steht Funkamateuren sogar ein geostationärer Satellit zur Verfügung, der einen Großteil unseres Planeten abdeckt. Große Teile Deutschlands sind zudem von einem breitbandigen Datennetz – dem HAMNET – auf Amateurfunkbasis durchzogen.

Die gesellschaftliche Komponente? Frequenzen sind ein hohes Gut. Ist eine Frequenz belegt, kann sie kein zweites Mal durch einen anderen Anwender oder Funkdienst verwendet werden. Und gerade in der heutigen Zeit, in der Kommunikation in all ihren Facetten förmlich exponentiell an Bedeutung gewinnt, wächst der Druck. Es werden immer mehr Frequenzbereiche für mobile Internetdienste, Inter-Fahrzeugkommunikation oder für künftige Lieferdrohnen-Dienste gebraucht. Für manches Industrieunternehmen sind verfügbare Frequenzen fast schon mit *Liquidität der Zukunft* gleichzusetzen. Nur: Wer schützt die international vereinbarten Amateurfunkfrequenzen vor diesem Bedarf?

Die soziale Komponente? Amateurfunk-Verbindungen geschehen zu einem Großteil zwischen Funkamateuren. Seltener findet eine Kommunikation ausschließlich mit

einer automatisch-arbeitenden Station statt. Hier interagieren letztlich also Menschen. Mehr noch, es sind Menschen mit den gleichen Interessen. Auf der ganzen Welt haben Funkamateure eine eigene Ausbildung und Prüfung durchlaufen, damit sie den Betrieb auf den Amateurfunkfrequenzen aufnehmen können.

Der Amateurfunkdienst ist also weit mehr als nur eine technische, gesellschaftliche und soziale Komponente. *Alle* diese Komponenten bedürfen der Förderung und Unterstützung. Genau hier setzt der Deutsche Amateur-Radio-Club (DARC) e. V. mit seiner Arbeit an.

Einem Funkamateur als »Einzelkämpfer« ist besonders in heutigen Zeiten nicht damit gedient, wenn ihm durch industrielle Interessen seine Arbeitsgrundlage – die Amateurfunkfrequenzen oder zumindest Teilbereiche – abhandenkommen. Der DARC steht dazu in Kontakt mit der Verwaltung, Politik und Militär. Auch auf internationaler Ebene ist der DARC durch Mitgliedschaft in der Internationalen *Amateur Rado Union* (IARU) vernetzt. Oberstes Ziel ist die Erhaltung und sogar Fortentwicklung der Frequenzbereiche, die für den Amateurfunkdienst zur Verfügung stehen. Wurden noch in den 90er Jahren für das 6-m-Band (50 MHz) Betriebsgenehmigungen noch per Losverfahren von der deutschen Fernmeldebehörde unter einigen wenigen Funkamateuren vergeben, so steht das 6-m-Band durch die Lobbyarbeit den Funkamateuren nun stetig zur Verfügung. Weiteres Beispiel gefällig? Stichwort *Standortbescheinigung* – aufwendig und kostspielig zugleich. Uns Funkamateuren wird dank der guten Zusammenarbeit mit Politik und Telekommunikationsbehörde zugestanden, dass wir unsere Feldstärkewerte selbst ermitteln und innerhalb des BEMFV-Verfahrens wissenschaftlich erklären dürfen, um die gesetzlichen Vorgaben einzuhalten – kostenlos!

Der DARC will einzelne Funkamateure aber auch in sozialer Hinsicht unterstützen. Der Deutsche Amateur-Radio-Club gliedert sich in seine 24 Landesverbände (»Distrikte«) und diese wiederum in über 1000 Ortsverbände. Ein Ortsverband ist also sicher auch in Ihrer Nähe. Für gewöhnlich treffen sich die Mitglieder vor Ort, um sich über Neuigkeiten auszutauschen, Fachwissen zu vertiefen oder sich in Vorträgen fortzubilden. Wir bringen Gleichgesinnte zusammen. Und auch der persönliche Eindruck eines Gegenübers lässt nicht selten Freundschaften entstehen, innerhalb derer der Amateurfunkdienst gemeinsam viel mehr Spaß bereitet.

Nur eine Mitgliedschaft im Deutschen Amateur-Radio-Club (DARC) e. V. kann die Gemeinschaft der Funkamateure nachhaltig stärken, damit auch in Zukunft die wichtige Arbeitsgrundlage der Amateurfunkfrequenzen und die Vielfalt der dortigen Gesprächspartner erhalten bleibt. Lassen Sie uns gemeinsam die technische, gesellschaftliche und soziale Komponente des Amateurfunks stärken! 35000 Mitglieder haben sich dafür entschieden – Sie auch?

Deutscher Amateur Radio-Club (DARC) e. V.
www.darc.de

Kapitel 1
Erlebnis Amateurfunk

Hören, Sprechen, Morsen, Schreiben, Löten – das ist die große Welt des Amateurfunks. In diesem Kapitel finden Sie in erster Linie einen sehr kompakten Überblick über den Funkbetrieb. Falls Sie noch keinerlei Berührung mit dem Amateurfunk haben, so hilft dieses Kapitel Ihnen, beim Empfang von Amateurfunkstationen das Gehörte oder zu Lesende zu verstehen. Sollten Sie schon einige Kenntnisse besitzen, überspringen Sie dieses einführende Kapitel einfach.

Die jeweiligen Fernmeldebehörden halten auf ihren Internetseiten weitere Informationen zu gesetzlichen Bestimmungen und gegebenenfalls auch zu Prüfungsinhalten für die Amateurfunkprüfung bereit:

- **Deutschland**: Bundesnetzagentur, *https://www.bundesnetzagentur.de*
- **Österreich**: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), *https://www.bmvit.gv.at*
- **Schweiz**: Bundesamt für Kommunikation BAKOM, *https://www.bakom.admin.ch*

Auch die Amateurfunkvereinigungen DARC (Deutschland), ÖVSV (Österreich) und USKA (Schweiz) informieren interessierte Einsteiger und Einsteigerinnen und helfen ihnen auf dem Weg zum Funkamateur.

Amateurfunklizenz

Für eine aktive Teilnahme am Amateurfunkdienst benötigen Sie in jedem Fall eine amtliche Genehmigung, die *Amateurfunklizenz*.

1.1 Amateurfunk, Freenet, PMR und CB-Funk

Oftmals werden die vier Bereiche Amateurfunk, Freenet, PMR und CB-Funk oberflächlich als »Hobbyfunk« bezeichnet. Doch es gibt erhebliche Unterschiede (siehe Tabelle 1.1). Funkamateure dürfen ihre Geräte selbst bauen oder Industriegeräte entsprechend ihren Wünschen modifizieren. Für die Einhaltung der technischen Vorschriften sind sie selbst verantwortlich, sie sind dazu aber auch in der Lage. Alle anderen »Hobbyfunker« dürfen drauflosfunken, aber keinesfalls ein Gerät verändern, da sonst dessen Zulassung verfällt.

Bereich	Hinweise
Amateurfunk	»Richtiger« Funkdienst (wie auch Seefunk, Flugfunk usw.) im Sinne international gültiger Vorschriften. Zur aktiven Teilnahme (Sendebetrieb) werden das Bestehen des Amateurfunkzeugnisses und die Zuteilung eines weltweit einmaligen Rufzeichens vorausgesetzt. Mithören hingegen darf jeder. Amateurfunksendungen sind »an alle« gerichtet. Funkamateure unterstützen oftmals in Katastrophenfällen die Hilfsorganisationen.
Freenet	Analoger und digitaler Sprechfunk für jedermann nahe 150 MHz. Nur in Deutschland zugelassen. Geräte müssen ein Prüfzeichen tragen, Gebühren fallen nicht an.
PMR	Analoger und digitaler Sprechfunk um 446 MHz für jedermann. Mehr oder weniger europaweit zugelassen, in Deutschland gebührenfrei, Geräte müssen ein Prüfzeichen tragen.
CB-Funk	Analoger Sprechfunk (AM, FM, SSB) sowie digitale Übertragung von Daten im 27-MHz-Bereich für jedermann. Europaweit zugelassen, in Deutschland gebührenfrei, Geräte müssen ein Prüfzeichen tragen.

Tabelle 1.1 Übersicht der Funkmöglichkeiten

1.2 Funken?

»Es blitzt doch gar nicht ...« Zumindest in der heutigen Zeit nicht mehr. Der Begriff stammt aus der Urzeit der Funktechnik, in der man aus kräftigen Funken noch die gewünschte Frequenz herausgefiltert und an die Antenne gegeben hatte.

Heutzutage wird die Information (Sprache, Bilder, Daten ...) mit einem hochfrequenten Signal gemischt. Das Mischsignal wird verstärkt und über die Antenne abgestrahlt. Beim Empfang wird das Trägersignal aus dem Mischsignal wieder entfernt, und übrig bleibt die Information (siehe Abbildung 1.1).

Sie können dieses Prinzip mit dem klassischen Brief vergleichen. Das Briefblatt als solches können Sie nicht versenden, sondern Sie stecken es in einen Briefumschlag. Der Briefumschlag transportiert die Information. Der Empfänger entnimmt das Blatt aus dem Umschlag und kann die Information nun lesen.

Sprache, digitale Informationen, Bilder usw. werden in Form eines *niederfrequenten* Signals (»Tonsignal«) dem Sender zugeführt. Damit wird ein *hochfrequentes* Signal geformt. Diesen Vorgang nennt man *Modulation*.

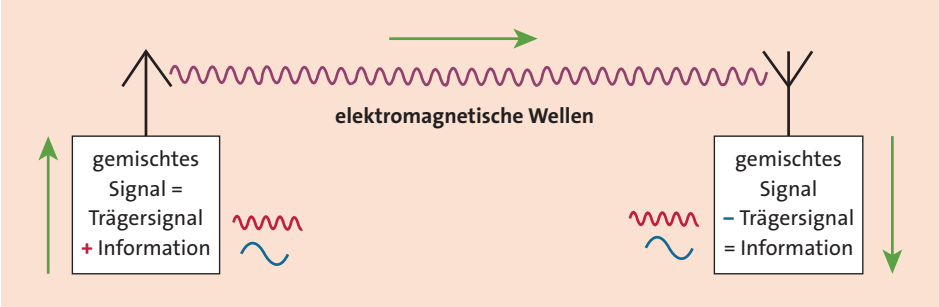


Abbildung 1.1 Das Prinzip der Funkübertragung

Aus der Modulation ergibt sich die Sendeart. Bekannt sind die *Amplitudenmodulation* (AM) für die (noch verbliebenen) Rundfunksender auf Lang-, Mittel- und Kurzwelle und für den Flugfunk. Die Funkamateure verwenden die *Einseitenbandmodulation* (SSB, *Single Sideband*), die für Sprechfunk sehr effektiv ist. Die *Frequenzmodulation* (FM) kennen Sie sicher vom UKW-Radio. Funkamateure verwenden diese gerne für den Nahbereich.

Die Sendearten der digitalen Informationsübertragung ermöglichen weitgehend störungsfreie Übertragungen, auch bei schlechten Ausbreitungsverhältnissen und Störungen.

Das hochfrequente Mischprodukt wird gegebenenfalls noch vervielfacht oder mit einem weiteren Hochfrequenzträger gemischt, bis es die für die Übertragung notwendige *Frequenz* aufweist. Die Frequenz wird in Hertz (Hz, nach Heinrich Hertz) bzw. einem Vielfachen davon (Kilohertz, Megahertz, Gigahertz) angegeben. Eine vollständige Schwingung in einer Sekunde ist ein Hertz!

Abhängig von der Frequenz ist auch die *Wellenlänge*. Diese ist umso kürzer, je höher die Frequenz ist.

Von der Wellenlänge hängen die Baumaße einer Antenne und auch die Ausbreitungsmöglichkeiten der Funkwellen ab. Die Frequenzbereiche werden als *Bänder* bezeichnet. Dabei kann sowohl die Angabe einer Frequenz als auch die Wellenlänge verwendet werden.

Beispiel: Mit »40-m-Band« oder »7-MHz-Band« ist jeweils der gleiche Bereich angesprochen.

1.3 Funkern zugehört

Gleich vorneweg: Jedermann darf den Funkamateuren zuhören, auch ohne Amateurfunklizenz. Die Funker wickeln ihren Funkverkehr in offener Sprache ab. Das ist eine der gesetzlichen Bedingungen, die mehr oder weniger weltweit erfüllt werden müs-

sen. Mit *offener Sprache* ist gemeint, dass die Sprache als solche nicht verschlüsselt wird und der Inhalt der Nachrichten keine geheimen Informationen enthält. Das Gleiche gilt für die Morsetelegrafie und die digitalen Übertragungsverfahren. Letztere können und dürfen ebenso »mitgelesen« werden.

Wenn Sie den Funkamateuren zuhören, gehören Sie damit bereits zur Amateurfunkgemeinde. Sie sind dann ein(e) SWL (*Short Wave Listener*). Damit werden seit vielen Jahrzehnten die »Höramateure« bezeichnet.

Hört man das erste Mal einem Gespräch zwischen Funkern zu, vernimmt man neben den jeweils weltweit einmaligen *Rufzeichen* der Beteiligten geheimnisvoll klingende Abkürzungen. Diese stammen noch aus der Zeit, als es gar keinen oder sehr wenig Sprechfunk gab. Sie wurden aber, da sie international verbindlich und verständlich sind, auch abseits der Morsetelegrafie übernommen. Und so sprechen Funker nicht von einem Funkkontakt, sondern von einem *QSO*. Ein Funker hat einen Standort, den oder das *QTH*. Die Qualität des Empfangs wird der jeweiligen Gegenstelle mittels zwei oder drei Ziffern mitgeteilt (*Rapport*).

1.3.1 Buchstabieren

Besonders für Rufzeichen ist die Verwendung des in den *Radio Regulations* (RR, vormals *VO Funk*) definierten Buchstabieralphabets verbindlich. Dies gilt nicht nur für den Amateurfunkdienst, sondern auch für den Flug- und Seefunk. Tabelle 1.2 zeigt Ihnen das jeweilige Zeichenwort und dessen Aussprache. Damit wird beim Sprechfunk eine internationale Verständigung leichter.

Zeichen	Zeichenwort	Aussprache/Betonung
A	Alfa	AL fah
B	Bravo	BRA vo
C	Charlie	TSCHAR li
D	Delta	DEL ta
E	Echo	ECK o
F	Foxtrott	FOX trott
G	Golf	GOLF

Tabelle 1.2 Das internationale Buchstabieralphabet

Zeichen	Zeichenwort	Aussprache/Betonung
H	Hotel	ho TELL
I	India	IN di ah
J	Juliett	DSCHUH li ETT
K	Kilo	KI lo
L	Lima	LI ma
M	Mike	MEIK
N	November	no WEMM ber
O	Oscar	OSS kar
P	Papa	pa PAH
Q	Quebec	KI beck
R	Romeo	RO mio
S	Sierra	ssi ER rah
T	Tango	TAN go
U	Uniform	JU ni form
V	Victor	WICK tor
W	Whiskey	WISS ki
X	X-Ray	EX reh
Y	Yankee	JENG ki
Z	Zulu	SUH luh

Tabelle 1.2 Das internationale Buchstabieralphabet (Forts.)

Das internationale Buchstabieralphabet verwendet dabei Wörter mit eindeutigem Klangbild, sodass Fehler oder Verwechslungen kaum möglich sind. Trotzdem kommen diese in der Praxis natürlich vor.

1.3.2 Q-Gruppen

Die *Q-Gruppen* (siehe Tabelle 1.3) sind für die »sprachlosen« Sendearten vorgesehen: von der klassischen Morsetelegrafie bis hin zu diversen digitalen Textübertragungen. Für den Sprechfunk *sollen* sie nicht zum Einsatz kommen, in der Praxis werden sie jedoch hin und wieder zu hören sein. Manchmal helfen sie, dass die beteiligten Funker sich bei Sprachproblemen besser verständigen können.

Für den Amateurfunkdienst sind die Q-Gruppen QRA bis QUZ vorgesehen. Sie sind in den Radio Regulations (RR, vormals VO Funk) verbindlich festgeschrieben. Eine Q-Gruppe kann eine Aussage oder, zusammen mit einem Fragezeichen, eine Frage einleiten.

Q-Gruppe	Bedeutung	Q-Gruppe?	Bedeutung
QRA	Der Name meiner Funkstelle ist ...	QRA?	Wie ist der Name Ihrer Funkstelle?
QRB	Die Entfernung zwischen unseren Funkstellen beträgt ca. Kilometer/Meilen/Seemeilen.	QRB?	Wie weit ist Ihre Funkstelle von meiner entfernt?
QRG	Ihre genaue Frequenz/die genaue Frequenz von ... ist kHz bzw. MHz.	QRG?	Bitte teilen Sie mir meine genaue Frequenz/die genaue Frequenz von ... mit.
QRH	Ihre Frequenz schwankt.	QRH?	Schwankt meine Frequenz?
QRI	Der Ton Ihrer Aussendung ist: 1 gut 2 veränderlich 3 schlecht	QRI?	Wie ist der Ton meiner Aussendung?
QRK	Die Verständlichkeit Ihrer Zeichen/der Zeichen von ... ist: 1 schlecht 2 mangelhaft 3 ausreichend 4 gut 5 ausgezeichnet	QRK?	Wie ist die Verständlichkeit meiner Zeichen/der Zeichen von ...?
QRL	Ich bin beschäftigt, bitte nicht stören.	QRL?	Sind Sie beschäftigt?

Tabelle 1.3 Q-Gruppen

Q-Gruppe	Bedeutung	Q-Gruppe?	Bedeutung
QRM	Ich werde gestört/ich werde 1 nicht 2 schwach 3 mäßig 4 stark 5 sehr stark gestört.	QRM?	Werden Sie gestört?
QRN	Ich werde durch atmosphärische Störungen beeinträchtigt/ich werde 1 nicht 2 schwach 3 mäßig 4 stark 5 sehr stark durch atmosphärische Störungen beeinträchtigt.	QRN?	Werden Sie durch atmosphärische Störungen beeinträchtigt?
QRO	Erhöhen Sie die Sendeleistung.	QRO?	Soll ich die Sendeleistung erhöhen?
QRP	Vermindern Sie Ihre Sendeleistung.	QRP?	Soll ich die Sendeleistung vermindern?
QRS	Geben Sie langsamer (... Wörter je Minute).	QRS?	Soll ich langsamer geben?
QRT	Stellen Sie die Übermittlung ein!	QRT?	Soll ich die Übermittlung einstellen?
QRU	Ich habe nichts für Sie (vorliegen).	QRU?	Haben Sie etwas für mich (vorliegen)?
QRV	Ich bin bereit.	QRV?	Sind Sie bereit?
QRX	Ich werde Sie um ... Uhr (auf Frequenz in kHz/MHz) wieder rufen.	QRX?	Wann werden Sie mich wieder rufen?
QRZ	Sie werden von ... (auf ... kHz oder MHz) gerufen.	QRZ?	Von wem werde ich gerufen?

Tabelle 1.3 Q-Gruppen (Forts.)

Q-Gruppe	Bedeutung	Q-Gruppe?	Bedeutung
QSA	Ihre Zeichen/die Zeichen von ... sind 1 kaum 2 schwach 3 ziemlich gut 4 gut 5 sehr gut hörbar.	QSA?	Wie ist die Stärke meiner Zeichen?
QSB	Die Stärke Ihrer Zeichen schwankt.	QSB?	Schwankt die Stärke meiner Zeichen?
QSD	Ihre Zeichen sind verstümmelt!	QSD?	Sind meine Zeichen verstümmelt?
QSK	Ich kann zwischen meinen Zeichen hören, Sie dürfen mich während meiner Übermittlung unterbrechen.	QSK?	Können Sie mich zwischen Ihren Zeichen hören? Wenn ja, darf ich Sie unterbrechen?
QSL	Ich gebe Ihnen Empfangsbestätigung.	QSL?	Können Sie mir Empfangsbestätigung geben?
QSO	Ich kann mit ... unmittelbar (oder durch Vermittlung von ...) verkehren.	QSO?	Können Sie mit ... unmittelbar (oder durch Vermittlung von ....) verkehren?
QSP	Ich werde an ... vermitteln.	QSP?	Wollen Sie an ... vermitteln?
QSV	Senden Sie eine Reihe V auf dieser Frequenz (oder auf ... kHz/MHz).	QSV?	Soll ich eine Reihe V auf dieser Frequenz (oder auf ... kHz/MHz) senden?
QSX	Ich höre ... (Name/Rufzeichen) auf (Frequenz/Kanal/Band).	QSX?	Wollen Sie (Name/Rufzeichen) auf (Frequenz/Kanal/Band) hören?
QSY	Gehen Sie zum Senden auf eine andere Frequenz über (oder auf ... kHz/MHz).	QSY?	Soll ich zum Senden auf eine andere Frequenz übergehen?

Tabelle 1.3 Q-Gruppen (Forts.)

Q-Gruppe	Bedeutung	Q-Gruppe?	Bedeutung
QTC	Ich habe ... Meldungen für Sie/für ...	QTC?	Wie viele Meldungen haben Sie für mich?
QTF	Ihre Position war nach den Peilungen meiner Funkstellen ... (Lage/evtl. mit Uhrzeit).	QTF?	Wollen Sie mir meine Position nach den Peilungen Ihrer Funkstellen angeben?
QTH	Mein Standort ist ... (Ort/Locator/Breite + Länge)	QTH?	Welches ist Ihr Standort (Ort/Locator/Breite + Länge)?
QTR	Es ist genau ... Uhr (Zeitzone).	QTR?	Welches ist die genaue Uhrzeit?

Tabelle 1.3 Q-Gruppen (Forts.)

Q-Gruppen im Alltag

Einige Q-Gruppen werden, obwohl sie eigentlich der Morsetelegrafie und weiteren diversen analogen und digitalen Textübertragungen vorbehalten sind, im Sprechfunk und ganz allgemein auch in persönlichen Gesprächen verwendet:

- **QSL**: Hier wird oft auf die QSL-Karte Bezug genommen, mit der eine Funkverbindung schriftlich oder elektronisch bestätigt wird.
- **QRP**: Wird im Zusammenhang mit Funkgeräten verwendet, die mit 5 Watt Senderausgangsleistung in Telegrafie oder 10 Watt in SSB oder weniger senden. Hier tummeln sich Selbstbauer, Funker mit tragbaren Geräten auf Bergen oder auf hoher See sowie Minimalisten.
- **QRL**: Hier wird, oft in Morsezeichen, gefragt, ob eine vermeintlich freie Frequenz wirklich auch frei ist, bevor man mit einem (allgemeinen) Anruf beginnt. Gilt aber auch als Synonym für den Arbeitsplatz.
- **QSY**: Selten wird hier eine vollständige Frequenzangabe verwendet, gebräuchlich ist bei schwierigen Situationen die Angabe (meist in kHz) der Abweichung von der aktuellen Arbeitsfrequenz, z. B. »QSY 20 up«.

Einige Q-Gruppen sind notwendig, um Sende- und Empfangssituationen besser beurteilen zu können oder zu verbessern:

- **QSD**: Für Selbstbauer und Restaurateure von historischen Funkgeräten ist diese Frage oder der Hinweis darauf von Bedeutung. Schließlich soll der Sender ein möglichst kristallklares, unzerhacktes Signal liefern.

- **QSB**: Schwankt das Signal, kann es notwendig sein, die Funkverbindung noch »anständig und geregelt« fertig abzuwickeln. Schwankende Signale treten auf Kurzwelle durch verschiedene physikalische Phänomene oft auf, aber beispielsweise auch beim Funkbetrieb von Fahrzeugen aus.
- **QSV**: Eine Reihe »V«, die per Morsetelegrafie gegeben wird, hilft dem Gegenüber, seinen Empfänger besser abzustimmen oder gegebenenfalls eine Richtantenne passend auszurichten. Beim Senden kann man die Arbeitsweise des Funkgeräts und der Antenne samt Zubehör damit überprüfen.

1.3.3 Weitere betriebliche Abkürzungen

Es gibt noch eine große Anzahl betrieblicher Abkürzungen außerhalb der Q-Gruppen. Diese entstanden in der Zeit, in der die Morsetelegrafie (nun Weltkulturerbe!) noch die vorherrschende Art der Kommunikation war. Tabelle 1.4 zeigt einige gebräuchliche Abkürzungen, wie sie z. B. auch bei der Gerätebedienung auftauchen können.

Abkürzung	Bedeutung
ANT	Antenne
RX	Empfänger, Empfang
TX	Sender, Sendung
TRX	Transceiver, Sendeempfänger, Funkgerät
PWR	Power, Leistung
AF	Audiofrequenz (meist Lautstärkeregler)
RF	Radiofrequenz (Verstärker, regelt die Hochfrequenzverstärkung eines Empfängers.)
ATT	Attenuator, Abschwächer (Der Empfänger wird unempfindlicher, Störungen durch zu viele starke Signale gehen zurück.)
GND	Erdung
PSE	Bitte
TNX	Danke

Tabelle 1.4 Auswahl von Abkürzungen

1.3.4 Rufzeichen

Anhand des Rufzeichens erkennen Sie das Heimatland der Amateurfunkstation. Die Rufzeichen gliedern sich in den *Landeskenner*, gefolgt von mindestens einer Zahl und dem Suffix. Die Landeskenner sind weltweit festgeschrieben. Für Deutschland beginnen die Rufzeichen mit DA, DB, DC, DD, DF, DG, DH, DJ, DK, DL, DM, DN und DO. DP steht für exterritoriale Stationen, z. B. Forschungseinrichtungen in der Antarktis.

Die Nachbarländer im Uhrzeigersinn:

- HB9: Schweiz
- F: Frankreich
- LX: Luxemburg
- ON: Belgien
- PA: Niederlande
- OZ: Dänemark
- SP: Polen
- OK: Tschechien
- OE: Österreich

1.3.5 Was hört man?

Begegnen sich zwei »fremde« Stationsbetreiber auf einem Funkband, tauschen diese zumindest ihre Vornamen, Standorte, Empfangsrapporte, Hinweise auf die verwendete Station und Antenne und Vereinszugehörigkeit aus. Natürlich kann daraus auch hier ein längeres Gespräch mit Allerweltsthemen entstehen, wie es zwischen Funkern, die sich (persönlich) kennen, oder in den »Klönrunden« geschieht. In diesen Runden treffen sich meist die gleichen Menschen, um sich auszutauschen. Einige davon setzen auf Gemeinsamkeiten der Teilnehmer: Camper, Bergsteiger, Segler, Mitarbeiter von Großunternehmen oder sogar Geistliche.

Empfangen Sie die Teilnehmer eines Funkwettbewerbs, hören Sie recht knappe, hektisch ablaufende Verbindungen. Rufzeichen, Rapport und Punkte, vielleicht noch den Namen oder ein weiteres, im jeweiligen *Contest* gefordertes Detail werden übermittelt – und schon wird wieder die nächste Station gerufen. In diesen Wettbewerben kommt es meist darauf an, so viele Stationen wie möglich zu erreichen. Welche Gegenstellen interessant sind, regelt die jeweilige Contestausschreibung. Mal geht es um Stationen mit geringer Sendeleistung (*QRP*), mal um Leuchttürme, Inseln, Berge, Regionen, Städte, Jubiläen oder andere Anlässe. Jedenfalls sind Contests eine gute Übung für Ausdauer, Genauigkeit und vor allem für Notfunksituationen.

Funkamateure kommunizieren aber auch mit modernster Digitaltechnik. Sie beherrschen Übertragungsverfahren mittels schwächster Signale, die man selbst aus dem

Rauschen nicht mehr wahrnimmt, wohl aber der Computer. Zudem führen verschiedene Arten digitaler Sprachübertragung zu neuen Verbindungsmöglichkeiten.

1.4 Funkübertragung

Vor dem ersten Empfangserlebnis benötigen Sie Informationen darüber, wo Sie im ganzen Wellensalat die Aussendungen der Funkamateure finden.

Die Amateurfunkbereiche sind international zugewiesen. Zudem gibt es verschiedene Übertragungsverfahren (Sendeart, *Mode*) für Sprache und Daten. Auch dies müssen Sie bei Ihren Empfangsversuchen berücksichtigen. Tabelle 1.5 zeigt Ihnen eine Auswahl der am meisten verwendeten analogen Sendearten.

Sendeart	Hinweise
Sprechfunk: AM	*Amplitudenmodulation*, im Amateurfunk nicht mehr gebräuchlich
Sprechfunk: FM	*Frequenzmodulation*, ab dem 10-m-Band
Sprechfunk: SSB/LSB/USB	Einseitenbandmodulation (*Single Sideband/Lower Sideband/Upper Sideband*), effektive Sendeart, auf fast allen Bändern eingesetzt
Morsen: CW	Morsetelegrafie (*Continuous Wave*), ein Weltkulturerbe

Tabelle 1.5 Einige im Amateurfunkdienst verwendete analoge Sendearten

Die Modulationsart *AM* wird noch vom Flug- und CB-Funk sowie den Rundfunksendern (Lang-, Mittel- und Kurzwelle) verwendet.

Bei *FM* ist hier die Schmalbandversion gemeint. Breitbandiges FM senden die UKW-Rundfunksender. Für den Sprechfunk aber werden keine Stereokanäle benötigt. Im Gegensatz zu AM wird bei FM der Frequenzversatz des Signals durch die Sprache bestimmt. Der Empfänger benötigt einen entsprechenden Demodulator. FM wird im Sprechfunk auch vom Betriebsfunk, (immer noch) von Rettungsdiensten und »Organisationen mit Sicherheitsaufgaben« genutzt. Auch der CB-Funk und die anderen lizenzfreien Anwendungen (Freenet, PMR und LPD) verwenden FM.

Bei *SSB* (*Single Sideband*) wird dem AM-Signal der Träger und ein Seitenband genommen. Dies bedeutet bei gleicher Sendeleistung die (rechnerisch) vierfache Reichweite. Das dadurch schmalbandigere Signal ist damit auch über große Entfernungen meist noch gut hörbar. Beim Senden wird erheblich an Energie eingespart. Die Stromaufnahme ist direkt von der Sprache oder dem anderen eingespeisten Signal abhängig.

Bis 10 MHz wird das untere Seitenband (*Lower Sideband*, *LSB*), bei Frequenzen darüber das obere (*Upper Sideband*, *USB*) abgestrahlt. Wenn Sie das erste Mal diese Signale hören, werden Sie vielleicht durch die »Micky-Maus-Stimmen« irritiert sein. Stimmen Sie in ganz feinen Schritten ab, bis die Stimme natürlich klingt.

CW (Morsetelegrafie) gehört mittlerweile zum Weltkulturerbe. Seit 2003 ist die Pflicht zur Morseprüfung im Amateurfunk entfallen. Viele Funkamateure benutzen diese technisch sehr einfache Sendeart weiterhin; auch für diverse militärische Dienste wird sie verwendet. CW hat den Vorteil, auch bei sehr geringen Sendeleistungen eine brauchbare Reichweite zu erzielen. Zudem lassen sich die Sendungen auch bei einer Vielzahl atmosphärischer und technischer Empfangsstörungen immer noch mitschreiben.

Für die Wiedergabe von digitalen Aussendungen der Funkamateure benötigen Sie zusätzlich zum Empfänger einen PC (Linux, macOS, Windows) mit einem entsprechenden Programm, wie z. B. dem Paket WSJT. Damit nehmen Sie dann auch Stationen wahr, die für das menschliche Ohr bereits »unter der Grasnarbe« liegen. Allerdings bedeutet dies für Sie zunächst zusätzliche Einarbeitung in die Bedienung und auch in die betrieblichen Abkürzungen, um das Gelesene zu verstehen. Darüber hinaus lassen sich auch die Faxsendungen und klassisches Funkfernschreiben der Funkamateure mit digitalen Hilfsmitteln mitlesen.

Grundbegriffe der Übertragungstechnik

Modulationsart: Beschreibt die Art und Beschaffenheit des gesendeten Signals; Beispiel: Amplitudenmodulation (AM), bei der die Amplitude des Trägersignals entsprechend der Information variiert wird.

Sendeart: Bezeichnung gemäß den Radio Regulations, ein internationales Abkommen, das die Verwendung des Funkspektrums regelt; Beispiel: A1A für Morsetelegrafie

Betriebsart: Bezeichnet eine Funkanwendung; Beispiel: Morsetelegrafie (CW), digitale Zeichenübertragung (FT8, PSK31 ...), jede Betriebsart hat spezifische Regeln und Verfahren für die Kommunikation

Die Sendearten werden gemäß *APPENDIX 1 (REV.WRC-19), Classification of emissions and necessary bandwitdths*, der Radio Regulations mit einem Code gekennzeichnet. Die ersten vier der neun Stellen beschreiben die Bandbreite, die nächsten drei Stellen kennzeichnen die Sendeart als solche, und die restlichen Stellen definieren weitere Einzelheiten des Signals.

Für den Amateurfunk genügen die Stellen 5 bis 7.

Tabelle 1.6 zeigt Ihnen den Aufbau des Sendearten-Schlüssels.

Modulationsart	Code	Signalart für Modulation des Hauptträgers	Code	Übertragene Informationen, Betriebsart	Code
unmodulierter Träger	N	kein moduliertes Signal	0	keine Information	N
Zweiseitenband-Amplitudenmodulation	A	ein Kanal mit quantigitalisierter Information ohne modulierten Hilfsträger	1	Morsetelegrafie (CW)	A
Restseitenband	C	ein Kanal mit quantisierter oder digitaler Information mit moduliertem Hilfsträger	2	Funkfernschreiben (RTTY)	B
Einseitenband (SSB)	J	ein Kanal mit analoger Information	3	Faksimile (FAX)	C
Frequenzmodulation	F			Datenübertragung, auch Fernsteuerung	D
Pulsmodulation	P			Sprechfunk	E
				Fernseh- und Videoübertragung	F

Tabelle 1.6 Bezeichnung von Aussendungen, Sendearten

Der Bandbreitenbedarf steigt in der Regel auch mit der Menge der übertragenen Information. Tabelle 1.7 gibt Ihnen einen Überblick über die wichtigsten Betriebsarten und die typischen Bandbreiten.

Betriebsart	Sendeart	Typ. Bandbreite
CW (Morsen)	A1A	bis 500 Hz
SSB-Sprechfunk	J3E	2.400 Hz
FM-Sprechfunk	F3E	12 kHz

Tabelle 1.7 Bandbreitenbedarf ausgewählter Betriebsarten

Betriebsart	Sendeart	Typ. Bandbreite
FT-8-Datenübertragung	J3D	50 Hz
AM-Sprechfunk	A3E	5 kHz

Tabelle 1.7 Bandbreitenbedarf ausgewählter Betriebsarten (Forts.)

Für die Bandpläne, die von den Dachverbänden der Amateurfunkvereinigungen aufgestellt werden, werden einige Betriebsarten unter dem Begriff *MGM* (*Machine Generated Mode*) zusammengefasst (siehe Tabelle 1.8).

Betriebsartkürzel	Betriebsart
SSTV	Slow Scan Television (Standbildübertragung)
AMTOR	Amateur Teleprinting over Radio
PACTOR	Packet Teleprinting over Radio
PSK	Phase Shift Keying
RTTY	Radio Teletyping

Tabelle 1.8 Einige MGM-Betriebsarten

Die dem Amateurfunkdienst international zugewiesenen Frequenzabschnitte (Bänder) sind in verschiedene Nutzungsbereiche unterteilt. Die jeweilige Bandbreite der Sendeart ist dabei das Kriterium. So liegt am unteren Bereich stets der Telegrafiebereich (CW), gefolgt von anderen Sendearten, die keine Sprache übertragen. Anschließend folgt bei fast allen Bändern SSB, beim 10-m-Band gibt es am oberen Ende noch einen Bereich für FM. Alle Bänder im UKW- und UHF-Bereich unterliegen der gleichen Systematik.

Die Amateurfunkbänder verfügen über unterschiedliche Ausbreitungsbedingungen. Wellenlänge, Sonnentätigkeit, Wetter und auch die Tageszeit entscheiden bei einigen Bereichen darüber, ob es hier etwas zu hören gibt.

In Tabelle 1.9 finden Sie einige Frequenzbereiche des Amateurfunks aufgelistet. Dabei handelt es sich um Bereiche, auf denen unabhängig von den Ausbreitungsbedingungen immer mit Empfang zu rechnen ist.

Band	Frequenzbereich	Hörbarkeit
80 m	3,500–3,800 MHz	überwiegend nachts, Europa, zum Teil weltweit
40 m	7,000–7,200 MHz	ganztägig, Europa und weltweit
20 m	14,000–14,350 MHz	fast ganztägig, Europa und weltweit
2 m	144,000–146,000 MHz	ganztägig, Deutschland, gegebenenfalls Nachbarländer
70 cm	430,000–440,000 MHz	ganztägig, Deutschland, gegebenenfalls Nachbarländer

Tabelle 1.9 Frequenzbereiche im Amateurfunk

1.5 Amateurfunk mithören

In die Welt des Amateurfunks können Sie einfach durch Mithören des Funkverkehrs hineinschnuppern. Anschließend können Sie vielleicht einige Funker in Ihrem Umkreis kennenlernen, um dann irgendwann zu entscheiden, ob Sie vielleicht auch einmal senden möchten.

1.5.1 SDR-Empfang per Internet

So einfach mal »reinhören« funktioniert auch über das Internet. Moderne digitale Empfänger (*Software Defined Radio*, *SDR*) lassen sich auch an IP-Netzwerke anschließen und darüber fernsteuern. Eine entsprechende Abfrage bei der Internet-Suchmaschine Ihrer Wahl wird Ihnen viele Ergebnisse bringen. Auch *http://www.websdr.org/* ist eine gute Anlaufadresse zu diesem Thema.

Einen bekannten Vertreter hiervon finden Sie unter *http://websdr.ewi.utwente.nl:8901* (für mobile Geräte unter *http://websdr.ewi.utwente.nl:8901/m.html*). Diese Empfangseinrichtung wird vom Verein der *Experimentele Telecommunicatie Groep Drienerlo* (ETGD) betrieben. Die Mitglieder kommen aus der Studentenschaft und den Mitarbeitern der Universität Twente und beschäftigen sich mit Elektronik und Amateurfunk. Mehr darüber finden Sie unter *http://www.etgd.utwente.nl/*.

Um das Webinterface des Empfängers bedienen zu können, benötigen Sie anfangs ein klein wenig Grundwissen.

Die Oberfläche ist trotz aller Funktionalität nur mit den notwendigsten Schaltflächen und Anzeigen ausgestattet. In Abbildung 1.2 ist schon der gesamte Bildschirm dargestellt.

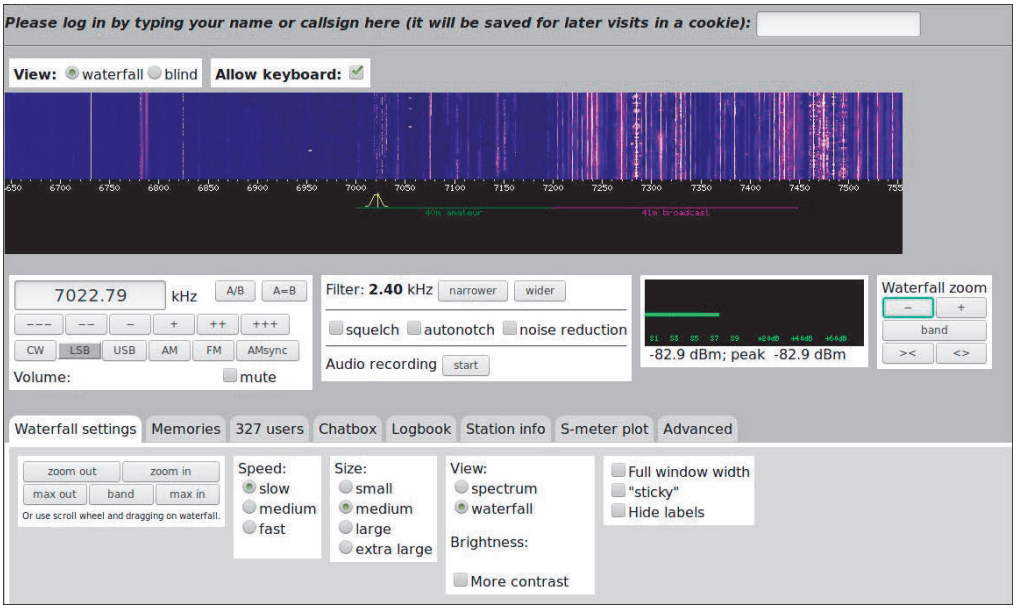


Abbildung 1.2 Die Bedienoberfläche des Web-SDR der Universität Twente

Wenn Sie im oberen Maskenbereich den Haken bei ALLOW KEYBOARD setzen, können Sie die Oberfläche auch bequem per Tastatur bedienen. Die einzelnen Tastaturbefehle finden Sie in Tabelle 1.10.

Funktion	Taste(n)
Frequenz abstimmen, ab/auf Schrittweite 0,1 kHz	j / k oder ← / →
Frequenz abstimmen, ab/auf Schrittweite 0,5 kHz	⇧ + ← / ⇧ + → oder ⇧ + j / ⇧ + k
Frequenz abstimmen, ab/auf Schrittweite 2,5 kHz	Strg + ← / Strg + → oder Strg + j / Strg + k
Sendeart: USB, LSB, CW, AM, FM	u, l, c, ⇧, f
Filterbandbreite weiter/schmaler	W / w
Wasserfallanzeige ein- und auszoomen	z / Z
Wasserfallanzeige zentrieren	Strg + z
Frequenz manuell eingeben	g

Tabelle 1.10 Tastaturbefehle für die Bedienoberfläche des Web-SDR der Uni Twente

Funktion	Taste(n)
Stummschalten	m
Lautstärke mehr/weniger	V / v

Tabelle 1.10 Tastaturbefehle für die Bedienoberfläche des Web-SDR der Uni Twente (Forts.)

Klicken Sie in das Wasserfalldiagramm, und setzen Sie damit die Empfangsfrequenz. Mit dem Mausrad können Sie nun abstimmen. Alternativ geben Sie zunächst eine Frequenz manuell ein, die in einem von Ihnen gewünschten Bereich liegt. Dazu klicken Sie in das Feld mit der Frequenzangabe und geben den Wert in Kilohertz (kHz) ein, z. B. 7100 kHz. Zudem können Sie, wenn wie vorhin beschrieben der Haken gesetzt wurde, mit der Tastatur abstimmen. Für das Beispiel wählen Sie unter der Frequenzeingabe LSB für die Sendeart.

Abbildung 1.3 zeigt den entsprechenden Funktionsblock der Maske im Detail.

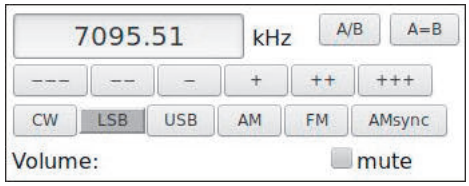


Abbildung 1.3 Einstellungen von Frequenz und Sendeart

Das Wasserfalldiagramm (siehe Abbildung 1.4) zeigt Ihnen die Belegung des dargestellten Frequenzraums. Mehr oder weniger breite Balken stellen die Signale dar. Morsefunk erkennen Sie dabei mit bloßem Auge: Punkte und Striche ziehen in einer Linie von unten nach oben. Der gelbe »Bügel« unterhalb der Frequenzleiste zeigt Ihnen, was der Empfänger aktuell wiedergibt. Zusätzlich werden Amateurfunkbänder durch eine grüne Linie, Rundfunkbänder durch eine violette Linie gekennzeichnet.

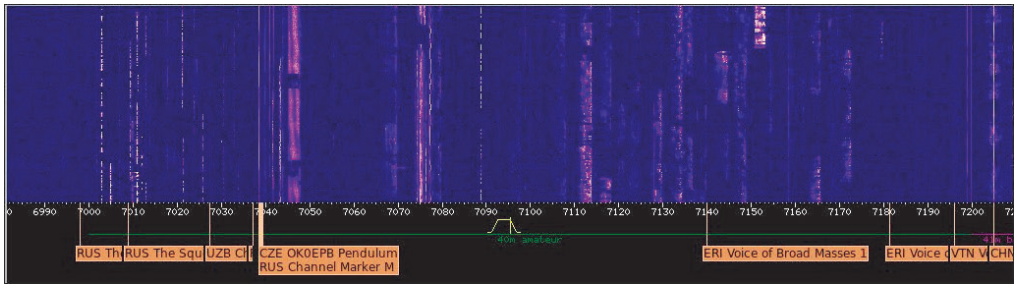


Abbildung 1.4 Wasserfalldiagramm mit Labels. Beachten Sie das Morsesignal am linken Rand!

Der Funktionsblock WATERFALL ZOOM bietet verschiedene Justiermöglichkeiten für die Darstellung. Der Zoomfaktor lässt sich in Stufen mit der Schaltfläche + vergrößern und mit – verkleinern. Wenn Sie auf BAND klicken, ist die Darstellung auf das jeweilige Amateur- oder Rundfunkband begrenzt, in dem sich die aktuelle Empfangsfrequenz befindet. Den kompletten, vom Empfänger nutzbaren Frequenzbereich erhalten Sie durch Klick auf ><. Die Umschaltung auf die feinstmögliche Auflösung funktioniert mit der Schaltfläche <>.

Abbildung 1.5 zeigt den Funktionsblock im Detail.

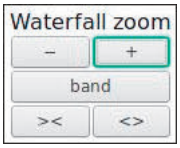


Abbildung 1.5 Einstellungen für das Wasserfalldiagramm (Darstellungsgrenzen)

Im unteren Bildbereich (siehe Abbildung 1.6) können Sie diese Einstellung ebenso vornehmen. Darüber hinaus können Sie hier die Laufgeschwindigkeit des Wasserfalldiagramms und dessen Größe festlegen sowie die Darstellung umstellen.

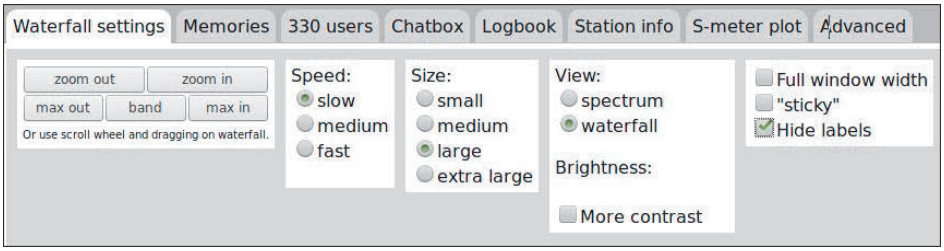


Abbildung 1.6 Weitere Einstellmöglichkeiten

Als Alternative können Sie sich den Frequenzbereich in der Spektrumansicht anzeigen lassen. Hier erkennen Sie leichter schwache und starke Signale (siehe Abbildung 1.7).

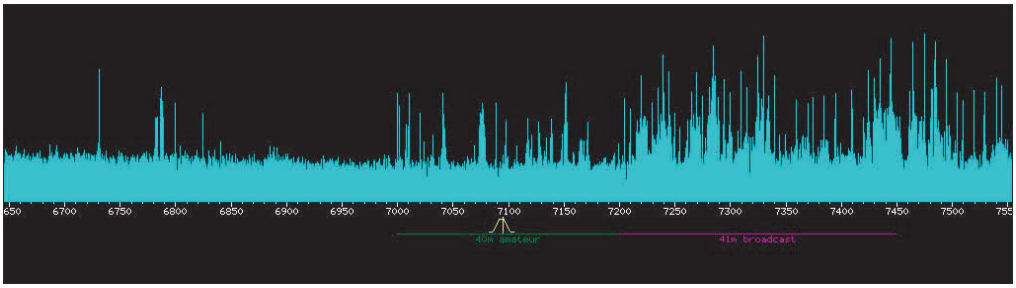


Abbildung 1.7 Spektrumanzeige anstelle des Wasserfalldiagramms

Rechts finden Sie außerdem die Funktion HIDE LABELS. Ist die Darstellung fein genug, werden bekannte Stationen mit ihrem Namen eingeblendet. Stört dies, setzen Sie dort den Haken.

Bei starker Bandbelegung kommt es zu Störungen des Empfangs. Im Filterblock der Bedienoberfläche des Web-SDRs können Sie den Filter schmaler oder breiter setzen. Außerdem können Sie eine Rauschsperre ein- und ausschalten, Pfeifgeräusche unterdrücken und das Rauschen reduzieren. Darüber hinaus ist hier der Audiorecorder für Mitschnitte untergebracht. In Abbildung 1.8 finden Sie diese Bedienelemente dargestellt.



Abbildung 1.8 Einstellungen für Bandbreite und Störungsausblendung

Die Feldstärke der empfangenen Stationen wird am S-Meter angezeigt. Dieses hier verfügt über einen quasianalogen Laufbalken. Sie sehen außerdem den aktuellen und den Spitzenwert in dBm angegeben. Abbildung 1.9 zeigt Ihnen diese Feldstärkeanzeige.

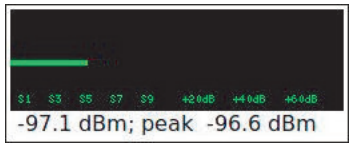


Abbildung 1.9 S-Meter

Für die Nutzung mit Smartphones gibt es eine abgespeckte Mobilversion. Diese enthält alles, was für den Empfangsbetrieb auf kleinen Displays notwendig ist. Die Frequenz stellen Sie dadurch ein, dass Sie das Wasserfalldiagramm unter dem gelben Filtersymbol verschieben. Die Frequenz können Sie auch in das dafür vorgesehene Feld eingeben. Die Sendeart wählen Sie im danebenliegenden Dropdown-Menü. In Abbildung 1.10 sehen Sie die gesamte Oberfläche.

Unter *http://www.websdr.org/* finden Sie weitere, über die ganze Welt verteilte Web-SDR-Empfänger.

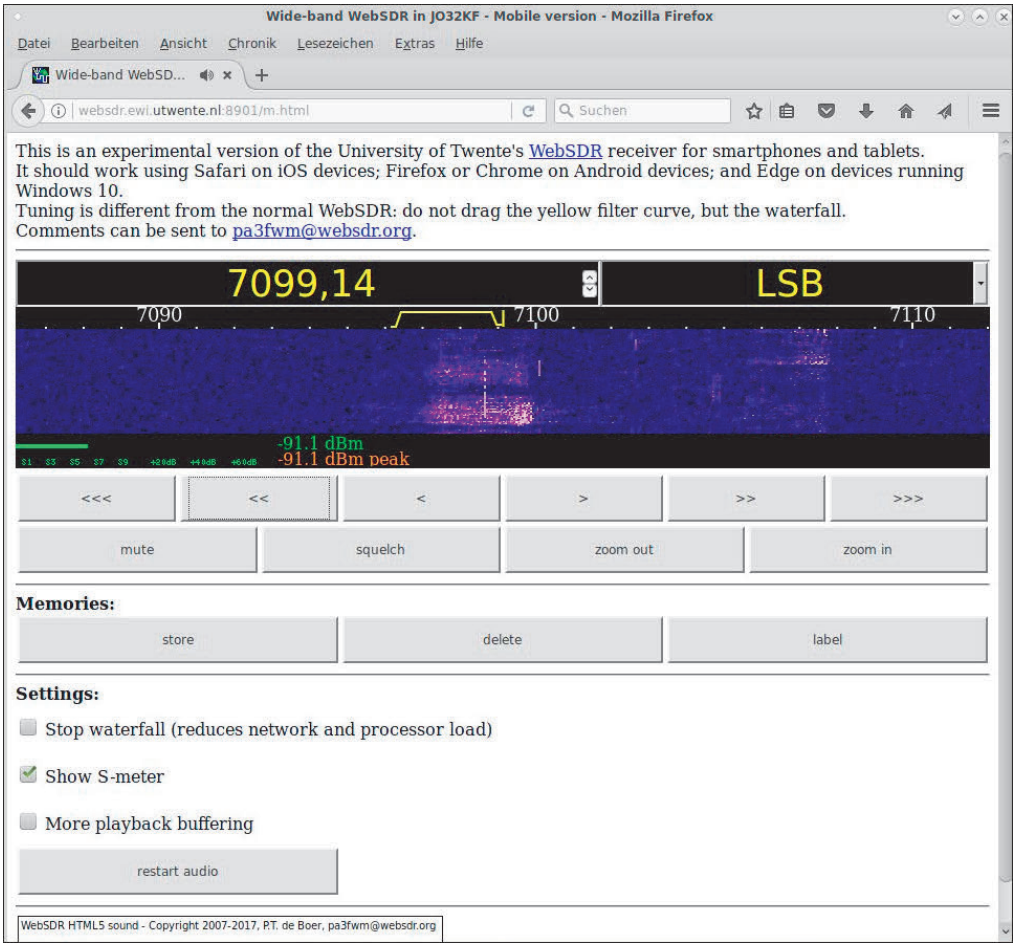


Abbildung 1.10 Vereinfachte Web-SDR-Oberfläche für mobile Geräte

1.5.2 SDR-Empfänger am PC

Die meisten SDR-Empfänger gibt es als USB-Geräte. Achten Sie beim Kauf darauf, dass das Betriebssystem Ihres Rechners diesen entsprechend unterstützt. Sie erhalten kleine USB-Sticks, meist mit dem RTL-Chipsatz. Diese werden von allen Betriebssystemen erkannt, und es gibt viele Programme für den Amateurfunkempfang.

Im mittleren Preissegment finden Sie z. B. die Geräte von SDRPlay. Diese verfügen über einen größeren Frequenzbereich, eine höhere Empfindlichkeit, und Sie können bei manchen Modellen mehrere Antennenanschlüsse nutzen.

Programme für den SDR-Empfang liegen solchen Geräte bei, bzw. Sie finden sie im Internet.

Und wenn der Amateurfunkempfang einmal keinen Spaß macht, können Sie damit UKW- oder DAB+-Radio hören!

Es gibt verschiedene SDR-Programme. Abbildung 1.11 zeigt den Arbeitsbildschirm von *Gqrx*. Eingestellt ist das 70-cm-Amateurfunkband. Die Bedienung ähnelt der eines Web-SDRs.

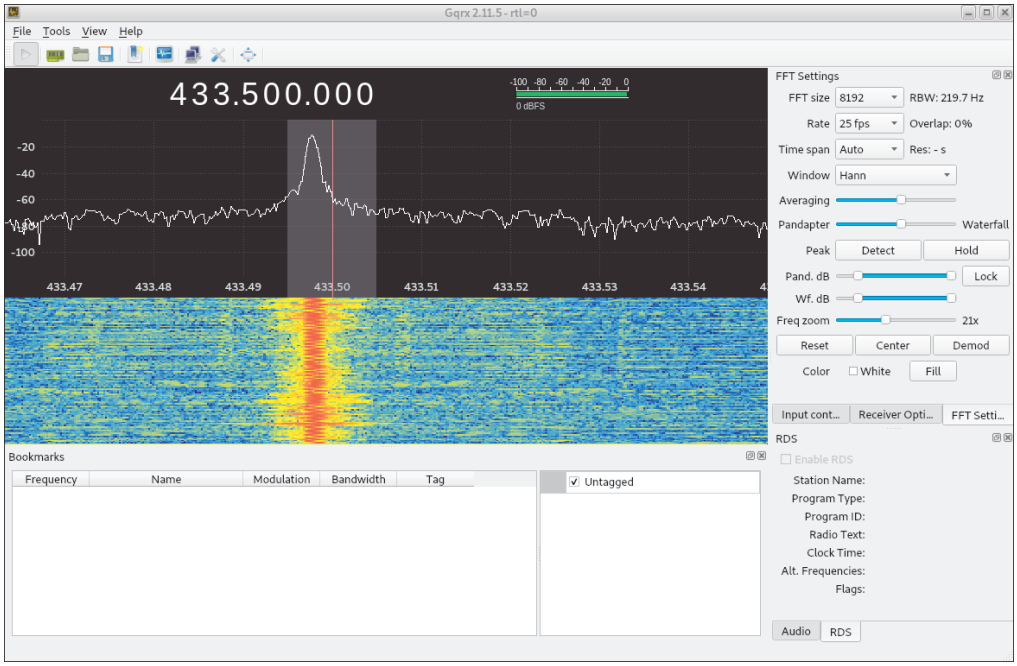


Abbildung 1.11 Das SDR-Programm Gqrx

1.5.3 Klassische Empfangsgeräte

Reine Empfangsgeräte sind in verschiedenen Bauformen sowohl neu als auch gebraucht erhältlich.

Im Vergleich zu der PC-gekoppelten SDR-Lösung haben Sie ein Gerät mit Schaltern und Knöpfen, das Sie nach kurzer Zeit intuitiv bedienen können.

Im Format von Handfunkgeräten erhalten Sie Empfänger, die oftmals als *Funkscanner* bezeichnet werden. Sie arbeiten meist mit vorher einstellbaren Festfrequenzen. Sie empfangen damit die höherfrequenten Amateurfunkbänder ab 144 MHz. Die »Kanäle« programmieren Sie mit den Frequenzen der Relaisfunkstellen und auch Frequenzen für den Direktbetrieb, auf denen Funkamateure miteinander kommunizieren können, ohne ein Relais zu nutzen. Teurere Modelle ermöglichen auch einen Empfang des Kurzwellenbereichs, wenngleich man hier nicht zu große Ansprüche an die Empfangsqualität stellen sollte.

Auf Flohmärkten finden Sie oft Kurzwellenempfangsgeräte, die in den letzten 25 Jahren produziert wurden (die Hersteller sind meist Yaesu, JRC, Kenwood oder Icom). Wenn diese Geräte in gutem Zustand sind, steht einem Kauf nichts im Wege. Natürlich erhalten Sie Kurzwellenempfänger auch als Neuware.

Geräte im Kofferradioformat ermöglichen auch die gute Wiedergabe von UKW- und DAB+-Sendungen. Allerdings gewährleisten hier nur die auch preislich höher liegenden Modelle brauchbaren Kurzwellenempfang, z. B. das TECSUN S-8800.

Tipp: Gehen Sie zusammen mit einem erfahrenen Funkamateur auf Einkaufstour. So vermeiden Sie Fehlkäufe und Enttäuschungen.

1.5.4 Bausätze

Sie können Ihren Empfänger auch selbst aufbauen. Dabei lernen Sie Funktechnik hautnah kennen. Allerdings müssen Sie teilweise Einschränkungen hinsichtlich der Ausstattung und der Empfangsleistungen hinnehmen, da im Normalfall keine aufwendigen Messmittel zur Verfügung stehen und die wenigsten Bausätze die Qualitäten hochpreisiger Geräte erreichen. Allerdings gibt es mit den SDR-Empfänger-Bausätzen hier auch Ausnahmen.

Die Zeitschrift *Funkamateur* betreibt einen kleinen Onlineshop mit Funkartikeln (http://www.funkamateur.de). Hier finden Sie unter anderem die vom Schweizer Entwickler Heinz Stampfl geschaffenen Bausätze *Junior 1* und *Junior 1D*.

Ersterer umfasst den Frequenzbereich von 5,9 MHz bis 8,1 MHz (das 49-m- und das 40-m-Rundfunkband sowie das dazwischen liegende 40-m-Amateurfunkband) mit den Sendearten AM und SSB.

Die Ausführung Junior 1D deckt den Bereich von 1 MHz bis 30 MHz in AM und SSB ab. SSB ist dabei als Doppelseitenempfang umgesetzt. Der Empfänger verfügt über eine digitale Frequenzanzeige und einen regelbaren Vorabstimmkreis (Preselektor), was den Empfang entscheidend verbessert.

Es werden verschiedene Bausätze von SDR-Empfängern angeboten. In der Regel sind diese relativ preiswert und bieten gute Empfangsleistungen.

1.5.5 Antennen für den Empfang

Wenn Sie einen eigenen Empfänger besitzen, benötigen Sie eine Antenne für den Empfang. Für den Anfang reicht eine einfache Wurfantenne, also ein Stück Draht. Ein Stück isolierter Schaltdraht, zwischen 2 und 20 m lang, genügt schon für den Empfang des Kurzwellenbereichs. Robuster ist eine isolierte Antennenlitze.

Einige moderne SDR-Empfänger verfügen über eine zusätzliche Langdraht-Klemme, verwenden aber sonst stets SMA-Anschlüsse. Für die Nutzung der Langdraht-

Klemme entfernen Sie nur ein Stück der Isolierung und stecken den Antennendraht ein – fertig. Die SMA-Stecker jedoch sind normalerweise nur lötbar, was mit einiger Übung auch gelingt. Möchten Sie anfangs dieser Arbeit aus dem Weg gehen, können Sie einfach einen Adapter *SO-259-Buchse auf SMA-Stecker* (siehe Abbildung 1.12 und Abbildung 1.13) dafür einsetzen.



Abbildung 1.12 Adapter SO-259 auf SMA: die Seite der SO-Buchse



Abbildung 1.13 Adapter SO-259 auf SMA: die Seite des SMA-Steckers

Um den Antennendraht daran anzustecken, benötigen Sie noch einen Bananenstecker (siehe Abbildung 1.14).

Möchten Sie den Funkamateuren auf dem 2-m- und 70-cm-Band lauschen, reicht eine kleine Antenne aus. Sie können hier ebenso eine kurze Wurfantenne mit 50 cm Länge verwenden. Einen besseren Empfang erzielen Sie mit einer kleinen Mobilantenne mit Magnetfuß (siehe Abbildung 1.15) oder Ähnlichem am Balkon oder Fensterbrett.



Abbildung 1.14 Bananenstecker

Den notwendigen Adapter für den Anschluss an Ihren Empfänger kaufen Sie zusammen mit der Antenne. Eventuell erhalten Sie so eine Antenne auch mit dem passenden Stecker.



Abbildung 1.15 Mobilantenne für das 2-m- und 70-cm-Band

1.6 Funkamateure persönlich kennenlernen

In Deutschland sind die allermeisten Funkamateure im »Deutschen Amateur-Radioclub e. V.« (*DARC*) organisiert.

Derzeit hat der Verein rund 34.000 Mitglieder. Er ist in Distrikte unterteilt, in denen sich wiederum die Ortsverbände mit den Mitgliedern befinden. Jeder Ortsverband verfügt über ein Kennzeichen, den Distrikts-Ortsverbands-Kenner (*DOK*). Dieser besteht im Regelfall aus dem Buchstaben, der den Distrikt kennzeichnet, und aus einer zweistelligen Zahl, z. B. B32 für den Ortsverband Pegnitz, der wiederum zum Distrikt Franken (B) gehört.

Das Vereinsleben findet in diesen Ortsverbänden (*OV*) auf unterschiedliche Art und Weise statt. So gibt es OVs, deren einzige Aktivität aus dem einmal im Vierteljahr stattfindenden OV-Abend besteht. Andere organisieren Lizenzkurse, Vorträge, Feste und Feiern aller Art, Exkursionen und wöchentliche Treffen. All dies hängt stets von den einzelnen Personen vor Ort ab.

Speziell für Pendler und andere, meist aus beruflichen Gründen »unsesshafte« Personen bietet sich der Ortsverband D22 »Soziale Medien« an. Hier tauschen sich die bundesweit verstreut lebenden Mitglieder mittels sozialer Medien aus. Ansonsten handelt es sich um einen gewöhnlichen Ortsverband, nur eben ohne regelmäßige lokale Treffen.

Bei Interesse besuchen Sie die Internetpräsenz des DARC unter *https://www.darc.de/home*. Klicken Sie dort auf Einsteiger.

Der DARC hat zudem die Ausbildungsplattform *50ohm.de* geschaffen. Aktuell, also im Frühjahr 2024, ist hier noch vieles im Aufbau begriffen. Aber: So leicht wie mithilfe dieser Plattform konnte man bisher nicht zu einer Amateurfunklizenz kommen: Selbstlerner können Online-Kurse belegen, Trainingsapps machen fit für die Prüfung, man erfährt, wo und wann (Teil-)Präsenzkurse abgehalten werden, und wo es im Umkreis helfende Lernpaten gibt. Kursleiter erhalten Kurspläne, Materialien und weitere Unterstützung. Unter *https://www.50ohm.de*/finden Sie all diese Informationen. Schauen Sie einfach mal rein!

Wenn Sie lieber den direkten Kontakt pflegen wollen, besuchen Sie einfach einen oder mehrere Ortsverbände in Ihrem Umkreis. Man wird Sie sicher in Ihrem Vorhaben, Funkamateur zu werden, unterstützen.

Es gibt weltweit und in Deutschland noch weitere Vereinigungen, die sich mit dem Amateurfunk beschäftigen. Dabei handelt es sich um Vereine mit spezielleren Zielen, z. B. Satellitenfunk, museale Erhaltung von Funktechnik oder Fördervereine an Hochschulen. Auch hier können Sie zu den Vereinstreffen stoßen und Ihre ersten Kontakte mit den Menschen hinter den Mikrofonen und Tasten knüpfen.

Wer sich ausschließlich auf das Hören des Funkgeschehens konzentrieren möchte, ist ebenso gut bei den vorgenannten Vereinen aufgehoben. Allerdings gibt es auch Funkfreunde, die sich ausschließlich dem Empfang verschrieben haben. Die Arbeitsgemeinschaft DX e. V., kurz *AGDX*, ist der Dachverband deutschsprachiger Kurzwellenhörervereine. Hier treffen sich Menschen, die sich auch dem Empfang weltweit hörbarer Rundfunkstationen widmen. Weiteres hierzu finden Sie unter *http://www.agdx.de*.

Funkamateure finden Sie auf vielen größeren Messen und Ausstellungen, wo sie sich und den Amateurfunk vorstellen. Hier können Sie Menschen und Technik direkt erleben und kennenlernen.

Eine Veranstaltung für Funkamateure ist die *HAM RADIO* in Friedrichshafen (*http://www.hamradio-friedrichshafen.de*). Sie findet jährlich im Zeitraum Juni/Juli statt. Hier treffen Funk- und Elektronikinteressierte zusammen. Das Programm ist sehr vielfältig. Es gibt Fachvorträge über neueste technische Entwicklungen, und Sie können am Stand der Bundesnetzagentur sogar die Amateurfunkprüfung ablegen. Internationale Aussteller zeigen ihre neuesten Produkte rund um den Amateurfunk. Vereine aus aller Welt stellen sich dar. Persönliche Kontakte mit Menschen aus aller Welt werden dort geknüpft. Die Planung mancher Urlaubsreise nimmt dort ihren Ursprung. Die inländischen Vereine geben über alle Fragen rund um den Amateurfunk Auskunft.

Vielleicht lernen Sie dort sogar Ihren persönlichen Ansprechpartner für den Einstieg kennen, zumindest erfahren Sie aber, wer in Ihrer Nähe Ihnen weiterhilft. Es treffen sich dort viele QSO-Partner und Jugendgruppen – der persönliche Kontakt ist hier das Wichtigste. Sie sehen und finden auf der HAM RADIO wirklich alles, was den Amateurfunk betrifft. Sollten Sie Ihre Zeit nicht nur auf dem Messegelände, sondern auch in Friedrichshafen verbringen, fallen Ihnen die dort herumflanierenden Funkfreunde mit ihren T-Shirts und Kappen sicher auf. Meist wird auf diese Kleidungsstücke das persönliche Rufzeichen gestickt.

Eine kleinere, aber deshalb nicht uninteressante Veranstaltung ist der *FUNK.TAG Kassel*. Dieser findet jeweils im Frühjahr statt und löste die nicht mehr stattfindende Interradio Hannover ab. Hier stellen sich ebenfalls Funkamateure mit ihrer Arbeit vor. Zudem gibt es gewerbliche Aussteller und einen Flohmarkt.

Weitere Informationen über das jeweilige aktuelle Programm und die Aussteller finden Sie auf der Webseite des Deutschen Amateur-Radioclubs e. V.

Alle zwei Jahre findet die *Amateurfunktagung München* statt. Sie wird in der Hochschule München veranstaltet und besteht aus einer Reihe von Vorträgen mit überwiegend funktechnischen Themen (*http://www.amateurfunktagung.de/*)

Neben den schon erwähnten OV-Abenden halten viele der Ortsverbände der Amateurfunkvereinigungen einmal im Jahr einen sogenannten *Fieldday* ab. Hierbei wird

eine Funkstation außerhalb bewohnter und erschlossener Gegend errichtet. Natürlich dienen diese Veranstaltungen dem gemütlichen Beisammensein. Gleichzeitig trainiert man aber auch, wie man im Notfall abseits der Netzstromversorgung und mit behelfsmäßig aufgebauten Antennen einen Funkbetrieb durchführt. Auch hierzu sind Einsteiger willkommen.

In Deutschland verfügen einige Funkamateure über ein Ausbildungsrufzeichen. Das ermöglicht es Ihnen, unter Aufsicht Ihre ersten QSOs zu tätigen, ähnlich einer »Fahrschule«. Wenn sich Ihnen eine derartige Möglichkeit bietet, nutzen Sie diese unbedingt. Sie erhalten schon mal ein Gefühl, wie es ist, teilweise weltweit über den Äther Kontakte zu knüpfen.

Auch die Amateurfunkvereinigungen von Österreich (ÖVSV) und der Schweiz (USKA) sind regional vor Ort mit ihren Untergliederungen aktiv. Die Aktivitäten sind die gleichen wie hier für den bundesdeutschen Raum beschrieben.

1.7 Technik als Erlebnis

Mit den eigenen Händen etwas schaffen, das können Sie auch im Amateurfunk erleben. Dazu müssen Sie nicht gleich ein Funkgerät selbst entwerfen und bauen, das machen wohl die wenigsten Funkamateure. Es bleiben aber genügend andere Betätigungsfelder, beispielsweise:

- Stecker an Antennenkabel löten oder crimpen
- Antennen berechnen und bauen
- Aufbau einer Stationsantenne
- mobile Stromversorgungen schaffen
- Messungen durchführen
- Zusatzgeräte wie Mikrofon, Morsetaste oder Rechner mit dem Funkgerät verkabeln
- Funkkoffer für unterwegs oder Notfunkeinsätze planen und bauen
- Stationstisch aufbauen
- Bausätze für Funk- und Messgeräte zusammenbauen (Das spart Zeit und Geld gegenüber kompletten Eigenentwicklungen.)
- Bewahrung technischer Denkmäler (historische Fernmeldetürme, Schiffe, Seefunkstellen, Sendeanlagen)
- Bewahrung und Pflege des Weltkulturerbes Morsetelegrafie

Und vieles andere mehr! Funkamateure helfen sich untereinander. Da hilft die junge Lötkünstlerin eben dem alten Antennenfuchs, und der Informatikstudent erklärt am OV-Abend seinen Vereinskollegen, was man mit dem Raspberry Pi so alles im Amateurfunk anstellen kann.

TEIL I

Amateurfunktechnik

Kapitel 2
Fachrechnen

Ohne einige Grundlagen geht es nicht. Daher geht es ab diesem Kapitel zunächst um die Basisgrößen und die Rechengrundlagen. Anschließend folgen die physikalischen Grundlagen der Elektrizität, gefolgt von immer mehr Themen, die sich mit dem Funken beschäftigen.

Für die Berechnungen benötigen Sie einen Taschenrechner. Besorgen Sie sich ein gängiges technisch-wissenschaftliches Modell. Möchten Sie damit zur Funkprüfung, darf er nicht programmierbar sein und keinen Textspeicher haben. In diesem Buch werden die Rechenwege mit dem Taschenrechner bei jedem Beispiel dargestellt. Achten Sie aber darauf, dass sich Bedienung in Detailfragen unterscheiden kann. Bei manchen Modellen muss beispielsweise nach LOG eine Klammer extra geöffnet werden, bei anderen funktioniert das automatisch.

Falls Sie eine Zusammenfassung aller wichtigen Formeln benötigen, verwenden Sie einfach die Formelsammlung, die sich im Anhang der »Prüfungsfragen im Prüfungsteil ›Technische Kenntnisse‹ bei Prüfungen zum Erwerb von Amateurfunkzeugnissen« befindet.

2.1 Basisgrößen des SI-Einheitensystems

Zählen, messen, wiegen – für all dies benötigt man genau festgelegte Maßeinheiten. Allein für Längenmaße gab es früher Elle, Fuß, Meile (des jeweiligen Landes) und vieles andere mehr. An einen geregelten Waren- und Dienstleistungsaustausch war hier nicht zu denken. So wurde das *SI-Einheitensystem* geschaffen, das *Système international d'unités*. Es ist international gültig, und hierzulande ist dessen Verwendung verbindlich.

Von einer *physikalischen Basisgröße* spricht man, wenn diese nicht durch andere Basisgrößen ausgedrückt werden kann. Die Basisgrößen werden von physikalischen Effekten abgeleitet. So war die Sekunde früher mittels der Erdrotation definiert, heute mittels der atomaren Strahlung des Cäsiumatoms.

Die Kürzel werden aber nicht für die Wertangabe genutzt, hier kommen die *Basiseinheiten* zum Zuge. Tabelle 2.1 zeigt Ihnen einen Auszug der Basisgrößen und -einheiten, die für den Amateurfunk notwendig sind.

Basisgröße	Symbol (in Formel)	Einheit	Einheitenzeichen
Länge	L	Meter	m
Masse (»Gewicht«)	M	Kilogramm	kg
Zeit	T	Sekunde	s
Stromstärke	I	Ampere	A

Tabelle 2.1 Auszug der Basisgrößen und -einheiten

Alle weiteren physikalischen Größen und Einheiten werden aus den sieben Basisgrößen und -einheiten abgeleitet.

Darüber hinaus müssen Sie aber noch einige weitere Begriffe kennen. Tabelle 2.2 listet Ihnen zusätzliche Größen und Einheiten auf, die im Funk- und Elektrobereich häufiger verwendet werden.

Größe	Symbol (in Formel)	Einheit	Einheitenzeichen
Magnetische Flussdichte	*B*	Tesla	T
Kapazität	*C*	Farad	F
Elektrische Feldstärke	*E*	Volt pro Meter	V/m
Frequenz	*f*	Hertz	Hz
Leitwert	*G*	Siemens	S
Magnetische Feldstärke	*H*	Ampere pro Meter	A/m
Induktivität	*L*	Henry	H
Leistung	*P*	Watt	W
Ladung	*Q*	Coulomb	C
Widerstand	*R*	Ohm	Ω
Impedanz	*Z*	Ohm	Ω
Spannung	*U*	Volt	V

Tabelle 2.2 Abgeleitete Größen und Einheiten

Größe	Symbol (in Formel)	Einheit	Einheitenzeichen
Arbeit	*W*	Wattsekunde Wattstunde	Ws (Joule) Wh

Tabelle 2.2 Abgeleitete Größen und Einheiten (Forts.)

Einige Messgrößen und deren Definitionen aus dem Bereich der elektronischen Datenverarbeitung sind mittlerweile auch für Funkamateure interessant.

Mit der Datenübertragungsrate, oft verkürzt auf *Datenrate*, gibt man an, welche Datenmenge im vorgegebenen Zeitintervall übertragen wird (üblich: je Sekunde):

$$\text{Datenübertragungsrate } (C) = \frac{\text{Datenmenge } (C)}{\text{Zeit } (t)}$$

Als Formelzeichen wird hier der Buchstabe *C* verwendet, wie bei der Kapazitätsangabe von Kondensatoren. In der Praxis dürfte aber keine Verwechslungsgefahr bestehen!

Die *Datenübertragungsrate*, auch *Bitrate* genannt, gibt an, wie viele *Bit* pro Sekunde übertragen werden.

Damit ergeben sich Angaben in

- Bit je Sekunde: Bit/s (andere vorkommende Schreibweise: bps)
- Kilobit je Sekunde: kBit/s
- Megabit je Sekunde: MBit/s
- Gigabit je Sekunde: GBit/s

Beachten Sie, dass beispielsweise 1 kBit/s auch einer Menge von 1000 Bit je Sekunde entspricht. Es gelten die Zahlenpräfixe der SI-Einheiten, und es werden eben keine Zweierpotenzen ausgedrückt! Wenn die Zweierpotenzen zur Angabe der Datenübertragungsrate genutzt werden sollen, lauten die Zahlenpräfixe *KiBi* (1014 Bit/s), *MeBi* (1048576 Bit/s) oder *GiBi* (1073741824 Bit/s)! Die Angabe der Datenübertragungsrate bezieht sich normalerweise nur auf Geräte zur Datenübertragung (Netzwerkschnittstellen, Switche, Modems usw.).

Bitte verwechseln Sie nicht Bit/s und Byte/s. Byte/s und Vielfache geben in der Regel für Bussysteme (parallele Datenübertragung, wie bei PCI, Festplattenanschlüsse, USB usw.) an, welche Datenmengen transportiert werden. Ein Byte/s entspricht dem Achtfachen eines Bit/s.

Die *Symbolrate* wird in Baud (Bd) angegeben. Ein Bd entspricht einem Symbol je Sekunde. Unter *Symbol* versteht man einen definierten (physikalischen) Zustand eines Übertragungssignales.

In der Digitaltechnik nutzt man genau zwei Symbole (Zustände), um Informationen auszudrücken, z. B. bei TTL die Spannungszustände 0 Volt (low) für die binäre 0 und 5 Volt (high) für die binäre 1. Nur in diesem Fall entspricht die Symbolrate der Bitrate. Bei Übertragungsverfahren mit mehr als zwei Symbolen liegt die Bitrate höher als die Baudrate. In der Funktechnik wird die Symbolrate durch die Modulation bestimmt.



Einsatz der Symbole in Formeln

Beispiel: »Ohmsches Gesetz«

Ausgeschrieben: Spannung = Widerstand × Strom

Ausgedrückt mit den SI-Symbolen: $U = R \times I$

Die Werte der SI-Einheiten lassen sich im Alltag oft nur schlecht ausdrücken. Entweder links oder rechts vom Komma steht eine große Anzahl von Nullen. Die *SI-Zahlenpräfixe* im Zusammenhang mit Zehnerpotenzen erleichtern den Umgang mit Mess- und Bauteilwerten (siehe Tabelle 2.3). Die Hochzahl gibt jeweils die Anzahl der Ziffer 0 an.

Name	Zeichen	Potenz	Faktor	Zahlenwert
Tera	T	10^{12}	Billionenfach	1.000.000.000.000
Giga	G	10^{9}	Milliardenfach	1.000.000.000
Mega	M	10^{6}	Millionenfach	1.000.000
Kilo	k	10^{3}	Tausendfach	1.000
Hekto	h	10^{2}	Hundertfach	100
Deka	da	10^{1}	Zehnfach	10
Dezi	d	10^{-1}	Zehntel	0,1
Zenti	c	10^{-2}	Hundertstel	0,01
Milli	m	10^{-3}	Tausendstel	0,001
Mikro	µ	10^{-6}	Millionstel	0,000001
Nano	n	10^{-9}	Milliardstel	0,000000001
Piko	p	10^{-12}	Billionstel	0,000000000001

Tabelle 2.3 Zahlenpräfixe der SI-Einheiten

Zehnerpotenzen

Beachten Sie zur richtigen Anwendung von Potenzen (»Hochzahlen«) Folgendes:

- Eine Nullerreihe **links vor** dem Komma bedeutet eine **positive** Potenzangabe. Beispiel: $100 = 10^2$
- Eine Nullerreihe **rechts hinter** dem Komma ist eine **negative** Potenzangabe. Beispiel: $0{,}001 = 10^{-3}$

Zahlenpräfixe

Wichtig ist die Beachtung von Groß- und Kleinschreibung bei den Präfixen. Merken Sie sich einfach, dass »große« Zahlen oberhalb des *kilo* in Großbuchstaben geschrieben werden, also **M**(ega), **G**(iga) und **T**(era).

Oft werden Werte, die mit Abweichungen, Stabilität usw. zu tun haben, in *Prozent*, *Promille* oder *Parts per Million* angegeben. Dabei handelt es sich nicht um SI-Präfixe, aber um eingeführte Angaben, die in Technik und Wissenschaft allgemein verwendet werden (siehe Tabelle 2.4).

Angabe	Zeichen/Kürzel	Wert	Potenz
Prozent	%	Hundertstel	10^{-2}
Promille	‰	Tausendstel	10^{-3}
Parts per Million	ppm	Millionstel	10^{-6}

Tabelle 2.4 Prozent und Co.

Genauigkeit, Auflösung und Unsicherheit

In der Technik wird die *Genauigkeit* durch die vorhandenen Stellen der Wertangabe ausgedrückt. Es ist mathematisch richtig, 435.000 kHz als 435 MHz zu bezeichnen. Die Angabe auf ein MHz genau bedeutet aber auch, dass in diesem Fall alles, was zwischen 434,5 MHz bis 435,4999 MHz liegt, mathematisch nicht zu beanstanden wäre, wohl aber im technischen und physikalischen Bereich!

Bei einer Anzeige spricht man von *Auflösung* (z. B. sieben Stellen) oder von Ableseunsicherheit (z. B. ±1 digit). Um die »Genauigkeit« einer Messung anzugeben, spricht man von der »Unsicherheit« eines Messwertes, also z. B. von:

- der Ableseunsicherheit einer Anzeige
- der Messunsicherheit bei einer Frequenzmessung

Einfach ausgedrückt: Geben Sie die Genauigkeit gegebenenfalls durch entsprechende Nachkommastellen an, z. B. 435,000 MHz.

Taschenrechner: Arbeit mit Zehnerpotenzen

Einen guten Taschenrechner brauchen Sie unbedingt, wenn Sie sich mit der Technik des Amateurfunks beschäftigen. Natürlich kann hier nicht auf die verschiedenen Modelle eingegangen werden. Sie müssen sich mit Ihrem Gerät vertraut machen. Versuchen Sie deshalb, die hier im Kasten gezeigte Aufgabe einzugeben und zum gezeigten Ergebnis zu kommen.

Die »Hochzahlen« werden meist mithilfe einer Taste eingegeben, die eine dieser Beschriftungen aufweisen könnte:

- Beliebiger Potenzwert: [^] oder [X■]
- für Multiplikationen »mal 10 hoch …«: [×X■]
- 10^2: [X²]
- 10^3: [X³]

Testen Sie die Zahl 10^6. Sie muss so in der Anzeige dargestellt werden. Suchen Sie dann die Taste, die Ihnen die Zahl in normaler Schreibweise anzeigt.

Beim hier verwendeten Gerät (Casio fx85DE Plus) funktioniert dies so:

- 10 [X■] 6 [=], Ergebnis: 1.000.000

Übung

Für einen digitalen Frequenzmesser wird eine Messunsicherheit von 5 ppm angegeben. Sie lesen 435,000 MHz als Messwert. Ermitteln Sie den Vertrauensbereich in kHz als Betrag und Frequenzbereich.

Gehen Sie so an die Rechnung heran:

- Schritt 1: Gleiche SI-Präfixe verwenden: 435 MHz entsprechen 435.000 kHz.
- Schritt 2: Berechnen Sie die Abweichung.

  Teilen der Frequenz f durch eine Million, dies dann mit 5 multiplizieren. Je nach Taschenrechner kommen Sie auf das Millionstel durch Hochzahleneingabe:

  435000 [÷] 10^6 [×] 5 [=] 2,175

  Es wurde ja schon auf kHz umgerechnet, also trägt das Ergebnis das richtige SI-Präfix: Die Abweichung beträgt 2,175 kHz.

  – Minimale Frequenz: 435000 kHz [−] 2,175 kHz [=] 434997,825 kHz

  – Maximale Frequenz: 435000 kHz [+] 2,175 kHz [=] 435002,175 kHz

Dieser Weg funktioniert mit dem Taschenrechner Casio fx-85DE PLUS. Bei anderen Geräten können alternative Eingaben erforderlich sein; beispielsweise gelangen Sie auch so zum Ziel:

435000 ÷ 1 EXP 6 × 5 = 2,175

oder:

435000 ÷ 1000000 × 5 = 2,175

Versuchen Sie, dies auf Ihrem Taschenrechner so nachzurechnen.

Übung zu SI-Einheiten

Setzen Sie in Tabelle 2.5 die jeweils fehlenden Angaben ein.

Nr.	Physikalische Größe	Formelsymbol	Einheit
1	Widerstand, Impedanz		
2		*I*	
3			V/m
4			V
5	Induktivität		
6		*P*	
7			F

Tabelle 2.5 Übungsaufgaben zu SI-Einheiten

Nr.	Physikalische Größe	Formelsymbol	Einheit
1	Widerstand, Impedanz	***R***	**Ω**
2	**Stromstärke**	*I*	**A**
3	**Elektrische Feldstärke**	***E***	V/m
4	**Spannung**	***U***	V
5	Induktivität	***L***	**H**
6	**Leistung**	*P*	**W**
7	**Kapazität**	***C***	F

Tabelle 2.6 Auflösung für die Übungsaufgaben zu SI-Einheiten, Lösungen gefettet

Übung zu SI-Präfixen, Zehnerpotenzen

Tragen Sie den jeweils fehlenden Wert in Tabelle 2.7 ein. Verwenden Sie in der Spalte »Dezimalschreibweise« das naheliegendste SI-Präfix, damit so wenig Nullen wie möglich benötigt werden.

Nr.	Potenzschreibweise	Dezimalschreibweise
1	20×10^{-3}	
2		0,003
3		0,010
4	25×10^{3}	

Tabelle 2.7 Übungsaufgaben zu Zehnerpotenzen und SI-Präfixen

Nr.	Potenzschreibweise	Dezimalschreibweise
1	20×10^{-3}	**0,02**
2	$\mathbf{3 \times 10^{-3}}$	0,003
3	$\mathbf{10^{-2}}$	0,010
4	25×10^{3}	**25.000**

Tabelle 2.8 Auflösung für die Übungsaufgaben zu Zehnerpotenzen und SI-Präfixen, Lösung fett

2.2 Dezibelrechnung für Verstärkung und Dämpfung (Leistung)

Berechnungen mit dem *Dezibel* gehören zu den Grundlagen der Funktechnik. Mit dem Dezibel (dB) drücken Sie *Verstärkungen* oder *Dämpfungen* von Spannungen oder Leistungen als *logarithmierten* Wert aus. Damit lassen sich Verstärkungen und Dämpfungen direkt addieren oder gegeneinander aufrechnen.

In der Praxis benötigen Sie dies, um beispielsweise Dämpfungen auf Antennenleitungen oder die effektiv abgestrahlte Leistung zu berechnen.

Häufig begegnen Ihnen in der Praxis diese Fälle:

- Berechnung der Gewinnangabe eines Verstärkers oder einer Antenne in dB
- Berechnung der Verlustangabe von Leitungen, Antennen usw. in dB
- Berechnung eines Gesamtsystems mit Verstärkung und Verlust
- Berechnung des Leistungsfaktors

Gewinnangaben von Antennen und Verstärkern werden normalerweise nicht als Faktor angegeben. Sie lesen in Gerätebeschreibungen Angaben wie »Verstärkung 6 dB«, aber nicht: »hebt das Signal um das Vierfache an«.

Oftmals hilft Ihnen das Umrechnen aber, mehr Klarheit über »Aufwand und Ertrag« beim Aufbau Ihrer Amateurfunkstation zu bekommen.

Für die Berechnung der Verstärkung in dB verwenden Sie diese Formel:

$$v = 10 \times \log \frac{\text{Ausgangsleistung } P_2}{\text{Eingangsleistung } P_1} \text{[dB]}$$

Rechenergebnisse richtig deuten

Eine *positive Zahl* steht für eine Verstärkung oder einen Antennengewinn.

Eine *negative Zahl* steht für Verluste bzw. eine Dämpfung. Wird nach der *Dämpfung* gefragt, lassen Sie das Minuszeichen weg!

Anstelle des Formelzeichens *v* für die Verstärkung wird auch der Buchstabe

g für Gewinn oder Gain verwendet.

Geht man gleich von einem Verlust (einer Dämpfung) aus, verwendet man den Buchstaben *a* (Attenuation, Abschwächung) anstelle *v* oder *D*. Allerdings sollte ein Ergebnis ohne negatives Vorzeichen entstehen, sonst stünde das Ergebnis für Gewinn:

$$a = 10 \log \frac{\text{Eingangsleistung } P_1}{\text{Ausgangsleistung } P_2} \text{ [dB]}$$

Übung

Sie besuchen einen Amateurfunkflohmarkt. An einem der Warentische finden Sie eine kleine Endstufe, mit der Sie das Signal Ihres Handfunksprechgeräts von 5 Watt auf 20 Watt anheben können.

Zum Einsetzen in die obige Formel legen wir fest, dass P_1 = 5 Watt und P_2 = 20 Watt sind. Tippen Sie das in den Taschenrechner ein.

Taschenrechner: Verstärkung in dB berechnen

Die Formel wird am Taschenrechner wie folgt abgebildet:

LOG (P_2 ÷ P_1) × 10 =

Die Multiplikation mit 10 ist notwendig, weil Sie sonst das Ergebnis in B (Bel) erhalten, gesucht ist aber das Ergebnis in dB!

Das Beispiel eingetippt: LOG (20 ÷ 5) × 10 =

Ergebnis: 6,02 dB, gerundet 6 dB

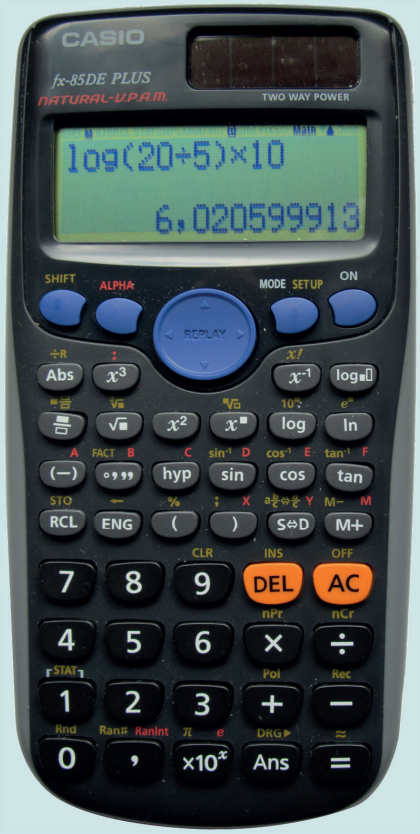


Abbildung 2.1 Berechnung mit dem Taschenrechner

Diese Hinweise zum Einsatz des Taschenrechners finden Sie in jedem der folgenden Rechenbeispiele.

Kommen Sie auch zu diesem Ergebnis? Wenn kein Tippfehler vorliegt und etwas anderes angezeigt wird, lesen Sie in der Anleitung Ihres Taschenrechners nach. Ältere Modelle verlangen die [LOG]-Taste nach der Eingabe der Werte.

Auf dem Amateurfunkflohmarkt erstehen Sie zudem eine Rolle Antennenkabel unbekannten Typs. Sie verbauen es zwischen Funkgerät und Antenne. Ihr Sender liefert 10 Watt, am anderen Ende der Leitung zeigt Ihr Wattmeter nur 8 Watt an. Wie hoch (in dB) ist die Dämpfung?

Vollziehen Sie die Berechnung mit Ihrem Taschenrechner nach:

[LOG] [(] 8 [÷] 10 [)] [×] 10 [=]

Ergebnis: –0,969, gerundet: –1 dB.

Zur Erinnerung: Das Minuszeichen kennzeichnet die Kabeldämpfungsverluste!

2.2.1 Berechnung des Leistungs- oder Dämpfungsfaktors

Sie möchten den Vervielfacher, den Faktor, bestimmen. Dazu wird diese Formel benutzt:

$$\text{Verstärkungsfaktor} = \left(\frac{\text{Ausgangsleistung (Watt)}}{\text{Eingangsleistung (Watt)}}\right)$$

Rechenergebnisse richtig deuten

- **Zahlen ohne führende Null** stehen für eine Verstärkung oder einen Antennengewinn.
- **Zahlen mit einer führenden Null vor dem Komma** stehen für Verluste bzw. eine Dämpfung.

In Ihrem Taschenrechner teilen Sie einfach die Ausgangsleistung durch die Eingangsleistung – fertig!

Als Beispiel dient wiederum der Verstärker, der bei 5 Watt Eingangsleistung 20 Watt Ausgangsleistung liefert. Das Ergebnis lautet 4. Das Gerät vervierfacht also die Eingangsleistung.

Nehmen wir hier auch wieder das Kabelbeispiel. Teilen Sie die 8 Watt Ausgangsleistung am Ende des Kabels durch die 10 Watt, die Sie mit Ihrem Sender liefern.

Das Ergebnis: 0,8.

2.2.2 Berechnung der Verstärkung in dB aus dem Leistungsfaktor

Im Grunde funktioniert das Berechnen der Verstärkung aus dem Leistungsfaktor so, wie bereits in Abschnitt 2.2 gezeigt, nur dass hier nicht mehr das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsleistung ermittelt wird:

$v = \log(\text{Leistungsfaktor}) \times 10$

Versuchen Sie es mit Ihrem Taschenrechner:

Gegeben ist der Leistungsfaktor 4, gesucht der entsprechende Wert in dB. Mit dem hier verwendeten Taschenrechner funktioniert dies so:

LOG (4) × 10 =

Ergebnis: 6,02, gerundet: 6 dB.

2.2.3 Wichtige dB- und Leistungsfaktorwerte

Einige dB- und Faktorwerte tauchen in der Praxis regelmäßig auf (siehe Tabelle 2.9):

dB	Leistungsfaktor	Hinweise
–20	0,01	Hundertstel
–10	0,1	Zehntel
–6	0,25	Viertelung (1 Stufe)
–3	0,5	Halbierung
0	1	
1,5	1,41	
2,15	1,64	Gewinn Dipol über isotropem Strahler. (Darauf wird bei den Antennenberechnungen noch eingegangen.)
3	2	Verdoppelung
6	4	Vervierfachung, 1 S-Stufe
10	10	Zehnfaches
20	100	Hundertfaches

Tabelle 2.9 Praxiswerte für dB- und Faktorwerte

2.3 Rechnen mit Dezibelwerten

Mit den Wertangaben in Dezibel können Sie recht einfach eine »Gewinn- und Verlustrechnung« einer Funkanlage durchführen. Gewinne werden hinzugefügt (Leistungsverstärker, Antennen mit Gewinn), Verluste abgezogen (Kabeldämpfung, Steckverbinder, Antennenverluste).

Berechnen Sie, wie hoch die Verstärkung insgesamt bei folgender Konfiguration ist:

- Verstärkung der Endstufe: 10 dB.
- Kabel- und Verbindungsverluste bis zur Antenne: 2 dB
- Antennengewinn: 8 dB

Rechnen Sie all dies zusammen:

10 – 2 + 8 ergibt 16 dB. Die Falle besteht darin, dass Verluste abgezogen werden, aber in der Aufgabenstellung nicht mit einem Minuszeichen gekennzeichnet werden.

Das Rechenbeispiel geht weiter: Sie verwenden ein Handfunksprechgerät mit einer Senderausgangsleistung von 5 Watt. Welche Leistung wird von der Antenne effektiv

abgestrahlt (*Effective Radiated Power*, ERP)? Diese Grundlagen werden in Kapitel 23 besprochen.

Jetzt kommen die Werte aus Tabelle 2.9 zum Einsatz: Die 16 dB lassen sich dabei in 10 und 6 zerlegen. Während Sie die dB-Werte addieren, multiplizieren Sie die passenden Leistungsfaktoren. Legen Sie sich eine Hilfstabelle (wie Tabelle 2.10) an:

dB	Leistungsfaktor
10	10
+	×
6	4
=	=
16	40

Tabelle 2.10 Berechnung des Leistungsfaktors aus Tabellenwerten

Aus den 5 Watt Sendeleistung an der Antennenbuchse des Handfunksprechgeräts werden damit 200 Watt abgestrahlte Leistung (5 W × 40).

2.4 Dezibelrechnung für Verstärkung und Dämpfung (Spannung)

Der Spannungsabfall oder die Spannungsverstärkung hat besonders bei Empfangsanlagen eine große Bedeutung. Von der Antenne eingefangene schwache Signale müssen über das Antennenkabel zum Empfänger – ein Vorverstärker bei der Antenne hebt die Signalspannung an, in langen Kabelwegen geht davon wieder etwas verloren. Für die Berechnung kann man auch hier wieder auf das Dezibel setzen, mit einer etwas geänderten Formel:

$$a_U = 20 \times \log\left(\frac{\text{Ausgangsspannung } U_2}{\text{Eingangsspannung } U_1}\right) \text{dB}$$

Zum Einsetzen in die obige Formel legen wir fest: $U_1 = 2$ mV, $U_2 = 8$ mV.

Tippen Sie das in den Taschenrechner ein:

LOG (8 ÷ 2) × 20 =

Ergebnis: 12,04 dB, gerundet 12 dB.

Das Spannungsverhältnis berechnet sich so:

$$\frac{\text{Ausgangsspannung } U_2}{\text{Eingangsspannung } U_1}$$

Die 20 vor dem log verwendet man zum einfacheren Rechnen mit Spannungspegeln. So hat man am Taschenrechner weniger Tipparbeit. Wenn Sie die beiden gegenübergestellten Spannungswerte jeweils zum Quadrat angeben, kann in der Formel wie bei Leistungswerten auch der Faktor 10 verwendet werden:

$$a_U = 10 \times \log\left(\frac{\text{Ausgangsspannung}^2}{\text{Eingangsspannung}^2}\right) \text{dB}$$

Rechenergebnisse richtig deuten

Berechnung der Spannungsverstärkung in dB:

- positiver Wert: Gewinn, Verstärkung
- negativer Wert: Verlust, Spannungsabfall, Dämpfung

Berechnung des Spannungsverhältnisses:

- Werte ohne führende Null: Gewinn, Verstärkung
- Werte mit führender Null: Verlust, Spannungsabfall, Dämpfung

Wird nach der Dämpfung gefragt, lassen Sie das Minuszeichen in Ihrer Antwort weg!

2.4.1 Wichtige dB- und Spannungsfaktorwerte

Sie sollten einige wichtige dB- und Spannungsfaktorwerte kennen, da diese für das überschlägige Berechnen nützlich sind (siehe Tabelle 2.11):

dB	Spannungsfaktor
–40	0,01
–20	0,10
–12	0,25
–6	0,5
6	2
12	4
20	10
40	100

Tabelle 2.11 Wichtige dB- und Spannungsfaktorwerte

Übung

Für einen Kleinsignalverstärker wird eine fünffache Spannungsverstärkung angegeben. Wie hoch ist diese in dB ausgedrückt?

Lösung:

Zum Ergebnis führen diese Taschenrechnereingaben:

LOG (5) × 20 =

Sie erhalten den Wert 13,97, also rund 14 dB.

An einem Ende eines längeren Kabels schließen Sie eine Baugruppe an, die 5 mV einspeist. Sie messen am anderen Ende nur noch 2,5 mV. Wie vielen dB Verlust entspricht dies?

Wiederum tippen Sie die Formel ein:

LOG (2,5 ÷ 5) × 20 =

Sie lesen ab: –6,05, gerundet –6 dB.

Aber gefragt ist die Dämpfung, also entfernen Sie das Vorzeichen: Die Dämpfung beträgt 6 dB.

2.5 Dezibelrechnung: Leistungspegel

Zum einfacheren Berechnen von Sendeanlagen wird oftmals anstelle der Leistung (in Watt) der *Leistungspegel* in dB, bezogen auf ein mW oder W, verwendet. Gewinne und Verluste lassen sich dann ohne Umrechnung verrechnen.

Als Bezüge verwenden Sie entweder 1 mW oder 1 W. Rechnen Sie in jedem Fall mit den zutreffenden Leistungsangaben, sonst stimmt das Ergebnis nicht. Geben Sie also die Leistung *P* entweder in mW oder W an, in Abhängigkeit von der gewünschten Einheit im Rechenergebnis.

Bezüge

Die Leistungsangabe in **mW** führt zu einem Ergebnis in **dBm**, eine in **W** zu **dBW**!

$$p = 10 \times \log\left(\frac{P}{1\ \text{mW}}\right)\ [\text{dBm}]$$

$$p = 10 \times \log\left(\frac{P}{1\ \text{W}}\right)\ [\text{dBW}]$$

2.5.1 Wichtige Leistungspegel

Im Funkeralltag sollten Sie die Werte der Tabelle 2.12 parat haben. Beachten Sie beim Lesen der Tabelle, dass dBm und mW (nicht kursiv) sowie *dBW* und *W* (kursiv) zusammengehören!

dBm / *dBW*	mW / *W*
–20	0,01
–10	0,1
–6	0,25
–3	0,5
0	1
3	2
6	4
10	10
20	100

Tabelle 2.12 Wichtige Leistungspegel

Übung

Berechnen Sie den Ausgangspegel in dBm, wenn folgende Werte gegeben sind:

- Sender mit 5 Watt Ausgangsleistung
- Endstufe mit 10 dB Verstärkung

Lösung:

Um zur richtigen Lösung zu gelangen, gehen Sie folgendermaßen vor:

- Schritt 1: Gefordert ist ein Ergebnis in dBm, daher rechnen Sie um: 5 Watt entsprechen 5.000 mW.
- Schritt 2: Tippen Sie Folgendes in Ihren Taschenrechner ein, damit Sie ein erstes Zwischenergebnis erhalten:

  [LOG] [(] 5000 [÷] 1 [)] [×] 10 [=]
- Schritt 3: Sie lesen 36,9897 ab, gerundet also 37. Der Sender selbst liefert 37 dBm Ausgangsleistung.
- Schritt 4: Hierzu rechnen Sie die 10 dB Verstärkung der Endstufe, sodass der Ausgangspegel 47 dBm beträgt.

2.6 Dezibelrechnung: Spannungspegel

Auch *Spannungspegel* werden definiert, beispielsweise für die elektrische Feldstärke, die in V/m angegeben wird. Häufig wird als Bezugswert 1 µV verwendet, was dann 0 dBµV entspricht. Beachten Sie auch bei der folgenden Formel, dass Sie stets mit demselben SI-Präfix (hier: *U* in µV) arbeiten.

$$p = 20 \times \log\left(\frac{U}{1\ \mu V}\right)\ [\mathrm{dB\mu V}]$$

Übung

Berechnen Sie den Spannungspegel in dBµV für die Spannung 5 Volt.

Lösung:

Die Formel wird am Taschenrechner wie folgt abgebildet:

[LOG] [(] 5 [×10ˣ] 6 [÷] 1 [)] [×] 20 [=]

Sie kommen zu dem Ergebnis: 133,979, gerundet 134 dBµV.

Alternativ können Sie so vorgehen:

[LOG] [(] 5000000 [÷] 1 [)] [×] 20 [=]

Als Nächstes folgt eine kompliziert klingende Übung: Der Pegelwert 126 dBµV/m entspricht welcher elektrischen Feldstärke?

Lösung:

Hilfreich bei den Berechnungen ist Tabelle 2.11. Hieraus entnehmen Sie, dass 20 dB der zehnfachen Spannung und 6 dB der doppelten Spannung entsprechen. Zählen Sie also insgesamt 6-mal »nach oben«:

1 µV mal 10 ergibt 10 µV mal 10 ergibt 100 µV mal 10 ergibt 1 mV mal 10 ergibt 10 mV mal 10 ergibt 100 mV mal 10 ergibt 1 V. Damit wurden 120 dB »abgearbeitet«. Die »restlichen« 6 dB entsprechen der Spannungsverdopplung, das Ergebnis lautet damit 2 Volt. Tabelle 2.13 zeigt es nochmals übersichtlicher.

Rechenoperation	(Zwischen-)Ergebnis
1 µV/m × 10 (1 von 6)	10 µV/m
10 µV/m ×10 (2 von 6)	100 µV/m
100 µV/m ×10 (3 von 6)	1 mV/m
1 mV/m × 10 (4 von 6)	10 mV/m

Tabelle 2.13 Rechenschema für den Pegelwert nach Feldstärke

Rechenoperation	(Zwischen-)Ergebnis
10 mV/m ×10 (5 von 6)	100 mV/m
100 mV/m ×10 (6 von 6)	1 V/m
1 V/m ×2 (6 dB, Verdoppelung bei Spannung)	**2 V/m**

Tabelle 2.13 Rechenschema für den Pegelwert nach Feldstärke (Forts.)

2.7 S-Meter und dB

Funkamateure verwenden zur Beurteilung der empfangenen Signale das *RST-System*. Die »Lautstärke« wird durch die S-Stufen ausgedrückt. Empfänger und Funkgeräte für den Amateurfunkdienst haben hierfür ein *S-Meter*, das die empfangene Feldstärke in logarithmierten Schritten, den S-Stufen, anzeigt. In den letzten Jahren finden sich allerdings Funkgeräte im unteren Preissegment, die oftmals nur über »Schätzbalken« auf dem Display verfügen. Empfänger oder Funkgeräte anderer Funkdienste verwenden andere Werte für die Darstellung der Empfangsfeldstärke, z. B. dBµV.

S-Meter können klassisch als Analoginstrument oder als Bestandteil der digitalen Benutzeroberfläche eines Funkgeräts oder Empfängers vorhanden sein. Abbildung 2.2 zeigt ein S-Meter, das in eine Digitalanzeige integriert ist.



Abbildung 2.2 S-Meter

Der vom Empfänger ausgegebene S-Wert sagt nur etwas über die Spannung des anliegenden Signals am Eingang aus. Die Antenne, das Kabel und die Qualität der Steckverbindungen beeinflussen die Signalstärke des Empfangs. So ist es ganz normal, dass nebeneinanderliegende Stationen schwache Signale mit unterschiedlichen S-Werten empfangen.

S-Stufen

Eine *S-Stufe* entspricht 6 dB bei Leistungen und dem Spannungsfaktor 2.

Der Empfangsspannungswert für S9 ist wie folgt definiert:

- Kurzwelle: 50 µV (an 50 Ω)
- UKW: 5 µV (an 50 Ω)

Werte über S9 werden in der Form »S9 + NN dB« angegeben.

Für jede S-Stufe gibt es damit einen definierten Spannungswert (siehe Tabelle 2.14).

S	KW		UKW	
	µV	dBµV	µV	dBµV
1	0,2	–14	0,02	–33
2	0,39	–8	0,04	–28
3	0,78	–2	0,08	–22
4	1,56	4	0,16	–16
5	3,12	10	0,31	–10
6	6,25	16	0,62	–4
7	12,5	22	1,25	2
8	25	28	2,5	8
9	50	34	5	14
9+10 dB	160	44	16	24
9+20 dB	500	54	50	34
9+30 dB	1,6 mV	64	160	44
9+40 dB	5 mV	74	500	54
9+50 dB	16 mV	84	1,6 mV	64
9+60 dB	50 mV	94	5 mV	74

Tabelle 2.14 S-Stufen

SO ...

... gibt es nicht!

Taschenrechner: Umrechnungen (Wiederholung)

Die in Tabelle 2.14 aus den S-Stufen gewonnenen Werte wurden wie folgt ermittelt:

Von µV nach dBµV:

$$p = \log\left(\frac{U}{1\ \mu V}\right) \times 20\ [\mathrm{dB\mu V}]$$

LOG (U ÷ 1µV) × 20 =

Übung

Meist ist das Umrechnen von S-Stufen nach Leistungssteigerung oder -abschwächung gefragt:

- Wie viele S-Stufen steigt die S-Meter-Anzeige Ihres Funkpartners, wenn Sie Ihre Senderausgangsleistung von 5 Watt auf 80 Watt erhöhen?

  Sie wissen: Eine S-Stufe stellt eine Vervierfachung oder eine Viertelung dar (6 dB). Sie rechnen:

  – Die erste S-Stufe: 5 × 4 = 20 W
  – Die zweite S-Stufe: 20 × 4 = 80 W

  Lösung: 2 S-Stufen

Es gibt auch Fragen dieses Typs, die einfacher klingen:

- Wie groß ist der Unterschied in dB von S5 nach S9?

  Lösung: 4 S-Stufen × 6 dB = 24 dB

Mehr Rechenaufwand erfordert diese Aufgabenstellung:

- Welcher Empfangsspannung entspricht die Angabe S9+20 dB auf Kurzwelle?

  Lösung: Sie haben folgende Informationen:

  – S9 Kurzwelle: 50 µV Empfangsspannung (wird in µV bzw. in mV angegeben)
  – 20 dB entsprechen einem Spannungsfaktor von 10 (10-fach ..., siehe Tabelle 2.11).

  Berechnung: 50 µV × 10 = 500 µV

2.8 Zahlensysteme

Es gibt neben dem bekannten Dezimalsystem noch einige weitere Zahlensysteme, die Sie kennen sollten. Die wichtigsten sind Dualzahlen und Hexadezimalzahlen.

2.8.1 Umrechnen von Dualzahlen

Dualzahlen (oder auch *Binärzahlen* genannt) begegnen Ihnen in der modernen Funktechnik. Ob Sie mit Logikschaltungen arbeiten oder bitweise Speichereinstellungen an Funkgeräten vornehmen – Sie sollten dieses Zahlensystem kennen.

Beim gewohnten Dezimalzahlensystem nimmt jede Stelle einen Wert zwischen 0 und 9 ein, bei den Dualzahlen hingegen nur zwischen 0 und 1. Hier kommt es also viel eher zum Stellenüberlauf als beim Dezimalsystem.

Eine Dualzahl stellt also genau zwei Zustände dar. Sollen mehr Werte dargestellt werden, wird die Bitfolge länger. Dazu setzen Sie die Länge dieser Bitfolge als Potenz für

die Basis 2 ein. Alternativ multiplizieren Sie die Basis (2) entsprechend oft mit sich selbst:

$2^{\text{ANZAHL BITFOLGEN}}$

Rechenbeispiel: Wie viele unterschiedliche Werte erhalten Sie bei einer siebenstelligen Dualzahl?

Setzen Sie die 7 als Potenz ein: 2^7 entsprechen 128 Werten, die Sie mit einer siebenstelligen Dualzahl darstellen können.

Die Taschenrechnereingabe hierfür lautet bei den meisten Modellen:

2 [x■] 7

Das Ergebnis erscheint dann sofort. Beispielsweise entspricht die Angabe 10 als Dualzahl 2 als Dezimalzahl.

Umrechnung einer Dezimalzahl in eine Dualzahl

Teilen Sie die Dezimalzahl durch 2.

Ist das Zwischenergebnis ohne Nachkommastellen, notieren Sie eine 0, andernfalls eine 1.

Das Zwischenergebnis ohne Nachkommastellen teilen Sie wiederum durch 2 usw. Dies führen Sie so lange fort, bis das Zwischenergebnis eine 0 vor dem Komma aufweist.

Am Ende schreiben Sie die Nullen und Einsen von unten nach oben in einer Zeile.

An einem Beispiel wird dies wesentlich deutlicher: Verwandeln Sie die Dezimalzahl 614 in eine Dualzahl. Die Lösungsschritte sehen Sie in Tabelle 2.15. Das Ergebnis lautet 1001100110.

Wert	÷2	→ 0/1	Stelle (Leserichtung) ↑
614	307	0	10
307	153,5	1	9
153	76,5	1	8
76	38	0	7
38	19	0	6

Tabelle 2.15 Lösungstabelle für die Umrechnung von dezimal zu dual

Wert	÷2	→ 0/1	Stelle (Leserichtung) ↑
19	9,5	1	5
9	4,5	1	4
4	2	0	3
2	1	0	2
1	0,5	1	1

Tabelle 2.15 Lösungstabelle für die Umrechnung von dezimal zu dual (Forts.)



Umrechnung von Dualzahlen in Dezimalzahlen

1. Schreiben Sie die Stellen der Dualzahlen unter- oder nebeneinander als Tabelle (Wertereihung: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256 ..., also immer das Doppelte).
2. Sie benötigen für diese Tabelle so viele Werte, wie die Dualzahl Stellen aufweist. Schreiben Sie dann die Dualzahl passend zu den Dezimalwerten.
3. Addieren Sie alle Dezimalwerte, bei denen die »1« der Binärzahl eingetragen wird.

Das funktioniert natürlich auch entsprechend andersherum. Ermitteln Sie etwa den dezimalen »Gegenwert« der Binärzahl 10010110.

Auch dazu legen Sie sich eine Tabelle an und verfolgen das gleiche Muster.

Die Binärzahl 10010110 verfügt über 8 Stellen. Tragen Sie die Binärzahl so ein, dass sich die höchste Stelle in der letzten Zeile der Tabelle befindet, und addieren Sie die jeweiligen Ergebnisse (siehe Tabelle 2.16).

Stelle	Dezimalwert	Binärzahl	Ergebnis
8	1	0	0
7	2	1	2
6	4	1	4
5	8	0	0
4	16	1	16

Tabelle 2.16 Lösung der Umrechnung

Stelle	Dezimalwert	Binärzahl	Ergebnis
3	32	0	0
2	64	0	0
1	128	1	128
Dezimalzahl:			150

Tabelle 2.16 Lösung der Umrechnung (Forts.)

2.8.2 Umrechnen von Hexadezimalzahlen

In der Datenverarbeitung und natürlich bei modernen Funkgeräten, die über einen Rechner gesteuert werden, kommen Werte in Hexadezimalschreibweise vor. Besonders bei der Angabe von MAC-Adressen, CAT-Anweisungen und in Code-Tabellen werden Ihnen diese Zahlen auch im Alltag begegnen.

Beim gewohnten Dezimalzahlensystem nimmt jede Stelle einen Wert zwischen 0 und 9 ein, bei den Hexadezimalzahlen dagegen zwischen 0 und F. Hier kommt es später zum Stellenüberlauf als beim Dezimalsystem.

Die Angabe 10 als Hexadezimalzahl entspricht 16 als Dezimalzahl.

Hexadezimalzahlen

Um Hexadezimalzahlen von Dezimalzahlen sicher unterscheiden zu können, wird am Ende der Buchstabe `h` angehängt. Korrekt sind auch die Formen `0xNNN` oder `$NNN`.

Das Hexadezimalsystem (*Sechzehnersystem*) dient der übersichtlicheren Darstellung von Bitfolgen.

Die Umrechnung geschieht ähnlich wie bei den Dualzahlen, nur dividieren Sie hier durch 16! Tabelle 2.17 hilft bei der Umrechnung.

Hex.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
Dez.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

Tabelle 2.17 Gegenüberstellung von Dezimal- mit Hexadezimalzahlen

Zur Umrechnung wenden Sie das »Restwertverfahren«, unter Zuhilfenahme einer »Hilfstabelle« für die Umwandlung der Werte von 10 bis 15 an.

1. Sie dividieren die Dezimalzahl durch 16. Als Ergebnis erhalten Sie einen Quotienten und einen Restwert. Der Quotient zeigt an, wie oft die 16 in die vorgegebene

Zahl passt, während der Restwert die Differenz zwischen dem Quotienten und der gegebenen Zahl darstellt.

2. Der Restwert bildet die letzte Stelle der Hexadezimalzahl ab; die Ganzzahl vor dem Komma, den Quotienten, dividieren Sie abermals durch 16.
3. Wiederholen Sie den letzten Schritt so lange, wie sich die Ganzzahl vor dem Komma durch 16 teilen lässt.
4. Sobald der letzte Quotient kleiner als 16 ist, wird dieser als erste Stelle der Hexadezimalzahl übernommen.
5. Die entstandenen Hexadezimalzahlen reihen Sie von unten nach oben aneinander.

Probieren Sie das wieder an einer Aufgabe aus: Ermitteln Sie die hexadezimale Entsprechung der dezimalen Zahl 183.

- 183 / 16 = 11 Rest 7

  Die 16 passt 11 mal in die 183. 11 mal 16 ergibt 176. Die Differenz zu 183 ist der Restwert, die 7. Der Restwert ergibt die letzte Stelle der Hexadezimalzahl. Die 11 ist der Quotient, mit dem weitergerechnet wird.

- 11 / 16 = 0 Rest 11

  Die 11 ist kleiner als die 16 und wird direkt übernommen, muss aber mithilfe von Tabelle 2.17 in eine Hexadezimalzahl umgewandelt werden, also in »B«.

Von hinten nach vorne gelesen, erhalten Sie so für die Dezimalzahl 183 die Hexadezimalzahl B7.

Ein weiteres Beispiel:

Wandeln Sie die Dezimalzahl 51.986 in eine Hexadezimalzahl um.

- 51986 / 16 = 3249 Rest 2

  Die 2 ist der Wert der letzten Stelle der Hexadezimalzahl. Mit dem Quotienten 3249 wird weitergerechnet.

- 3249 / 16 = 203 Rest 1

  Die 1 ist die nächste Stelle der Hexadezimalzahl. Mit der 203 wird weitergerechnet.

- 203 / 16 = 12 Rest 11

  Die 11 ist die nächste Stelle der Hexadezimalzahl und wird mithilfe von Tabelle 2.17 in den Wert B umgewandelt. Mit der 12 wird weitergerechnet.

- 12 / 16 = 0 Rest 12

  Die 12 ist kleiner als 16 und wird als letzter Wert zur ersten Stelle der Hexadezimalzahl. Mithilfe von Tabelle 2.17 wird die 12 in den Wert C umgewandelt.

Von hinten nach vorne gelesen, erhalten Sie so für die Dezimalzahl 51.986 die Hexadezimalzahl CB12.

Der Restwert lässt sich mit einem Taschenrechner schnell berechnen:

Rest = Dezimalzahl – (Ganzzahliger Quotient × Divisor)

Rest = 51986 – (3249 × 16)
= 51986 – 51984
= 2

Umrechnung von Hexadezimalzahlen in Dezimalzahlen

Jede Stelle der Hexadezimalzahl beträgt 16 bzw. ein Vielfaches davon:

16, 256, 4.096 usw.

Bilden Sie eine Tabelle mit diesen Werten.

Tragen Sie in diese Tabelle die Hexadezimalzahl ein.

Und natürlich funktioniert auch hier die Rechnung in beide Richtungen. Ermitteln Sie als Übung den dezimalen Wert der hexadezimalen Zahl 12A.

Lösung: Bilden Sie eine Tabelle wie Tabelle 2.18. Tragen Sie die Hexadezimalzahl »kopfüber« ein. Buchstaben müssen Sie durch die dezimale Entsprechung ersetzen. Addieren Sie das jeweilige Einzelergebnis. Das Gesamtergebnis lautet 298.

Stelle	Dezimalwert	Hexadezimalzahl	Ergebnis
1	10	A	10
2	16	2	32
3	256	1	256
4	4.096	0	0
Summe:			298

Tabelle 2.18 Lösungstabelle

Technisch-wissenschaftliche Taschenrechner

Gute technisch-wissenschaftliche Taschenrechner verfügen über Umrechnungsfunktionen für Dezimal–Dual bzw. Dezimal–Hexadezimal und umgekehrt. Ein Blick in die Bedienungsanleitung lohnt sich!

Kapitel 3
Bauteilkunde

Viele elektronische Bauelemente erhalten Sie in verschiedenen Ausführungen. Neben der Baugröße, Bauform, Belastbarkeit, dem Aufbau und der Veränderbarkeit besteht ein großer Unterschied darin, ob es sich um ein *bedrahtetes* oder ein *oberflächenmontierbares* Bauelement handelt.

Bei der Herstellung von Leiterplatten unterscheidet man zwischen verschiedenen Technologien, die sich nach der Komplexität der Schaltung und den Kostenaspekten richten. Einseitige Leiterplatten, bei denen die Bauteile auf einer Seite angebracht (Bestückungsseite) und auf der gegenüberliegenden Seite verlötet werden (Lötseite), sind eine traditionelle Methode. Diese Technik, die seit den 1960er-Jahren ohne Lötleisten genutzt wird, findet heute hauptsächlich bei sehr einfachen Schaltungen, DIY-Projekten (*Do-it-yourself*) oder besonders kostengünstigen Baugruppen Anwendung. Der Hauptvorteil einseitiger Leiterplatten liegt in ihrer Einfachheit und der leichteren Reparaturmöglichkeit, da die bauteilfreie Lötseite einen direkten Zugang zu den Lötstellen bietet. Allerdings benötigen sie aufgrund der bedrahteten Bauelemente mehr Platz.

Zweilagige Platinen gelten mittlerweile als Standard (*State-of-the-Art*), da sie eine höhere Dichte an elektrischen Verbindungen erlauben, ohne den Platzbedarf wesentlich zu erhöhen. Sie ermöglichen es, Leiterbahnen sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite der Platine zu führen, was komplexere Schaltungen auf kompakterem Raum ermöglicht. Für noch anspruchsvollere elektronische Geräte kommen mehrlagige Platinen zum Einsatz, die über zwei hinausgehende Schichtebenen für Leiterbahnen verfügen. Diese Mehrlagenplatinen bieten die Möglichkeit, noch dichtere und komplexere Schaltungstopologien zu realisieren, sind jedoch in der Herstellung aufwendiger und teurer.

Die Wahl der Technologie hängt somit von den Anforderungen der jeweiligen Anwendung sowie von Kosten- und Platzüberlegungen ab. (Abbildung 3.1 zeigt die Bestückungsseite eines Bauteils, und Abbildung 3.2 zeigt seine Lötseite.)

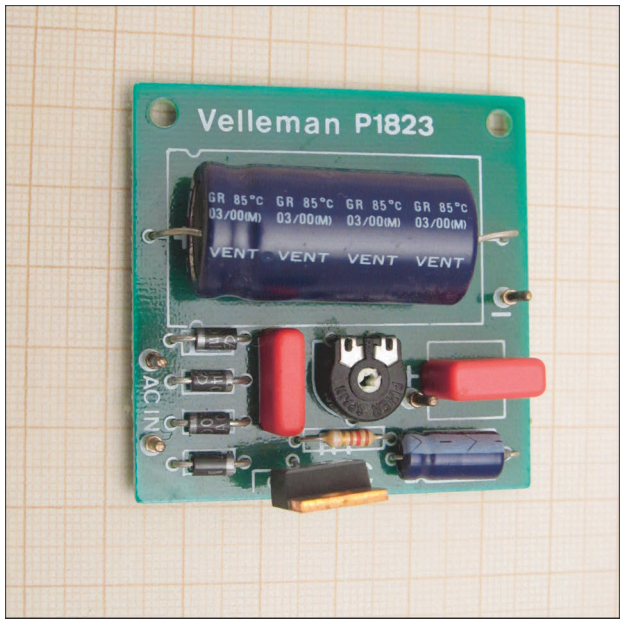


Abbildung 3.1 Bestückungsseite

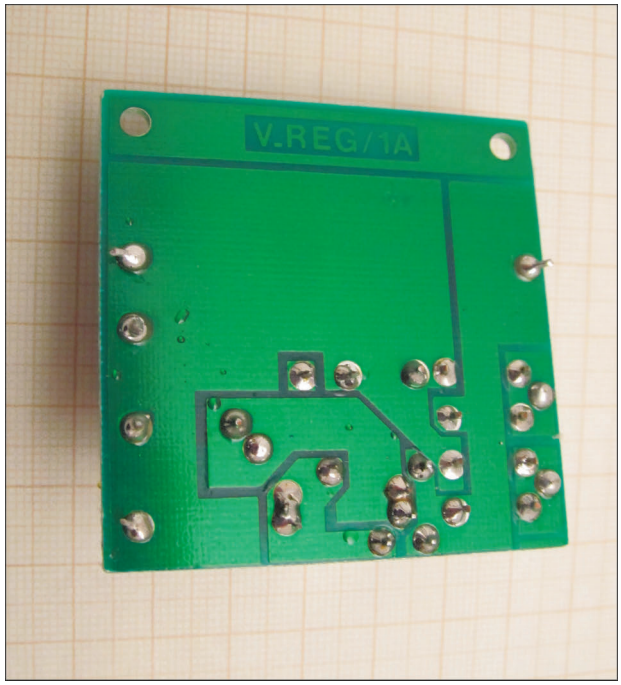


Abbildung 3.2 Lötseite

Oberflächenmontierbare Bauelemente (*Surface Mounted Device*, *SMD*) haben anstelle der Anschlussdrähte kurze Beinchen mit Auflageflächen oder auch nur Auflageflächen. Sie werden direkt mit den Leiterbahnen verlötet. Die Gehäuse werden oftmals im Rahmen des Fertigungsprozesses mit der Leiterplatte verklebt (siehe Abbildung 3.3).

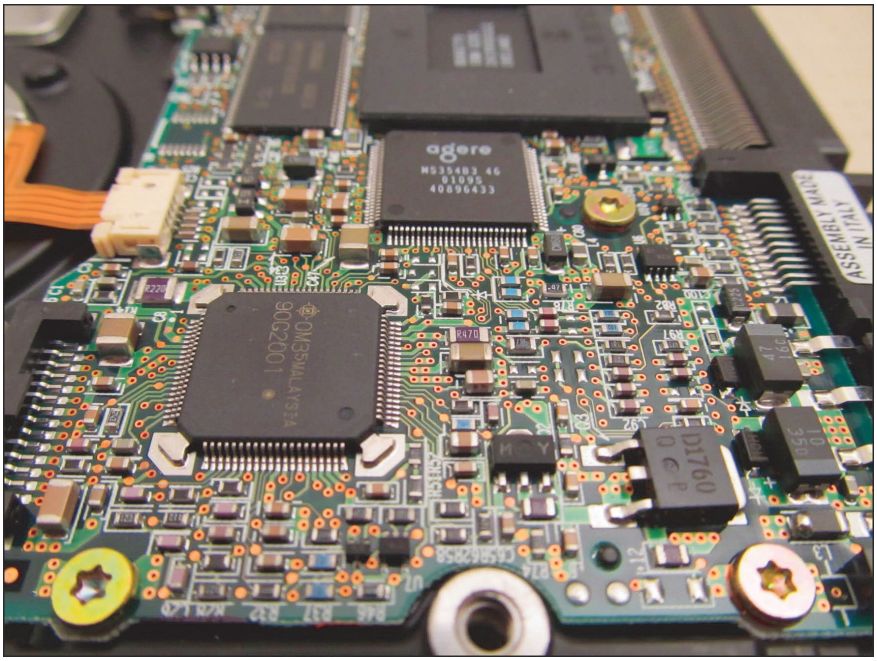


Abbildung 3.3 Leiterplatte mit SMD-Bauelementen

Für Schaltungen mit hochfrequenten Anwendungen ist die SMD-Technik von Vorteil, außerdem erzielt man mit ihr eine hohe Packungsdichte. Leider gestaltet sich der Austausch von Bauelementen schwierig. Zudem sind die Bauteile sehr winzig – die Bedruckung mit Bauteilinformationen ist knapp und teilweise codiert. Eine gute Lupe oder eine elektronische Vergrößerungshilfe unterstützt die Arbeiten sehr.

Eine *Mischbestückung*, also die gleichzeitige Verwendung von bedrahteten und oberflächenmontierbaren Bauelementen auf einer Leiterplatte, ist ganz normal und geläufig. In der Elektronikfertigung ist es üblich, sowohl bedrahtete Bauelemente (THT, *Through-Hole Technology*) als auch oberflächenmontierte Bauteile (SMD, Surface-Mounted Device) auf derselben Leiterplatte zu verwenden. Diese Kombination ermöglicht eine optimale Anpassung an die spezifischen Anforderungen der verschiedenen Bauteile. Insbesondere Schalter, Anschlussblöcke und größere Bauteile, die während des Gebrauchs mechanischen Belastungen ausgesetzt sind, sollten bevorzugt in der bedrahteten Bauweise (THT) installiert werden.

Der Grund dafür liegt in der erhöhten Haltbarkeit und Zuverlässigkeit dieser Befestigungsart. Durch die Durchkontaktierung, bei der die Anschlussbeine der Bauteile durch die Leiterplatte geführt und anschließend verlötet werden, ergibt sich eine besonders starke mechanische Verankerung. Diese Technik ist daher ideal für Bauteile geeignet, die regelmäßigen Druck, Zug oder andere mechanische Kräfte aushalten müssen.

Die restlichen, weniger mechanisch beanspruchten Komponenten, können effizient als SMD-Elemente montiert werden, was Platz spart und eine hohe Packungsdichte ermöglicht. Durch diese gezielte Auswahl der Montagetechnik für die verschiedenen Bauteile wird sowohl die Langlebigkeit als auch die Zuverlässigkeit der gesamten Elektronikbaugruppe sichergestellt (siehe Abbildung 3.4).

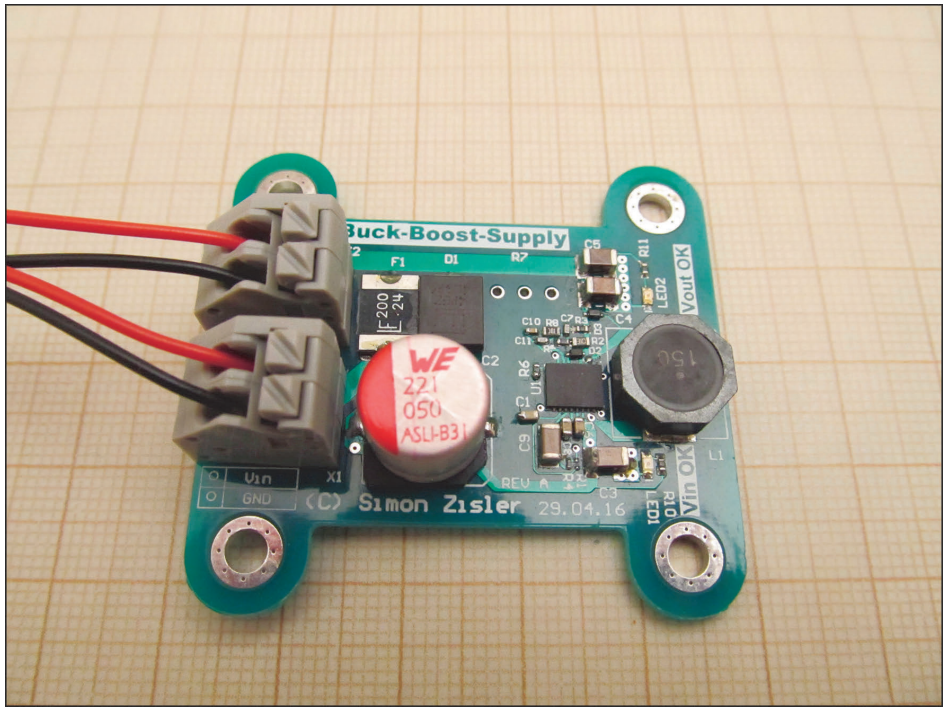


Abbildung 3.4 Leiterplatte mit oberflächenmontierten und bedrahteten Bauelementen

Kapitel 4
Physikalische Grundlagen

In diesem Kapitel geht es um das physikalische Grundlagenwissen, das Sie für Ihr Amateurfunkhobby kennen müssen. In Abschnitt 5.9 können Sie mit Experimenten den Stoff praktisch vertiefen!

4.1 Der Stromkreis

Grundlage aller Elektro- und Nachrichtentechnik ist der Stromkreis. Der Gleich- oder Wechselstrom muss fließen können, sonst wird keine Arbeit verrichtet. Die physikalischen Grundlagen des Stromkreises werden ausführlicher in Abschnitt 4.2 und Abschnitt 4.3 dargestellt.

Der minimalste Stromkreis (siehe Abbildung 4.1) besteht aus der Stromquelle (Batterie, Akku, Dynamo, Solarpaneel, Generator, Netzteil ...) und dem »Verbraucher«. (Der Begriff steht hier wegen des physikalischen Energieerhaltungsgrundsatzes in Anführungszeichen, da er eigentlich nicht korrekt ist!) Das Praxisbeispiel finden Sie in Abschnitt 5.9.2 mit Abbildung 5.16.

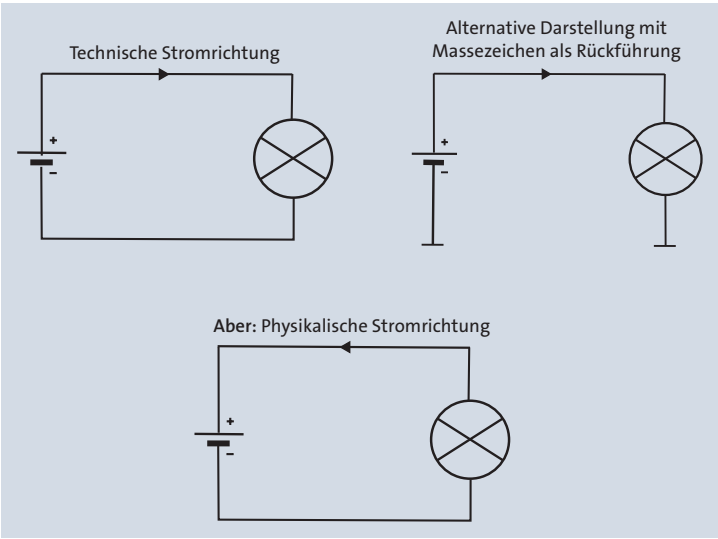


Abbildung 4.1 Minimaler Stromkreis, bestehend aus einer Batterie und einem Glühlämpchen

In Abbildung 4.1 sehen Sie den einfachen Stromkreis zweimal dargestellt. Das obere Beispiel zeigt die Hin- und Rückleitung des Stromes anhand vollständig gezeichneter Leitungen. Das untere Beispiel verwendet das Massezeichen für die Rückführung. Dies kann in der Praxis eine Massefläche auf einer Leiterplatte, die Metallkarosserie eines Kraftwagens oder der Metallrahmen eines Fahrrades sein. In diesen Fällen wird normalerweise nicht extra ein »Minuskabel« verlegt.

4.1.1 Schaltelemente und Schaltzeichen im Stromkreis

In Stromkreisen wird ein-, aus- oder umgeschaltet. Es gibt Schalter für dauerhaften Kontakt, Taster für eine kurzzeitige Betätigung sowie Fernschalter, besser bekannt als Relais. Sicherungen schützen vor Überlastung und deren Folgen wie Bränden, Explosionen oder Geräteschäden. Abbildung 4.2 zeigt Ihnen die Schaltzeichen, deren Bedeutung finden Sie in Tabelle 4.1.

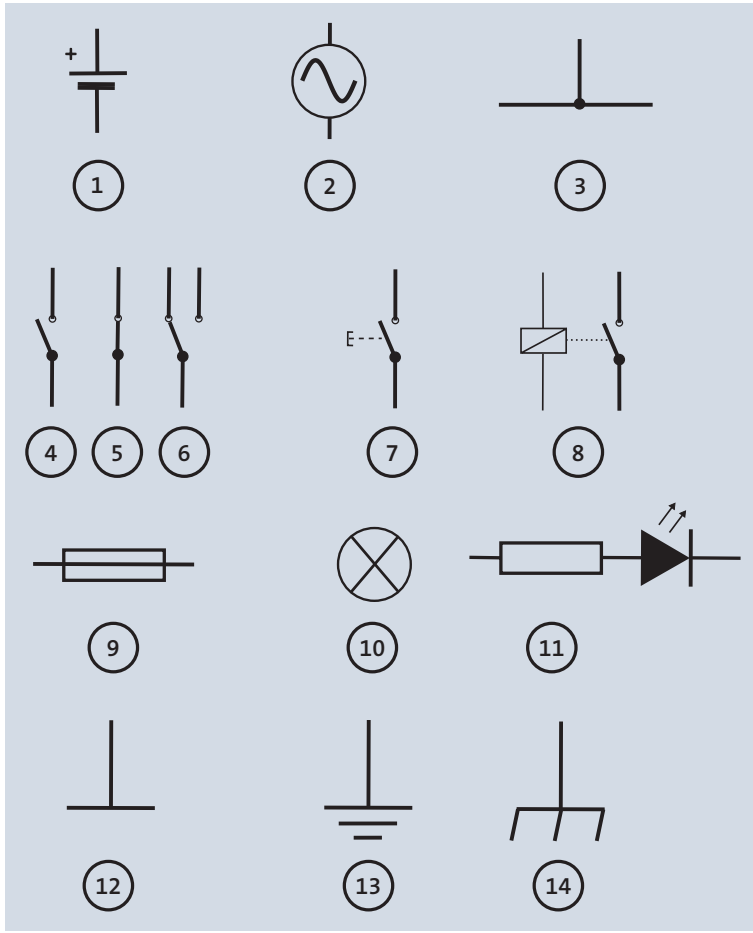


Abbildung 4.2 Schaltzeichen für Elemente des Stromkreises

Nr.	Bedeutung	Hinweise
1	Batterie	1 Zelle
2	Wechselstromquelle	z. B. Transformator, Generator
3	Knoten	Verzweigung im Stromkreis
4	Schalter	offen
5	Schalter	geschlossen
6	Schalter	Umschalter
7	Taster	Schließer
8	Relais	1 Arbeitskontakt, Schließer
9	Sicherung	
10	Glühlämpchen	
11	LED mit Vorwiderstand	
12	Masse	Gehäuse, Massefläche auf Platine
13	Erde	Für Antenne, Gebäudeanschluss, Stromversorgung
14	Masse	Für Gehäuse, Massefläche auf Platine

Tabelle 4.1 Bedeutung der Schaltzeichen

4.1.2 Schalter und Taster

Schalter ermöglichen die dauerhafte Unterbrechung oder Herstellung von elektrischen Verbindungen. *Taster* bieten im eigentlichen Sinne die Herstellung eines Momentkontaktes bzw. einer Unterbrechung.

Die Schaltkontakte müssen etwas mehr als den höchsten vorkommenden Strom verkraften, und das Schaltergehäuse muss eine sichere Isolierung der Spannung bieten. Bei den Anbietern von Elektronikkomponenten finden Sie meist auch die Datenblätter, die die Hersteller herausgeben. Darin suchen Sie nach Angaben wie der (maximalen) Schaltspannung und dem (maximalen) Schaltstrom. Weitere Angaben beziehen sich auf die Lebensdauer bezüglich Schaltzyklen, Temperaturangaben und gegebenenfalls Isolation. Manchmal erfahren Sie auch den Durchgangswiderstand. Ein Datenblattauszug eines Schalters kann beispielsweise diese Infos liefern: Schaltspannung AC max. 250 V, Schaltstrom max. 2 A.

Schalter (siehe Abbildung 4.3) und Taster (siehe Abbildung 4.4) werden für verschiedene Montagemöglichkeiten gebaut. Einige Modelle können Sie direkt mit einer Leitung verbinden (»Schnurschalter, Schnurtaster«), andere werden in Frontplatten verbaut und sind daher entweder rund (Abbildung 4.4 zeigt eine Befestigung mit Mutter) oder rechteckig (»Schnapp«-Befestigung oder mit 2 oder mehr Schrauben). Andere Ausführungen werden direkt auf eine Leiterplatte gelötet.

Auch hinsichtlich der Betätigung gibt es Variationen: Drucktasten für Dauerkontakt (Schalter) oder Momentkontakt (Taster), Wippschalter, Kippschalter und -taster, Drehschalter (Stufenschalter ...). Außerdem existieren Sonderbauformen wie Thermostate, die abhängig von Temperaturwerten schalten, oder Magnetschalter (z. B. Reed-Kontakte), die durch ein Magnetfeld betätigt werden. Schalter und Taster können mehrere Schaltebenen aufweisen. Damit lassen sich z. B. für Gleichspannungsmotore Umpoler für den Richtungswechsel verwirklichen.

Schalter und Taster gibt es als Schließer und als Öffner.

Und: Zu den Tastern zählt natürlich auch die Morsetaste!

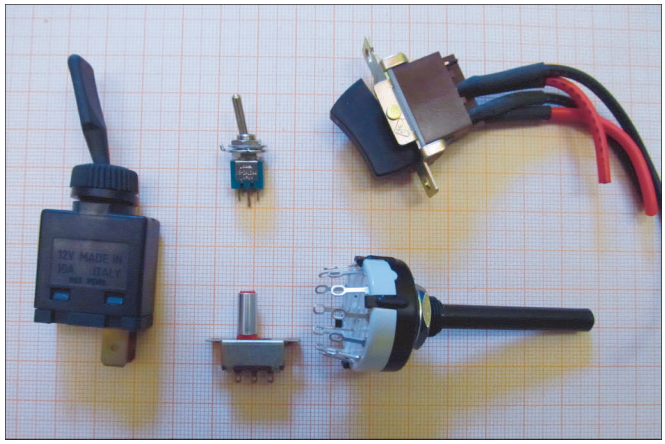


Abbildung 4.3 Schalter: Kipp-, Schiebe-, Wipp- und Drehschalter

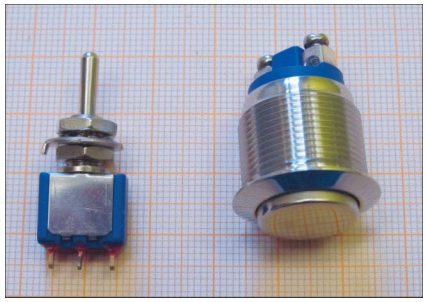


Abbildung 4.4 Taster: Kipptaster (erkennbar am Hebel in Mittelstellung) und Einbautaster für Frontplatten

4.1.3 Relais

Relais sind elektromagnetisch betätigte Schalter oder Taster. Die Steuerspannung, die auch niedriger oder höher als die Schaltspannung sein kann, bewirkt, dass der Elektromagnet im Relais magnetisch wird und die Kontakte entsprechend bewegt. Beim *monostabilen Relais* hält dieser Zustand so lange an, wie die Steuerspannung anliegt. Abbildung 4.5 zeigt ein solches Relais. Anders verhält es sich bei den *bistabilen Relais*. Sie werden mittels Impuls per Taster ein- und ausgeschaltet.

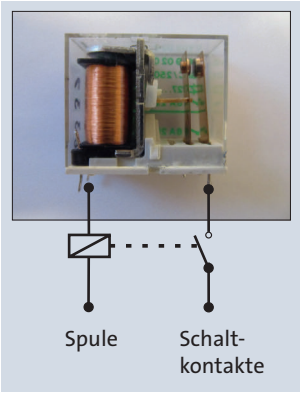


Abbildung 4.5 Monostabiles Relais

Eine Sonderform der Relais sind *Koaxialrelais* (siehe Abbildung 4.6), die Sie als Antennenumschalter benutzen. Sie kommen zum Einsatz, wenn Sie nicht die Möglichkeit haben, mehrere Antennenkabel vom Funkraum zur Antenne zu führen. Mit einem Koaxialkabel und einer Steuerleitung lösen Sie das Problem. Umgeschaltet wird am Mast oder Dach, nahe der Antenne.



Abbildung 4.6 Koaxialrelais mit N-Norm-Anschlüssen

Beim Abschalten der Steuerspannung am Relais tritt die Selbstinduktion der Spule auf (*Öffnungsfunke*). Die dabei entstehende Spannungsspitze, die deutlich über der ursprünglichen Betriebsspannung liegt, kann angeschlossene Halbleiter zerstören. Aber auch am Taster oder Schalter selbst kann Kontaktabbrand auftreten und die Lebensdauer des Schaltelements stark vermindern. Mit dem Einsatz einer *Freilaufdiode* begrenzen Sie diese Spannungsspitze auf deren Durchlassspannung (Siliziumdiode 0,7 Volt). Die Überspannung baut sich dann ab, ohne Schaden anzurichten. Abbildung 4.7 zeigt den Einsatz der Freilaufdiode in einer kleinen Musterschaltung. Mehr zu diesem Thema finden Sie auch in Abschnitt 9.7.

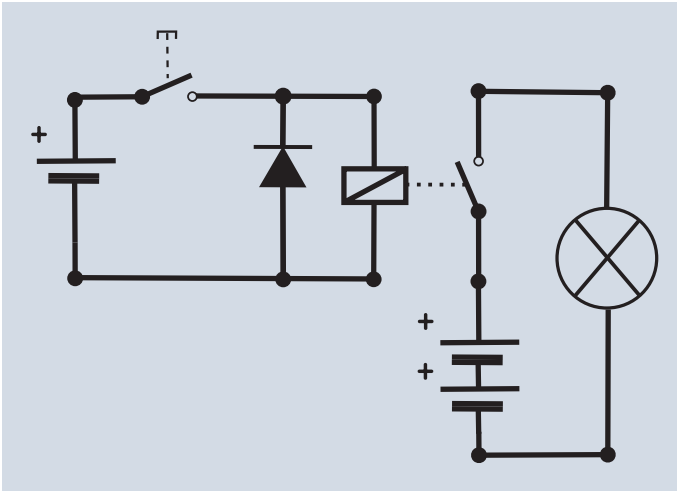


Abbildung 4.7 Relaisschaltung mit Freilaufdiode

4.1.4 Der Kurzschluss – Supergau im Stromkreis

Von einem Kurzschluss spricht man, wenn die Pole der Stromversorgung direkt miteinander verbunden werden. Es kann dabei zu Bränden und Explosionen kommen. Kurzschlüsse entstehen zum einen durch äußerliche Einwirkungen (Wurf, Sturz, Untertauchen von Elektrogeräten) oder durch Unachtsamkeit. Das Paradebeispiel ist **ein auf Strommessung (I) eingestelltes Multimeter**.

Abbildung 4.8 zeigt Ihnen, was nie passieren darf: Ein Amperemeter bzw. ein entsprechend eingestelltes Vielfachmessgerät wird zwischen die beiden Anschlüsse einer Stromversorgung geklemmt (bzw. die Prüfspitzen werden mit den Anschlüssen verbunden). Im besten Fall wird eine eventuell vorhandene Sicherung im Meßgerät oder die Sicherung der Stromversorgung ausgelöst. Andernfalls können die bekannten Kurzschlussfolgen – wie (Kabel-)Brand, Explosion (besonders bei Akkus) – sofort ausgelöst werden! Also messen Sie niemals, »wie viel Strom« in der Steckdose ist! Kontrollieren Sie vor einer Messung immer die Einstellungen am Messgerät!

Zeitgemäße Vielfachmessgeräte verfügen übrigens über eigene Buchsen für die Strommessung. Alle anderen Messsungen (Spannung, Widerstand, ...) erfolgen über einen anderen Eingang. Damit ist wenigstens ein Fehler durch eine falsche Schalterstellung ausgeschlossen.

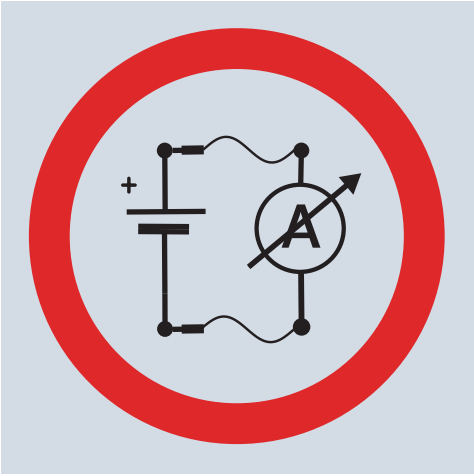


Abbildung 4.8 Kurzschluss durch ein Strommessgerät

Es gibt tatsächlich Ausnahmen von dieser Warnung: Sie prüfen eine Konstantstromquelle auf die Einhaltung der Stromstärke (LED-Treiber, Ladeschaltung für NiMH-Akkus). Auch bei Gleichspannungsmotoren mit Permanentmagneten können Sie den Kurzschlussstrom sicher messen, indem Sie den Motor manuell drehen, nachdem er von der Stromversorgung getrennt wurde; so bleibt der erzeugte Strom kontrollierbar.

4.1.5 Die Sicherungen

Die Hauptaufgabe einer Sicherung ist, Mensch und Gerät beim Auftreten einer Fehlerbedingung zu schützen. Dabei werden hauptsächlich drei Fälle unterschieden:

- Überstrom
- Fehlerstrom
- Übertemperatur

Überstromsicherung

Im Falle eines zu hohen Stromes, also bis hin zum Kurzschluss, verhindern Übertromsicherungen vor allem Brände oder weitergehende Schäden an der Stromversorgung oder angeschlossenem Gerät. Geräteinterne *Schmelzsicherungen* sind bei hochwertigeren Geräten und in der Messtechnik verbreitet (siehe Abbildung 4.9).

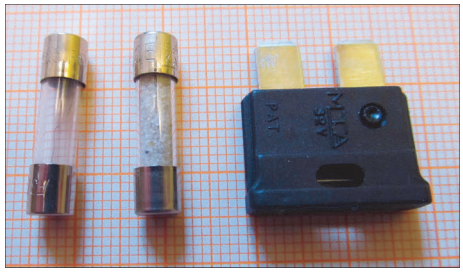


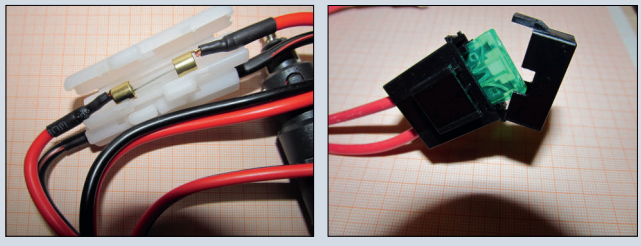
Abbildung 4.9 Schmelzsicherungen (Glasrohr, Kfz) – deutlich sieht man den Sicherungsdraht.

Bei zu hohem Strom schmilzt der Draht in der Sicherung und unterbricht den Stromkreis. Solche Sicherungen werden auch als *Feinsicherung* bezeichnet. Brennt so eine Schmelzsicherung durch, müssen Sie nach Möglichkeit den Grund dafür herausfinden und vor allem eine neue Sicherung mit gleichem Stromwert und gleicher Auslösecharakteristik (siehe Tabelle 4.2) einsetzen.

Die Glasröhrchen-Schmelzsicherungen enthalten teilweise Keramiksand. Oftmals sind solche Sicherungen auch in den Gerätezuleitungen von Geräten untergebracht, die mit 12 oder 24 Volt Gleichstrom betrieben werden (siehe Abbildung 4.10).

Charakteristik	Kürzel
Flink	F
Superflink	FF
Träge	T
Mittelträge	M
Superträge	TT

Tabelle 4.2 Auslösecharakteristik von Feinsicherungen



mit Feinsicherung mit KFZ-Sicherung

Abbildung 4.10 Schmelzsicherung im Gerätekabel

Für den Bereich der Schutzkleinspannung gibt es auch *rückstellbare Überstromsicherungen*. Hier erhitzt ein zu hoher Strom eine Mechanik mit Bimetall, die den Stromkreis unterbricht (siehe Abbildung 4.11).

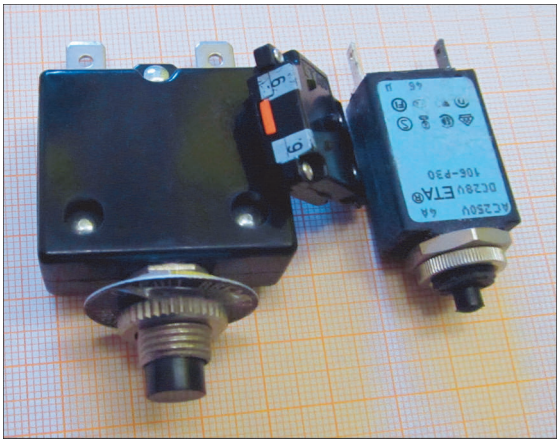


Abbildung 4.11 Rückstellbare Überstromsicherungen

Im Bereich der Elektroinstallation finden Sie die sogenannten *Leitungsschutzschalter* in den Unterverteilungen, aber teilweise auch in größeren Geräten montiert (siehe Abbildung 4.12). Umgangssprachlich kennt man diese als »Sicherungsautomaten«, da es vor allem früher im Gegensatz zu ihnen auch Schmelzsicherungen gab. Diese kommen in neueren Elektroinstallationen nicht mehr vor.



Abbildung 4.12 Leitungsschutzschalter in Elektrounterverteilung

Fehlerstromsicherung

Ein *Fehlerstrom* liegt vor, wenn über den Schutzleiter Strom fließt. Die Gründe hierfür sind vielfältig. Zum Beispiel kann ein Gerätegehäuse wegen eines Defekts Netzspan-

nung führen, oder man bohrt eine Stromleitung in der Wand mit der Bohrmaschine an. Auch wenn bei einem Wassereinbruch in tiefgelegenen Gebäudeteilen Wasser in die Steckdosen gerät, wird ein Fehlerstrom fließen.

Der *Fehlerstromschutzschalter*, auch als *RCD* oder *FI-Schalter* bezeichnet, trennt in so einem Fall alle Leiter des Stromkreises, ausgenommen den Schutzleiter ab. Abbildung 4.13 zeigt ein Modell in einer Elektrounterverteilung. Sie können auch Steckdosenleisten mit eingebautem RCD erwerben.



Abbildung 4.13 Fehlerstromschutzschalter

Übertemperatursicherungen

Vor allem, um Brände zu verhindern, kommen meist *nicht rückstellbare Temperatursicherungen* zum Einsatz. Sie sind hauptsächlich in elektrischen Kleingeräten wie im Wasserkocher oder im Föhn verbaut. Tritt Übertemperatur auf und wird die Sicherung ausgelöst, muss diese ausgetauscht werden. Vorher sollte allerdings der Grund für die Temperaturüberhöhung gefunden werden.

Im Bereich der Elektronik überwacht man besonders bei Leistungskomponenten deren Temperatur. Hierzu kommen Überwachungsschaltungen mit Fühlern zum Einsatz. Bei Funkgeräten wird im Sendebetrieb die Endstufentemperatur kontrolliert. Ab einem bestimmten Wert wird der Lüfter hinzugeschaltet, eventuell kommt dabei eine Drehzahlregelung zum Einsatz. Ist wegen einer allgemein zu hohen Umgebungstemperatur (Hochsommer, Gerät im KFZ eingebaut) der Luftstrom schon zu warm, regelt die Schaltung entweder die Sendeleistung zurück oder greift anders ein, z. B. indem sie das Funkgerät abschaltet.

4.2 Spannung als Ursache

Die *elektrische Spannung* ist die **U**rsache dafür, dass Strom fließen kann.

- **Definition**: Elektrische Spannung liegt vor, wenn zwischen zwei Polen unterschiedliche elektrische Ladungen vorliegen (Ladungstrennung). Dabei gilt, dass am Minuspol der Elektronenüberschuss, am Pluspol Elektronenmangel vorliegt.
- Eine elektrische Spannung kann auch durch die Ladungsverschiebung eines sich ändernden Magnetfelds hervorgerufen werden (*elektrodynamisches Prinzip*).
- Die elektrische Spannung ist als Potenzialdifferenz zwischen Raumpunkten (»Polen«) definiert.
- Formelzeichen: ***U*** (aber international ***V***!)
- Einheit: **V** (Volt)
- Elektrische Spannungen werden mit dem *Voltmeter* gemessen. Das Messgerät wird dabei mit beiden Polen der Spannungsquelle verbunden (siehe Abbildung 4.14).

Elektrische Spannung wird hervorgerufen durch:

- Reibung
- Druck (auf Kristalle, Piezoelemente)
- Induktion (Bewegung von Magnetfeldern in Drahtspulen, »Dynamo«, »Generator«, aber auch bewegte Spulen in Magnetfeldern)
- Licht (photoelektrische Vorgänge in Solarzellen)
- Wärme (Seebeck-Effekt, Peltier-Elemente)
- chemische Vorgänge (Primärelement [»Batterie«], Akkumulator)

Spannungen werden zwischen zwei Punkten mit unterschiedlicher elektrischer Ladung gemessen. Der Spannungsmesser wird dabei direkt mit beiden Polen verbunden (siehe Abbildung 4.14).



Abbildung 4.14 Spannungsmessung an einer Batterie

Gefahr durch elektrische Spannung

Nach VDE0100 gelten bei Berührung als ungefährlich:

- Wechselspannungen unter 25 V (Effektivwert bei 50 Hz)
- Gleichspannungen unter 60 V
- Für hochfrequente Berührspannungen gelten Werte nach BGV B11 (*http://www.vbg.de*).
- Eine lesenswerte Broschüre, die auch für Funkamateure durchaus interessant ist, gibt die Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) heraus:
  »Sicher experimentieren mit elektrischer Energie in Schulen«
  Sie können diese Broschüre unter *https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/2603* herunterladen.

Eine gebräuchliche Spannungsquelle ist die Batterie oder der Akkumulator. Abbildung 4.15 zeigt das Schaltzeichen.

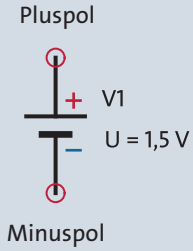


Abbildung 4.15 Schaltzeichen für die Batterie

Genau genommen zeigt das Schaltzeichen eine einzelne Batteriezelle. Wenn zur Erhöhung der Spannung mehrere Batterien hintereinandergeschaltet werden, sollte das auch in der Schaltzeichnung dargestellt werden. Meist werden zwei Zellen dargestellt, die gestrichelt miteinander verbunden sind, und die Gesamtspannung wird angegeben. Manche Schaltplanverfasser ziehen um das Schaltsymbol einen Rahmen und schreiben ebenso die Gesamtspannung in das Symbol.

Es gibt verschiedene Batterien und Akkumulatoren (siehe Tabelle 4.3), die sich durch ihre Zellenspannung, ihre Ladefähigkeit und weitere Eigenschaften unterscheiden. Lesen Sie die Betriebsanleitung von Geräten, die Batterien und Akkumulatoren aufnehmen können. Die Lade-, Pflege- und Sicherheitshinweise für Akkus sind Pflichtlektüre! Gerade bei Akkumulatoren, die Lithium enthalten, können durch fehlerhafte Behandlung, aber auch schon durch Materialfehler sogar Brände entstehen.

Typ	Zellenspannung
Alkaline, Zink-Kohle-Elemente	1,5 V
Nickel-Metallhydrid-Akkumulator	1,2 V
Blei-Gel-Akkumulator	2 V
Lithium-Polymer-Akkumulator	3,7 V
Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator	3,2 V

Tabelle 4.3 Batterie- und Akkutypen (Auswahl)

In der Amateurfunktechnik werden Sie mit einem weiten Spannungsbereich arbeiten.

Sie erinnern sich: Bei S1 für den UKW-Bereich haben Sie es mit 0,02 µV zu tun. Netzteile für Funkgeräte oder das Bordspannungsnetz eines PKW bieten 12 Volt, das Haushaltsstromnetz 230 Volt, und in einem entsprechend starken Röhrenverstärker kommen schon einmal 3 kV zum Einsatz.

Batterie- oder Akkuzellen werden normalerweise nur hintereinandergeschaltet. Damit erhöhen Sie die Abgabespannung. Eine Parallelschaltung zur Erhöhung des Abgabestroms funktioniert grundsätzlich, führt aber zu Problemen. Zellen mit geringfügig höherer Spannung »laden« solche mit niedrigerer. Mittels dazwischengeschalteter Dioden können Sie dies verhindern.

Abbildung 4.16 zeigt hintereinandergeschaltete Zellen. Für die Berechnungen nehmen wir eine Zellenspannung von 1,5 Volt an.

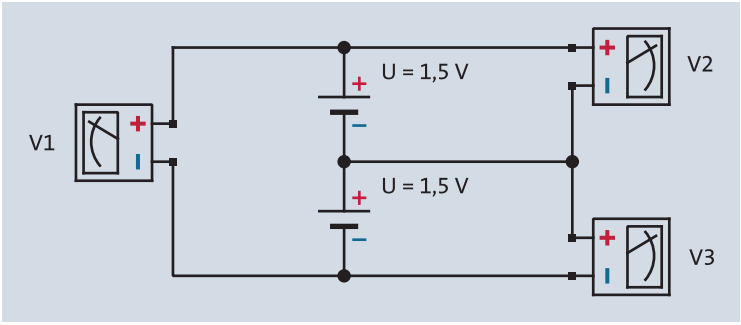


Abbildung 4.16 Zusammenschaltung von Batteriezellen und Spannungsmessungen

Mit dem Spannungsmesser V1 erhalten Sie die Summe der Zellenspannungen, also 3 Volt. V2 und V3 zeigen jeweils 1,5 Volt an.

Übung

Welchen Wert lesen Sie von Ihrem Spannungsmesser bei einer angenommenen Zellenspannung von 1,5 Volt ab, wenn Sie die Anordnung in Abbildung 4.17 messen?

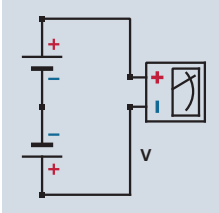


Abbildung 4.17 Übung für eine Spannungsmessung

Lösung: Es sind 0 (null!) Volt! Die Batteriezellen wurden in Gegenreihenschaltung angeordnet; die Spannungen heben sich auf.



Reihenschaltung

In der Reihenschaltung (Hintereinanderschaltung, an den Pluspol der ersten Zelle kommt der Minuspol der zweiten Zelle usw.) addieren Sie die Teilspannungen (der Zellen) zur Gesamtspannung.

4.3 Strom

Elektrischer Strom wird durch die *Nutzung* der elektrischen Spannung erzeugt. Die elektrische Spannung allein verrichtet keine Arbeit.

- **Definition**: Werden die beiden Pole einer (Gleich-)Spannungsquelle miteinander durch einen elektrischen Leiter verbunden, fließt Strom. Die Ladungsträger (Elektronen bzw. Ionen) bewegen sich in eine Richtung.
- Elektronen fließen in Leitern und Halbleitern, Ionen in Elektrolyten.
- *Physikalische Stromrichtung*: vom Minus- zum Pluspol
- *Technische Stromrichtung* (die allgemein in der Technik angewandt wird): vom Pluspol zum Minuspol
- Formelzeichen: ***I*** (Strom**I**ntensität)
- Einheit: **A** (Ampere)
- Elektrische Ströme werden mit dem *Amperemeter* gemessen. Das Messgerät wird dabei in den geschlossenen Stromkreis eingefügt (siehe Abbildung 4.18).
- Im unverzweigten Stromkreis ist die Stromstärke überall gleich!
- Im verzweigten Stromkreis ergibt die Summe der Teilströme die gesamte Stromstärke (siehe Abbildung 4.19).

- Als *Kurzschluss* wird eine Verbindung zweier unterschiedlicher elektrischer Potenziale bezeichnet, bei der der dabei fließende Strom keinen Nutzen aufweist, sondern sogar zu Schäden an der Spannungsquelle führen kann.
- Strom kann nicht »verbraucht« werden. Bauteile und Geräte, die in stromdurchflossenem Zustand irgendeine Arbeit verrichten, werden aber umgangssprachlich trotzdem als »Verbraucher« bezeichnet.

In Abbildung 4.18 sehen Sie zunächst das Grundprinzip. Sie haben eine Spannungsquelle, den »Verbraucher« und den Strommesser »Hand in Hand« verschaltet.

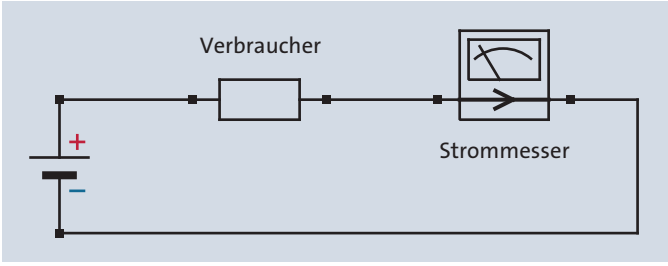


Abbildung 4.18 Geschlossener unverzweigter Stromkreis

Stromkreise können verzweigen. In diesem Fall ergibt die Summe der Teilströme den insgesamt fließenden Strom (siehe Abbildung 4.19).

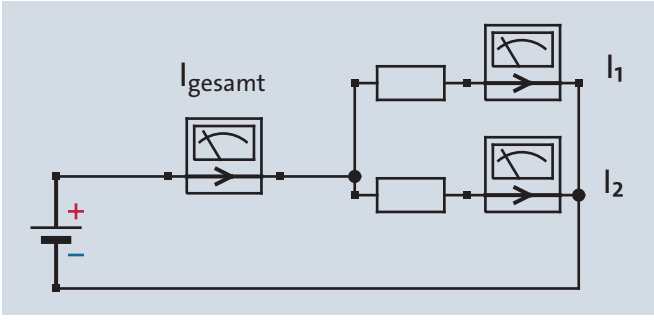


Abbildung 4.19 Verzweigter Stromkreis

Die Formel hierfür lautet:

$$I_{\text{gesamt}} = I_1 + I_2 + \cdots$$

Übung

Sie haben eine Schaltung wie in Abbildung 4.19. Sie lesen von den Strommessern ab:

- I_1: 100 mA
- I_2: 1,4 A

Berechnen Sie den Gesamtstrom in mA.

Lösung: 1.500 mA. Die Falle lauert in den unterschiedlichen SI-Präfixen.

4.4 Ladungsmenge

Beim fließenden Strom werden *Ladungsträger* zwischen zwei Punkten bewegt. In Abhängigkeit von Stromstärke (I) und Zeit (t) ergibt sich die Ladungsmenge (Q).

- **Definition**: Fließt Strom (I) eine bestimmte Zeit (t), lässt sich hieraus die Ladungsmenge (Q) berechnen: $Q = I \times t$.
- Formelzeichen: ***Q***
- Einheit: **C** (Coulomb), alt: Amperesekunde
- Definition: 1 C = 1 A × 1 s
- Umrechnen von Sekunde auf Stunde: 1 h = 60 min = 3.600 s

Das Coulomb wird nur für kleine *Ladungsmengen* verwendet. Für Akkumulatoren ist die *Amperestunde* (Ah) gebräuchlich. Die Formel gilt gleichermaßen für das Laden und für das Entladen von Akkumulatoren. Die Formel der Ladungsmenge wenden Sie an, wenn Ihnen die Zeit und der Lade-/Entladestrom bekannt sind.

Sind Ihnen die Akkukapazität und der Lade-/Entladestrom bekannt und Sie suchen die Lade-/Entladedauer, stellen Sie die Formel entsprechend um:

$$t = \frac{Q}{I}$$

Suchen Sie die Stromstärke, und Akkukapazität sowie Zeit sind Ihnen bekannt, gilt diese Formel:

$$I = \frac{Q}{t}$$

Übung

Berechnen Sie die aufgenommene Ladungsmenge dieses Akkus:

- Ladestrom: 8 A
- Ladedauer: 10 h

Für diese Berechnung verwenden Sie die Formel $Q = I \times t$ wie gewohnt:

$$8\ \text{A} \times 10\ \text{h} = 80\ \text{Ah}$$

Sie betreiben einen Empfänger an einem vollen Akku mit 7 Ah. Der Empfänger hat eine Stromaufnahme von 380 mA. Wie lange können Sie den Empfangsbetrieb aufrechterhalten?

Stellen Sie nun die Formel um. Sie suchen t, haben Q und I:

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{7}{0{,}38} = 18\text{ h }25\text{ min}$$

Tippen Sie in Ihren Taschenrechner ein:

7 [÷] 0,38 [=]

Sie erhalten den (Zwischen-)Wert 18,42.

18 Stunden sind ein Teilergebnis, die 0,42 müssen Sie noch in Minuten umrechnen:

0,42 [×] 60 *(Minuten)* [=] 25 Minuten

Zusammengerechnet ergibt sich also ein maximal 18 Stunden und 25 Minuten dauernder Empfangsbetrieb.

Eine weitere Aufgabenstellung zeigt Ihnen ein Schaltbild (siehe Abbildung 4.20), aus dem Sie die Spannungswerte der Akkuzellen ablesen können. Jede dieser Zellen verfügt über eine Ladung von 24 Ah.

Ermitteln Sie die Daten des Akkublocks, der sich aus dieser Zusammenschaltung bildet!

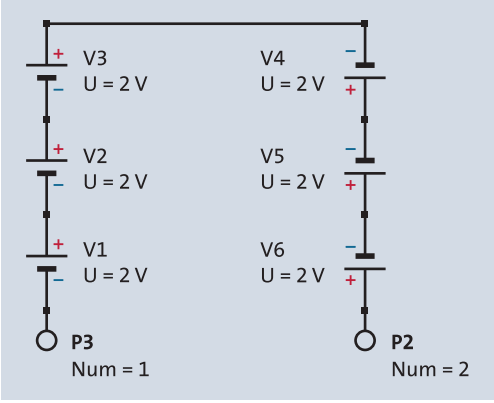


Abbildung 4.20 Schaltbild zur Aufgabe

Bei der Reihenschaltung addieren sich die Spannungen, aber nicht die Ladung.

Daher beträgt die Ladung 24 Ah bei 12 Volt Spannung.

4.5 Stromleitverhalten verschiedener Stoffe

4.5.1 Leiter

Damit sich zwei unterschiedliche elektrische Potenziale ausgleichen können, müssen sich die Ladungsträger (Elektronen) zwischen diesen Punkten bewegen können.

Eigentlich sind unabhängig von der kristallinen oder amorphen Stoffstruktur nur die freien Ladungsträger pro Volumen sowie ihre Beweglichkeit für die Leitfähigkeit eines Stoffes verantwortlich.

Innerhalb der kristallinen Gitterstruktur lassen sich die freien Elektronen besonders leicht bewegen. In metallischen Leitern bewegen sich (negativ geladene) Elektronen zwischen (positiv geladenen) Metallionen. Bei Metallen bilden die äußeren Valenzelektronen das sogenannte *Elektronengas*. Können diese Bindungselektronen mit geringer Energie aus ihrer Bahn gelöst werden, erhält man eine gute Leitfähigkeit.

Aber auch kristalliner Kohlenstoff in Form von Grafit weist diese Eigenschaften auf. Anwendungen sind beispielsweise die Schleifkohle bei Generatoren und Elektromotoren oder die Kohlebogenlampen in alten Kinoprojektoren.

Diesen Durchfluss der Elektronen können Sie mit dem von Wasser durch einen Berg von grobem Kies vergleichen. Abbildung 4.21 zeigt Ihnen das Prinzip. Me^+ sind hier die Metallionen, die ⊖ stellen die frei beweglichen Elektronen dar.

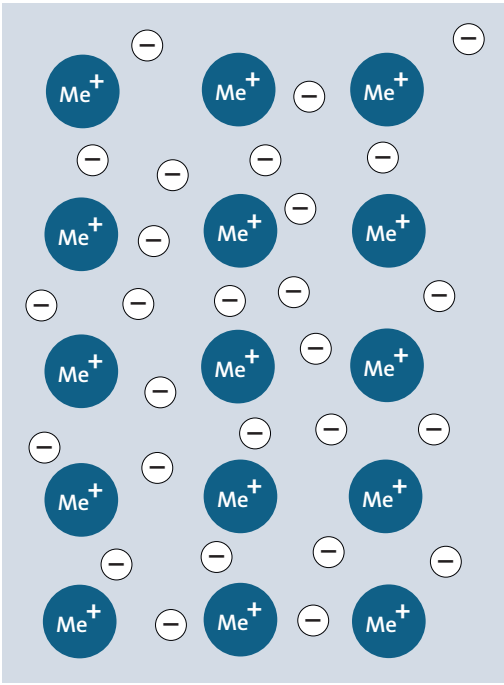


Abbildung 4.21 Freie Elektronen im Metallgitter

4.5.2 Halbleiter

Bei *Halbleitern* sind nur wenige freie Ladungsträger vorhanden, und sie verhalten sich damit zunächst ähnlich wie nicht leitende Stoffe. Durch Zuführung von elektrischer Spannung, Licht oder Wärme wird allerdings ein Ladungstransport ermöglicht.

Halbleiter werden in der modernen Elektronik vielfältig eingesetzt. Sie schalten, rechnen, verstärken, leuchten und können noch vieles andere mehr. Der Hauptvertreter ist das chemische Element Silizium (Si). Wie im Modell in Abbildung 4.22 gezeigt, sind hier die Elektronen zwischen den Atomrümpfen gebunden.

Halbleiterbauelemente bestehen aus unterschiedlich dotierten Bereichen. Unter *Dotierung* versteht man das Ergänzen des Halbleitermaterials mit anderen chemischen Elementen, was dessen Eigenschaften grundlegend verändert. Damit ist der Aufbau von Dioden und Transistoren möglich. Gallium-Arsenid (5:3) weist eine besonders hohe Beweglichkeit der Ladungsträger auf und wird deshalb in Halbleitern für Mikrowellenbauteile verwendet.

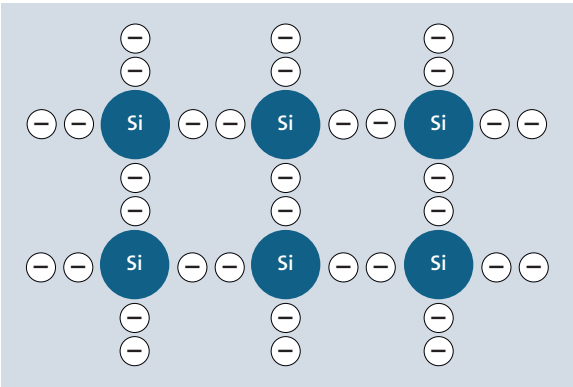


Abbildung 4.22 Halbleiterstruktur

- **n-Dotierung**: Wenn Sie dieses Reinsilizium mit einem fünfwertigen Stoff (z. B. Phosphor, Antimon, Arsen) versetzen, dann führen Sie zusätzliche freie negative Ladungsträger zu. Diese Struktur bleibt elektrisch neutral.

  Die Elektronen »am fünften Arm« sind nicht gebunden und lassen sich, wie bei Metallen, leicht bewegen (siehe Abbildung 4.23).

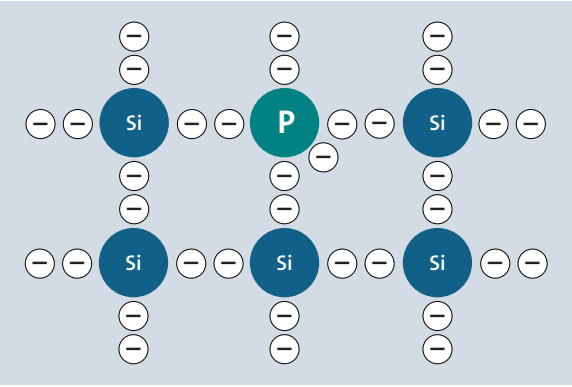


Abbildung 4.23 n-Dotierung mit Phosphor

- **p-Dotierung**: Umgekehrt führen Sie freie positive Ladungsträger zu, wenn Sie Reinsilizium mit einem dreiwertigen Stoff (z. B. Bor, Aluminium, Gallium) versetzen. Hier bleibt unbesetzter Raum zurück, ein Loch, da der dreiwertige »Gast« sich nicht mit allen ihn umgebenden Si-Atomen binden kann (siehe Abbildung 4.24). Auch dieser Halbleiter ist elektrisch neutral.

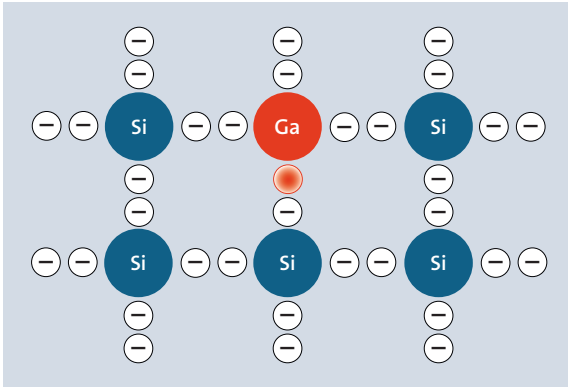


Abbildung 4.24 p-Dotierung mit Gallium

- **Übergang n-p:** Bei der Verbindung eines n-dotierten mit einem p-dotierten *Halbleiterkristall* entsteht entlang der Berührungsflächen ein neutraler Übergangsbereich. In diesem füllen die zusätzlich vorhandenen Elektronen der n-dotierten die leeren Plätze der p-dotierten Zone auf. Dies geschieht im Verhältnis 1:1, also gibt es je überschüssigem Elektron ein »Loch«. Der Übergangsbereich wird auch als *Raumladungszone*, *Sperrschicht* oder *Grenzschicht* bezeichnet. Diese Grenzschicht selbst ist ebenso neutral. Sie hat eine Stärke von ca. 1 µm.

  Durch das Abwandern der Elektronen aus der n-dotierten Seite entsteht eine positive elektrische *Ladungsballung*. Auf der p-dotierten Gegenseite bildet sich eine negative elektrische Ladungsballung. Durch die *Ladungstrennung* baut sich eine elektrische Spannung zwischen diesen Schichten auf. Bei Silizium-Halbleitern beträgt diese ca. 0,7 Volt, bei Germanium 0,3 Volt (Driftspannung).
- **Stromleitung in eine Richtung**: Legen Sie an diesem Halbleiterkristall mit der eben beschriebenen n-p-Verbindung eine elektrische Spannung an, bestimmen Sie damit die Stärke der Grenzschicht und die elektrische Leitfähigkeit.
- **Durchlassrichtung**: Legen Sie den Minuspol einer Spannungsquelle an die n-dotierte Schicht und den Pluspol an die p-dotierte. Es werden fortwährend an der n-dotierten Schicht Elektronen geliefert. Wenn die angeschlossene Spannungsquelle die Driftspannung überschreitet, können sich die Elektronen gleichmäßig

im Halbleiterkristall ausbreiten. Diese Elektronen und die »Löcher« tragen damit zum Ladungstransport durch das Halbleiterkonstrukt bei (siehe Abbildung 4.25, oberer Teil).

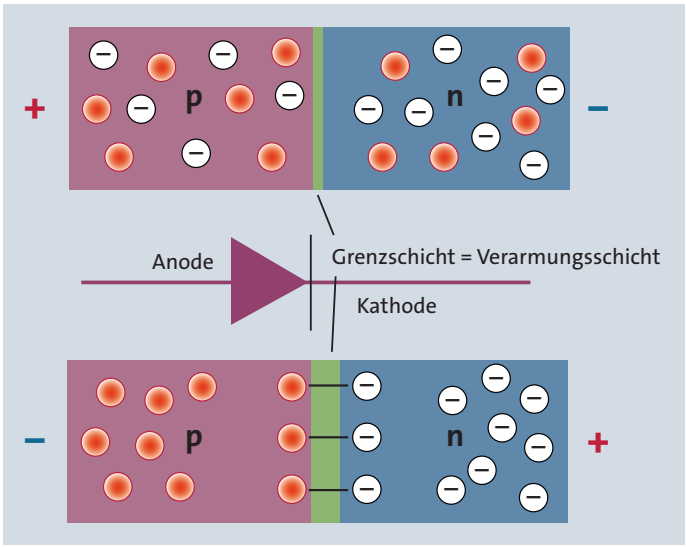


Abbildung 4.25 Aufbau einer Halbleiterdiode und Verhalten bei angelegter Spannung

- **Sperrrichtung**: Legen Sie den Pluspol einer Spannungsquelle an die n-dotierte Schicht und den Minuspol an die p-dotierte. Damit entziehen Sie der Grenzschicht die Elektronen und »Leerstellen«. Die Grenzschicht (*Verarmungszone*) vergrößert sich dadurch weiter, und der elektrische Widerstand erhöht sich immens (siehe Abbildung 4.25, unterer Teil).

Fügen Sie eine weitere p- oder n-Schicht hinzu, entsteht ein Transistor (npn, pnp).

4.5.3 Nichtleiter, Isolatoren

In *Nichtleitern* (*Isolatoren*) sitzen die Elektronen fest. Ladungen können sich hier nicht bewegen, es herrscht eine »Starre«. Die Valenzelektronen (*Bindungselektronen*) können nur mit hoher Energie aus ihrer Bahn herausgelöst werden. Zu den Isolatoren gehören Kunststoffe, Porzellan, Glas, nicht gelöste Salze und chemisch reines Wasser (siehe Abbildung 4.26). Stoffe können ihre *Nichtleitereigenschaft* durch verschiedene Umstände verlieren. Hierzu gehört bei Salzen das Zuführen von Wasser oder das Erwärmen auf hohe Temperaturen.

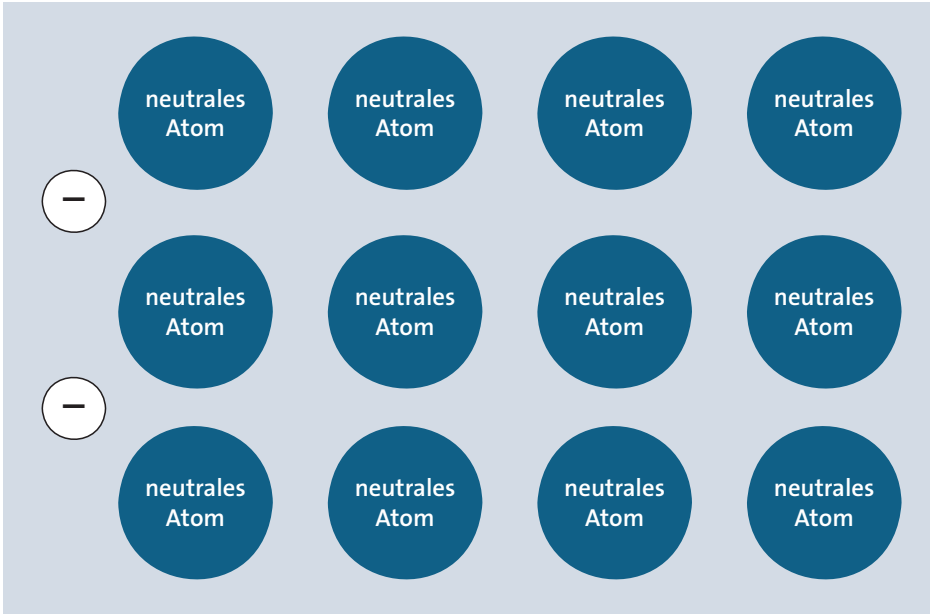


Abbildung 4.26 Strukturmodell eines Nichtleiters

4.5.4 Zusammenfassung

- **Halbleiter**: Einige chemische Elemente (Silizium, Germanium) isolieren bei Raumtemperatur gut (Nichtleiter). Durch Zusätze (*Dotierung*) oder bei hohen Temperaturen werden sie zu elektrischen Leitern.
- **p-leitendes Halbleitermaterial** verfügt über bewegliche Elektronenlücken.
- **n-leitendes Halbleitermaterial** verfügt über frei bewegliche Elektronen (Elektronenüberschuss).
- **Dotierung n-leitendes Halbleitermaterial**: Fünfwertige Stoffe werden zum vierwertigen Halbleitergrundstoff hinzugegeben.
- **Dotierung p-leitendes Halbleitermaterial**: Dreiwertige Stoffe werden zum vierwertigen Halbleitergrundstoff hinzugegeben. (Der Zusatzstoff enthält weniger als vier Valenzelektronen.)
- **Sperrschicht**: Elektronen wandern an der Sperrschicht aus dem n-dotierten Teil in den p-dotierten. Auf der n-Seite baut sich der Elektronenüberschuss hierdurch zum Teil ab, während auf der p-Seite der Elektronenmangel teilweise neutralisiert wird. Auf beiden Seiten der Grenzfläche bildet sich eine isolierende Schicht. (Hinweis: Das entspricht einer Diode in Sperrrichtung!)

- **Verarmungszone:** In einer Halbleiterdiode erweitert sich die Verarmungszone (*Grenzschicht*), wenn man an die Kathode (n-Seite) eine positive und an die Anode (p-Seite) eine negative Spannung anlegt.
- **Metallische Leiter** haben für den Widerstand einen positiven Temperaturkoeffizienten. Je höher der metallische Leiter erwärmt wird, desto schlechter leitet er. Die temperaturbedingte Eigenbewegung der Atome behindert die freien Elektronen mit steigender Temperatur in ihrem Durchfluss.

  In Tabelle 4.4 finden Sie Metallwerkstoffe, nach ihrer Leitfähigkeit geordnet. Im Vorgriff auf Abschnitt 4.6 finden Sie den spezifischen Widerstand und die Leitfähigkeit angegeben. Prägen Sie sich die Reihung und Einteilung (gute/schlechte Leiter) ein.

Werkstoff	Leitfähigkeit	Spezifischer Widerstand	Eigenschaft
Silber	63	0,016	gute Leiter
Kupfer	56	0,0178	
Gold	45	0,022	
Aluminium	37	0,027	
Zinn	8	0,115	schlechte Leiter
Blei	5	0,208	
Quecksilber	1	0,958	

Tabelle 4.4 Leitende Werkstoffe (Auswahl)

Die Leitfähigkeit wird in $S \times m/mm^2$, der spezifische Widerstand in $\Omega \times mm^2/m$ angegeben.

- **Isolatoren/Nichtleiter:**
  - Epoxyd
  - Polyethylen (PE)
  - Polystyrol (PS)
  - Polyvinylchlorid (PVC)
  - Pertinax
  - Teflon
  - Glas
  - Porzellan
  - chemisch reines Wasser (Destillat)

4.6 Spezifischer Widerstand und Leitfähigkeit

Was bisher verschwiegen wurde: Im »normalen« Umfeld, in dem wir leben, gibt es keine verlustfreie Ladungsübertragung. Das, was an elektrischer Ladung am anderen Leitungsende nicht ankommt, wird in Wärme umgesetzt. (Der Hintergrund ist das erste Gesetz der Thermodynamik, das *Energieerhaltungsgesetz*: Energie kann nicht vernichtet werden.)

In Abschnitt 4.5 haben Sie das Stromleitverhalten verschiedener Stoffe kennengelernt – hier kommen jetzt die Berechnungen hinzu.

Die Leitfähigkeit wird durch die Zahl der freien Ladungsträger bestimmt. Aber diese sind in ihrem Weg durch den Leiter zahlreichen *Widerständen* ausgesetzt: Sie stoßen mit den Atomen zusammen.

Für jedes Leitermaterial wurden der spezifische Widerstand und die Leitfähigkeit ermittelt (siehe Tabelle 4.4).

Der *spezifische Widerstand* ist vom Material des Leiters abhängig und stellt eine Materialkonstante dar. Er gibt den elektrischen Widerstand eines Materials bei 20°C an, wenn ein Leiter aus diesem Material eine Länge von 1 m und einen Querschnitt von 1 mm^2 aufweist.

- Formelzeichen: ρ (ausgesprochen Rho)
- Einheit: $\frac{\Omega \times mm^2}{m}$

Gute Leiter verfügen über einen niedrigen spezifischen Widerstand.

Die *Leitfähigkeit* ist der Kehrwert des spezifischen Widerstands.

- Formelzeichen: κ (ausgesprochen Kappa)
- Einheit: $\frac{m}{\Omega \times mm^2} = \frac{1}{\rho}$

Sie wird verwendet, da die Zahlenwerte hier leichter handhabbar sind. Gute Leiter verfügen über eine hohe Leitfähigkeit.



Flächen und Längen

Der Querschnitt ist eine Flächenangabe, der Durchmesser eine Längenangabe!

Auf den *Widerstand* gehe ich in Kapitel 5 ausführlich ein.

- Formelzeichen: ***R***
- Einheit: Ω (Ohm)

Sie benötigen folgende Formel für die Berechnung des Widerstands, wenn Ihnen ρ (rho), die Leiterlänge und der Leiterquerschnitt (also die Fläche) bekannt sind:

$$R = \frac{\rho \times l}{A}$$

Zudem sollten Sie sich diese Umstellung für die Berechnung der Leiterlänge aus dem Wert ρ, dem gemessenen Widerstand und dem Leiterquerschnitt einprägen:

$$l = \frac{R \times A}{\rho}$$

Übung

Zu Beginn führen Sie gleich eine Berechnung durch, in der eine Falle versteckt ist. Die bekannten Angaben eines Stücks Aluminiumdraht sind folgende:

- Material: Aluminium
- Länge: 3,8 m
- Drahtdurchmesser: 1,6 mm

Gesucht ist der Widerstand in Ω (Ohm) des Drahtstücks.

Lösung:

- Schritt 1: Aus Tabelle 4.4 entnehmen Sie den spezifischen Widerstand, also $0{,}027\ \Omega \times \text{mm}^2/\text{m}$.
- Schritt 2: Sie müssen vom Drahtdurchmesser auf den Querschnitt umrechnen! Gegeben ist der Durchmesser, dieser ist der doppelte Kreisradius. Die Kreisfläche A berechnen Sie, indem Sie die Kreiszahl π (3,14159) mit dem Quadrat des Radius multiplizieren:

  $$A = \pi \times r^2$$

  Tippen Sie Folgendes in den Taschenrechner ein: (1,6 ÷ 2) x^2 × π =

  Das Zwischenergebnis der Querschnittsfläche ist abgelesen 2,01 und gerundet 2 mm^2.
- Schritt 3: Jetzt können Sie den Widerstand R mit dieser Formel bestimmen:

  $$R = \frac{\rho \times l}{A} = \frac{0{,}027\ \frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}} \times 3{,}8\ \text{m}}{2\ \text{mm}^2} = 0{,}05\ \Omega$$

  Der Weg mit dem Taschenrechner: 0,027 × 3,8 ÷ 2 =

  Sie kommen zum Ergebnis 0,0513, gerundet 0,05 Ω.

Ein weiterer Aufgabentyp gibt Ihnen als bekannte Angaben:

- Kupferkabel mit Querschnitt 1,5 mm^2
- gemessener Widerstand: 1 Ω

Gesucht ist in dieser Aufgabe die Kabellänge.

Lösung:

Stellen Sie die Formel um, und fügen Sie die entsprechenden Werte ein:

Aus

$$R = \frac{\rho \times l}{A}$$

wird:

$$l = \frac{R \times A}{\rho} = \frac{1\Omega \times 1{,}5\text{mm}}{0{,}0178 \frac{\Omega \times \text{mm}}{\text{m}}} = 84{,}26\text{m}$$

Kapitel 5
Die Welt der Widerstände

Sich gegen den Strom stellen – das machen die *Widerstände*. Damit spielen sie eine wichtige Rolle in der Elektrotechnik: Sie begrenzen den Stromfluss, indem sie den Ladungstransport verlangsamen. Normale Widerstände, auch als *feste Widerstände* bezeichnet, haben einen konstanten Widerstandswert, der unabhängig von der Temperatur bleibt. Zu den gängigen Arten zählen Kohleschichtwiderstände (kostengünstig), Metallschichtwiderstände (geringere Toleranzen) und Drahtwiderstände (geeignet für hohe Stromstärken).

Unter den verschiedenen Arten von Widerständen sind NTC-Widerstände (*Negative Temperature Coefficient*) und PTC-Widerstände (*Positive Temperature Coefficient*) besonders interessant:

- *NTC-Widerstände* zeichnen sich dadurch aus, dass ihr Widerstand mit steigender Temperatur abnimmt. Das bedeutet, dass sie bei höheren Temperaturen den Strom stärker fließen lassen.
- Im Gegensatz dazu haben *PTC-Widerstände* die Eigenschaft, dass ihr Widerstand mit steigender Temperatur zunimmt. Dadurch begrenzen sie den Strom bei höheren Temperaturen stärker.

In der Praxis werden NTC- und PTC-Widerstände aufgrund ihrer temperaturabhängigen Eigenschaften in verschiedenen Anwendungen eingesetzt, in denen normale Widerstände aufgrund ihres konstanten Widerstandswerts ungeeignet sind, beispielsweise bei einer Einschaltstrombegrenzung.

- **Definition**: Der *Widerstand* schränkt den elektrischen Ladungsfluss (Strom) ein. Die Ladungsträger stoßen gegen die Ionen des Metallgitters im Leiter und werden dadurch in ihrem Fluss gebremst. Der Widerstandswert ist der Quotient aus Spannung geteilt durch Strom.
- Formelzeichen: ***R*** (Résistance)
- Einheit: Ω (Ohm)
- Berechnung, wenn Strom und Spannung bekannt sind:

$$R[\Omega] = \frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}} = \frac{U\,[\text{V}]}{I\,[\text{A}]}$$

- Berechnung, wenn der spezifische Widerstand bekannt ist:

$$R\,[\Omega] = \frac{\text{spezifischer Widerstand} \times \text{Länge [m]}}{\text{Querschnittsfläche [mm}^2\text{]}} = \frac{\rho[\frac{\Omega \times \text{mm}^2}{\text{m}}] \times l[\text{m}]}{A\,[\text{mm}^2]}$$

- Serienschaltung von Widerständen:

$$R_{\text{gesamt}} = R_1 + R_2 + R_3 \ldots$$

- Parallelschaltung von Widerständen (Kehrwert nicht vergessen!):

$$\frac{1}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots$$

- Parallelschaltung von Widerständen, wenn alle Widerstandswerte identisch sind:

$$R_{\text{gesamt}} = \frac{\text{Widerstandswert}}{\text{Anzahl}} = \frac{R}{N}$$

5.1 Schaltzeichen

Widerstände gibt es in verschiedenen Bauformen und für unterschiedliche Einsatzbereiche. Dies schlägt sich auch in der hohen Zahl von Schaltzeichen nieder (siehe Abbildung 5.1 und Tabelle 5.1).

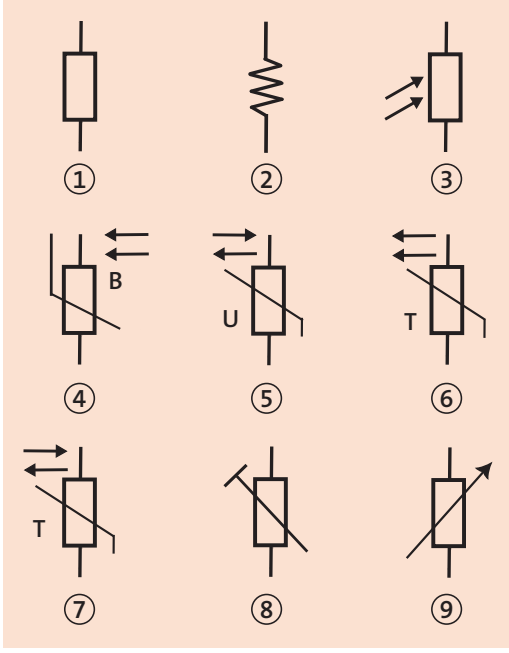


Abbildung 5.1 Schaltzeichen für Widerstände

Nr.	Typ	Nr.	Typ
1	Widerstand allgemein (Symbol gemäß EN 60617)	6	Kaltleiter (positiver Temperaturkoeffizient, PTC)
2	Widerstand allgemein (Symbol gemäß ANSI)	7	Heißleiter (negativer Temperaturkoeffizient, NTC)
3	Photowiderstand (LDR)	8	Trimmpotentiometer, variabler Widerstand
4	Feldplatte (Magnetfeldsensor, MDR)	9	Potentiometer, variabler Widerstand (»Handregler«)
5	Varistor (spannungsabhängiger Widerstand, VDR)		

Tabelle 5.1 Zeichenerklärung

Die Grundformen der Widerstandssymbole unterscheiden sich bezüglich ihrer Darstellung je nach verwendeter Norm. Gemäß der EN 60617 verwendet man ein Rechteck, während in den ANSI-Normen eine gezackte Linie zu finden ist.

5.2 Widerstände als Bauelement

5.2.1 Bauausführungen von Widerständen

Widerstände mit festem sehen Sie in Abbildung 5.2 und Abbildung 5.4. Die bedrahteten Ausführungen sind von der Leistung her abgestuft dargestellt, Sie sehen also den Hochleistungswiderstand mit 25 Watt Belastbarkeit oben, die Viertelwattausführung unten. Bedrahtete Widerstände mit entsprechender Größe haben einen aufgedruckten Wert. Eine einheitliche Kennzeichnung gibt es aber leider nicht. Einige Hersteller drucken den Wert direkt in Ohm (Ω) auf, so wie es am obersten Exemplar in Abbildung 5.2 zu sehen ist. Andere verwenden eine Kodierung. Der Buchstabe R steht hierbei anstelle eines Kommas. So stehen die Aufdrucke 22R für 22 Ω, 2R2 für 2,2 Ω und R22 für 0,22 Ω. Sie müssen im letzten Fall hier gedanklich die Ziffer 0 voranstellen. Der Buchstabe k steht für kΩ (Wert × 1000), M für MΩ (Wert × 1.000.000). Entsprechend stehen 22k für 22.000 Ω und 2k2 für 2.200 Ω, 22M für 22.000.000 Ω oder 2M2 für 2.200.000 Ω.

Beispiel aus Abbildung 5.2: Hier trägt der zweite Widerstand von oben den Aufdruck 51R, was 51 Ω bedeutet. Während es bei den größeren Gehäusen also kein Problem ist, die Werte als Klartext aufzudrucken, benötigt man für die »kleinen Runden« einen *Farbcode* (siehe Tabelle 5.3). Dabei erkennen Sie anhand der Ringzahl, ob es sich um

einen Kohleschichtwiderstand (4 Ringe) oder um einen Metallschichtwiderstand (5 Ringe) handelt. Bei Letzteren kann der Wert genauer angegeben werden.

Widerstände haben verschiedene Eigenschaften bezüglich ihrer Verwendbarkeit (siehe Tabelle 5.2).

Ausführung	Verwendung
Drahtwiderstände	Gleichspannungsbereich
Metalloxidwiderstände	Gleichspannung bis Hochfrequenz (induktionsarm)
Kohleschichtwiderstände	Gleichspannung bis Hochfrequenz (induktionsarm)
Metallschicht-/ -filmwiderstände	Messtechnik

Tabelle 5.2 Verwendungsbereiche von Widerständen

In der Funktechnik werden vor allem Metalloxidwiderstände verwendet. Sie finden hier deutlich höher belastbare Ausführungen im Vergleich zu den Kohleschichttypen vor. Zudem führen Metalloxidwiderstände Verlustwärme besser ab und sind außerdem induktionsarm. Damit können Sie sich einen Abschlusswiderstand für Ihre Sendeanlage aufbauen (*Dummy Load*).

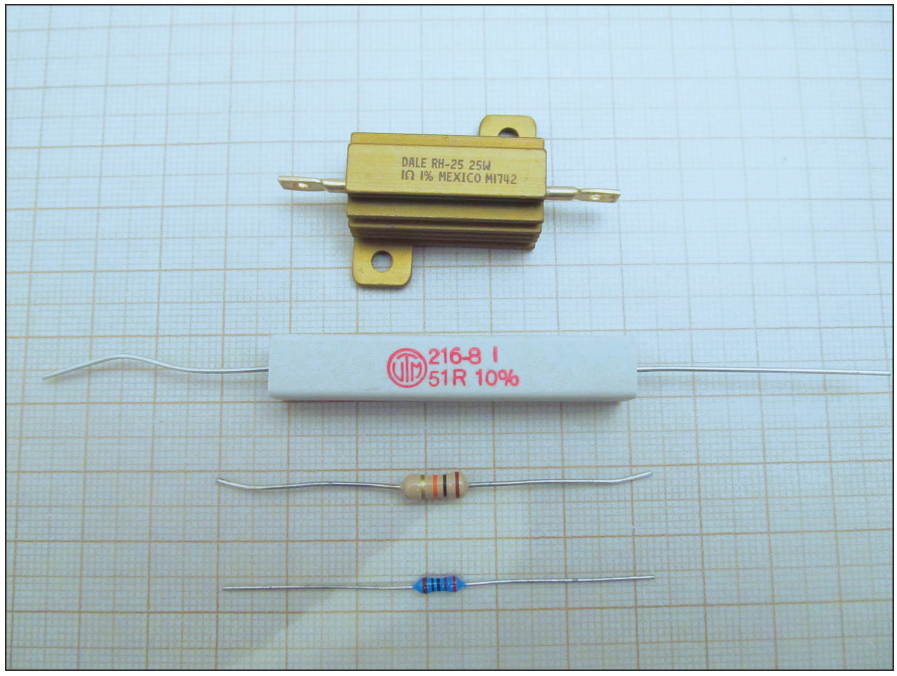


Abbildung 5.2 Bedrahtete Widerstände in verschiedenen Leistungsklassen

Ringfarbe	Ringe 1 + 2, (Ringe 1–3)	Ring 3 (4) (Multiplikator)	Ring 4 (5) (Toleranz in %)
Schwarz	0	1	–
Braun	1	× 10	1 %
Rot	2	× 100	2 %
Orange	3	× 1.000	–
Gelb	4	× 10.000	–
Grün	5	× 100.000	0,5 %
Blau	6	× 1.000.000	0,25 %
Violett	7	× 10.000.000	0,1 %
Grau	8	–	
Weiß	9	–	
Gold	–	× 0,1	5 %
Silber	–	× 0,01	10 %
ohne	–	–	20 %

Tabelle 5.3 Farbcode der Widerstände

Übung

Bestimmen Sie den Nennwert und den möglichen Wertebereich des abgebildeten Widerstands (siehe Abbildung 5.3).

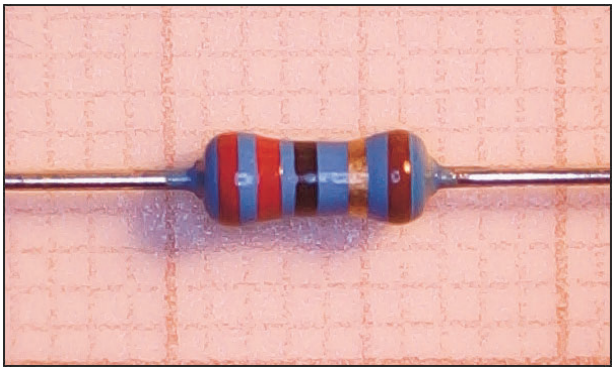


Abbildung 5.3 Widerstandswert bestimmen

Lösung:

- Schritt 1: Richten Sie den Widerstand zunächst richtig herum aus. *Rechts* muss hinter dem letzten Farbring mehr Grundfarbe des Widerstandskörpers sichtbar sein als links gegenüber. Zudem können die Metallicfarben Silber und Gold nur rechts stehen.
- Schritt 2: Vergleichen Sie die Farben aus Tabelle 5.3, und versuchen Sie, die Musterlösung nachzuvollziehen (siehe Tabelle 5.4).

Ring 1	Ring 2	Ring 3	Ring 4	Ring 5
Rot	Rot	Schwarz	Gold	Braun
2	2	0	0,1	1 %

Tabelle 5.4 Lösungshinweis zur Bestimmung des Widerstandswerts

- Berechnen Sie den abgelesenen Wert: $220 \times 0{,}1 = 22\ \Omega$
- Der Wertebereich bei 1 % Toleranz hat ein Minimum von 21,78 Ω und ein Maximum von 22,22 Ω.

SMD-Widerstände haben zwar einen Buchstaben-/Zahlencode aufgedruckt, dieser muss aber aus Platzgründen ebenso verschlüsselt werden (siehe Abbildung 5.4).



Abbildung 5.4 SMD-Widerstände

5.2.2 Wertangaben für SMD-Widerstände

Die Kennzeichnung und der Zifferncode von SMD-Widerständen sind standardisiert und folgen einem bestimmten Muster. Die Miniaturisierung der Bauteile hatte zur Folge, dass die Bezeichnung des Widerstandswertes mit einem alphanumerischen Code dargestellt wird. SMD-Widerstände werden mit zwei-, drei- und vierstelligen Buchstaben-Ziffern-Kombinationen gekennzeichnet. SMD-Chips mit der sehr klei-

nen Bauform 0603 sind teilweise nicht bezeichnet, und noch kleinere Bauformen wie 0402 erhalten gar keine Kennzeichnung mehr.

Zweistelliger Zeichencode

Die Kennzeichnung besteht aus einem Buchstaben, gefolgt von einer Ziffer. Die Großbuchstaben entsprechen der 1. Dekade der E24-Normreihe mit einer Toleranz von ±5 %. (Beginnt der Code mit einem Kleinbuchstaben, so handelt es sich um einen Sonderwert in anderer Abstufung.)

1. Buchstabe (Großbuchstabe) für E24 Normwerte

A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z
1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

1. Buchstabe (Kleinbuchstabe) für Sonderwerte

a	b	d	e	f	m	n	t	y															
2,5	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0																

2. Zeichen als Multiplikator mit 10n für n= 0 bis 8 und 0,1 für n = 9

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9														

Beispiele:

D3 → $1{,}3 \times 10^3 = 1{,}3\ \text{k}\Omega$

b2 → $3{,}5 \times 10^2 = 350\ \Omega$

T9 → $5{,}1 \times 10^{-1} = 0{,}51\ \Omega$

Dreistelliger Zifferncode

Die Widerstandswerte entsprechen der Normreihe E24 mit einer Toleranz von ±5 %. Der Wert der ersten beiden Ziffern wird mit der Zehnerpotenz der dritten Ziffer multipliziert. Die Ziffer für den Zehnerexponenten kann fehlen; die Kennzeichnung besteht dann aus zwei Ziffern und dem Buchstaben R, der als Kommastelle dient. (Ist die mittlere Ziffer unterstrichen, dann ist die bestmögliche Toleranz nur ±5 % oder schlechter.)

1. Ziffer		1	2	3	4	5	6	7	8	9
2. Ziffer	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
3. Ziffer	0	1	2	3	4	5	6	7		

Beispiele:

470 → $47 \times 10^0 = 47\ \Omega$

514 → $51 \times 10^4 = 510\ \text{k}\Omega$

1R0 → $1{,}0 = 1{,}0\ \Omega$

Dreistelliger Zeichencode

Die Kennzeichnung erfolgt durch zwei Ziffern und entsprechend der Normreihe E96 mit einer Toleranz von ±1 %. Mit folgender Tabelle kann der Widerstandswert ermittelt werden:

Code	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16
Wert	100	102	105	107	110	113	115	118	121	124	127	130	133	137	140	143
Code	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Wert	147	150	154	158	162	165	169	174	178	182	187	191	196	200	205	210
Code	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48
Wert	215	221	226	232	237	243	249	255	261	267	274	280	287	294	301	309
Code	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
Wert	316	324	332	340	348	357	365	374	383	392	402	412	422	432	442	453
Code	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
Wert	464	475	487	499	511	523	536	549	562	576	590	604	619	634	649	665
Code	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
Wert	681	698	715	732	750	768	787	806	825	845	866	887	909	931	953	976

Code	A	B	C	D	E	F	X	Y
10er Exponent	0	1	2	3	4	5	-1	-2
Multiplikator	1	10	100	1000	10000	100000	0,1	0,01

Beispiele:

26C → $182 \times 10^2 = 18{,}2\ \text{k}\Omega$

81D → $681 \times 10^3 = 681\ \text{k}\Omega$

03X → $105 \times 10^{-1} = 10{,}5\ \Omega$

Vierstelliger Zifferncode

Die ersten drei Ziffern geben den direkten Wert an, die vierte Ziffer den Zehnerexponenten des Multiplikators. Die letzte Ziffer kann auch als Anzahl der anzufügenden Nullen interpretiert werden. Die Kennzeichnung entspricht der Normreihe E96 mit einer Toleranz von ±1 %.

Wenn in dem Zifferncode ein R vorhanden ist, markiert es die Kommastelle des Widerstandswertes in Ohm und der Multiplikator fehlt.

Beispiele:

1020 → $102 \times 100^0 = 102\ \Omega$

1653 → $165 \times 10^3 = 165\ \text{k}\Omega$

22R1 → $22{,}1 = 22{,}1\ \Omega$

6R80 → $6{,}80 = 6{,}8\ \Omega$

Übung

Entschlüsseln Sie die Widerstandswerte aus Abbildung 5.4.

Lösung:

- Der Wert des oberen Widerstandes, beschriftet mit R050, wird wie folgt aufgelöst:

  Links vom Buchstaben R steht keine Zahl, also wird hier die 0 ergänzt (0,050). R entspricht zudem dem Multiplikator 1 (0,050 × 1). Der Wert beträgt damit 0,050 Ω, was 50 mΩ entspricht.
- Unterer Widerstand, beschriftet mit 393:

  Zusammensetzung des Werts: 39, Multiplikator 10^3, ergibt 39.000 Ω, was 39 kΩ entspricht.

5.2.3 Manuell veränderbare Widerstände

Manuell veränderbare Widerstände dienen Einstell- und Regelzwecken. In Abbildung 5.5 sehen Sie unterschiedliche Ausführungen (zeilenweise von links nach rechts):

- **Trimm-Potentiometer**: Diese Modelle können als feste Einstellregler (Trimmer) oder – mit eingesteckter Achse – als Potentiometer verwendet werden.
- **Potentiometer**: Diese Ausführung kann mittels Zentralbefestigung in einer Frontplatte befestigt werden. Die Kontakte werden entweder direkt auf die Leiterplatte gelötet oder per Kabel mit ihr verbunden.
- **Spindel-Trimmer**: Damit können Sie sehr genaue Einstellungen vornehmen.
- **(Trimm-)Potentiometer** in gekapselter Bauform: Dieses Bauelement ist gut vor Staub und Feuchtigkeit geschützt.

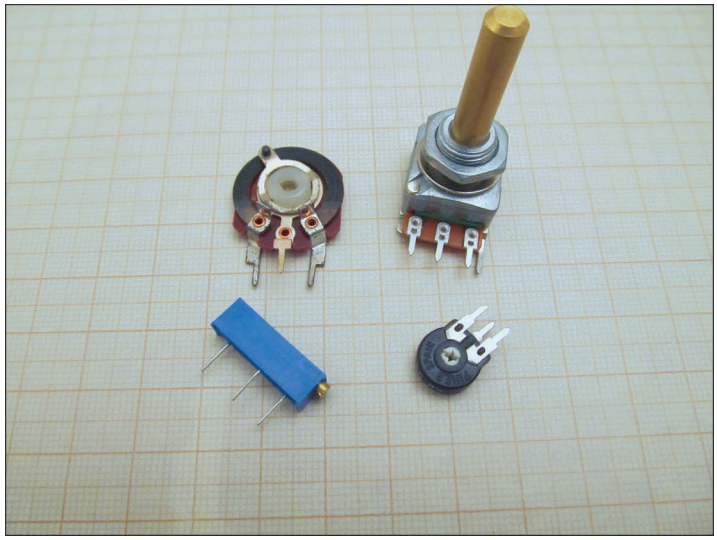


Abbildung 5.5 Veränderbare Widerstände

Abbildung 5.6 zeigt das (Trimm-)*Potentiometer* im Detail. Die runde Widerstandsbahn hat an ihren beiden Endkontakten den angegebenen Widerstandswert. Der Schleifer mit dem Graphitschleifstück, das mit dem Mittelkontakt verbunden ist, greift die dazwischenliegenden, beliebigen Werte ab.

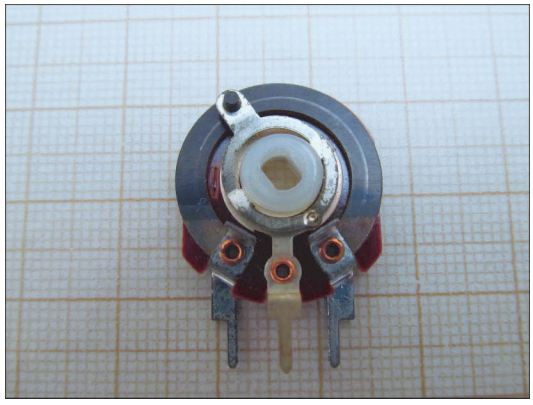


Abbildung 5.6 Potentiometer im Detail

Die Widerstandsbahn kann einen linearen oder logarithmischen Werteverlauf aufweisen. Es gibt anstelle runder auch linienförmige Ausführungen (»Schieberegler«).

Ein weiterer, selbst konfigurierbarer Widerstandstyp ist ein aus *Konstantandraht* hergestellter Drahtwiderstand. Konstantan hat einen sehr niedrigen Temperaturkoeffizienten, d. h., der spezifische Widerstand ändert sich nur wenig bei Temperaturschwankungen. Dieses Drahtmaterial ist in verschiedenen Ausführungen (unisoliert,

isoliert, mit hitzebeständiger Isolation), mit spezifischen Widerständen und Querschnitten lieferbar. Solange Sie den »Drahtwiderstand« nicht aufwickeln, können Sie ihn auch für hochfrequente Anwendungen benutzen. Ist das Aufwickeln unumgänglich, lassen Sie Abstände zwischen den Windungen. Führen Sie die dabei entstehende Spule *bifilar* aus! Die dadurch gegenläufig arbeitenden Magnetfelder heben sich auf, und die Konstruktion bleibt damit induktionsarm. Abbildung 5.7 zeigt ein Anschauungsmodell.

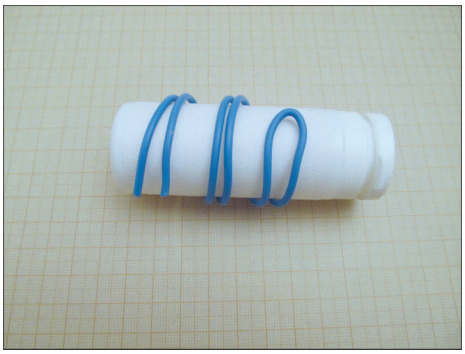


Abbildung 5.7 Bifilare Wicklung

5.2.4 Widerstandsreihen

Zu Beginn der 50er-Jahre kamen die E-Reihen in Gebrauch. Daher gibt es Standardwerte, die von der Industrie und Entwicklung verwendet werden. Die *E-Reihen* unterscheiden sich hinsichtlich der Zahl der Werte je Dekade und der Toleranz. Die Ziffer der E-Reihenbezeichnung gibt die Anzahl der Werte je Dekade an. Eine *Dekade* umfasst die Werte vom Ausgangswert bis unterhalb des Zehnfachen; das Zehnfache selbst zählt nicht mehr dazu. Mathematisch startet eine Dekade z. B. bei 1 und endet z. B. bei 9,99999 unendlich. Gleiches gilt für den Bereich 0,1 bis 0,99999 unendlich oder 100 bis 999,99999 unendlich. Die Dekade der Widerstandsreihe E24 umfasst damit die Werte 1,0 bis 9,1.

Dabei gilt: Je höher die Ziffer in der Reihenbezeichnung ist, desto geringer ist die Toleranz. Andernfalls könnten sich Widerstandswerte überlappen (siehe Tabelle 5.5). Dies ist aber heute nicht mehr allgemeingültig! Auch Widerstände aus »niedrigen« Reihen können hiervon abweichend eine geringere Toleranz aufweisen.

E-Reihe	Toleranz	Faktor
E3	über 20 %	2,1544
E6	20 %	1,4677

Tabelle 5.5 Standardtoleranzen und Berechnungsfaktoren der E-Reihen

E-Reihe	Toleranz	Faktor
E12	10 %	1,2115
E24	5 %	1,1006
E48	2 %	1,0491
E96	1 %	1,0242
E192	0,5 %	1,0120

Tabelle 5.5 Standardtoleranzen und Berechnungsfaktoren der E-Reihen (Forts.)

Sie können die Widerstandswerte einer E-Reihe nach einer Formel berechnen. Einfacher geht es, eine Reihentabelle zu benutzen. In Tabelle 5.6 finden Sie die Werte der Reihen E12 und E24.

Reihe					
E12	**E24**	**E12**	**E24**	**E12**	**E24**
1,0	1,0	2,2	2,2	4,7	4,7
–	1,1	–	2,4	–	5,1
1,2	1,2	2,7	2,7	5,6	5,6
–	1,3	–	3,0	–	6,2
1,5	1,5	3,3	3,3	6,8	6,8
–	1,6	–	3,6	–	7,5
1,8	1,8	3,9	3,9	8,2	8,2
–	2,0	–	4,3	–	9,1

Tabelle 5.6 Werte der E-Reihen E12 und E24

5.3 Berechnung von Widerständen, Spannung, Strom, Leistung

Die Berechnung eines Widerstands ist anhand folgender Ausgangswerte möglich:

- Strom und Spannung
- Leistung und Spannung
- Leistung und Strom

Wenn die Pole einer Spannungsquelle über einen Widerstand miteinander verbunden sind, fließt Strom. Mit dem Amperemeter können wir diesen messen. Abbildung 5.8 zeigt den Aufbau.

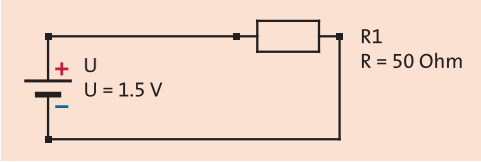


Abbildung 5.8 Stromkreis mit einem Widerstand

5.3.1 Widerstandsberechnungen im Detail (Strom und Spannung)

Die Grundformel für diese Berechnungen bezieht sich auf die Spannung, die in diesem Stromkreis wirkt. Die Formel lautet:

Spannung [V] = Widerstand [Ω] × Strom [A]

Reduziert auf die Formelzeichen wird daraus:

U [V] = R [Ω] × I [A]

Bekannte Werte:

- Widerstand: 220 Ω
- Gemessener Strom: 500 mA
- Gesucht: Spannung

Berechnung: 220 [×] 0,5 [=] 110 Volt. Achten Sie wie immer auf die richtigen SI-Präfixe! Sie müssen die Angaben in mA in A umwandeln.

Lesen Sie die Werte aus dem Schaltbild in Abbildung 5.8 aus. Sie kennen diese Werte:

- Spannung: 1,5 V
- Widerstand: 50 Ω

Sie möchten wissen, welcher Strom (A) hier fließt. Die Formel wird also umgestellt:

$$\text{Strom [A]} = \frac{\text{Spannung [V]}}{\text{Widerstand [Ω]}}$$

Nur mit Formelzeichen:

$$I\ [\text{A}] = \frac{U\ [\text{V}]}{R\ [\Omega]}$$

Der Taschenrechner hilft:

1,5 [÷] 50 [=]

Ergebnis: 0,03 A

In einer weiteren Aufgabenstellung sind Ihnen diese Werte bekannt:

- Es fließt ein Strom von 20 A.
- Es liegt eine Spannung von 13,8 Volt an.

Wie hoch ist der Widerstand *R*?

Wiederum muss die Formel umgestellt werden:

$$R[\Omega] = \frac{\text{Spannung}}{\text{Strom}} = \frac{U\,[\text{V}]}{I\,[\text{A}]}$$

In den Taschenrechner geben Sie ein:

13,8 [÷] 20 [=]

Ergebnis: 0,69 Ω

Dies ist ein Wert aus der Praxis. Moderne Kurzwellenfunkgeräte, die am 12-Volt-Bordnetz von Fahrzeugen betrieben werden können, benötigen diese hohen Ströme, um die Ausgangsleistung von rund 100 Watt erzielen zu können.



Ohmsches Gesetz

Diese Berechnungen sind auch unter dem Namen *Ohmsches Gesetz* bekannt.

5.3.2 Widerstandsberechnungen und Leistung

Im Vorgriff auf die Leistungsberechnung in Kapitel 6 finden Sie hier auch schon einige Informationen zum Thema Leistung.

Die *elektrische Leistung* P errechnet sich aus Strom × Spannung. Im Zusammenhang mit Widerständen ergeben sich für die Praxis einige Ableitungen.

- **Definition**: Die elektrische Leistung gibt an, wie viel elektrische Energie in einer Sekunde in andere Energieformen umgewandelt wird bzw. Arbeit verrichtet.
- Formelzeichen: ***P***, nicht verwechseln mit elektrischer Arbeit ***W***!
- Einheit: **W** (Watt) (1 V × 1 A)
- Berechnung:

  $$\textit{Leistung}\quad P\,[W] = \textit{Spannung}\,[V] \times \textit{Strom}\,[A] = U\,[V] \times I\,[A]$$

- Weitere Berechnungsmöglichkeit mit einem Widerstandswert:

  Die Leistung vervierfacht sich, wenn entweder die Spannung oder der Strom verdoppelt wird. Es gelten:

  $$\textit{Leistung}\ P[W] = (\textit{Strom}[A])^2 \times \textit{Widerstand}[\Omega] = I[A]^2 \times R[\Omega]$$

bzw.:

$$Leistung = P\,[W] = \frac{(Spannung\,[V])^2}{Widerstand\,[\Omega]} = \frac{(U[V])^2}{R[\Omega]}$$

Übung

Sie messen in einem Stromkreis mit einem Widerstand folgende Werte:

- Spannung: 12 Volt
- Strom: 250 mA

Berechnen Sie die Leistung.

Lösung: Zuerst rechnen Sie den Stromwert auf das »richtige« SI-Präfix um: 250 mA entsprechen 0,25 A.

Nun fahren Sie mit der Berechnung fort:

$P = U \times I = 12V \times 0,25A = 3W$

Ein Sender gibt 100 Watt an einen 50-Ohm-Messwiderstand ab. Welchen Wert muss das hierzu eingeschleifte Hochfrequenz-Amperemeter anzeigen?

Sie haben hier nur zwei Werte: 100 W Leistung und 50 Ω Widerstand.

Sie müssen die Formel

$P = I^2 \times R$

so umstellen:

$$I\,[A] = \sqrt{\frac{P\,[W]}{R\,[\Omega]}}$$

Mit den meisten Taschenrechnern funktioniert dies so:

100 [÷] 50 [=] [√]

Ergebnis: 1,41 A

Bei einigen Taschenrechnermodellen lehnt sich die Eingabe mehr an die Formel an:

[√] 100 [÷] 50 [=]

Übung

Ein weiteres Beispiel: Für einen Widerstand mit 10 kΩ werden eine maximale Spannungsfestigkeit von 0,5 kV und eine maximale Belastbarkeit von 2 Watt angegeben. Welche Gleichspannung dürfen Sie maximal anlegen, damit der Widerstand nicht überlastet und beschädigt wird?

Lösung:

Ihnen sind bekannt: $P = 2$ W, $R = 10.000\ \Omega$, die Spannungsfestigkeit benötigen wir hier nicht zur weiteren Berechnung.

$$U\,[\mathrm{V}] = \sqrt{P\,[\mathrm{W}] \times R\,[\Omega]} = \sqrt{2\mathrm{W} \times 10000\Omega}$$

Je nach Taschenrechnermodell geben Sie ein:

[√■] 2 [×] 10000 [=]

Oder

2 [×] 10000 [=] [√]

In beiden Fällen lesen Sie dieses Ergebnis ab: 141,421.

Gerundet heißt das also, dass 141 Volt nicht überschritten werden dürfen.

Widerstandsberechnungen (»ohmsches Gesetz«), Leistung

- Bekannt: **Widerstand [R], Strom [I],** gesucht: **Spannung [U]**

  $U[V] = R[\Omega] \times I[A]$

- Bekannt: **Spannung [U], Widerstand [R]**, gesucht: **Strom [I]**

  $$I[A] = \frac{U[V]}{R[\Omega]}$$

- Bekannt: **Spannung [U], Strom [I],** gesucht: **Widerstand [R]**

  $$R[\Omega] = \frac{U[V]}{I[A]}$$

- Bekannt: **Spannung [U], Strom [I]**, gesucht: **Leistung [P]**

  $P[W] = U[V] \times I[A]$

- Bekannt: **Leistung [P], Spannung [U]**, gesucht: **Strom [I]**

  $$I[A] = \frac{P[W]}{U[V]}$$

- Bekannt: **Leistung [P], Strom [I]**, gesucht: **Spannung [U]**

  $$U[V] = \frac{P[W]}{I[A]}$$

- Bekannt: **Leistung [P], Strom [I]**, gesucht: **Widerstand [R]**

  $$R[\Omega] = \frac{P[W]}{(I[A])^2}$$

- Bekannt: **Leistung [P], Spannung [U]**, gesucht: **Widerstand [R]**

  $$R[\Omega] = \frac{(U[V])^2}{P[W]}$$

- Bekannt: **Widerstand [R], Leistung [P]**, gesucht: **Strom [I]**

$$I[A] = \sqrt{\frac{P[W]}{R[\Omega]}}$$

- Bekannt: **Widerstand [R], Leistung [P]**, gesucht: **Spannung [U]**

$$U[V] = \sqrt{P[W] \times R[\Omega]}$$

5.4 Innenwiderstand von Strom- und Spannungsquellen

Strom- und Spannungsversorgungen reagieren bei Belastung (also bei einem geschlossenen Stromkreis mit entsprechendem »Lastwiderstand«) mit einem Sinken der Spannung. Aus dem gemessenen Spannungsabfall und dem bekannten Wert des Stroms können Sie den Innenwiderstand berechnen.

- **Definition**: Der *Innenwiderstand* **(R_i)** gehört zu den Eigenschaften einer Spannungsquelle. Er repräsentiert den Widerstand innerhalb der Spannungsquelle selbst. Wenn ein Strom aus der Spannungsquelle entnommen wird, führt der Innenwiderstand zu einem Spannungsabfall am Ausgang der Spannungsquelle, da er den Stromfluss begrenzt und somit eine Spannungsteilung bewirkt.
- Begriffe:
  - *Leerlaufspannung* **[$U_{Leerlauf}$]:** Gemessene Spannung an unbelasteter Spannungsquelle
  - *Kurzschlussspannung* **[U_{KI}]:** Gemessene Spannung an kurzgeschlossener Spannungsquelle
  - *Maximaler Strom* **[I_{max}]:** Dieser fließt beim Kurzschluss (= Kurzschlussstrom, Lastwiderstand = 0 Ω).
  - *Spannungsabfall* **[ΔU]**: Berechnet sich aus $U_{Leerlauf} - U_{KI}$
- Berechnung maximaler Strom und Innenwiderstand:

$$I_{max}[A] = \frac{U_{Leerlauf}[V]}{R_i[\Omega]}$$

$$R_i[\Omega] = \frac{U_{Leerlauf}[V] - U_{Last}[V]}{I_{Last}[A]}$$

Übung

Sie messen an Ihrer kleinen Funkanlage folgende Werte:

- Leerlaufspannung Netzteil: 13,8 V
- Strom bei Sendebetrieb mit voller Leistung: 12 A
- Spannung Netzteil bei Sendebetrieb mit voller Leistung: 12,5 V

Sie möchten den Innenwiderstand des Netzteils erfahren.

Lösung:

- Tragen Sie die bekannten Werte in die Formel ein. In der Praxis berechnen Sie zunächst die Differenz zwischen Leerlauf- und Lastspannung. Das Zwischenergebnis dividieren Sie durch den Wert des Laststroms:

$$R_{\mathrm{i}}[\Omega] = \frac{U_{\mathrm{Leerlauf}}[V] - U_{\mathrm{Last}}[V]}{I_{\mathrm{Last}}[A]} = \frac{(13{,}8V - 12{,}5V)}{12A} = \frac{1{,}3V}{12A} = 0{,}11\Omega$$

5.5 Leistungsanpassung

Wenn der Lastwiderstand dem Innenwiderstand der Strom-/Spannungsquelle entspricht, sprechen wir von *Leistungsanpassung*. In der Funktechnik ist dies der Idealfall (Sender zu Antenne).

Bei der Stromversorgung von Geräten ist die Spannungsanpassung der Normalfall. Der Lastwiderstand muss höher sein als der Innenwiderstand der Spannungsquelle. Andernfalls bricht die Spannung zusammen, und die Versorgung ist nicht mehr gewährleistet.

Idealerweise verfügen Gleichspannungsquellen über eine hohe Spannungskonstanz bei Belastung. Dies ist besonders bei der Versorgung von Funkgeräten und Sendern von Bedeutung.

Besonders in der Akkuladetechnik, aber auch zum Betreiben von LEDs kommt die Stromanpassung in Form der Konstantstromquelle zum Einsatz. Hier ist der Versorgungsteil mit hohem Innenwiderstand ausgestattet, während der Lastwiderstand niedrig ist. Die Spannung darf in diesem Fall zusammenbrechen.

- **Leistungsanpassung**: Alle Widerstände passen zueinander.

  Es gilt: $R_{\mathrm{Innenwiderstand}} = R_{\mathrm{Lastwiderstand}}$
- **Spannungsanpassung**: Der Innenwiderstand einer Spannungsquelle muss so gering wie möglich gehalten werden und in jedem Fall niedriger sein als der Lastwiderstand.

  Es gilt: $R_{\mathrm{Lastwiderstand}} \gg R_{\mathrm{Innenwiderstand\ Spannungsquelle}}$
- **Stromanpassung**: Der Innenwiderstand der Stromquelle muss einen hohen Innenwiderstand aufweisen, der über dem des Lastwiderstands liegt.

  Es gilt: $R_{\mathrm{Lastwiderstand}} \ll R_{\mathrm{Innenwiderstand\ Stromquelle}}$

5.6 Serienschaltung (Reihenschaltung) von Widerständen, Spannungsteiler

Bei der Serienschaltung von Widerständen gelten folgende Grundsätze:

- Der Strom I ist an allen Stellen im Stromkreis gleich.
- Die Summe aller Widerstände ergibt den Gesamtwiderstand.
- Die Gesamtspannung ist die Summe aller Teilspannungen.
- Mit jedem hinzugefügten Widerstand erhöht sich der Gesamtwiderstand.
- Berechnung Gesamtwiderstand: $R_{\text{gesamt}}[\Omega] = R_1[\Omega] + R_2[\Omega] + R_3[\Omega] + \ldots$
- Berechnung Gesamtspannung: $U_{\text{gesamt}}[\text{V}] = U_1[\text{V}] + U_2[\text{V}] + U_3[\text{V}] + \ldots$
- Beim Spannungsteiler arbeitet man mit Verhältnissen:
  - Das Verhältnis der Teilspannung zur Gesamtspannung ist das gleiche wie das des Teilwiderstands zum Gesamtwiderstand.
  - Das Verhältnis der Teilspannungen untereinander ist das gleiche wie das der Teilwiderstände zueinander.
- Verhältnis Teilwiderstand zu Gesamtwiderstand und Teilspannung zu Gesamtspannung:

$$\text{Verhältnis} = \frac{R_{\text{Teil}}}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{U_{\text{Teil}}}{U_{\text{gesamt}}}$$

- Verhältnis Teilwiderstände und -spannungen untereinander:

$$\text{Verhältnis} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

- Berechnung von Teilspannungen am Beispiel von U_1 mit dem Widerstand R_1:

$$\text{Teilspannung } U_n[V] = \frac{U_{\text{gesamt}}[V] \times R_n[\Omega]}{R_{\text{gesamt}}[\Omega]}$$

In der Praxis verwenden Sie Spannungsteiler für die Gewinnung von niedrigeren Spannungen innerhalb von Schaltungen. Einen Sonderfall stellt der Einsatz von Potentiometern anstelle von Festwiderständen dar. Abbildung 5.9 zeigt Ihnen das Schaltungsprinzip.

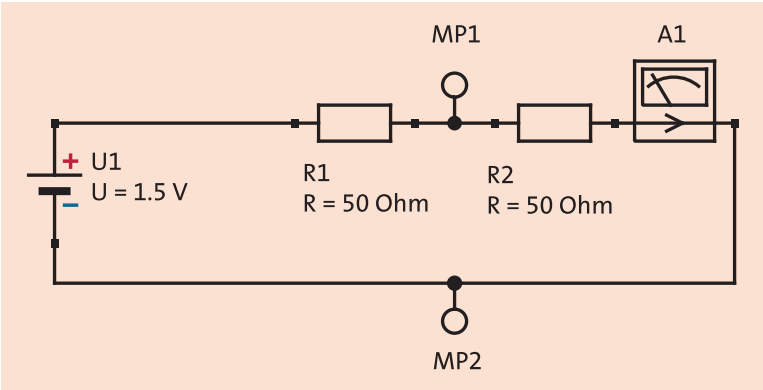


Abbildung 5.9 Serienschaltung von Widerständen

Übungen

In Abbildung 5.9 befinden sich einige Aufgaben:

- Berechnen Sie den Gesamtwiderstand R_{gesamt}.
- Berechnen Sie den Gesamtstrom I_{gesamt}.
- Welche Spannung messen Sie zwischen den Messpunkten MP1 und MP2?

Lösung:

- Der Gesamtwiderstand R_{gesamt} errechnet sich aus $R_1 + R_2$, also 50 Ω + 50 Ω = 100 Ω.
- In der zweiten Berechnung sitzt eine kleine Falle: Im unverzweigten Stromkreis, was hier eindeutig vorliegt, gibt es keine Teilströme.

  $I_{\text{gesamt}} = \frac{U}{R_{gesamt}} = \frac{1{,}5\ V}{100\ \Omega} = 0{,}015\ A = 15\ mA$

- Die Spannung zwischen den beiden Messpunkten ermitteln Sie wie folgt:

  $U_1[V] = \frac{U_{\text{gesamt}}\,[V] \times R_1\,[\Omega]}{R_{\text{gesamt}}\,[\Omega]}$

  Setzen Sie die Werte ein, und rechnen Sie mit dem Taschenrechner:

  1,5 [×] 50 [÷] [(] 50 [+] 50 [)] [=]

  Ergebnis: 0,75 Volt

Auch ein Potentiometer wird oft als ein Spannungsteiler verwendet (siehe Abbildung 5.6). Hier müssen Sie für den Minimal- und Maximalwert jeweils eine Berechnung durchführen.

$R_{\text{Poti}} = 5\ \text{k}\Omega$,

$U_{\text{gesamt}} = 6\ \text{V}$

Gesucht: Spannung am Abgriff (U_1) minimal und maximal. Der minimale Widerstand beim verwendeten Bauelement beträgt nicht 0 Ω, es wurden 0,8 Ω am unteren Anschlag und 2,2 Ω am oberen Anschlag des Potentiometers gemessen.

Normale Einbaurichtung:

- Maximalwert: $U_{\text{Abgriff}} = 6\ \text{V} \times \frac{(5000\ \Omega - 2{,}2\ \Omega)}{5000\ \Omega} = 5{,}99736\ \text{V}$
- Minimalwert: $U_{\text{Abgriff}} = 6\ \text{V} \times \frac{0{,}8\ \Omega}{5000\ \Omega} = 0{,}00096\ \text{V}$

Umgekehrte Einbaurichtung:

- Maximalwert: $U_{\text{Abgriff}} = 6\ \text{V} \times \frac{(5000\ \Omega - 0{,}8\ \Omega)}{5000\ \Omega} = 5{,}99904\ \text{V}$
- Minimalwert: $U_{\text{Abgriff}} = 6\ \text{V} \times \frac{2{,}2\ \Omega}{5000\ \Omega} = 0{,}00264\ \text{V}$

5.7 Parallelschaltung von Widerständen (verzweigter Stromkreis)

Die Parallelschaltung begegnet Ihnen im Alltag überall. Schon wenn Sie in Ihrem Haushalt eine Lampe einschalten und gleichzeitig der Kühlschrank am selben, verzweigten Stromkreis arbeitet, liegt eine Parallelschaltung vor.

Im verzweigten Stromkreis herrschen diese Bedingungen:

- Die Spannung U ist an allen Enden der Verzweigung gleich; der Gesamtstrom ist die Summe aller Teilströme; mit jedem hinzugefügten Widerstand vermindert sich der Gesamtwiderstand und verbessert sich der Leitwert!
- Berechnung Gesamtwiderstand: Der Gesamtwiderstand ist der Kehrwert aus:

$$\frac{1}{R_{\text{gesamt}}\,[\Omega]} = \frac{1}{R_1\,[\Omega]} + \frac{1}{R_2\,[\Omega]} + \cdots$$

- Wenn Sie von dem Ergebnis nicht den Kehrwert verwenden, erhalten Sie den Leitwert!
- Weisen alle Widerstände innerhalb der Parallelschaltung die gleichen Werte auf, berechnen Sie den Gesamtwiderstand mit dieser einfacheren Formel:

$$R_{\text{gesamt}}[\Omega] = \frac{R_{\text{Einzelwert}}[\Omega]}{\text{Anzahl}}$$

Die Berechnung eines Kehrwertes bedeutet, dass Sie eine Zahl als Bruch ausdrücken und Zähler und Nenner vertauschen: 3 wird zu $\frac{1}{3}$. Mit einem Taschenrechner ist alles Weitere aber kein Problem, wenn man die richtige Taste hierfür benutzt.



Rechnen mit Kehrwerten

Das Rechnen mit dem Kehrwert ist nicht mit der Zahl 0 möglich. Je näher eine Zahl sich dem Wert 0 nähert, desto weiter ist ihr Kehrwert davon entfernt (z. B. 0,01 → Kehrwert 100 und umgekehrt [»Hundertstel«]).

Der Kehrwert einer Zahl ergibt, wenn er mit dieser multipliziert wird, die Zahl 1, mathematisch geschrieben: x^{-1}.

Sie bilden den Kehrwert durch Vertauschen von Zähler und Nenner. Haben Sie eine natürliche Zahl, so wird 1 der Zähler.

Technisch-wissenschaftliche Taschenrechner verfügen über eine Kehrwerttaste. Diese ist modellabhängig unterschiedlich gekennzeichnet: [1/X], [X⁻¹]

Schauen Sie sich folgende Beispielberechnung zur Parallellschaltung der zwei Widerstände 22 Ω und 56 Ω an.

22 [1/X] + 56 [1/X] [=] [1/X]

Gerundetes Ergebnis: 15,8 Ω

Es gibt auch eine »Fußgängermethode« für Taschenrechner ohne Kehrwertfunktion:

1. Schritt 1: 1 [÷] 22 [=] [M+] (Kontrolle Zwischenwert: 0,0454545)
2. Schritt 2: 1 [÷] 56 [=] [M+] (Kontrolle Zwischenwert: 0,0178571)
3. Schritt 3: Kontrolle Zwischensumme: [MR] 0,0633116
4. Schritt 4: Kehrwert aus der Zwischensumme bilden: 1 [÷] [MR] [=] 15,784893 = 15,8 Ω

Mit einer der beiden Methoden sollten Sie zum Ergebnis kommen. Technisch-wissenschaftliche Taschenrechnermodelle beherrschen zudem noch das Bruchrechnen. Hier könnten Sie recht anschaulich Ihre Werte in Form von Brüchen eingeben. Allerdings schaffen ältere Modelle es nicht, den Kehrwert aus der Bruchsumme zu bilden und geben mit »-E-« auf. Sie müssten das Zwischenergebnis vorher per Umwandlungstaste [°’’’] in einen Dezimalbruch verwandeln.

Übung

Berechnen Sie den Gesamtwiderstand der Schaltung in Abbildung 5.10.

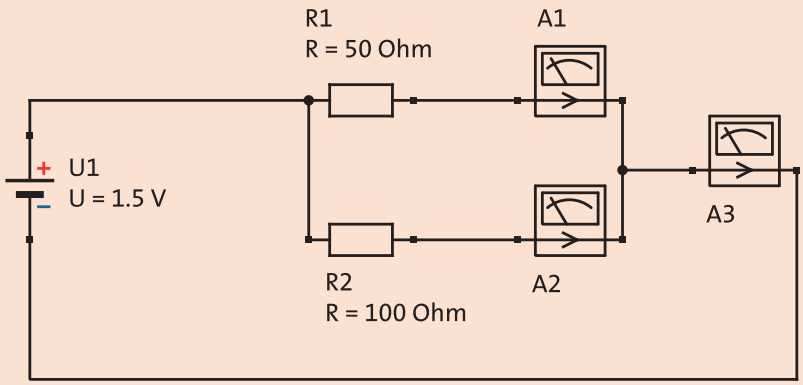


Abbildung 5.10 Verzweigter Stromkreis, Parallelschaltung von Widerständen

Lösung:

Berechnen Sie den Kehrwert des Gesamtwiderstands (Leitwert), dann daraus den Kehrwert:

$$\frac{1}{R_{\text{gesamt}}[\Omega]} = \frac{1}{R_1[\Omega]} + \frac{1}{R_2[\Omega]}$$

Tippen Sie Folgendes in den Taschenrechner ein:

50 [1/X] [+] 100 [1/X] [=] [1/X]

Sie kommen zu dem Ergebnis 33,33 Ω.

Die Messgeräte A1 bis A3 sind in den Stromkreis eingeschleift und messen die Stromstärke (Amperemeter). Bekannt sind:

- Spannung: 1,5 Volt
- Widerstandswerte (50 Ω, 100 Ω, gegebenenfalls Gesamtwiderstand 33,33 Ω).

Gesucht sind die Stromstärkewerte (I). Die Formel, die Sie für die Berechnung verwenden müssen, lautet:

$$I = \frac{U}{R}$$

- Zweig mit A1:

  1,5 [÷] 50 [=]

  Ergebnis: 0,03 A
- Zweig mit A2:

  1,5 [÷] 100 [=]

  Ergebnis: 0,015 A
- Gesamtstrom A3:
  Entweder addieren Sie die Werte von A1 und A2 (0,045 A), oder Sie berechnen den Gesamtstrom so: 1,5 [÷] 33,33333 [=] 0,045 A.

Versuchen Sie auch, auf die Spannung zurückzurechnen, indem Sie die Widerstandswerte und die Teilströme als gegebene Werte einsetzen.

Im Falle der gezeigten Schaltung aus Abbildung 5.10 genügt es, wenn Sie die Werte eines Astes verwenden: (A1: 0,03 A, 50 Ω, Formel: $U = R \times I$)

5.8 Gemischte Schaltung von Widerständen

Das gleichzeitige Auftreten von Serien- und Parallelschaltung führt meist zu lähmendem Entsetzen, was aber nicht notwendig ist. Die in Abschnitt 5.6 und Abschnitt 5.7 gezeigten Formeln müssen Sie nur in der richtigen Reihenfolge anwenden.

Betrachten Sie hierzu die Schaltung in Abbildung 5.11.

Der Grundsatz lautet: Arbeiten Sie von »innen« nach »außen«!

- Treffen in einem Teilkreis eine Parallel- und eine Serienschaltung aufeinander, muss zuerst die Parallelschaltung berechnet werden. Anschließend wird deren Gesamtwiderstand zum weiteren (Serien-)Widerstand addiert.
- Liegen mehrere Verzweigungen vor, berechnen Sie den Teilast zuerst, in dem die meisten Teilrechnungen vorzunehmen sind.
- Als Hilfsmittel kreisen Sie die zu berechnenden »Zonen« mit einem Bleistift ein.

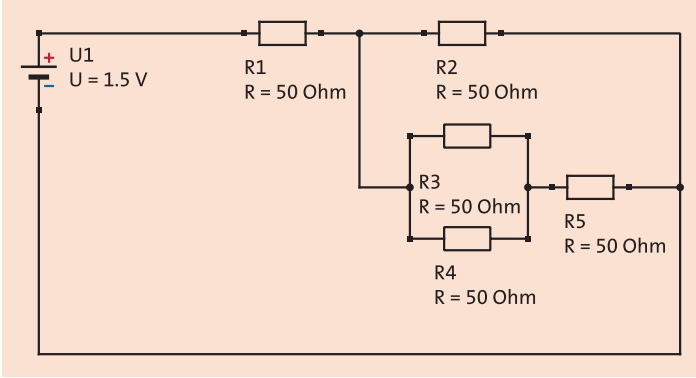


Abbildung 5.11 Gemischte Schaltung von Widerständen

Tabelle 5.4 zeigt, wie die Schaltung nun Schritt für Schritt berechnet wird.

Schritt	Berechnung	(Zwischen-) Ergebnis
1	Parallelschaltung R3 + R4	25 Ω
2	Serienschaltung [R3 + R4] mit R5	75 Ω
3	Parallelschaltung Zweig [R3 + R4 + R5] mit R2	30 Ω
4	Serienschaltung aller Zweige mit R1	80 Ω

Tabelle 5.7 Berechnungsschritte zu Abbildung 5.11

Lassen Sie uns das im Detail durchgehen:

- **Schritt 1: Parallelschaltung R3 + R4**
  - Berechnen Sie mit dem Taschenrechner: 50 [1/X] [+] 50 [1/X] [=] [1/X]
  - Ergebnis: 25 Ω
  - Weil beide Widerstände den gleichen Wert haben, reicht es auch, den Wert durch 2 zu teilen.
- **Schritt 2: Serienschaltung [R3 + R4] mit R5**

  25 Ω + 50 Ω = 75 Ω
- **Schritt 3: Parallelschaltung Zweig [R3 + R4 + R5] mit R2**
  - Berechnen Sie mit dem Taschenrechner: 75 [1/X] [+] 50 [1/X] [=] [1/X]
  - Ergebnis: 30 Ω
- **Schritt 4: Serienschaltung der beiden Zweige [R2 – R5] mit R1**

  30 Ω + 50 Ω = 80 Ω

Der Gesamtwiderstand beträgt also 80 Ω. Abbildung 5.12 zeigt Ihnen nochmals grafisch die Arbeitsreihenfolge.

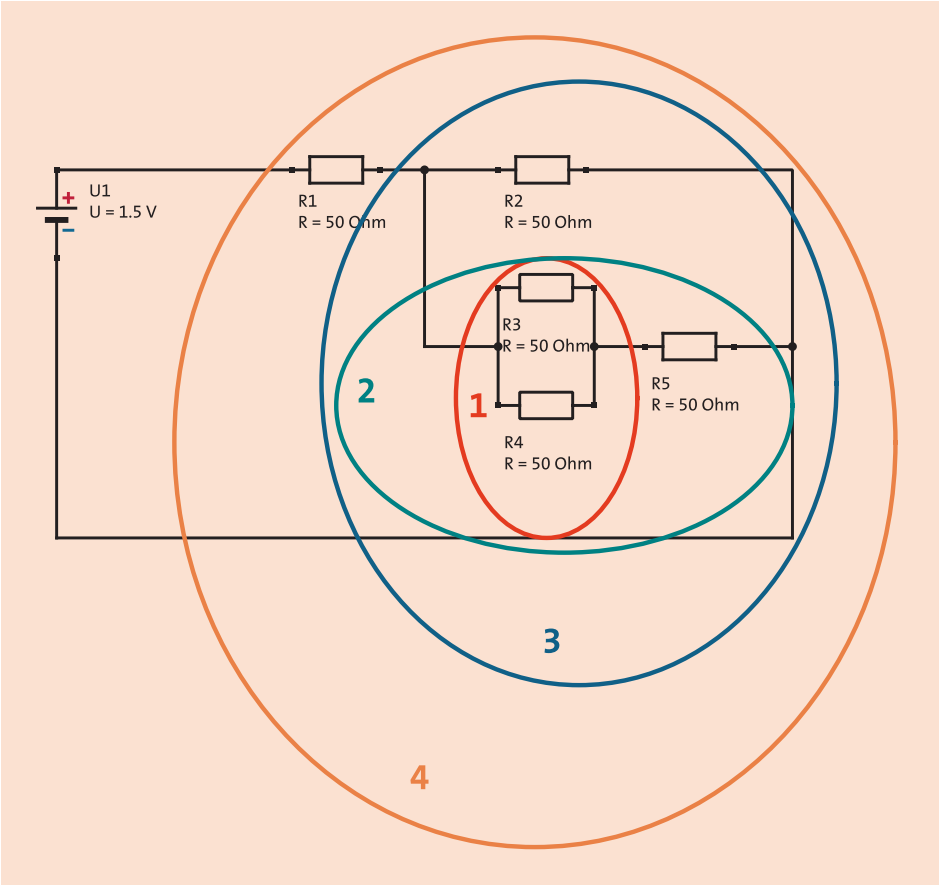


Abbildung 5.12 Lösungsreihenfolge zu Abbildung 5.11

5.8.1 Berechnungen mit variablen Widerständen

Potentiometer stellen alle vorkommenden Werte dar, also von 0 bis unendlich (siehe Abbildung 5.13).

Hier wird auch Folgendes deutlich: »unendlich« ist nicht der Wert 0. (Die fälschliche Annahme aber, dass zwei nicht miteinander verbundene Punkte 0 Ω aufweisen, bringt man nicht aus der Welt. Richtig ist, dass hier ein Widerstand von ∞ Ω, also unendlich, vorliegt.)

Hier ermitteln Sie einen Bereich. Einmal soll berechnet werden, wie hoch der Widerstand der Schaltung ist, wenn das Potentiometer kurzgeschlossen ist, also reell 0 Ω Widerstand aufweist. In diesem Fall überbrücken Sie R4 geistig oder per Bleistift und

berechnen die Schaltung. Es ergibt sich damit folgende Schaltung: R3 und R2 liegen parallel zueinander und mit R1 in Serie.

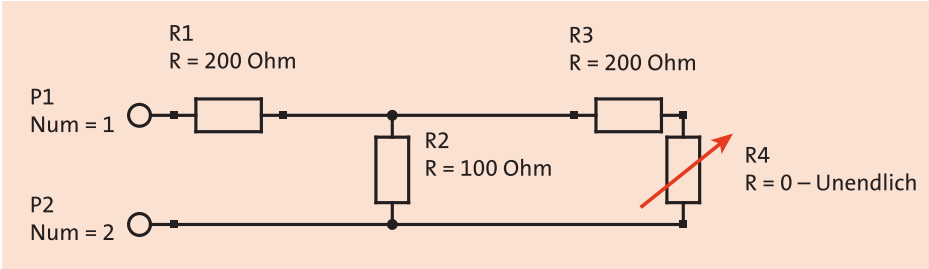


Abbildung 5.13 Schaltung mit Potentiometer

Berechnen Sie den verzweigten Bereich mit dem Taschenrechner:

100 [1/X] [+] 200 [1/X] [=] [1/X]

Widerstand der parallel liegenden Widerstände: 66,7 Ω

+ Serienwiderstand R1: 200 Ω

= Gesamtwiderstand 266,7 Ω

Wird R4 gegen unendlich gestellt, gleicht dies einer Unterbrechung der Verzweigung, und für die Berechnung wird es eine einfache Serienschaltung:

R_{gesamt} = R1 + R2 = 300 Ω

Die Schaltung weist also einen einstellbaren Widerstandsbereich von 266,7 Ω bis 300 Ω auf!

In der Praxis verwenden Sie derartige (Teil-)Schaltungen, wenn Sie etwas sehr feinfühlig einstellen müssen.

5.8.2 Gemischte Schaltung: Symmetrisches Dämpfungsglied

Immer wenn ein hoher Pegel abgeschwächt werden soll, kommen *Dämpfungsglieder* zum Einsatz. Sie schützen damit empfindliche Meßgeräte, verhindern das Übersteuern von Empfängereingängen oder auch von Sendern.

Abbildung 5.14 zeigt Ihnen die beiden möglichen Zusammenschaltungen von Widerständen. Sollen R-Eingang und R-Ausgang verschiedene Größen annehmen, findet mit dieser Schaltung nicht nur die Dämpfung, sondern auch eine Impedanzwandlung statt. Nur für die Dämpfungsfunktion gilt jedenfalls: R-Eingang = R-Ausgang.

Das Schaltbild in Abbildung 5.14 zeigt Ihnen zwei verschiedene Möglichkeiten: T-Form und π-Form. Es gilt jeweils auch, dass die Widerstände R1 und R3 die gleichen Widerstandswerte aufweisen.

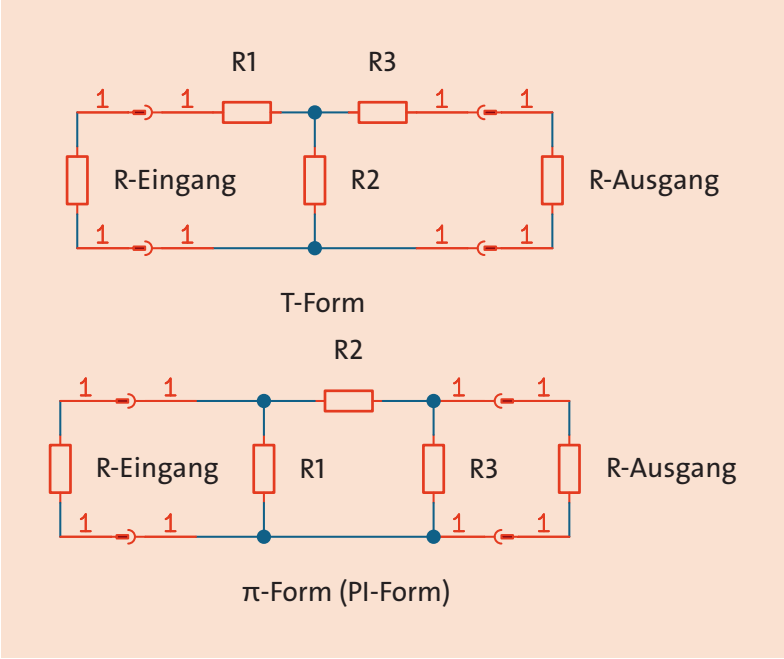


Abbildung 5.14 Schaltungsbeispiele für Dämpfungsglieder

Beim Selbstbau achten Sie auf die Verwendung von geeigneten Widerständen. Wird beispielsweise ein Funkgerät mit einem *Transverter* verbunden, ist oftmals ein Dämpfungsglied notwendig. Die Sendeleistung muss auf ein für den Transverter geeignetes Maß gedämpft werden. Hierbei müssen die Widerstände entsprechend belastbar sein, und es muss für eine gute Wärmeabfuhr gesorgt werden. Im Funkfachhandel bekommen Sie fertig aufgebaute Dämpfungsglieder für die Mess- und Sendetechnik. Für Selbstbauprojekte, z. B. einen Transverter, kommt aber auch der Eigenbau eines Dämpfungsglieds infrage. Dazu sehen Sie hier die Berechnung der Widerstandswerte, wenn die Dämpfung in dB und die Eingangsleistung bekannt sind.

Für unser Beispiel sind die bekannten Werte: Dämpfung 6 dB, Eingangsleistung 50 Watt. Rechnen Sie den Dämpfungsfaktor D auf den Abschwächungsfaktor um:

$$a = 10^{\frac{D}{20\ \mathrm{db}}}$$

$$a = 10^{\frac{6\ \mathrm{db}}{20\ \mathrm{db}}}$$

$$a = 1{,}995262315$$

Das gerundete Ergebnis lautet also 1.995.

Berechnen Sie nun die Widerstände für das Dämpfungsglied in T-Form mit den Angaben R = R-Eingang = R-Ausgang = 50 Ω:

$$R_1 = R \times \frac{a-1}{a+1}\Omega, \qquad R_1 = 50 \times \frac{1{,}995-1}{1{,}995+1} = 16{,}61\,\Omega$$

$$R_2 = R \times \frac{2 \times a}{a^2-1}\Omega, \qquad R_2 = 50 \times \frac{2 \times 1{,}995}{1{,}995^2+1} = 66{,}94\,\Omega$$

$$R_3 = R \times \frac{a-1}{a+1}\Omega, \qquad R_3 = 50 \times \frac{1{,}995-1}{1{,}995+1} = 16{,}61\,\Omega$$

Berechnen Sie die Widerstände für das Dämpfungsglied in π-Form:

$$R_1 = R \times \frac{a+1}{a-1}\Omega, \qquad R_1 = 50 \times \frac{1{,}995+1}{1{,}995-1} = 150{,}50\,\Omega$$

$$R_2 = R \times \frac{a^2-1}{2 \times a}\Omega, \qquad R_2 = 50 \times \frac{1{,}995^2-1}{2 \times 1{,}995} = 37{,}34\,\Omega$$

$$R_3 = R \times \frac{a+1}{a-1}\Omega, \qquad R_3 = 50 \times \frac{1{,}995+1}{1{,}995-1} = 150{,}50\,\Omega$$

Die Berechnung der Belastung der Widerstände für das Dämpfungsglied in T- und π-Form lautet:

$$P_1 = P_{\text{Eingang}} \times \frac{a-1}{a+1}\text{W}, \qquad P_1 = 50 \times \frac{1{,}995-1}{1{,}995+1} = 16{,}61\,\text{W}$$

$$P_2 = P_{\text{Eingang}} \times \frac{2 \times (a-1)}{a \times (a+1)}\text{W},$$

$$P_2 = 50 \times \frac{2 \times (1{,}995-1)}{1{,}995 \times (1{,}995+1)} = 16{,}65\,\text{W}$$

$$P_3 = P_{\text{Eingang}} \times \frac{a-1}{a^2 \times (a+1)}\text{W},$$

$$P_3 = 50 \times \frac{1{,}995-1}{1{,}995^2 \times (1{,}995+1)} = 4{,}17\,\text{W}$$

5.9 Experimentieren und simulieren

Jetzt haben Sie schon viel berechnet und einige Bauelemente kennengelernt. Vieles erscheint einfach mathematisch-abstrakt. Wenn Sie möchten, vollziehen Sie die zumindest leicht aufbaubaren Dinge experimentell nach!

Wenn Sie gerne löten, besorgen Sie sich eine Lochrasterplatine.

5.9.1 Steckplatine

Experimente gelingen aber einfacher mit einer Steckplatine. Hier stecken Sie Ihre Bauelemente zusammen und können diese auch einfach entfernen – ideal für schnelle Versuchsaufbauten. Besorgen Sie sich noch Batteriehalterungen und Steckbrücken dazu.

Eine Steckplatine verfügt über matrixartig angeordnete »Löcher«, in die genau ein Drahtende eines Bauelements oder einer Steckbrücke passt. Die einzelnen Löcher sind wiederum nach bestimmten Mustern miteinander verbunden. Die Steckplatine, die für die Bilder in diesem Kapitel verwendet wurde, verfügt über das in Abbildung 5.15 gezeigte Kontaktschema.

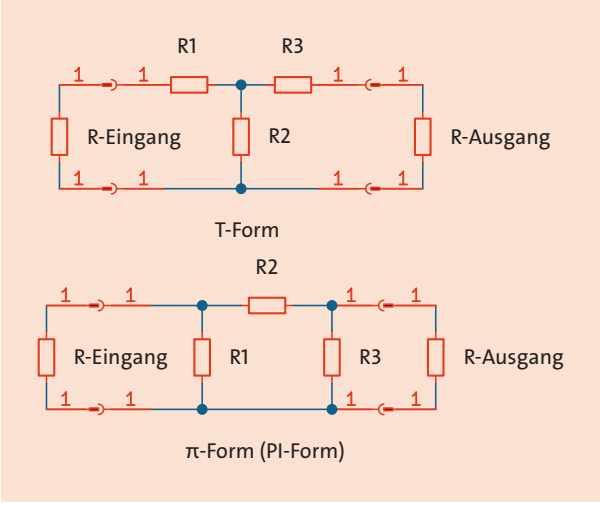


Abbildung 5.15 Kontaktschema der Steckplatine

Die mit dünnen roten und blauen Strichen an den Rändern markierten Reihen verwenden Sie für die Versorgungsspannung. Die rote und blaue Einfärbung der Steckplatine soll Ihnen nur zeigen, welche zusammengeschaltet sind.

Gleiches gilt für die Steckplatine im Koordinatenbereich. Je Zeile sind A–E sowie F–J für sich zusammen verschaltet.

5.9.2 Aufbau des Stromkreises und Experimente mit Widerständen

Folgendes Material wird neben der beschriebenen Steckplatine benötigt:

- Ein Birnchen (2,5 V) inklusive Fassung
- 3 AAA-Batterien
- 1 Batteriehalterung für 2 AAA-Batterien

- 1 Batteriehalterung für 3 AAA-Batterien
- 2 Widerstände mit jeweils 22 Ω und 0,25 Watt Leistung

Damit Sie ein Gespür für die Arbeit mit der Steckplatine bekommen, bauen Sie zunächst einen einfachen Stromkreis auf. Hierfür verwenden Sie die Halterung für 2 AAA-Batterien. Am Ende sollte das Birnchen leuchten (siehe Abbildung 5.16).

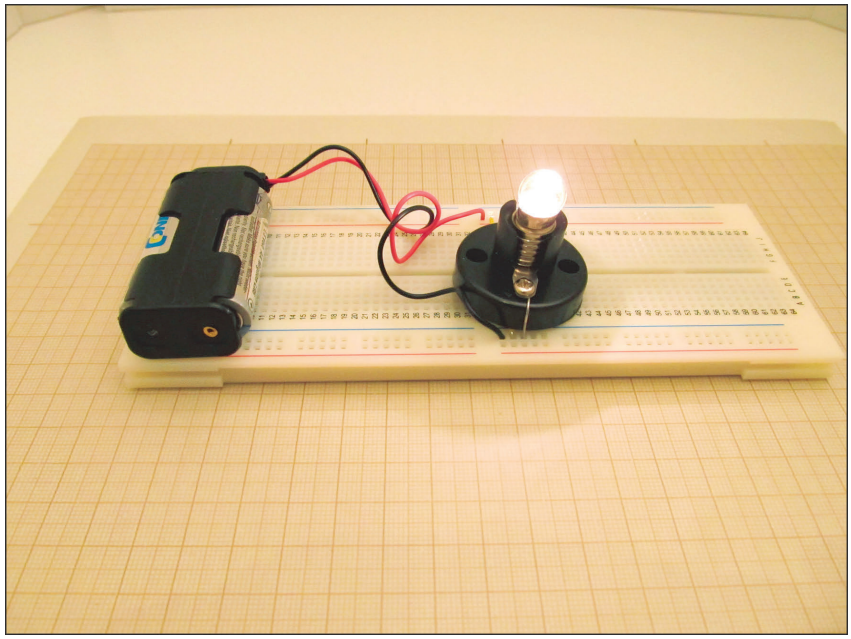


Abbildung 5.16 Einfacher Stromkreis

Sie erweitern jetzt den Stromkreis gemäß Abbildung 5.17. Fügen Sie einen Widerstand mit 22 Ω ein. Setzen Sie zudem die Halterung für drei AAA-Zellen ein. Sie sehen nun, dass das Birnchen dunkler leuchtet (siehe Abbildung 5.18). Berühren Sie nach einigen Sekunden **vorsichtig** den Widerstand. Sie werden feststellen, dass er sehr warm geworden ist.

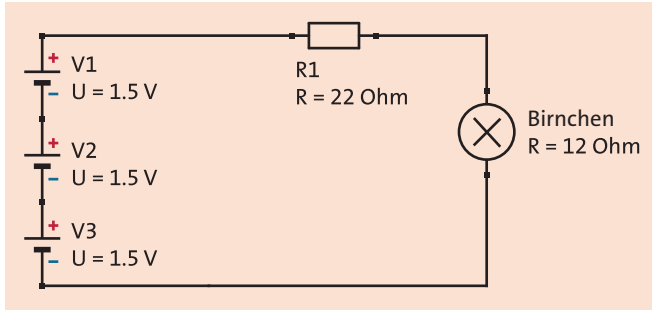


Abbildung 5.17 Schaltplan für das Experiment aus Abbildung 5.18

Beenden Sie das Experiment nun, denn der Widerstand könnte sich sonst zu sehr erhitzen. Ich habe mit Absicht einen zu schwach ausgelegten Typ verwendet, damit die Verlustwärme demonstriert werden kann. Die lange rote und die untere kurze gelbe Steckbrücke haben bei diesem Experiment keine Funktion! Der Widerstandswert für das Birnchen wurde per Messung im Stromkreis ermittelt und errechnet.

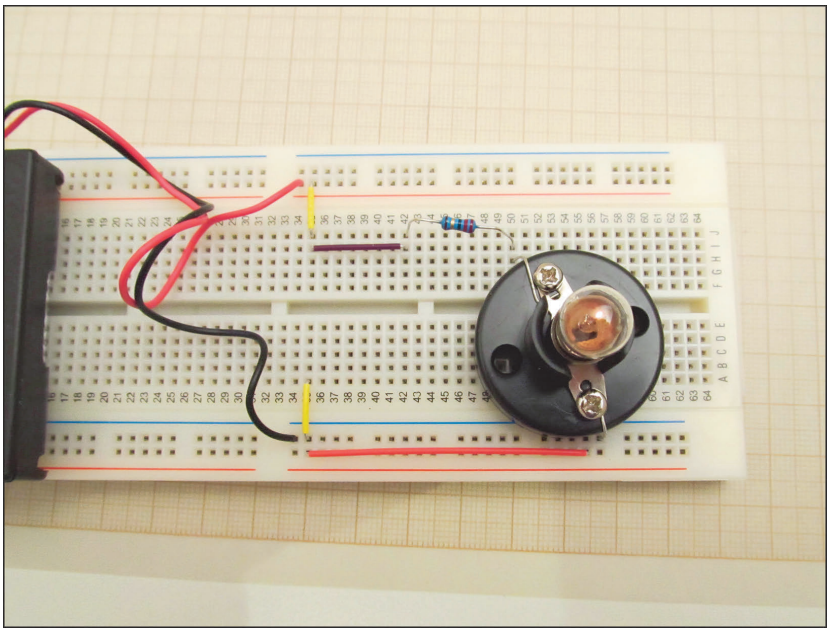


Abbildung 5.18 Stromkreis mit einem Widerstand

Stecken Sie den zweiten 22-Ω-Widerstand parallel zum ersten (siehe Abbildung 5.19 und Abbildung 5.20). Das Birnchen wird heller leuchten, und die Wärmeentwicklung am zuerst eingebauten Widerstand wird zurückgehen. Damit haben Sie die Wirkung der Parallelschaltung erfahren.

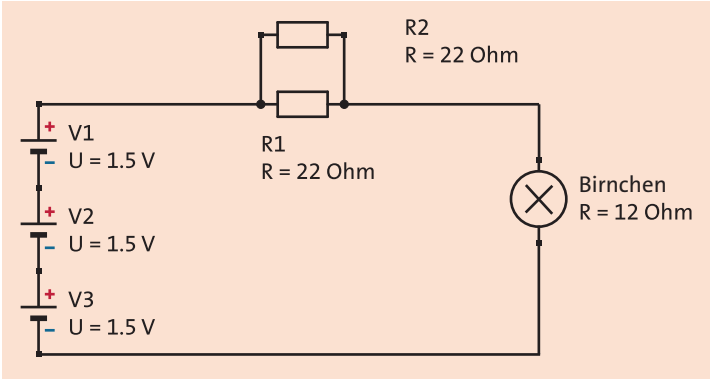


Abbildung 5.19 Schaltplan zum Experiment aus Abbildung 5.20

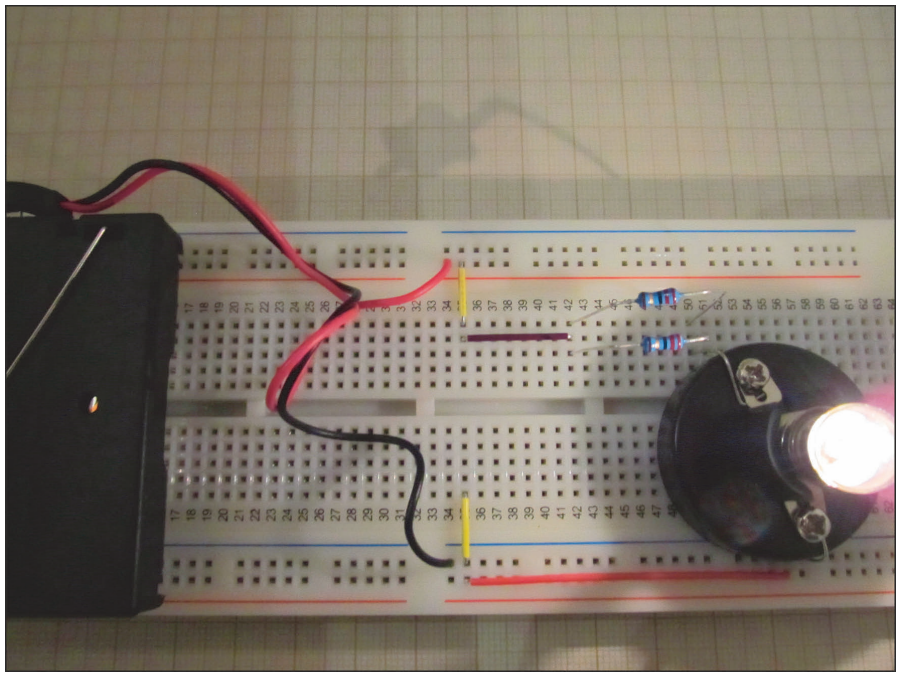


Abbildung 5.20 Stromkreis mit zwei parallel geschalteten Widerständen

Bauen Sie die Schaltung gemäß Abbildung 5.21 um, indem Sie die beiden Widerstände hintereinander setzen (siehe Abbildung 5.22).

Das Birnchen bleibt dunkel, denn die beiden Widerstände schränken den Stromfluss zu stark ein.

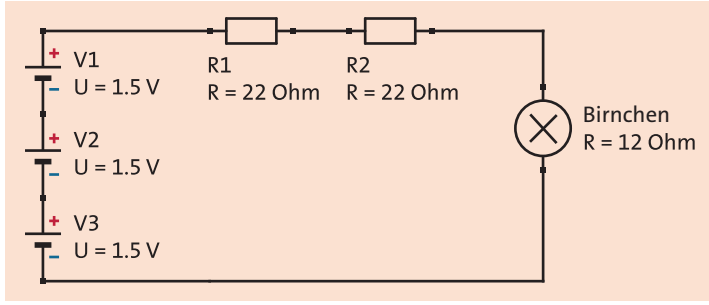


Abbildung 5.21 Schaltplan für das Experiment aus Abbildung 5.22

Sie können zusätzlich Kontakte für Messgeräte stecken. Damit sind Strom- und Spannungsmessungen möglich. Ihre Messergebnisse können Sie mit Ihren Berechnungen vergleichen.

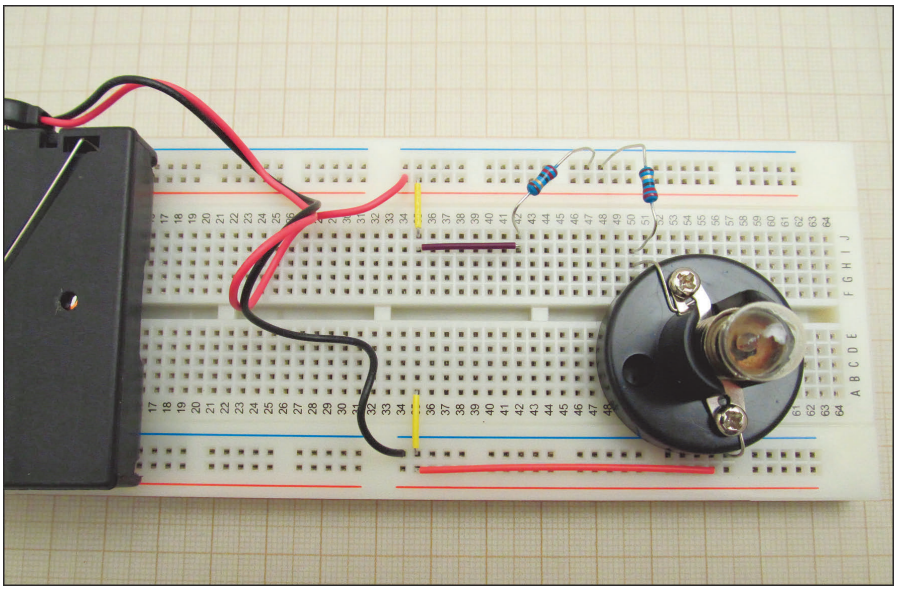


Abbildung 5.22 Stromkreis mit zwei Widerständen in Reihenschaltung

5.9.3 Simulation am Rechner

Sie können an Ihrem PC Schaltungen simulieren und Berechnungen durchführen. Dies ist eine interessante Ergänzung zu Experimentalaufbauten.

Relativ gut dokumentiert und einfach bedienbar ist *Quite Universal Circuit Simulator*. Leider gehen die Schöpfer dieses Programms seit einiger Zeit getrennte Wege. Aus diesem Grunde gibt es für Linux *Qucs-S* und für Windows *QucsStudio*. Letzteres läuft aber unter Linux oder FreeBSD mittels `wine` ohne Probleme (Aufruf: `wine QucsStudio/bin/qucs.exe`).

Auf die Bedienung gehe ich hier nicht ein, denn Sie finden im Internet gute Einführungstutorien, auch als Videos. Dort erfahren Sie mehr über das Anlegen eines Projekts, die Handhabung und schließlich auch über die Simulation und Berechnung von Schaltungen.

Die erste Simulation behandelt das Experiment aus Abbildung 5.18. Der Widerstandswert des (heißen) Glühbirnchens wurde messtechnisch ermittelt und beträgt 12 Ω. Falls Sie das Glühlampensymbol suchen: Das habe ich mit dem Zeichenwerkzeug einfach über das Widerstandssymbol gelegt.

Wenn Sie nun in diesem Programm das DC-Zahnrad ❶ anklicken (in Abbildung 5.24 das vierte Symbol von rechts), werden zu den Komponenten alle Spannungswerte und beim Messinstrument der Stromwert ausgegeben.

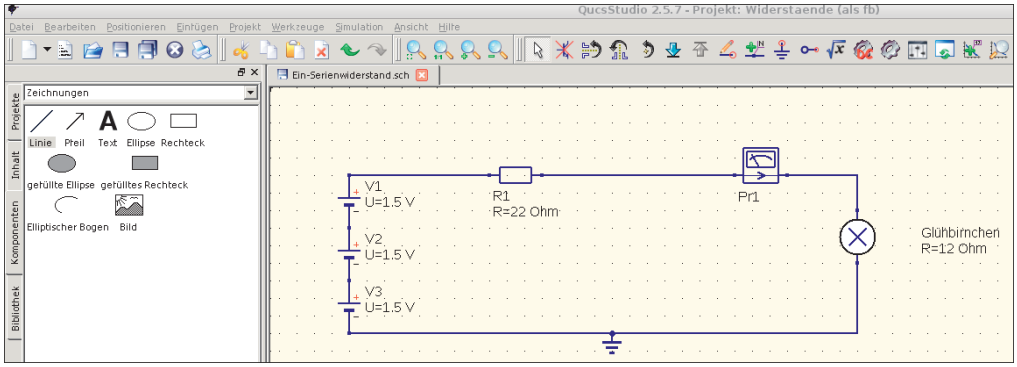


Abbildung 5.23 Schaltung vor der Simulation

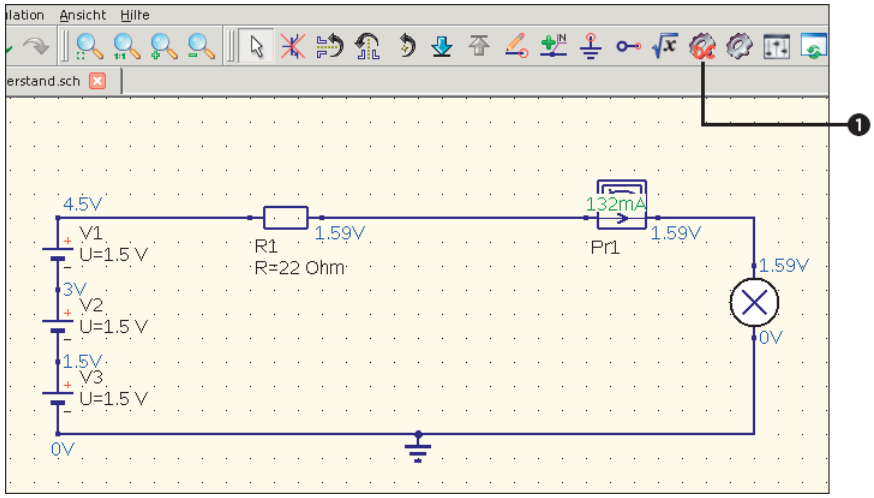


Abbildung 5.24 Schaltung nach der Berechnung des Gleichspannungsarbeitspunkts

In einer gemischten Schaltung von Widerständen (siehe Abbildung 5.11) bereitet es viel Arbeit, die einzelnen Teilspannungen und -ströme zu berechnen. Hier muss zusätzlich die DC-Simulation eingefügt werden. Drücken Sie F2. Als Ergebnis habe ich in Abbildung 5.25 eine Tabelle anstelle eines Graphen eingefügt. Anschließend habe ich auch wieder das Symbol für die Berechnung des Gleichspannungsarbeitspunkts angeklickt. So finden Sie alle Teilspannungen bei den Bauelementen, die Ströme bei den Messinstrumenten und zusätzlich in der Tabelle.

Eine Schaltungssimulation kann Ihnen beim Lernen und Experimentieren also durchaus helfen.

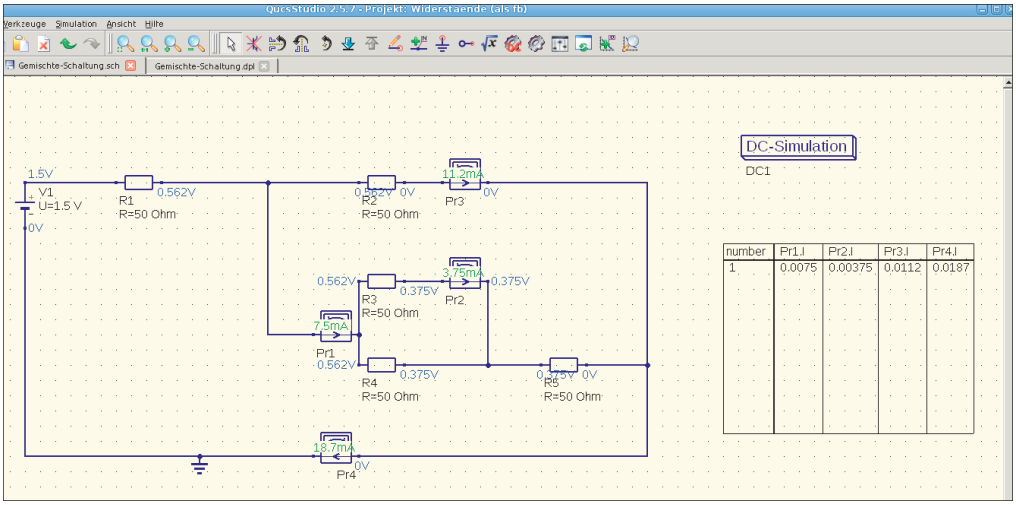


Abbildung 5.25 Simulierte gemischte Schaltung von Widerständen

Kapitel 6
Elektrische Leistung

Die Leistung (*P*) muss oftmals im Zusammenhang mit Widerständen ermittelt werden. Das Thema *Leistung* betrifft zudem die Themen *Belastbarkeit*, *Sicherungen* und *Abwärme*.

- **Definition**: Die elektrische Leistung, die in einem geschlossenen Stromkreis an seinen Bauteilen umgesetzt wird, ist zur Spannung und dem fließenden Strom proportional.
- Formelzeichen: ***P***
- Einheit: **W**, Watt (1 Watt = 1 Volt × 1 Ampere)
- Berechnung: Leistung (P) = Spannung (U) × Strom (I) Watt

  Weitere Berechnungsmöglichkeit aus der elektrischen Arbeit ***W***:

  $$P = \frac{\text{Elektrische Arbeit (Ws)}}{\text{Zeit (s)}} = \frac{W}{t} \text{ Watt}$$

  Die Gesamtleistung besteht aus der Summe von Teilleistungsbeträgen:

  $$P_{\text{gesamt}} = P_1 + P_2 + \cdots$$

  Die Berechnung der elektrischen Arbeit wird in Abschnitt 6.2 behandelt, die Berechnung der Leistung zusammen mit Widerständen finden Sie in Abschnitt 5.3.

Übung

Sie möchten einen Abschlusswiderstand mit 50 Ω für Messzwecke (»künstliche Antenne«, Dummy Load) aufbauen. Hierzu stehen Ihnen fünf geeignete Widerstände mit 250 Ω und 20 Watt Belastbarkeit zur Verfügung.

- Wie schalten Sie die Widerstände zusammen?
- Wie hoch ist die Belastbarkeit der Widerstandsschaltung?

Lösung: Sie schalten die Widerstände parallel zusammen (250 Ω ÷ 5 Stück = 50 Ω Gesamtwiderstand). Die Belastbarkeit ist 100 Watt (5 × 20 Watt).

6.1 Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad gibt an, wie sich der Einsatz zum Ergebnis verhält. Er beschreibt das Verhältnis der abgegebenen Leistung zur eingesetzten Leistung und gibt an, wie effizient eine Vorrichtung oder ein Prozess ist.

- Formelzeichen: η (ausgesprochen Eta)
- Berechnung des Wirkungsgrads:

  $$\eta = \frac{P_{\text{Ausgang}}}{P_{\text{Eingang}}}$$

  und als Prozentwert:

  $$\eta = \frac{P_{\text{Ausgang}}}{P_{\text{Eingang}}} \times 100\ \%$$

Übung

Sehen Sie sich das an einem kurzen Beispiel an: Sie möchten in Ihrem Auto (12 Volt) einen HF-Verstärker einbauen, der das Sendesignal Ihres Handfunksprechgeräts auf 50 Watt anhebt. Sie messen die Stromaufnahme mit 9 Ampere.

Berechnen Sie den Wirkungsgrad!

Lösung:

- Bekannte Werte: U, I und P_{Ausgang}
- Zuerst berechnen Sie die Eingangsleistung:

  $P = U \times I$

  $12\ \text{V} \times 9\ \text{A} = 108\ \text{W}$

  Dann stellen Sie die Ausgangs- und die Eingangsleistung einander gegenüber:

  50 [÷] 108 [×] 100 [=]
- Sie kommen zu dem Ergebnis, dass der Wirkungsgrad 46,3 % beträgt.

Nicht nur bei Verstärkern, auch bei Netzteilen und anderen Arten der Stromversorgung kann der Wirkungsgrad bestimmt werden. Auch dazu ein Beispiel:

- Die Leerlaufspannung eines Netzteils beträgt 13,8 Volt. Die Spannung bei einer Belastung mit 2 Ampere ist 13 Volt.
- Gesucht ist der Wirkungsgrad des Netzteils. Mit dem Taschenrechner rechnen Sie:

  13 [÷] 13,8 [×] 100 [=]
- Hier beträgt der Wirkungsgrad also 94,2 %.

6.2 Elektrische Arbeit

Der Begriff *elektrische Arbeit* bezieht sich auf die Verrichtung einer Leistung über einen Zeitraum.

- **Definition**: Unter elektrischer Arbeit versteht man die über einen bestimmten Zeitraum verrichtete elektrische Leistung.
- Formelzeichen: ***W*** (Work)
- Einheit: **Ws** (Wattsekunde), gebräuchlicher: Kilowattstunde (kWh)
- Berechnung:

  $W = \text{Leistung} \times \text{Zeit} = P \times t$

  Mit entsprechenden Werten auch:

  $W = \text{Spannung} \times \text{Strom} \times \text{Zeit} = U \times I \times t$

Zeiten umrechnen

Wichtig zum Umrechnen auf größere Einheiten und Zeiträume:

- 1 Minute hat 60 Sekunden.
- 1 Stunde hat 3.600 Sekunden.
- 1 Tag hat 86.400 Sekunden.

Übung

Berechnen Sie einige Beispiele. Bekannt ist Folgendes:

- tägliche Einschaltdauer: 8 Stunden
- Benutzung: ganzjährig
- Betriebsspannung: 230 V
- Stromaufnahme: 1,2 A
- Kosten je kWh beim örtlichen Energieversorger: 29 Cent

Gesucht werden die jährlichen Kosten.

- Schritt 1: Berechnen Sie die Leistung:

  230 [×] 1,2 [=]

  Zwischenergebnis: Die Leistung P beträgt 276 Watt.
- Schritt 2: Berechnen Sie die »Tagesarbeit« in Wattstunden. Sie ersparen sich so die Umrechnung von den Wattsekunden her.

  8 [×] 276 [=]

  Zwischenergebnis: 2.208 Wattstunden, umgerechnet in kWh: 2,2.

- Schritt 3: Nun rechnen Sie die »Tagesarbeit« auf das Kalenderjahr mit 365 Tagen hoch und ermitteln die Kosten:

  2,2 [×] 365 [×] 0,29 [=]

Die Gesamtkosten im Kalenderjahr belaufen sich also auf 232,87 Euro.

Und dazu noch ein Beispiel aus der Praxis, diesmal im Schnelldurchgang:

Ein Bewegungsschalter an 230 Volt hat eine Leistungsaufnahme von 0,75 Watt und läuft rund um die Uhr das ganze Jahr. Auch hier kostet die Kilowattstunde 29 Cent.

Wie teuer ist der Betrieb dieses Geräts im Kalenderjahr hinsichtlich der Stromkosten?

- Schritt 1: Berechnen Sie die elektrische Arbeit:

  0,75 [×] 24 [×] 365 [÷] 1000 [=]

  Jahresarbeit: 6,57 kWh
- Schritt 2: Berechnen Sie die Kosten:

  6,57 [×] 0,29 [=]

Der Betrieb des Geräts kostet jährlich also 1,91 Euro.

Kapitel 7
Wechselstrom/Signale

Die Wechselstromtechnik ermöglicht den Energietransport über weite Strecken. Auf den gleichen Grundlagen beruht auch die Nachrichtentechnik.

- **Definition**: Ändert sich anhaltend die Richtung von Ladungsträgern zwischen zwei Spannungspolen, liegt Wechselstrom vor.
- Weitere Bezeichnung für Wechselstrom: **AC** (*Alternating Current*)
- Frequenz: Die Häufigkeit der Richtungswechsel je Sekunde wird als *Frequenz* bezeichnet und in Hertz (oder einem Vielfachen) angegeben. Durch die zeitliche Auflösung entsteht eine Kurvenform, im Idealfall in Sinusform.
  - Formelzeichen: f
  - Einheit: **Hz** (Hertz; eine vollständige Schwingung je Sekunde)
  - Berechnung der Frequenz:

    $$f = \frac{\text{Zahl der Schwingungen (Richtungswechsel)}}{\text{s}}\ \text{Hz}$$

- Periodendauer: der Zeitraum, der für eine vollständige Schwingung benötigt wird:
  - Formelzeichen: $\boldsymbol{T}$
  - Einheit: **s** (Sekunde)
  - Die Periodendauer ist der Kehrwert der Frequenz. Berechnung:

    $$T = \frac{1}{f}\ \text{s}$$

- Wird die Wechselspannung nicht zur Energieversorgung, sondern zur Übertragung von Informationen benutzt, spricht man von Signalen!

Wechselstrom kann als niederfrequent (*NF*) oder hochfrequent (*HF*) bezeichnet werden. Zum NF-Bereich gehören technische Nutzungen wie der *Bahnstrom*, der in Deutschland, Österreich und der Schweiz eine Frequenz von 16 $^2/_3$ Hz aufweist. Für die Stromversorgung in Europa wird Wechselstrom mit 50 Hz, in anderen Erdteilen auch mit 60 Hz verwendet.

Zum NF-Bereich gehört noch alles, was man hören kann: Musik und Sprache reichen bis 20 kHz, also 20.000 Hz. Darüber hinaus spricht man von Hochfrequenz.

In der Funk- und Nachrichtentechnik wird in den Größenordnungen gearbeitet, die Sie in Tabelle 7.1 sehen.

Maßeinheit	Kürzel	In Hz	In kHz	In MHz	In GHz
1 Kilohertz	1 kHz	10^3 HZ	1	0,001	0,000001
1 Megahertz	1 MHz	10^6 Hz	1.000	1	0,001
1 Gigahertz	1 GHz	10^9 Hz	1.000.000	1.000	1
1 Terahertz	1 THz	10^{12} Hz	1.000.000.000	1.000.000	1.000

Tabelle 7.1 Größenordnungen von Frequenzangaben

Zudem teilt man das Frequenzspektrum der Funkwellen grob nach Wellenlängen ein. Tabelle 7.2 zeigt die für den Amateurfunkdienst relevanten Bereiche.

Frequenzbereich	Bereich	Bezeichnung	Meter-Bezeichnung
30 kHz – 300 kHz	LF	Low Frequency (Langwelle)	Kilometerwellen
300 kHz – 3 MHz	MF	Medium Frequency (Mittelwelle)	Hektometerwellen
3 MHz – 30 MHz	HF	High Frequency (Kurzwelle)	Dekameterwellen
30 MHz – 300 MHz	VHF	Very High Frequency (Ultrakurzwelle)	Meterwellen
300 MHz – 3 GHz	UHF	Ultra High Frequency	Dezimeterwellen
3 GHz – 30 GHz	SHF	Super High Frequency	Zentimeterwellen
30 GHz – 300 GHz	EHF	Extreme High Frequency	Millimeterwellen
300 GHz – 3 THz	THF	Tremendously High Frequency	Mikrometerwellen

Tabelle 7.2 Einteilung der Frequenzbereiche

Tabelle 7.3 zeigt Ihnen zum einen die in der Bundesrepublik Deutschland freigegebenen Amateurfunkbänder mit Länge und Frequenz, die für den Sendebetrieb notwendige(n) Lizenzklasse(n) sowie die maximal zulässige Senderausgangsleistung und Bandbreite.

Band	Frequenzbereich	Status	Maximale Bandbreite	Amateurfunk-Zeugnisklasse gem. Zulassungsurkunde, maximale Leistung		
				A	E	N
2200 m	135,7 – 137,8 kHz	S	800 Hz	1 W ERP	–	–
630 m	472 – 479 kHz	S	800 Hz	1 W ERP	–	–
160 m	1810 – 1850 kHz	P	2700 Hz	750 W PEP	100 W PEP	–
	1850 – 1890 kHz	S	2700 Hz	75 W PEP	75 W PEP	–
	1890 – 2000 kHz	S	2700 Hz	10 W PEP	10 W PEP	–
80 m	3500 – 3800 kHz	P	2700 Hz	750 W PEP	100 W PEP	–
60 m	5351,4 – 5366,5 kHz	S	2700 Hz	15 W EIRP	–	–
40 m	7000 – 7200 kHz	P	2700 Hz	750 W PEP	–	–
30 m	10100 – 10150 kHz	S	800 Hz	150 W PEP	–	–
20 m	14000 – 14350 kHz	P	2700 Hz	750 W PEP	–	–
17 m	18068 – 18168 kHz	P	2700 Hz	750 W PEP	–	–
15 m	21000 – 21450 kHz	P	2700 Hz	750 W PEP	100 W PEP	–
12 m	24890 – 24990 kHz	P	2700 Hz	750 W PEP	–	–
10 m	28 – 29,7 MHz	P	7000 Hz	750 W PEP	100 W PEP	10 W ERP
6 m	50 – 50,4 MHz 50,4 – 52 MHz	S S	12 kHz 12 kHz	750 W PEP 25 W PEP	–	–
2 m	144 – 146 MHz	P	40 kHz	750 W PEP	75 W PEP	6,1 W ERP
70 cm	430 – 440 MHz	P	2 MHz AM-Fernsehen 7 MHz	750 W PEP	75 W PEP	6,1 W ERP
23 cm	1240 – 1300 MHz	S	2 MHz AM- oder digitales TV 7 MHz, FM-TV 18 MHz	750 W PEP von 1247 – 1263 MHz max. 5 W EIRP	75 W PEP	–

Tabelle 7.3 In der Bundesrepublik Deutschland freigegebene Amateurfunkbänder

Band	Frequenzbereich	Status	Maximale Bandbreite	Amateurfunk-Zeugnisklasse gem. Zulassungsurkunde, maximale Leistung		
				A	E	N
13 cm	2320 – 2450 MHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
9 cm	3400 – 3475 MHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
6 cm	5650 – 5850 MHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
3 cm	10 – 10,5 GHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
1,2 cm	24 – 24,05 GHz	P	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
	24,05 – 24,25 GHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
6 mm	47 – 47,2 GHz	P	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
4 mm	75,5 – 76 GHz	P	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
	76 – 81,5 GHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
2,5 mm	122,25 – 123 GHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–

Tabelle 7.3 In der Bundesrepublik Deutschland freigegebene Amateurfunkbänder (Forts.)

Band	Frequenzbereich	Status	Maximale Bandbreite	Amateurfunk-Zeugnisklasse gem. Zulassungsurkunde, maximale Leistung		
				A	E	N
2 mm	134 – 136 GHz	P	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
	136 – 141 GHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
1,2 mm	241 – 248 GHz	S	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–
	248 – 250 GHz	P	10 MHz 20 MHz TV-Aussendungen	75 W PEP	5 W PEP	–

Tabelle 7.3 In der Bundesrepublik Deutschland freigegebene Amateurfunkbänder (Forts.)

Abkürzungen und Hinweise

P (Primär): Das Band steht dem Amateurfunk als primärer Nutzer zur Verfügung. Das bedeutet, Amateurfunker haben vorrangigen Zugang zu diesen Frequenzen gegenüber anderen Nutzern.

S (Sekundär): Amateurfunknutzer haben sekundären Zugang zu diesen Frequenzen. Das bedeutet, sie müssen Interferenzen mit primären Nutzern tolerieren und dürfen selbst keine Störungen verursachen.

ERP (Effective Radiated Power): Effektiv abgestrahlte Leistung, die die Gewinnfaktoren von Antennen berücksichtigt.

PEP (Peak Envelope Power): Spitzenhüllkurvenleistung, die höchste Leistung, die von einem Sender während eines Übertragungszyklus abgegeben wird.

EIRP (Effective Isotropic Radiated Power): Effektiv isotrop abgestrahlte Leistung, eine theoretische Leistung, die eine isotrope Antenne, die Energie gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlt, aussenden würde, um die gleiche Signalstärke zu erreichen.

7.1 Schwingungsformen

Es gibt verschiedene Schwingungsformen: Rechteck (siehe Abbildung 7.1), Sinus (siehe Abbildung 7.2), Trapez, Dreieck und »Sägezahn«.

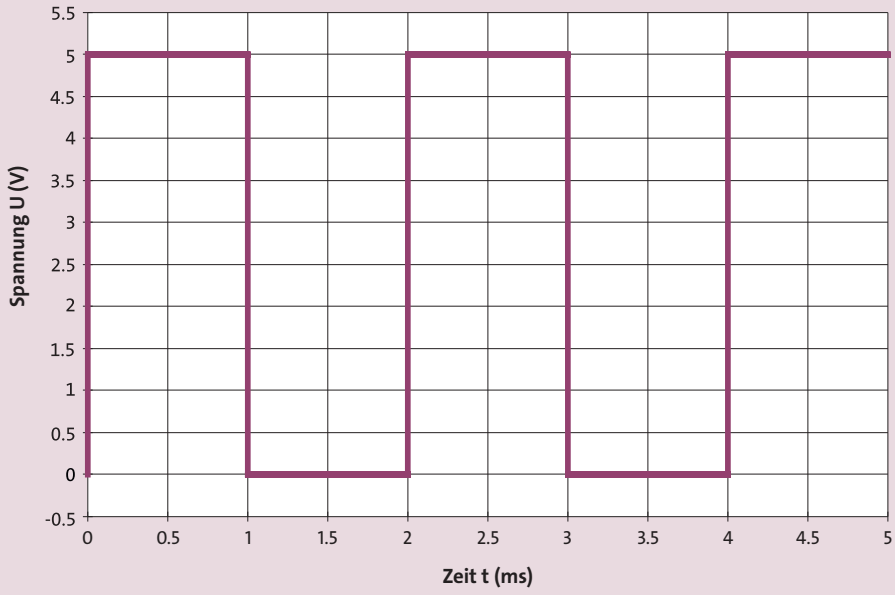


Abbildung 7.1 Rechtecksignal



Rechtecksignal

Das *Rechtecksignal* schlechthin gibt es nicht. Es existiert nur in der Theorie. In Wahrheit handelt es sich dabei immer um *trapezförmige Signale*. Die Zeit der Spannungsänderung muss berücksichtigt werden (*Flankensteilheit*).

Rechtecksignale bestehen außer aus der *Grundwelle* aus ungeradzahligen *Harmonischen*, also dem Dreifachen, Fünffachen, Siebenfachen der Grundfrequenz. Dies hängt mit der symmetrischen Struktur des Rechtecksignals zusammen, die dazu führt, dass sich geradzahlige Harmonische gegenseitig auslöschen, während ungeradzahlige Harmonische verstärkt werden.

Als Ausgang dienen stets sinusförmige Signale!

In Abbildung 7.2 finden Sie Details der Sinuskurve. So erkennen Sie den Unterschied zwischen dem Scheitel- und dem Effektivwert, dessen Berechnung Sie in Abschnitt 7.6 finden. Für die Zeigerdarstellung (siehe Abschnitt 7.8) dient die Gradeinteilung, die hier für jede Viertelwelle angegeben wurde.

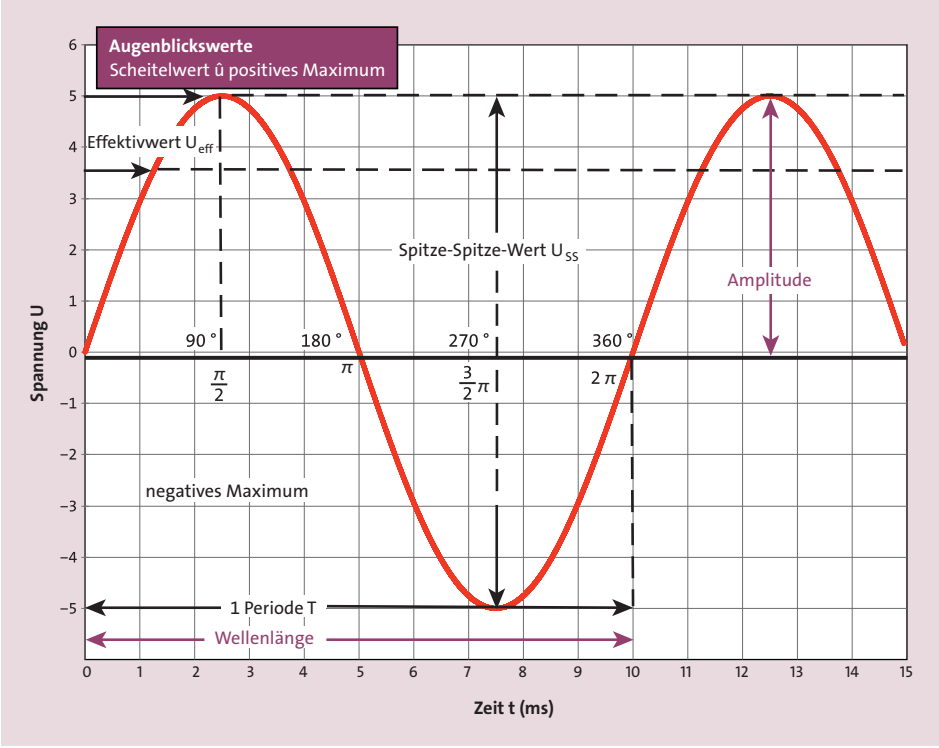


Abbildung 7.2 Das Sinussignal und seine Kennwerte

Sinusförmige Signale

Reiner *Sinus* entsteht durch die Drehung einer elektromagnetischen Spule in einem Magnetfeld (*Wechselstromgenerator*, Alternator). In der Frühzeit erzeugte man auf elektromechanische Art selbst hochfrequente Signale (Maschinensender SAQ, Grimeton, Alexandersongenerator). Heute erzeugen elektronische Schaltungen (*Oszillatoren*) die gewünschten Signale.

7.2 Berechnung der Frequenz

Kurze Wiederholung: Die Einheit Hz wird wie folgt definiert:

$$f = \frac{\text{Zahl der Schwingungen (Perioden)}}{\text{Zeit (Sekunden)}}\,\text{Hz}$$

In einem Beispiel sieht das so aus:

- Gegeben: 438.000.000 Perioden je Sekunde

- Gesucht: Angabe in kHz und MHz
- Lösung: 438.000 kHz, 438 MHz

7.3 Berechnung der Periodendauer

Betrachten Sie Abbildung 7.2. Dort finden Sie die Periodendauer *T* dargestellt. Sie gibt die abgelaufene Zeit an, die eine vollständige Schwingung für ihre Ausführung benötigt hat.

Die Periodendauer ist der Kehrwert der Frequenz, also

$$T = \frac{1}{f(\text{Hz})}\ \text{s}$$

und wird in Sekunden(bruchteilen) angegeben. Sekundenbruchteile unterliegen dabei keiner 60er-Teilung wie Stunden und Minuten. Hier gelten die üblichen SI-Präfixe.

Übung

Gegeben ist eine Frequenz von 1,8 MHz, suchen Sie die Periodendauer *T*.

Lösung:

Sie berechnen Folgendes:

1 [÷] 1800000 [=]

Das Ergebnis lautet abgelesen: $5{,}555555556 \times 10^{-7}$

Finden Sie dann das passende SI-Präfix: milli = 10^{-3}, µ = 10^{-6}, nano = 10^{-9}

Wenn Sie die Mikrosekunden wählen, kommen Sie gerundet auf 0,6 Mikrosekunden.

Und noch ein weiteres Beispiel:

- Gegeben: Frequenz 1.000 Hz
- Gesucht: Periodendauer

Lösung:

Sie rechnen:

1 [÷] 1000 [=]

Das Ergebnis ist: 1 Millisekunde.

7.4 Berechnung der Frequenz aus der Periodendauer

Für die Berechnung der Frequenz aus der Periodendauer kehren Sie die Formel für die Periodendauer um. Die Frequenz f berechnet sich aus dem Kehrwert der Periodendauer:

$$f = \frac{1}{T}\ \text{Hz}$$

Übung

Probieren Sie das aus. Welche Frequenz hat eine Schwingung, deren Periodendauer 20 ms beträgt?

Lösung:

Rechnen Sie das SI-Präfix um: 20 ms entsprechen 0,02 Sekunden!

1 ÷ 0,02 =

Das Ergebnis lautet: 50 Hz

Man kann die Frequenz aus der Anzeige oder dem Bildschirmabzug eines Oszilloskops berechnen.

Ein *Oszilloskop* ist ein Messgerät, das Schwingungen am Bildschirm darstellt. Es gibt »richtige« Geräte mit eigenem Bildschirm. Moderne Ausführungen können per Speicherkarte oder USB-Schnittstelle Messergebnisse auf den Rechner übertragen. Darüber hinaus gibt es *USB-Oszilloskope*, die die gesamte Darstellung gemessener Daten und die Gerätesteuerung dem Rechner überlassen.

Ein solches Messblatt enthält eine *X-Achse* (waagrecht) und eine *Y-Achse* (senkrecht). Üblicherweise wählt man für die Zeitdarstellung die waagrechte, für Spannungswerte die senkrechte Achse. Damit ergibt sich auch eine Kästchenstruktur, in der das gemessene Signal dargestellt wird. An den Achsen befinden sich Hinweise, welchen Wert ein Kästchen darstellt (*Div.*).

Die Aufgabe besteht darin, die Frequenz des im Messblatt aus Abbildung 7.3 dargestellten Signals zu ermitteln.

Am Rand des Bildschirmabzugs finden Sie wichtige Hinweise, damit Sie die weiteren Daten auslesen können:

- Waagrechte Achse: Jedes Kästchen entspricht 3 µs.
- Senkrechte Achse: Jedes Kästchen entspricht 3 V.

Zur Berechnung der Frequenz benötigen wir die Periodendauer.

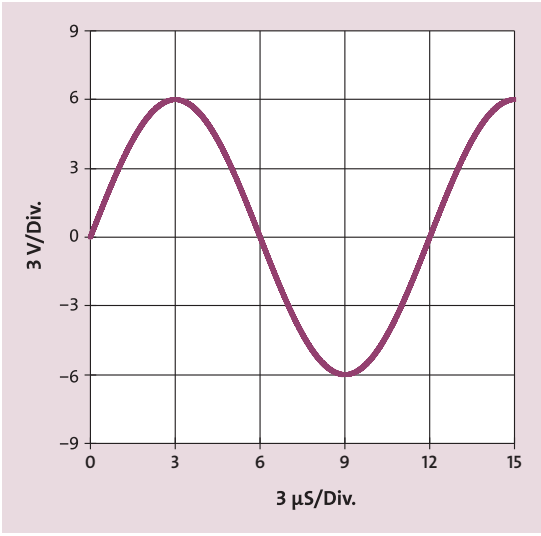


Abbildung 7.3 Messblatt für die Übungsaufgabe

Betrachten Sie den Graphen. Die Sinuskurve beginnt links mit 0. Wenn die Kurve die 0-Linie das zweite Mal kreuzt, ist eine Schwingung vollendet. Bis hierhin sind es vier Kästchen.

- Berechnung der Periodendauer: 4 Kästchen für je 3 µs ergibt: 12 µs
- Umrechnen der SI-Präfixe von µs auf s (siehe Abschnitt 2.1): 1 µs = 10^{-6} s

Lösung:

Geben Sie dazu in den Taschenrechner ein:

1 [÷] 0,000012 [=]

Manche Taschenrechnermodelle liefern Ihnen noch andere Eingabemöglichkeiten:

1 [÷] 12 [×10ˣ] [-] 6 [=]

Ergebnis: 83333,33 Hz entsprechend 83,3 kHz

7.5 Berechnung der Wellenlänge

Die *Wellenlänge* war früher eine andere Art der Angabe, wo im Wellenspektrum eine Sendestation zu finden war. Praktikabler ist die Angabe einer Frequenz.

Sie benötigen die Angabe der Wellenlänge aber für den Bau von Antennen und Antennenteilen. Hier geht es um Meter oder Zentimeter oder, wenn es sich um höhere Frequenzen handelt, auch mal um Millimeter!

Wissenswertes zur Wellenlänge:

- Je höher die Frequenz ist, desto kürzer ist die Wellenlänge. (Oder, wissenschaftlich ausgedrückt: Die Wellenlänge verhält sich umgekehrt proportional zur Höhe der Frequenz.)
- Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen:
  - Freiraum: 300.000 km/s
  - leitungsgebunden: 190.000 km/s bis 280.000 km/s
- Formelzeichen: λ (ausgesprochen Lambda)
- Einheit: **m**
- Berechnung der Wellenlänge:

  $$\lambda = \frac{300000}{f\ (\text{kHz})}\ \text{m}$$

  Zur besseren Handhabung werden die Frequenzen meist in kHz oder MHz in die Formel eingesetzt. Bei der Verwendung von MHz setzen Sie die Zahl 300 als Zähler ein.
- Umrechnung aus der Wellenlänge auf die Frequenz:

  $$f = \frac{300000}{\lambda(\text{m})}\ \text{kHz}$$

Übung

Schauen Sie sich auch dazu ein Beispiel an, indem Sie die Wellenlänge der Frequenz 7,100 MHz berechnen.

Lösung:

300 [÷] 7,1 [=]

Ergebnis: 42,25 m

Und noch ein Beispiel: Berechnen Sie die Frequenz bei einer Wellenlänge von 1 m.

Lösung:

300000 [÷] 1 [=]

Ergebnis: 300.000 kHz = 300 MHz

7.6 Berechnung des Effektivwerts

Betrachten Sie die Darstellung eines Sinussignals in Abbildung 7.2. Sie sehen, dass es bei der Kurvenlinie des Signals, die den Spannungsverlauf darstellt, einen Scheitelpunkt û und einen darunter liegenden Effektivwert U_{eff} gibt.

Spannung und auch Strom ändern stetig ihre Werte. Der Scheitelpunkt kennzeichnet den höchsten vorkommenden Spannungswert des Signals. Er ist wichtig für die Berechnung und Auslegung von Bauelementen hinsichtlich der Spannungsfestigkeit.

Der Effektivwert dient dazu, einen Vergleichswert gegenüber Gleichstrom und -spannung hinsichtlich thermischer Wirkung zu schaffen.

Der *Effektivwert*

- entspricht der Nennspannung; in der Praxis wird auf den Zusatz $_{\text{eff}}$ verzichtet.
- entspricht der Gleichspannung, die die gleiche Wirkung an einem ohmschen Widerstand erzielt wie das Quadrat der Wechselspannung.
- wird aus dem Scheitelwert û berechnet:

$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}} \text{V}$$

- wird in der Praxis einfacher berechnet: û × 0,707
- entspricht dem Kehrwert aus $\frac{1}{\sqrt{2}}$
- wird auf den Scheitelwert wie folgt umgerechnet:

$$\hat{u} = \sqrt{2} \times U_{\text{eff}} = 1{,}41 \times U_{\text{eff}} \text{ V}$$

Oder einfach ausgedrückt: Multiplizieren Sie den Effektivwert mit 1,41!

Übung

Und auch dazu gibt es wieder ein Beispiel, in dem der Spitzenwert einer sinusförmigen Wechselspannung von 17 Volt berechnet wird. Gesucht ist also der Effektivwert.

Lösung:

Geben Sie die Werte direkt in den Taschenrechner ein:

17 [×] 0,707 [=]

Das Ergebnis, abgelesen: 12,019.

Das gerundete Ergebnis lautet: 12 Volt.

7.7 Spannungsmessung mit dem Oszilloskop

Mit dem *Oszilloskop* können Sie nicht nur die Formen verschiedener Signale betrachten, sondern auch deren Spannung messen. Dazu benutzen Sie das Rastergitter auf dem Bildschirm. Bei der senkrechten (Y-)Achse wird meist angegeben, welchem Wert der Abstand zwischen zwei Kästchen entspricht. Diese Angabe wird als DIV, also Teilung (*Division*), bezeichnet.

Betrachten Sie Abbildung 7.3, und versuchen Sie dabei, die Spannung abzulesen. An der Y-Achse finden Sie den Hinweis 3V/DIV, also je Kästchen müssen Sie 3 Volt rechnen. Genau zwei Kästchen ist das Signal »hoch«, das ergibt 6 Volt.

Unterscheiden Sie zwischen der Spannung und dem Spitze–Spitze-Wert. Bei Letzterem zählen Sie die senkrechten Kästchen zwischen den beiden Maximalausschlägen.

Das Oszilloskop wird weiter in Abschnitt 25.14 behandelt.

7.8 Zeigerdarstellung sinusförmiger Signale

Ein herkömmlicher *Wechselstromgenerator* verfügt über einen festen (Stator) und einen rotierenden Teil (Rotor). Im einfachsten Fall besteht eines dieser beiden Teile aus einem Dauermagnet (wie beim Fahrraddynamo). Auch ein Kleinspannungselektromotor kann, wenn er angetrieben wird, deshalb als Generator wirken.

Durch die Drehung wird in der Spule die sinusförmige Wechselspannung erzeugt. Das Magnetfeld nimmt dabei zu und wieder ab. Durch die ständige Änderung des Magnetfeldes wird in der Spule die Wechselspannung hervorgerufen (siehe Abbildung 7.4).

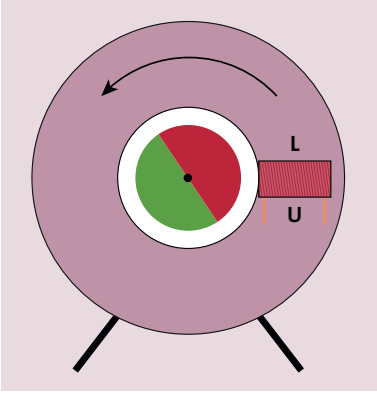


Abbildung 7.4 Prinzip eines Generators

Betrachten Sie Abbildung 7.2. Der *Phasenwinkel* unterscheidet sich zwischen einem Scheitelwert und der Null-Linie immer um 90°. Die Halbwelle weist damit einen Phasenwinkel von 180° auf. Den Zusammenhang mit der geometrischen Darstellung der Sinuserzeugung finden Sie in Abbildung 7.5.

Zum einfacheren Merken:

0° (Anfang) – 90° (positiver Scheitelwert) – 180° (Halbwelle, auf Null-Linie) – 270° (negativer Scheitelwert) – 360° (Schwingung vollständig, auf Null-Linie). Die Schwingung wird als Kreis betrachtet.

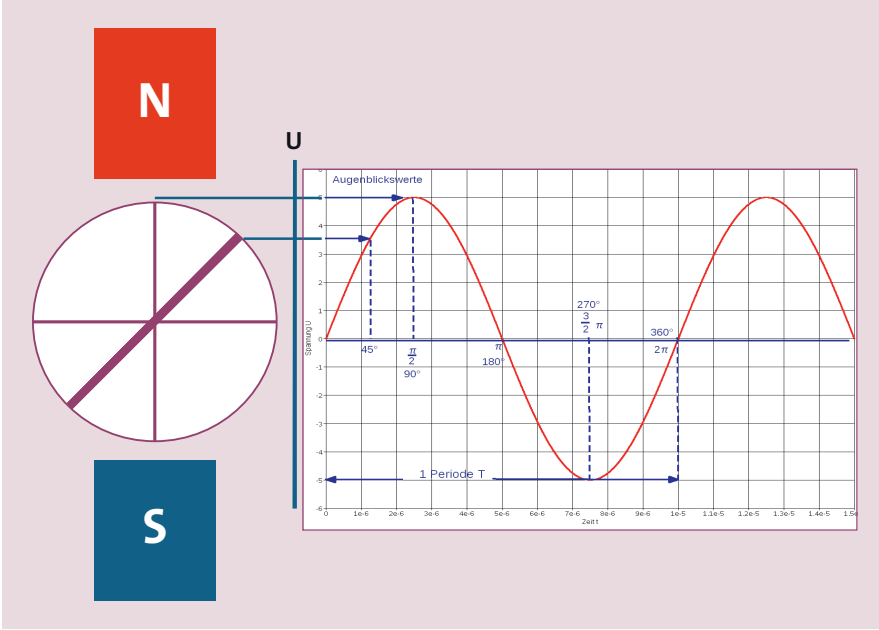


Abbildung 7.5 Phasenwinkel, Wechselstromgenerator

7.9 Phasendifferenzen

Identische Sinusschwingungen sind in ihren Phasenwinkeln verschoben, wenn deren Nulldurchgänge zeitlich versetzt stattfinden. Ein *Nulldurchgang* liegt vor, wenn das Sinussignal den Wert 0 aufweist. In Schirmbildern und Diagrammen wird dies durch die »Null-Linie« dargestellt.

Die *Phasendifferenzen* können durch Bauelemente hervorgerufen werden, die sich zwischen der Signalquelle und dem Messpunkt befinden.

Abbildung 7.6 zeigt eine Darstellung einer Phasendifferenz. Die Phasendifferenz wird in Winkelgraden angegeben. Betrachten Sie nochmals Abbildung 7.2 mit der Abbildung des Sinussignals.

90° bezeichnen den ersten positiven Scheitelpunkt einer Schwingung.

Die rote Sinuskurve bezeichnet die ursprüngliche Kurve, die grüne, nicht im Nullpunkt beginnende Kurve ist jene mit der versetzten Phasenlage. Sie erkennen, dass der erste Scheitelpunkt der Kurve CH2 in der Hälfte des ersten Kästchens liegt. Damit beträgt die Phasendifferenz 45°.

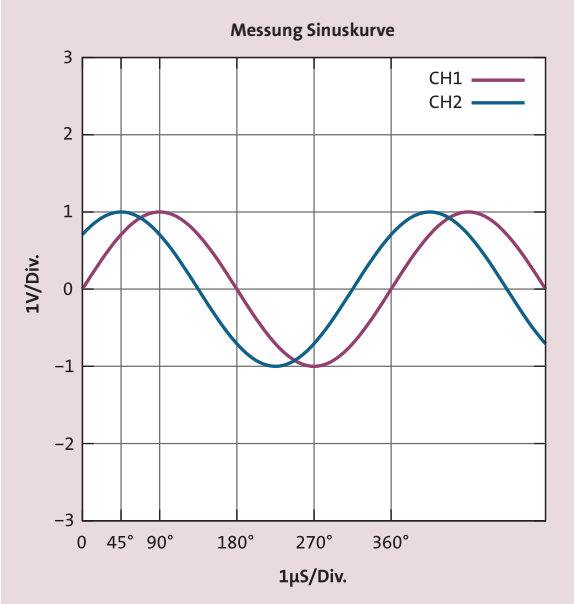


Abbildung 7.6 Phasendifferenz

7.10 Nichtsinusförmige Signale

Nur ein Sinussignal besitzt eine einzige Frequenz. Alle anderen Signalformen bestehen aus einem *Frequenzgemenge* und werden auch als *nichtsinusförmige Signale* bezeichnet.

Neben allerlei »unförmigen« Gebilden zählen hierzu die Rechteck-, die Sägezahn- und die Dreieck-Formen.

Nichtsinusförmige periodische Signale

- wiederholen sich regelmäßig und mit gleicher Kurvenform,
- bestehen aus einem Frequenzgemisch,
- weisen eine Grundfrequenz und ganzzahlige Vielfache davon auf.

Die ganzzahligen Vielfachen einer Grundfrequenz nennt man *Harmonische*. Bei der Zählung der Harmonischen wird die Grundwelle/Grundfrequenz immer als *erste Harmonische* bezeichnet (Nr. 1).

- Rechtecksignale bestehen aus der Summe von ungeraden ganzzahligen Harmonischen.
- Sägezahnsignale bestehen aus allen ganzzahligen Harmonischen.
- Die Harmonischen haben stets einen Bruchteil der Spannung der Grundharmonischen.

Rechtecksignale

Ein Rechtecksignal (siehe Abbildung 7.7) besteht aus den ungeraden ganzzahligen Harmonischen, also: 1, 3, 5, 7 ...

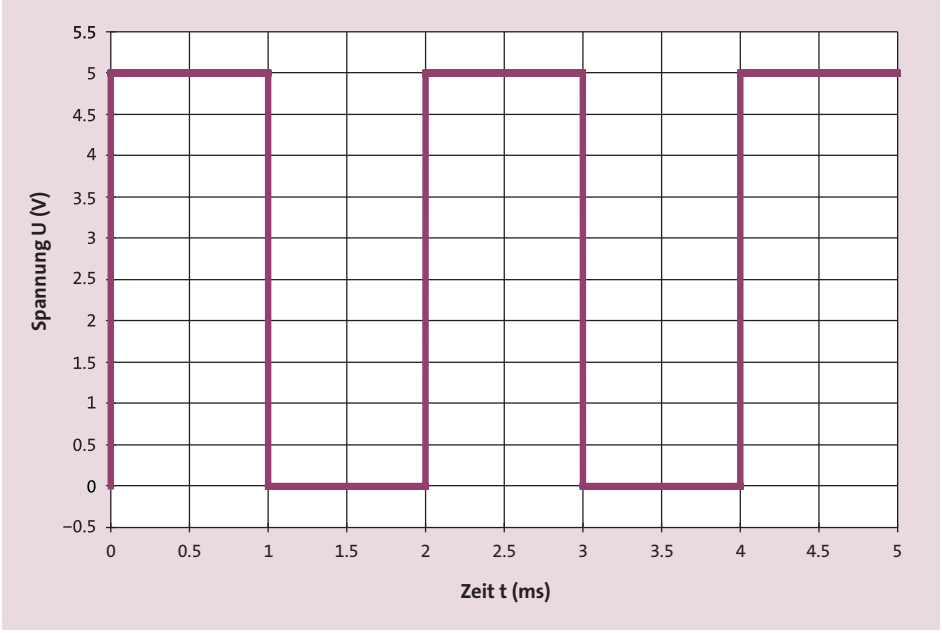


Abbildung 7.7 Rechtecksignal

Das folgende Beispiel in Abbildung 7.8 zeigt den Weg zum *Rechtecksignal*. Drei Sinussignale (1.000 Hz [1. Harmonische], 3.000 Hz [3. Harmonische], 5.000 Hz [5. Harmonische]) vermischen sich zu dem Rechteck, das hier als gestrichelte Linie angedeutet ist.

Deutlicher wird die gefilterte Ausgabe in Abbildung 7.9. Mit drei Sinuskurven ist die Rechteckform bereits gut erkennbar.

In der Praxis müssen Sie erkennen, dass es sich um eine rechteckförmige Struktur handelt und damit ungeradzahlige Harmonische vorliegen.

Allerdings bedeuten solche Schirmbilder bei Sendern, dass dieser Harmonische abstrahlt, was unerwünscht ist. Darum sollen Signale im Bereich der Funktechnik möglichst eine reine Sinusform aufweisen.

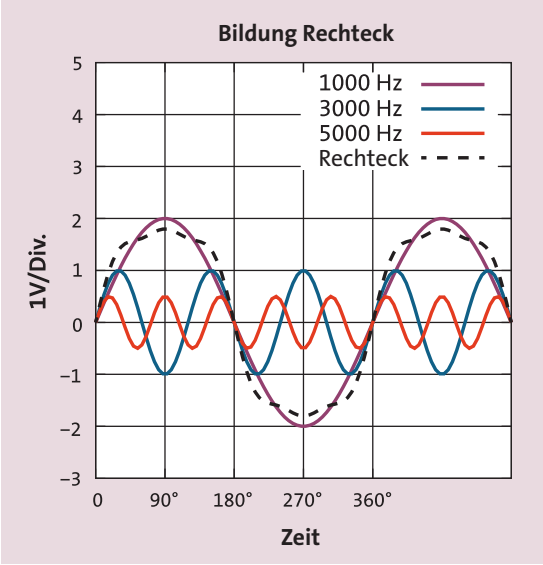


Abbildung 7.8 Sinuskurven mit ungeraden Harmonischen bilden ein Rechteck.

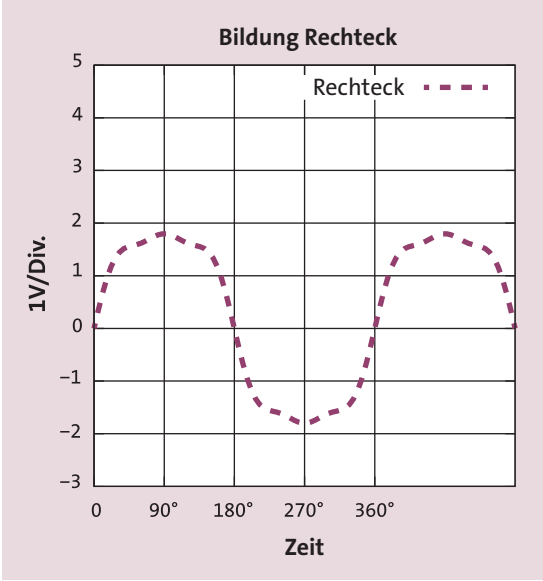


Abbildung 7.9 Signal aus drei Sinuskurven (ungerade Harmonische)

Sägezahnsignale

Beim *Sägezahnsignal* werden alle Harmonischen (1., 2., 3., ...) vereint (siehe Abbildung 7.10).

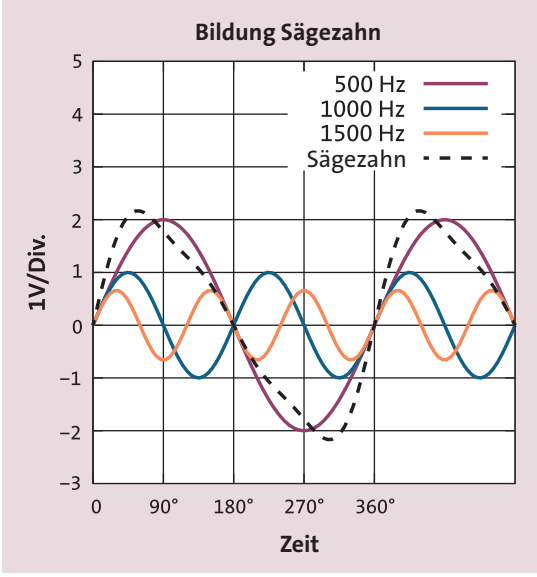


Abbildung 7.10 Sinuskurven aller Harmonischen bilden das Sägezahnsignal.

Prägen Sie sich das Schirmbild ein, auf dem alle Harmonischen ausgewählt werden.



Abbildung 7.11 Sägezahnsignal

Abstrahlung von Harmonischen und Betriebstechnik

Weil in den Anfangsjahren der Funktechnik viele Sender auch starke Signale der Harmonischen abstrahlten, wurde beim CQ-Ruf auch das Band angegeben, z. B. »cq 80«. So wurde verhindert, dass jemand vergeblich die Station auf 40 m anrief. Auch heute sind Sie nicht davor sicher. Transverter mit nicht ausreichend geschirmten Kabeln sind ebenso für diesen Effekt verantwortlich.

Impulse

In der Praxis müssen Sie beachten, dass ein Impuls immer eine Anstiegs- und eine Abfallzeit hat. Auch wenn die Darstellung am Oszilloskop oftmals rechteckig wirkt, kann man bei detaillierter Signalbetrachtung die nicht so senkrecht verlaufenden Flanken erkennen (siehe Abbildung 7.12).

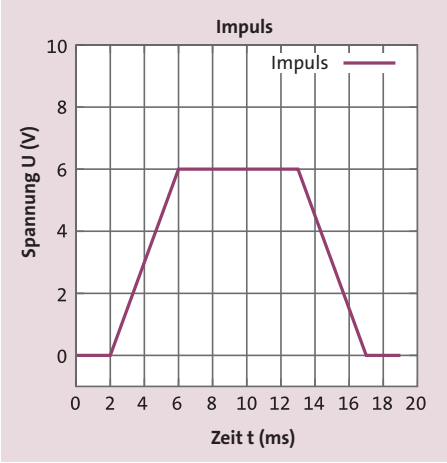


Abbildung 7.12 Darstellung eines Impulssignals mit Signalflanken

In der Digitaltechnik hat die Anstiegszeit einen entscheidenden Einfluss auf die Übertragungsgeschwindigkeit. Die »Flanken«, also die Übergänge von niedrigen zu hohen Signalpegeln und umgekehrt, können durch Signalechos auf Kabeln beeinträchtigt werden. Ebenso wirkt sich die Übertragung über Radiowellen, bei der Informationen ohne physische Verbindungen zwischen Sender und Empfänger ausgetauscht werden, auf die Signalqualität aus. Reflexionen von Objekten und Interferenzen können die Signalflanken verzerren, was zu einer abgeflachten Anstiegszeit führt. Diese Verzögerung senkt die Übertragungsgeschwindigkeit, da eine langsamere Signaländerung die Menge der pro Zeiteinheit übertragbaren Daten reduziert. Je steiler die Anstiegs- und Abfallzeiten, desto effizienter und schneller ist die Datenübertragung, da das System schneller zwischen den Zuständen wechseln kann. Je flacher der Signalanstieg ist, desto verminderter ist die Geschwindigkeit!

In der Praxis kennt man das beispielsweise aus der Verbindung zwischen einem modernen Funkgerät und einem PC. Das Funkgerät wird dabei über ein CAT-Interface vom PC aus gesteuert. Stellt man die maximale Übertragungsrate zwischen den beiden Geräten ein, treten manchmal Fehlereffekte auf. Reduziert man die Geschwindigkeit, so funktioniert die Verbindung. Der Grund hierfür können nicht gut geschirmte oder nicht gut verarbeitete Kabel sein.

In der Elektronik gilt, dass bis zu 10 % der Sollspannung als *low* und Werte ab 70 % (= Effektivwert) der Scheitelspannung als *high* bezeichnet werden. Die TTL-Technik (5 Volt = 1, bis zu 0,8 Volt = 0) definert sogar, dass ab 2,4 Volt »1« gilt.

Kennwerte zum Rechtecksignal

- **Impulsdauer** τ: Zeit, in der die Spannung den Sollwert hält, also mindestens das 0,707-Fache (Effektivwert) der Scheitelspannung
- **Periodendauer** T: Beschreibt die Zeit, in der eine vollständige Schwingung vollzogen wird.
- **Tastgrad** D: Drückt das Verhältnis der Impulsdauer τ zur Periodendauer T aus:

$$D = \frac{\tau}{T}$$

Abbildung 7.13 zeigt Ihnen die einzelnen Größen zum Rechtecksignal grafisch dargestellt. Beachten Sie, dass die Pausen, aber auch die Impulslängen oftmals variieren können, beispielsweise bei der Morsetelegrafie!

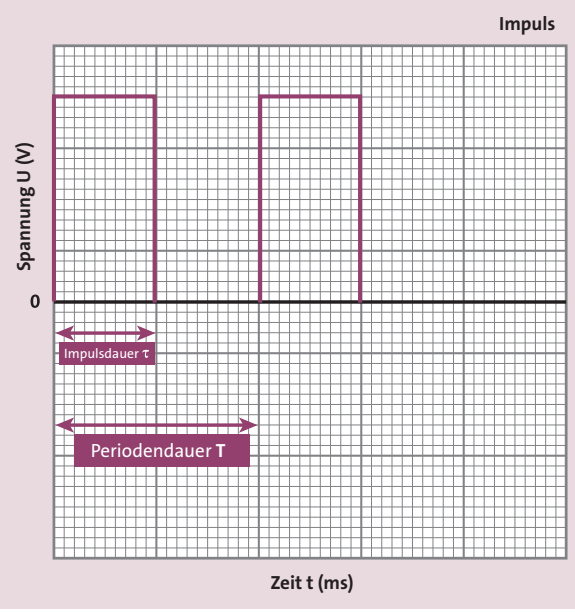


Abbildung 7.13 Darstellung der Impuls- und Periodendauer

Thermisches Rauschen

Das Rauschen setzt sich aus der Gesamtheit aller Frequenzen (gegebenenfalls innerhalb eines definierten Frequenzbereichs) zusammen. Beim *rosa Rauschen* nimmt die Amplitude (Leistungspegel) des Rauschens mit zunehmender Frequenz ab. Beim *weißen Rauschen* bleiben die Pegel über den gesamten Frequenzbereich konstant.

Nehmen Sie als Beispiel einen klassischen Empfänger mit umschaltbaren Bandbreiten (SSB: 2,5 kHz, CW 0,5 kHz).

Wenn Sie die Bandbreite von 2,5 kHz auf 0,5 kHz verringern und alle anderen Filterwerte sich nicht ändern, geben Sie nur noch eben ein Fünftel des Pegels an den Ausgang.

Zuerst berechnen Sie den Leistungsfaktor:

$$\frac{0{,}5}{2{,}5} = 0{,}2$$

Eine Leistungsviertelung entspricht 6 dB. Eine Fünftelung entspricht dann etwa 7 dB.

Kapitel 8
Das elektrische Feld (elektrostatische Feld)

Elektrische Felder sind allgegenwärtig und entstehen überall dort, wo elektrische Spannungen existieren. Sie können durch ruhende (elektrostatische Felder) oder bewegte elektrische Ladungen (dynamische elektrische Felder) erzeugt werden. Naturphänomene wie die elektrischen Felder zwischen geladenen Wolken und der Erde, die zu blitzartigen Entladungen führen, sind beispielhaft für die dynamischen Aspekte elektrischer Felder. Folgendes sollten Sie wissen:

- Elektrische Felder beschreiben die Kraftwirkung zwischen elektrisch geladenen Körpern, die sowohl anziehend als auch abstoßend sein kann. Diese Felder können statisch (elektrostatisch) sein, wenn sie von ruhenden Ladungen erzeugt werden, oder variabel, wenn sie von bewegten Ladungen ausgehen.
- Form und Ausbreitung der Feldlinien, die das elektrische Feld visualisieren, werden von der Form der Körper und deren Lage bestimmt.
- Stehen sich zwei leitende, unendlich große Platten parallel gegenüber, entsteht ein gleichförmiges (homogenes) elektrisches Feld. In einem homogenen Feld sind die Feldlinien gerade und gleichmäßig verteilt.
- Bei einem nicht homogenen elektrischen Feld breiten sich die Feldlinien ungleichmäßig aus, was oft in der Nähe von punktförmigen oder unregelmäßig geformten Ladungsträgern der Fall ist.
- Feldlinien treten bei elektrischen Leitern stets senkrecht aus und ein.
- Die elektrischen Feldlinien verlaufen innerhalb von elektrischen Leitern parallel zur Richtung des Stromflusses. Sie sind ein direktes Ergebnis der angelegten Spannung, die den Stromfluss erzeugt.
- Die elektrische Feldstärke um einen einzelnen elektrischen Leiter ist direkt proportional zur angelegten Spannung und gibt die Kraft pro Ladungseinheit an, die in diesem Feld erfahren wird. Die elektrische Feldstärke ist ein Maß für die Intensität des elektrischen Feldes.
- Formelzeichen: $\boldsymbol{E}$
- Einheit: **Volt/m** (Volt je Meter)

- Berechnung:

$$E = \frac{\text{Spannung (V)}}{\text{Distanz (m)}} = \frac{U}{d}\ \text{V/m}$$

Abbildung 8.1 zeigt das Prinzip des *elektrischen Feldes*. Darin wird die homogene Form dargestellt. Die Feldlinien verlaufen dabei von + nach –.

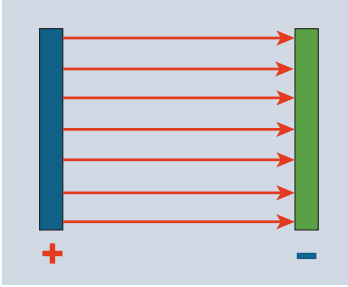


Abbildung 8.1 Homogenes elektrisches Feld

Diese Darstellung gilt allerdings nur für Plattenkondensatoren. Bei anderen Konstruktionen verlaufen die äußeren Feldlinien enstprechend der Geometrie des »Kondensators«, meist aber bogenförmig.

Die meisten Berechnungen drehen sich stets um die Formel

$$E = \frac{U}{d}$$

und deren Umstellungen. Die Spannung berechnen Sie so:

$$U = E \times d$$

Übung

Schauen Sie sich auch dazu ein Beispiel an: An die bekannte 9-Volt-Blockbatterie wird ein Plattenkondensator mit 6 mm Plattenabstand angeschlossen. Gesucht wird der Wert der elektrischen Feldstärke E zwischen den Platten.

Lösung: Es sind der Abstand und die Spannung bekannt. Zuerst rechnen Sie die 0,6 cm in Meter um: 0,006 m. Sie wenden die Formel im Taschenrechner an:

9 [÷] 0,006 [=]

Ergebnis: E beträgt 1.500 V/m.

Eine weitere Musterrechnung liefert Ihnen folgende Werte:

- Leistung: 5 Watt
- Abstand: 30 cm

- Widerstand: 50 Ω
- Gesucht: E

Lösung:

- Schritt 1: Berechnung der Spannung U (Schauen Sie zur Wiederauffrischung in Abschnitt 5.3 nach.)

  Die Spannung U erhalten Sie aus dieser umgestellten Formel:

  $U = \sqrt{P \times R}$

  Je nach Taschenrechnermodell gibt es wenigstens zwei Varianten:

  [√■] 5 [×] 50 [=]

  Oder

  5 [×] 50 [=] [√]

  Gerundetes Zwischenergebnis:

  15,8 V
- Schritt 2: Wenden Sie die Feldstärkeformel an:

  15,8 [÷] 0,3 [=]

  Ergebnis: 52,67 V/m

Ein weiteres Beispiel beschäftigt sich mit der maximalen Spannungsfestigkeit eines Kondensators. Besonders bei der Planung und Berechnung von Antennen und Antennenabstimmvorrichtungen ist dies von Bedeutung.

Bekannte Werte:

- Durchschlagsfestigkeit des Dielektrikums: 200 kV/cm
- Materialstärke: 0,2 mm
- Gesucht: maximale Spannung U

Lösung:

Wenden Sie die umgestellte Feldstärkeformel an:

$U = E \times d$

Beachten Sie dabei die Umrechnung von cm in mm und die Umstellung von kV auf V! Rechnen Sie mit dem Taschenrechner:

200000 [÷] 10 [×] 0,2 [=]

Die maximale Spannung darf 4.000 V (entsprechend 4 kV) betragen.

8.1 Das elektrische Feld als Bauelement: Der Kondensator

8.1.1 Vom Dielektrikum zum Bauelement

Der *Kondensator* ist ein Schlüsselbauteil im Elektronikbereich, aber auch in der Elektrotechnik. Er puffert Spannungsspitzen und -tiefen ab, ist für Wechselstrom ein kleines Hindernis und blockt Gleichspannung ab. In der Antennentechnik hilft er bei Abstimmarbeiten. Kurzum – er ist ein wichtiges, universelles Bauelement.

Der Kondensator ist eine praktische Anwendung der Gegebenheiten des elektrischen Felds. Abbildung 8.2 zeigt Ihnen diesen Zusammenhang und auch schon einmal die verschiedenen Schaltzeichen der unterschiedlichen Kondensatorausführungen.

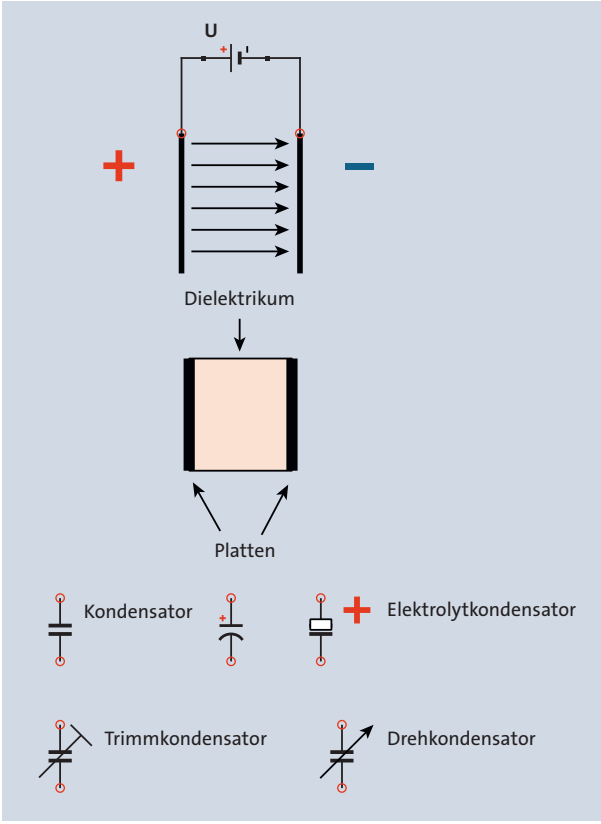


Abbildung 8.2 Elektrisches Feld und Kondensator

Die grundlegenden Eigenschaften eines Kondensators sind:

- Im Kondensator werden elektrische Ladungen gespeichert.
- Das Dielektrikum befindet sich zwischen den Kondensatorplatten. Es kann aus Luft, Vakuum, Kunststoff oder anderen, nichtleitenden Materialien gebildet werden. Jedes Dielektrikum verfügt über eine spezifische Dielektrizitätszahl.

- Je größer der Plattenabstand ist, desto geringer ist die Kapazität des Kondensators.
- Je größer der Plattenabstand und damit je stärker das Dielektrikum ist, desto spannungsfester ist der Kondensator.
- Je größer die Fläche der Platten ist, desto höher ist die Kapazität eines Kondensators.
- Ein Kondensator im Stromkreis sperrt Gleichspannung.
- Ein Kondensator bildet einen Wechselstromwiderstand.
- Die Kapazität *C* wird in Farad (F) und meist mit einem SI-Präfix (µ, p, n) angegeben.

Mit dem Begriff *Kondensatorplatten* werden schon lange nicht mehr nur parallel aufeinander ausgerichtete Blechplatten gemeint. Moderne »Kondensatorplatten« bestehen aus leitenden Folien, die aufgewickelt oder gefaltet werden. Gleiches gilt für das Dielektrikum. Bestand es früher nur aus Luft oder gar aus Vakuum, so werden heute verschiedene nichtleitende Materialien verwendet. Stärke und Material entscheiden über die Spannungsfestigkeit der Bauelemente.

Auf größeren Kondensatoren werden die Bauteilwerte (Kapazität, die höchste zulässige Spannung, zum Teil ergänzt um den Temperaturbereich) in Klarschrift aufgedruckt. Bei SMD-Ausführungen sucht man Aufdrucke oft vergebens. Hier hilft nur noch ein Messgerät mit einer speziellen Messpinzette zum Ermitteln der Kapazitätswerte.

In Abbildung 8.3 sehen Sie einige bedrahtete Kondensatoren.

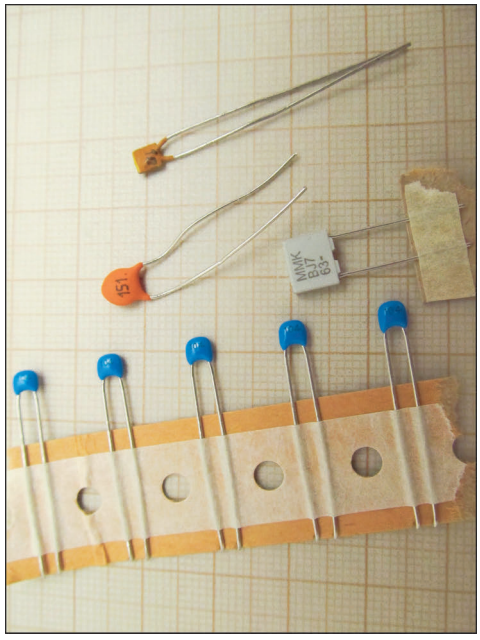


Abbildung 8.3 Bedrahtete Festwertkondensatoren

Die Kennzeichnung von Kondensatoren erfolgt ziemlich unheinheitlich. Es gibt einen Farbcode ähnlich dem, der bei den Widerständen eingesetzt wird. Zudem existieren neben der vollständigen Angabe in Klartext (wo es das Ablesen der Baugröße ermöglicht) auch verschiedene Kodierungen. Ebenso gibt es die von Widerständen her bekannten Werte in den E-Reihen.

Eine der am häufigsten vorkommenden Kodierungen benutzt eine Ziffern- und Buchstabenfolge. Die ersten beiden Zahlen repräsentieren den Wert, die dritte Stelle zeigt die Anzahl der Nullen hinter der Wertangabe. Die Buchstaben drücken die Abweichung aus. Die Kapazität wird stets in pF angegeben (siehe Tabelle 8.1). Die Toleranzangaben sind aber nicht auf jedem Kondensator aufgedruckt. In diesem Falle finden Sie nur die drei Ziffern vor!

Stelle				
1	**2**	**3**	**4**	
Wert-angabe		**Multiplikator (Anzahl der 0)**	**Toleranz**	
		0 = 10^0	**C < 10 pF, Abweichung in pF**	**C > 10 pF, Abweichung in %**
		1 = 10^1	B = ±0,1 pF	–
		2 = 10^2	C = ±0,25 pF	–
		3 = 10^3	D = ±0,5 pF	D = ±0,5 %
		4 = 10^4	F = ±1 pF	F = ± 1 %
		5 = 10^5	G = ±2 pF	G = ± 2 %
				H = ±2,5 %
				J = ± 5 %
				K = ±10 %
				M = ± 20 %

Tabelle 8.1 Kodierung von Kondensatoren

Beispiel: Der Aufdruck 104 entspricht 10 × 10^4 entsprechend 100.000 pF entsprechend 100 nF.

Weitere Kennzeichnungsvariante

Eine andere Variante benutzt die SI-Präfixkürzel als Dezimaltrenner in einem dreistelligen System: m steht für mF, µ für µF, n für nF und p für pF.

Beispiele finden Sie in Tabelle 8.2.

Wert	Kodierung
470 µF	m47
4,7 µF	4µ7
47 nF	47n
470 pF	n47
4,7 pF	4p7

Tabelle 8.2 Beispiele für die dreistellige Wertangabe

Die Besonderheit besteht hier darin, 100er-Wertangaben mit dem nächsthöheren SI-Präfix einzuleiten und damit »0,...« zu schreiben:

470 µF = 0,47 mF, geschrieben: m47

Elektrolytkondensatoren

Die bis hierher besprochenen Kondensatoren sind bipolar. Das heißt, es ist ohne Bedeutung, »wie herum« Sie diese in Ihre Schaltungen einbauen.

Eine besondere Gruppe stellen die *Elektrolytkondensatoren* dar. Sie sind in der Lage, besonders hohe Ladungsmengen zu speichern. »Normale« Elektrolytkondensatoren (*Elkos*) müssen richtig gepolt in die Schaltung eingebaut werden. Eine Verpolung führt unweigerlich zur Zerstörung des Bauelements. Bedingt durch die Reaktion des flüssigen Elektrolyts bläht sich das Bauteil auf, und die Bestandteile quellen nach außen. Bei minderer Qualität ist die Haltbarkeit begrenzt. Deshalb tauchen die Elkos oft im Zusammenhang mit den Diskussionen um die »geplante Obsolenz« von Elektronikgeräten auf. Verwenden Sie Qualitätsware, dann haben Sie lange Freude an Ihren selbst entwickelten und gebauten Schaltungen. Besonders haltbar sind Ausführungen mit festem Elektrolyt.

Bei der liegenden Ausführung erkennen Sie den Pluspol an der Rille an einem Ende im Gehäuse. Stehende Ausführungen verfügen über eine entsprechende Bedruckung.

Elektrolytkondensatoren dienen zum Abpuffern von Spannungsschwankungen, sie arbeiten in Verstärkern und Netzteilen. Sie können sich sogar eine kleine LED-Taschenlampe mit einem Elko als Energieversorgung aufbauen.

Es gibt auch bipolare Ausführungen, diese sind aber relativ selten zu finden. Abbildung 8.4 zeigt Ihnen zwei Exemplare dieses Kondensatortyps.

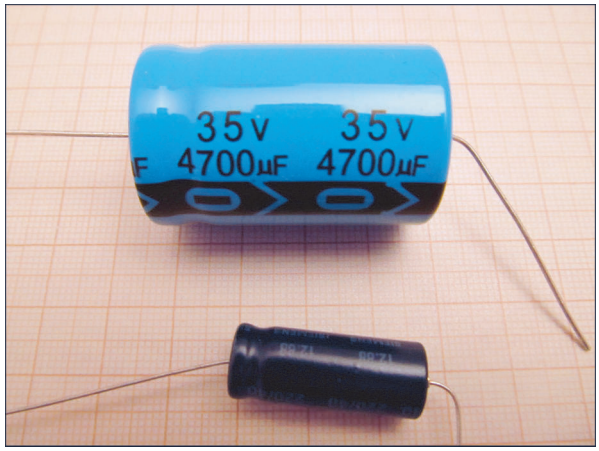


Abbildung 8.4 Bedrahtete Elektrolytkondensatoren

Eine besondere Ausführung von Elektrolytkondensatoren stellen die *Tantalkondensatoren* dar. Sie sind recht klein in ihren Abmessungen und auch nur für niedrige Spannungswerte erhältlich.

Variable Kondensatoren

Für Abstimm- und Testzwecke kommen variable Kondensatoren zum Einsatz.

Dabei gibt es solche, deren Kapazität nur selten justiert werden muss. Diese nennt man *Trimmkondensatoren* oder kurz *Trimmer*. Abbildung 8.5 zeigt Ihnen eine bedrahtete Ausführung.

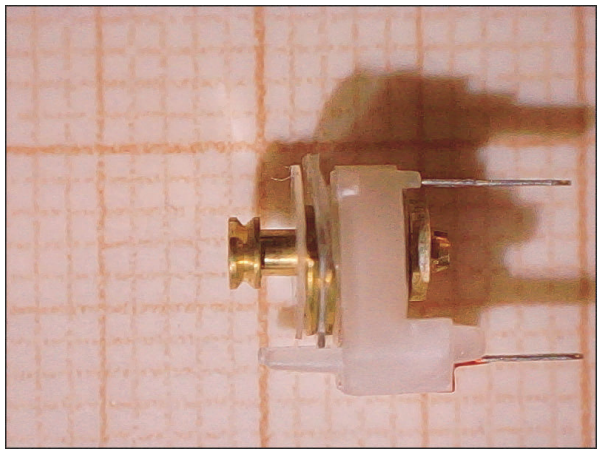


Abbildung 8.5 Trimmkondensator

Muss die Kapazität während des normalen Betriebs der Schaltung verändert werden, kommen Drehkondensatoren zum Einsatz (siehe Abbildung 8.6 und Abbildung 8.7).

Die kleine Version können Sie in Antennenanpassgeräten für den QRP-Bereich verwenden, die große in Anpass- und Röhrensenderschaltungen.

In Abbildung 8.6 sehen Sie, dass das Dielektrikum aus einem Kunststoffmaterial gebildet wird.

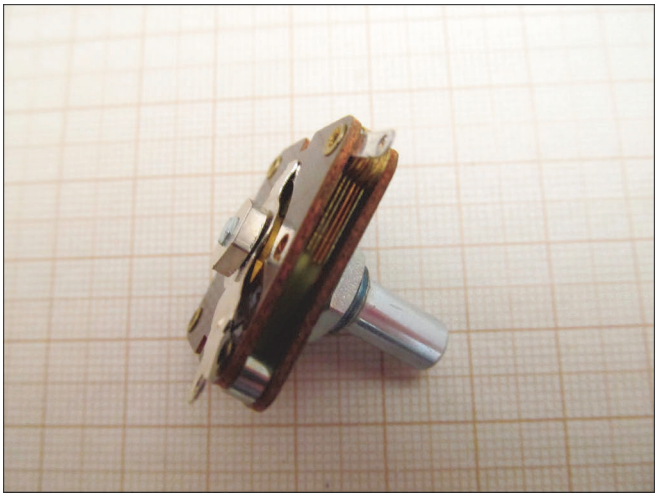


Abbildung 8.6 Kleiner Drehkondensator

Der Drehkondensator aus Abbildung 8.7 zeigt die klassischen Details eines Kondensators. »Richtige« Metallplatten bilden den Raum für die Ladungen.

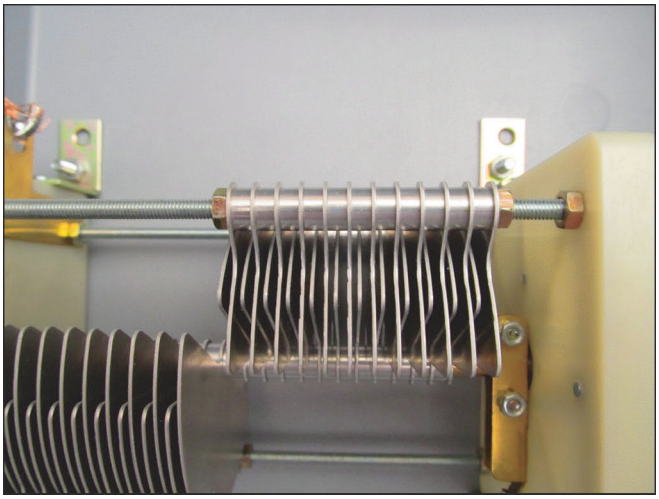


Abbildung 8.7 Detail eines großen Luftdrehkondensators

An der Mittelachse befinden sich ebenso Plattenpakete, die in die feststehenden eintauchen. Je nach Bauform arbeiten solche Kondensatoren entweder als reine variable Kapazität oder als einstellbarer Spannungsteiler.

Natürlich gibt es variable Kondensatoren auch in SMD-Ausführung. Hier werden Sie bei den sehr kleinen Bauformen oft jegliche Beschriftung vermissen. Sie benötigen dann ein Kapazitätsmessgerät mit entsprechender Messpinzette.

In Abbildung 8.8 sehen Sie einen »normalen« Kondensator und einen Trimmer. Dieses Bild wurde mithilfe eines Werkstattmikroskops aufgenommen, bei der Unterlage handelt es sich um Millimeterpapier.

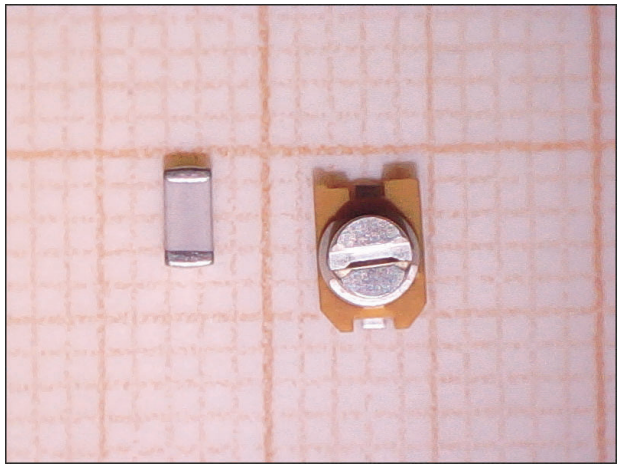


Abbildung 8.8 SMD-Kondensatoren

Kondensatoren selber bauen

Sie haben zwei Möglichkeiten, selbst Kondensatoren anzufertigen.

Am einfachsten kommen Sie mit Koaxialkabel zum Ziel. Die Hersteller geben hier sogar die Kapazität je Meter an. Die »Platten« werden aus der Abschirmung (Geflecht und/oder Metallfolie) und dem Innenleiter gebildet. Die Isolierung des Innenleiters ist zugleich das Dielektrikum.

Die Kabel sind zudem sehr spannungsfest. Diejenigen Funkamateure, die ihre Drahtantennen für Kurzwelle selbst bauen, greifen bei Sperrkreisen oft darauf zurück. Abbildung 8.9 zeigt ein Koaxialkabelstück, das anschließend als Kondensator seinen Dienst verrichtet.

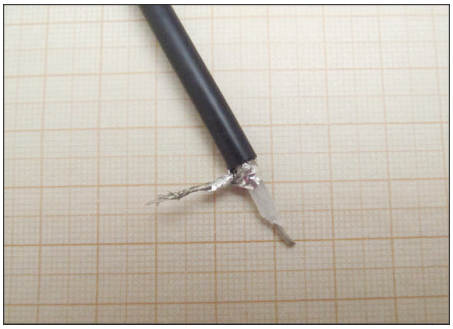


Abbildung 8.9 Kondensator aus Koaxialkabelmaterial

Einen klassischen Wickelkondensator können Sie sich aus Metall- und Kunststofffolie bauen. Tabelle 8.3 führt die wichtigsten Arbeitsschritte auf.

Sie benötigen:

- 2 gleich große Stücke Aluminiumfolie
- 2 gleich große Stücke Kunststofffolie (hier: Aufkleber-Trägerfolie)
- 1 Kartonrolle (Toilettenpapierrolle)
- Klebestreifen zum Fixieren
- Werkzeug: Schere

Nr.	Arbeitsschritt
1	Schneiden Sie die Folienteile zurecht. Die Metallfolienteile müssen schmaler und kürzer ausfallen als die Kunststoffteile. (So verhindern Sie Kurzschlüsse.)
2	Falten Sie an je einem Ende der Metallfolie einen Falz (siehe Abbildung 8.10).  **Abbildung 8.10** Falzen der Enden der Aluminiumfolie

Tabelle 8.3 Aufbauschritte für einen Kondensator

Nr.	Arbeitsschritt
3	Legen Sie die Folienteile wie folgt von unten nach oben: Metallfolie – Kunststofffolie – Metallfolie – Kunststofffolie. Achten Sie darauf, dass die Metallfolien sich nirgends berühren. Die Falze der Metallfolien liegen an einem Ende des Stapels und enden fast bündig mit der Kunststofffolie (siehe Abbildung 8.11, Abbildung 8.12).

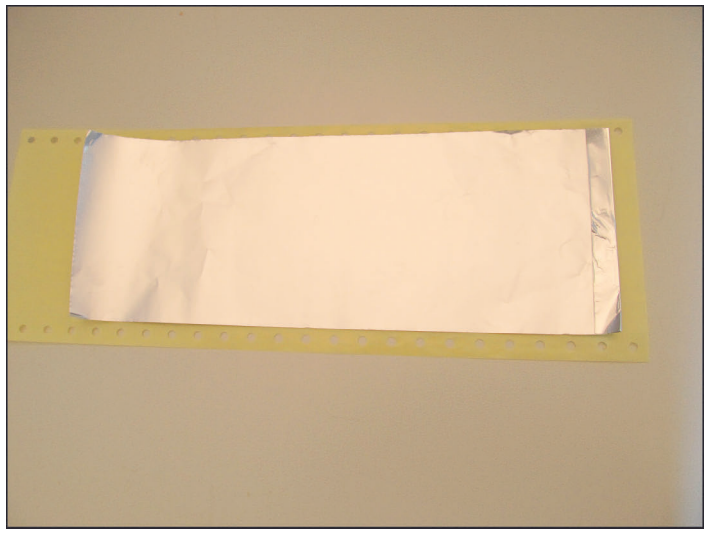


Abbildung 8.11 Kondensatorplatten und Dielektrikum

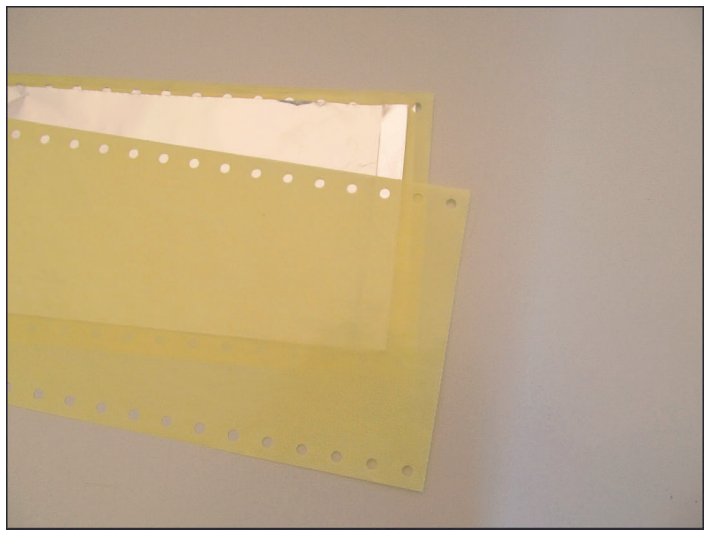


Abbildung 8.12 Auflegen der Deckfolie

Tabelle 8.3 Aufbauschritte für einen Kondensator (Forts.)

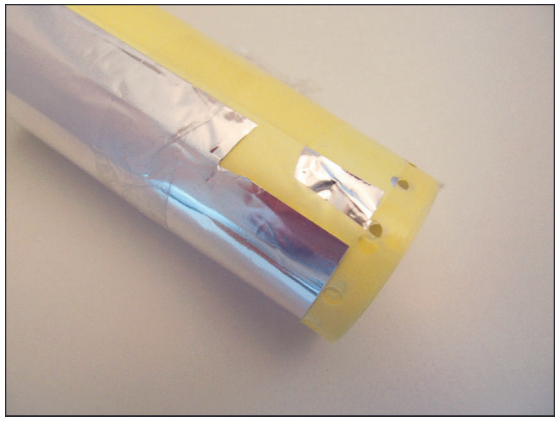
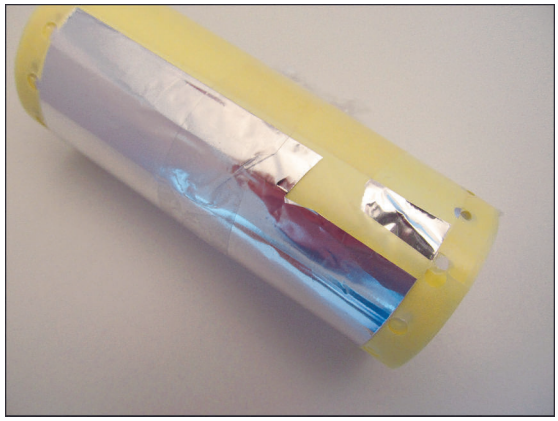
Nr.	Arbeitsschritt
4	Kleben Sie das falzfreie Ende des Folienstapels an die Kartonrolle. Die Deckfolie sollte dabei am Karton anliegen.
5	Wickeln Sie den Stapel relativ straff auf die Rolle, und halten Sie das Ende mit den Falzen gut fest.
6	Wickeln Sie einige Runden des Klebebands zum Fixieren um die Rolle herum. Lassen Sie aber die Ränder frei.
7	Schneiden Sie ein Stück der oberen Metallfolie und des Dielektrikums ab. Damit ist die zweite »Platte« zugänglich (siehe Abbildung 8.13).  **Abbildung 8.13** Zugeschnittene Anschlussflächen
8	Glückwunsch! Sie haben einen Kondensator aufgebaut (siehe Abbildung 8.14).  **Abbildung 8.14** Fertiger Kondensator

Tabelle 8.3 Aufbauschritte für einen Kondensator (Forts.)

Anschließend können Sie Ihr Werk mit einem Messgerät so, wie in Abbildung 8.15 gezeigt, überprüfen und die Kapazität ermitteln. Der hier aufgebaute Kondensator hat rund 4,4 nF.

Messungen an Kondensatoren

Wie bei allen anderen elektronischen Bauelementen auch muss der Kondensator spannungsfrei und außerhalb der Schaltung sein. Viele moderne Multimeter oder spezielle LCR-Messgeräte (für Induktivitäten, Kondensatoren und Widerstände) ermöglichen die sekundenschnelle Ermittlung der Kapazität eines Kondensators. Ein Problem dabei ist der Kondensator, der sich aus den Messleitungen bildet. Die modernen Messgeräte verfügen entweder über eine Taste, z. B. [REL], die ähnlich der [TARA]-Taste einer elektronischen Waage dieses Ergebnis auf 0 setzt. Oder das Messgerät erkennt die Messleitungen als solche. Abbildung 8.15 zeigt ein einfaches LCR-Messgerät mit Kondensator beim Messvorgang.



Abbildung 8.15 LCR-Messgerät bei Kapazitätsmessung

Ladungsmenge und Kapazität

Die Kapazität von Kondensatoren hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie »Plattengröße« und Dielektrikum.

- Formelzeichen: C
- Einheit: F (Farad; gebräuchliche SI-Präfixe in der Praxis: m, µ, n, p)

- Je höher die angelegte Spannung ist, desto höher ist die Ladung.
- Je dünner das Dielektrikum (»je geringer der Plattenabstand«) ist, desto höher ist die Kapazität.

  Umgekehrt: Je dicker das Dielektrikum (»je größer der Plattenabstand«) ist, desto geringer ist die Kapazität.
- Das Material des Dielektrikums beeinflusst ebenso die Kapazität. Dies wird durch die Dielektrizitätszahl ε_r (ausgesprochen: Epsilon) berücksichtigt.
- Die Dielektrizitätszahl gibt an, um wie viel die elektrische Feldstärke gegenüber dem Vakuum abnimmt und um wie viel die Kapazität zunimmt. Vakuum hat ein ε_r von 1, Luft ein ε_r von 1,000059.
- ε_0 hat den Wert $8.854187817620 \times 10^{-12}$ F je Meter.
- Die Formel zur Kapazitätsberechnung (Plattenfläche, Plattenabstand, Dielektrizitätszahl) lautet:

  $$C = \frac{\varepsilon_0 \times \varepsilon_{r\times} \times \mathrm{A}}{d}$$

Hier erkennen Sie, dass ein größerer Plattenabstand *d* die Kapazität eben verringert.

Berechnung der Kapazität aus Strom, Zeit und Spannung (der Strom wird konstant gehalten):

$$C = \frac{\text{Strom (A)} \times \text{Zeit (s)}}{\text{Spannung (V)}} = \frac{I \times t}{U}\ \mathrm{F}$$

- Definition F:

  $$1\ \mathrm{F} = 1\frac{\mathrm{A} \times \mathrm{s}}{\mathrm{V}}$$

8.1.2 Zusammenschaltung von Kondensatoren

Bei der Zusammenschaltung von Kondensatoren funktionieren die Berechnungen genau entgegengesetzt zu denen bei den Widerständen.

Serienschaltung von Kondensatoren

Bei der Serienschaltung vermindert sich die Gesamtkapazität. Diese ist dabei niedriger als die kleinste Teilkapazität.

Die Serienschaltung von Kondensatoren vergrößert den Plattenabstand.

$$\frac{1}{C_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \ldots$$

Hieraus müssen Sie noch den Kehrwert berechnen, um die Kapazität in F zu erhalten.

Haben alle Kondensatoren den gleichen Wert, teilen Sie die Kapazität eines Kondensators durch die Anzahl:

$$C_{\text{gesamt}} = \frac{C_{\text{einzel}}}{\text{Anzahl}}\ \text{F}$$

Übung

Berechnen Sie das Beispiel aus Abbildung 8.16 mit beiden Methoden.

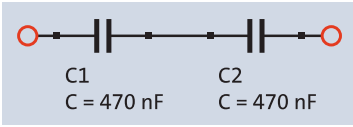


Abbildung 8.16 Serienschaltung von Kondensatoren

Lösung:

Sie können die einfache Methode verwenden, da beide Kondensatoren über dieselbe Kapazität verfügen:

470 [÷] 2 [=]

Ergebnis: 235 nF

Wenn Sie die Formel mit dem Kehrwert verwenden, rechnen Sie Folgendes:

1 [÷] 470 [+] 1 [÷] 470 [=] [1/X]

Dies führt zum gleichen Ergebnis.

Kehrwerttasten

Kehrwerttasten können mit [1/X] oder [X⁻¹] beschriftet sein!

Parallelschaltung von Kondensatoren

Die Gesamtkapazität ergibt sich aus der Summe der einzelnen (Teil-)Kapazitäten:

$$C_{\text{gesamt}} = C_1 + C_2 + C_3 \ldots$$

Übung

Berechnen Sie die Gesamtkapazität des Beispiels aus Abbildung 8.17 in µF.

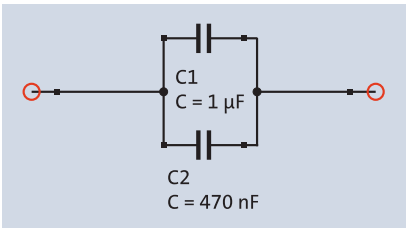


Abbildung 8.17 Parallelschaltung von Kondensatoren

Lösung:

Beachten Sie die verschiedenen SI-Präfixe!

1 + 0,47 = 1,47 µF

Gemischte Zusammenschaltung von Kondensatoren

Auch hier gilt, wie bei den Widerständen auch, dass Sie zunächst die Teiläste in sich berechnen und anschließend Verzweigungen auflösen, bevor Sie die Zwischenergebnisse zum Endergebnis zusammenfassen.

Übung

Als Beispiel berechnen Sie die beiden Schaltungen, die Sie in Abbildung 8.18 und Abbildung 8.19 sehen.

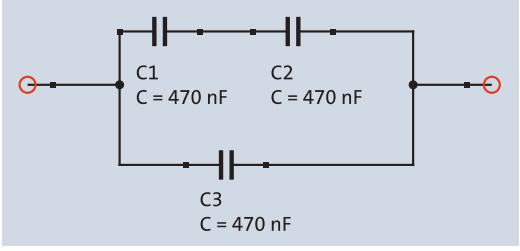


Abbildung 8.18 Zusammenschaltung von Kondensatoren, Serienschaltung in der Verzweigung

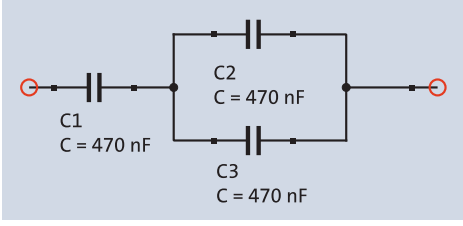


Abbildung 8.19 Zusammenschaltung von Kondensatoren, Serien- und Parallelschaltung von Kondensatoren

Lösung zu Abbildung 8.18:

- Schritt 1: Teilkapazität aus C1 und C2:

  1 ÷ 470 + 1 ÷ 470 = 1/X

  Zwischenergebnis: 235 nF
- Schritt 2: Gesamtkapazität

  235 nF + 470 nF ergibt 705 nF.

Lösung zu Abbildung 8.19:

- Schritt 1: Parallelverzweigung:

  $C_{\text{Gesamt}} = C_1 + C_2 = 470\,\text{nF} + 470\,\text{nF} = 940\,\text{nF}$
- Schritt 2: Serienschaltung Parallelverzweigung und Serienkondensator 470 nF:

  $$\frac{1}{C_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{470} + \frac{1}{940}$$

und daraus der Kehrwert:

1 ÷ 470 + 1 ÷ 940 = 1/X

Ergebnis: gerundet 313 nF

8.1.3 Ladung und Entladung eines Kondensators im Gleichspannungskreis

Beim Anschluss an eine Gleichspannungsquelle lädt sich ein Kondensator auf. Unmittelbar nach dem Anschluss ist der Ladestrom am höchsten. Er nimmt ab, je länger der Kondensator mit der Versorgung verbunden ist. Umgekehrt verhält es sich mit der Spannung des Kondensators. Während der Ladestrom abnimmt, nimmt die Spannung zu.

Bei der Entladung verhält es sich ebenso. Spannung und Strom beginnen mit Höchstwerten, die mit der verlaufenden Zeit abflachen und schließlich gegen 0 gehen.

Sie können das mit normalen Messgeräten überprüfen. Dieser Vorgang läuft aber rasch ab, sodass es fast nicht möglich ist, zwei oder drei Messstellen zu überblicken.

Schalten Sie Ihr Multimeter oder LCR-Messgerät in den Widerstandsmessbereich (meist mit Ω gekennzeichnet). Schließen Sie die Spitzen Ihrer Messkabel einen Moment kurz, und legen Sie sie anschließend an die Anschlüsse eines entladenen Kondensators (empfohlene Kapazität: 470 nF oder mehr). Sie sehen kurzzeitig in der Anzeige einen Wert, der aber rasch wieder verschwindet.

Eine weitere Möglichkeit, die Kondensatorladung »erleben« zu können, haben Sie mit einem akustischen Durchgangsprüfer. Auch hier muss der Kondensator über eine ausreichende Kapazität verfügen, damit genügend Strom fließen kann. Sie wer-

den einen ganz kurzen Ton hören. Ein Dauerton hingegen würde einen defekten Kondensator kennzeichnen.

Geladene Kondensatoren

Geladene Kondensatoren können oberhalb von 60 Volt Gleichspannung bereits Lebensgefahr bei Berührung bedeuten. Wenn Sie Schaltungen entwickeln und die verwendeten Spannungen über dem SELV-Bereich liegen, müssen Sie Entladewiderstände vorsehen. Damit sind Sie geschützt, wenn Sie am offenen und abgeschalteten Gerät arbeiten.

(SELV = *Safety Extra Low Voltage*, früher *Schutzkleinspannung*)

Das Lade-/Entladespiel sehen Sie in einer QucsStudio-Simulation (siehe Abbildung 8.20). Es wird eine Impulsquelle (V1) genutzt, die einen 2 ms langen Impuls mit 12 Volt an die Schaltung abgibt. Genau nach dieser Zeit unterbricht der Schalter S2 den Ladevorgang, während S1 die Entladung zuschaltet. Der Widerstand R1 verzögert Ladung und Entladung. Das Messwerk Pr1 gibt den Ladestrom an, Pr3 gibt den Entladestrom an. Mit Pr2 wird die Kondensatorspannung gemessen.

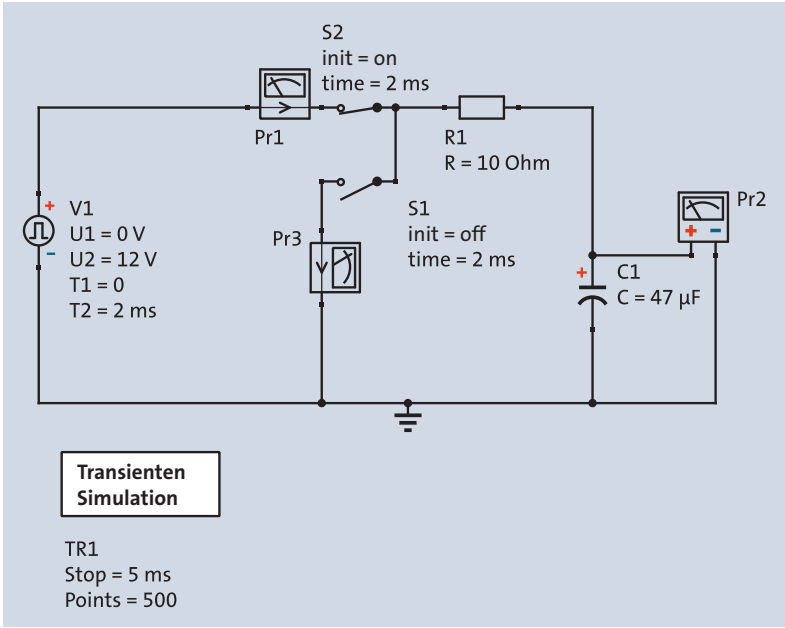


Abbildung 8.20 Simulation einer Ladung und Entladung eines Kondensators

In Abbildung 8.21 sehen Sie den Ablauf. Zunächst steigt die Spannung bis knapp 12 Volt (oberes Diagramm) an, und der Ladestrom beginnt mit einem Spitzenwert von 1,2 Ampere und geht schon fast gegen 0. Nach 2 ms erfolgt die Umschaltung. Die Spannung und der Entladestrom sinken rasch mit der Zeitdauer wieder ab.

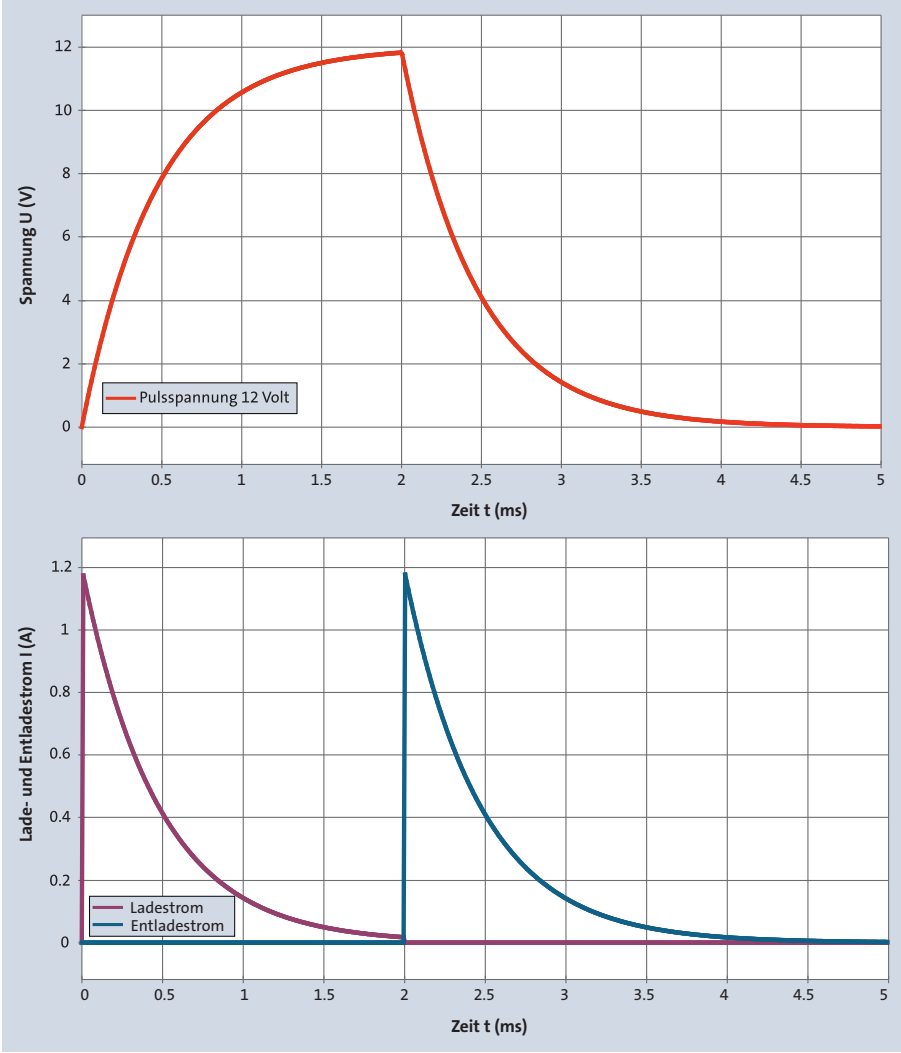


Abbildung 8.21 Messkurven der Simulation

Kondensator und Gleichspannung

Wichtig: Gleichstrom fließt nicht durch einen (intakten) Kondensator!

Für die Ladezeit gibt es die Zeitkonstante **τ** (Tau). Darin steigt die Kondensatorspannung auf 63 % der Ladespannung. Der Ladestrom hingegen sinkt auf 37 % seines Startwerts.

Der Widerstand im Ladestromkreis und natürlich die Kapazität des Kondensators bedingen den Wert von **τ**.

$\tau = \text{Widerstand}\ (\Omega) \times \text{Kapazität}\ (F) = R \times C\ (\mathbf{s})$

Kapitel 9
Magnetisches Feld und Induktivitäten

In diesem Kapitel beschäftigen wir uns mit magnetischen Feldern und mit der Induktivität.

9.1 Das magnetische Feld

In der Natur existiert zum einen das Erdmagnetfeld zwischen dem Nord- und dem Südpol. Darüber hinaus gibt es Dauermagnete, die z. B. in Drehspulmesswerken, kleinen Elektromotoren und Fahrraddynamos verwendet werden. Die Materialien mit magnetischen Eigenschaften nennt man auch *ferromagnetische Stoffe*. Hierzu zählen Eisen (Fe), Nickel (Ni) und Cobalt (Co). Bei vielen dieser Materialien hängt der Magnetismus auch mit der Temperatur zusammen. Magnete können ihre Kraft bei hohen Temperaturen verlieren.

Sobald Strom fließt, entsteht entlang eines Leiters ein Magnetfeld. Sie können das einfach testen. Sie benötigen nur einen Kompass und zwei oder drei Batterien. Legen Sie den Kompass auf eine Unterlage, und lassen Sie ihn in Ruhe seine Ausrichtung finden. Neben den Kompass legen Sie einen Draht, der schon an einem Ende mit der Spannungsquelle verbunden ist. Beobachten Sie nun genau die Kompassnadel, und verbinden Sie das offene Ende mit dem zweiten, noch freien Pol der Gleichspannungsquelle. Die Nadel richtet sich nun anders aus. Sie haben ein Magnetfeld gebildet. Ein Netzteil ohne regelbare Strombegrenzung ist für diesen Versuch nicht geeignet, da der Kurzschluss die Sicherung im Gerät auslöst und damit den Stromfluss unterbricht.

Wenn Sie über mehrere Kompasse und eine Möglichkeit verfügen, Gleichströme ab 15 Ampere fließen zu lassen, können Sie sich die konzentrische Ausbildung des magnetischen Feldes ansehen. Lassen Sie die Leiter senkrecht verlaufen, und platzieren Sie die Kompasse um den stehenden Leiter herum. Wenn Sie den Strom fließen lassen, sehen Sie, wie sich die Kompassnadeln »um den Leiter herum« ausrichten.

Magnetisches Feld

Notwendig: Stromfluss, »Strom strahlt«

Beim gestreckten, stromdurchflossenen Leiter baut sich das Magnetfeld in konzentrischen Kreisen um den Leiter herum auf.

Magnetische Feldstärke:

- Formelzeichen: ***H***
- Einheit: **A/m** (Ampere/Meter)

Berechnung am geraden, mit Gleichstrom durchflossenen Leiter:

$$H = \frac{\text{Strom (A)}}{2 \times \pi \times r\,(\text{m})} = \frac{I}{2 \times \pi \times r}\ (\text{A/m})$$

Übung

Schauen Sie auch dazu ein Beispiel an: Sie messen einen Strom von 15 Ampere. Sie möchten wissen, welche Stärke das magnetische Feld in einem halben Zentimeter Abstand vom Leiter hat.

Lösung:

- Schritt 1: Rechnen Sie den Abstand r auf Meter um: 0,005 m
- Schritt 2: Die Berechnung an sich:

$$H = \frac{15\ \text{A}}{2\ \times\ \pi\ \times 0{,}005}\ \text{A/m}$$

Eingabe mit dem Taschenrechner:

15 [÷] [(] 2 [×] [π] [×] 0,005 [)] [=]

Ergebnis gerundet: 477 A/m

9.1.1 Der Skin-Effekt und Wirbelströme

Der Skin-Effekt hat mit Verlusten beim Transport von Wechselströmen zu tun.

Fließt Gleichstrom durch einen Leiter, so wird dessen gesamter Querschnitt für den Ladungstransport genutzt.

Wirbelströme entstehen in einem Leiter durch ein sich änderndes Magnetfeld. Je schneller dieser Vorgang geschieht (»je höher die Frequenz ist«), desto ausgeprägter tritt dieses Phänomen auf. Die Wirbelströme wiederum erzeugen ein eigenes Magnetfeld, das die Ladungsträger an die Oberfläche des Leiters drängt. Dadurch steht

weniger Querschnitt für den Ladungstransport zur Verfügung, womit sich bei steigender Frequenz der Leitwiderstand erhöht.

Wirbelströme erwärmen Spulenkerne, was im Leistungsbereich bei Transformatoren, Elektromotoren, aber auch bei Antennenanpassspulen mit Ringkernen zu beachten ist.

In der Praxis wirkt man diesem Effekt durch »verseilte« Übertragungsleitungen (Litzen) entgegen. Man verwendet also nicht einen einzigen, dicken Leiter, sondern viele Einzelleiter.

Leiter können auch zur Verbesserung des Leitverhaltens mit Materialien überzogen werden, die ein sehr gutes Leitverhalten aufweisen (Silber [Ag], Aluminium [Al]). Im Bereich sehr hoher Frequenzen oder Leistungen werden beispielsweise versilberte Kupferrohre und Hohlleiter verwendet.

Bei Hochfrequenzanwendungen bemessen Sie Ringkerne in Übertragungsschaltungen mit entsprechenden Durchmessern. Bei Transformatoren verwenden Sie ebenfalls Ringkernausführungen oder solche aus dünnen, voneinander isolierten »Dynamoblechen« (Weicheisenblech, kein Stahlblech).

9.2 Induktivität (Spulen und Transformatoren)

Mittlerweile wissen Sie, dass sich um einen stromdurchflossenen Leiter herum ein Magnetfeld aufbaut. So richtig nutzbar wird dies, wenn man den Leiter zu einer Spule aufwickelt. Das Magnetfeld wird dann räumlich konzentriert.

Aus diesem Grunde gibt es heute Elektromotoren, Transformatoren, Hubmagnete, aber auch Abstimmelemente für die Funktechnik, Übertrager, Drosseln ... kurzum, die moderne Kommunikationstechnik eben.

Auch der umgekehrte Fall funktioniert: Ein wechselndes Magnetfeld bewirkt, dass sich in der Spule eine Spannung aufbaut. Wenn Sie zwei Spulen auf einem gemeinsamen Kern betreiben, kann die eine mit einer Wechselspannung angesteuert werden, die zweite gibt wiederum Spannung ab. Dies ist auch das Grundprinzip von Übertragern und Transformatoren.

Eine *Induktivität* von 1 Henry liegt vor, wenn eine gleichförmige Änderung des Stroms von 1 Ampere während einer Sekunde eine Selbstinduktionsspannung von 1 Volt hervorruft.

- Formelzeichen: $\boldsymbol{L}$
- Einheit: **H** (Henry)
- Magnetische Feldkonstante:

  μ_0: $1{,}2566 \times 10^6 \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}$

9.3 Schaltzeichen für Induktivitäten

Die Schaltzeichen für die Induktivitäten drücken das Aufwickeln eines Leiters bildlich aus. Ältere, nicht mehr gültige Symbole zeigen die Spule noch als schwarzen oder schraffierten Block.

Abbildung 9.1 zeigt Ihnen einige Schaltzeichen für Spulen.

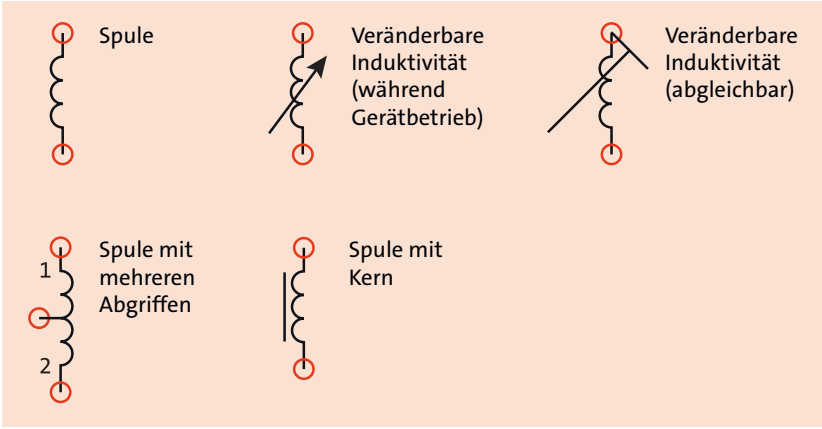


Abbildung 9.1 Schaltsymbole für Spulen

9.4 Induktivitäten selbst bauen

Um Spulen selbst zu wickeln, muss man anfangs etwas üben. Hierzu nehmen Sie preiswerten Schaltdraht und verschiedene Wickelkörper, die Sie anschließend aus den entstandenen Luftspulen herausziehen. Hierfür eignen sich Holzdübel oder -stiele in verschiedenen Durchmessern.

Halten Sie das aufgewickelte Material stets straff, ziehen Sie immer wieder nach, und drücken Sie auch den Spulendraht an die Wickelhilfe an. Damit wird die Spule formstabiler. Messen Sie mit einem LCR-Messgerät nach, ob das angestrebte und vorher berechnete Bauteil auch seinen Zielwert erreicht. Und wenn nicht – man kann es in weitem Rahmen passend machen.

Spulenwerte verändern

Sie können den Induktivitätswert *L* (in H, mH oder µH) von Spulen leicht verändern:

- *L* vergrößern: Windungen zusammendrücken, die Wicklung wird dichter.
- *L* verkleinern: Windungen auseinanderziehen, die Wicklung wird »luftiger«.
- Allgemein: Windungen hinzufügen oder abnehmen

Dabei gilt:

- Wird die Spule auf die Hälfte des ursprünglichen Maßes zusammengedrückt, ergibt dies die doppelte Induktivität.
- Wird die Spule auf das Doppelte des ursprünglichen Maßes auseinandergezogen, halbiert sich die Induktivität.
- Verdoppeln Sie die Anzahl der Windungen, vervierfacht sich die Induktivität.
- Halbieren Sie die Anzahl der Windungen, sinkt die Induktivität auf ein Viertel ab.
- Die Änderung der Windungszahl wirkt sich im Quadrat auf den Wert der Induktivität aus.

Abbildung 9.2 zeigt Ihnen drei Spulen. Die mittlere ist das Original. Ihre Induktivität L wurde mit 4 µH gemessen. Die obere, auf die etwa doppelte Länge gezogene Spule weist 2 µH auf, die untere, auf die Hälfte zusammengestauchte Spule 8 µH.

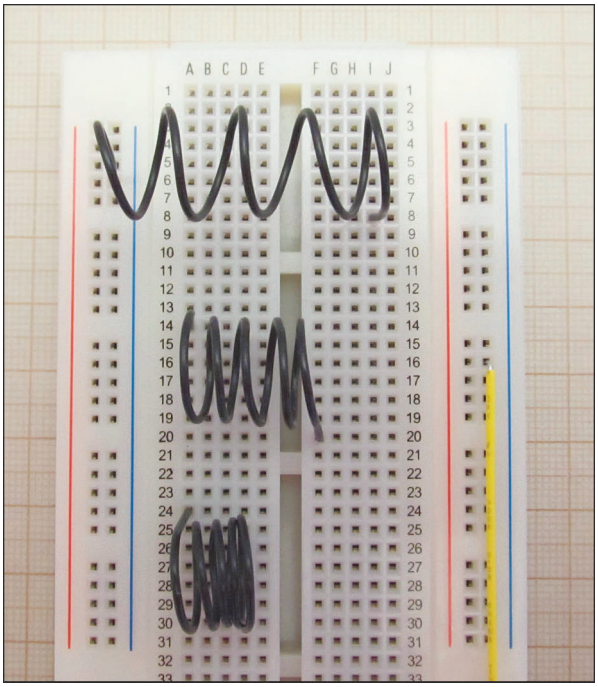


Abbildung 9.2 Luftspulen gezogen und gestaucht

9.5 Induktivitäten (Bauelemente)

Die einfachste Bauform ist die kernlose Zylinderspule, wie in Abbildung 9.2 gezeigt. Es gibt Spulenkernsätze zum Selbstbewickeln, und Sie haben die Wahl zwischen einstellbaren und veränderlichen Spulen. Natürlich gibt es vieles in bedrahteter und

oberflächenmontierbarer Ausführung. Wird eine Zylinderspule in einer elektrischen Schaltung verwendet, um den Stromfluss zu begrenzen oder zu »drosseln«, dann wird die Spule auch gerne als »Drossel« bezeichnet.

Bedrahtete Bauelemente finden Sie in Abbildung 9.4 und Abbildung 9.5.

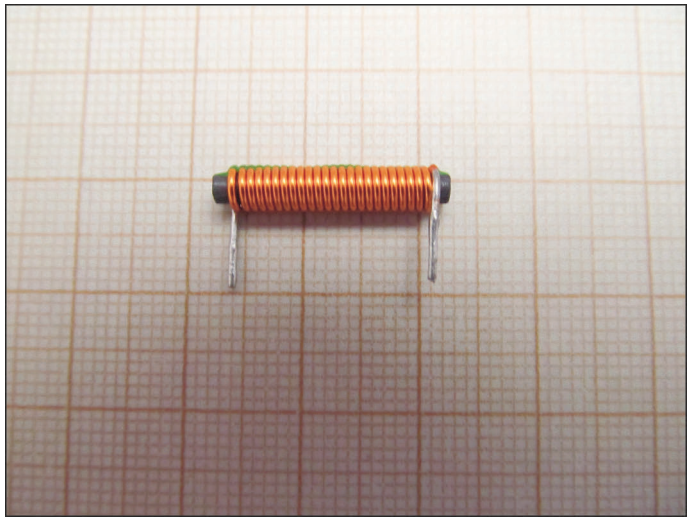


Abbildung 9.3 HF-Drossel mit 6 µH

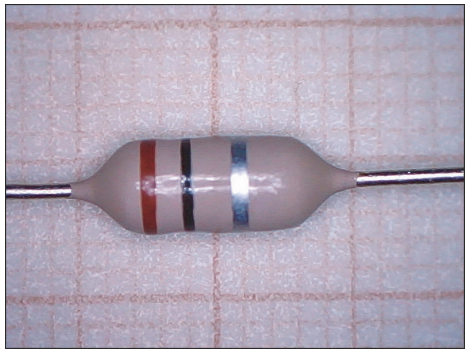


Abbildung 9.4 Festinduktivität mit 0,10 µH

Kleinformatige Induktivitäten werden u. a. durch einen Farbcode gekennzeichnet. Sie können hierfür Abschnitt 5.2 heranziehen, anstelle von Ω verwenden Sie µH als Einheit.

Entstörkomponenten verwenden oft Ferritmaterialien. Diese können als Perlen oder längliche Gebilde zum Aufschieben auf den Leiter geformt sein. Ringkerndrosseln (siehe Abbildung 9.6) helfen besonders im Stromversorgungsbereich, hochfrequente Rückwirkungen zu vermindern.

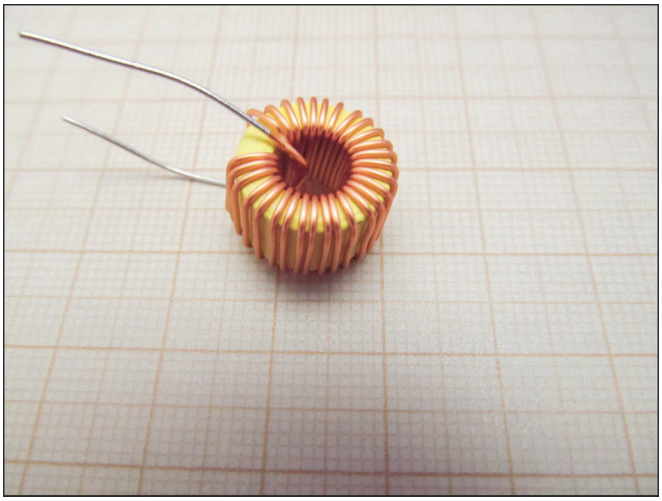


Abbildung 9.5 Funkentstördrossel

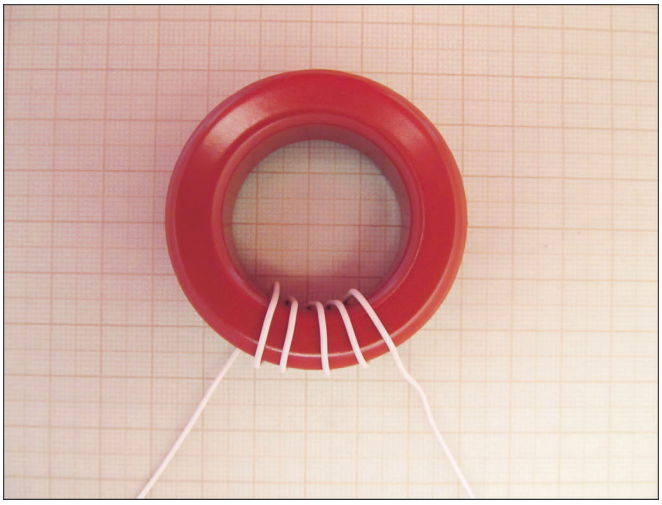


Abbildung 9.6 Ringkern (Amidon T-200-2) mit Wicklung

Für den Bau von Sendern, Antennenanpassgeräten und -schaltungen greift man gerne zum Ringkern als Spulenträger. Wenig Streuung und die kompakte Bauweise der damit geschaffenen Induktivitäten sind die Vorteile.

Für die Bilder wurden hier *farbig isolierte* Schaltdrähte verwendet. Für Ihre Spulen setzen Sie aber Kupferlackdraht (CUL-Draht, siehe Abbildung 9.7) oder, bei Antennen, auch solchen mit Teflonisolierung ein. Achten Sie beim Kauf von CUL-Draht darauf, dass dieser als »lötbar« gekennzeichnet ist. Sie müssen die Isolierung hier nicht entfernen, das flüssige Lot sorgt für ein Abschmelzen.

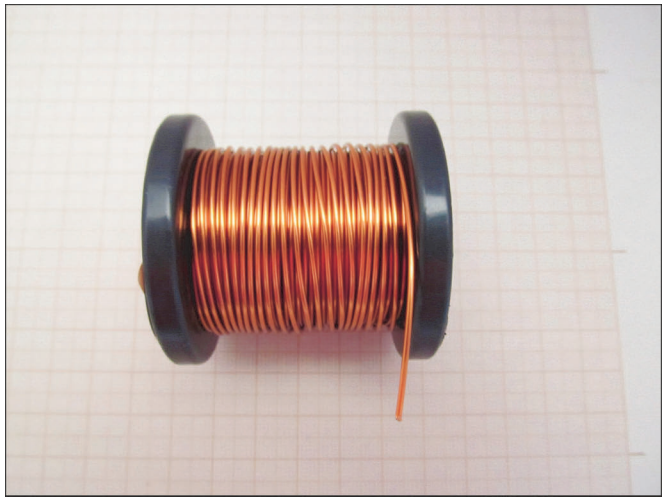


Abbildung 9.7 Kupferlackdraht

Abbildung 9.8 und Abbildung 9.9 zeigen Induktivitäten in SMD-Ausführung. Sie tragen oftmals keinerlei Kennzeichnung. Sie benötigen hier ein LCR-Messgerät mit entsprechender Messpinzette, wenn Sie den Bauteilwert nicht kennen.

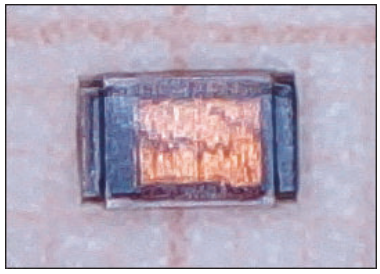


Abbildung 9.8 SMD-Spule, 15 µH

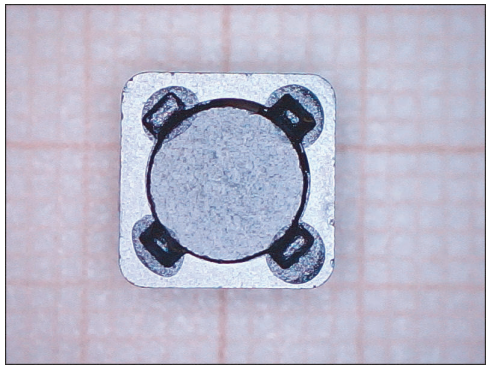


Abbildung 9.9 SMD-Ferrit-Spule, 27 µH

Für Eigenentwicklungen finden Sie passende Spulenkörper mit oder ohne Kern (siehe Abbildung 9.10, Abbildung 9.11 und Abbildung 9.12). Die »große« Spule mit dem Porzellanträger verwendet man in Sendern oder Antennenanpassgeräten.

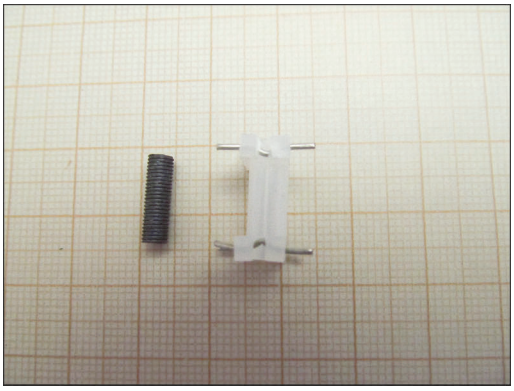


Abbildung 9.10 Spulenkörper mit Abgleichkern

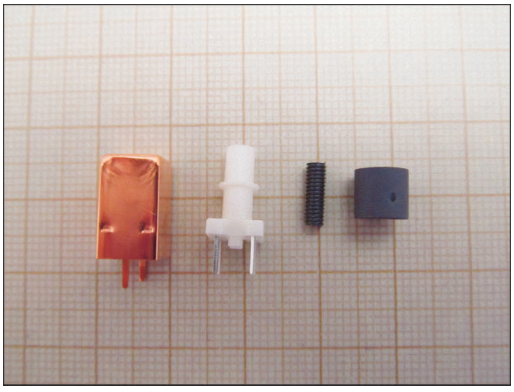


Abbildung 9.11 Filterbausatz mit Spulenkern und Abschirmbecher

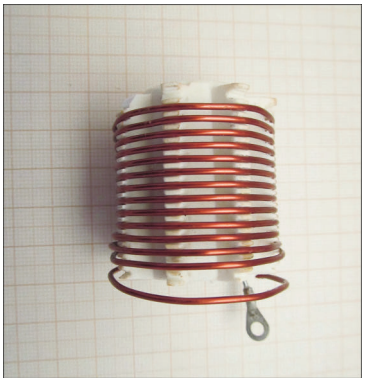


Abbildung 9.12 Spule mit keramischem Wickelkörper

9.6 Grundlagen der Induktivität

Das Magnetfeld eines stromdurchflossenen Leiters können Sie durch Aufwickeln verdichten. Sie erhalten eine Spule (siehe Abbildung 9.13).

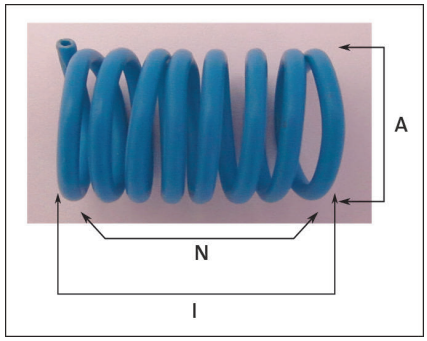


Abbildung 9.13 Zylinderspule

Die einzelnen Bemaßungshinweise kommen in den hier behandelten Formeln vor (siehe Tabelle 9.1).

Buchstabe	Wert
A	Querschnittsfläche der Spule
l	Länge
N	Windungszahl

Tabelle 9.1 Angaben zur Zylinderspule

Im Inneren der Zylinderspule herrscht ein homogenes magnetisches Feld. In der Abbildung 9.14 sehen Sie die Darstellung der Feldlinien im Querschnitt. Es bauen sich aber auch um die Spule herum magnetische Feldlinien auf.

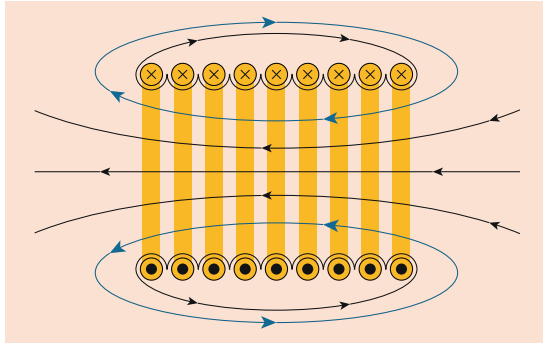


Abbildung 9.14 Feldlinien einer Zylinderspule

9.7 Eigenschaften von Induktivitäten

Zu Induktivitäten sollten Sie Folgendes wissen:

- Es gibt Induktivitäten ohne (»Luftspule«) und mit Kern.
- Ferritmaterial als Spulenkern erhöht die Induktivität.
- Netzdrosseln und andere Entstörmittel sollen einen Kern aus Ferrit aufweisen!
- Induktivitäten verzögern (Einschalt-)Impulse.
- Auch gerade Leiter stellen eine Induktivität dar.
- Kerne aus nicht ferromagnetischen Materialien vermindern die Induktivität, z. B. Kupfer, Aluminium. Dieser Effekt wirkt sich besonders bei hochfrequentem Wechselstrom aus. Das hochfrequente Magnetfeld kann in solche Materialien nicht eindringen, was den Feldquerschnitt verringert.

9.7.1 Experimente

Eine Induktivität verzögert Impulse, indem sie kurzfristig als Energiespeicher fungiert. Im Gegensatz zum Kondensator, der auf der Ladungstrennung beruht, gibt die Spule die gespeicherten Ladungen umgehend wieder ab.

Experimentell können Sie dies selbst erkunden. Sie benötigen ein kleines, kurzschlussfestes Labornetzteil, die hier im Buch schon öfter für Experimente gezeigten Glühlämpchen und ein Relais mit einer Spulenspannung von 6 Volt. Verschalten Sie Spule und Birnchen, wie in Abbildung 9.15 gezeigt, einfach hintereinander. Regeln Sie die Spannung zwischen 15 und 20 Volt ein. Verbinden Sie die Schaltung nun mit dem Netzteil. Beim Schließen des letzten Kontakts werden Sie eine Verzögerung erkennen. Zuerst hören Sie, wie die Spule anzieht, das Relais »klackt«. Erst danach beginnt das Lämpchen zu leuchten.

Diese Verzögerung beruht darauf, dass zuerst das Kernmaterial der Relaisspule magnetisch gesättigt wird. So lange wird im wörtlichen Sinn »gedrosselt«. Erst danach fließt der Strom ungehindert durch die Spule und das Glühlämpchen kann leuchten.

Die Relaisspule baut nach dem Abschalten des Stroms das Magnetfeld ab. Dass dabei wieder eine Spannung aufgebaut wird, könnten Sie nur mit einem Voltmeter, das Sie mit den Spulenanschlüssen verbinden, anhand einer sehr kleinen Spannungsspitze erkennen.

Besser ergründen Sie dies mit einer alten elektrischen Hausklingel. Deren Prinzip beruht darauf, dass bei angezogenem Klöppel die Stromversorgung der Spule unterbrochen ist und der Klöppel daher per Federkraft wieder in seine Ausgangsstellung geht. Dabei sehen Sie an den Kontakten den Öffnungsfunken – die Stromversorgung der Spule wird ja schlagartig unterbrochen. Wenn Sie einen Mittelwellen- oder Kurzwel-

lenempfänger bzw. dessen Antenne nahe an diese Klingel bringen, können Sie dieses Funkenfeuer als Störgeräusch wahrnehmen.

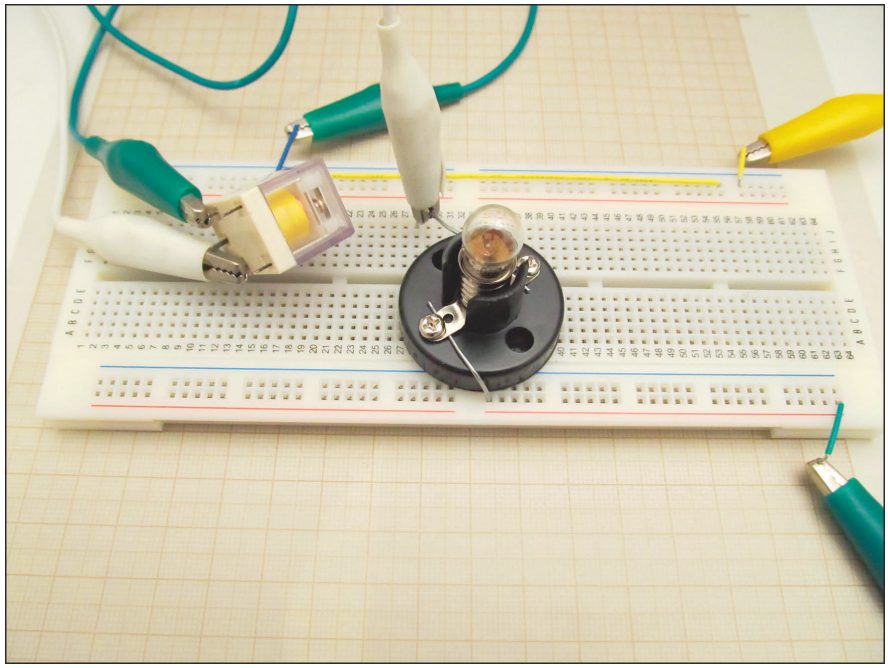


Abbildung 9.15 Induktionsversuch

Falls Sie über eine ausgebaute, intakte Relaisspule mit Weicheisenkern verfügen, schließen Sie deren Kontakte an Ihr Multimeter an. Schalten Sie das Gerät in den Gleichspannungsmessbereich. Nehmen Sie einen Dauermagnet, und bewegen Sie eine Polseite in raschen Wechselbewegungen so nah wie möglich am Spulenkern vorbei. Sie können die von Ihnen erzeugte Spannung am Multimeter ablesen.

In der Elektronikpraxis sind diese *Öffnungsfunken* von Relais und Motoren unerwünscht. Sie stören durch Knackgeräusche den Funkempfang oder bringen Steuerungen durcheinander. Deshalb wird meist ein Widerstand oder eine Diode zur geregelten Ableitung der Spulenspannung parallel zu den Spulenanschlüssen gesetzt.

9.8 Vertiefung mit Berechnungen

9.8.1 Spulenberechnungen

Für die einlagige Zylinderspule, wie sie häufig z. B. für Antennenanpassungen oder in der Sende-/Empfangstechnik genutzt wird, brauchen Sie diese Angaben zur Berechnung:

Buchstabe	Wert
A	Querschnittsfläche der Spule
L	Länge
N	Windungszahl
μ_0	1,2566 ×10^{-6} N/A² (magnetische Feldkonstante)
μ_R	1

Tabelle 9.2 Angaben für die Zylinderspule

Mit der folgenden Formel ermitteln Sie den ungefähren Wert einer Zylinderspule:

$$L \approx \frac{1{,}2566 \times 10^{-6} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} \times \text{Querschnittsfläche } (\mathrm{m}^2) \times \text{Windungszahl}^2}{\text{Länge (m)}}$$

Entsprechend:

$$L \approx \frac{1{,}2566 \times 10^{-6} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} \times \mathrm{A} \times \mathrm{N}^2}{l}$$

Die Formel verwendet die *Permeabilitätszahl* 1,2566 × 10 – 6 $^{\mathrm{Vs}}/_{\mathrm{Am}}$ für μ_0 (Luftspule). Der Wert μ_R ist um X größer, bei der Luftspule beträgt X aber 1. Daher tauchen die beiden µs nicht in der Formel explizit auf. Werden Spulenkerne verwendet, so haben diese in Abhängigkeit vom Material ihre eigenen Angaben. Hier wird die magnetische Feldkonstante dann entsprechend multipliziert.

Übung

Schauen Sie sich dazu ein Beispiel an:

- Typ: Luftspule, einlagig, zylindrisch
- Bekannte Angaben:
  - Durchmesser: 20 mm
  - Länge der Spule: 40 mm
  - Anzahl der Windungen: 30

Lösung:

Rechnen Sie den Durchmesser in die Querschnittsfläche um:

$$A = \left(\frac{\text{Durchmesser}}{2}\right)^2 \times \pi$$

Mit dem Taschenrechner ermitteln Sie:

(20 ÷ 2) × (20 ÷ 2) × π =

Das Zwischenergebnis ist 314 mm².

Danach rechnen Sie es in die richtigen SI-Präfixe um:

- A = 314 mm² = 0,000314 m²
- L = 40 mm = 0,04 m

Anschließend wenden Sie folgende Formel an:

$$L = 1{,}2566 \times 10^{-6} \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} \times 30^2 \times \frac{0{,}000314}{0{,}04}\ \mathrm{H}$$

Mit dem Taschenrechner berechnen Sie:

1,2566 x10ˣ - 6 × 30 x² × (0,000314 ÷ 0,04) =

Das abgelesene Ergebnis lautet 8,877879 × 10^{-6} und entspricht gerundet 9 µH.

Es wird ein Kernfaktor A_L für einen Spulenkörper angegeben. Diesen Wert gibt der Hersteller in nH an. Für Sie wird damit die Berechnung leichter:

$$L = \text{Kernfaktor} \times \text{Windungszahl}^2 = A_l \times N^2\ H$$

Berechnen Sie nun die folgende Spule mit Kern. Die bekannten Werte sind:

- A_L = 250 nH
- N = 100

Gesucht ist L.

Lösung:

Sie geben Folgendes in den Taschenrechner ein:

250 x10× - 9 × 100 × 100 =

Alternativ können Sie auch Folgendes eingeben:

9 ± 10× × 250 × 100 × 100 =

Das Ergebnis, das Sie ablesen, ist 0,0025 H und entspricht 2,5 mH.

Schauen Sie sich noch eine weitere Übung mit diesen bekannten Werten an:

L = 3 mH

A_L = 250 nH

Gesucht ist die Windungszahl N.

Lösung:

Stellen Sie die Formel um:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{0{,}003\ \text{H}}{250\ \times\ 10^{-9}\ \text{H}}}$$

Mögliche Fallen: Es wird übersehen, dass der A_L-Wert in nH angegeben wird.

In den Taschenrechner eingetippt, erhalten Sie dieses Ergebnis:

[√■] 0,003 [÷] 250 [×10ˣ] [-] 9 [=]

Abgelesen: 109,54

Gerundet sind es also 110 Windungen (*N*).

Alternativ können Sie mit dem Taschenrechner auch folgenden Rechenweg wählen:

250 nH entsprechen 0,25 µH entsprechen 0,00025 mH. Daher können Sie eingeben:

3 [÷] 0,00025 [=] [√]

Die Werte wurden bewusst in beiden Schreibweisen (Komma, Hochzahl) eingesetzt, damit das Umstellen auf die Einheiten verdeutlicht wird.

9.8.2 Die magnetische Feldstärke

Wenn ein Leiter von Strom durchflossen wird, baut sich um ihn herum ein Magnetfeld (*H*) auf. Die Stärke dieses Magnetfeldes errechnet sich aus dem Verhältnis der Stromstärke *I* zur Feldlinienlänge *lm* des Leiters.

Bei einer Zylinderspule multiplizieren Sie *I* mit der Windungszahl *N*.

- Ringkerne zeichnen sich durch ihre geringe Streuung aus, was bedeutet, dass sie das magnetische Feld effizient in ihrem Kern konzentrieren. Aufgrund ihrer geschlossenen Ringform verlaufen die Magnetfeldlinien hauptsächlich innerhalb des Kernmaterials, was zu einem sehr effektiven Einschluss des Magnetfeldes führt und externe magnetische Streufelder minimiert. Diese Eigenschaft macht Ringkerne besonders geeignet für Anwendungen, bei denen eine präzise Induktivität mit minimalen äußeren magnetischen Interferenzen erforderlich ist. Einheit: Ampere je Meter, A/m
- Formelzeichen: ***H***
- Feldstärke gerader Leiter:

$$H = \frac{\text{Strom (A)}}{\text{Länge Leiter (m)}} = \frac{I}{l_m}\ \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- Feldstärke der Spule:

$$H = \frac{\text{Strom(A)} \times \text{Windungszahl}}{\text{Länge Leiter(m)}} = \frac{I \times N}{l_m} \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- Mittlere Länge der Feldlinien:

$$l_m = \pi \times D_m$$

Möglicherweise müssen Sie bei Ringkernen zunächst die mittlere Feldlininenlänge aus den Durchmesserangaben (siehe Abbildung 9.16) heraus berechnen.

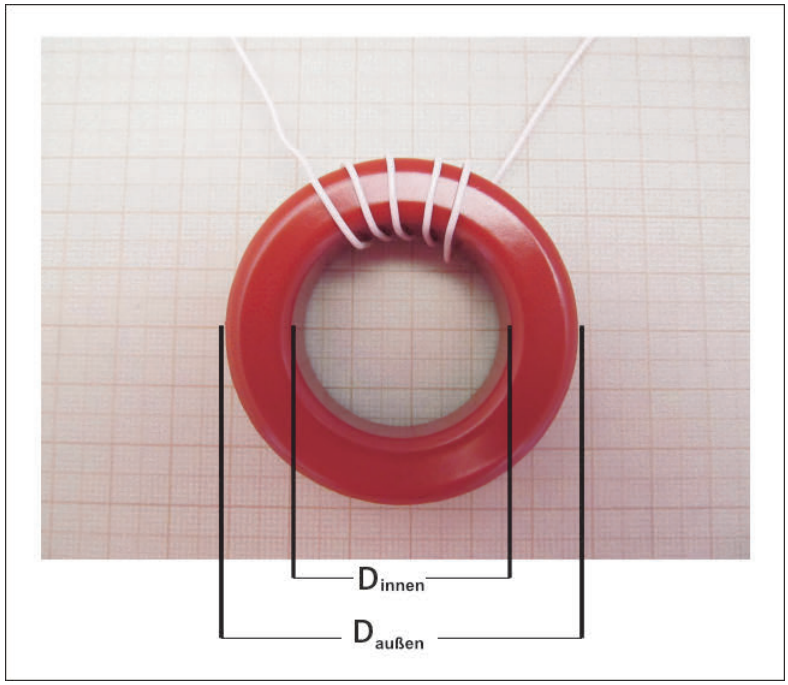


Abbildung 9.16 Dimensionen des Ringkerns

Den mittleren Durchmesser ermitteln Sie auf diese Weise:

$$D_m = \frac{D_{\text{aussen}} + D_{\text{innen}}}{2}$$

Übung

Der Ringkern vom T-50 hat laut Datenblatt einen Außendurchmesser von 12,7 mm und einen Innendurchmesser von 7,7 mm. Er wird mit 10 Windungen Kupferdraht bewickelt. Die Stromstärke erreicht maximal 0,5 Ampere.

Berechnen Sie die mittlere magnetische Feldstärke bei maximalem Strom.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie den mittleren Ringkerndurchmesser.

  12,7 [+] 7,7 [=] [÷] 2 [=]

  Sie kommen zu dem Zwischenergebnis D_m: 10,2 mm.
- Schritt 2: Anschließend nutzen Sie das Zwischenergebnis, um die mittlere Feldlinienlänge zu berechnen.

  10,2 [×] [π] [=]

  Zwischenergebnis: l_m = 32,04 mm
- Schritt 3: Zum Schluss berechnen Sie die Feldstärke.

  [(] 0,5 [×] 10 [)] [÷] 0,032 [=]

  Sie kommen zu folgendem Ergebnis: 156,25 A/m.

9.8.3 Magnetische Flussdichte

Die Gesamtzahl der magnetischen Feldlinien einer Spule vereinigt sich zum *magnetischen Fluss*. Dessen Maß ist die *magnetische Flussdichte*.

Der Wert gibt an, wie stark eine Fläche von 1 m^2 vom magnetischen Fluss der senkrecht stehenden Spule durchsetzt wird. Bei der Berechnung werden die Permeabilitätszahl μ_r und die Permeabilitätskonstante μ_0 1,2566 × 10^{-6} herangezogen.

- Einheit: **T** (Tesla)
- Formelzeichen: ***B***
- Berechnung:

  B = Permeabilitätskonstante (nT) × Permeabilitätszahl

  $$\times \text{ Feldstärke } \left(\frac{\text{A}}{\text{m}}\right) = \mu_0 \times \mu_r \times H(\text{T})$$

Für Luft beträgt die Permeabilitätszahl 1.

Übung

Berechnen Sie die magnetische Flussdichte einer Luftspule, die eine Feldstärke von 500 A/m erzeugen kann.

Lösung:

Die Permeabilitätszahl für Luft hat den Wert 1, sodass hier μ_r nicht in der Formel verwendet wird.

Mit dem Taschenrechner führen Sie diese Berechnung aus:

1,2566 [×10ˣ] [-] 6 [×] 500 [=]

Sie lesen 6,283 × 10^{-4} ab. Das ergibt 0,00063 T, was wiederum 0,63 mT entspricht.

9.9 Zusammenschaltung von Induktivitäten

Für die Zusammenschaltung von Induktivitäten gehen Sie wie bei den Widerständen vor:

- Reihenschaltung:

  $L_{\text{gesamt}} = L_1 + L_2 + \ldots$

  Sie addieren hier die Werte einfach!

- Parallelschaltung:

  L_{gesamt} ist der Kehrwert aus:

  $$\frac{1}{L_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \ldots$$

Übung

Berechnen Sie die Gesamtinduktivität zwischen den Messpunkten P1 und P2 der in Abbildung 9.17 gezeigten Schaltung.

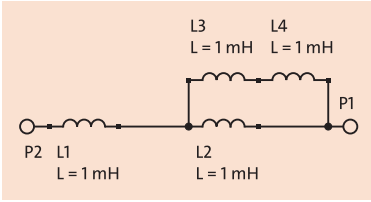


Abbildung 9.17 Übungsaufgabe

Lösung:

- Schritt 1: Lösen Sie den Zweig L3/L4 auf.

  Sie gelangen zu dem Zwischenergebnis 2 mH.

- Schritt 2: Nun lösen Sie die Parallelschaltung auf.

  1 [÷] 1 [+] 1 [÷] 2 [=] 1,5 mH

  Bilden Sie den Kehrwert aus dem Zwischenergebnis: 1 [÷] 1,5.

  Gerundet ergibt das 0,67 mH.

- Schritt 3: Abschließend addieren Sie die Parallelschaltung mit L1.

  Das Ergebnis ist eine Gesamtinduktivität von 1,67 mH.

9.10 Die Spule im Gleichstromkreis

Im Inneren einer langen Zylinderspule bildet sich ein fast homogenes magnetisches Feld, wenn Gleichstrom fließt. Die Spule stellt einige Zeit nach dem Einschalten einen

(ohmschen) Widerstand dar. Bei Ein- und Ausschaltvorgängen sowie Änderungen der Stromstärke allerdings verzögert die Spule die Änderungen. Dazu können Sie nochmals das Experiment am Ende von Abschnitt 9.7 nachlesen oder es selbst durchführen.

Abbildung 9.18 zeigt Ihnen, dass ein Voltmeter mit den Kontakten einer Spule verbunden wurde. Es wird nur ein kurzer Impuls (1 ms) gegeben.

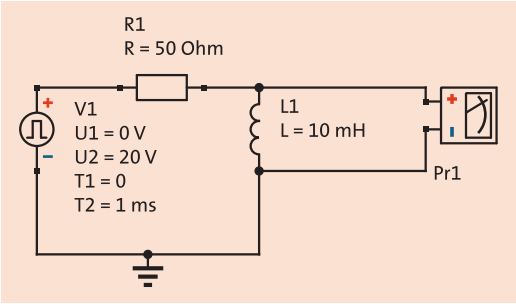


Abbildung 9.18 Messung des Spannungsverlaufs an der Spule

Zunächst steigt die Spannung schlagartig an, um dann bis zum Ende der Impulsdauer gegen 0 zu sinken. Sie erkennen daran die Sättigung des Spulenkerns. Nach dem Impulsende ruft das abnehmende Magnetfeld eine entgegengesetzt gerichtete Spannung in den Spulenwindungen hervor. Deren Wert hat sich nach dem Abbau des Magnetfeldes im Spulenkern gegen 0 bewegt. Das Diagramm in Abbildung 9.19 zeigt den Verlauf. Beachten Sie dabei die Abschaltung des Impulses bei 1 ms.

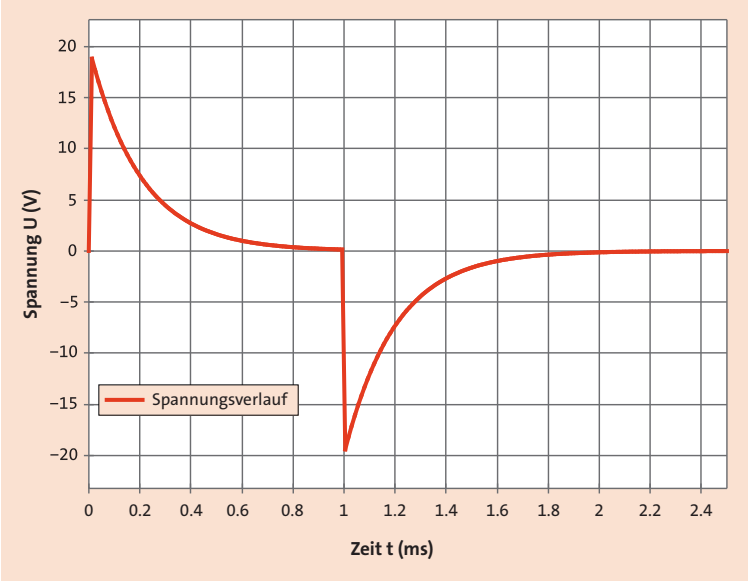


Abbildung 9.19 Spannungsverlauf

Abbildung 9.20 zeigt, dass ein Amperemeter in den Stromkreis eingefügt wurde. Die Messung ergibt, dass zunächst der Strom allmählich ansteigt. Erst nach magnetischer Sättigung des Spulenkerns erreicht der Strom seinen Endwert. Nach dem Ende des Gleichspannungsimpulses sinkt der Strom langsam gegen 0 (siehe Abbildung 9.21).

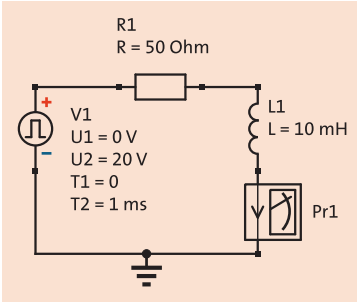


Abbildung 9.20 Messung des Stromverlaufs

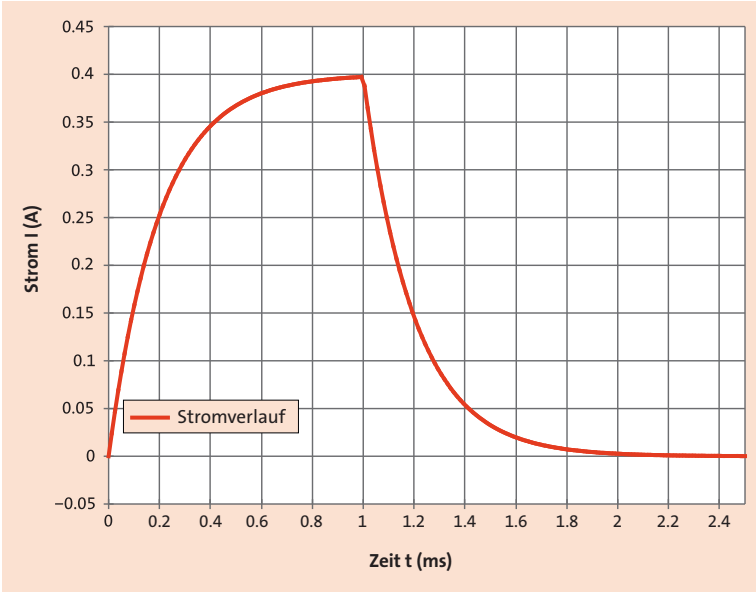


Abbildung 9.21 Stromverlauf

9.11 Transformatoren und Übertrager

Eine Spule kann ein Magnetfeld erzeugen – aber auch von einem sich ändernden Magnetfeld heraus eine Spannung. Zum einen gibt es die *Selbstinduktion*, die besonders bei großen Spulen zu Öffnungsfunken führt. Zum anderen: Koppeln Sie zwei Spulen miteinander, und schon haben Sie einen *Übertrager* bzw. *Transformator*.

9.11.1 Allgemeines zu Transformatoren und Übertragern

Transformatoren ermöglichen es, Wechselspannungen nach deren »Erzeugung« auf hohe Voltzahlen zu bringen und über weite Strecken relativ verlustarm zu transportieren. Am Zielort wird die hohe Spannung wieder in brauchbare und handhabbare Werte umgesetzt. Nichts anderes geschieht in den Umspannwerken, Trafohäusern, Netztrafos in den Geräten usw.

In der Niederfrequenztechnik benutzt man trafoähnliche Gebilde, um die hohe Ausgangsspannung von Röhrenendstufen auf ungefährliche Werte herunterzuregeln und dann Lautsprechern zuzuführen.

In der Hochfrequenztechnik benutzt man *Übertrager*, um bei bestimmten Antennenbauformen moderne Sendertechnik und meist geniale, aber alte Funktionsprinzipien zu einer gedeihlichen Zusammenarbeit zu bewegen.

- Aufgaben:
  - galvanische Trennung zweier Wechselstromkreise
  - Erhöhung oder Verminderung einer Wechselspannung
- Wirkungsweise und Aufbau:
  - Es liegen mindestens zwei magnetisch gekoppelte Spulen vor.
  - Eine Spule muss mit einer Wechselstromquelle verbunden sein, die in der benachbarten Spule mittels Gegeninduktion eine Spannung erzeugt.
  - Transformatoren und Übertrager mit galvanischer (spannungsmäßiger) Trennung bestehen mindestens aus einer Primär- und Sekundärwicklung.
- Belastung:
  - Wirbelströme führen zur Erwärmung von Spulenkernen (siehe Abschnitt 9.1.1).

Betrachten Sie die Schaltzeichen in Abbildung 9.22 genau. Transformatoren weisen einen Kern aus Blechen auf, der mit den »Kernlinien« dargestellt wird. Dies soll die einzelnen »Trafo«- oder *Dynamobleche* symbolisieren.

Ferritkerne werden als gepunktete Linie dargestellt. Merken Sie sich dazu einfach, dass Ferritkerne schnell brechen, wenn sie auf den Boden fallen, und dass die aufgereihten Trümmer eben eine Krümellinie bilden ...

Abbildung 9.23 zeigt den prinzipiellen Aufbau von Transformatoren und Übertragern. Es sind mindestens eine *Primärwicklung* und eine *Sekundärwicklung* vorhanden. Es gibt Transformatoren und Übertrager, bei denen die Primärspule mehrere Abgriffe hat. So gibt es Netzteile, die Sie an 230 Volt, aber auch an 110 Volt betreiben können, aber vor dem Verbinden mit dem Stromnetz gegebenenfalls entsprechend umschalten müssen (im Gegensatz zu manchen modernen »Allesfressernetzteilen«). Falls Sie ein gebrauchtes Amateurfunkgerät älteren Baujahrs erwerben, müssen Sie

unbedingt hierauf achten, aber selbst bei PC-Schaltnetzteilen ist oftmals diese Umschaltvorrichtung vorhanden.

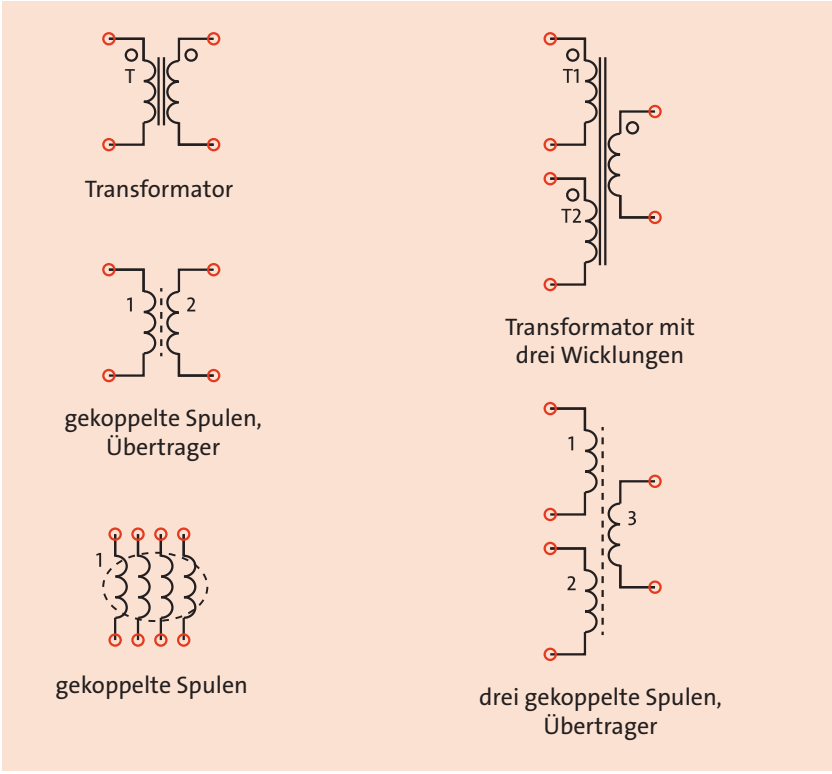


Abbildung 9.22 Schaltzeichen für Transformatoren und Übertrager

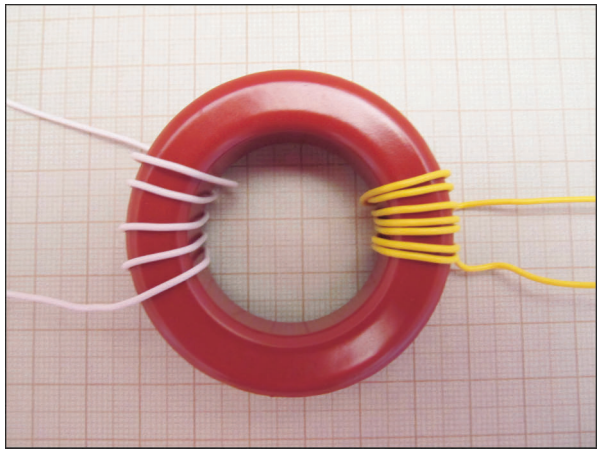


Abbildung 9.23 Prinzipaufbau von Trafos und Übertragern

Häufiger finden Sie Transformatoren und Übertrager mit mehreren Sekundärspulen. Von den Ausführungen mit mehreren Spulenabgriffen unterscheiden sie sich durch die galvanische Trennung der einzelnen Wicklungen.

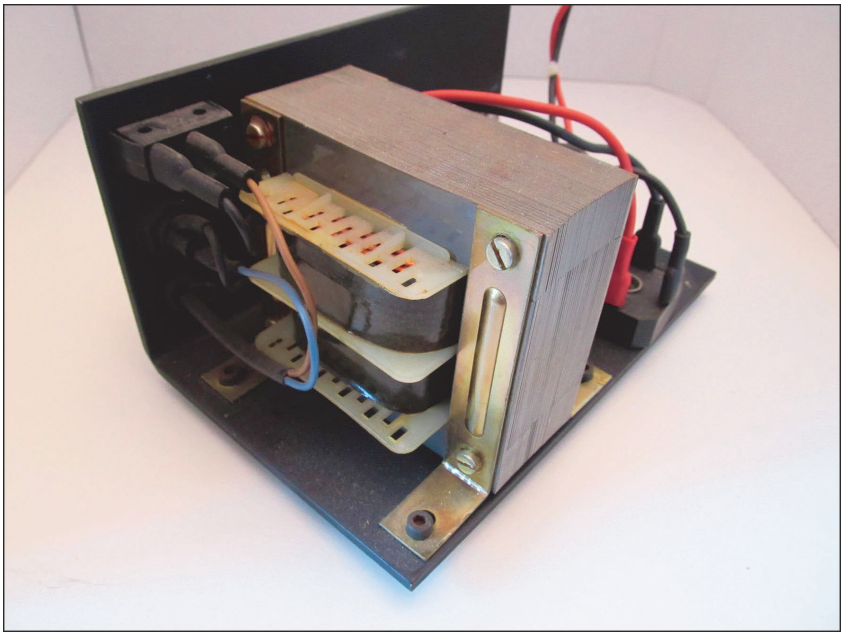


Abbildung 9.24 Netztransformator in klassischer Bauweise

In Abbildung 9.24 sehen Sie ein Einbaunetzteil mit klassischem Transformator. Der Nachteil dieser Technik besteht zum einen im hohen Gewicht, zum anderen aber auch im höheren Eigenverbrauch dieser Geräte. Dafür verursachen solche Netzteile normalerweise keine Empfangsstörungen auf Lang-, Mittel- und Kurzwelle (*längsgeregelte Netzteile*). Bei den überwiegend verwendeten Transformatoren (230 Volt Eingang, Schutzkleinspannung Ausgang) erkennen Sie die Primärwicklung am dünneren Draht. Die Anschlüsse der Primärwicklung sollten in diesem Falle besonders gut gegen versehentliches Berühren abgedeckt werden.

Abbildung 9.25 zeigt ein wichtiges Detail von klassischen Netztransformatoren: den Blechkern. Sogenannte *E-Bleche* (der Name stammt von der Form) werden wechselseitig in Spulenkörper gesteckt, die den Kern bilden. Damit der Transformator aufgrund eventuell lockerer Bleche nicht zu laut brummt, werden diese manchmal zusätzlich verklebt.

Die Windungszahlen der Primär- und Sekundärspule(n) bestimmen das Übersetzungsverhältnis Ü (siehe Abbildung 9.26). Mit dessen Hilfe können Sie Transformatoren und Übertrager berechnen.

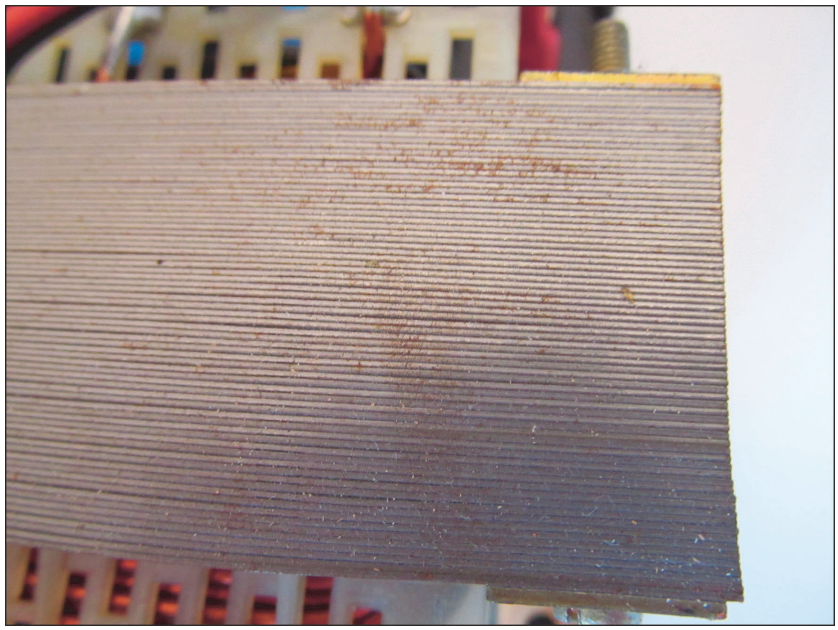


Abbildung 9.25 Der Blechkern eines Netztransformators

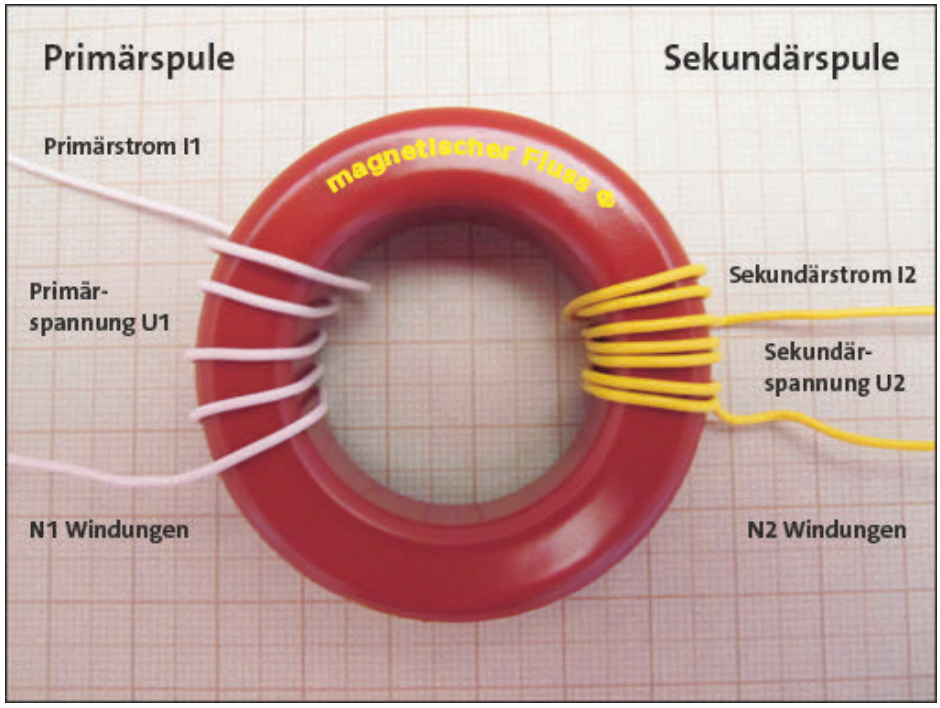


Abbildung 9.26 Primär- und Sekundärspulen

Lebensgefahr beim Umgang mit Transformatoren!

- Verhindern Sie jegliche Berührungsmöglichkeit mit den Anschlusskontakten von Transformatoren!
- Verbinden Sie die Sekundärwicklungen von Transformatoren, die für Kleinspannung ausgelegt sind, niemals miteinander, da dies zu gefährlich hohen Spannungen führen kann, die ein ernsthaftes Lebensrisiko darstellen.

9.11.2 Verhältnis von Spannungen zu Windungszahlen

Die Spannungen verhalten sich im selben Verhältnis wie die Anzahl der Windungen zueinander.

- Berechnung des Übersetzungsverhältnisses:

$$\ddot{U} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_2}$$

- Berechnung der Sekundärspannung, wenn die Primärspannung und die Windungszahlen bekannt sind:

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} \times U_1$$

- Berechnung der Windungszahl der Sekundärspule, wenn die Primär- und die Sekundärspannung sowie die Windungszahl der Primärspule bekannt sind:

$$N_2 = \frac{U_2}{U_1} \times N_1$$

Übung

Sie möchten einen Transformator selbst wickeln. Auf der Seite mit 230 Volt legen Sie 600 Windungen auf. Der Transformator soll 18 Volt abgeben. Gesucht ist das Übersetzungsverhältnis und die Zahl der Windungen der Sekundärwicklung.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie das Übersetzungsverhältnis. Dazu dividieren Sie die Primär- durch die Sekundärspannung:

  230 [÷] 18 [=]

  Gerundetes Übersetzungsverhältnis: 12,78

- Schritt 2: Nun berechnen Sie die Sekundärwicklung. Sie dividieren die Windungszahl der Primärwicklung durch das Übersetzungsverhältnis:

  600 [÷] 12,78 [=]

  Das abgelesene Ergebnis ist 46,95. Sie müssen 47 Windungen anbringen.

Schauen Sie sich noch ein weiteres Beispiel an: Sie finden einen Transformator vor, über den Sie nur wissen, dass die Primärwicklung das Achtfache an Windungen der Sekundärwicklung aufweist und dass er an 230 Volt angeschlossen wird. Gesucht ist die Sekundärspannung.

Lösung:

Bekannt sind also nur das Verhältnis N1 : N2 mit 8 : 1. Die Sekundärspannung beträgt in diesem Fall ein Achtel der Primärspannung. Also rechnen Sie:

230 [÷] 8 [=]

Die Sekundärspannung beträgt 28,75 Volt.

9.11.3 Verhältnis von Strömen zu Windungszahlen

Ohne Verluste mit einzubeziehen, gilt beim Transformator:

$P_1 = P_2$

In der Realität ist P_2 (elektrisch) wegen der Wirbelströme und Wärmeverluste stets geringer als P_1.

Diese Formel detaillierter ausgearbeitet:

$U_1 \times I_1 = U_2 \times I_2$

Die Ströme verhalten sich umgekehrt zur Anzahl der Windungen der Wicklungen, wenn die Verluste unberücksichtigt bleiben.

$$\ddot{U} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \text{ (A)}$$

Sie berechnen die Stromstärke der Primärspule wie folgt, wenn Primär- und Sekundärspannung und -strom bekannt sind:

$$I_1 = \frac{U_2}{U_1} \times I_2 \text{ (A)}$$

Sie berechnen die Stromstärke der Sekundärspule wie folgt, wenn Primärspannung und -strom sowie die Sekundärspannung bekannt sind:

$$I_2 = \frac{U_1}{U_2} \times I_1 \text{ (A)}$$

Übung

Für ein Netzteil haben Sie einen Transformator (Eingang 230 Volt) mit einer Ausgangsspannung von 11 Volt. Die Sekundärwicklung ist in der Lage, einen Strom von 16 Ampere fließen zu lassen. Wie viel Strom fließt durch die Primärwicklung, wenn man die Verluste nicht in die Berechnung mit einbezieht?

Lösung:

Bekannt sind folgende Werte: $U_1 = 230$ V, $U_2 = 11$ V, $I_2 = 16$ A.

Die Formel $I_1 = \frac{U_2}{U_1} \times I_2$ wenden Sie im Taschenrechner an:

11 [÷] 230 [×] 16 [=]

Das Ergebnis beträgt gerundet 0,77 Ampere, die durch die Primärspule fließen.

In einem weiteren Beispiel haben Sie von einem Transformator diese Daten:

- Primärspannung: 230 V
- Primärstrom: 250 mA
- Sekundärspannung: 12 V

Gesucht ist der Sekundärstrom.

Lösung:

Mit der Formel $I_2 = \frac{U_1}{U_2} \times I_2(\text{A})$

und den eingesetzten Werten geben Sie in den Taschenrechner ein:

230 [÷] 12 [×] 0,25 [=]

Sie kommen damit zu dem Ergebnis, dass 4,8 Ampere durch die Sekundärspule fließen können.

9.11.4 Stromdichte bei Transformatorenwicklungen

In Transformatoren entsteht Abwärme zum einen durch die Wirbelströme im Kernmaterial, zum anderen durch die Erwärmung der Wicklungsdrähte (*Verlustwärme*). Daher können nicht beliebig hohe Ströme durch die Transformatorspulen fließen, ohne dass es zu Schäden kommt.

Die Stromdichte *S* ist eine Angabe darüber, wie viele Ladungsträger je Sekunde durch einen Leiter mit definiertem Querschnitt fließen können. (Das Formelzeichen *S* wurde in Forschung und Lehre inzwischen durch *J* ersetzt, die Formeln selbst bleiben natürlich ohne Änderung.)

- Formelzeichen: ***S***
- Einheit: A/mm²
- Berechnung:

$$\text{Stromdichte } (S) = \frac{\text{Strom (A)}}{\text{Leitungsquerschnittsfläche (mm}^2\text{)}} = \frac{\text{I}}{\text{A}}$$

In diversen Formelsammlungen wird ein Wert von 2,5 A/mm² für *S* angegeben. Dieser taucht auch in den Katalogtabellen von Zulieferern der Elektroindustrie auf und stellt einen sicheren Wert dar. Wenn Sie tiefer in dieses Thema einsteigen

möchten, ziehen Sie die DIN 46435 zurate! Die DIN-Normen können Sie oft in den Bibliotheken von Bildungseinrichtungen einsehen.

- Berechnung des zulässigen Stroms in Transformatorenwicklungen:
  Leiterdurchmesser müssen auf den Querschnitt (= Fläche) umgerechnet werden. Für die Formel wird der Radius *r* benötigt, er ist die Hälfte des Durchmessers!

  $A = r \times r \times \pi \ (\text{mm}^2)$

  Berechnung des maximal zulässigen Stroms:

  $I_{\text{max}} = S \times \text{Querschnittsfläche} = S \times (A)$

Übung

Eine Wicklung im Transformator besteht aus 1,5 mm starkem Draht. Wie viele Ampere dürfen maximal fließen, wenn der Wert für *S* in Höhe von 2,5 A/mm² nicht überschritten werden soll?

Lösung:

- Schritt 1: Beachten Sie bei der Drahtstärke: Verwenden Sie den Radius für die Formel. Dieser beträgt 0,75 mm.
- Schritt 2: Berechnen Sie die Querschnittsfläche:

  0,75 [×] 0,75 [×] [π] [=]

  Zwischenergebnis für die Leiterquerschnittsfläche: 1,767 mm²
- Schritt 3: Anschließend berechnen Sie den höchstzulässigen Strom.

  2,5 [×] 1,767 [=]

  Ergebnis gerundet: 4,4 A

9.11.5 Übertrager, Impedanzen und die Übersetzung von Widerstandsverhältnissen

Transformatoren dienen der Versorgung mit elektrischer Energie, Übertrager arbeiten hingegen mit Signalen. Auch in der Anpassung und Speisung von Antennen kommen Übertrager zum Einsatz.

In letzterem Fall geht es um die »Übersetzung« von Widerständen. Dabei handelt es sich nicht um den »ohmschen« Widerstand, sondern um den Wechselstromwiderstand (»Impedanz«, *Z*). Der Wert wird in Ω angegeben.

Sie sehen die folgenden Formeln hier mit dem Formelzeichen *Z* für den Wechselstromwiderstand bzw. die Impedanz. In anderen Abhandlungen wird ebenso *R* verwendet. Auf die »Tauglichkeit« der Formeln hat dies keinen Einfluss!

$$\ddot{U} = \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}} \text{ bzw. } \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}$$

Im Umkehrschluss bedeutet dies:

$$\ddot{U}^2 = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Setzen Sie die Werte für *Z* bzw. *R* so ein, dass der Zähler größer als der Nenner ist. Impedanzen werden mit dem Quadrat der Windungsverhältnisse übersetzt.

Berechnung eines Widerstands, wenn das Verhältnis und der weitere Widerstand bekannt sind:

$$R_{\text{unbekannt}} = R_{\text{bekannt}} \times \ddot{U}^2$$

Übung

An einem 1 : 2-Übertrager ist auf der Sekundärseite ein Widerstand mit 200 Ω angeschlossen. Berechnen Sie die Impedanz zwischen den Anschlusspunkten A und B des Übertragers (siehe Abbildung 9.27).

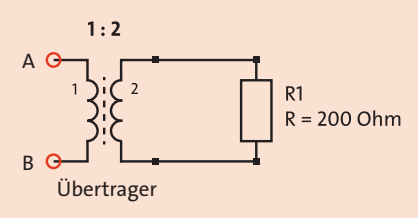


Abbildung 9.27 Schaltbild für das Berechnungsbeispiel

Lösung:

Wenden Sie die Formel $R_{A\leftrightarrow B} = R_1 \times \ddot{U}^2$ an, und rechnen Sie:

200 [×] 1 [÷] 2 [×] 1 [÷] 2 [=]

Ergebnis: 50 Ω

Ein weiteres Berechnungsbeispiel dazu:

Sie möchten Ihr Funkgerät (Z_{TRX} = 50 Ω) mit einer Antenne verbinden (Z_{ANT} = 240 Ω). Welches Windungszahlverhältnis soll der Übertrager haben?

Lösung:

Sie müssen die Wurzel aus den beiden Z-Angaben berechnen, je nach Taschenrechnermodell entweder so:

- 240 ÷ 50 = √

oder so:

- √ 240 ÷ 50 =

Ü ist gerundet also 2,2.

9.11.6 Balun – balanced-unbalanced

Ein besonderer Übertrager für die Anwendung mit Hochfrequenz ist der *Balun* (Kunstwort aus »balanced-unbalanced«). Aus der Wechselstromtechnik kennt man diesen Übertrager auch als *Spar-* oder *Autotransformator*.

Die Kennzeichen eines Baluns sind:

- Es gibt keine galvanische (gleichspannungsmäßige) Trennung von Primär- und Sekundärseite.
- Die Primär- und die Sekundärwicklung sind in einer Spule vereint.
- Es wird nur eine Erdverbindung benötigt.

Abbildung 9.28 zeigt Ihnen das Prinzip.

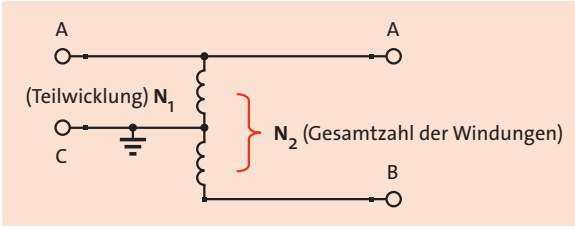


Abbildung 9.28 Prinzip eines Balun(transformator)s

N_2 trägt alle Windungen, N_1 nur einen Teil. Damit können Sie das Übersetzungsverhältnis wie bei den anderen Übertragern bilden.

Übung

N_2 hat 14 Windungen, N_1 4 Windungen. Zwischen den Klemmen A und C (siehe Abbildung 9.28) wird ein Funkgerät mit $Z = 50\ \Omega$ angeschlossen.

Ermitteln Sie

- das Übersetzungsverhältnis
- die Impedanz der Antenne (Klemmen A und B)

Lösung:

- Um das Übersetzungsverhältnis zu ermitteln, nutzen Sie diese Formel:

  $$\ddot{U} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{14}{4}$$

  Lösung: Ü = 3,5

- Zur Berechnung der Impedanz der Antenne nutzen Sie diese Formel (»schulbuchmäßig«):

  $$Z_{A \leftrightarrow B} = \ddot{U}^2 = \left(\frac{14}{4}\right)^2 \times 50$$

  Da Ü schon bekannt ist, können Sie auch diese einfachere Rechnung durchführen:

  3,5 [×] 3,5 [×] 50 [=]

  Sie kommen zu dem abgelesenen Ergebnis: 612,5, $Z_{A \longleftrightarrow B} \approx 600\ \Omega$.

Kapitel 10
R, C und L im Wechselstromkreis

10.1 Ohmscher Widerstand

Für die Berechnung des Widerstands *R* nutzen Sie die Effektivwerte von Spannung und Strom (*Nennspannung* und *Nennstrom*), wobei eine vereinfachte »ohmsche« Methodik angewendet wird, die auf den bekannten Formeln des Gleichspannungskreises basiert. Welchen Widerstandstyp Sie verwenden können, hängt vom Frequenzbereich ab:

- **Drahtwiderstände**: nur für tiefe Frequenzen geeignet (max. 1 kHz), ihre Gegenspieler sind die Induktion und der Skin-Effekt.
- **Metalloxidwiderstände**: auch für sehr hohe Frequenzen geeignet
- **Kohleschichtwiderstände**: auch für sehr hohe Frequenzen geeignet
- **Metallschichtwiderstände**: nur für tiefe Frequenzen geeignet

Lesen Sie zur Wiederholung und Vertiefung Abschnitt 5.2 und Abschnitt 7.6.

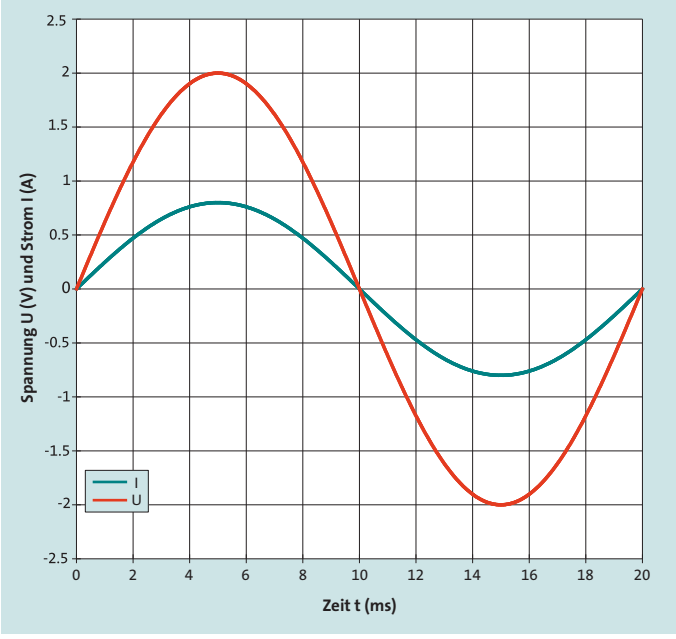


Abbildung 10.1 Strom und Spannung mit phasengleichem Verlauf

Beim reinen ohmschen Widerstand kommt es zu keinerlei Phasenverschiebung (siehe Abbildung 10.1) zwischen Spannung und Strom. Daher können Sie mit dem Effektivwert Ihre Berechnungen vornehmen.

Der ohmsche Widerstand spielt in der Funktechnik an einigen Stellen eine wichtige Rolle:

- Übergangswiderstände von Steckverbindern und Antennenteilen vermindern das Empfangs- und Sendesignal.
- Antennenmaterial mit schlechteren Leiteigenschaften verschlechtert ebenso die Signalstärken.

10.2 Kondensator im Wechselstromkreis

Durch einen (intakten) Kondensator fließt kein Gleichstrom. Wechselstrom hingegen »reicht« er weiter. Dies beruht auf dem Umstand, dass er ständig seine Ladung wechselt. So fließt auf der einen Seite der stetig umgepolte »Ladestrom«, auf der anderen »Platte« wird die entgegengesetzte Ladung erzeugt.

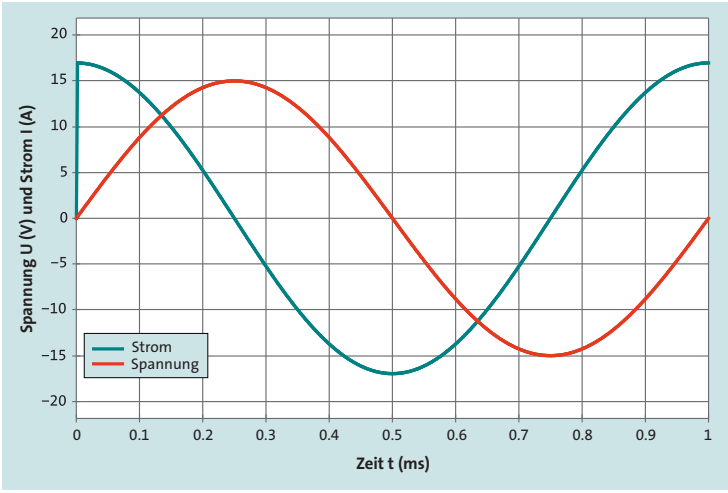


Abbildung 10.2 Phasenverschiebung, Kondensator im Wechselstromkreis

Die *Phasenverschiebung*: Der Strom eilt der Spannung um 90° (π/2, λ/4) voraus (siehe Abbildung 10.2). Durch die Spannungsänderung ist der Kondensator bestrebt, sich zu laden und die Ladung auch wieder abzugeben. Erst wenn er vollständig geladen ist, wird auch der Scheitelwert der Spannung erreicht. Dies gilt genauso für die negative Halbwelle.

- Je höher die Frequenz ist, desto niedriger ist der Wechselstromwiderstand.
- Je höher die Kapazität ist, desto niedriger ist der Wechselstromwiderstand.

Der *Blindwiderstand* (*Reaktanz*, d. h. der Wechselstromwiderstand mit negativem Vorzeichen) eines Kondensators hängt von seiner Kapazität und der Frequenz ab. Der Blindwiderstand bewirkt keine Wärmeverluste.

Für den Wechselstromwiderstand des Kondensators, auch *kapazitiver Widerstand* genannt, gilt die ohmsche Formel:

$$X_c = \frac{U_C}{I_C}\,(\Omega)$$

wobei für die Spannung der Effektivwert und für den Strom der Spitzenwert eingesetzt wird.

Der Wechselstromwiderstand wird auch durch die Frequenz bestimmt. Die Formel drückt auch den Umstand aus, dass mit zunehmender Frequenz der Widerstand sinkt:

$$X_c = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}\ (\Omega)$$

Von dieser Formel gibt es eine Kurzform, die die Kreisfrequenz anstelle des ausführlichen Terms verwendet.

Zur Kreisfrequenz:

- Formelzeichen: ω (kleines Omega)
- Einheit: **1/s** (nicht Hertz!)
- Berechnung der Kreisfrequenz:

  $$\omega = 2 \times \pi \times f$$

  »Kurze Formel« für den Wechselstromwiderstand:

  $$X_c = \frac{1}{\omega \times C}\ (\Omega)$$

- Berechnung der Kapazität des Kondensators, wenn Spannung, Strom und Frequenz bekannt sind:

  $$C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times \frac{U_c}{I_c}} = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times X_c}$$

Die vielleicht kompliziert aussehende Formel ist aber mit dem Taschenrechner leicht zu meistern.

Übung

Berechnen Sie die Kapazität eines Kondensators. Die bekannten Werte sind:

- Wechselspannung: 32 Volt
- Wechselstrom: 100 mA
- Frequenz: 50 Hz

Lösung:

Der Lösungsweg mit dem Taschenrechner lautet:

- 2 [×] [π] [×] 50 [×] 32 [÷] 0,1 [=] [X⁻¹] [=]

  bzw. alternativ:

- 2 [×] [π] [×] 50 [×] 32 [÷] 0,1 [=] [1/X]

In beiden Fällen lesen Sie 9,947...×10^{-6} ab. Das Ergebnis ist in F, somit werden es nach dem Weglassen der Exponentialschreibweise µF. Die Lösung lautet also 9,95 µF.

In einer weiteren Berechnungsaufgabe ist der kapazitive Widerstand (also der Wechselstromwiderstand) eines Kondensators mit einer Kapazität von 50 pF bei 144 MHz gesucht.

Lösung:

Verwenden Sie die Formel

$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}$$

Mit dem Taschenrechner kommen Sie so zur Lösung:

- 2 [×] [π] [×] 144 [×10ˣ] 6 [×] 50 [×10ˣ] [±] 12 [=] [X⁻¹] [=]

  bzw. so:

- 2 [×] [π] [×] 144 [EXP] 06 [×] 50 [EXP] [±] 12 [=] [1/X]

Lesen Sie das Ergebnis ab und runden Sie: X_C = 22 Ω.

10.2.1 Kondensatorverluste, Verlustwiderstand, Auswahl des Dielektrikums

Die Verluste eines Kondensators hängen von seinem Dielektrikum und der verwendeten Frequenz ab. Auch die Umgebungswärme kann einen Einfluss ausüben, nicht nur durch eine eventuelle Wertabweichung bei der Kapazität.

Bei einem von Wechselstrom durchflossenen Kondensator treten Verluste auf, die Sie rechnerisch als parallel geschalteten Verlustwiderstand (Abbildung 10.3) zusammenfassen können. Sie werden als *Verlustfaktor* tan δ (Tangens Delta), das ist der Kehrwert des *Gütefaktors*, ausgedrückt.

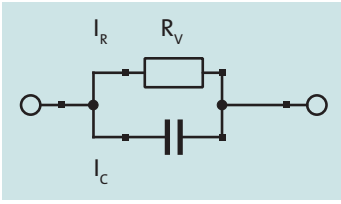


Abbildung 10.3 Darstellung der Kondensatorverluste als Widerstand

Verluste im Dielektrikum treten bei einem von Wechselstrom durchflossenen Kondensator zwar auf; in den meisten Fällen, vor allem im »eingeschwungenen Zustand«, sind diese aber vernachlässigbar klein.

Tritt eine Phasenverschiebung von (annähernd) 90° ein, wird keine Leistung umgesetzt!

Niedrige Verlustfaktoren weisen Kondensatoren mit Glimmer- und Keramikmaterial auf. Styroflexkondensatoren eignen sich für niedrigere Frequenzen. Ausführungen aus Kunststofffolie gehören in den NF-Bereich (Tonfrequenzen).

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ (sprich: Tangens Delta) drückt das Verhältnis des durch den »Ersatzwiderstand« fließenden Stroms I_R zu dem durch den Kondensator fließenden Strom I_C aus. Die Umkehrung hiervon ist der Gütefaktor Q. Hier gilt: Je höher der parallele Verlustfaktor ist, desto höher ist die Güte des Kondensators.

Verlustfaktor und Gütefaktor beim Kondensator

Verlustfaktor:

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{X_C}{R_v}$$

Gütefaktor:

$$Q = \frac{R_V}{X_C}$$

10.3 Induktivität einer Spule

Auch die Spule stellt einen Widerstand im Wechselstromkreis dar.

Die Spule im Wechselstromkreis

Steigt die Frequenz, steigt auch der Wechselstromwiderstand der Spule!

Die Spannung eilt dem Strom um 90° (π/2, λ/4) voraus (siehe Abbildung 10.4).

Wird eine Spule von Wechselstrom durchflossen, wirkt der induktive Widerstand X_L und erhöht den Gesamtwiderstand. Gegenüber dem Anschluss an eine Gleichstromquelle vermindert sich daher der Stromfluss.

Der Wechselstromwiderstand (Blindwiderstand) ist abhängig von der Frequenz des Wechselstroms und von der Induktivität. Es entstehen keine Wärmeverluste.

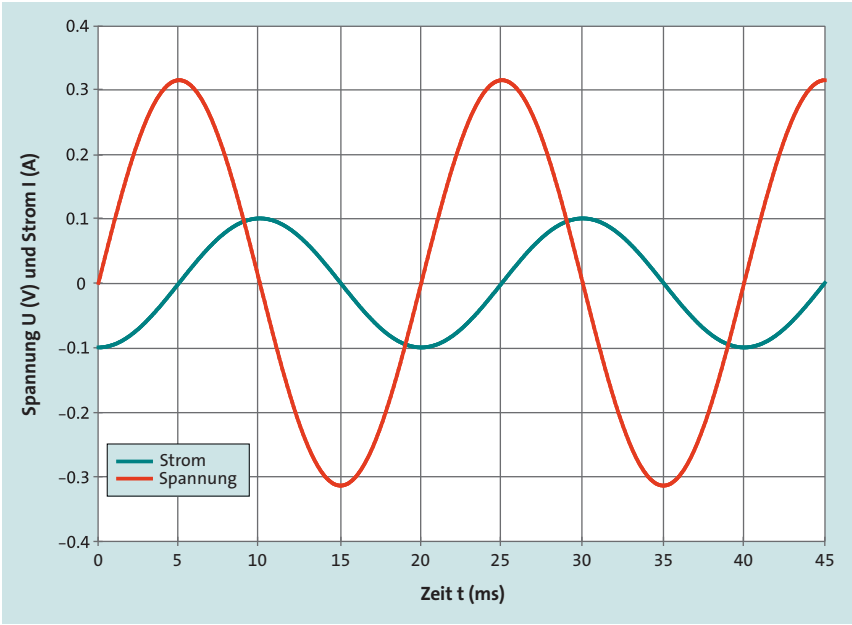


Abbildung 10.4 Phasenverlauf einer Spule im Wechselstromkreis

Für die Berechnung des Wechselstromwiderstands stehen ebenso zwei Formeln zur Verfügung:

- Berechnung aus Spannung und Strom:

$$X_L = \frac{U_L}{I_L}\,\Omega$$

- Berechnung aus der Frequenz bzw. Kreisfrequenz:

$$X_L = \omega \times L$$

- Ausführliche Formel:

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

Erkennen Sie den Unterschied bei der ausführlichen Formel gegenüber der Berechnung des Wechselstromwiderstands beim Kondensator? Beim Kondensator arbeiten Sie mit dem Kehrwert, bei der Spule nicht. Dies rührt daher, dass der Wechselstromwiderstand einer Induktivität mit der Frequenz steigt.

Übung

Berechnen Sie den Wechselstromwiderstand einer Spule mit 47 µH bei 28 MHz.

Lösung:

Verwenden Sie die Formel $X_L = 2 \times \pi \times f \times L$.

Mit dem Taschenrechner rechnen Sie:

- 2 [×] [π] [×] 28 [×10ˣ] 6 [×] 47 [×10ˣ] [±] 6 [=]

  oder alternativ:

- 2 [×] [π] [×] 28 [EXP] 06 [×] 47 [EXP] [±] 06 [=]

Sie kommen zu dem Ergebnis: X_L beträgt 8.269 Ω.

10.3.1 Spulenverluste, Güte

Auch Spulen weisen Verluste auf. Diese entstehen durch den ohmschen Widerstand und durch weitere Effekte wie Skin-Effekt, Wirbelströme usw.

Die Güte einer Spule ist umso höher, je niedriger der Gleichstromwiderstand gegenüber dem Wechselstromwiderstand der Spule ist.

- Verlustfaktor:

  $$\tan \delta = \frac{R_s}{X_L}$$

- Gütefaktor:

  $$Q = \frac{X_L}{R_S}$$

10.3.2 Induktivitäten in Schaltungen und Geräten

Falsch platzierte Spulen können beim Entwickeln einer Schaltung Ärger verursachen. Magnetische Kopplungen mit Bauelementen in der näheren Umgebung der Spule rufen dann unerwünschte Effekte hervor.

Diese Gegenmaßnahmen schaffen Abhilfe:

- Parasitäre Schwingungen erfordern verlustbehaftete Spulen. Dazu wickeln Sie die Spule um einen niederohmigen Widerstand.
- Sie verwenden einen metallischen Abschirmbecher für die Spule. Damit werden Abstrahlungen eines abgestimmten Schwingkreises verhindert.

10.4 Zusammenfassung

Die spezifischen Eigenschaften von Widerstand, Kondensator und Spule im Wechselstromkreis finden Sie in Tabelle 10.1 nochmals kurz zusammengefasst.

	Ohmscher Widerstand	Kondensator	Induktivität
Aus Strom und Spannung	$R = \frac{U}{I}(\Omega)$	$X_C = \frac{U_C}{I_C}(\Omega)$	$X_L = \frac{U_L}{I_L}(\Omega)$
Aus der Frequenz	–	$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}(\Omega)$	$X_L = 2 \times \pi \times f \times L\ (\Omega)$
Kreis-frequenz	–	$\omega = 2 \times \pi \times f\ 1/s$	
Kurze Formeln	–	$X_C = \frac{1}{\omega \times C}$	$X_L = \omega \times L\ (\Omega)$
Phasen-verschiebung	keine	Der Strom eilt der Spannung um 90° $\frac{\pi}{2}, \frac{\lambda}{4}$ voraus.	Die Spannung eilt dem Strom um 90° $\frac{\pi}{2}, \frac{\lambda}{4}$ voraus.

Tabelle 10.1 Zusammenfassung

10.4.1 Experimente

Vollziehen Sie die Berechnungen nach. Sie benötigen für den Versuch folgende Geräte:

- einen Frequenzgenerator mit Einstellmöglichkeiten für die Signalform, Pegel und Frequenz
- ein Digitalmultimeter, dessen Wechselstrombereich bis 1.000 Hz reicht
- verschiedene Kondensatoren und Induktivitäten als Messkandidaten

Abbildung 10.5 zeigt Ihnen einen »fliegenden« Messaufbau im Einsatz.

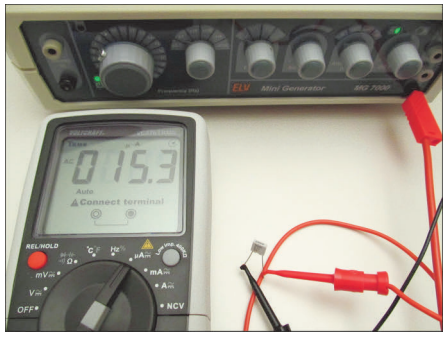


Abbildung 10.5 Fliegender Messaufbau mit Kondensator im Wechselstromkreis

10.5 Reihenschaltung von Kondensator und Widerstand

Sie erinnern sich, dass bei einem von Wechselstrom durchflossenen Kondensator der Strom um 90° vorauseilt. Am »ohmschen« Widerstand hingegen liegen Strom und Spannung in Phase.

Aus diesem Grund können Sie die Teilwiderstände und -spannungen nicht einfach addieren.

Um nun die Gesamtspannung bzw. den Gesamtwiderstand *Z* auszurechnen, wenden Sie die Formel für ein rechtwinkliges Dreieck an:

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Bei der Serienschaltung von einem Widerstand mit einem Kondensator arbeiten Sie mit diesen Formeln:

Berechnung der Spannung:

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}\ \text{V}$$

Für den Scheinwiderstand *Z* gilt diese Formel:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}\ \Omega$$

10.6 Reihenschaltung von Spule und Widerstand

Sie werden sich auch daran erinnern, dass bei einer von Wechselstrom durchflossenen Spule die Spannung um 90° vorauseilt. Am »ohmschen« Widerstand hingegen liegen Strom und Spannung in Phase.

Es kommen die Formeln aus Abschnitt 10.5 zum Einsatz, Sie tauschen nur U_C gegen U_L und X_C gegen X_L aus.

10.7 Tief- und Hochpassfilter für den Audiobereich

Mittels Widerständen und Kondensatoren oder Induktivitäten können Sie vor allem für den NF-Bereich (Audio-)Filter kreieren, die entweder tiefe oder hohe Frequenzen absenken.

In der Praxis helfen solche Schaltungen oftmals, zu tiefe oder zu hohe Stimmlagen an ein Funkgerät anzupassen. Diese kleine Schaltung schleift man einfach in die Mikrofonleitung ein.

10.7.1 Tief- und Hochpassfilter aus R und C oder L berechnen

Während der Widerstand Wechselströme unabhängig von der Frequenz durchleitet, leitet der Kondensator mit steigender Frequenz besser, wohingegen die Spule immer mehr »drosselt«.

Filter, die die hohen Frequenzen passieren lassen und die tiefen sperren, nennt man *Hochpassfilter* (siehe Abbildung 10.6).

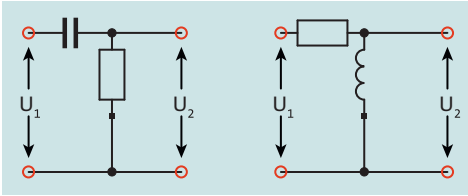


Abbildung 10.6 CR- und RL-Hochpassfilter

Filter, die die tiefen Frequenz passieren lassen und die hohen sperren, nennt man *Tiefpassfilter* (siehe Abbildung 10.7).

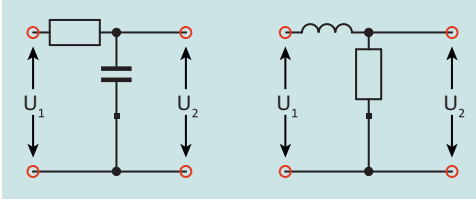


Abbildung 10.7 RC- und LR-Tiefpassfilter

Die Grenzfrequenz f_g für Hochpassfilter entspricht der Frequenz, bei der 70,7 % des Spannungsendwertes erreicht werden (siehe Abbildung 10.8).

Die Grenzfrequenz f_g für Tiefpassfilter entspricht der Frequenz, bei der die Eingangsspannung auf 70,7 % (–3 dB) abgesunken ist (siehe Abbildung 10.9).

- Berechnung der Grenzfrequenz für RC/CR-Filter:

$$f_g = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \text{Hz}$$

- Berechnung der Grenzfrequenz für RL/LR-Filter:

$$f_g = \frac{R}{2 \times \pi \times L} \text{ Hz}$$

Abbildung 10.6 zeigt, wie ein Hochpassfilter arbeitet: Der Kondensator leitet stets besser, je höher die Frequenz ist. Tiefe Frequenzen kommen hier nur gedämpft durch, da mit dem Widerstand zudem ein Spannungsteiler aufgebaut wird, der einen Teil der Signalspannung ableitet.

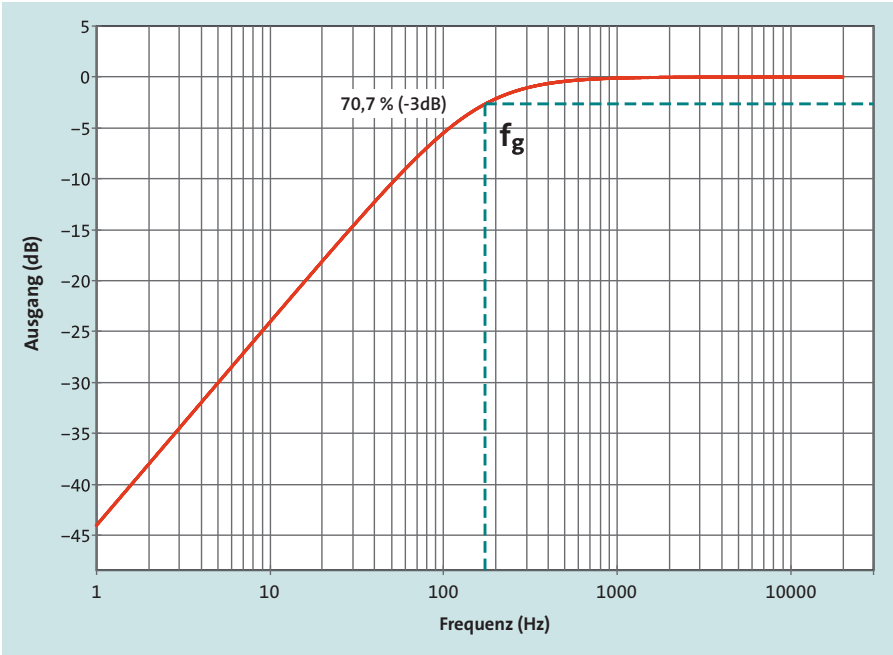


Abbildung 10.8 Ein Hochpassfilter und seine Grenzfrequenz

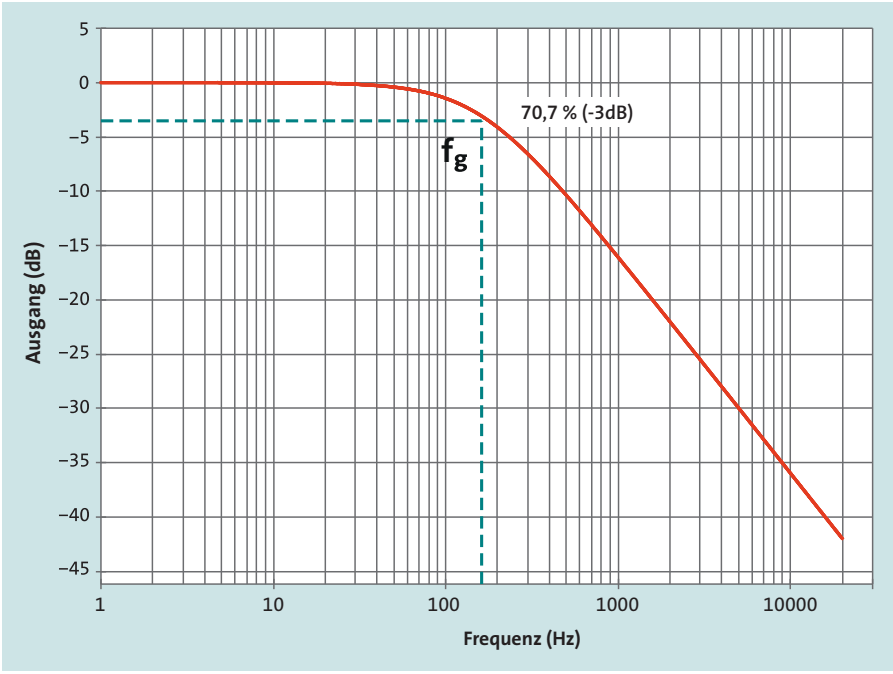


Abbildung 10.9 Ein Tiefpassfilter und seine Grenzfrequenz

Die Spule hingegen hat mit zunehmender Frequenz dämpfende Wirkung. Deshalb sitzt sie im Hochpassfilter auch an anderer Stelle im Spannungsteiler. Signale mit tieferen Frequenzen leitet sie bevorzugt ab.

Abbildung 10.7 zeigt Ihnen die Funktionsweise des Tiefpassfilters. Der Kondensator leitet hohe Frequenzen ab. Die Spule blockiert hohe Frequenzen und steht deshalb an der ersten Stelle im Spannungsteiler.

Übung

Sie haben ein Tiefpassfilter, das aus einem Kondensator mit 47 nF und einem Widerstand mit 8 kΩ besteht. Berechnen Sie die Grenzfrequenz.

Lösung:

Geben Sie Folgendes in den Taschenrechner ein:

- 2 [×] [π] [×] 8 [×10ˣ] 3 [×] 47 [×10ˣ] [±] 9 [=] [X⁻¹] [=]
  oder alternativ
- 2 [×] [π] [×] 8 [EXP] 3 [×] 47 [EXP] [±] 09 [=] [1/X]

Sie kommen zu folgendem Ergebnis: 423 Hz.

10.7.2 Ermitteln der Spannungsverhältnisse

Die in Abschnitt 10.7.1 gezeigten Filterschaltungen können Sie auch als Spannungsteiler betrachten. Sollten Sie im Rahmen eines Selbstbauprojekts das Spannungsteilerverhältnis benötigen, finden Sie in Tabelle 10.2 die notwendigen Formeln.

Filter/Kombination	R und C	R und L
Hochpass	$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$	$\frac{U_2}{U_1} = \frac{X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$
Tiefpass	$\frac{U_2}{U_1} = \frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$	$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$

Tabelle 10.2 Formeln für die Ermittlung des Spannungsverhältnisses

10.8 Schwingkreise mit Spulen und Kondensatoren

Spulen und Kondensatoren bilden zusammengeschaltet *Schwingkreise* bzw. Filter.

10.8.1 Schwingung im LC-Kreis

Im Schwingkreis findet ein stetiger Energieaustausch zwischen Kondensatoren und Induktivitäten statt. Die beiden Bauteile verhalten sich bekanntermaßen entgegengesetzt. Beim Kondensator eilt der Strom gegenüber der Spannung vor, bei der Spule eilt er nach. Dieser Umstand begünstigt ein Hin- und Herschaufeln von Ladungen zwischen diesen Bauteilen.

Abbildung 10.10 zeigt Ihnen den Verlauf von Strom und Spannung an C und L in einem Schwingkreis, der kontinuierlich mit einer Wechselspannung gespeist wird.

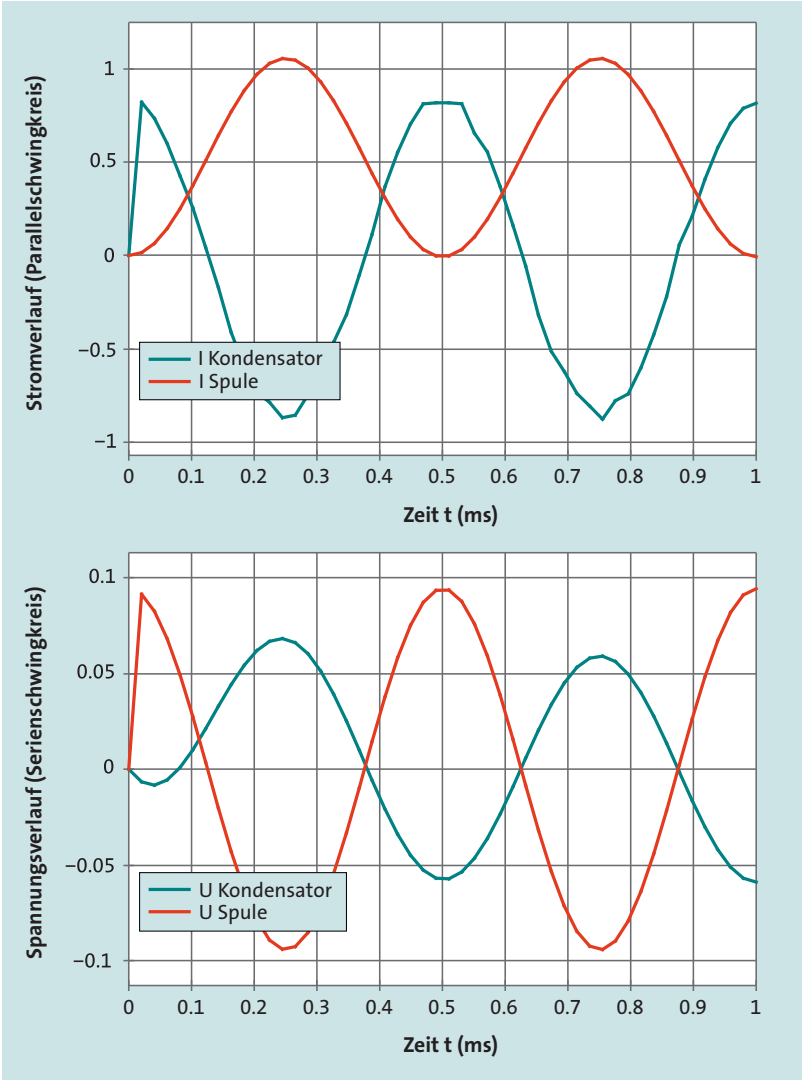


Abbildung 10.10 Strom und Spannung im LC-Schwingkreis

Sie erkennen, dass Kondensator und Spule gegeneinander arbeiten. Wenn Sie die linken Ränder der Diagramme betrachten, erkennen Sie, dass jeweils eine Messkurve einen »Zacken« aufweist. Dies gehört zum Einschwingvorgang eines LC-Kreises. So hat beim Parallelschwingkreis der Kondensator einen hohen Ladestrom; beim Serienschwingkreis steigt die Spannung an der Spule anfangs rasch an. Beim Parallelschwingkreis sind die Teilspannungen der Verzweigung gleich, aber die Ströme verschieden; beim Serienschwingkreis bleibt der Strom gleich, aber die Teilspannungen an den Bauteilen variieren.

10.8.2 Schwingungsarten

Es wird zwischen ungedämpften und gedämpften Schwingungen unterschieden:

- *Gedämpfte Schwingungen* werden durch ein Einzelereignis angestoßen. Durch die Verluste von Spulen und Kondensatoren wird das Signal mit jeder Schwingung schwächer (siehe Abbildung 10.11).
- *Ungedämpfte Schwingungen* werden laufend erzeugt (Oszillator, Generator) und dem Schwingkreis zugeführt. Dabei werden die Spulenverluste ausgeglichen (siehe Abbildung 10.12).

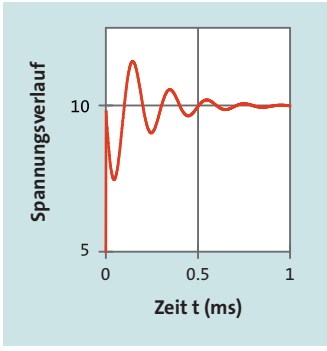


Abbildung 10.11 Gedämpfte Schwingung

Gedämpfte Schwingungen gibt es in der Praxis zuhauf. Öffnungsfunken von Geräten mit Induktivlasten, Gewitterblitze oder Einschaltstromstöße zählen zu den Varianten aus dem Elektrobereich.

Wenn Sie einen Stein in ein Gewässer werfen, können Sie das Prinzip der gedämpften Schwingung sehen: Die Wasserwellen werden allmählich kleiner, bis die Wasseroberfläche sich wieder beruhigt. Auch einige Saiteninstrumente, z. B. die Gitarre, arbeiten mit gedämpften Schwingungen: Sie schlagen eine Saite an und hören den Anschlag selbst laut. Die Saite schwingt noch einige Zeit nach und wird dabei immer leiser, bis sie schließlich verstummt.

Die Verluste können Sie sich an einem anderen Beispiel verdeutlichen: Sie haben zwei gleich große Tassen, eine ist mit Kaffee gefüllt. Sie müssen nun unermüdlich immer den Inhalt in die jeweils freie Tasse umfüllen – und zwar schnell, ohne Trichter und andere Hilfsmittel. In der Hektik gehen immer ein paar Tropfen verloren. Irgendwann stellen Sie fest, dass nicht mehr viel von der Flüssigkeit vorhanden ist.

Ein Generator oder Oszillator erzeugt die *kontinuierliche, ungedämpfte Schwingung*, die den Schwingkreis stetig mit Energie versorgt. Dabei werden jegliche Verluste kontinuierlich kompensiert, wie in Abbildung 10.12 dargestellt.

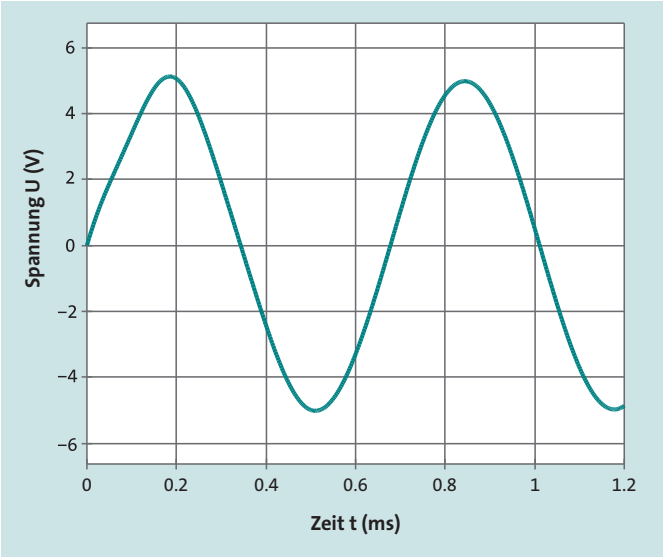


Abbildung 10.12 Ungedämpfte Schwingung

10.8.3 Der Reihenschwingkreis

Im *Reihenschwingkreis*, auch als *Serienschwingkreis* bezeichnet, sind Kondensator und Spule hintereinander platziert (siehe Abbildung 10.13).

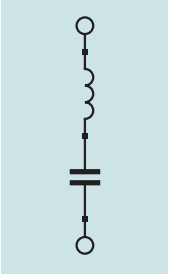


Abbildung 10.13 Reihenschwingkreis

Eigenschaften bei Resonanzfrequenz:

- Widerstand/Impedanz: niedrig (etwa wie bei der Induktivität), sonst hoch. (Betrag induktiver Widerstand = Betrag kapazitiver Widerstand)
- Spannung: niedrig (siehe Abbildung 10.14)
- Strom: hoch (siehe Abbildung 10.15)

Eigenschaften außerhalb der Resonanzfrequenz:

- Widerstand/Impedanz: hoch
- Spannung: hoch
- Strom: niedrig

Reihenschwingkreise werden vorrangig als Filterkreise zur Unterdrückung von Störungen eingesetzt.

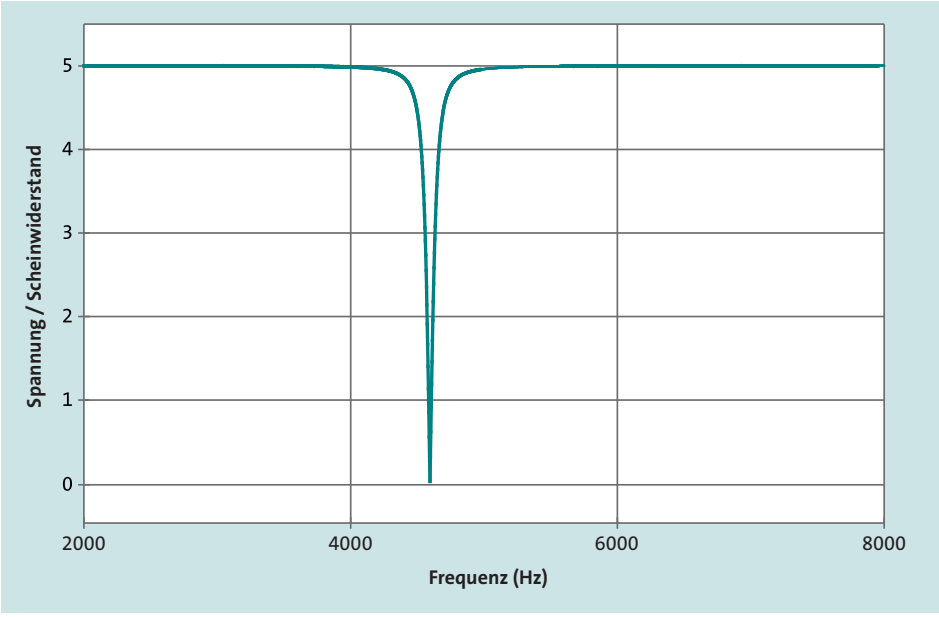


Abbildung 10.14 Reihenschwingkreis: Spannungsverlauf bei Resonanz

Der »Saugkreis«

Ein Saugkreis ist eine spezielle Art von Filterkreis, der bestimmte Frequenzen aus einem Signal herausfiltert. Der Saugkreis wird so genannt, weil er bei einer bestimmten Frequenz oder einem engen Frequenzbereich eine sehr geringe Impedanz auf-

weist, wodurch er elektrische Energie bei dieser Frequenz effektiv absorbiert oder saugt. Dadurch wird die unerwünschte Frequenz aus dem Signal entfernt, ähnlich wie ein Bandsperrfilter. Diese Eigenschaft macht den Saugkreis besonders nützlich, um Störungen oder unerwünschte Signale, die bei einer bestimmten Frequenz auftreten, zu unterdrücken ohne den Rest des Signals wesentlich zu beeinflussen.

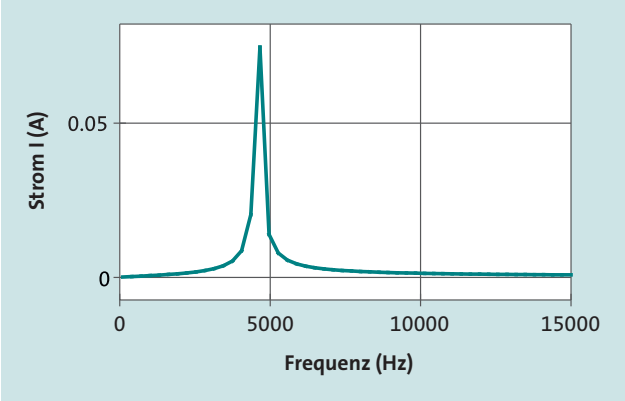


Abbildung 10.15 Reihenschwingkreis: Stromverlauf bei Resonanz

In der Praxis können Sie damit manche Empfangsstörung durch starke Signale neben Ihrer Empfangsfrequenz abstellen. Der Reihenschwingkreis als *Saugkreis* wirkt in diesem Fall wie ein Kurzschluss (siehe Abbildung 10.16)!

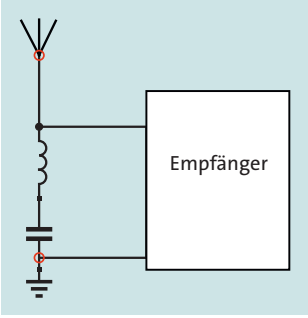


Abbildung 10.16 Reihenschwingkreis (Saugkreis)

Sie können ihn auch als *Leitkreis* verwenden. Hier ist er ja außerhalb der Resonanzfrequenz hochohmig und sperrt damit alles außerhalb des Resonanzbereichs aus (siehe Abbildung 10.17).

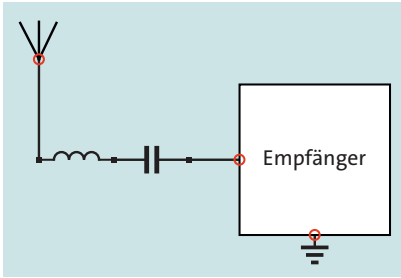


Abbildung 10.17 Reihenschwingkreis (Leitkreis)

10.8.4 Parallelschwingkreis

Beim Parallelschwingkreis werden beide Anschlüsse von Induktivität und Kondensator miteinander verbunden (siehe Abbildung 10.18).

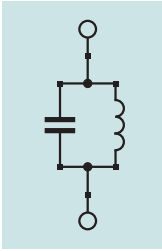


Abbildung 10.18 Parallelschwingkreis

Eigenschaften bei Resonanzfrequenz:

- Widerstand/Impedanz: hoch
- Spannung: hoch (siehe Abbildung 10.19)
- Strom: niedrig (siehe Abbildung 10.20)

Eigenschaften außerhalb der Resonanzfrequenz:

- Widerstand/Impedanz: niedrig
- Spannung: niedrig
- Strom: hoch

Die Einsatzgebiete liegen im *Sperrkreis* und im *Bandpass*.

Erreichen Signale beim Parallelschwingkreis die Resonanzfrequenz, so werden diese gesperrt. Der Scheinwiderstand und damit die Spannung steigen enorm an, der Stromfluss hingegen kommt fast zum Erliegen.

Man nutzt diesen Umstand beispielsweise bei verkürzten Dipolantennen aus, die Sperrkreise benutzen (z. B. die W3DZZ-Antenne).

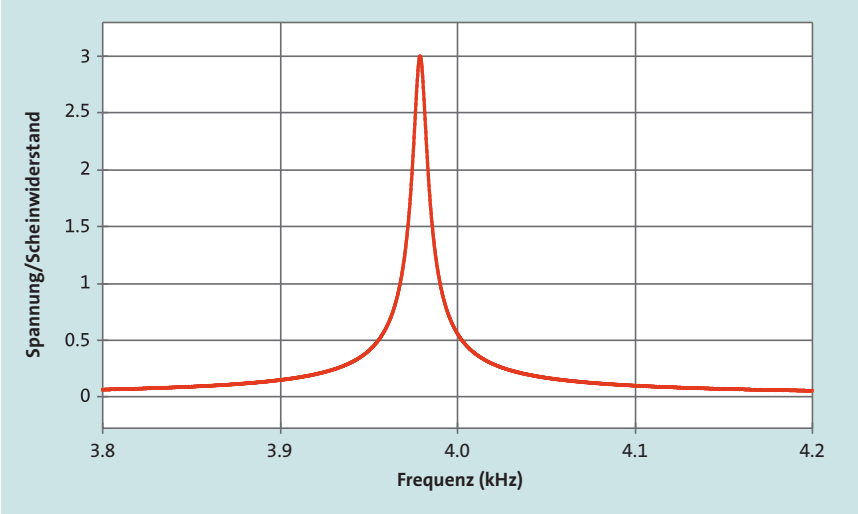


Abbildung 10.19 Parallelschwingkreis: Spannungsverlauf

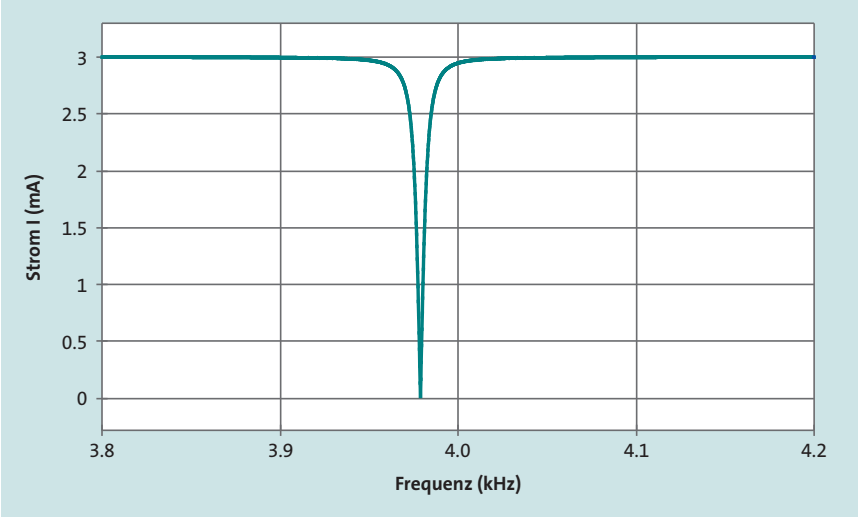


Abbildung 10.20 Parallelschwingkreis: Stromverlauf

10.8.5 Die Resonanzfrequenz von Schwingkreisen

Hier geht es um eine der wichtigsten Berechnungen für Funkamateure!

Jede Form von Induktivität wirkt zusammen mit einem Kondensator als Schwingkreis, also auch die Wicklungen von Übertragern und Transformatoren.

Spannungen, Ströme, Widerstände und Leistungen einzelner Komponenten werden ermittelt und unter Berücksichtigung der Phasenwinkel geometrisch addiert.

- **Definition**: Man spricht von der Resonanzfrequenz, wenn:
  induktiver Widerstand X_L = kapazitiver Widerstand X_C
- Formelzeichen: f_0
- Einheit: Hertz (Hz, kHz, MHz, GHz, THz)
- Berechnung der Resonanzfrequenz:

$$f_0 = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}} \text{ (Hz)}$$

- Herausrechnen von Komponenten im Schwingkreis:
  - Ermitteln von C:

$$C = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times f_0^2 \times L} \text{ (F)}$$

  - Ermitteln von L:

$$L = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times f_0^2 \times C} \text{ (H)}$$

Übung: Resonanzfrequenz

Die bekannten Daten eines Parallelschwingkreises lauten:

- L = 1,5 µH
- C = 40 pF

Gesucht ist die Resonanzfrequenz.

Lösung:

- Schritt 1: Verwenden Sie die Schwingkreisformel, und geben Sie diese mit den Werten der Aufgabe in Ihren Taschenrechner ein. Dazu kehren Sie die Reihenfolge in der Nennerreihe um und beginnen mit der Wurzel.
- Schritt 2: Geben Sie die Wurzel aus $L \times C$ mit den richtigen Potenzen ein und drücken Sie [=] für das Zwischenergebnis:
  [√■] 1,5 [×10ˣ] [±] 6 [×] 40 [×10ˣ] [±] 12 [=]
- Schritt 3: Das Zwischenergebnis müssen Sie noch mit 2 × π multiplizieren. Drücken Sie [=] für ein Zwischenergebnis, und geben Sie schließlich den Kehrwert aus – fertig!
  [×] 2 [×] [π] [=] [X⁻¹] [=]
  Alternativ:
  1,5 [EXP] [±] 06 [×] 40 [EXP] [±] 12 [=]
  [√] [=]
  [×] 2 [×] [π] [=]
  [1/X] [=]

Abgelesen: 20546814,8 Hz, das Ergebnis entspricht 20,5468 MHz.

Taucht ein hochohmiger Widerstand auf, so lassen Sie diesen für die Berechnung unberücksichtigt, da er die Resonanzfrequenz nur wenig beeinflusst (siehe auch Abbildung 10.22).

Übung: Schwingkreiskomponenten

Sie haben einen Schwingkreis mit einer Resonanzfrequenz von 5 MHz. Die Induktivität beträgt 100 µH. Welchen Wert hat der Trimmkondensator, wenn die Frequenz exakt 5 MHz beträgt?

Lösung:

Lösen Sie die Formel schrittweise auf:

$$C = \frac{1}{4 \times \pi^2 \times f_0^2 \times L}$$

$$= \frac{1}{4 \times 9{,}8696 \times 25 \times 10^{12} \times 100 \times 10^{-6}} = \frac{1}{9{,}8696 \times 10^{10}}$$

$$= 10{,}13 \times 10^{-12}$$

In den Taschenrechner tippen Sie:

1 [÷] [(] 4 [×] [π] [X²] [×] 5 [X²] [×] 10 [EXP] 12 [×] 100 [×] 10 [EXP] 6 [±] [)] [=]

Abgelesen: 1,01321.... ×10^{-19}

Abschließend müssen Sie noch die Kommastellen richtig setzen: milli→mikro→nano→pico, also 10^{-18}, das ergibt also 10,13 pF.

10.8.6 Frequenzändernde Eingriffe am Schwingkreis

In Tabelle 10.3 finden Sie die Möglichkeiten, durch Veränderung an den Komponenten frequenzändernd in einen Schwingkreis einzugreifen. Natürlich können Sie auch einen variablen Kondensator verwenden, was aber manchmal unerwünscht ist.

Änderung an *L*	Auswirkung an *L*	Auswirkung an *f*
Windungszahl erhöhen	wird höher	wird niedriger
Windungen zusammenschieben/ Länge der Spule verringern	wird höher	wird niedriger
Ferritkern in Spule einführen	wird höher	wird niedriger
Windungszahl vermindern	wird niedriger	wird höher

Tabelle 10.3 Änderungen an Schwingkreiskomponenten und ihre Auswirkungen

Änderung an *L*	Auswirkung an *L*	Auswirkung an *f*
Windungen auseinanderziehen/ Spule verlängern	wird niedriger	wird höher
Ferritkern entfernen	wird niedriger	wird höher
Änderung an *C*	**Auswirkung an *C***	**Auswirkung an *f***
Plattenabstand verringern	wird höher	wird tiefer
Plattenabstand erhöhen	wird tiefer	wird höher

Tabelle 10.3 Änderungen an Schwingkreiskomponenten und ihre Auswirkungen (Forts.)

10.8.7 Bandbreite und Güte von Schwingkreisen

Ein Schwingkreis ist genau auf einer Frequenz in Resonanz. Oberhalb und unterhalb der Resonanzfrequenz ändert sich der Scheinwiderstand entsprechend dem Schwingkreistyp allmählich. Mit dem Begriff *Bandbreite* wird hierbei ein Bereich beschrieben, an dessen unterer und oberer Frequenz die Spannung oder der Scheinwiderstand auf 70,7 % gegenüber der Resonanzfrequenz abfällt, was –3dB entspricht (siehe Abbildung 10.21).

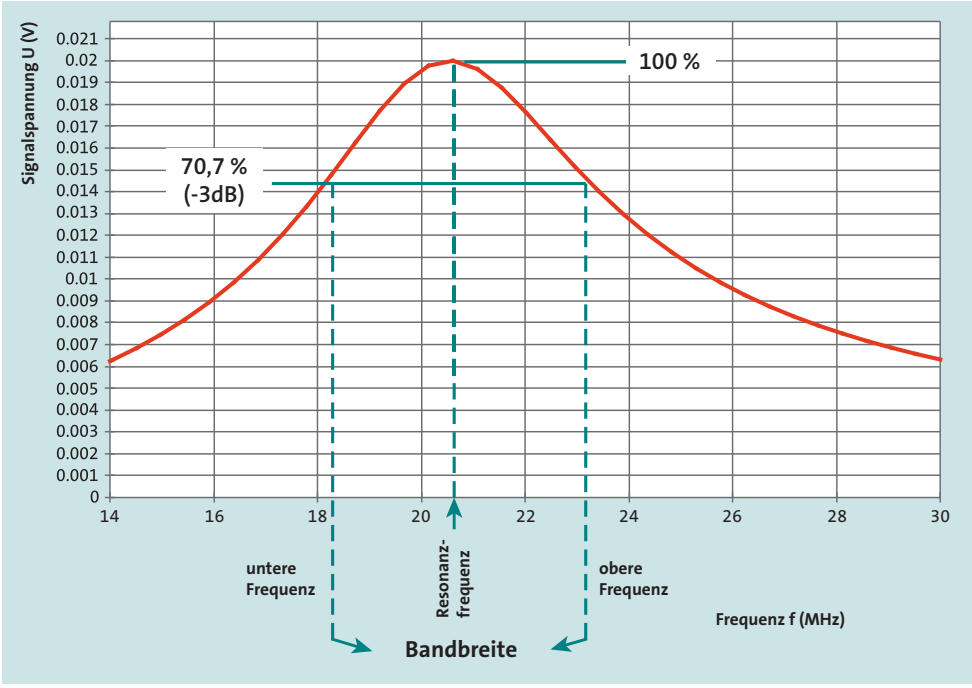


Abbildung 10.21 Bandbreite eines Schwingkreises

- Die Bandbreite B eines Schwingkreises hängt vom Verlustwiderstand der beteiligten Induktivität ab, der die Kreisgüte Q hauptsächlich mitbestimmt. Bei Verwendung geeigneter Kondensatoren wirken sich deren Verluste kaum merklich auf Q aus.
- Die obere bzw. untere Grenzfrequenz ist erreicht, wenn die Signalspannung den rund 0,7-fachen Wert der Spannung der Resonanzfrequenz erreicht.
- Die Differenz zwischen der oberen und unteren Frequenz ergibt die Bandbreite.
- Die Bandbreite B steigt mit zunehmender Frequenz proportional an.
- Die Bandbreite wird in Hz oder einem Vielfachen davon angegeben.
- Die Güte wird hauptsächlich durch den Verlustwiderstand der Spule bestimmt.
- Die Güte ist umgekehrt proportional zur Bandbreite.
- Die Güte ist eine Faktorangabe ohne Einheit.
- Mit zunehmenden Verlusten steigt die Bandbreite und sinkt die Güte.
- Sind die obere und untere Frequenz der Bandbreite (–3-dB-Bereich) bekannt, berechnet sich die Bandbreite mit dieser Formel:

  $$B = f_{\text{obere Frequenz}} - f_{\text{untere Frequenz}}$$

- Die Güte lässt sich auf mehrere Arten bestimmen:
  - Aus dem Verhältnis der Resonanzfrequenz zur Bandbreite:

    $$Q = \frac{\text{Resonanzfrequenz (Hz)}}{\text{Bandbreite (Hz)}} = \frac{f}{B}$$

  - Aus dem Verhältnis des Parallelwiderstands zum Scheinwiderstand der Spule (Parallelschwingkreis):

    $$Q = \frac{\text{Widerstand Parallelschwingkreis}}{\text{Blindwiderstand Spule}} = \frac{R_P}{X_L}$$

  - Aus dem Verhältnis des Blindwiderstands der Spule zum Serienwiderstand (Reihenschwingkreis):

    $$Q = \frac{\text{Blindwiderstand Spule}}{\text{Widerstand Reihenschwingkreis}} = \frac{X_L}{R_S}$$

  - Aus den Werten von Spule, Kondensator und Widerstand (Parallelschwingkreis):

    $$Q = \text{Widerstand Parallelschwingkreis} \times \sqrt{\frac{C}{L}} = R_P \times \sqrt{\frac{C}{L}}$$

- Für die Berechnung der Bandbreite gibt es noch weitere Formeln.
  - Serienresonanzkreis, L, C und R sind bekannt:

    $$B = \frac{\text{Widerstand Reihenschwingkreis}}{2 \times \pi \times \text{Induktivität}} = \frac{R_S}{2 \times \pi \times L}$$

Die Kapazität *C* wird hier nicht verwendet, da sie zwar die Resonanzfrequenz, aber nicht die Bandbreite beeinflusst.

– Der Parallelresonanzkreis, *L*, *C* und *R* sind bekannt. Die vollständige Formel lautet dann:

$$B = \frac{\frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}}{R_P \times \sqrt{\frac{C}{L}}}$$

Diese sperrige Formel kann niemand ernsthaft in den Taschenrechner eingeben! Zerlegen Sie sie also in Teilschritte:

$$B = \frac{\text{Resonanzfrequenz}}{\text{Güte}} = \frac{f_0}{Q}$$

Berechnen Sie zuerst die Resonanzfrequenz und die Güte, um dann die vereinfachte Formel anzuwenden.

Bevor es an die Rechenbeispiele geht, betrachten Sie in Abbildung 10.22 einmal die Auswirkung des Spulenwiderstands auf die Bandbreite, hier bei einem Parallelresonanzkreis. Sie sehen, dass mit zunehmendem Spulenwiderstand der Scheinwiderstand *Z* bzw. die Signalspannung zugunsten der Bandbreite sinkt.

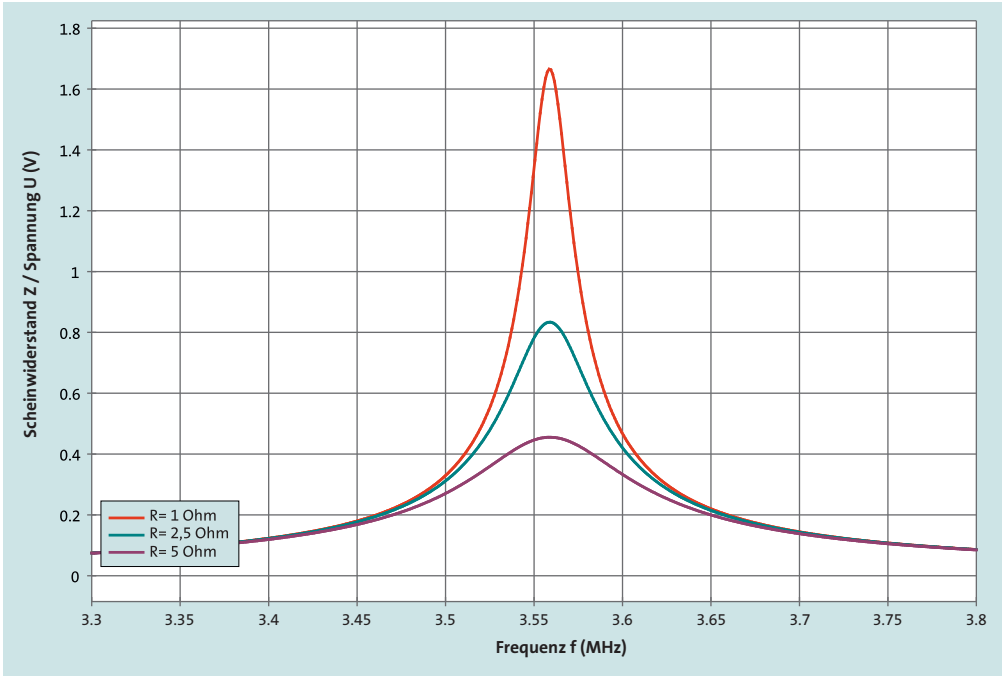


Abbildung 10.22 Spulenwiderstand, Güte und Bandbreite

Übung: Güte eines Reihenschwingkreises berechnen

Bekannte Werte eines Reihenschwingkreises sind:

- $L = 50\ \mu H$
- $C = 50\ pF$
- $R = 5\ \Omega$

Gesucht ist die Güte Q.

Lösung:

Die zu verwendende Formel lautet:

$$Q = \frac{X_L}{R_S}$$

- Schritt 1: Berechnen Sie die Resonanzfrequenz f:

  $$f = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

  Mit den eingesetzten gegebenen Werten sieht die Formel so aus:

  $$f = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{50 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^{-12}}}$$

  Geben Sie die Wurzel aus $L \times C$ mit den richtigen Potenzen in den Taschenrechner ein, um zum ersten Zwischenergebnis zu gelangen:

  [√■] 50 [×10ˣ] [±] 6 [×] 50 [×10ˣ] [±] 12 [=]

  Das Zwischenergebnis multiplizieren Sie nun noch mit 2 × π. Sie erhalten ein weiteres Zwischenergebnis, für das Sie den Kehrwert ausgeben – fertig!

  [×] 2 [×] [π] [=] [X⁻¹] [=]

  Alternativ:

  50 [EXP] [±] 06 [×] 50 [EXP] [±] 12 [=]

  [√] [=]

  [×] 2 [×] [π] [=]

  [1/X] [=]

  Zwischenergebnis: 3183098,862 Hz (Das entspricht 3,18 MHz.)

  Speichern Sie dieses Ergebnis einfach im Taschenrechner. Meist können Sie es mit einer Taste [MR] wieder aufrufen.

- Schritt 2: Bestimmen Sie X_L. Die Formel dazu lautet:

  $$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

  Setzen Sie die Werte ein, und berechnen Sie:

  $$X_L = 2 \times \pi \times 3183098{,}862 \times 50 \times 10^{-6}$$

  Ergebnis: 1000 Ω

- Schritt 3: Abschließend berechnen Sie die Güte. Auch hier setzen Sie die Werte in die Formel ein:

$$Q = \frac{1000}{5}$$

Die Güte Q beträgt also 200.

Übung: Güte eines Parallelschwingkreises berechnen

Folgende Werte eines Parallelschwingkreises sind gegeben:

- $L = 1\,\mu H$
- $C = 30\,pF$
- $R = 0{,}5\,k\Omega$

Gesucht ist die Güte Q.

Lösung:

Es kommt diese Formel zum Einsatz:

$$Q = R_P \times \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Setzen Sie die bekannten Werte in die Formel ein:

$$Q = 500 \times \sqrt{\frac{30 \times 10^{-12}}{1 \times 10^{-6}}}$$

Anschließend geben Sie die Formel in den Taschenrechner ein:

- [√■] 30 [×10ˣ] [±] 12 [÷] 1 [×10ˣ] [±] 6 [=] [×] 500 [=]

  Alternativ:
- 30 [EXP] [±] 12 [÷] 1 [EXP] [±] 6 [=] [√] [×] 500 [=]

Ergebnis: Q beträgt 2,73.

Übung: Bandbreite eines Reihenschwingkreises berechnen

Dies sind die bekannten Werte des Reihenschwingkreises:

- $L = 70\,\mu H$
- $C = 0{,}02\,\mu F$
- $R = 20\,\Omega$

Gesucht ist die Bandbreite B.

Lösung:

Wenden Sie diese zusammenfassende Formel an:

$$B = \frac{R_S}{2 \times \pi \times L}$$

Setzen Sie die Werte in die Formel ein:

$$B = \frac{20}{2 \times \pi \times 70 \times 10^{-6}}$$

So geben Sie die Formel in den Taschenrechner ein:

E 20 [÷] [(] 2 [×] [π] [×] 70 [×10ˣ] [±] 6 [)] [=]

Alternativ:

E 20 [÷] [(] 2 [×] [π] [×] 70 [EXP] [±] 6 [)] [=]

Dieses Ergebnis lesen Sie ab: 45472,84... Hz. Die Bandbreite beträgt also 45,5 kHz.

Übung: Bandbreite eines Parallelschwingkreises berechnen

Folgende Werte eines Parallelschwingkreises sind bekannt:

- $L = 1\,\mu H$
- $C = 40\,pF$
- $R = 1{,}5\,k\Omega$

Gesucht ist die Bandbreite Q.

Lösung:

Hier müssen Sie verschiedene Arbeitsschritte abarbeiten. Die Formel lautet:

$$B = \frac{f_0}{Q}$$

Um diese Formel mit Werten befüllen zu können, müssen Sie die Resonanzfrequenz und die Güte berechnen.

- Schritt 1: Um die Resonanzfrequenz zu berechnen, nutzen Sie diese Formel:

  $$f = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

  Mit eingesetzten Werten sieht die Formel wie folgt aus:

  $$f = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{1 \times 10^{-6} \times 40 \times 10^{-12}}}$$

Geben Sie die Wurzel aus $L \times C$ mit den richtigen Potenzen in den Taschenrechner ein, um zum Zwischenergebnis zu gelangen:

√■ 1 ×10ˣ ± 6 × 40 ×10ˣ ± 12 =

Das Zwischenergebnis multiplizieren Sie nun mit $2 \times \pi$ und geben anschließend den Kehrwert aus – fertig!

× 2 × π = X⁻¹ =

Alternativ:

1 EXP ± 06 × 40 EXP ± 12 =

√ =

× 2 × π =

1/X =

Abgelesen: 25164606,05 Hz Das Zwischenergebnis entspricht also einer Resonanzfrequenz von 25,166 MHz.

- Schritt 2: Berechnen Sie die Güte.
  Dazu benötigen Sie diese Formel, da es sich in diesem Fall um einen Parallelschwingkreis handelt:

$$Q = R_P \times \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Setzen Sie die bekannten Werte in die Formel ein:

$$Q = 1500 \times \sqrt{\frac{40 \times 10^{-12}}{1 \times 10^{-6}}}$$

In den Taschenrechner tippen Sie Folgendes ein:

√■ 40 ×10ˣ ± 12 ÷ 1 ×10ˣ ± 6 = × 1500 =

Alternativ:

40 EXP ± 12 ÷ 1 EXP ± 6 = √ × 1500 =

Ergebnis: Q beträgt 9,48.

Die negativen Hochzahlen am Ende des angezeigten Ergebnisses sind ohne Bedeutung.

- Schritt 3: Wenden Sie die Bandbreitenformel an:

$$B = \frac{25164606{,}05}{9{,}48}$$

Abgelesen: 2654494,309.

Die Bandbreite beträgt also 2,65 MHz.

10.9 Bandfilter

Bei Sende- und Empfangsschaltungen ist es oft notwendig, einen definierten Frequenzbereich passieren zu lassen. Die Signale außerhalb dieses Bereichs sollen so gut wie möglich unterdrückt werden.

Dazu verwenden Sie *Bandfilter*, die auch als *Bandpassfilter* bezeichnet werden. Bandpassfilter bestehen aus mindestens zwei miteinander gekoppelten Schwingkreisen.

Es gibt folgende Kopplungsmöglichkeiten der Schwingkreise innerhalb eines Bandfilters:

- induktiv (siehe Abbildung 10.23),
- kapazitiv (siehe Abbildung 10.24),
- Serienschwingkreis (siehe Abbildung 10.25)

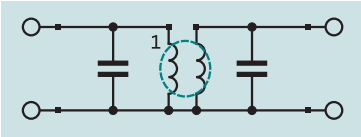


Abbildung 10.23 Bandfilter: induktive Kopplung

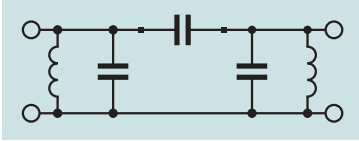


Abbildung 10.24 Bandfilter: kapazitive Kopplung

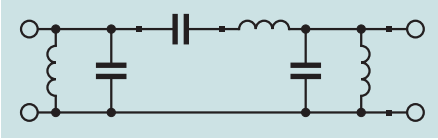


Abbildung 10.25 Bandfilter: Kopplung mittels eines Serienkreises

Die Art der Kopplung wirkt sich auf die Bandbreite und die Durchlasskurve aus:

- **Unterkritische Kopplung** (meist induktiv): Die Durchlasskurve verhält sich wie bei einem einzelnen Resonanzkreis (siehe Abbildung 10.26).
- **Kritische Kopplung**: Die Durchlasskurve ist im Maximum abgeflacht (siehe Abbildung 10.27).
- **Überkritische Kopplung**: Die Durchlasskurve weist zwei Maxima auf (siehe Abbildung 10.28).

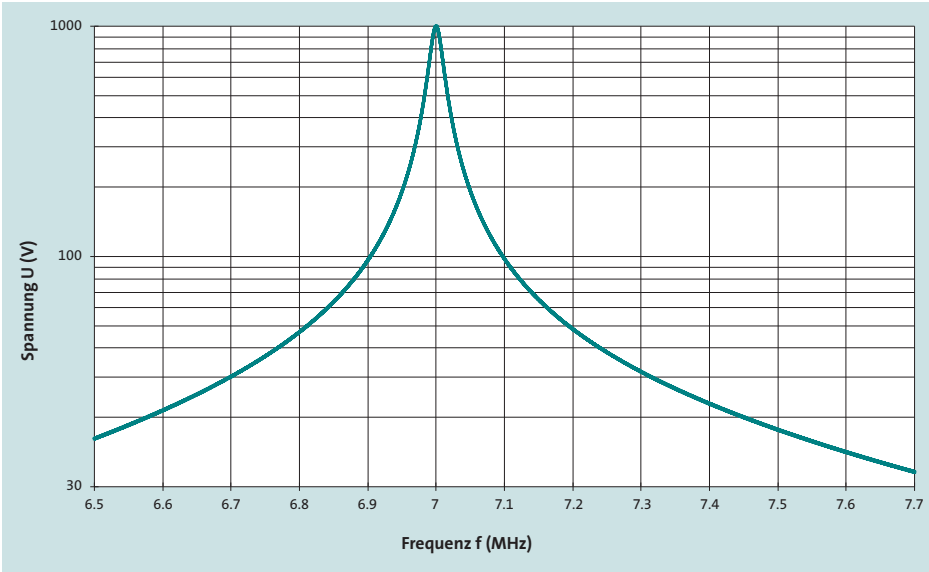


Abbildung 10.26 Bandfilter: unterkritische Kopplung

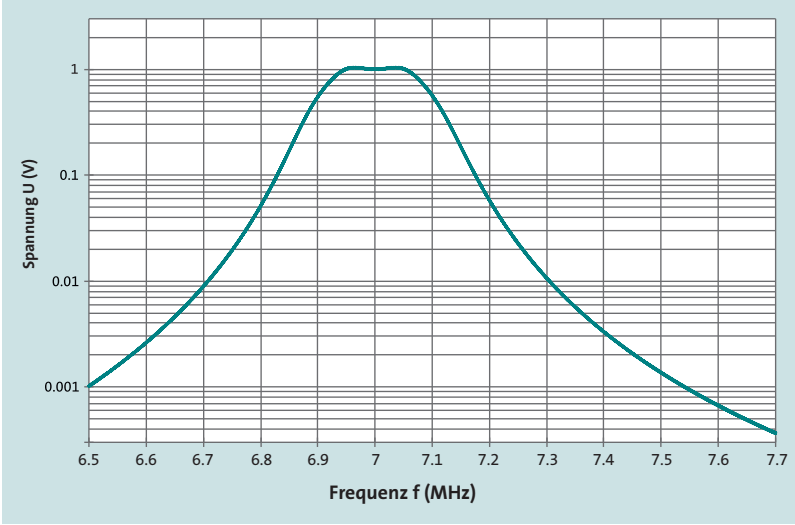


Abbildung 10.27 Bandfilter: kritische Kopplung

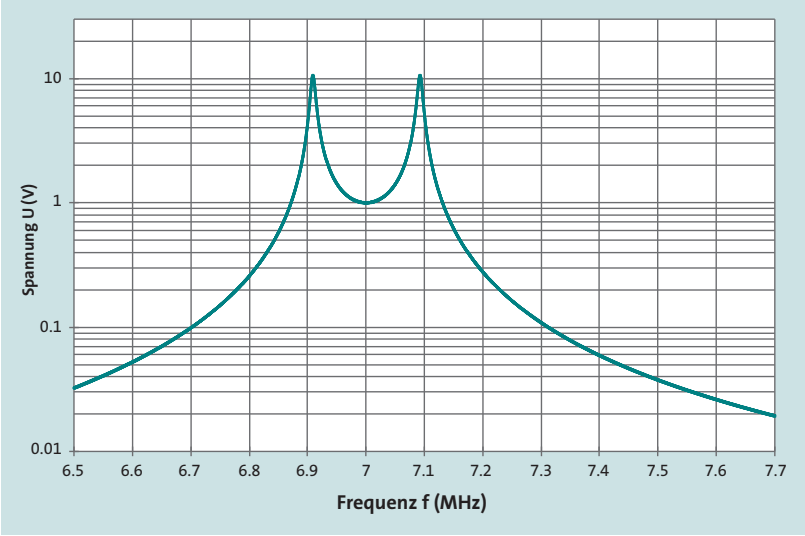


Abbildung 10.28 Bandfilter: überkritische Kopplung

Die unterkritische Kopplung lässt ein breiteres Frequenzspektrum passieren und weist eine höhere Einfügedämpfung des Bandfilters auf. Die kritische Kopplung deckt den gewünschten Frequenzbereich relativ gleichmäßig ab und unterdrückt unerwünschte Signale oberhalb und unterhalb des Durchlassbereichs stärker. Die überkritische Kopplung weist zwei oder mehr Maxima auf. Das höchste und das niedrigste Maximum kennzeichnen den Durchlassbereich.

Für Eigenentwicklungen gibt es Filterbausätze (siehe Abbildung 9.11) oder auch vollständige Filter (siehe Abbildung 10.29).

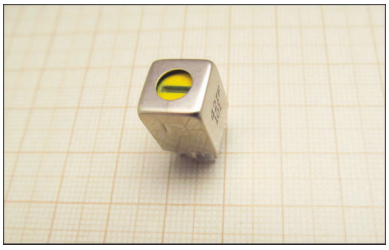


Abbildung 10.29 Filterspule für 455 kHz, Spule 680 µH mit Koppelwicklung

Abgleicharbeiten an Bandfiltern und anderen mit Hochfrequenz arbeitenden Schaltungen

Derartige Abgleicharbeiten sollten Sie nicht mit normalen Schraubendrehern vornehmen. Diese wirken durch ihre metallischen Klingen verstimmend auf Schwingkreise und behindern damit den Abgleich. Verwenden Sie stattdessen ein Abgleichbesteck

(siehe Abbildung 10.30). Dieses besteht aus Kunststoff, der weder Induktivitäten noch Kapazitäten verfälscht.

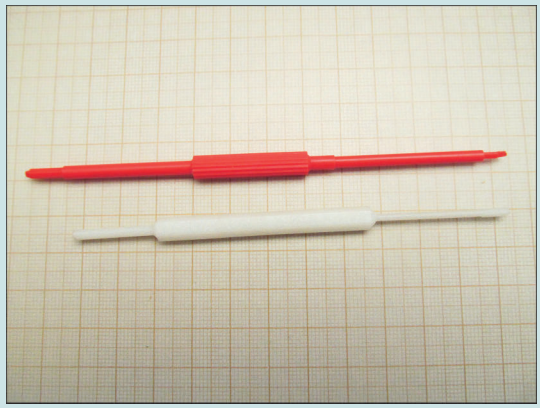


Abbildung 10.30 Abgleichbesteck



Arbeit mit Bandfiltern

Bei der Arbeit mit Bandfiltern gilt: Zuerst berechnen und dann messen; wenn notwendig erst abgleichen, dann messen.

In der Praxis verwenden Sie einstellbare Induktivitäten und/oder Keramiktrimmer bzw. Keramikkondensatoren.

10.9.1 Schwingquarze als Bandfilter

In nicht mit digitalen Signalprozessoren arbeitenden Sendeempfängern werden oft Quarzfilter als trennscharfe Bandfilter eingesetzt.

Schwingquarze werden heute aus Siliziumdioxid gefertigt. Es handelt sich dabei um sehr dünne Kristallplättchen, die an beiden Flächen mit jeweils einer Elektrode gehalten werden. Diese Quarze haben die Eigenschaft, auf Druck eine Spannung zu erzeugen und umgekehrt: Bei angelegter Spannung beginnen sie, mechanische Schwingungen abzugeben.

Hauptsächlich verwendet man Quarze im Zusammenhang mit sehr frequenzstabilen Schwingungserzeugern. Aber auch für Filterzwecke werden sie eingesetzt.

Schwingquarze weisen zwei Resonanzen auf: die *Serienresonanzfrequenz* und die *Parallelresonanzfrequenz* (sie liegt über der Serienresonanzfrequenz). Die Quarze verhalten sich dabei wie gewöhnliche Schwingkreise:

- Serienresonanzfrequenz: niederohmig
- Parallelresonanzfrequenz: hochohmig

Vollständige Quarzfilter befinden sich ab Werk abgeglichen in einem geschirmten Gehäuse, daher ist nicht viel zu sehen. Abbildung 10.31 zeigt Ihnen ein Prinzipschaltbild eines einfachen Quarzfilters.

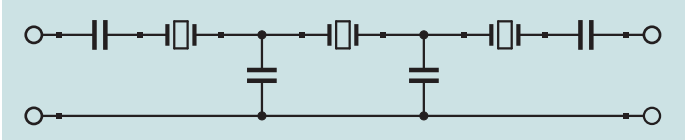


Abbildung 10.31 Einfaches Quarzfilter

Ein Quarz selbst sieht recht unscheinbar aus (siehe Abbildung 10.32).

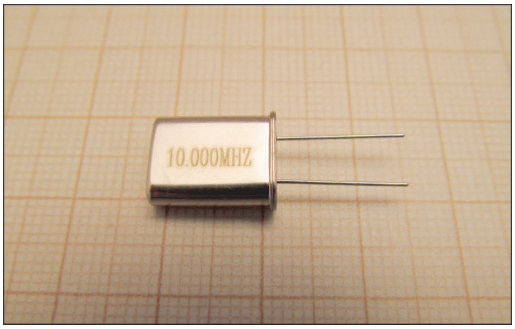


Abbildung 10.32 10-MHz-Quarz

Quarzfilter für Funkgeräte und Empfänger erhalten Sie mit verschiedenen Bandbreiten (siehe Tabelle 10.4).

3-dB-Bandbreite	Sendeart
12 kHz	FM
6 kHz	AM
2,7 kHz	SSB
500 Hz	CW

Tabelle 10.4 Sendearten und Filterbandbreiten

10.9.2 Hoch- und Tiefpassfilter mit Spule und Kondensator

Auch mit Spulen und Kondensatoren lassen sich Tief- und Hochpassfilter aufbauen:

- Beim *Tiefpassfilter* liegt die Induktivität im Signalweg, und der Kondensator stellt die Parallelverbindung zum Massepotenzial her. Der Blindwiderstand der Spule steigt mit der Frequenz an und dämpft Signale mit niedrigerer Frequenz weniger.

Daher wird sie im Tiefpassfilter an dieser Stelle eingesetzt. Der Kondensator hingegen weist mit steigender Frequenz einen geringeren Widerstand auf. Deshalb leitet er höherfrequente Signale in dieser Schaltung ab.

- Beim *Hochpassfilter* liegt der Kondensator im Signalweg, die Spule stellt die Parallelverbindung zum Massepotenzial her. Der Kondensator dämpft hierbei die Signale mit den niedrigen Frequenzen. Die zudem besser leitende Spule führt diese gegen Masse ab.

Abbildung 10.33 zeigt die Schaltung des Tiefpassfilters, die dazugehörige Kurve sehen Sie in Abbildung 10.34.

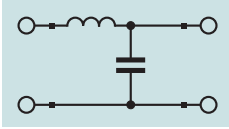


Abbildung 10.33 LC-Tiefpassfilter

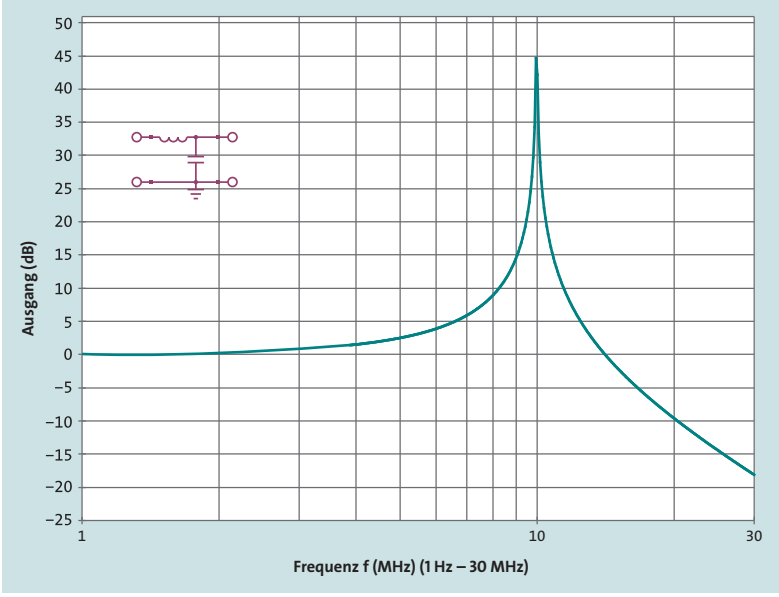


Abbildung 10.34 Tiefpassfilter, Frequenzgang

In der Praxis ist die Kurve jedoch flacher ausgebildet, da die Schaltung ja mit weiteren Komponenten verbunden wird, die Widerstände aufweisen. Abbildung 10.35 zeigt Ihnen das Diagramm für einen Tiefpassfilter, der am Ein- und Ausgang mit passenden Widerständen »belastet« ist.

Abbildung 10.36 zeigt die Schaltung des Hochpassfilters, die dazugehörige Kurve sehen Sie in Abbildung 10.37.

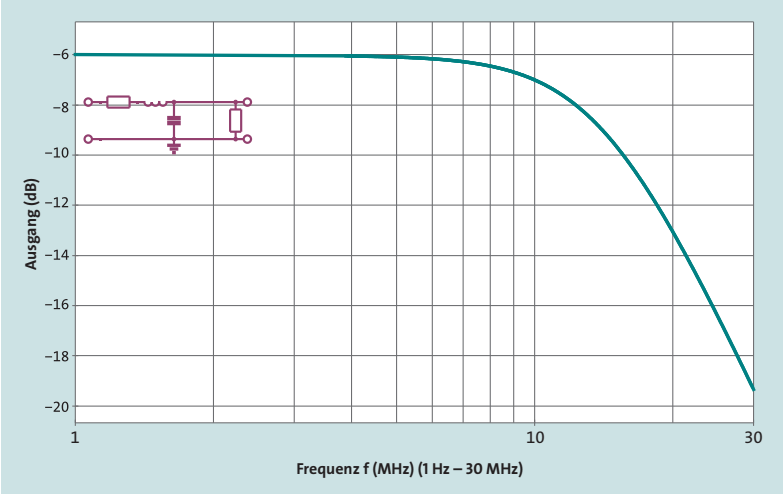


Abbildung 10.35 Tiefpassfilter mit Widerständen, Frequenzgang

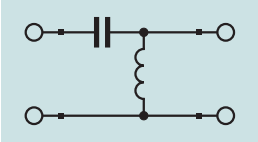


Abbildung 10.36 LC-Hochpassfilter

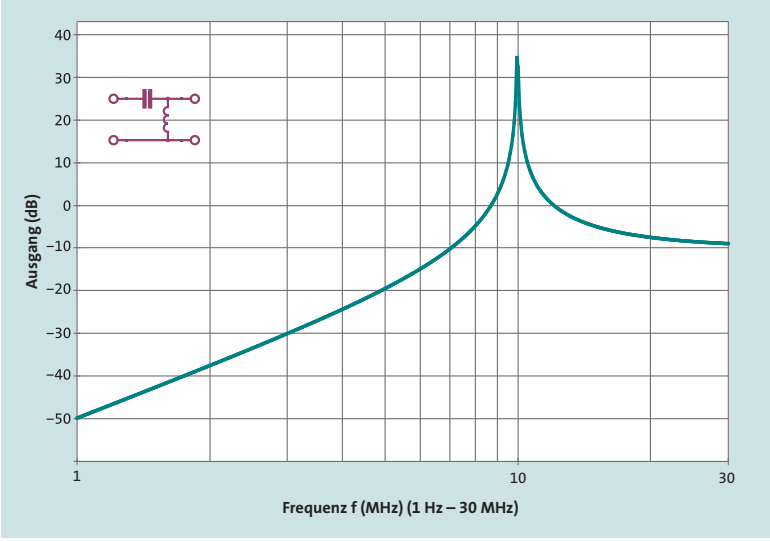


Abbildung 10.37 Hochpassfilter, Frequenzgang

Die Grenzfrequenzberechnung dieser Filter erfolgt mit der Schwingkreisformel.

Vertiefung zum Thema Hoch- und Tiefpassfilter

Es gibt noch weitere Schaltungen für diese Filter. Besonders die Tiefpassfilter dienen oftmals Entstörzwecken. Sie lassen keine hochfrequenten Schwingungen in das Stromnetz gelangen (siehe Abbildung 10.39) oder unterdrücken Oberwellen von Sendern. Betrachten Sie die Schaubilder aus Abbildung 10.38, Abbildung 10.40, Abbildung 10.41 und Abbildung 10.42.

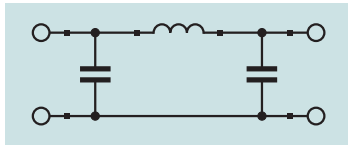


Abbildung 10.38 π(pi)-Tiefpassfilter

Diese Schaltung wird auch in symmetrischer Form, quasi doppelt, als Netzfilter eingesetzt.

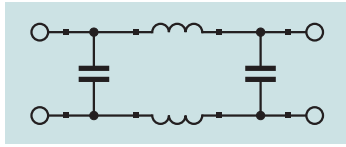


Abbildung 10.39 Netzfilter in π-Schaltung

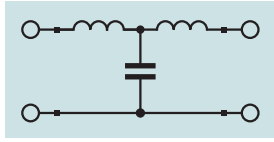


Abbildung 10.40 T-Tiefpassfilter

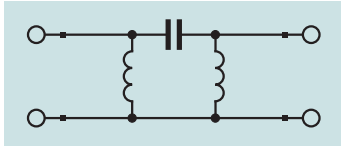


Abbildung 10.41 π(pi)-Hochpassfilter

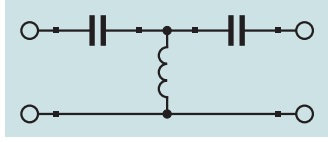


Abbildung 10.42 T-Hochpassfilter

Das Übersichtsbild in Abbildung 10.43 zeigt Ihnen für den jeweiligen Filter charakteristische Kurvenbilder. Diese helfen Ihnen bei der Einordnung von Diagrammen.

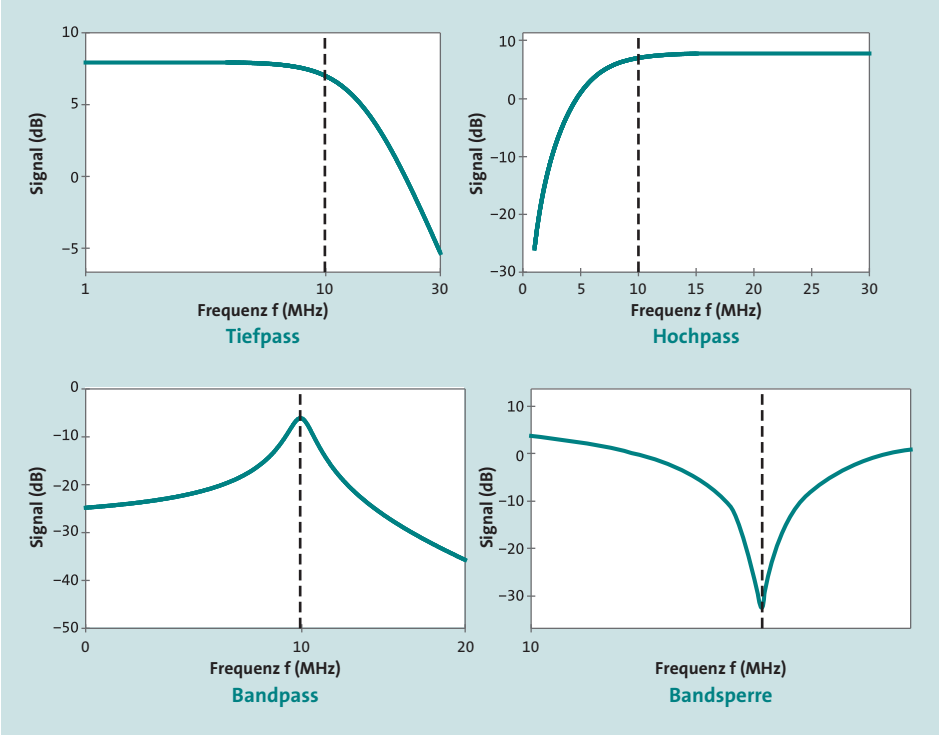


Abbildung 10.43 Übersicht über mögliche Filterkurven

10.10 Probleme in Hochfrequenzschaltungen

Wenn es absolut nicht klappen will, obwohl Sie alles mustergültig berechnet haben: Die Eigenresonanz von HF-Drosseln ruft in HF-Schaltungen Nebenresonanzen hervor. Das kann sogar zu unbrauchbaren Filterschaltungen führen. Abhilfe schafft entweder die Verwendung von Drosseln mit anderer Eigenresonanz oder mit anderem Induktivitätswert mit Austausch des Kondensators.

10.10.1 Experimente

Falls vorhanden, nehmen Sie ein Antennenanpassgerät und einen Kurzwellenempfänger. Schließen Sie einige Meter Draht an den Antenneneingang des Abstimmgeräts. Verbinden Sie das Anpassgerät mit dem Empfänger, und schalten Sie diesen ein. Verändern Sie nun stetig die Einstellungen am Anpassgerät, bis Sie am Empfänger die Signale in maximal möglicher Stärke empfangen. Nun haben Sie eine Resonanz hergestellt.

Wenn Sie einen Frequenzgenerator, ein Digitalmultimeter und die schon öfter beschriebene Experimentierplatine haben, bauen Sie einmal einen Reihenschwingkreis (siehe Abbildung 10.44) und einen Parallelschwingkreis (siehe Abbildung 10.45) auf. Schließen Sie das Messgerät an. Abwechselnd messen Sie den Wechselstrom und die Wechselspannung. Können Sie die Resonanzkurven nachvollziehen?

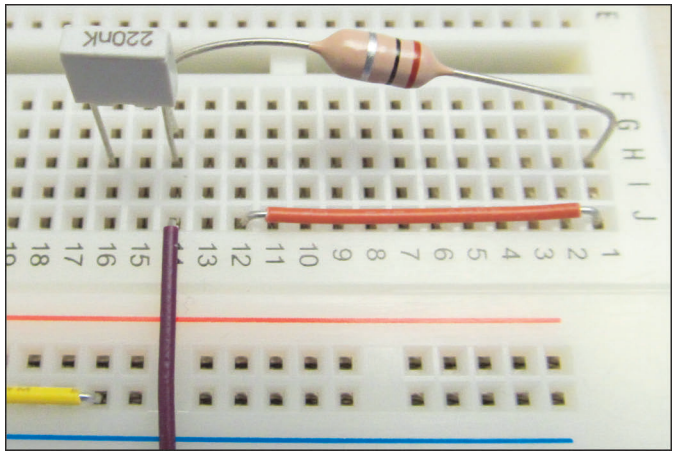


Abbildung 10.44 Reihenschwingkreis

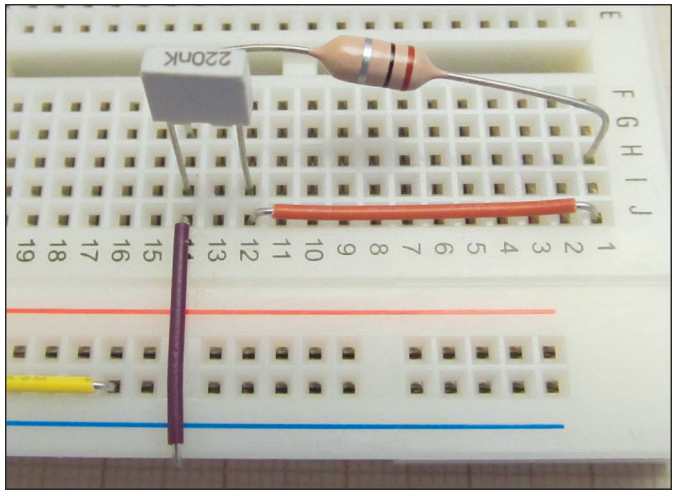


Abbildung 10.45 Parallelschwingkreis

In meinem Beispiel kamen die Festinduktivität (mit 10 µH und 0,1 Ω Spulenwiderstand) sowie ein Kondensator mit 220 nF zum Einsatz. Die berechnete Resonanzfrequenz liegt bei 107 kHz, die Kreisbandbreite ist sehr schmal. Beim Verändern der Frequenz müssen Sie die Abstimmung sehr feinfühlig vornehmen – dann bemerken Sie die Minima und Maxima.

Kapitel 11
Die Halbleiterdiode

Dioden gibt es für verschiedene Einsatzbereiche, und dementsprechend weisen sie unterschiedliche Eigenschaften auf. Allen gemeinsam ist jedoch, dass sie zunächst einmal Strom in nur einer Richtung durchlassen.

11.1 Schaltzeichen

Abbildung 11.1 zeigt Ihnen die Schaltzeichen verschiedener Ausführungen von Halbleiterdioden. Die Grundlagen über Halbleiter und ihre Eigenschaften werden in Abschnitt 4.4 behandelt.

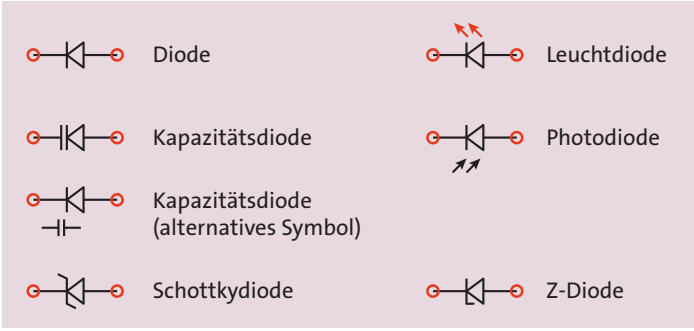


Abbildung 11.1 Schaltzeichen von Dioden

11.2 Dioden (Bauelemente)

Beim Einbau von Dioden in Schaltungen müssen Sie auf deren Durchlassrichtung achten. Die Kathode ist meist durch einen Ring bei runden Bauformen (bedrahtet, MELF) oder durch einen Balken gekennzeichnet (siehe Abbildung 11.2).

Bei den Leuchtdioden ist die Anode durch ein langes Anschlussbein, die Kathode durch ein kurzes gekennzeichnet. Darüber hinaus finden Sie bei runden Bauformen den Kragen (größerer Umfang als die »Leuchtkuppel«, die »Drahtseite«) auf der Kathodenseite abgeflacht. In Abbildung 11.5 sehen Sie auch etwas vom Innenleben einer LED. Über dünne Bondingdrähte ist der »Leuchtkristall« mit den Zuleitungen verbunden.

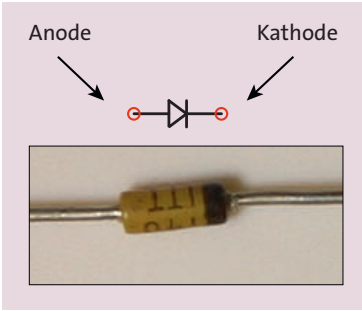


Abbildung 11.2 Anschlüsse und deren Kennzeichnung

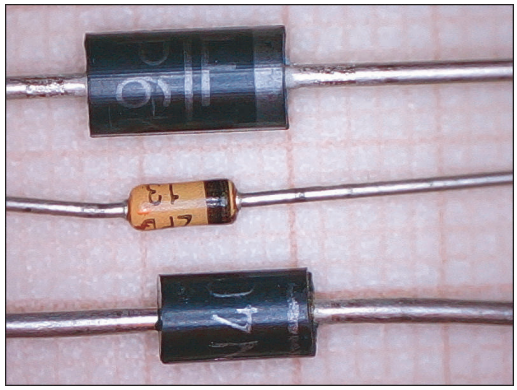


Abbildung 11.3 Dioden in bedrahteter Ausführung



Abbildung 11.4 Diode in SMD-Bauform

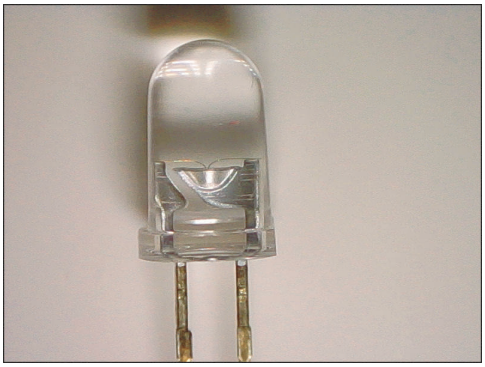


Abbildung 11.5 Leuchtdiode in bedrahteter Ausführung

Dioden tragen eine Bezeichnung, die aus Buchstaben und Ziffern besteht. Es gibt jedoch mehrere solcher Kennzeichnungssysteme, unter anderem JEDEC aus den USA und EECA aus Europa. Zudem existieren in Asien eigene Normen. Einige Halbleiterhersteller haben zudem eigene Bezeichnungssysteme.

In Tabelle 11.1 sehen Sie einen Auszug des EECA-Schlüssels.

Buchstabe	Material	Kategorie
A	Germanium	Kleinleistungsdiode
B	Silizium	Kapazitätsdiode
C	Galliumarsenid, Selen	–
D	Keramik	–
E	–	Tunneldiode
P	–	Photodiode
Q	–	emmitierende Diode (LED, Laser)
R	Cadmiumsulfid	–
X	–	Diode
Y	–	Gleichrichterdiode
Z	–	Z-Diode

Tabelle 11.1 Diodenbezeichnungen nach EECA

Die auf die Buchstaben folgenden Ziffern sind willkürlich.

Neuere Technologien, wie Halbleiter aus Siliziumkarbid, werden oft nicht in diesen etablierten Kennzeichnungssystemen erfasst und folgen daher möglicherweise anderen oder neuen Bezeichnungsrichtlinien.

Das Betriebsverhalten der Dioden wird unter anderem durch deren Umgebungstemperatur beeinflusst. Eine hohe Temperatur kann bei Hochfrequenzanwendungen zu erhöhtem Rauschen führen. Hohe Temperaturen setzen die Durchlassspannung herab.

11.3 Diodentypen und Eigenschaften

Die verschiedenen Materialien, aus denen die Dioden bestehen können, bestimmen auch die Diodenkennlinie, die immer mit der kleinstmöglichen Durchlassspannung beginnt. Die *Durchlassspannung* beschreibt die niedrigste Spannung, ab der die Diode in Durchlassrichtung Strom fließen lässt. Die *Sperrspannung* beschreibt den Wert, der, wenn die Diode in »Sperrrichtung« betrieben wird, nicht überschritten werden darf, um den Halbleiter zu schützen.

Jedes Diodenmaterial verfügt über eine eigene Strom-/Spannungskennlinie. Diese beginnt stets mit dem Erreichen der Durchlassspannung.

Tabelle 11.2 listet Ihnen den jeweiligen Beginn der Diodenkennlinie (kleinste Durchlassspannung) auf. Anhand der Durchlassspannung identifizieren Sie die Diodenkennlinien.

Typ	Durchlassspannung
Schottkydiode	0,25 V
Germaniumdiode	0,20–0,40 V, typisch: 0,30 V
Siliziumdiode	0,50–0,80 V, typisch: 0,70 V
LED	ab 1,5 V, je nach Farbe

Tabelle 11.2 Durchlassspannungen der Dioden

- **Schottkydiode**
  - Einsatzbereich: Hoch- und Höchstfrequenzanwendungen, Einsatz in Mischern
  - Durchlassspannung: 0,25 Volt
  - Weitere Eigenschaften: Von Standarddioden abweichender Aufbau. Die Schottkydiode besteht aus einer N-Schicht aus Silizium und einem Metallkontakt.

- **Germaniumdiode**
  - Einsatzbereich: Hochfrequenzanwendungen mit geringen Spannungen
  - Durchlassspannung: ca. 0,3 Volt
  - Weitere Eigenschaften: Temperaturempfindlichkeit, Ablösung weitgehend durch Schottkydioden
- **Siliziumdiode**
  - Einsatzbereich: Gleichrichter, niederfrequente Anwendungen, Verpolungsschutz
  - Durchlassspannung: ca. 0,7 Volt
  - Weitere Eigenschaften: hohe Ströme möglich
- **Leuchtdiode**
  - Einsatzbereich: Beleuchtung, Signalisierung, Nachrichtentechnik (LWL)
  - Durchlassspannung: je nach Farbe, von 1,2 Volt bis 4,5 Volt
  - Weitere Eigenschaften: LEDs sind beim Betrieb in Sperrrichtung empfindlich, da ihre Sperrspannung sehr niedrig ist. Achten Sie daher beim Einbau von LEDs in Schaltungen auf die richtige Polung der Anschlüsse! Eine LED kann deswegen nicht direkt an Wechselspannung betrieben werden. Die Nennspannung der LED darf nicht überschritten werden. Man benutzt deswegen entweder Vorwiderstände oder Konstantstromquellen, um die LED zu schützen.
- **Photodiode**
  - Einsatzbereich: Auswertung der Lichtstärke, Schalten mit Licht, Nachrichtentechnik (LWL)
  - Weitere Eigenschaften: Die Photodiode wird in Sperrrichtung betrieben, und fällt auf sie Licht, so wird sie leitend. Die Photodiode erzeugt in Durchlassrichtung eine Spannung und wird somit als Photoelement bezeichnet. Mit großflächigen PN-Übergängen ausgestattet und zu größeren Einheiten zusammengeschaltet, spricht man dann von Sonnenkollektoren. (Diese werden allerdings nicht in Sperrrichtung betrieben.)
- **Optokoppler**
  Optokoppler bestehen aus einer LED und einer Photodiode. Diese Konstruktion ermöglicht es, über den optischen Weg Signale potenzialfrei zu übertragen.
- **Kapazitätsdiode**
  - Einsatzbereich: Hochfrequenztechnik (Abstimmvorrichtungen in Oszillatoren und Sendern)
  - Weitere Eigenschaften: Zwischen der P- und der N-Schicht liegt die Raumladungszone (Verarmungszone), die wie ein Dielektrikum wirkt. Die Kapazitätsdiode wird in Sperrrichtung betrieben. Je höher nun die dort anliegende Spannung ist, desto niedriger ist der Kapazitätswert. Umgekehrt führt eine niedrige

Spannung zu höherer Kapazität. Dies beruht darauf, dass der »Plattenabstand« bei kleinerer Spannung niedriger ist (da die Verarmungszone dünner ist).

- **Z-Diode**
  - Einsatzbereich: Spannungregelung
  - Weitere Eigenschaften: Z-Dioden werden in Sperrrichtung betrieben. Sie verfügen über eine definierte Durchbruchspannung. Damit der Strom nicht die Diode beschädigt, muss mit einem zusätzlichen Widerstand gearbeitet werden. In moderne Spannungsreglerbausteine ist die Z-Diode integriert.

11.4 Spannungsabfall an Dioden

Anhand der Durchlassspannungen erkennen Sie die Materialien. Es wird die Differenz zwischen Anode und Kathode angegeben.

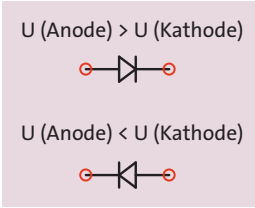


Abbildung 11.6 Spannungsabfall an Dioden

- Die technische Flussrichtung des Stroms ist stets von der Anode zur Kathode!
- Erreicht der Spannungsunterschied wenigstens 0,6 Volt, so wird eine Siliziumdiode leitend.
- Bei negativen Spannungsangaben verhält es sich umgekehrt. Hier muss für die richtige Flussrichtung der Diodenpfeil vom kleineren Wert wegzeigen. –1 Volt ist mehr als –2 Volt!

11.4.1 Experiment: Messung des Spannungsabfalls an einer Siliziumdiode 1N4001

Damit die Diode geschützt ist, wird zusätzlich ein Widerstand mit 22 Ω in den Messstromkreis eingefügt. Die Spannung der Messschaltung beträgt 3 Volt. In Abbildung 11.7 sehen Sie die Messung und den Schaltungsaufbau.

Wenn Sie die Diode in dieser Schaltung anschließend verkehrt herum einsetzen, darf allenfalls nur eine sehr, sehr geringe Spannung angezeigt werden. Andernfalls ist die Diode defekt.

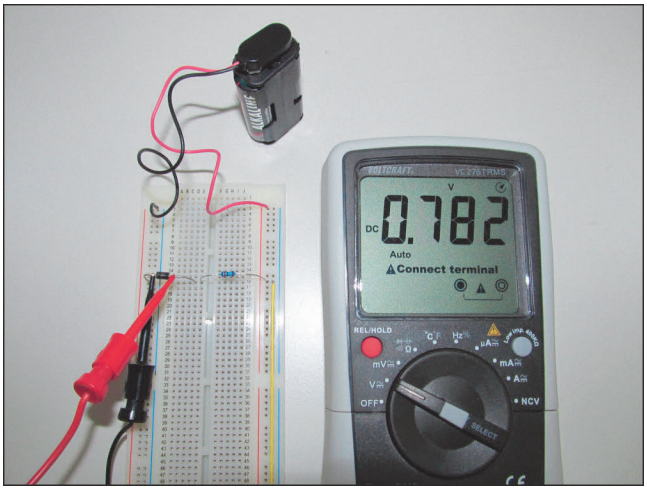


Abbildung 11.7 Messaufbau zur Ermittlung der Durchlassspannung einer Diode

Sie können dies selbstverständlich auch mit QucsStudio simulieren (siehe Abbildung 11.8).

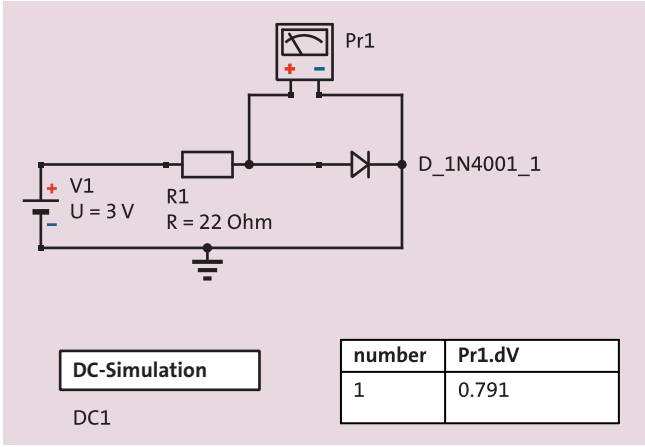


Abbildung 11.8 Simulation der Durchlassspannung an einer Siliziumdiode

Natürlich kann man jetzt auf die Idee kommen, Dioden parallel zu schalten, damit man eine geringere Durchlassspannung erzielt. Das funktioniert jedoch nicht. Dioden sind keine Widerstände. Wenn Sie Dioden parallel schalten, muss genauso für jede einzelne die Durchlassspannung erreicht werden. Die Ströme allerdings verteilen sich. Aber: Die Halbleiterbauelemente weichen in ihren Werten oft ein wenig ab. Die Diode mit einer etwas geringeren Durchlassspannung würde mehr Strom fließen lassen als jene, die eine geringfügig höhere Durchlassspannung benötigt. Damit kann es zu Überlastungsreaktionen kommen.

11.5 Dioden in Schaltungen

11.5.1 LED mit Vorschaltwiderstand

Um eine LED an einer höheren Spannung als der Durchlassspannung zu betreiben, müssen Sie einen Widerstand vorschalten. Die Schaltung hierzu finden Sie in Abbildung 11.9. Oftmals verwendet man diese Schaltung als Betriebsanzeige eines (Selbstbau-)Geräts.

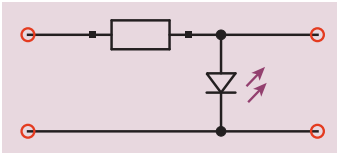


Abbildung 11.9 LED mit Vorwiderstand

Der Vorwiderstand muss berechnet werden. Die bekannten Daten sind:

- LED-Durchlassspannung: 1,6 V
- LED-Strom: 18 mA
- Betriebsspannung: 13,8 V

Zu berechnen sind:

- Widerstand R_V
- die Leistung des Widerstands

Lösung:

Wenden Sie das ohmsche Gesetz an. Von der Betriebsspannung ziehen Sie die Durchlassspannung ab, damit Sie den Spannungsabfall ermitteln. Diesen teilen Sie durch den Strom, der durch die LED fließen darf.

$$R_V = \frac{\text{Betriebsspannung} - \text{Durchlassspannung}}{\text{LED} - \text{Strom}} = \frac{U_{\text{Betrieb}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{LED}}}\ (\Omega)$$

Mit dem Taschenrechner berechnen Sie:

(13,8 - 1,6) ÷ 0,018 =

Ergebnis: 677,8 Ω

In der Praxis verwenden Sie in diesem Fall den nächsthöheren Wert aus den E-Reihen, nämlich 680 Ω.

Berechnen Sie nun die Belastbarkeit des Widerstands:

$$P = (\text{Betriebsspannung} - \text{Durchlassspannung}) \times \text{LED} - \text{Strom}$$
$$= U \times I\ (\text{W})$$

In den Taschenrechner geben Sie ein:

(13,8 − 1,6) × 0,018 =

Ergebnis: 0,22 W

Sie können einen Widerstand mit 0,25 Watt Belastbarkeit verwenden.

Die Werte des benötigten Widerstands lauten 680 Ohm / 0,25 Watt.

11.5.2 Z-Diode zur Spannungsstabilisierung

Die Z-Diode, auch Zener-Diode genannt, wird so eingebaut, wie es Abbildung 11.10 zeigt.

Die Diode zeigt immer zum höheren Spannungspotenzial, weil sie in Sperrrichtung betrieben wird. Dies müssen Sie besonders bei symmetrischen Stromversorgungen beachten. (0 Volt ist eine höhere Spannung als –12 Volt!)

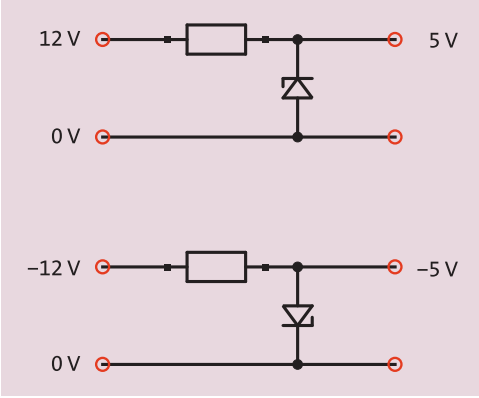


Abbildung 11.10 Z-Diode mit Vorwiderstand

In der Praxis müssen Sie beim Einbau stets auf die richtige Positionierung der Z-Diode achten!

Übung

Abbildung 11.11 zeigt Ihnen eine Schaltung mit Z-Diode.

Die bekannten Daten sind:

- Betriebsspannung: 12 V
- Zener-Spannung: 5 V
- Strom durch die Z-Diode: 25 mA

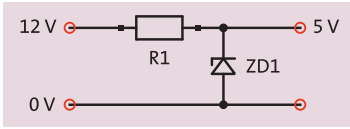


Abbildung 11.11 Z-Diode mit Vorwiderstand, unbelastet

Berechnen Sie den Widerstandswert und die Belastbarkeit von R1.

Lösung:

Die notwendige Formel für Ihren Rechenweg lautet:

$$R_1 = \frac{(12\ \text{V} - 5\ \text{V})}{0{,}025\ \text{A}}$$

In den Taschenrechner eingetippt, sieht das so aus:

(12 - 5) ÷ 0,025 =

Widerstandswert: 280 Ω

Die Formel zur Berechnung der Belastbarkeit lautet:

$$P = (12\ \text{V} - 5\ \text{V}) \times 0{,}025\ \text{A}$$

Ergebnis: 0,175 Watt

In der Praxis wird der nächste Wert aus der E-Reihe verwendet: 0,25 W.

Bei der nächsten Berechnung kommt ein Lastwiderstand hinzu (siehe Abbildung 11.12).

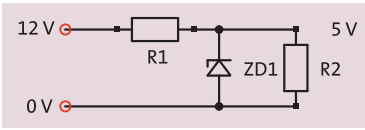


Abbildung 11.12 Z-Diode mit Vorwiderstand, belastet

Die bekannten Werte sind nun:

- Betriebsspannung: 12 V
- Zener-Spannung: 5 V
- Zener-Strom: 25 mA
- Strom durch R2: 20 mA

Gesucht sind der Widerstand und die Belastbarkeit von R1.

Lösung:

- Schritt 1: Addieren Sie die Teilströme der Verzweigung ZD1 mit R2:
  45 mA entsprechend 0,045 A.

- Schritt 2: Berechnen Sie die Teilspannung (= Spannungsabfall).
  Betriebsspannung – Spannung Z-Diode: 7 V
- Schritt 3: Berechnen Sie R1 mit dieser Formel:

$$R_1 = \frac{7\ \text{V}}{0{,}045\ \text{A}}$$

Ergebnis: 155,55 Ω

Für die Praxis nehmen Sie den nächsten Wert aus der E24-Reihe: 160 Ω.

Die Belastbarkeit berechnen Sie mit folgender Formel:

$P = 7\ \text{V} \times 0{,}045\ \text{A}$

Ergebnis: 0,315 Watt

In der Praxis verwenden Sie dann also einen Widerstand mit einer Belastbarkeit von 0,5 Watt.

11.5.3 Kapazitätsdiode

Die *Kapazitätsdiode* (andere Bezeichnung: *Variocapdiode*) ersetzt in der Praxis Drehkondensatoren als variable Kapazität. Sie wird gegen die Sperrrichtung betrieben, und die Kapazität nimmt mit zunehmender Sperrspannung ab bzw. mit abnehmender Sperrspannung zu. Entsprechend ändert sich die Kreisfrequenz:

Hohe Sperrspannung führt zu höherer Frequenz, niedrige Sperrspannung führt zu tieferer Frequenz.

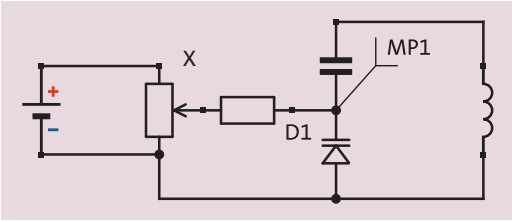


Abbildung 11.13 Abstimmung eines Schwingkreises mit einer Kapazitätsdiode

11.5.4 Spannungsbegrenzer mit antiparallelen Dioden

Mit antiparallel geschalteten Dioden bauen Sie eine zuverlässig arbeitende Spannungsbegrenzung für Signale auf (siehe Abbildung 11.14). Wird die Durchlassspannung (egal ob von der positiven oder von der negativen Halbwelle) erreicht, flacht das Signal ab.

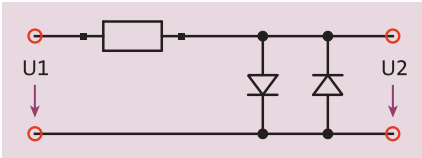


Abbildung 11.14 Spannungsbegrenzung

Die Signalspannung ist bei Siliziumdioden höher als bei Germanium- oder Schottkydioden. Sie erkennen dies anhand der Signalbilder (siehe Abbildung 11.15).

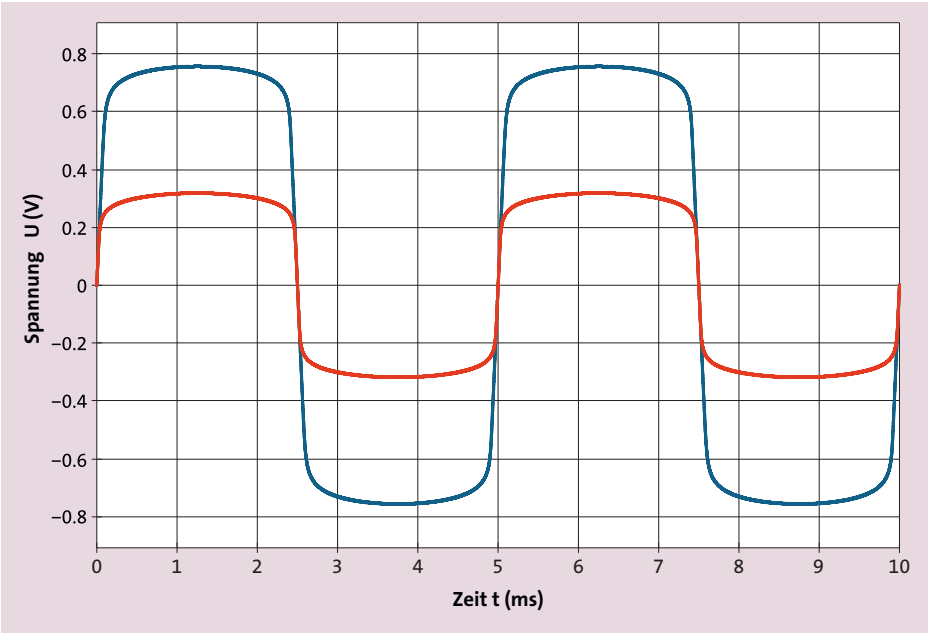


Abbildung 11.15 Signalbilder bei einer Spannungsbegrenzung

11.5.5 Entkopplung von Spannungsquellen

Betreiben Sie gleichzeitig verschiedene Spannungsquellen zur Versorgung z. B. eines Funkgeräts oder Kleinrechners, so müssen Sie diese umschalten. Dabei ist aber stets eine kurze Betriebsunterbrechung notwendig. Ohne Unterbrechung funktioniert dies, wenn Sie die Quellen per Diode entkoppeln.

Die Entkopplung ist notwendig, damit z. B. kein Strom von einem Akku in ein Solarpanel zurückfließen kann und damit für eine rasche Entladung sorgt. Zudem soll ein Netzteil einen Akku nicht überladen. Die Dioden lenken also den Stromfluss in die richtigen Bahnen und schützen vor unerwünschten Effekten.

Der »Verbraucher« funktioniert, solange wenigstens einer der Versorger genug Energie anbietet (siehe Abbildung 11.16). Die Schaltung ist dabei so konzipiert, dass das Solarpanel (U1) die Batterie U2 puffert. Diese Schaltung funktioniert gut mit traditionellen Bleiakkus. Bei empfindlicheren Lithium-Ionen-Akkus ist jedoch zusätzliche Vorsicht geboten. Hierbei ist es erforderlich noch eine Ladesteuerung hinzuzufügen oder eben D2 direkt an die Batterie anzuschließen, um den Zufluss von D1 zu unterbinden und so ungewollte Ladungsprozesse zu verhindern.

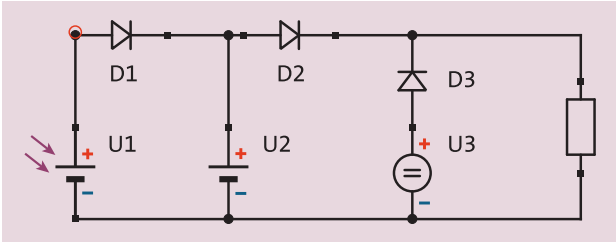


Abbildung 11.16 Entkopplung von Versorgungsspannungen

Kapitel 12
Der Transistor und seine Grundschaltungen

Transistoren regeln, verstärken und erzeugen Schwingungen. Sie haben weitestgehend die Elektronenröhre abgelöst. Bringt man viele Transistoren in einem gemeinsamen Gehäuse unter, entstehen *integrierte Schaltungen* für alle Zwecke, z. B. Mikroprozessoren.

12.1 Schaltzeichen

In Abbildung 12.1 finden Sie die Schaltzeichen von gebräuchlichen Transistoren. In meist älteren Schaltbildern werden die Symbole mit dem Kreis gezeigt, in vielen aktuellen Publikationen und Schaltplaneditoren entfällt dieser aber. Daher finden Sie in dieser Abbildung beide Formen dargestellt.

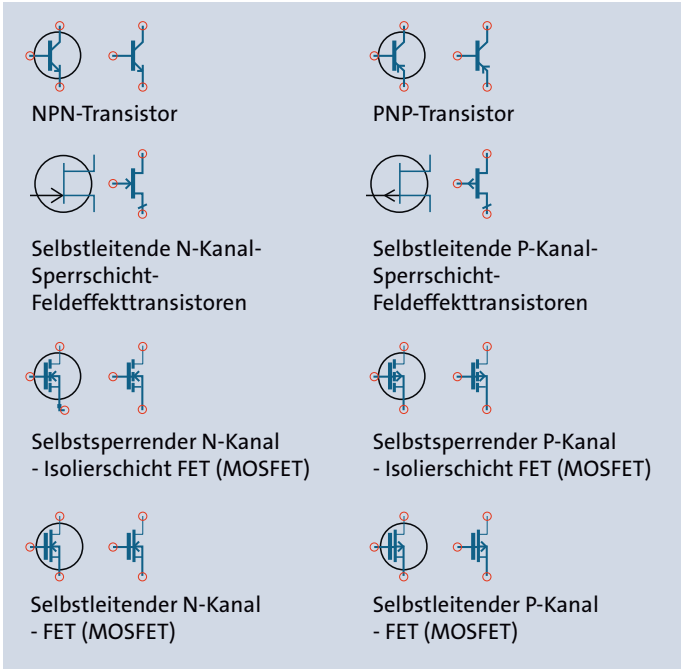


Abbildung 12.1 Schaltzeichen für Transistoren

12.2 Transistoren (Bauelemente)

Transistoren gibt es schon viele Jahrzehnte, und deshalb existiert eine Unzahl verschiedener Gehäuse- und Anschlussbilder. Informationen darüber finden Sie in diversen Herstellerkatalogen, Halbleiterbüchern und auch in einführender Elektronik-Literatur. Für Leiterplattenprogramme gibt es entsprechende Bauteilbibliotheken, die die notwendigen Daten für die Beschriftungsebene, die Lage und die Abmessungen der Bauteilanschlüsse usw. beeinhalten.

Die Gehäuseform und -größe lassen Sie oft schon den Einsatzzweck erkennen. Halbleiter, die nur kleine Signale verstärken oder schalten, benötigen weniger große »Chips« und natürlich oftmals keine Kühlung. Leistungshalbleiter in NF- und HF-Verstärkern, Reglern und Umrichtern hingegen werden sehr, sehr warm. Die Abwärme muss abgeführt werden. Die Gehäuse dieser Transistoren haben meist eine plane Fläche. Diese Fläche wird, meist mit Wärmeleitpaste versehen, gegen einen Kühlkörper gepresst.

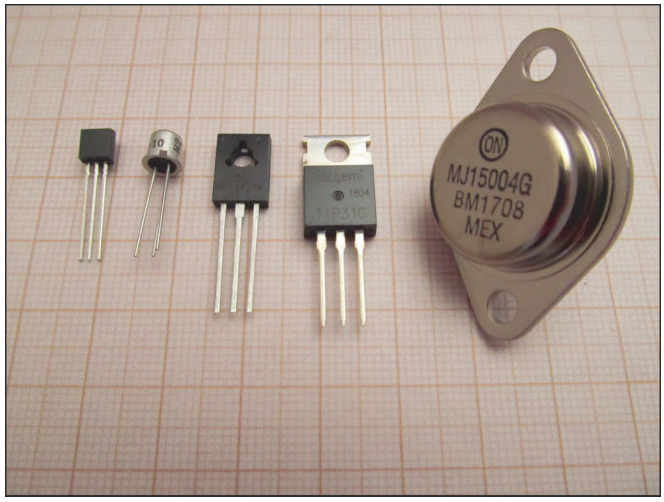


Abbildung 12.2 Bedrahtete Transistoren verschiedener Leistungsklassen

In Abbildung 12.2 sehen Sie einige bedrahtete Transistoren. Von links nach rechts verfügen die Exemplare über immer größere Gehäuse und damit auch Leistungen. Tabelle 12.1 stellt Ihnen die Halbleiter vor.

Bezeichnung	Gehäuse	Hinweise
BC 557 C	TO-92	PNP-Kleinsignaltransistor
BCY 58-10	TO-18	NPN-Kleinsignaltransistor

Tabelle 12.1 Übersicht über die Transistoren aus Abbildung 12.2

Bezeichnung	Gehäuse	Hinweise
BD 139 CDIL	TO-126	NPN-Kleinleistungstransistor, max. 8 Watt
TIP 31C MBR	TO-220	NPN-Kleinleistungstransistor, max. 40 Watt
MJ 150004 ONS	TO-3	NPN-Leistungstransistor, max. 250 Watt

Tabelle 12.1 Übersicht über die Transistoren aus Abbildung 12.2 (Forts.)

Fast alle dieser Transistoren verfügen über drei Anschlussbeinchen, nur der Leistungstransistor hat zwei. Das Gehäuse stellt den Kollektoranschluss dar. Beim Einbau solcher Halbleiter müssen Sie auf mögliche Kurzschlussgefahren achten.

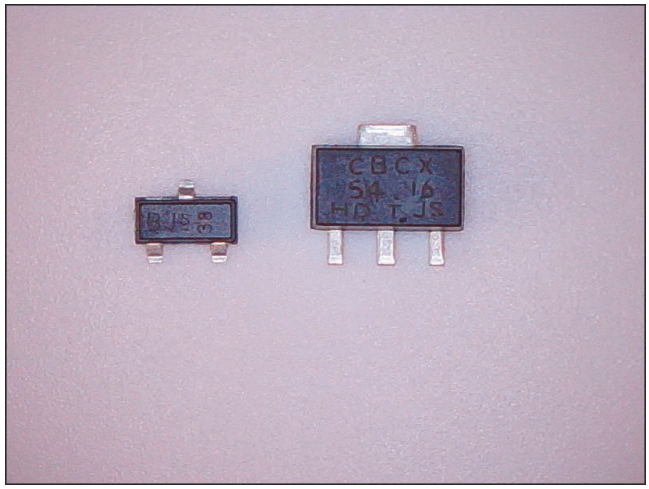


Abbildung 12.3 SMD-Transistoren

Die beiden Vertreter der Halbleiter im SMD-Gehäuse (siehe Abbildung 12.3, Tabelle 12.2) verfügen über diese Kenndaten.

Typ	BCX 71J SMD	BCX 54-16 SMD
Gehäuse	SOT-23	SOT-89
Einsatz	PNP-Kleinsignaltransistor	NPN-Kleinsignaltransistor

Tabelle 12.2 SMD-Kleinsignaltransistoren

12.2.1 Aufbau und Funktion von bipolaren Transistoren

Bei den bipolaren Transistoren handelt es sich entweder um NPN- oder PNP-Typen. Diese weisen stets drei Schichten auf. Sie sind im Grunde eine um eine weitere P- oder

N-Schicht erweiterte Diode, was aus dem Ersatzschaltbild (siehe Abbildung 12.4 und Abbildung 12.5) hervorgeht. Allerdings können Sie keinen Transistor in der Praxis durch die gezeigte Diodenschaltung ersetzen. Die jeweilige mittlere Schicht ist in Wirklichkeit hauchdünn.

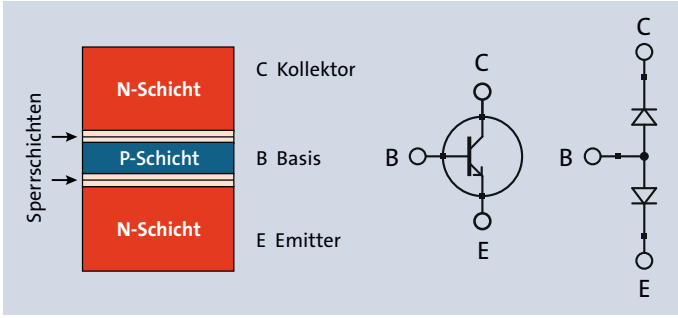


Abbildung 12.4 Aufbau des NPN-Transistors mit Ersatzschaltbild

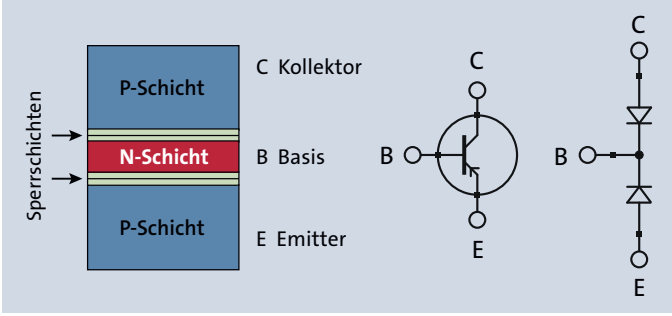


Abbildung 12.5 Aufbau des PNP-Transistors mit Ersatzschaltbild

Jeder bipolare Transistor verfügt über drei Anschlüsse:

- **Kollektor (C)**: Hier liegt das zu schaltende Potenzial an. Es ist beim NPN-Transistor positiv und beim PNP-Transistor negativ.
- **Basis (B)**: Eingang für die Steuerspannung
- **Emitter (E)**: Ausgang

Funktionsweise von bipolaren Transistoren

Bei bipolaren Transistoren aus Silizium muss zwischen Basis und Emitter ein Spannungsunterschied von mindestens 0,6 Volt bestehen. Wird dieser erreicht, beginnt in der Strecke B → E ein Strom zu fließen. Gleichzeitig wird damit aber auch der Stromfluss zwischen dem Kollektor und dem Emitter hergestellt.

Bei NPN-Transistoren muss der Spannungsunterschied B → E mit positivem, bei den PNP-Transistoren mit negativem Vorzeichen vorhanden sein.

Abbildung 12.6 zeigt Ihnen die Stromrichtung anhand des Diodensymbols. Ob ein Transistor noch funktioniert, messen Sie durch Prüfung der »Diodenstrecke« B → E (NPN) und E → B (PNP).

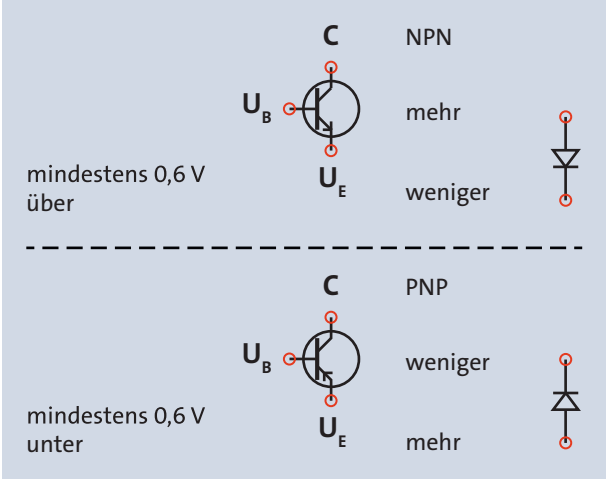


Abbildung 12.6 Mindestspannung 0,6 Volt zwischen B und E

Die einzelnen Spannungen und Ströme, die mit den bipolaren Transistoren zu beherrschen sind, sehen Sie in Abbildung 12.7 und Abbildung 12.8.

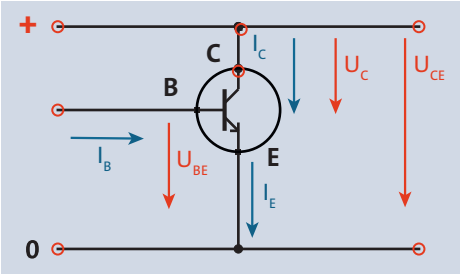


Abbildung 12.7 Ströme und Spannungen am NPN-Transistor

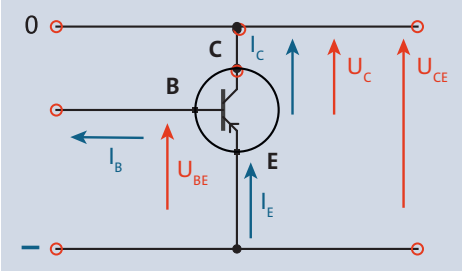


Abbildung 12.8 Ströme und Spannungen am PNP-Transistor

Tabelle 12.3 verdeutlicht nochmals die einzelnen Begriffe.

Begriff	Strecke	Hinweise
Kollektorspannung	C → E	Spannung, die zwischen dem Kollektor und dem Emitter gemessen wird
Kollektorstrom		Strom, der am Kollektor gemessen wird
Basisspannung	B → E	Spannung, die zwischen der Basis und dem Emitter anliegt
Basisstrom		Strom, der von oder zur Basis fließt
Emitterstrom	C → E + B → E	Strom, der am Emitter gemessen wird. Er setzt sich aus dem Kollektor- und dem Basisstrom zusammen.

Tabelle 12.3 Ströme und Spannungen an bipolaren Transistoren

In Abbildung 12.9 finden Sie eine Simulation wiedergegeben. Wenn der Schalter S1 betätigt wird, liegt an der Basis von T1 eine Spannung an, die 0,6 Volt überschreitet. Damit beginnt der Basisstrom zu fließen und schaltet die Strecke vom Kollektor zum Emitter durch. Im Diagramm sehen Sie die Strommessung als Ergebnis.

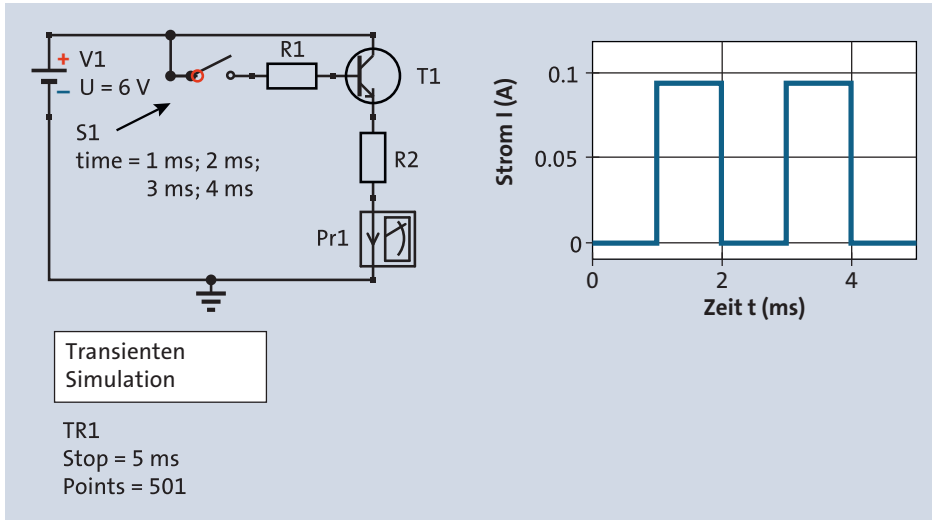


Abbildung 12.9 Simulation von Schaltvorgängen mit einem NPN-Transistor

Basiswissen über bipolare Transistoren

- Es gibt NPN- und PNP-Transistoren.
  - NPN-Transistoren benötigen positive Kollektorspannungen.
  - PNP-Transistoren benötigen negative Kollektorspannungen.
- Bipolare Transistoren arbeiten stromgesteuert.
- Mit einem geringen (Basis-)Strom wird ein großer (Kollektor-)Strom gesteuert.
- Das Verhältnis von Kollektorstrom zu Basisstrom beträgt zwischen 10:1 und 900:1.
- NPN-Transistoren leiten Strom, wenn die Spannungsdifferenz zwischen Basis und Emitter 0,6 Volt überschreitet.
- PNP-Transistoren leiten Strom, wenn die Spannungsdifferenz zwischen Emitter und Basis 0,6 Volt überschreitet.

Experiment mit einem NPN-Transistor

Auf dem Steckbrett können Sie selbst mit einem Transistor schalten. Sie benötigen hierzu die bereits hier im Buch verwendeten Teile, zusätzlich aber den Transistor *TIP 31C MBR*. Das ist ein für unsere Experimente »gutmütiger« NPN-Transistor.

Bei diesem Transistor müssen Sie beachten, dass das Gehäuse gleichzeitig der Kollektoranschluss und damit spannungsführend ist.

Das Anschlussbild des NPN-Transistors sehen Sie in Abbildung 12.10.

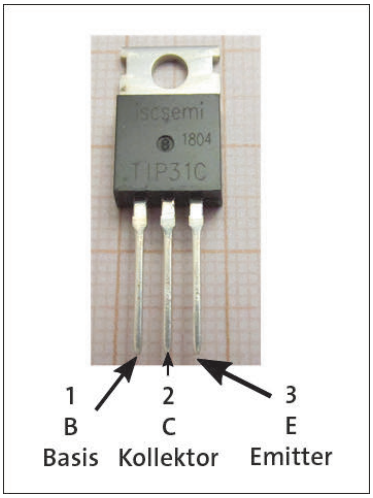


Abbildung 12.10 Anschlussbild des TIP 31C MBR

Zusammen mit den restlichen Bauelementen bauen Sie die Schaltung aus Abbildung 12.11 auf. Der Schalter S1 wird durch die beiden freien Enden von R1 und R2 gebildet.

Natürlich können Sie das auch richtig und ordentlich mit einem Taster oder Schalter aufbauen. Prüfen Sie nach, ob der Aufbau wie in Abbildung 12.12 dargestellt aussieht. Fassen Sie die beiden Enden von R1 und R2 zusammen (oder betätigen Sie S1), dann sollte das in Abbildung 12.13 gezeigte Ergebnis zustande kommen.

Bei dieser Anwendung wird der Transistor nicht einmal handwarm, weshalb er ohne Kühlblech betrieben werden darf. Auch die beiden Widerstände bleiben kühl.

In Abbildung 12.13 sehen Sie auch Details vom Anschluss des Transistors auf dem Steckbrett.

Sie können die einzelnen Verbindungen auftrennen und einen Strommesser einfügen. Messen Sie den Basis-, den Kollektor- und den Emitterstrom.

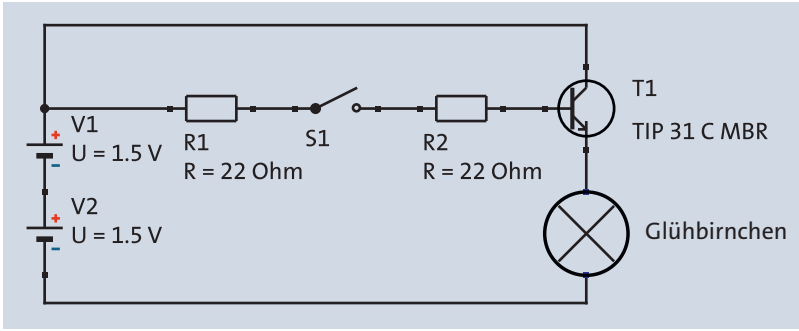


Abbildung 12.11 Schaltplan für das Experiment

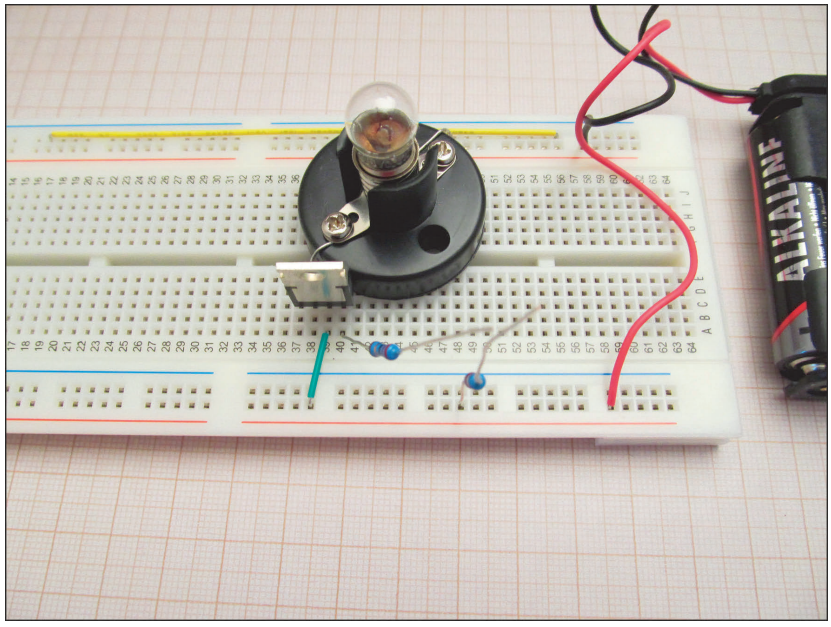


Abbildung 12.12 Aufbau des Experiments

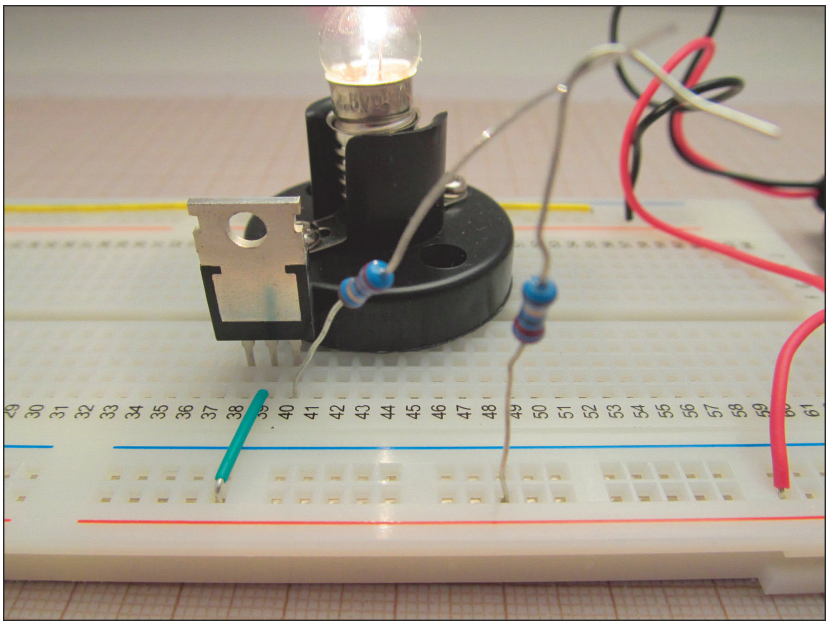


Abbildung 12.13 Funktionierendes Experiment

Grundschaltungen mit bipolaren Transistoren

Bei bipolaren Transistoren unterscheidet man zwischen drei Grundschaltungen. Deren Anwendung ergibt sich aus dem Verwendungszweck. Tabelle 12.4 zeigt diese auf.

	Emitterschaltung	Basisschaltung	Kollektorschaltung »Emitterfolger«
Stromverstärkung	hoch (> 100)	keine	hoch (> 100)
Spannungsverstärkung	hoch (> 100)	hoch (> 100)	keine
Leistungsverstärkung	sehr hoch (10^4)	hoch (> 100)	hoch (> 100)
Anwendungsbereich	NF, HF bis 10 MHz	HF bis 1 GHz, Oszillatoren	NF und HF, Impedanzanpassung
Eingangswiderstand	100 Ω bis 10 kΩ	10 Ω bis 100 Ω	10 kΩ bis 100 kΩ
Ausgangswiderstand	1 kΩ bis 10 kΩ	10 kΩ bis 100 kΩ	10 Ω bis 100 Ω
Phasendrehung	180°	keine	keine
Schaltbild	Abbildung 12.14	Abbildung 12.15	Abbildung 12.16

Tabelle 12.4 Transistorgrundschaltungen und ihre Eigenschaften

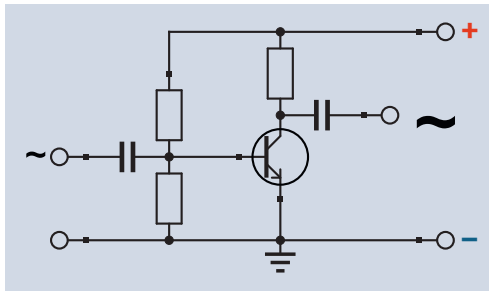


Abbildung 12.14 Emitterschaltung

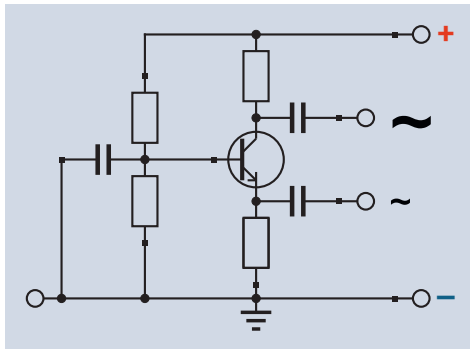


Abbildung 12.15 Basisschaltung

Die Basisschaltung entspricht fast der Emitterschaltung. Um die Unterschiede zwischen ihnen besser zeigen zu können, wurde sie hier um 90° gedreht gegenüber den meisten Lehrbuchdarstellungen gezeichnet.

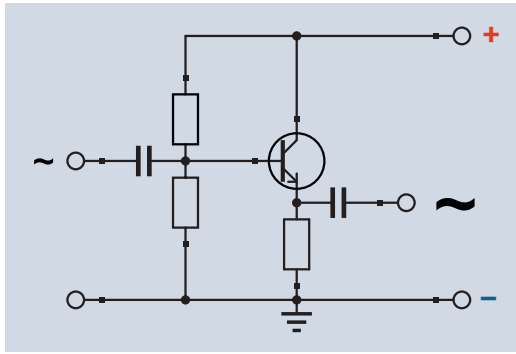


Abbildung 12.16 Kollektorschaltung (»Emitterfolger«)

Die Kollektorschaltung dient oft auch als Pufferstufe, um Rückwirkungen durch eine angeschlossene Last auf die vorhergehende Schaltung zu verhindern (Beispiel: Oszillator und weitere Schaltung eines Senders).

Kondensatoren im Signalweg einer Transistorschaltung

Diese Kondensatoren dienen der Wechselstromkopplung! Damit ist es möglich, Signale und nicht nur Gleichströme zu verstärken bzw. zu schalten.

Alle anderen Kondensatoren dienen Kompensationsmaßnahmen, um Verschiebungen der Arbeitspunkte, z. B. durch Temperaturänderungen, auszugleichen.

Verwechslungsgefahr! Achten Sie auf die richtigen Begriffe:

- **Kollektorschaltung (auch bekannt als Emitterfolger)**: In dieser Konfiguration scheint die Spannung am Emitter der Basisspannung zu folgen, was bedeutet, dass der Emitterausgang eng mit der Eingangsspannung an der Basis verbunden ist.
- **Emitterschaltung ≠ Emitterfolger**: Im Gegensatz zum Emitterfolger bietet die Emitterschaltung eine hohe Verstärkung. Hierbei ist der Emitter nicht in der Weise mit dem Eingangssignal verbunden, wie es beim Emitterfolger der Fall ist.

Bipolare Transistoren: Basisvorspannung, Arbeitspunkt

Damit ein Transistor eine Wechselspannung verstärken kann, müssen Sie den *Arbeitspunkt* (Vorspannung) einstellen. Richtig berechnet und justiert, wird die Wechselspannung mit einer Gleichspannung im richtigen Verhältnis überlagert. Andernfalls produziert so eine Verstärkerschaltung veränderte Signale.

Die Einstellung dieser Vorspannung wird meist mittels eines Spannungsteilers vorgenommen. Dabei besteht die Möglichkeit, einen der notwendigen Widerstände einzusparen, indem man die Diodenstrecke Basis–Emitter (beim NPN-Transistor) miteinbezieht. Abbildung 12.17 zeigt Ihnen, auf welche Teile in der Schaltung es ankommt. Die für die Berechnung nicht maßgeblichen Teile sind rot durchgestrichen. Es bleibt eine einfache Spannungsteilerberechnung.

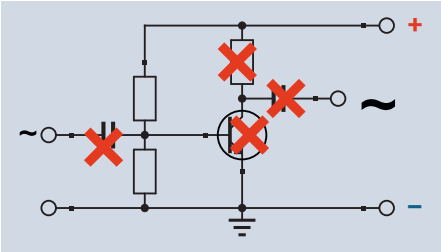


Abbildung 12.17 Einstellung des Arbeitspunkts

Übung

Die bekannten Werte sind:

- Betriebsspannung: 12 V
- Kollektorstrom: 0,004 A

- Gleichstromverstärkung: 200
- Teilspannung an Basis: 0,6 V
- I am unteren Widerstand $R_2 = I_{\text{Basis}} \times 10$

Gesucht ist der Wert des oben liegenden Widerstands R_1.

Lösung:

- Schritt 1: Sie müssen Folgendes erkennen:

  Der Kollektorstrom beträgt das 200-Fache des Basisstroms!
- Schritt 2: Ermitteln Sie nun die Teilspannung an der Basis des Transistors (= Spannungsteiler):

  $U_{\text{Basis}} = 12\ \text{V} - 0{,}6\ \text{V} = 11{,}4\ \text{V}$
- Schritt 3: Anschließend ermitteln Sie den Basisstrom:

  $$I_{\text{Basis}} = \frac{\text{Kollektorstrom}}{\text{Gleichstromverstärkung}} = \frac{0{,}004\ \text{A}}{200} = 0{,}00002\ \text{A} = 20\ \mu\text{A}$$
- Schritt 4: Nun ermitteln Sie den Stromfluss durch R_1.

  Es fließen durch R_1 die 20 µA Basisstrom und das Zehnfache davon, also 200 µA, die durch R_2 fließen.

  Ergebnis: 220 µA
- Schritt 5: Berechnen Sie nun den Widerstand R_1:

  $$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{11{,}4\ \text{V}}{0{,}00022\ \text{A}} = 51818\ \Omega = 51{,}8\ \text{k}\Omega$$

  Der Wert für R_1 beträgt 51,8 kΩ.

  Wenn der untere Widerstand des Spannungsteilers (R_2) fehlt, dann müssen Sie gegebenenfalls die Diodenstrecke des Transistors berücksichtigen.

Maßnahmen zur Temperaturkompensation, Gleichstromgegenkopplung

Transistoren erwärmen sich, wenn Strom durch sie fließt. Sie leiten bei steigenden Temperaturen besser. Dadurch verschiebt sich aber der Arbeitspunkt, was nach Möglichkeit verhindert werden muss. Mittels Gleichstromgegenkopplung oder Gleichspannungsgegenkopplung gleicht man die temperaturbedingten Veränderungen wieder aus.

Betrachten Sie zunächst die Gleichstromgegenkopplung. Abbildung 12.18 zeigt die der Grundschaltung hinzugefügten Bauelemente. Diese befinden sich in der roten Umrandung. Ein Widerstand und ein Kondensator werden parallel zueinander liegend zwischen Emitter und Masse eingefügt.

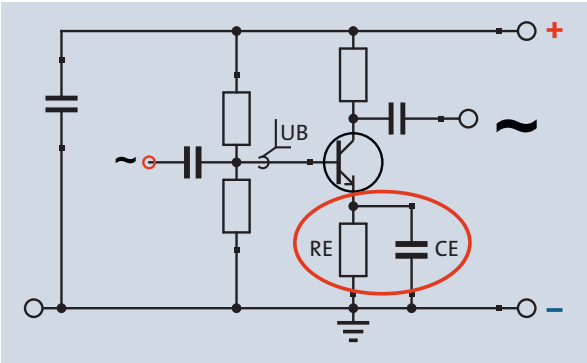


Abbildung 12.18 Gleichstromgegenkopplung

Der Widerstand RE bewirkt, dass der Spannungsabfall bei steigendem Kollektorstrom damit auch den Emitterstrom erhöht. Weil die Spannung UB durch den Spannungsteiler einen relativ konstanten Wert behält, sinkt somit der Basisstrom. Dieser Umstand wiederum drosselt den Kollektorstrom.

Diese Maßnahme allein würde sich aber negativ auf zu verstärkende Signale auswirken. Der Kondensator CE bewirkt, dass sich die Kollektorstromänderung träge vollzieht. Zudem muss bedacht werden, dass sich die Verstärkung ohne diesen Kondensator aus dem Verhältnis des Kollektorwiderstands zum Emitterwiderstand (RE) berechnet. In der Praxis bedeutet dies eine Verminderung der Verstärkung.

Übung

Die bekannten Werte sind:

- Betriebsspannung: 18 V
- Kollektorstrom: 0,005 A
- Gleichstromverstärkung: 200
- Strom durch R2: Basisstrom × 10
- Spannungsabfall an der Strecke Basis–Emitter: 0,6 V
- I an $R_2 = I_{\text{Basis}} \times 10$
- Spannungsabfall an RE: 1,5 V

Lösung:

- Schritt 1: Sammeln Sie Erkenntnisse:

  Der Kollektorstrom beträgt das 200-Fache des Basisstroms!
- Schritt 2: Ermitteln Sie den Basisstrom:

$$I_{\text{Basis}} = \frac{\text{Kollektorstrom}}{\text{Gleichstromverstärkung}} = \frac{0{,}005\ \text{A}}{200} = 0{,}000025\ \text{A} = 25\ \mu\text{A}$$

- Schritt 3: Ermitteln Sie den Stromfluss durch R_1.

  Es fließen durch R_1 die 25 µA Basisstrom. Das Zehnfache davon, also 250 µA, sollen durch R_2 fließen.

  Ergibt: 275 µA

- Schritt 4: Ermitteln Sie die Teilspannung an der Basis des Transistors (= Spannungsteiler). Dabei hilft Tabelle 12.5:

Angabe	Wert
Betriebsspannung	18 V
Strecke Basis–Emitter	–0,6 V
Spannungsabfall an RE	–1,5 V
Teilspannung an der Basis	**= 15,9 V**

Tabelle 12.5 Berechnung der Teilspannung

- Schritt 5: Berechnen Sie R_1:

$$R_1 = \frac{U}{I} = \frac{15{,}9\ \text{V}}{0{,}000275\ \text{A}} = 57818\ \Omega = 57{,}8\ \text{k}\Omega$$

  Der Widerstand R_1 beträgt 57,8 kΩ.

Maßnahmen zur Temperaturkompensation, Gleichspannungsgegenkopplung

In der vorherigen Maßnahme wurde nicht auf die Platzierung eines Widerstands zwischen der Betriebsspannung und dem Kollektor (siehe Abbildung 12.19) eingegangen, er wurde aber im Schaltbild bereits dargestellt.

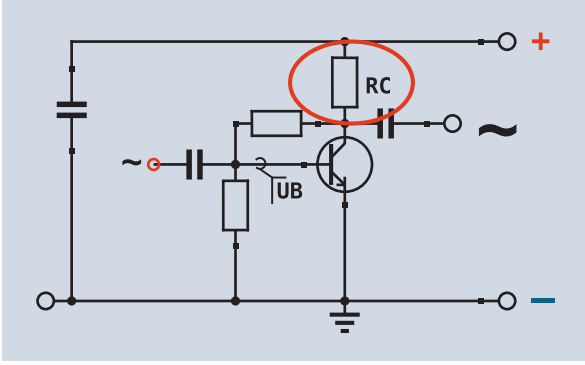


Abbildung 12.19 Gleichspannungskompensation

Dieser Widerstand (RC) bewirkt, dass bei einem Ansteigen des Kollektorstroms die Spannung zwischen Kollektor und Emitter sinkt, gleichfalls wie die Spannung zwischen Basis und Emitter. Dieser Effekt ermöglicht es, den Kollektorstrom herunterzuregeln.

Übung

Die bekannten Werte sind:

- Betriebsspannung: 24 V
- Kollektorstrom: 0,003 A
- Gleichstromverstärkung: 200
- Spannung Kollektor → Emitter: 6 V
- Spannung Basis → Emitter: 0,6 V

Gesucht ist R_1 (oben liegend) des Spannungsteilers (Vorwiderstand Basis).

Lösung:

- Schritt 1: Erkennen Sie die Fallen der Aufgabe: Hier wird *nicht* von der Betriebsspannung, sondern von der Spannung zwischen Kollektor und Emitter ausgegangen. Der Wert von R_C ist ohne Belang.
- Schritt 2: Ermitteln Sie den Basisstrom:

$$I_{\text{Basis}} = \frac{\text{Kollektorstrom}}{\text{Gleichstromverstärkung}} = \frac{0{,}003\ \text{A}}{200} = 0{,}000015\ \text{A} = 15\ \mu\text{A}$$

- Schritt 3: Berechnen Sie nun die Teilspannung (Basisspannung):

$$\begin{aligned} U_{\text{Basis}} &= U(\text{Kollektor} \rightarrow \text{Emitter}) - U(\text{Basis} \rightarrow \text{Emitter}) \\ &= 6\ \text{V} - 0{,}6\ \text{V} = 5{,}4\ \text{V} \end{aligned}$$

- Schritt 4: Abschließend berechnen Sie den Widerstand:

$$R_1 = \frac{5{,}4\ \text{V}}{0{,}000015\ \text{A}} = 539998\ \Omega = 540\ \text{k}\Omega$$

Der Widerstand beträgt 540 kΩ.

Berechnung des Kollektorwiderstands:

Die bekannten Werte sind:

- Betriebsspannung: 24 V
- Spannung Kollektor → Emitter: 6 V
- Spannung Basis → Emitter: 0,6 V
- Gleichstromverstärkung: 100
- Kollektorstrom: 0,005 A

Gesucht sind Basisstrom und der Kollektorwiderstand R_C.

Lösung:

- Schritt 1: Ermitteln Sie den Basisstrom:

$$I_{\text{Basis}} = \frac{\text{Kollektorstrom}}{\text{Gleichstromverstärkung}} = \frac{0{,}005\ \text{A}}{100} = 0{,}00005\ \text{A} = 50\ \mu\text{A}$$

- Schritt 2: Ermitteln Sie nun den Strom durch R_C:

  0,005 A + 0,00005 A = 0,00505 A
- Schritt 3: Anschließend berechnen Sie die Teilspannung:

  24 V – 6 V = 18 V
- Schritt 4: Zum Schluss berechnen Sie den Widerstand:

$$R_C = \frac{U}{I} = \frac{18\ \text{V}}{0{,}00505\ \text{A}} = 3564\ \Omega = 3{,}56\ \text{k}\Omega$$

Der Widerstand R_C weist einen Wert von 3,56 kΩ auf.

Bipolare Transistoren: Berechnung der Verstärkungsfaktoren

Verstärkung mit bipolaren Transistoren

- **Spannungsverstärkung (V_U)**

  Die Spannungsverstärkung ist das Verhältnis der Änderung der Kollektor–Emitter-Spannung zur Änderung der Basis–Emitter-Spannung:

$$V_U = \frac{U\ (\text{Kollektor} \rightarrow \text{Emitter})}{U(\text{Basis} \rightarrow \text{Emitter})} = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{BE}}$$

  Den Wert benötigen Sie in einer weiteren Formel!
- **Stromverstärkung (V_I)**

  Die Stromverstärkung ist das Verhältnis der Kollektorstromänderung zur Basisstromänderung:

$$V_I = \frac{I\ \text{Kollektor (maximal)} - I\ \text{Kollektor (minimal)}}{I\ \text{Basis (maximal)} - I\ \text{Basis (minimal)}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

  (Das Δ-Zeichen drückt die Differenz aus.)

  Den Wert benötigen Sie in einer weiteren Formel!
- **Leistungsverstärkung (V_P)**

  Die Leistungsverstärkung ist das Produkt aus Spannungsverstärkung und Stromverstärkung, das die Gesamtverstärkung der Leitung beschreibt:

$$V_P = V_U \times V_P$$

Bipolare Transistoren: Phasenlagen von Signalen in Verstärkern

Erinnern Sie sich: Nur die Emitterschaltung bringt eine Phasendrehung um 180° mit sich.

Bipolare Transistoren: Beeinflussung der Signalform in Schaltstufen

Im Gegensatz zum Verstärker, bei dem der Transistor jeden Teil einer Signalkurve weitergibt, sind bei einer Schaltstufe ganze zwei Zustände bekannt: Ein oder Aus.

Bei der Schaltstufe entfällt die beim Verstärker gegebene Basisvorspannung. Hier hat die Basis keine Verbindung zur Betriebsspannung, sondern ist ganz allein auf die Zufuhr einer Spannungs- oder Signalquelle angewiesen.

Oft müssen Sie bei der Verwendung von integrierten Schaltkreisen einen Schalttransistor aufgrund der Leistungsanforderungen nachsetzen.

In Abbildung 12.20 finden Sie die Schaltung, mit der das Diagramm in Abbildung 12.21 in der Simulation erzeugt wurde.

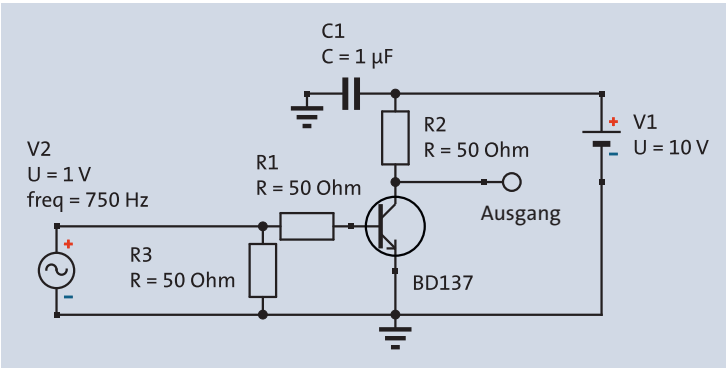


Abbildung 12.20 Transistorschaltstufe

In Abbildung 12.21 erkennen Sie die Funktion: Solange die Eingangsspannung nicht die notwendige Basisspannung erreicht, liegt am Ausgang (zwischen R2 und dem Kollektor des Transistors) die volle Spannung an. Wird der Transistor leitend, fällt die Spannung sehr weit ab.

Aus dem Sinus der Eingangsspannung wird damit ein »Quasi-Rechteck«.

Wenn Sie am Ausgang der Schaltung einen Kondensator einfügen, kehrt sich die Spannung um! Sie bekommen damit die Spiegelspannung der Betriebsspannung.

Eine weitere Form einer Schaltstufe finden Sie im Abschnitt »Experiment mit einem NPN-Transistor« einige Seiten vorher.

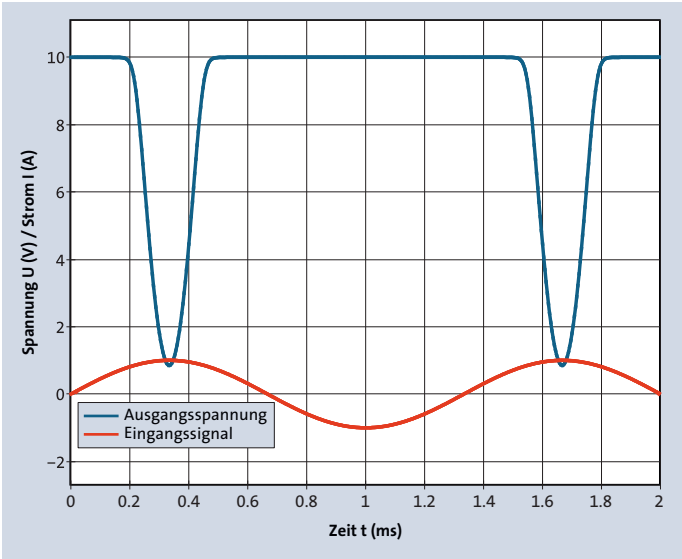


Abbildung 12.21 Ausgangsspannung, abhängig vom Eingangssignal

Bipolare Transistoren: Fehler in Transistorverstärkerschaltungen

Schlechte Lötstellen können in Verstärkerschaltungen Fehlfunktionen oder Ausfälle bewirken. Mit etwas systematischer Suche werden Sie diese finden, sofern sie nicht schon mit bloßem Auge zu erkennen sind.

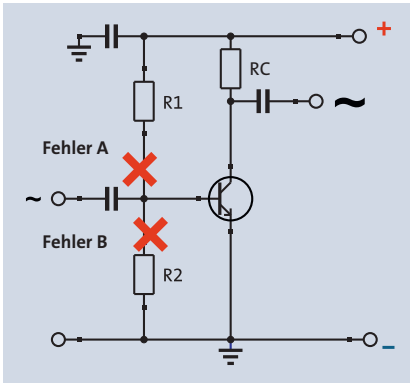


Abbildung 12.22 Fehlerbilder in einer Transistorschaltung

Der Fehler A (die Verbindung zu R1 ist unterbrochen) hat diese Folgen:

- Es fließt kein Basisstrom.
- Es fließt kein Kollektorstrom.
- Der Basisspannungsteiler ist außer Funktion.
- Kollektorspannung = Betriebsspannung

Der Fehler B (die Verbindung zu R2 ist unterbrochen) hat diese Folgen:

- Die Begrenzung des Kollektorstroms erfolgt nur durch RC.
- Der Spannungsteiler für die Basisspannung ist außer Funktion.
- Die Kollektorspannung nimmt einen Wert von ca. 0,1 V ein.

Bipolare Transistoren: Kopplung von Transistorstufen

Sobald nicht Gleichströme direkt verstärkt werden sollen, sondern Wechselströme oder Signale, müssen schwingungserzeugende, verstärkende und schaltende Teilschaltungen (»Stufen«) entsprechend gekoppelt werden.

Im Tonfrequenzbereich und bei Kleinsignalen verwenden Sie hierfür die *kapazitive Kopplung* (siehe Abbildung 12.23). Ein Kondensator verhindert die Weitergabe von Gleichspannungsanteilen und lässt nur die Wechselstromkomponente passieren.

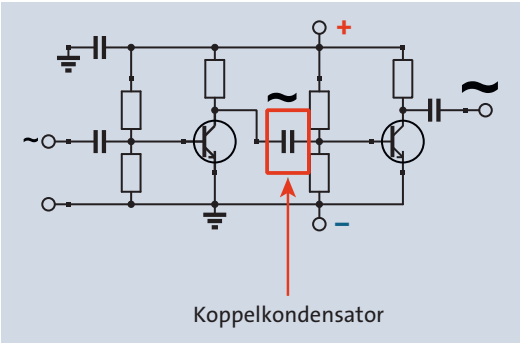


Abbildung 12.23 Kapazitiv gekoppelte Transistorstufen

Im Hochfrequenzbereich benutzen Sie die *transformatorische Kopplung* (auch *induktive Kopplung* genannt). Aber auch im NF-Bereich kann Ihnen dieses Prinzip begegnen, besonders bei älteren Schaltungen (siehe Abbildung 12.24). Dies wird oft zur Impedanzanpassung (Widerstandsanpassung) angewendet.

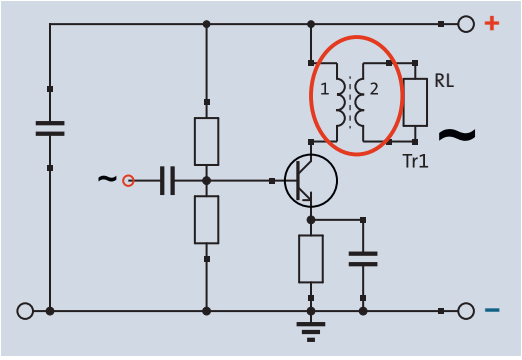


Abbildung 12.24 Induktive Kopplung von Schaltstufen

12.2.2 Aufbau und Funktion von Feldeffekttransistoren

Feldeffekttransistoren (FETs) arbeiten mit Spannungsverstärkung. Anders als bei den bipolaren Transistoren wird hier mit einer Steuerspannung gearbeitet. FETs werden auch als *unipolare Transistoren* bezeichnet, weil nur eine Art von Ladungsträgern jeweils zur Anwendung kommt (Elektronen oder »Löcher«, siehe Abschnitt 4.4). Sie können diese Halbleiter auch als regelbare, elektrische Widerstände betrachten.



Wissenswertes über Feldeffekttransistoren allgemein

- Der Feldeffekt besteht darin, dass ein elektrisches Feld den Ladungsträgerstrom beeinflusst. Der Ladungsträgerstrom fließt hierbei durch einen Kanal, der aus Halbleitermaterial besteht. Das elektrische Feld wirkt hierbei senkrecht zur Stromflussrichtung.
- Bei Erwärmung sinkt der Stromfluss eines FETs.
- FETs weisen viele Eigenschaften von Elektronenröhren auf!
- Tabelle 12.6 zeigt die Anschlussbezeichnungen und ihre Entsprechungen beim bipolaren Transistor, aber auch bei der Elektronenröhre:

FET	Bipolarer Transistor	Elektronenröhre
(S) Source	Ermitter	Kathode
(G) Gate	Basis	Gitter
(D) Drain	Kollektor	Anode

Tabelle 12.6 Anschlussbezeichnungen bei FET, bipolarem Transistor und Elektronenröhre

Abbildung 12.25 zeigt das Prinzip des Feldeffekts.

Zunächst sperrt der MOSFET (oberster Teil der Abbildung 12.25). Es liegt keine Spannung zwischen den Anschlüssen *Source* und *Gate* an. Source und *Drain* sind n-dotiert, das Substrat p-dotiert. Wie bei anderen Halbleitern auch bildet sich ein n-p-Übergang (Grenzschicht, nichtleitend).

FET-Typen

FET ist ein Oberbegriff für Transistoren, die ein elektrisches Feld zur Steuerung des Stromflusses nutzen.

MOSFET ist eine spezifische Art von FET, die eine Metalloxidschicht verwendet, um das Gate elektrisch vom Kanal zu isolieren, was eine präzisere Spannungssteuerung ermöglicht.

Der Hauptunterschied zwischen einem allgemeinen FET und einem MOSFET liegt in der Gate-Isolation, die den MOSFET effizienter und vielseitiger in der modernen Elektronik macht.

Desweiteren gibt es noch verschiede weitere FET-Typen (**MESFET**, **HEMT**, **JFET**, **FinFET** und **Depletion-Mode FET**) die die Einsatzmöglichkeiten von Feldeffektransistoren in der Elektronik erweitern.

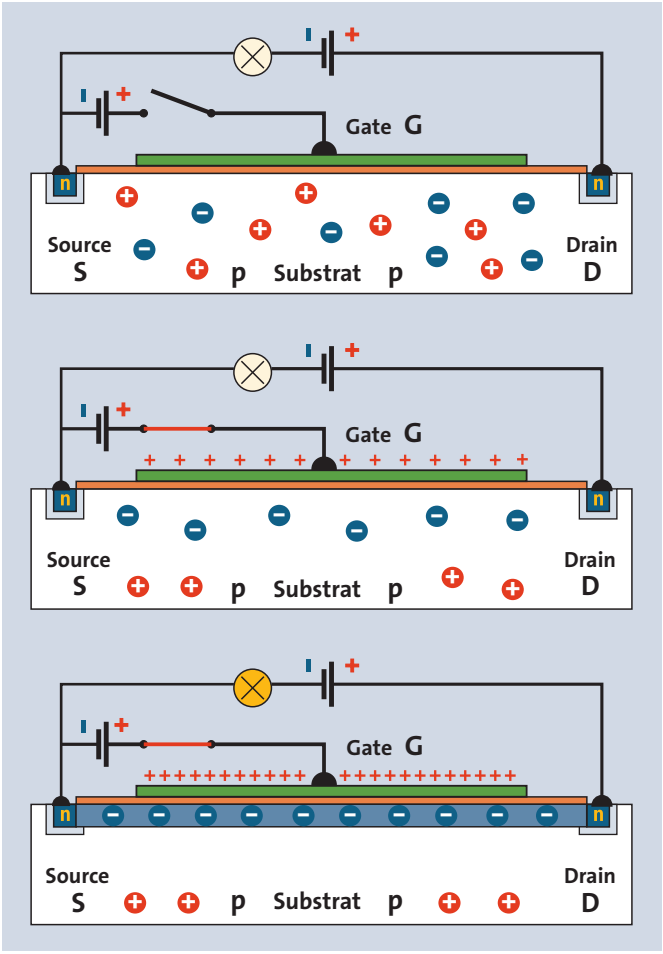


Abbildung 12.25 Schaltvorgang in einem n-Kanal-MOSFET

Im weiteren Verlauf (mittlerer Teil von Abbildung 12.25) wird an die Source der Minuspol, an das Gate der Pluspol einer Spannungsquelle angeschlossen. Das Gate wirkt

wie eine Kondensatorplatte. Aus diesem Grund sortieren sich die unterschiedlichen Ladungsträger (Elektronen und »Löcher«) im Substrat. Die Elektronen sammeln sich nahe des Gates, die abgestoßenen »Löcher« so weit entfernt wie möglich davon. Damit herrscht »Ordnung« im Substrat. Ein Ladungsausgleich zwischen dem Gate und dem Substrat findet jedoch wegen des Dielektrikums bzw. der Isolierschicht nicht statt.

Die nun anstehende Menge freier Elektronen zwischen Source und Drain bilden nun einen leitenden Kanal (n-Kanal). Dies ermöglicht nunmehr einen Stromfluss zwischen diesen beiden Anschlüssen des Halbleiters. Die Glühlampe im Beispiel der Abbildung 12.25 beginnt zu leuchten.

Sperrschicht-FET (JFET)

Es gibt verschiedene FET-Typen. Eine davon ist der Sperrschicht- bzw. J-FET (J: *Junction* = Sperrschicht). Hier wird die Sperrschicht des p-n-Übergangs für die Beeinflussung der Zustände im »Kanal« genutzt.

Man unterscheidet zwischen dem n-Kanal-Sperrschicht-FET und dem p-Kanal-Sperrschicht-FET (wie zwischen den NPN- und PNP-Ausführungen beim bipolaren Transistor). Prägen Sie sich die Schaltzeichen aus Abbildung 12.26 gut ein! Tabelle 12.7 zeigt Ihnen die Eigenschaften der unterschiedlichen Typen.

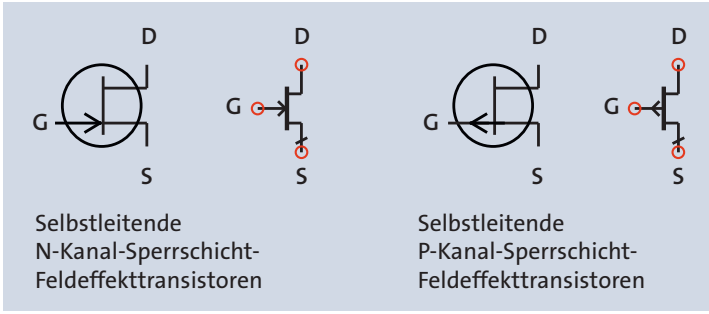


Abbildung 12.26 Schaltzeichen für JFETs

Bei den Anschlüssen ist die Lage des Gates eindeutig. Es handelt sich ja um den Pfeil. Beim älteren Schaltzeichen liegen sich Gate und Source direkt gegenüber auf einer (gedachten) Linie. Drain sitzt einsam rechts oben.

Beim modernen, normgerechten Schaltzeichen *kann* die Source durch einen kleinen schrägen Querstrich gekennzeichnet sein. Zur Not wenden Sie diese Regel an:

- Gate links → Drain rechts oben
- Gate unten → Drain links oben

- Gate rechts → Drain links unten
- Gate oben → Drain rechts unten

Diese Regel gilt im Übrigen auch für weitere FET-Typen.

Eigenschaft	n-Kanal-Sperrschicht-FET	p-Kanal-Sperrschicht-FET
Kristallstrecke	n-leitend	p-leitend
Zonen	2 p-leitende	2 n-leitende
Drainspannung	positiv	negativ
Gatespannung	negativ	positiv

Tabelle 12.7 Eigenschaften von Sperrschicht-FETs

Sperrschicht-FETs

- Einsatzgebiete: Oszillatoren, Schaltstufen
- Vorteil: hoher Eingangswiderstand, leistungsloses Regeln
- Nachteil: für hohe Ströme ungeeignet
- Arbeitsweise als Regler: Polung der Spannung Gate–Source in Sperrrichtung
- Arbeitsweise als Schalter: Polung der Spannung Gate–Source in Flussrichtung (siehe Abbildung 12.27)

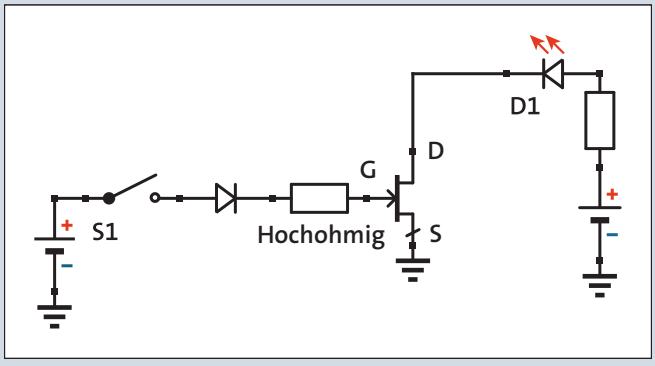


Abbildung 12.27 JFET als Schalter

Regelverhalten:

- Selbstleitend bei Gatespannung von 0 Volt!
- n-Kanal-JFET: bei negativer Gatespannung Verringerung des Stromflusses (siehe Abbildung 12.28)

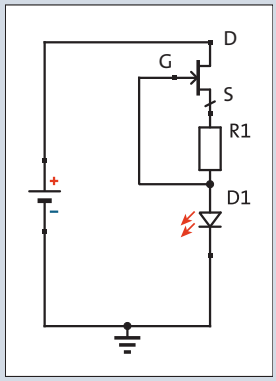


Abbildung 12.28 JFET als Regler

- p-Kanal-JFET: bei positiver Gatespannung Verringerung des Stromflusses

Bei 0 Volt würde der JFET den größtmöglichen Strom leiten. Durch den Spannungsteiler R1 : D1 wird eine negative Spannung eingestellt, die mit dem Gate verbunden wird. Dadurch wird beim JFET der leitende Kanal »enger«, das heißt, es wird weniger Strom durchgelassen.

Isolierschicht-FET

Isolierschicht-FETs verfügen über eine Isolierschicht aus Metalloxid. Daher stammt die Bezeichnung MOSFET (engl. *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*). Sie benötigen keine Sperrspannung zum Aufbau der Sperrschicht. Der Gatestrom ist deshalb geringer als bei den JFETs (siehe auch Abbildung 12.25).

Auch hier unterscheidet man zwischen n-Kanal- und p-Kanal-Ausführungen. Darüber hinaus wird nach Verarmungstypen und Anreicherungstypen mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften eingeteilt.



MOSFETs

- **Verarmungstyp**: Durch entsprechende Dotierung wird der Kanal zwischen Source und Drain dauerhaft hergestellt, das elektrische Feld am Gate verringert den Drainstrom. Daher sind diese Arten selbstleitend. Wenn Sie die Spannung zwischen Gate und Source erhöhen, dann verringert sich der Stromfluss. Bei umgekehrter Spannung zwischen diesen Punkten erhöhen Sie ihn (Schaltzeichen siehe Abbildung 12.29).

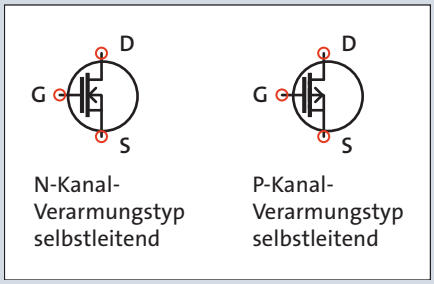


Abbildung 12.29 MOSFETs, Verarmungstypen

- **Anreicherungstyp:** Durch entsprechende Dotierung fehlt der Kanal zwischen Source und Drain. Dieser FET-Typ ist selbstsperrend. Nur wenn Sie an das Gate eine Spannung anlegen, kann der Kanal gebildet werden, und der Halbleiter lässt den Strom fließen. Im Schaltzeichen wird auf das Fehlen des Kanals durch die unterbrochen dargestellte Linie zwischen Drain und Source hingewiesen (Schaltzeichen siehe Abbildung 12.30).

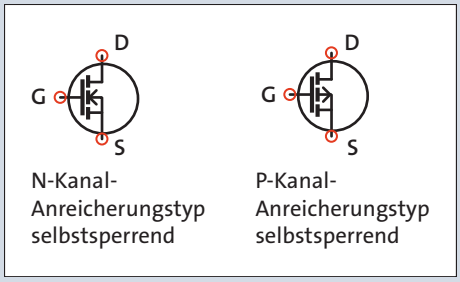


Abbildung 12.30 MOSFETs, Anreicherungstypen

Bei diesen Halbleitern gibt es Ausführungen auch mit zwei Gates, die Sie mit unterschiedlichen Steuerspannungen beaufschlagen können (Dual-Gate-MOSFET). Sie verwenden diese unter anderem in aktiven Mischstufen von Sendern und Empfängern (Schaltzeichen siehe Abbildung 12.31).

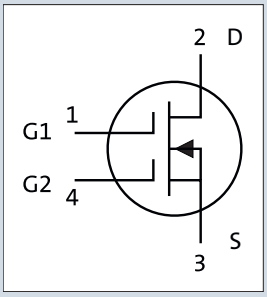


Abbildung 12.31 Dual-Gate-MOSFET

12.3 Integrierte Schaltkreise

Seit einigen Jahrzehnten ist es möglich, viele Transistoren auf einem Halbleiterkristallblättchen zu vereinigen. Allgemein sind diese Konstrukte unter der Bezeichnung *Integrierter Schaltkreis* (IC) bekannt.

ICs werden für alle Anwendungsarten hergestellt. Ob kleiner Verstärker, Radio, digitale Schaltungen oder Mikroprozessor – sie alle haben eine hohe Packungsdichte von Halbleitern gemeinsam.

Es gibt ICs in bedrahteter und oberflächenmontierbarer Ausführung. Abbildung 12.32 zeigt Ihnen auch einen Mikroprozessor (Z80), der in der Vor-PC-Ära in den Computern der 80er-Jahre weit verbreitet war. Links in der gleichen Aufnahme finden Sie einen IC-Sockel. Damit kann man ohne Lötarbeiten einen integrierten Schaltkreis in die Schaltung einbauen und wieder aus ihr ausbauen.

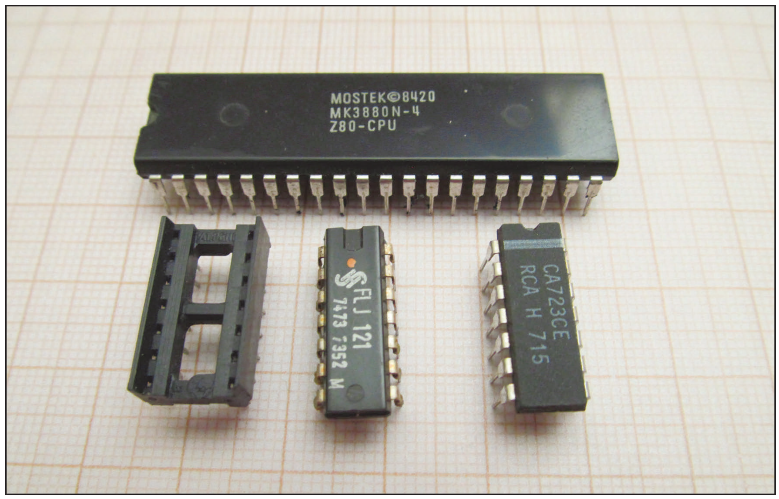


Abbildung 12.32 Bedrahtete ICs

Oberflächenmontierbare ICs (siehe Abbildung 12.33) haben die Miniaturisierung von elektronischen Schaltungen stark vorangetrieben.

In den Schaltbildern und Schaltzeichnungen werden oft die Nummern der Beinchen (Pins) angegeben. Sie müssen allerdings wissen, auf welche Weise die Nummerierung zustande kommt.

Betrachten Sie nochmals Abbildung 12.32. Sie werden erkennen, dass die meisten ICs an einer Seite eine Kennzeichnung in Form einer Kerbe, eines Farbbalkens, eines Punktes oder einer Abschrägung aufweisen. (Es gibt jedoch kleinere oder spezialisierte ICs, bei denen eine Kennzeichnung möglicherweise fehlt.) Wenn die so gekennzeichnete Seite sich auf der linken Seite befindet (das Bauelement liegt dabei quer), beginnt die Zählung mit dem linken unteren Anschluss (siehe Abbildung 12.34).

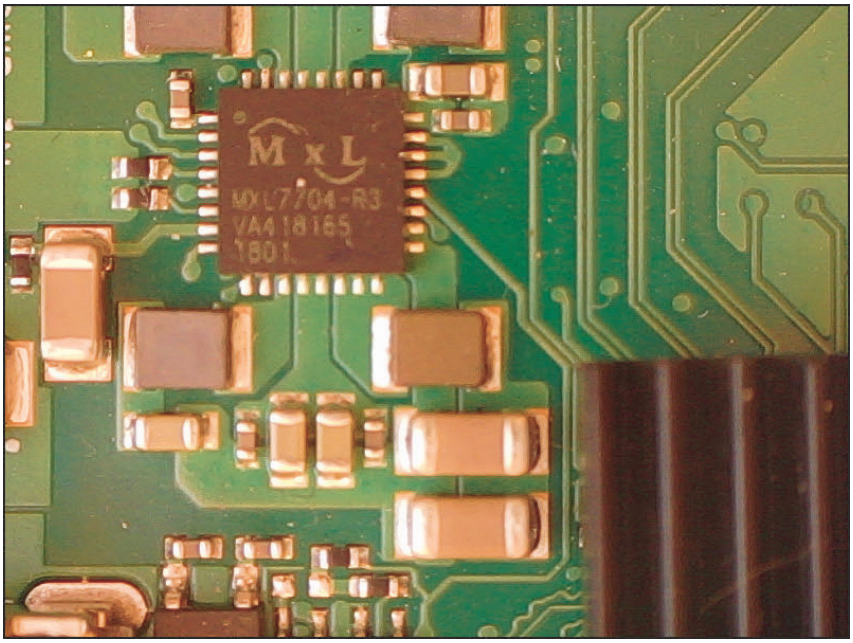


Abbildung 12.33 SMD-IC

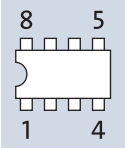


Abbildung 12.34 Nummerierung der Anschlussbeinchen eines ICs

Bei vielen ICs ist die Funktion doppelt oder vierfach in ihrem Gehäuse untergebracht, es gibt also zwei oder vier Operationsverstärker statt einem. Gleiches gilt für die Logik-ICs.

12.3.1 Analoge ICs: Der Operationsverstärker

Bei Operationsverstärkern handelt es sich um gleichstromgekoppelte Verstärker. Sie verfügen über einen sehr hohen Verstärkungsfaktor und große Linearität.

Diese Bauelemente werden vor allem im Bereich der Messtechnik und der Signalaufbereitung verwendet.

Abbildung 12.35 zeigt Ihnen beide gebräuchlichen Schaltzeichen. Links finden Sie das ältere, aber immer noch im Gebrauch befindliche. Es zeigt auch die Anschlüsse der Versorgungsspannung. Bei der »liegenden 8« handelt es sich um das Unendlichkeitszeichen.

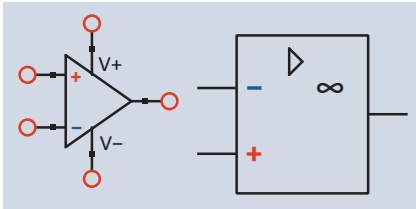


Abbildung 12.35 Schaltzeichen für Operationsverstärker

Operationsverstärker weisen viele Eigenschaften auf. Unterschiedliche Grundschaltungen für diese Halbleiterbauelemente erlauben eine große Zahl von Einsatzfeldern.

Operationsverstärker

Am Operationsverstärker werden Widerstände oder Kondensatoren für die Rückkopplung zwischen den Ein- und Ausgängen angeschlossen.

Operationsverstärker

- haben einen Signaleingang (+), einen invertierenden Signaleingang (–) und einen Ausgang,
- benötigen eine symmetrische Versorgungsspannung, z. B. +12 V und –12 V,
- haben einen hohen Eingangswiderstand,
- haben einen (rechnerisch) unendlichen Verstärkungsfaktor und
- können mit Spannungen »rechnen«.

Operationsverstärker können als

- invertierender,
- nicht invertierender,
- differenzverstärkender oder
- summierender

Verstärker arbeiten.

Mit Operationsverstärkern bauen Sie

- Impedanzwandler,
- Spannungs-Strom-Wandler und
- Strom-Spannungs-Wandler

auf.

Operationsverstärker: Invertierender Spannungsverstärker

Ein Operationsverstärker kann als invertierender Spannungsverstärker eingesetzt werden. Abbildung 12.36 zeigt Ihnen die Grundschaltung hierzu.

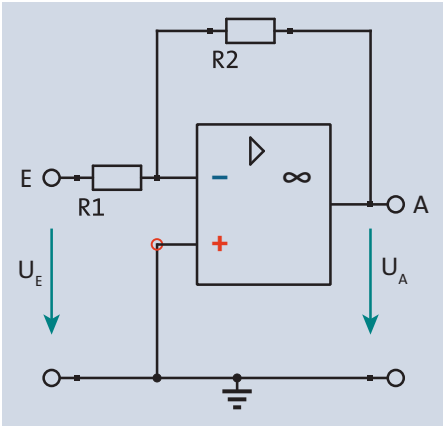


Abbildung 12.36 Invertierender Spannungsverstärker

Der Begriff *invertierend* bezieht sich auf den Vorzeichenwechsel zwischen dem Eingang E und dem Ausgang A. Legen Sie an E eine positive Gleichspannung an, finden Sie an A eine negative. Dabei handelt es sich aber nicht um eine Phasenverschiebung (Verwechslungsgefahr!). Beim Anlegen einer Wechselspannung wird zutreffend von einer Phasenverschiebung (hier um 180°) gesprochen.

Das Verhältnis der beiden Widerstände R_1 und R_2 entspricht dem von U_E und U_A. Der Verstärkungsfaktor V_U für die Spannung wird nach dieser Formel berechnet:

$$V_U = \frac{R_2}{R_1} = -\left(\frac{U_A}{U_E}\right)$$

Den Eingangswiderstand der Schaltung bestimmt der Wert von R_1. Der Ausgangswiderstand ist extrem niedrig bei dieser Beschaltung.

Die Berechnung der Ausgangsspannung, wenn die Widerstände und die Eingangsspannung bekannt sind, erfolgt mit:

$$U_A = -\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \times U_E$$

Bei bekanntem Verstärkungsfaktor ist die Berechnung natürlich einfacher:

$$U_A = V \times U_E$$

Übung

Bei einem invertierenden Verstärker haben die Widerstände folgende Werte:

- R_1: 1 kΩ
- R_2: 10 kΩ

Berechnen Sie die Spannungsverstärkung.

Lösung:

Sie verwenden diese Formel und setzen die Werte gleich mit ein:

$$V_U = \frac{R_2}{R_1} = \frac{10\ \text{k}\Omega}{1\ \text{k}\Omega} = 10$$

Die Spannungsverstärkung beträgt 10.

In einem weiteren Beispiel sind Ihnen von einem invertierenden Spannungsverstärker diese Daten bekannt:

- Eingangswiderstand: 2 kΩ
- Gewünschte Spannungsverstärkung: 20-fach

Berechnen Sie den ungefähren Wert von R_2 (Rückkopplungswiderstand).

Lösung: Sie müssen den Eingangswiderstand mit dem Verstärkungsfaktor multiplizieren:

$$R_2 = R_1 \times V = 2\ \text{k}\Omega \times 20 = 40\ \text{k}\Omega$$

Für R_2 wird ein Widerstand mit 40 kΩ benötigt.

Operationsverstärker: Nicht invertierender Spannungsverstärker

Sie können den Operationsverstärker als Spannungsverstärker so beschalten, dass die Invertierung unterbleibt (siehe Abbildung 12.37). Das Ausgangssignal wird mit dem invertierenden Eingang rückgekoppelt und mittels Spannungsteiler auch gegen Masse geteilt.

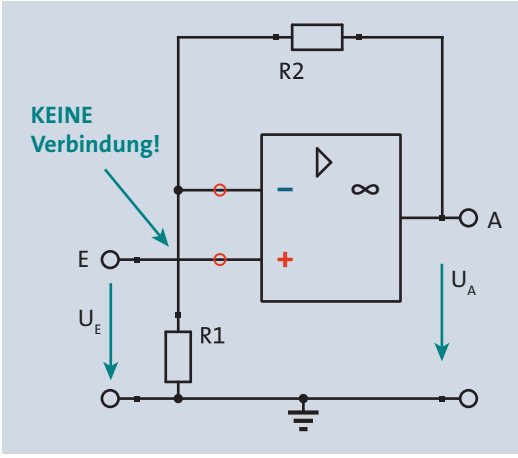


Abbildung 12.37 Nicht invertierender Spannungsverstärker

Der Verstärkungsfaktor ist hier stets größer-gleich 1! Sind die Widerstände bekannt, berechnen Sie den Verstärkungsfaktor V_U mit dieser Formel:

$$V_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Sind Eingangsspannung und Verstärkungsfaktor bekannt (bzw. die Widerstandswerte), berechnen Sie die Ausgangsspannung mit dieser Formel:

$$U_E = V_U \times U_E$$

Übung

Die Widerstände eines nicht invertierenden Spannungsverstärkers haben folgende Werte:

- R_1: 4,7 kΩ
- R_2: 47 kΩ

Gesucht ist die Spannungsverstärkung V_U.

Lösung:

Setzen Sie die Werte in diese Formel ein:

$$V_U = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{47\ \text{k}\Omega}{4{,}7\ \text{k}\Omega} = 11$$

Die Spannungsverstärkung beträgt 11.

Diese Schaltung arbeitet als Impedanzwandler, wenn Sie R_1 weglassen und R_2 praktisch durch einen Draht oder eine Leiterbahn ersetzen (siehe Abbildung 12.38). Damit erhalten Sie die Möglichkeit, mit dem sehr hochohmigen Eingang der Schaltung (selbst mit Hochfrequenz) die Eingangsspannung auf eine niederohmige, folgende Stufe zu übergeben.

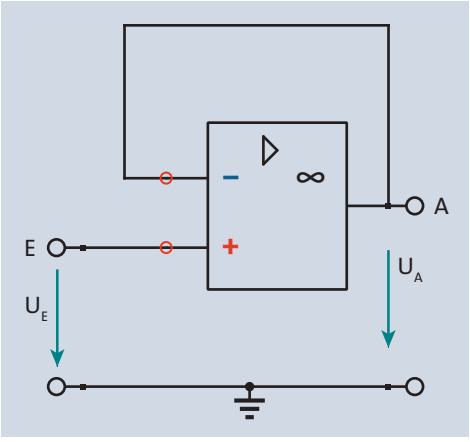


Abbildung 12.38 Impedanzwandler mit einem Operationsverstärker

Operationsverstärker

Operationsverstärker ermöglichen viele Schaltungen, die auch für Funkamateure von großem Interesse sein können (z. B. Audioverstärker, Signalgeneratoren, Spannungsregler oder aktive NF-Filter zur Störungsausblendung: »Notch« und »Peak« usw.). Sie werden in ergänzender Literatur und im Internet fündig, wenn Sie weitere Informationen suchen.

12.3.2 Monolithic Microwave Integrated Circuit (MMIC)

Hinter dem sperrigen Begriff *Monolithic Microwave Integrated Circuit* verbirgt sich ein hochintegriertes Bauelement, das insbesondere in HF-Verstärkerschaltungen zum Einsatz kommt.

Mit den MMICs aufgebaute Verstärkerschaltungen benötigen wenig externe Bauteile. Die notwendigen aktiven und passiven Bauteile sind auf einem Halbleitersubstrat untergebracht. Außerdem entsprechen die Ein- und Ausgangsimpedanz der Bauelemente in der Regel 50 Ohm , was sie besonders kompatibel und einsetzbar in verschiedensten Schaltungsumgebungen macht. Sie arbeiten sehr breitbandig bei hoher Verstärkung. Manche dieser MMICs decken einen Frequenzbereich von NF bis hin zu mehreren GHz ab, bei anderen beginnt der Arbeitsbereich erst bei 50 MHz und endet bei 1,5 GHz. Die Verstärkung bewegt sich zwischen 10 dB und 20 dB.

Abbildung 12.39 zeigt Ihnen, wie wenig externe Beschaltung notwendig ist.

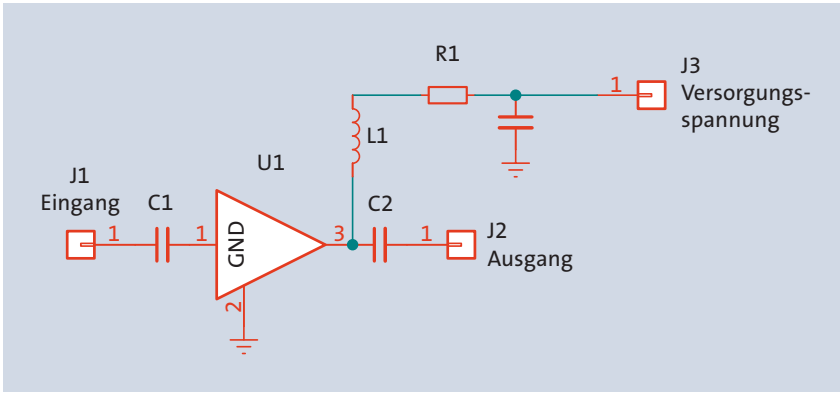


Abbildung 12.39 Beispielschaltung mit einem MMIC

12.3.3 Digitale ICs: Logische Schaltungen

Den Transistor als Schalter haben Sie bereits in Abschnitt 12.2.1 kennengelernt. Eine weitere Form einer Schaltstufe finden Sie im Abschnitt »Experiment mit einem NPN-Transistor«.

In digitalen ICs werden Transistoren zu einem *Gatter* zusammengefasst. Gatter können genau eine Aufgabe übernehmen, deshalb können Sie verschiedene Typen einsetzen. Ein Gatter verarbeitet binäre Signale (binär = zwei Spannungszustände, 0 Volt und z. B. 5 Volt) nach logischen Grundmustern.

Um die Funktionsweise zunächst von der Schaltungstechnik her verstehen zu können, sehen Sie sich Abbildung 12.40 und Abbildung 12.41 an.

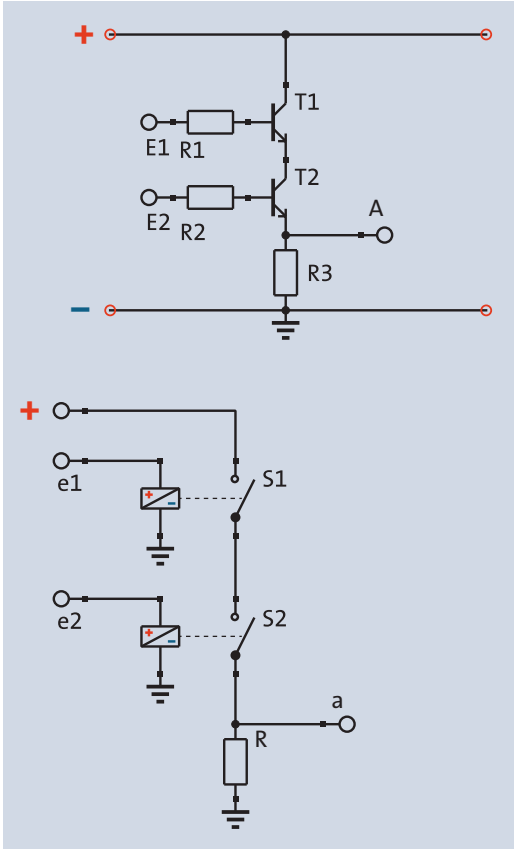


Abbildung 12.40 Ein UND-Glied, mit Transistoren und Relais dargestellt

Die UND-Funktion wurde in Abbildung 12.40 nachgebildet. Bei der im oberen Bildteil sichtbaren Transistorschaltung muss gleichzeitig an E1 UND E2 eine positive Spannung anliegen, damit die Transistoren T1 und T2 leitend werden. Dann liegt an A eine Spannung an.

Gleichermaßen funktioniert die Schaltung mit Relais. Werden die Spulen e1 UND e2 gleichzeitig mit Spannung versorgt, ziehen die Relais an, und S1 UND S2 sind geschaltet. An a liegt die Spannung an.

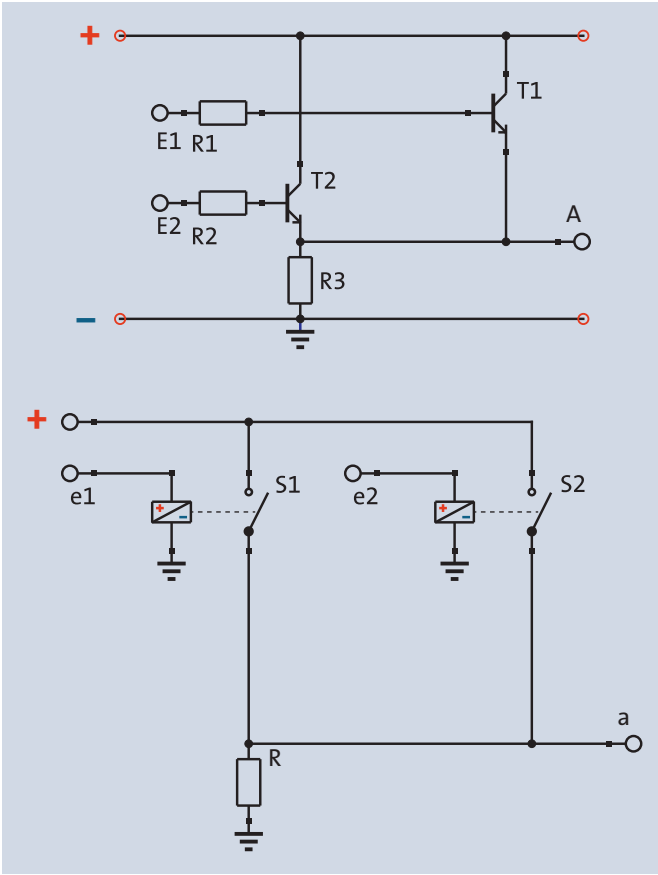


Abbildung 12.41 Ein ODER-Glied, mit Transistoren und Relais dargestellt

Die Schalter liegen hier in Serie.

Wie ein ODER-Glied funktioniert, sehen Sie in Abbildung 12.41. Hier reicht es aus, wenn an E1 ODER an E2 bzw. an e1 ODER e2 eine Spannung anliegt, damit an A oder a etwas »herauskommt«. Die »Schalter« sind hier also parallel gesetzt.

Die Bezeichnungen für die meisten integrierten Schaltkreise, die logischen Funktionen dienen, beginnen mit »74«. Details erfahren Sie in diverser Elektronikliteratur. Wichtig ist vielleicht die Spannung, mit der gearbeitet wird: 5 Volt. Dieser Wert wird auch als »TTL-Pegel« bezeichnet.

Darüber hinaus gibt es die CMOS-Ausführungen hierzu. Deren Bezeichnungen beginnen mit »40«. CMOS-Ausführungen haben einen weiten Versorgungsspannungsbereich (3 Volt bis 15 Volt).

Für jede dieser Logik-Funktionen gibt es eine *Wahrheitstabelle*. Diese gibt an, bei welchen Zuständen an den Eingängen welche Resultate am Ausgang erzielt werden. Dabei werden alle Zustände systematisch dargestellt.

Da die Logik-Funktionen von der booleschen Algebra abstammen, werden teilweise die Zustände »wahr« und »nicht wahr« verwendet. In der Technik schreibt man einfach »0« und »1«, also »aus« und »ein«.

Für die Logik-Funktionen gibt es genormte Symbole, sowohl solche nach DIN-EN-Normen als auch international gebräuchliche. Wenn Sie sich eingehender damit beschäftigen möchten, werden Sie wohl beide Versionen erlernen.

Abbildung 12.42 zeigt Ihnen die Symbole (nach DIN-EN), die Wahrheitstabellen und Zeitdiagramme der Logik-Funktionen.

Logikschaltungen, Verknüpfungen

- **UND/AND**
  Der Ausgang führt 0, wenn ein Eingang 0 aufweist.
  Der Ausgang führt 1, wenn beide Eingänge 1 aufweisen.
- **ODER/OR**
  Der Ausgang führt 0, wenn alle Eingänge 0 aufweisen.
  Der Ausgang führt 1, wenn mindestens ein Eingang 1 aufweist.
- **NICHT-UND/NAND**
  Der Ausgang führt 0, wenn alle Eingänge 1 aufweisen.
  Der Ausgang führt 1, wenn mindestens ein Eingang 0 aufweist.
- **NICHT-ODER/NOR**
  Der Ausgang führt 0, wenn mindestens ein Eingang 1 aufweist.
  Der Ausgang führt 1, wenn alle Eingänge 0 aufweisen.
- **XOR**
  Der Ausgang führt 0, wenn beide Eingänge gleich sind (1 und 1 oder 0 und 0).
  Der Ausgang führt 1, wenn beide Eingänge ungleich sind (1 und 0).
- **EXOR/XNOR/Äquivalenz/Gleichheit**
  Der Ausgang führt 0, wenn beide Eingänge ungleich sind (1 und 0).
  Der Ausgang führt 1, wenn beide Eingänge gleich sind (1 und 1 oder 0 und 0).

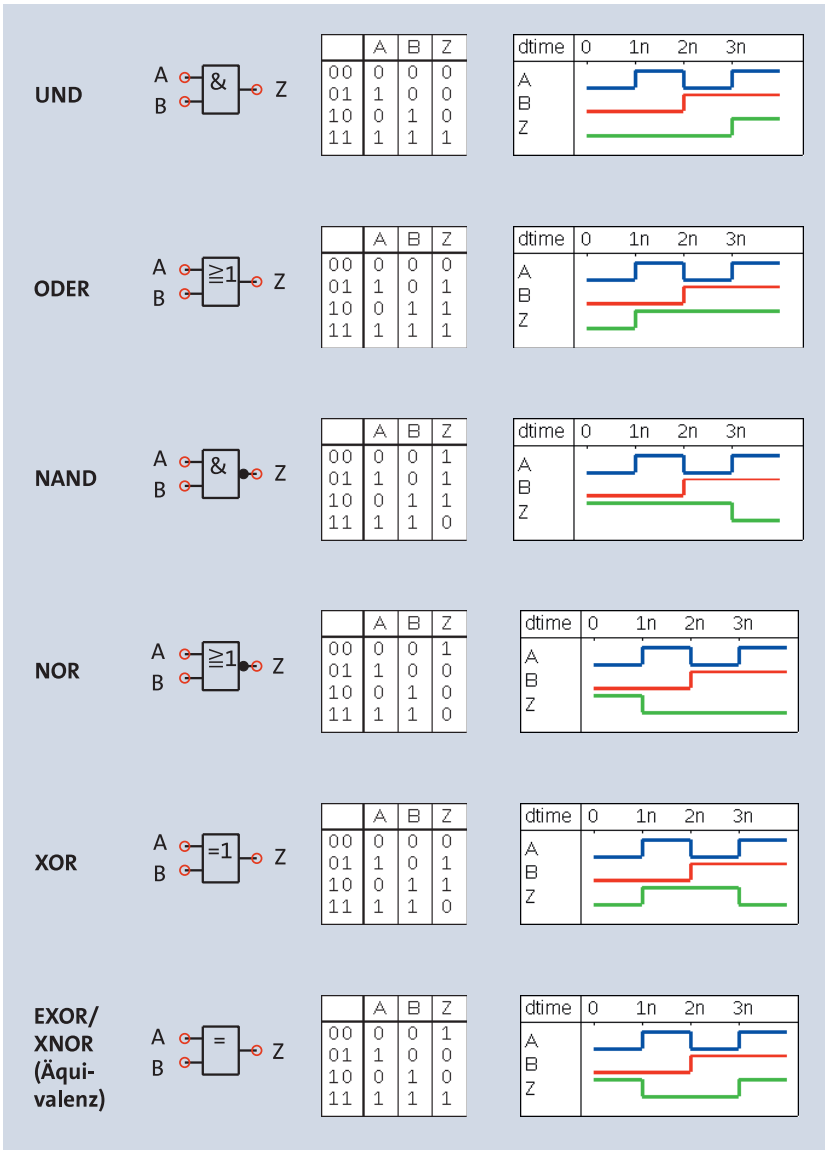


Abbildung 12.42 Symbole, Wahrheitstabellen und Zeitdiagramme von Logik-Schaltelementen



Experimente mit Gattern

Experimente mit Gattern lassen sich einfach mit einem Simulationsprogramm durchführen. Natürlich können Sie sich die notwendigen Bausteine zusammen mit einer 5-Volt-Spannungsquelle beschaffen und am Steckbrett Ihre Experimente durchführen.

Abbildung 12.43 zeigt Ihnen, wie Sie mit dem QucsStudio eine Gatterschaltung simulieren können, die mit Transistoren aufgebaut wurde. Die Abbildung zeigt ein NOR-Gatter. Im zweiten und dritten Zeitabschnitt der Simulation liegt immer an einem der Eingänge Spannung an, worauf am Ausgang keine Spannung anliegt. Nur wenn beide Eingänge spannungsfrei sind, liegt auch eine Ausgangsspannung vor.

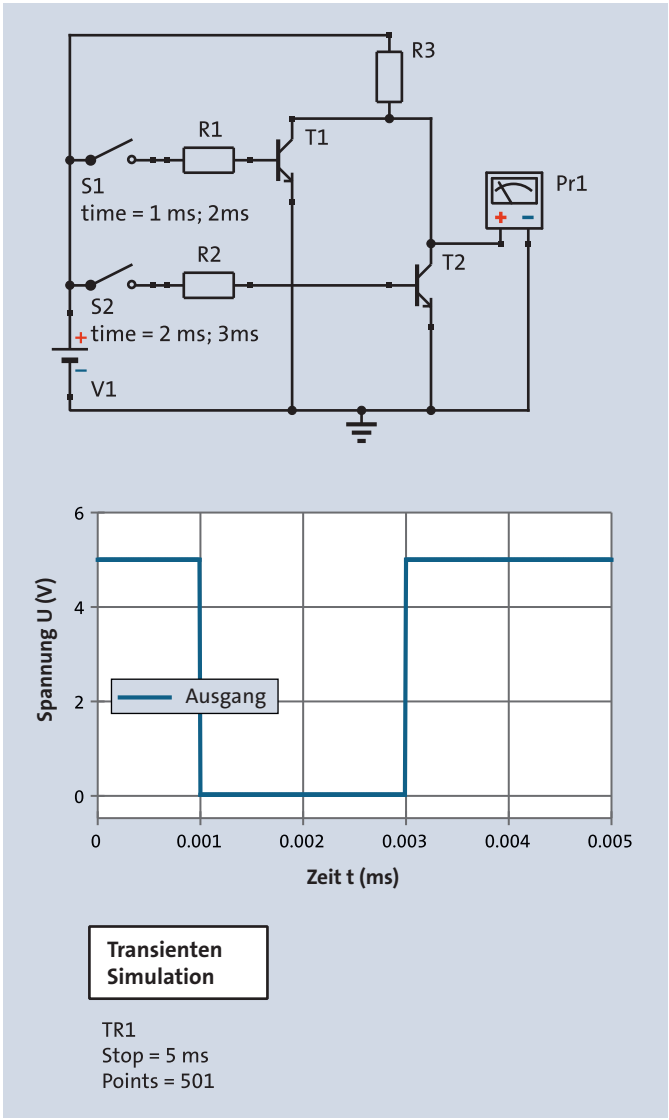


Abbildung 12.43 Gattersimulation mit Transistor

Selbstverständlich können Sie in diesen Simulationsprogrammen auch Ihre digitalen Schaltungen ausgiebig testen. Abbildung 12.44 zeigt Ihnen die Arbeitsweise genauer.

Die Eingänge der Gatter bekommen eine »Drahtbezeichnung« zugewiesen, genauso der Ausgang der Schaltung. Auf diesem Weg können die Ein- und Ausgangszustände in diversen Ergebnistabellen und -diagrammen berücksichtigt werden (siehe Abbildung 12.45).

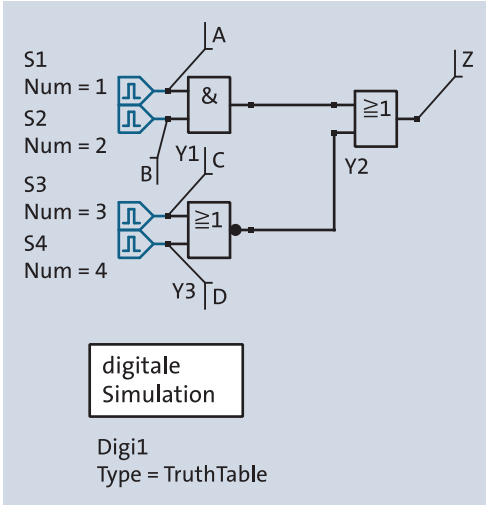


Abbildung 12.44 Gattersimulation mit QucsStudio

	A	B	C	D	Z
0000	0	0	0	0	1
0001	1	0	0	0	1
0010	0	1	0	0	1
0011	1	1	0	0	1
0100	0	0	1	0	0
0101	1	0	1	0	0
0110	0	1	1	0	0
0111	1	1	1	0	1
1000	0	0	0	1	0
1001	1	0	0	1	0
1010	0	1	0	1	0
1011	1	1	0	1	1
1100	0	0	1	1	0
1101	1	0	1	1	0
1110	0	1	1	1	0
1111	1	1	1	1	1

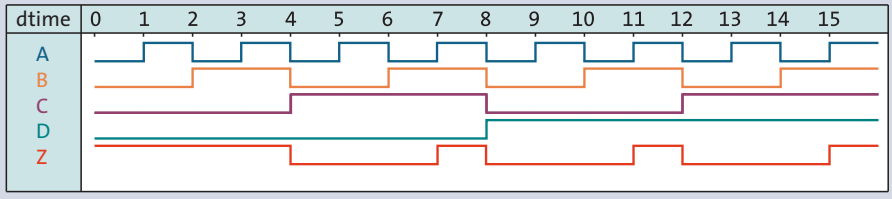


Abbildung 12.45 Ergebnisse: Wahrheitstabelle und Zeitverlauf-Diagramm

Kapitel 13
Die Elektronenröhre

Nostalgie? Nein, die Röhre (siehe Abbildung 13.1) hat noch lange nicht ausgedient. Viele Audiophile schwören auf den unverfälschten Klang, den Röhrenverstärker liefern. Auch Gitarristen lieben den Röhrenverstärker. Geht der Röhre die Puste aus, »schämt« sie sich, wird rot. Der Halbleiterblock hingegen regelt entweder ab oder geht ganz einfach kaputt.



Abbildung 13.1 Elektronenröhre

Auch einige Funker schätzen die Röhre als Sendeverstärker. Die »PAs« (*Power Amplifier*) sind einfach aufgebaut und robust und wartungsarm konstruiert. Diese Leistungsverstärker zeichnen sich durch ihre unkomplizierte Bauweise aus und erfordern keine komplexen Steuerungssysteme zur Überwachung. Natürlich, im Zeitalter der Power-MOSFETs, die ähnliche Eigenschaften aufweisen, ist hier praktisch wenig Unterschied mehr zur Röhre feststellbar.

Die Röhre war das erste aktive Bauteil der Elektronik, das sich zur Verstärkung von Signalen eignet (abgesehen vom Telegrafie-Relais).

Die Röhren bestehen meist aus einem gasgefüllten oder evakuierten Glaskörper. Darin befindet sich die beheizte Kathode.

An der Kathode herrscht Elektronenüberschuss. (Erinnern Sie sich: Die technische und die physikalische Stromrichtung sind entgegengesetzt!) Um die Elektronen nun zum Verlassen der Kathode zu bewegen, wird diese mit einem Glühfaden beheizt (siehe Abbildung 13.2).

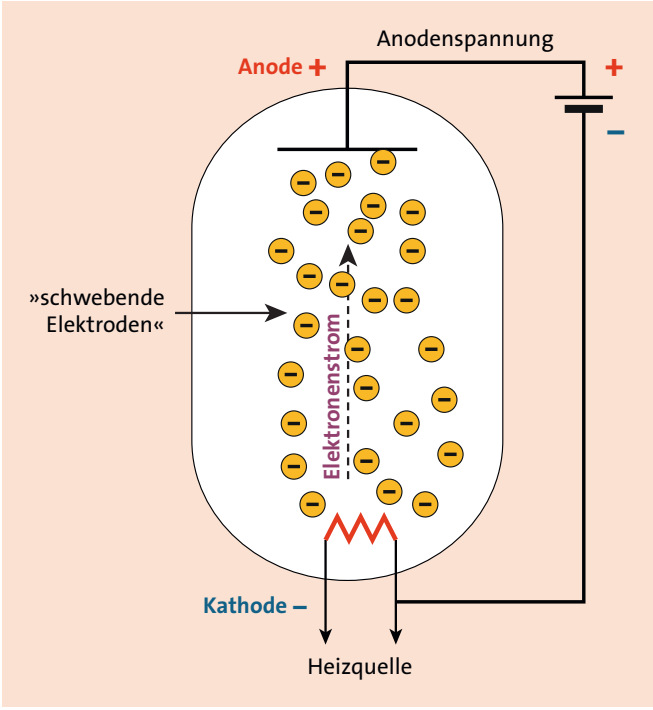


Abbildung 13.2 Funktion der Elektronenröhre

Das Gitter zwischen Anode und Kathode dient zur Steuerung der Elektronenströmung (Abbildung 13.3).

Der Anodenstrom wird durch ein von der Gitterspannung hervorgerufenes elektrisches Feld gesteuert.

Eine sehr geringe negative Spannung am Gitter lässt die Elektronen ziemlich ungehindert passieren. Je negativer die Spannung am Gitter wird, desto weniger Elektronen passieren das Gitter (der Anodenstrom sinkt).

Wird die Anodenspannungsquelle umgepolt, fließt kein Elektronenstrom. Die dann überschüssigen Elektronen an der Anode werden mangels Heizung nicht emittiert.

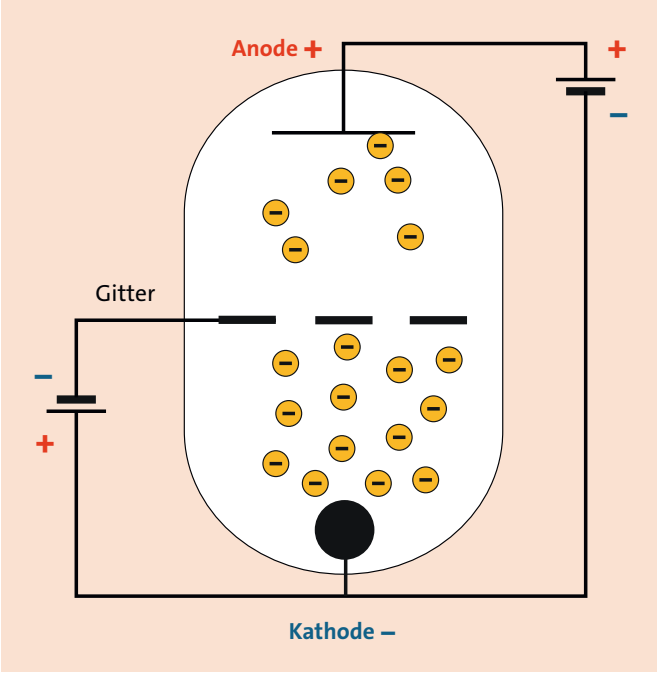


Abbildung 13.3 Aufbau und Funktion einer Triode

Spannungs- und Stromverhältnisse bei Röhren

- **Vorsicht, Lebensgefahr:** Die Anodenspannung einer Röhre kann je nach Typ und Einsatz zwischen 100 und über 2.000 Volt betragen! Achten Sie auf Ihre Sicherheit, wenn Sie an Röhrengeräten arbeiten!
- Röhren verfügen entweder über eine indirekt oder direkt beheizte Kathode. Für diese Heizung benötigt man meist eine Spannung von 6,3 Volt bei rund 300 mA Heizstrom.
- Der Anodenstrom beträgt bei kleineren Röhren zwischen 1 und 20 mA. Bei Leistungsröhren fließt natürlich ein höherer Anodenstrom.

Kapitel 14
Schaltungskunde: Stromversorgung

Funkgeräte, Empfänger und das ganze »Drumherum« benötigen eine Stromversorgung.

Die meisten Geräte sind heute für den Anschluss an Gleichspannung konstruiert, wenige besitzen ein internes Netzteil. Es gibt aber auch Sonderformen der Stromversorgung. So kann über das Antennenkabel ein Vorverstärker mit der notwendigen Betriebsspannung versorgt werden. Das Hochfrequenzsignal und die Versorgungsspannung werden dabei entkoppelt und kommen sich nicht in die Quere.

14.1 Schaltnetzteil vs. klassische Längsregelung

Sie können Netzteile auf zwei Arten bauen. Die ältere, klassische Bauweise besteht aus einem (mehr oder weniger großen und schweren) Transformator, einer Gleichrichtung, Spannungsglättung und -stabilisierung. Dieses Netzteil liefert Gleichspannung. Die regelnden Halbleiter und der Transformator setzen einen Teil der Energie in Form von Wärme frei.

Bei ungünstiger Auslegung kann die Ausgangsspannung mit einer geringen Restwelligkeit (*Brummspannung*) von 50 Hz oder 100 Hz überlagert sein.

Moderne »Schaltnetzteile« zerhacken die eingehende (Netz-)Spannung mit einer hohen Frequenz. Oder, technisch korrekter: Sie modulieren die eingehende Netzspannung mit einer hohen Frequenz. Diese Netzteile sind relativ kompakt, leicht und energieeffizient. Aus dem großen Transformator wird ein kleiner Übertrager.

Leider können diese Netzteile den Funkempfang empfindlich stören. Der Schwingungserzeuger für das »Zerhacken« kann auch Oberwellen erzeugen. Werden diese nicht durch entsprechende Filterschaltungen zurückgehalten, strahlen sie über die Kabel ab.

14.2 Berechnung einfacher Versorgungsschaltungen

Abbildung 14.1 zeigt Ihnen die einfachste Form eines Gleichspannungsnetzteils. Die Netzspannung wird mittels des Transformators auf die gewünschte Spannung herab-

oder heraufgesetzt. Die Diode richtet den Wechselstrom gleich. Sie lässt nur die positiven Halbwellen passieren. Der Kondensator puffert und glättet die Halbwellen. Die Schaltung weist aber eine hohe Restwelligkeit auf! Zudem führen solche nicht stabilisierten Netzteile eine deutlich höhere Leerlaufspannung.

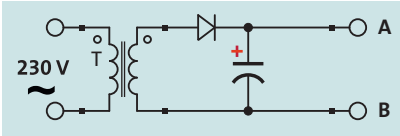


Abbildung 14.1 Trafo mit Einweggleichrichtung und Kondensator

Übung

Gesucht ist die Leerlaufspannung bei folgenden bekannten Werten:

- Eingangsspannung des Transformators: 230 V
- Übersetzungsverhältnis des Transformators: 8 : 1

Lösung:

Zunächst ermitteln Sie die Spannung der Sekundärseite des Transformators.

Am Übersetzungsverhältnis erkennen Sie, ob die Spannung heruntertransformiert- (N : 1) oder hochtransformiert (1 : N) wird.

Wird die Spannung heruntertransformiert, teilen Sie die Eingangsspannung einfach durch den Wert N:

Sekundärspannung des Trafos:

230 [÷] 8 [=]

Zwischenergebnis: 28,75 Volt

Um nun an den Spitzenwert (= *Scheitelspannung*) zu gelangen, multiplizieren Sie diese Spannung mit der Wurzel aus 2 (ca. 1,41):

Eingabe je nach Taschenrechnermodell:

- [√] 2 [=] [×] 28,75 [=]

  bzw. so:
- 2 [√] [×] 28,75 [=]

Ergebnis: 40,54, also ca. 40 Volt.

14.3 Gleichrichtung

Elektronische Schaltungen benötigen für ihren Betrieb Gleichspannung. Aus diesem Grunde muss die Wechselspannung gleichgerichtet werden. Dies geschieht heute

mit Halbleiterdioden. Röhrendioden und andere Konstrukte wie der Quecksilbergleichrichter finden sich nur noch in musealer Umgebung.

Die Einweggleichrichtung besteht nur aus einer einzigen Diode. Diese halbiert quasi die Sinusschwingung und lässt nur eine Halbwelle passieren. Zwischen diesen Halbwellen bleiben Spannungslücken bestehen. Die Frequenz der pulsierenden Gleichspannung ändert sich hierbei nicht. Es bleibt hier bei den in Mitteleuropa üblichen 50 Hz.

Abbildung 14.2 zeigt Ihnen die Einweggleichrichtung.

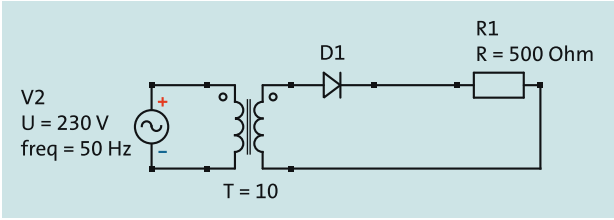


Abbildung 14.2 Einweggleichrichtung

Den Spannungsverlauf der Einweggleichrichtung sehen Sie in Abbildung 14.3. Deutlich erkennen Sie die Lücke, die die fehlende Halbwelle hervorruft.

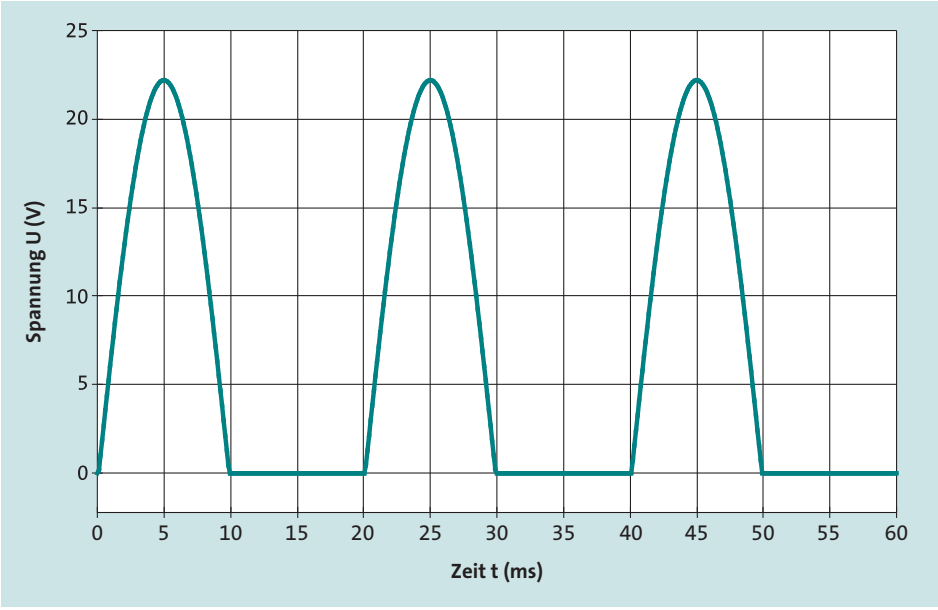


Abbildung 14.3 Spannungsverlauf der Einweggleichrichtung

Um diese »Halbwellenpause« zu umgehen, können Sie entweder die Zweiweggleichrichtung oder den Brückengleichrichter benutzen.

Für die *Zweiweggleichrichtung* benötigen Sie den passenden Transformator. Dieser verfügt sekundärseitig entweder über eine Mittelanzapfung oder über zwei identische Wicklungen. Diese Mittelanzapfung stellt das Massepotenzial bereit, während am Anfang und Ende der zusammengeschalteten Sekundärspule die Halbwellen gleichgerichtet werden. Dabei haben diese Enden eine um 180° verschobene Phasenlage. Da dies in der gleichen Zeit geschieht wie bei der Einweggleichrichtung, verdoppelt sich die Frequenz der Brummspannung auf 100 Hz (hier in Mitteleuropa).

Für die Zweiweggleichrichtung gibt es zwei Schaltbilder, die Sie sich für die Funkpraxis einprägen sollten (siehe Abbildung 14.4). Achten Sie auf die Einbaulage der Dioden und die Polarität.

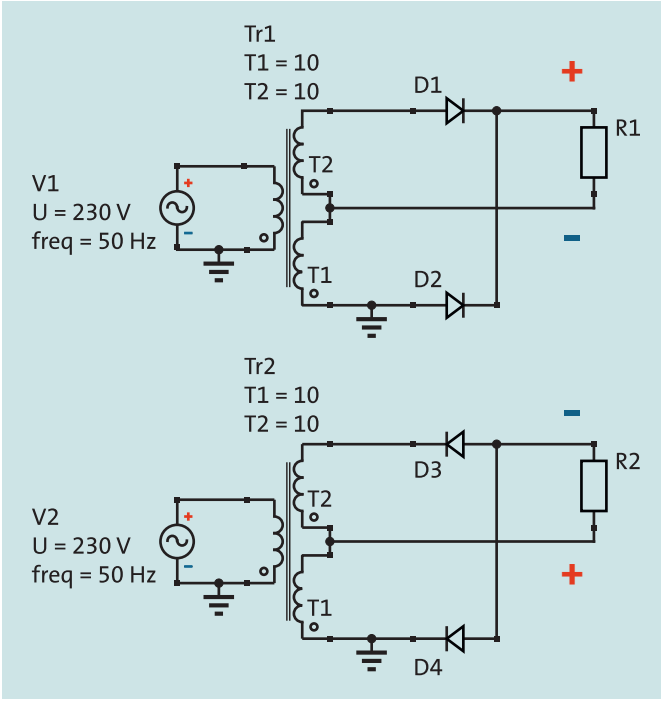


Abbildung 14.4 Zweiweggleichrichtung

Die gleichgerichtete, aber noch nicht geglättete Spannung ist in Abbildung 14.5 wiedergegeben.

Ohne Transformator mit Mittelanzapfung funktioniert die Brückengleichrichtung (auch Graetzschaltung, Zweipuls-Brückenschaltung oder B2 genannt). Sie besteht aus vier Dioden. Der Strom fließt jeweils durch zwei Dioden.

Diese Gleichrichter können Sie mit vier identischen Dioden oder einem fertigen *Blockgleichrichter* aufbauen. Den »Block« gibt es in bedrahteter (siehe Abbildung 14.6) und in SMD-Ausführung.

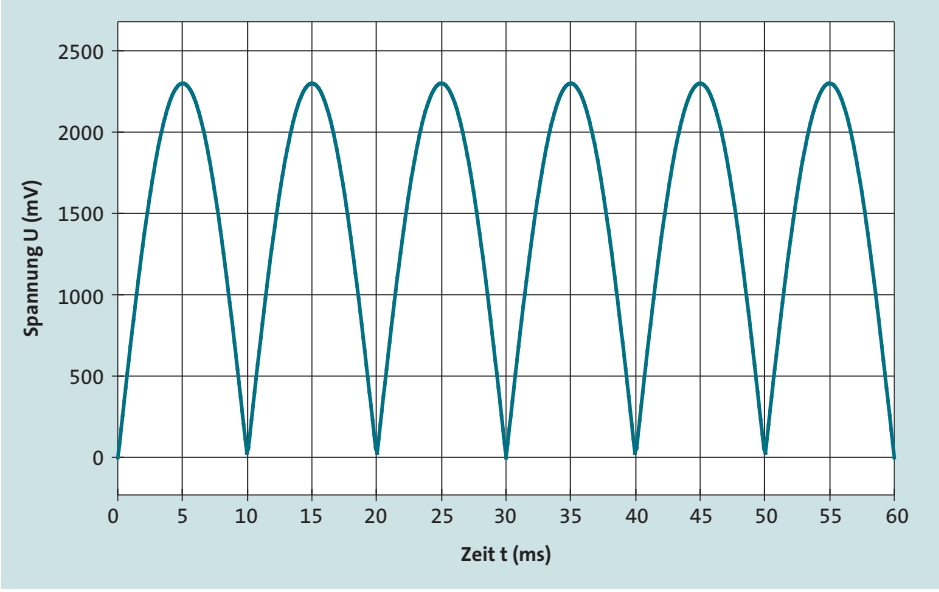


Abbildung 14.5 Spannungsverlauf für die Zweiweg- und Brückengleichrichtung

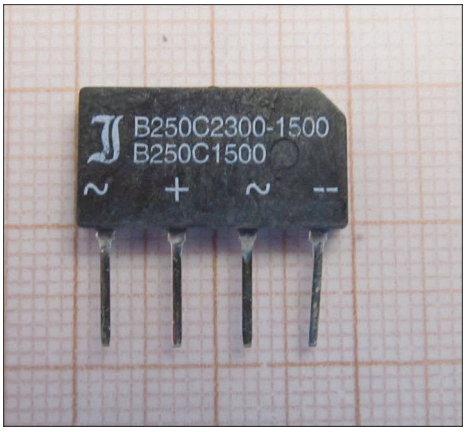


Abbildung 14.6 Brückengleichrichter

Brückengleichrichter tragen eine Bezeichnung, aus der ihr Leistungsvermögen hervorgeht. Die aufgeschlüsselten Werte des in Abbildung 14.6 gezeigten Modells haben folgende Bedeutung:

- B = Brückenschaltung
- 250 = maximale Anschlussspannung (Effektivwert)
- C = Kondensatorlast
- 1500 = maximaler Kondensatorstrom (Dauer) in mA

Abbildung 14.7 zeigt Ihnen die Schaltung. Andere Darstellungen der Diodenanordnung (»Raute«) sind hier zusätzlich zu sehen.

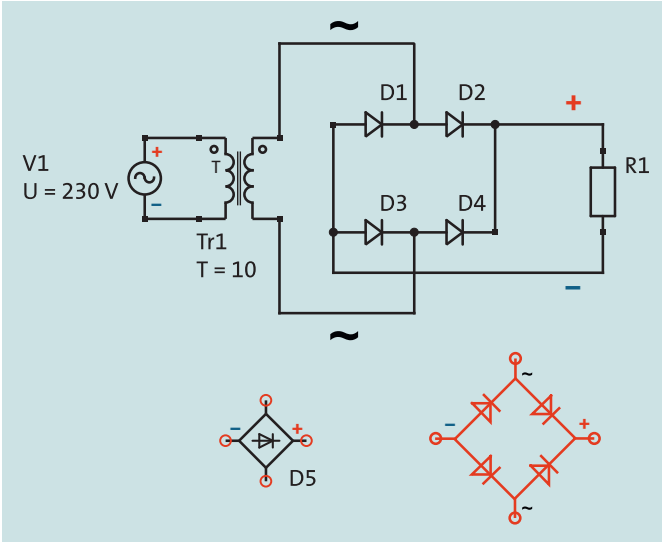


Abbildung 14.7 Schaltung und Schaltbilder eines Brückengleichrichters

Einen Brückengleichrichter erkennen Sie an diesen Merkmalen:

- **Minus**: Zwei Dioden zeigen »weg«.
- **Plus**: Zwei Dioden zeigen »zusammen«.
- **Wechselspannung**: Sie liegt innerhalb einer 2er-Diodenstrecke.

Darüber hinaus finden Sie die Darstellung in einer geometrisch anderen Anordnung sowie ein vereinfachtes Symbol für den Brückengleichrichter.

Das Ergebnis dieser Gleichrichtung finden Sie in Abbildung 14.5.

Gleichrichterschaltungen im Vergleich

Einweggleichrichtung

- Frequenz der Brummspannung: 50 Hz
- Spannungsabfall an Gleichrichtung: 1 Diodenspannung (z. B. 0,7 Volt bei Silizium)
- Glättungskondensator: Es ist eine hohe Kapazität erforderlich, da eine »Pause« von einer Halbwelle überbrückt werden muss.
- Leerlaufspannung: Scheitelwert der Wechselspannung

Zweiweggleichrichtung

- Frequenz der Brummspannung: 100 Hz
- Spannungsabfall an Gleichrichtung: 1 Diodenspannung

- Glättungskondensator: Im Vergleich zur Einweggleichrichtung ist die halbe Kapazität erforderlich.
- Es ist ein Transformator mit Mittelanzapfung oder zwei identischen Sekundärwicklungen notwendig.
- Leerlaufspannung: 0,9-Faches der Wechselspannung (Effektivwert)

Brückengleichrichter

- Frequenz der Brummspannung: 100 Hz
- Spannungsabfall an Gleichrichtung: 2 Diodenspannungen
- Glättungskondensator: Im Vergleich zur Einweggleichrichtung ist die halbe Kapazität erforderlich.
- Leerlaufspannung: Sie beträgt das 0,9-Fache der Wechselspannung (Effektivwert).

Anforderung an die Diode(n)

- Spannungsfestigkeit: 2-facher Scheitelwert der Wechselspannung
- Strombelastbarkeit: Die Diode soll mindestens den maximalen Ladestrom des Glättungskondensators verkraften

14.4 Gleichspannungsrückgewinnung bzw. Spannungsvervielfacher

Man kann aus einer Wechselspannung eine sinusförmige Gleichspannung gewinnen. Mit einer Schaltung (siehe Abbildung 14.8), die aus einem Kondensator und einer Diode besteht, »heben« Sie die Wechselspannung über die Null-Linie. Das Signal an sich bleibt dabei erhalten. Diese Schaltung ist unter dem Begriff *Klemmschaltung* bekannt.

In der Praxis werden Sie diese Schaltung um weitere Elemente erweitern, um z. B. eine Spannungsvervielfachung aufzubauen.

Wenn Sie in dieser Schaltung einen normalen Elektrolytkondensator verwenden, achten Sie hier unbedingt auf die Polarität beim Einbau.

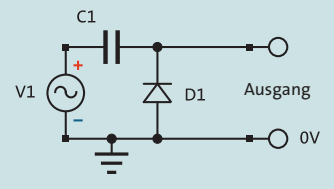


Abbildung 14.8 Klemmschaltung

Abbildung 14.9 zeigt Ihnen die Spannungsverhältnisse bei dieser Schaltung. Die Sinuskurve mit ihren positiven und negativen Halbwellen (blau) wird über die Null-Linie »gehoben« (rot). Allerdings benötigt die Schaltung eine Einschwingzeit von einer Periode, weil zunächst der Kondensator geladen werden muss. Zudem ist die durch den Kondensator hervorgerufene Phasenverschiebung um 180° anhand des Wellenverlaufs erkennbar.

Beim gezeigten Beispiel beträgt die Spannung am Transformator 18 Volt bei 50 Hz. Diese wird gegenüber der Null-Linie annähernd verdoppelt.

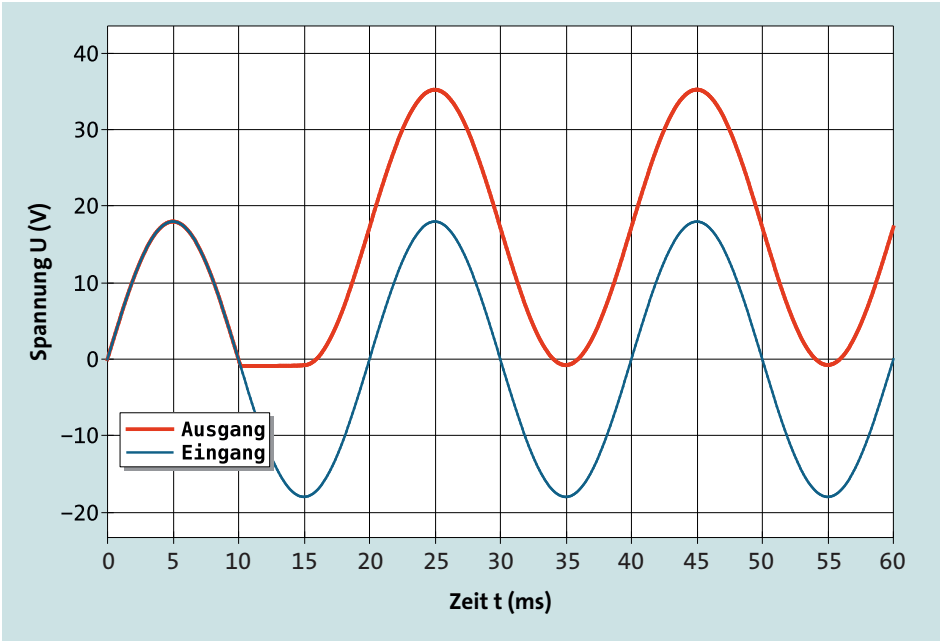


Abbildung 14.9 Spannungsverlauf der Klemmschaltung

Wenn Sie die Schaltung um eine Diode und einen weiteren (Elektrolyt-)Kondensator erweitern, dann erhalten Sie einen *Spannungsverdoppler*. Die in Serie zum ersten Kondensator liegende Diode wirkt dabei als Gleichrichter, der zweite Kondensator glättet die Spannung. Die Schaltung sehen Sie in Abbildung 14.10, die Ein- und Ausgangsspannungen in Abbildung 14.11.

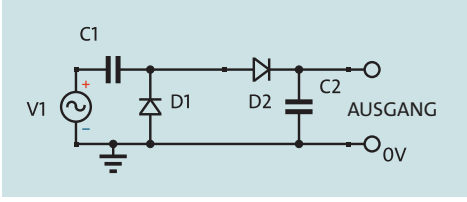


Abbildung 14.10 Schaltung eines Spannungsverdopplers

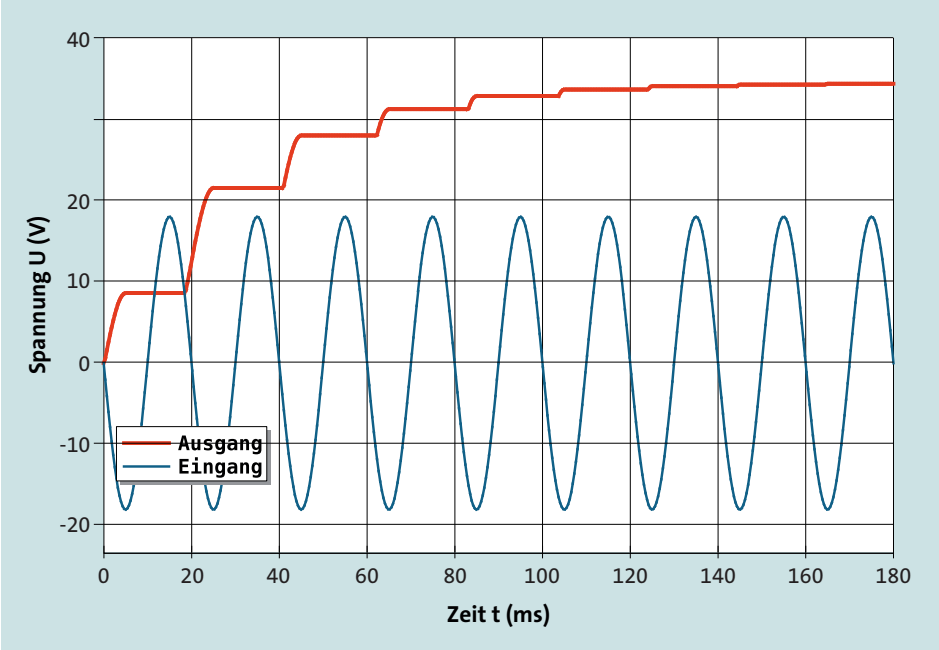


Abbildung 14.11 Spannungsverläufe am Spannungsverdoppler

14.5 Spannungsglättung

Eine gleichgerichtete Spannung besteht aus Halbwellen. Damit funktionieren ein Gleichstrommotor oder eine Glühlampe, nicht unbedingt aber ein elektronisches Gerät. Die Spannung muss zumindest geglättet werden. Dazu verwendet man einen Elektrolytkondensator und gegebenenfalls eine Drossel (siehe Abbildung 14.12).

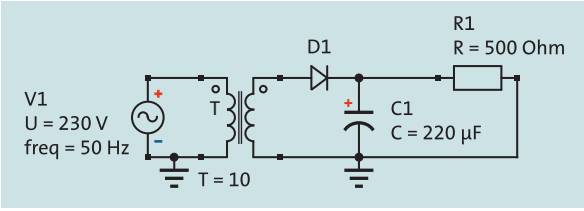


Abbildung 14.12 Einweggleichrichter mit Spannungsglättung

Abbildung 14.13 zeigt das Ergebnis dieser Glättung anhand der Schaltung mit dem Einweggleichrichter.

Sie sehen dabei immer noch eine kräftige Spannungsänderung. Der Kondensator muss nach dem Einschalten der Spannung zudem erst einmal geladen werden, was den verzögerten Spannungsanstieg erklärt.

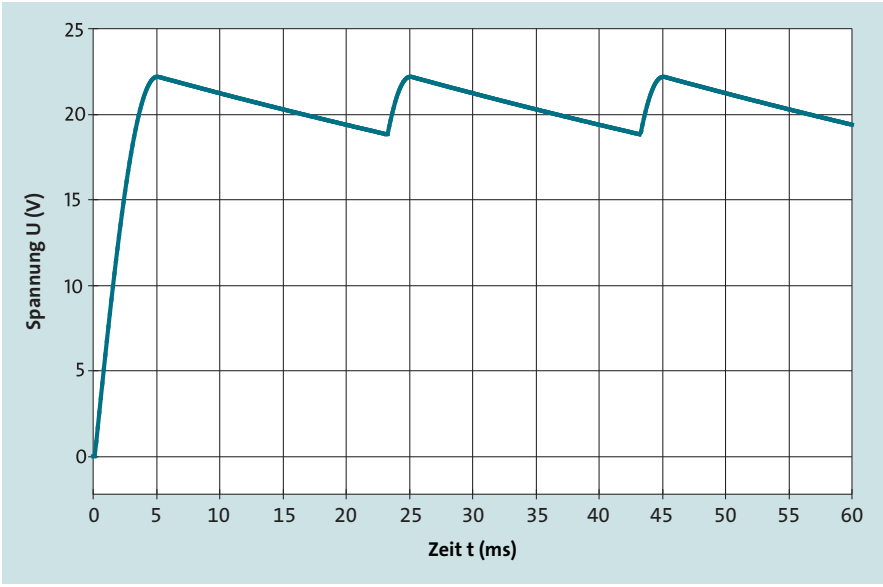


Abbildung 14.13 Geglättete Gleichspannung beim Einweggleichrichter

Betrachten Sie im Vergleich hierzu das Diagramm der Brückengleichrichtung bei gleichen elektrischen Werten (siehe Abbildung 14.14). Hier wirkt die Kapazität des Kondensators ja doppelt (der Wert wurde gegenüber der Einweggleichrichtung nicht verändert). Die *Brummspannung* liegt hier deutlich niedriger, weil der Kondensator nicht so weit entladen wird.



Abbildung 14.14 Geglättete Gleichspannung beim Brückengleichrichter

Die Spannungsfestigkeit des Elektrolytkondensators muss mindestens

$$U_C = U_{\text{Trafo}} \times \sqrt{2}$$

betragen. Überschlägig multiplizieren Sie die Trafospannung mit 1,41. Den Spannungsverlust der Gleichrichterdioden lassen wir hier außer Acht. Nehmen Sie in der Praxis den nächsthöheren Spannungswert, den der Hersteller anbietet.

14.6 Spannungsregelung

Mit dem Glättungskondensator allein steht noch keine stabile Gleichspannung zur Verfügung. Mittels Transistoren oder Halbleiterreglern muss die Spannung stabilisiert werden. Dies reduziert zum einen die Brummspannung noch weiter, und zum anderen werden in einem gewissen Rahmen lastbedingte Spannungsschwankungen ausgeglichen.

Moderne Netzteilkonzepte bieten hier sogar noch eine einstellbare Stromstärke, die diesen Geräten Kurzschlussfestigkeit verleiht.

Eine einfache, minimale Schaltung hierzu finden Sie in Abbildung 14.15. Der umrahmte Teil zeigt den Kern der Regelung. Anhand der Spannungsangabe für die Z-Diode erkennen Sie die ungefähre Ausgangsspannung, hier also 5 Volt.

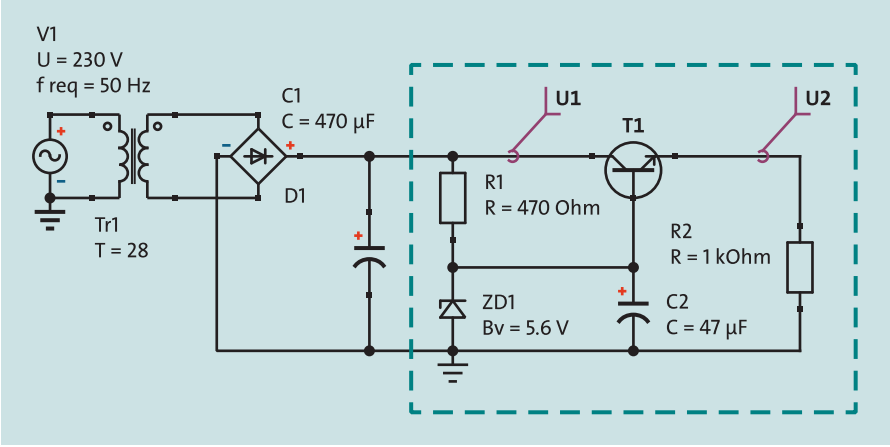


Abbildung 14.15 Einfache Spannungsregelung

Die Z-Diode ZD1 sorgt zusammen mit dem Widerstand R1 für die notwendige Basisspannung für T1, die mit C2 gepuffert wird, damit die Regelung sanft arbeitet. Abbildung 14.16 zeigt Ihnen die Eingangsspannung, gemessen am Glättungskondensator, und die stabilisierte Ausgangspannung, die knapp unter 5 Volt liegt. Sie sehen, dass nach einer Anlaufzeit, in der die Kondensatoren sich aufgeladen haben, die Aus-

gangsspannung quasi keine Brummspannung mehr aufweist. Mit dieser Schaltung könnten Sie bereits kleine elektronische Geräte betreiben.

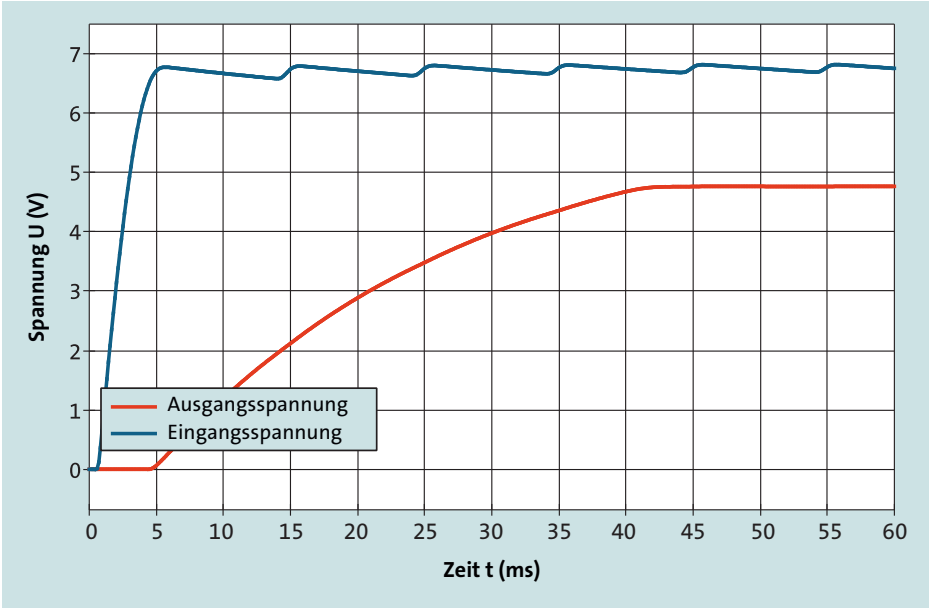


Abbildung 14.16 Wirkung der Stabilisierungsschaltung

Die eben gezeigte Schaltung eignet sich vor allem für die Versorgung kleiner Geräte mit geringerer Stromaufnahme. Die Schaltung aus Abbildung 14.17 stellt schon etwas mehr Energie zur Verfügung. In der Praxis werden Sie dies eleganter mittels Spannungsregler-IC umsetzen.

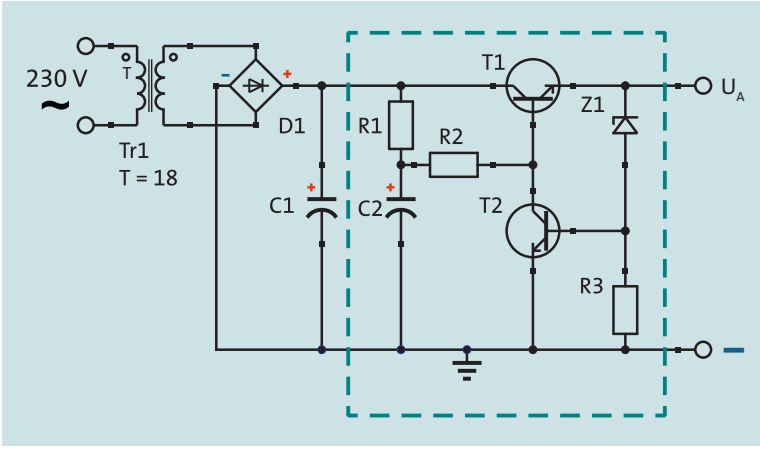


Abbildung 14.17 Netzteil mit verbesserter Spannungsregelung

Die Schaltung nach Abbildung 14.17 funktioniert wie folgt:

- Sinkt die Ausgangsspannung, so erhält Transistor T2 über die Z-Diode Z1 weniger Strom und leitet dadurch weniger.
- Durch den verminderten Kollektorstrom von T2 verringert sich der Spannungsabfall an R1/R2, die Basisspannung von T1 steigt und somit auch die Emitterspannung.

14.7 Spannungsregelung mit Festspannungsreglern

Anstatt eine Schaltung mit einzelnen Transistoren aufzubauen, greift man heute für kleine Stromversorgungen auf Festspannungsregler zurück. Da diese meist mit drei Anschlüssen auskommen, sehen sie Transistoren ähnlich.

Bekannte Typen gehören zur Serie 78XX für positive Ausgangsspannung bzw. zur Serie 79XX für negative Ausgangsspannung. Sie erhalten Ausführungen für 5 V, 6 V, 8 V, 9 V, 12 V, 15 V, 18 V und 24 V. Die Spannungsangabe erfolgt zweistellig.

Darüber hinaus unterscheiden sich die »Dreibeiner« durch den Abgabestrom (siehe Tabelle 14.1). Diese Angabe bei den größeren Ausführungen bezieht sich auf eine gekühlte Montage (auf einem Kühlblech eben).

Typ	Maximale Stromabgabe (gekühlt)
78LXX	0,1 A
78MXX	0,5 A
78XX	1 A
78SXX	2 A
78TXX	3 A
78HXX	5 A

Tabelle 14.1 Kennzeichnung der Stromabgabe bei Festspannungsreglern

Ein Beispiel für einen Festspannungsregler für 12 Volt und 3 Ampere ist der 78T12.

Die Eingangsspannung für diese Regler sollte mindestens 3 Volt über der Ausgangsspannung liegen, aber nach Möglichkeit auch nicht viel höher. Bei einer höheren Eingangsspannung steigt die Wärmeabgabe des Spannungsreglers teilweise erheblich an (Verlustleistung).

Normalerweise liegt die Ausgangsspannung 1 bis 3 Volt unter der Eingangsspannung.

Es gibt natürlich verlustarme, teilweise anschlusskompatible »Low-Drop«-Spannungsregler, die über weitere Verbesserungen verfügen (z. B. der L4940XX).

Auffallend bei all diesen Spannungsreglern ist der Umstand, dass die Kapazität des Glättungskondensators sehr niedrig ist. Die Brummspannung wird durch die Schaltung selbst vermindert.

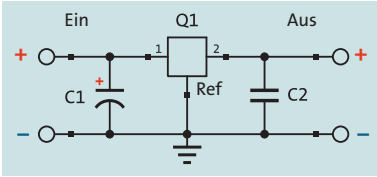


Abbildung 14.18 Spannungsregelung mit Festspannungsregler

Abbildung 14.18 zeigt Ihnen den Einsatz eines Festspannungsreglers. Nicht mit dargestellt wurden der Transformator und der Brückengleichrichter.

Wenn Sie nicht den passenden Festspannungsregler zur Hand haben, sondern nur einen für eine niedrigere Ausgangsspannung als die gewünschte, gibt es einen Ausweg. Sie legen den Regler »hoch«. Das heißt: Mit einigen zusätzlichen Bauelementen stellen Sie die gewünschte Ausgangsspannung einfach ein.

Wenn Sie lediglich über einen Festspannungsregler verfügen, dessen Ausgangsspannung niedriger ist als die von Ihnen benötigte, gibt es eine praktische Lösung: Sie können die Ausgangsspannung des Reglers »anheben«. Durch Hinzufügen einiger zusätzlicher Bauelemente lässt sich die gewünschte höhere Ausgangsspannung realisieren. Das Anheben der Ausgangsspannung erfolgt, indem der GND-Pin (Ground oder Minuspol) des Spannungsreglers nicht direkt mit dem Minuspol der Versorgung verbunden, sondern stattdessen an einen positiven Spannungswert gelegt wird. Die Summe dieser positiven Spannung und der Standard-Abgabespannung des Reglers ergibt die modifizierte, höhere Ausgangsspannung.

Diese Methode ermöglicht es, die Flexibilität von Festspannungsreglern zu erweitern, erfordert jedoch sorgfältige Planung und Berechnung, um sicherzustellen, dass die zusätzlichen Bauelemente korrekt dimensioniert sind und die Gesamtschaltung stabil funktioniert.

Übung

Berechnen Sie die Ausgangsspannung der Schaltung aus Abbildung 14.19.

Lösung:

Sammeln Sie zunächst die bekannten Werte:

- Ausgangsspannung des Festspannungsreglers: 6 Volt
- Spannungsteiler: Widerstände mit 560 Ω und 270 Ω

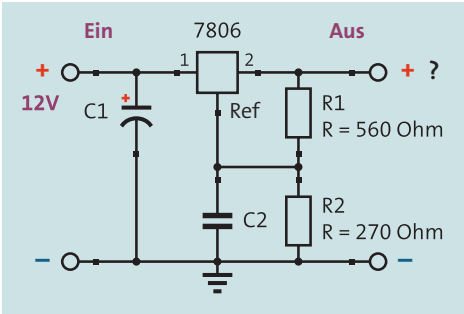


Abbildung 14.19 Festspannungsregler für abweichende Spannung

Mit der Spannungsteilerberechnung (siehe Abschnitt 5.6) berechnen Sie die Spannung zwischen R_1 und R_2, die am GND-Pin anliegt.

Verwenden Sie hierzu diese Formel:

$$U_{\text{Spannungsteiler}} = \frac{U_{\text{Gesamt}} \times R_1}{R_1 + R_2}$$

In den Taschenrechner geben Sie dies so ein:

6 [×] 560 [÷] [(] 560 [+] 270 [)] [=]

Abgelesen: 4,048, entsprechend 4 Volt.

Zu diesen 4 Volt kommen nun die 6 Volt Ausgangsspannung des Ladereglers hinzu: 10 Volt.

Die angenommene Differenz zwischen Ein- und Ausgangsspannung kann zwischen 1 und 3 Volt liegen. Ziehen Sie diese Differenz von den 10 Volt ab.

Sie können höchstens also rund 9 Volt, mindestens aber 7 Volt am Ausgang der Schaltung erwarten. Genaueres erfahren Sie bei einem Blick in das Datenblatt des Spannungsreglers.

Ich möchte noch darauf hinweisen, dass Sie viele »Musterschaltungen« und interessante Hinweise für den Einsatz in den Datenblättern finden können, die die Halbleiterhersteller für ihre Bauelemente bereithalten.

14.8 Die Funktionsweise von Schaltnetzteilen

Schaltnetzteile verkleinern Stromversorgungen für Geräte aller Art. So finden Sie Steckernetzteile, die klein und kompakt sind, aber durchaus mehrere Ampere an Strom liefern. Als klassisch aufgebaute Netzteile würde ein schwerer Klotz entstehen. Allein der Transformator hätte einiges Volumen und Gewicht.

Bei einem Schaltnetzteil wird die eingehende Netzspannung direkt an einen Brückengleichrichter gegeben. Dieses Bauteil muss entsprechend spannungsfest sein: Der Scheitelwert beträgt schließlich 325 Volt! Ein Glättungskondensator hilft hier mehr zum kurzfristigen Ausgleich von Strom- und Spannungsschwankungen.

Anschließend wird die »grobe« und hohe Gleichspannung mit einer Pulsweitensteuerung mit hoher Frequenz »zerhackt« und auf einen räumlich kleinen Transformator zur galvanischen Trennung der restlichen Schaltung vom Stromnetz gegeben. Hier kann mit Frequenzen von mehreren 100 kHz gearbeitet werden. Der Rest der Schaltung wird meist durch moderne Festspannungsregler (oder bei Labornetzteilen einstellbare Spannungsregler) umgesetzt.

Abbildung 14.20 zeigt Ihnen das Grundprinzip eines einfachen Schaltnetzteils.

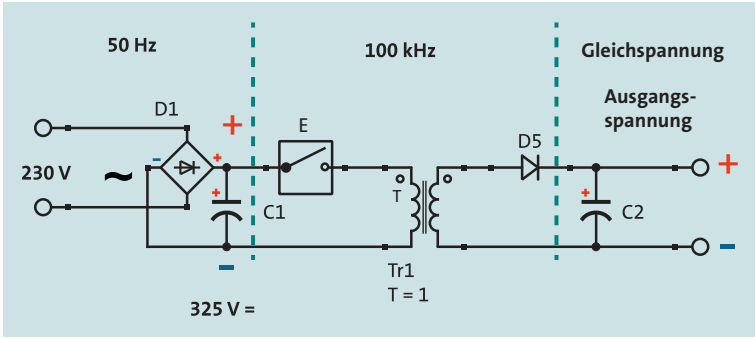


Abbildung 14.20 Grundprinzip eines Schaltnetzteils

14.9 Rückwirkungen in das Stromnetz, Störungen

Funkanlagen, aber auch andere Verbraucher können hochfrequente Signale auf das Stromnetz übertragen. Damit können z. B. in direkter Umgebung der Rundfunk- und Fernsehempfang, aber auch andere elektronische Geräte gestört werden.

Besonders in Verbindung mit HF-Leistungsverstärkern, aber auch mit Funkgeräten müssen Sie auf eine ausreichend dimensionierte HF-Filterung achten. Dies gilt auch für Schaltnetzteile, die den Empfang in der Nachbarschaft lahmlegen können.

Hinweise zu Netzfiltern finden Sie in Abschnitt 10.9.2.

14.10 Hochspannungsgleichrichter

Wenn Sie z. B. für eine mit Röhren aufgebaute Leistungsendstufe für die Anodenspannung eine Gleichrichtung aufbauen, kommen hier hohe Spannungen zum Ein-

satz. Die Sperrspannung einer einzelnen Diode reicht hier unter Umständen nicht aus, sodass Sie mehrere Dioden gleichen Typs hintereinanderschalten werden. Die Sperrspannungen addieren sich hierbei.

Auch bei Dioden gleichen Typs weichen diese Sperrspannungen voneinander ab. Es kann vorkommen, dass eine einzelne Diode in der Kette mit einem über ihrer Sperrspannung liegenden Wert in Berührung kommt. Damit in diesem Fall keine Schäden auftreten, werden hochohmige Widerstände parallel zu den einzelnen Dioden geschaltet (siehe Abbildung 14.21).

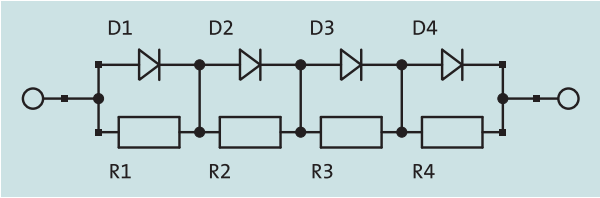


Abbildung 14.21 Parallelwiderstände am Hochspannungsgleichrichter

14.11 Fernspeisung, BIAS-T

Vorverstärker, kleine automatische Antennenanpassgeräte, Aktivantennen und andere aktive Komponenten können Sie über das Antennenkabel per Fernspeisung mit der notwendigen Energie versorgen. Eine separate Versorgungsleitung wird damit eingespart. Der Preis hierfür ist aber eine geringe Einfügedämpfung. Im Grunde handelt es sich um eine Frequenzweiche, die aber hier Gleichspannung und Hochfrequenz bzw. eine niedrige Wechselspannung vom HF-Signal trennt. Die wenigen Bauelemente der Speiseschaltung (siehe Abbildung 14.22) haben verschiedene Aufgaben, die in Tabelle 14.2 erläutert werden.

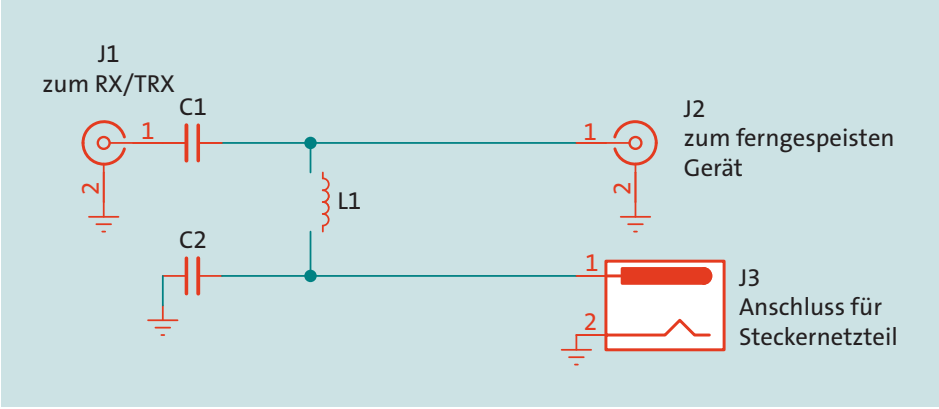


Abbildung 14.22 Fernspeiseweiche

Bauteil	Aufgabe
L1	Blockiert das hochfrequente Nutzsignal, lässt aber die Gleichspannung passieren. Die Drossel muss die passende Strombelastbarkeit aufweisen. Der Wechselstromwiderstand soll im Nutzfrequenzbereich mindestens bei 500 Ω (bei einer 50-Ω-Leitung) oder darüber liegen.
C1	Blockiert die Gleichspannung in Richtung RX/TRX.

Tabelle 14.2 Übersicht über die Bauteile

In der Praxis werden meist zwei Induktivitäten hintereinander geschaltet. Eine von ihnen ist meist auf Ferrit gewickelt und weist eine geringe Eigenkapazität auf, die andere ist eine handelsübliche Festinduktivität. Oftmals werden beiden noch Widerstände (4 bis 6 kΩ) parallelgeschaltet, damit die Eigenresonanz der HF-Drosseln unterdrückt wird. Außerdem finden Sie in der Praxis noch eine LED, die den Betrieb signalisiert, und Spannungstabilisatoren. Achten Sie auf die richtige Polung der Gleichspannung!

Kapitel 15
Grundlagen der elektronischen Schwingungserzeugung

15.1 Oszillator (Schwingungserzeuger)

Oszillatoren benötigt man für Sender, Empfänger, aber auch für die ganze moderne Elektronik allgemein – von der Digitaluhr bis zum Rechner. Ohne Schwingung bewegt sich nämlich nichts in der modernen Elektronik.

Eine Schaltung, die elektrische Schwingungen erzeugt, wird als *Oszillator* bezeichnet.

Um einen Oszillator aufzubauen, sind diese »Zutaten« nowendig:

- ein verstärkendes Bauelement (Transistor, Röhre)
- die Zuführung des Ausgangssignals des verstärkenden Bauelements zum Eingang der Schaltung
- frequenzbestimmende Bauelemente (L, C bzw. Quarz)

Oszillatoren sind selektive Verstärker. Sie verstärken idealerweise eine einzige Frequenz.

Quarzoszillatoren haben den Vorteil, dass sie eine hohe Frequenzstabilität aufweisen. Man setzt sie sowohl in modernen, komplexen Schaltungen zur Erzeugung der notwendigen Grundfrequenzen ein als auch in (sehr einfachen) Funkgeräten.

Ein Quarzoszillator erzeugt in der Regel ein Signal mit nur einer einzigen Frequenz.

Variable Frequenzoszillatoren (VFO) sind abstimmbar. Hier bestimmt ein Schwingkreis (LC) die Resonanzfrequenz der Rückkopplung. Dabei wird meist eine variable Kapazität (z. B. ein Drehkondensator) verwendet. Veränderliche Induktivitäten sind grundsätzlich auch möglich; sie sind aber schwieriger herzustellen und werden deshalb seltener verwendet.

Variable Frequenzoszillatoren sind nicht besonders frequenzstabil. Besonders Temperaturänderungen wirken sich auf sie aus. Steigt die Temperatur an, kann die Kapazität des Schwingkreiskondensators sinken, da sich der Plattenabstand erhöht. Dadurch erhöht sich die Frequenz. Die VFO-Spule (Induktivität) hingegen nimmt durch die Erwärmung zu, die Windungen dehnen sich aus. Dadurch sinkt die Frequenz.

Schwankungen der Versorgungsspannung wirken sich ebenso frequenzändernd aus und verursachen sogenannte *Chirps*. Diese entstehen, weil durch die Schwankungen meist beim Senden die Spannung etwas einbricht, was die Frequenzänderung verursacht. Besonders bei Telegrafiesendern fällt dies sofort auf. Morsezeichen hören sich dann nicht wie »dah-dah«, sondern wie »duiii-duiii« an.

In Eigenbauprojekten werden Sie das VFO-Gehäuse in entsprechend dickes, wärmeisolierendes Material verpacken und damit der Temperaturdrift entgegenwirken.

Übrigens werden bei vielen Funkgeräten in deren Datenblättern Angaben zur Frequenzstabilität gemacht; dabei wird eine »Einlaufzeit«, z. B. 30 Min., angegeben.

15.1.1 Rückkopplung als Grundlage der Schwingungserzeugung

Eine Verstärkerschaltung bildet die Grundlage für die Schwingungserzeugung. Die Schwingung selbst kommt durch die Rückkopplung zustande, die »um das verstärkende Bauteil herum« aufgebaut wird (siehe Abbildung 15.1). Für die Rückkopplung wird dabei nur ein Teil der Ausgangsspannung des Verstärkers benötigt.

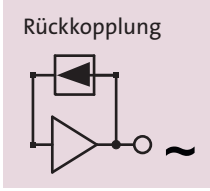


Abbildung 15.1 Rückkopplung

Darüber hinaus muss das an einem Schaltungspunkt betrachtete Oszillatorsignal auf dem Signalweg so verstärkt und phasengedreht werden, dass es wieder gleichphasig und mit mindestens der gleichen Amplitude zum selben Punkt zurückgekoppelt wird.

Im Rückkopplungszweig befinden sich auch die frequenzbestimmenden Elemente (LC-Schwingkreis, Quarz, Keramikresonator). Zudem ist am Ausgang eine Schaltung angebracht, die die Entnahme des Signals und die Zuführung eines Teils der Ausgangsleistung zur Rückkopplung vornimmt.

Sie berechnen den Rückkopplungsfaktor k als Kehrwert des Verstärkungsfaktors v:

$$k = \frac{1}{v}$$

Die Schaltung schwingt, wenn $k \times v = 1$ gegeben ist. Zum Anschwingen muss hier allerdings der Wert 1 kurzfristig überschritten werden.

Liegt der Verstärkungsfaktor höher als der Kehrwert des Rückkopplungsfaktors, schwingt die Schaltung von selbst »ohne Fremdzündung« an.

Grundschaltungen von LC-Oszillatoren

Die drei bekannten Grundschaltungen wurden nach ihren Entwicklern benannt:

- Colpitts
- Hartley
- Meißner

Sie unterscheiden sich eigentlich nur in der Anordnung der frequenzbestimmenden Bauelemente. Abbildung 15.2 zeigt Ihnen die bekannten Unterscheidungsmerkmale der verschiedenen Schaltungen.

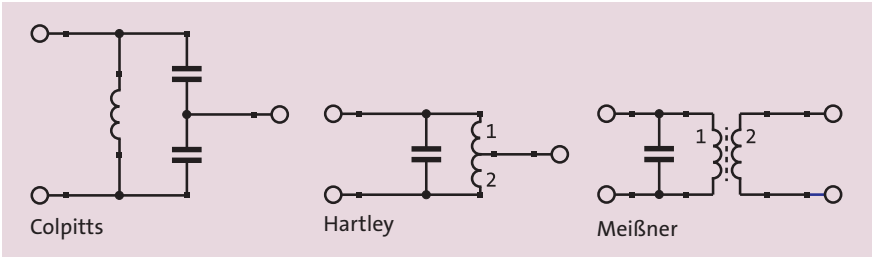


Abbildung 15.2 Unterscheidung der frequenzbestimmenden Bauelemente

Beim Colpitts-Oszillator wird entweder mit einer veränderlichen Spule oder einem Doppeldrehkondensator abgestimmt. Bei allen anderen Oszillatortypen bietet sich der Einfachheit halber der Einsatz eines Drehkondensators an.

Oszillatoren

Oszillatoren sind rückgekoppelte, selektive Verstärker und erzeugen eine Sinusspannung.

Ein LC-Kreis oder ein Quarz im Rückkopplungszweig bestimmt die Frequenz.

Transistorisierte Oszillatoren können grundsätzlich als Emitter-, Basis- und Kollektorschaltung ausgelegt werden.

Oszillatoren unterscheiden sich im Aufbau der frequenzbestimmenden Bauelemente. Diese sind nach ihren Entwicklern benannt:

- **Colpitts**: kapazitive Dreipunktschaltung (siehe Abbildung 15.3)
- **Hartley**: induktive Dreipunktschaltung (siehe Abbildung 15.4)
- **Meißner**: induktive Rückkopplung (siehe Abbildung 15.5)

Die Dreipunktschaltungen ermöglichen eine gute Anpassung an die jeweilige Transistorschaltung.

Oszillatoren müssen gegen Rückkopplungen der HF-Signale eines Leistungsverstärkers geschützt werden, wofür die Gleichstromversorgung gut gefiltert und entkoppelt wird.

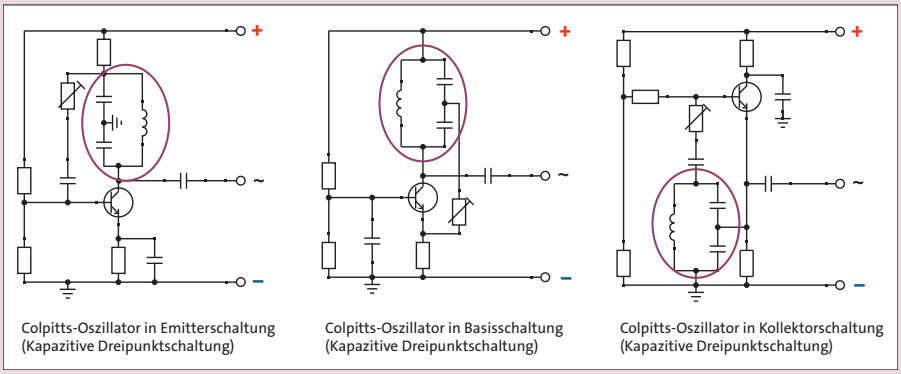


Abbildung 15.3 Colpitts-Oszillatoren

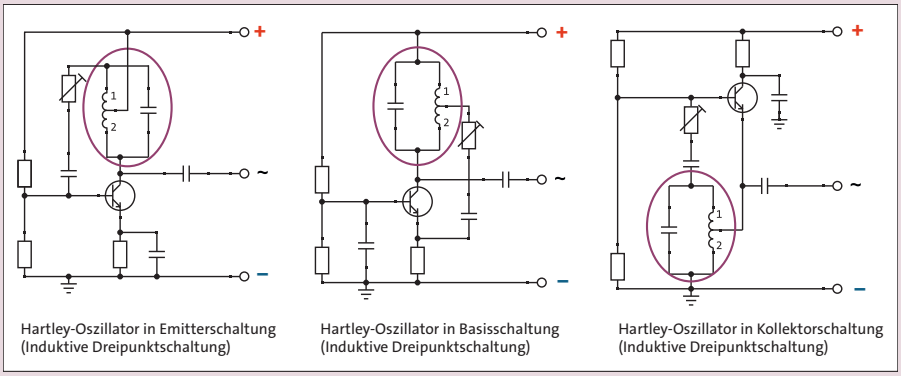


Abbildung 15.4 Hartley-Oszillatoren

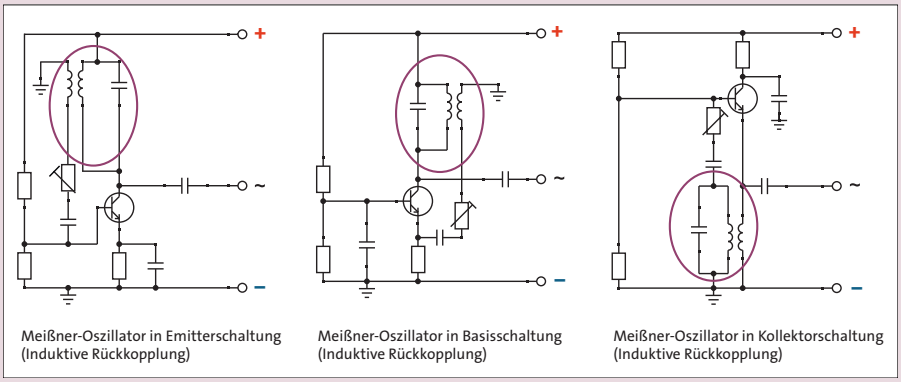


Abbildung 15.5 Meißner-Oszillatoren

In den jeweiligen Schaltbildern wurden nur die Trimmwiderstände für die Einstellung der Rückkopplung dargestellt. Die Einstellmöglichkeiten für Frequenz und Arbeitspunkt wurden nicht durch in ihren Werten veränderliche Bauelemente darge-

stellt. Für die jeweilige Oszillatorart typische Merkmale wurden lila umrandet, damit Sie sich das Schaltungsmuster besser einprägen können.

Beim Meißner-Oszillator müssen Sie beachten, dass bei der Emitterschaltung die Phasendrehung beim Anfertigen der Spule berücksichtigt werden muss: Der Wickelsinn der Spulen ist hier gegenläufig. Zudem müssen Sie hier das Übersetzungsverhältnis des »Transformators« so bemessen, dass der notwendige Rückkopplungsfaktor *k* erreicht wird.

Bei den Dreipunktschaltungen hat der frequenzbestimmende Schwingkreis stets ein Bauteil mit Anzapfung bei einem der beiden Bauteile. Dies führt damit zu drei gegenüber den zwei Anschlusspunkten beim herkömmlichen Schwingkreis.

Wenn Sie einen Hartley-Oszillator in Emitterschaltung ausführen, müssen Sie die Betriebsspannung mit der Mittelanzapfung der Induktivität verbinden. Dann funktioniert auch die Phasendrehung um 180° an den Enden der Spule.

Oszillatoren arbeiten nur stabil, wenn ihre Versorgungsspannung stabil ist. Außerdem dürfen hierüber keine HF-Signale nachfolgender Senderstufen gelangen, unkalkulierbare Effekte wären sonst die Folge. Temperaturänderungen müssen so klein wie möglich gehalten werden.

Für den Aufbau von Oszillatoren gilt:

- Aufbau einer gefilterten, entkoppelten und stabilen Stromversorgung
- Abschirmen, Einbau in ein dickes Metallgehäuse
- gegebenenfalls Verwendung einer Temperaturkompensation
- stabiler mechanischer Aufbau

Grundschaltungen von Quarzoszillatoren

Quarzoszillatoren weisen, wenn sie halbwegs vor großen Temperaturschwankungen geschützt sind, eine sehr hohe Frequenzstabilität auf.

Die Schwingquarze weisen eine hohe Güte auf. Man darf ein sauberes, stabiles Signal erwarten.

Aus diesem Grund setzt man sie zur Erzeugung der Grundfrequenzen für Phasenregelkreise ein. Aber auch als »Bandpass-Oszillatoren« in Funkgeräten und Empfängern, die mehrere Amateurfunkbänder abdecken, leisten sie gute Arbeit. Bei ganz einfach gehaltenen FM-Funksprechgeräten dienen sie direkt zur Frequenzerzeugung für die einzelnen Kanäle.

Eine besondere Form stellt der *VXO* dar, ein Quarzoszillator, dessen Frequenz man im laufenden Betrieb »zieht«. Weit ist hier der Abstimmbereich allerdings nicht. Bekannte Funkgeräte aus der Vor-Digital-Ära sind das IC-202 (2-m-Band, nur SSB und CW) und das IC-402 (70-cm-Band, nur SSB und CW).

In jeder Oszillator-Grundschaltung können Sie Schwingquarze einsetzen. Wenn Sie dies im Schwingkreisteil (*Parallelresonanz*) vornehmen, wird der Quarz in seiner Grundschwingung betrieben (siehe Abbildung 15.6). Der Quarz bestimmt hier die Resonanzfrequenz des Schwingkreises.

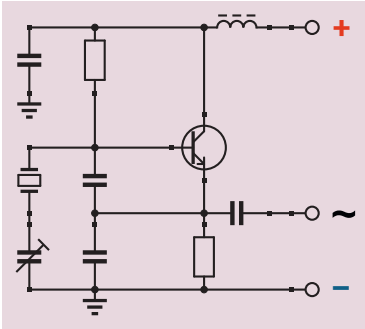


Abbildung 15.6 Quarzoszillator, Kollektorschaltung, Quarz in Grundschwingung

Setzen Sie den Quarz im Rückkopplungszweig ein, betreiben Sie ihn in *Serienresonanz*. Hier können Sie eine Obertonfrequenz, eine Harmonische (Oberwelle) der Grundfrequenz, nutzen und damit höhere Frequenzen erzeugen (siehe Abbildung 15.7). Der Quarz bestimmt hier, welche Frequenz den Rückkopplungszweig passieren darf.

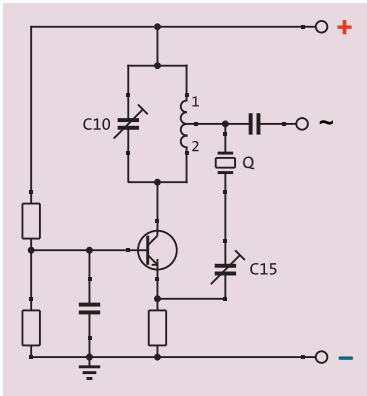


Abbildung 15.7 Quarzoszillator, Basisschaltung, Oberton möglich

Die Parallel- und die Serienresonanz der Schwingkreise weisen unterschiedliche Resonanzfrequenzen auf, allerdings ist die Differenz gering.

Sie sehen in den beiden Schaltbildern der Quarzoszillatoren immer einen Trimmkondensator unmittelbar am Schwingquarz. Damit justieren Sie die exakte Frequenz ein, auf der die Schaltung schwingen soll. Der Einstellbereich beträgt dabei ± 0,001 % (10^{-4}).

Wenn eine sehr hohe Frequenzgenauigkeit gefordert ist, werden zumindest temperaturkompensierte Quarzoszillatoren eingesetzt. Beim *TCXO* wird mittels einer Steuer-

spannung aus der Temperaturmessung der Quarzoszillator abgestimmt (*Kapazitätsdioden*). Reicht auch hier die Frequenzgenauigkeit nicht aus, kommt (zusätzlich) ein *Quarzofen* zum Einsatz. In ihm wird der Quarz auf einer Temperatur von 75°C (modellabhängig) gehalten. In diesem Fall spricht man von einem OCXO, einem *Oven-Controlled Crystal Oscillator*. Ein Nachteil besteht in der Aufheizzeit: Solange der Quarz sich nicht auf Solltemperatur befindet, findet noch eine Frequenzdrift statt. Schnell einschalten und das Gerät mit dem OCXO benutzen – das funktioniert also nicht.

Für höchste Ansprüche verwendet man einen GPSDO (*GPS-disziplinierter Oszillator*). Bei ihm wird eine sehr hohe Kurz- und Langzeitstabilität durch ein zugeführtes externes Referenzsignal ermöglicht. Man verwendet hierfür die Aussendungen von Navigationssatelliten, z. B. GPS. Meist verwendet man GPSDO für Eich- und Messzwecke, wenn eine sehr hohe Genauigkeit gefordert ist (*Frequenznormal*).

Spannungsgesteuerte Oszillatoren

Sie können in einem Oszillator den Drehkondensator durch eine Kapazitätsdiode (siehe Abschnitt 11.3) ersetzen. Diese ändert mittels zugeführter Spannung ihre Kapazität: Je höher die Spannung ist, desto niedriger ist ihre Kapazität und umgekehrt.

Ein damit aufgebauter Oszillator trägt die Bezeichnung VCO (*Voltage-Controlled Oscillator*).

15.1.2 Der richtige Messpunkt an Oszillatoren

Wenn Sie an Oszillatoren arbeiten und das Ausgangssignal betrachten bzw. die Ausgangsfrequenz messen möchten, sollten Sie den Tastkopf oder die Messspitze stets nach der Pufferstufe ansetzen. Setzen Sie die Messleitung nämlich direkt in der Oszillatorschaltung an, so verstimmen Sie diese.

15.1.3 Zusammenfassung zu Oszillatoren

- **GPSDO** (GPS-disziplinierter Oszillator): Quarzoszillator mit GPS-Signal-Synchronisation
- **Oszillator mit induktiver Rückkopplung**: Meißner
- **Oszillator mit Dreipunktschaltung**: Colpitts, Hartley
- **OCXO** (Oven-Controlled Crystal Oscillator): Quarzoszillator mit Quarzofen, in dem der Quarz auf etwa 75°C (modellabhängig) warm gehalten wird.
- **Quarzoszillator, Quarz im Parallelresonanzkreis**: Grundton
- **Quarzoszillator, Quarz im Rückkopplungsstrang**: auch Oberton möglich
- **TCXO**: Quarzoszillator mit Temperaturkompensation
- **VFO**: variabler Frequenzoszillator

- **VCO**: spannungsgesteuerter Oszillator
- **VXO**: variabler Quarzoszillator
- **VCXO**: spannungsgesteuerter Quarzoszillator

15.2 Phasenregelkreise (PLL)

Phasenregelkreise (engl. *Phase-Locked Loop*, PLL) ermöglichen es, ein stabiles Ausgangssignal mit hoher Frequenzgenauigkeit zu erzeugen, während der Bedarf an physischen Bauteilen minimiert wird. Mussten früher beispielsweise für ein VHF-FM-Sprechfunkgerät jeweils zwei Quarze (Senden und Empfangen) für eine Frequenz (»Kanal«) beschafft werden, so entfällt mit dieser Technik dieser Aufwand.

Die PLL-Schaltung hat die Fähigkeit, ein Ausgangssignal zu erzeugen, dessen Frequenz und Phasenlage präzise an ein Referenzsignal angepasst wird. Dies wird erreicht, indem die Differenz in der Phasenlage zwischen dem Ausgangs- und dem Referenzsignal kontinuierlich gemessen und minimiert wird. Dadurch kann der PLL ein Signal synthetisieren, das mit dem Referenzsignal in Frequenz und Phase »synchronisiert« ist. Abbildung 15.8 zeigt Ihnen den grundsätzlichen Aufbau.

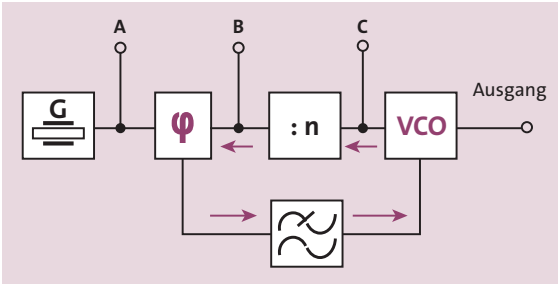


Abbildung 15.8 Schematischer Aufbau einer PLL

Hinsichtlich der Frequenzen (im Schaltbild von Abbildung 15.8) gilt:

- **A und B**: Die Frequenzen sind gleich.
- **A und C**: C ist höher als A.
- **B und C**: C ist höher als B.

Die PLL-Schaltung besteht aus verschiedenen Unterschaltungen:

- **VCO (spannungsgesteuerter Oszillator)**: Er wird innerhalb der Regelschleife der PLL gesteuert.
- **Teiler**: Er dividiert das Signal vom VCO durch einen festen Faktor und führt es dem Phasenvergleicher zu.

- **Phasenvergleicher (φ)**: Er vergleicht das geteilte VCO-Signal mit dem Signal aus einem zweiten, stabilen (Quarz-)Oszillator.
- **Quarzoszillator**: Er stellt ein besonders stabiles Referenzsignal bereit.

15.2.1 Der Phasenvergleicher φ

Die Arbeitsweise des Phasenvergleichers ähnelt der einer Kippstufe. Das Signal A schaltet den Ausgangsimpuls ein, das Signal B schaltet ihn wieder aus. Damit bestimmen die beiden zugeführten Signale die Länge des Ausgangsimpulses C.

Der Tiefpassfilter übernimmt die Glättung des Signals C, damit es als Steuerspannung für den VCO verwendet werden kann. Dessen Auslegung ist nicht so ganz einfach. Bei zu hoher Grenzfrequenz erzeugen Sie ein Ausgangssignal mit vielen Störanteilen. Bemessen Sie die Grenzfrequenz zu niedrig, kann die Schaltung Frequenzabweichungen nicht schnell genug korrigieren und die PLL »rastet aus«. Bei älteren Funkgeräten wurde man auf diesen Umstand noch durch blinkende LEDs hingewiesen.

Im Idealfall stimmen die Flanken der beiden zu vergleichenden Signale (Punkte A und B in Abbildung 15.8) genau überein (siehe Abbildung 15.9).

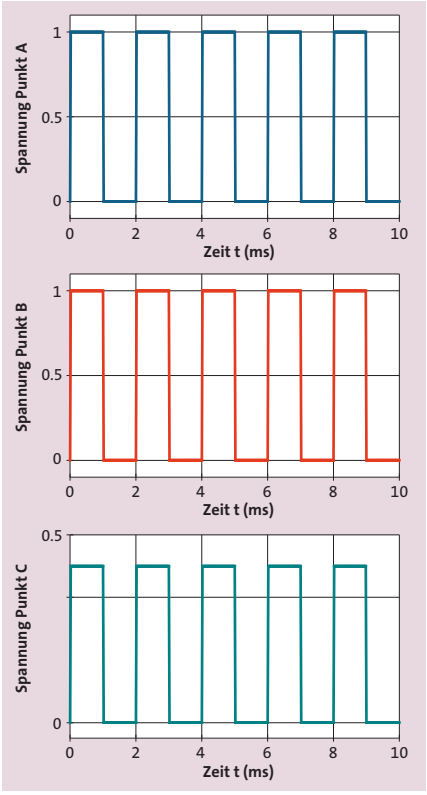


Abbildung 15.9 Übereinstimmende Flanken

Die Impulse der Spannung C verändern sich, wenn die Signale A und B nicht in Phase liegen. Der Impuls beginnt mit der ansteigenden Flanke von A und endet mit der absteigenden Flanke von B. Dabei steigt der Mittelwert der Spannung C, der im VCO für eine sinkende Frequenz sorgt. Dies geschieht so lange, bis die Phasengleichheit wieder eintritt.

15.2.2 Der Teiler

Dem Teiler wird ein Anteil des Ausgangssignals des VCO zugeführt. Der Teiler wiederum führt sein »Rechenergebnis« dem Phasenvergleicher zu.

Die Aufgabe des Phasenvergleichers besteht darin, die Frequenz des vom Teiler ausgegebenen Signals mit der des Quarzoszillators abzugleichen, um so eine Übereinstimmung der Frequenzen zu gewährleisten.

Im Prinzipschaltbild (siehe Abbildung 15.8) befindet sich der Teiler zwischen den Signalabgriffen B (heruntergeteilte Frequenz) und C (hohe Ausgangsfrequenz).

Übung

Sie messen am Punkt A die Frequenz 12,5 kHz. Die Schaltung soll Ausgangsfrequenzen von 28 bis 29,7 MHz erzeugen. In welchem Bereich bewegt sich das Teilerverhältnis?

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie für die niedrigste Frequenz 28 MHz mit dem Taschenrechner:
  28000 [÷] 12,5 [=]
  Zwischenergebnis: 2.240
- Schritt 2: Berechnen Sie für die höchste Frequenz 29,7 MHz:
  29700 [÷] 12,5 [=]
  Zwischenergebnis: 2.376

Das Teilerverhältnis bewegt sich zwischen 2.240 und 2.376.

Und damit haben Sie auch bereits eine neue Erkenntnis: Wenn Sie an der Abstimmung eines neueren Funkgeräts drehen, verstellen Sie nicht die frequenzbestimmenden Elemente des Oszillators, sondern einen Teilerfaktor.

15.2.3 Der VCO

Die Grundlagen des VCOs wurden in Abschnitt 15.1.1 besprochen. Für die Berechnung einer PLL müssen Sie auch die Regelempfindlichkeit des VCOs bestimmen können. Diese wird als Faktor $^{\text{Frequenzänderung}}/_{\text{V}}$ angegeben.

Jede Erhöhung der Spannung führt zu einer höheren Frequenz des VCO und umgekehrt.

Übung

Eine Änderung der Regelspannung von 5 V auf 7,5 V bewirkt eine Änderung der Ausgangsfrequenz von 10,5 MHz auf 10,75 MHz.

Für die Berechnung ermitteln Sie von beiden Größen den Änderungsbetrag, hier:

- Frequenzänderung: 0,25 MHz
- Spannungsänderung: 2,5 V

Mit der Formel

$$\text{Regelempfindlichkeit} = \frac{\text{Frequenzänderung}}{\text{Spannungsänderung}}$$

führen Sie die Berechnung durch und erhalten als Ergebnis 0,1 MHz, entsprechend 100 kHz.

15.2.4 Der Tiefpassfilter

Der Tiefpassfilter bewirkt in erster Linie, dass er aus dem Rechteckimpuls, den der Phasenvergleicher abgibt, die Regelspannung aus dem Mittelwert erzeugt und diese dem VCO zuführt.

Eine gute Glättung verlangsamt das »Einrasten« der PLL. Eine zu niedrige Grenzfrequenz des Tiefpassfilters führt dazu, dass Frequenzabweichungen zu langsam ausgeglichen werden. Eine zu hohe Grenzfrequenz hingegen bewirkt ein Ausgangssignal, das durch zu viele Störanteile gekennzeichnet ist. Die Auslegung des Tiefpassfilters ist damit eine schwierige Sache.

15.3 Direkte digitale Synthese (DDS)

Die direkte digitale Synthese (DDS) nutzt fortschrittliche Digitaltechnik, unterstützt durch spezialisierte elektronische Bauelemente, um präzise und vielfältige Signale zu erzeugen. Diese Technologie bietet umfangreiche Möglichkeiten in Bereichen wie Funk-, Mess- und Nachrichtentechnik, indem sie die Erzeugung unterschiedlicher Signalformen aus digital definierten Bitfolgen ermöglicht. Die Anweisungen an den DDS-Synthesizer werden in digitaler Form gegeben. So können Sie mittels eindeutiger Bitfolgen bestimmen, auf welcher Frequenz das Ausgangssignal der Schaltung schwingen soll. Damit erhalten Sie die Möglichkeit, vor allem platzsparende Konzepte zu entwickeln. Zudem können Sie die Steuerungsbefehle auch über Standardkleinrechner (Raspberry Pi, Arduino) oder PCs »formulieren«. Dies war quasi auch die »Geburtsstunde« der modernen, preiswerten SDR-Technik (*Software Defined Radio*)!

Ein Quarzoszillator in der DDS-Schaltung erzeugt das Taktsignal für die digitalen Komponenten. Beim Design der Schaltung wird auf eine sehr hohe Frequenzstabilität geachtet. Oftmals wird ergänzend eine PLL verwendet, um einen größeren Ausgangsfrequenzbereich abzudecken. Die Ausgangsfrequenz des DDS kann maximal so hoch sein wie die der Takterzeugung.

Das damit erzeugte Signal taktet unter anderem die Arbeitsschritte des Phasenakkumulators und des Digital-Analog-Wandlers.

Der Phasenakkumulator erhält in binärer Form die Angaben zur Frequenz. Je Arbeitstakt wird dieser Wert addiert. Die Zwischenwerte entsprechen dem Phasenwinkel des Signals. Der Überlauf des Phasenakkus entspricht $2 \times \pi$, also einem Umlauf des Phasenzeigers (siehe Abschnitt 7.8).

Zu jedem Phasenwert gehört der entsprechende Signalwert. Dieser wird mithilfe einer mathematischen Funktion (z. B. der Sinusfunktion) erzeugt und zugeordnet. Dabei können aber auch in einem Festwertspeicher hinterlegte Angaben genutzt werden, sodass es hier eigentlich nur zu einem »Wenn-dann-Vergleich« kommt. Der Signalwert schließlich steuert den Digital-Analog-Wandler an, der das Ausgangssignal aus den zugeführten Binärinformationen zusammensetzt. Das Analog-Signal kann dann abgegriffen werden. Abbildung 15.10 zeigt ein vereinfachtes Schema des Vorgangs. Sehen Sie sich die allgemein zugänglichen Datenblätter von DDS-Bauelementen an. In ihnen finden Sie auch meist die ausführlichen Blockschemata der Bausteine.

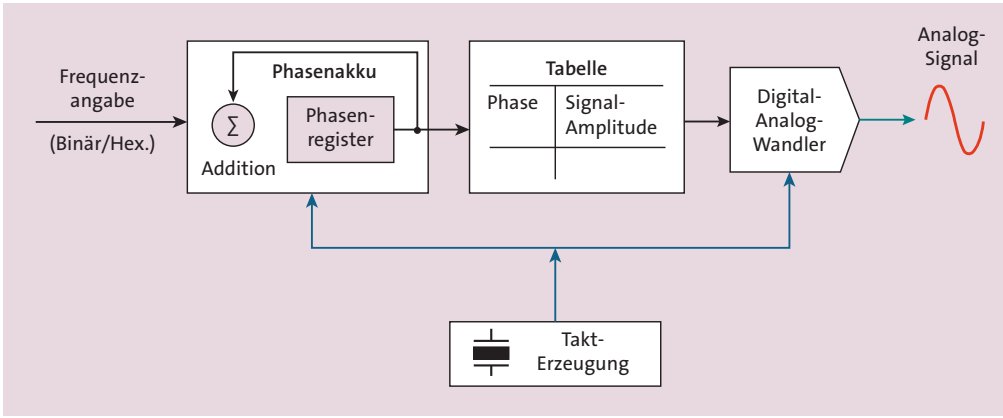


Abbildung 15.10 Vereinfachtes Schema für DDS

Kapitel 16
Sende- und Empfangstechnik

16.1 Sendearten, Modulation

Bei allen Sendearten (außer der Morsetelegrafie) werden Informationen in das erzeugte Hochfrequenzsignal »mitgegeben«, das Signal wird in der Regel moduliert. Diese Modulation beeinflusst die Bandbreite des Signals, die von der Art der übertragenen Informationen und der gewählten Modulationsart abhängt. Aber auch das an sich unmodulierte Telegrafiesignal verfügt über eine Bandbreite, nämlich in Abhängigkeit von der Gebegeschwindigkeit.

Bei der Morsetelegrafie tasten Sie die hochfrequente Energie – Sie schalten sie also nur *ein* und *aus*. Bei ziemlich allen anderen Sendearten vermengen Sie die Information mit einem hochfrequenten Trägersignal. Dies nennt man *Modulation*.

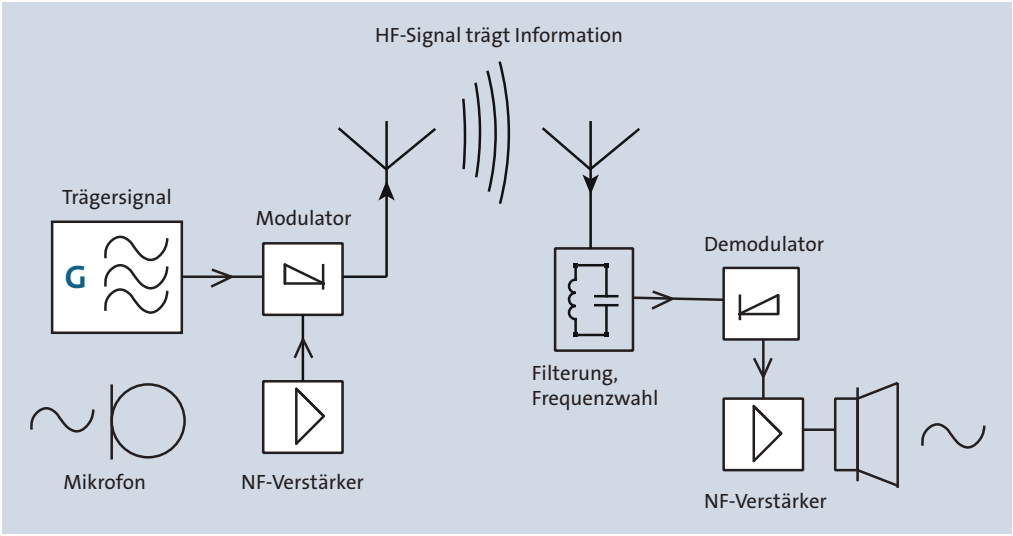


Abbildung 16.1 Das Prinzip der drahtlosen Nachrichtenübertragung

In Abbildung 16.1 sehen Sie, wie eine Information übertragen wird, und in Abbildung 16.2 sehen Sie einen unmodulierten Träger.

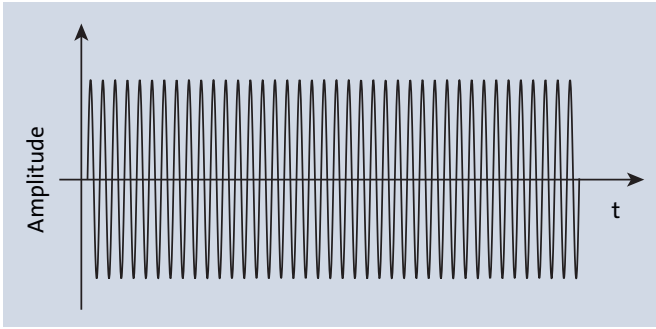


Abbildung 16.2 Unmodulierter Träger

Das Trägersignal wird während des Betriebs kontinuierlich erzeugt. Dabei ist es egal, ob nun gerade gesprochen wird oder nicht. Über das Mikrofon werden Sprache oder Musik in ein niederfrequentes Signal umgewandelt. Im NF-Verstärker (er verstärkt Niederfrequenz, also im hörbaren Bereich) wird das Signal so weit angehoben, dass die folgenden Stufen es verarbeiten können. Im Modulator »formt« das NF-Signal das Trägersignal. Das auf diese Weise gebildete Signal wird noch verstärkt, was in Abbildung 16.1 aber nicht dargestellt wurde. Über die Antenne wird es schließlich abgestrahlt.

Am Empfangsort gelangt das Signal via Antenne zunächst zu filternden Baugruppen. Hier sorgen beispielsweise Bandfilter dafür, dass nur der gewünschte Frequenzbereich durchgelassen wird. Im einfachsten Fall befindet sich hier nur ein Schwingkreis, der genau auf die Empfangsfrequenz abgestimmt wird. Im Demodulator wird das NF-Signal vom hochfrequenten Träger getrennt. Dafür, dass die »Nutzlast« hörbar wird, sorgt der NF-Verstärker.

16.1.1 Sendearten und deren Kennzeichnung

Mit dem Begriff *Sendeart* wird mehr ausgedrückt als mit *Modulationsart*.

Die Sendeart beschreibt, ob Sprache, Telegrafie, Bilder oder Video übertragen werden, und legt fest, nach welchen Standards oder Verfahren diese Inhalte für die Übertragung aufbereitet werden. Die Modulationsart definiert die Art und Weise, wie Informationen in ein Trägersignal integriert werden, um diese über ein Übertragungsmedium zu transportieren. Sie bestimmt, wie das Signal verändert wird – beispielsweise in seiner Amplitude, Frequenz oder Phase – um die zu übertragenden Informationen darzustellen. Dies ermöglicht es, dass das Signal effektiv über Distanzen übertragen und vom Empfänger korrekt interpretiert werden kann.

Die für den Amateurfunk gebräuchlichsten Sendearten finden Sie in Tabelle 16.1.

1. Stelle: Modulationsart		2. Stelle: Signalmodulation		3. Stelle: Informationsart	
A	Zweiseitenband, AM	1	Einkanal, quantisiert/ digitalisiert, ohne Trägermodulation	A	Tastung Morse-telegrafie (CW)
C	Restseitenband, AM	2	Einkanal, quantisiert/ digitalisiert, mit Trägermodulation	B	Fernschreiben
F	Frequenzmodulation, FM	3	Einkanal, analoge Modulation	C	Fax
G	Phasenmodulation			D	Datenübertragung, Telemetrie
J	Einseitenband-Amplitudenmodulation, unterdrückter Träger, SSB (LSB, USB)			E	Sprechfunk
				F	Video

Tabelle 16.1 Übersicht der Sendearten

Die im Amateurfunk gängigsten Sendearten und ihren »Alltagsbegriff« finden Sie in Tabelle 16.2.

Begriff	Überträgt	Sendeart
SSB (LSB, USB)	Sprechfunk	J3E
FM	Sprechfunk	F3E
CW	Morsezeichen	A1A
RTTY	Funkfernschreiben	F2B

Tabelle 16.2 Sendearten und Begriffe

16.1.2 Eigenschaften verschiedener Modulationsarten

Besonders beim Sprechfunk bestehen große Unterschiede zwischen den einzelnen Modulationsarten hinsichtlich Übertragungsqualität, Störungsanfälligkeit und belegter Bandbreite.

Mit einem SDR-Empfänger können Sie sich die Unterschiede am Bildschirm ansehen.

Amplitudenmodulation (AM)

AM wird im Amateurfunk nicht mehr verwendet, beim Rundfunk über Lang-, Mittel- und Kurzwelle hingegen immer noch. Bestimmte Funkdienste verwenden es ebenso weiter. Für den Bau von Sendern sind Kenntnisse der Amplitudenmodulation allerdings unerlässlich, da SSB-Signale (eine spezifische Form der Amplitudenmodulation) auf dem Prinzip der AM basieren. Sie nutzen eines der Seitenbänder zusammen mit oder ohne den Träger. Dieses Verständnis ist grundlegend, um effiziente und effektive SSB-Sender konstruieren zu können.

Das AM-Signal belegt, gemessen an der übertragenen Information, eine hohe Bandbreite. Oft benötigen wir als Ausgangsgröße für weitere Berechnungen die Bandbreite des niederfrequenten Signals (NF-Bandbreite). Hat ein Mikrofon einen Frequenzgang von 200 Hz (f_{min}) bis 2.000 Hz (f_{max}), ergibt sich durch diese Formel dessen Bandbreite:

$$\text{Bandbreite} = f_{max} - f_{min}\ (\text{Hz})$$

In diesem Beispiel beträgt die NF-Bandbreite 1.800 Hz.

Beim Anschluss eines Einton-Generators entspricht dessen Ausgangsfrequenz der Bandbreite des Tonsignals.

Das AM-Signal besteht aus dem Träger, dem unteren und dem oberen Seitenband (siehe Abbildung 16.3).

Die tiefste Frequenz ermitteln Sie dadurch, dass Sie von der Trägerfrequenz die Frequenz des Tonsignals (bzw. die darin höchst vorkommende Frequenz) abziehen. Die höchste Frequenz erhalten Sie, wenn Sie das Tonsignal der Trägerfrequenz hinzurechnen.

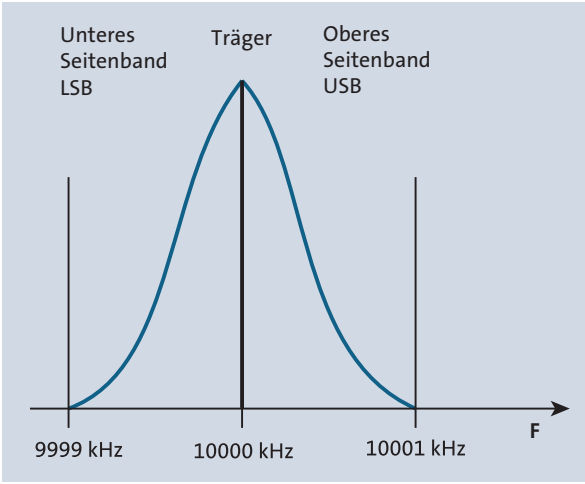


Abbildung 16.3 AM-Signal, Bandbreite

Im Beispiel aus Abbildung 16.3 beträgt die Frequenz des Tonsignals 1.000 Hz, also 1 kHz. Die belegte Bandbreite erhalten Sie durch die Differenz zwischen dem oberen und dem unteren Seitenband, also mit:

$$\text{Bandbreite (AM)} = f_{\text{oberes Seitenband}} - f_{\text{unteres Seitenband}}\ \text{(Hz)}$$

In unserem Beispiel sind das 2.000 Hz (2 kHz).

In Abbildung 16.4 sehen Sie eine Spektralaufnahme eines AM-Signals. Bei gleicher Lautstärke wurde die Tonhöhe geändert. Sie erkennen dies an den zackig verlaufenden Seitenlinien, die die obere und untere Grenze der Signalbandbreite darstellen.

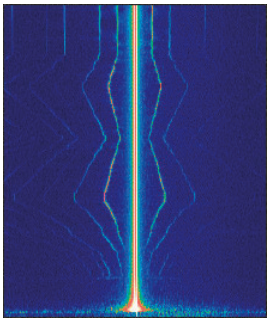


Abbildung 16.4 AM-Signal mit variabler Tonhöhe

Die Lautstärke des modulierenden Tonsignals bestimmt, wie kräftig die Amplitude des AM-Signals ausfällt. Abbildung 16.5 zeigt Spektralaufnahmen mit verschiedener Aussteuerung, die mit per SDR-RX erstellt wurden.

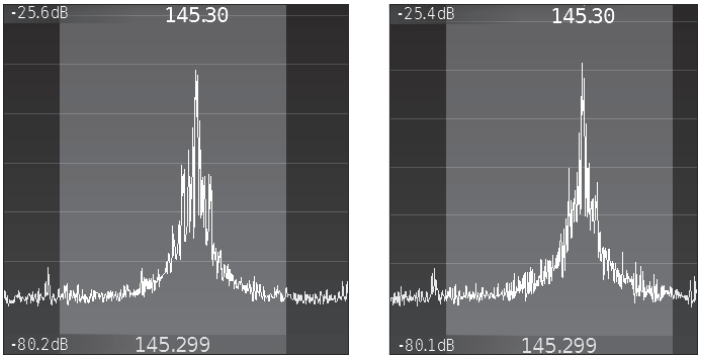


Abbildung 16.5 AM-Signal mit geringer (rechts) und kräftiger (links) Lautstärke

In einem Wasserfalldiagramm erkennt man Lautstärkeschwankungen. In Abbildung 16.6 sehen Sie das Trägersignal als gelbe Linie. Das Tonsignal verfügt über eine konstante Frequenz. Die direkt neben dem Träger parallel verlaufenden Linien zeigen die Amplitude. Das Tonsignal wurde mehrfach unterbrochen, was Sie auch an den dann fehlenden Seitenlinien erkennen.

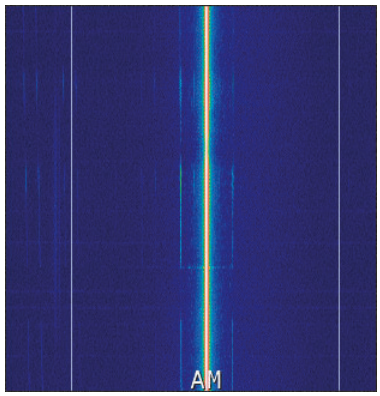


Abbildung 16.6 AM-Signal; das Tonsignal wurde mehrfach ein- und ausgeschaltet.

Der Modulationsgrad *m* gibt das Verhältnis zwischen der Amplitude des Tonsignals und der Trägerschwingung an. An einem Schirmbild (siehe Abbildung 16.7) ermitteln Sie zunächst den tiefsten und den höchsten Punkt der Sinuskurve des modulierten Seitenbands. Die Hälfte dieser Spannung entspricht der Scheitelspannung $\hat{U}_{mod}$. Zudem ermitteln Sie nun zwischen der Null-Linie des Trägers bis hin zur Hälfte dieser gedachten Null-Linie des modulierten Seitenbands die hier anliegende Spannung $\hat{U}_T$. Mit modernen Oszilloskopen können Sie sich durch interaktive Bildschirme die Spannungswerte direkt ausgeben lassen, bei älteren gilt das »Kästchenzählen« als Methode der Wahl. Für die grobe Ermittlung des Modulationsgrades reicht dies aber aus.

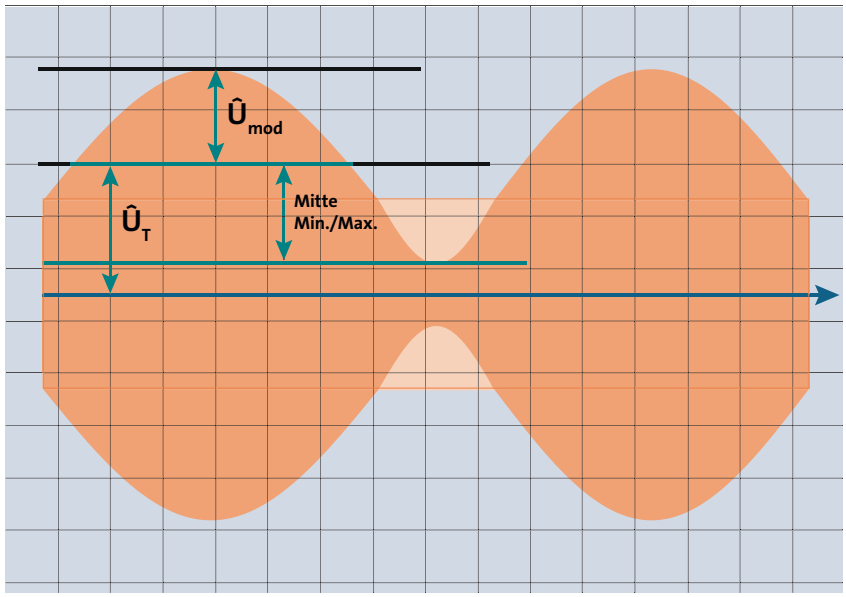


Abbildung 16.7 AM, Ermittlung des Modulationsgrades

In Abbildung 16.7 zählen Sie für $\hat{U}_{mod}$ 2 Kästchen, für $\hat{U}_T$ 2,5. Mit der Formel

$$m = \frac{\hat{U}_{mod}}{\hat{U}_T}$$

erhalten Sie den Modulationsgrad. Ist dieser in Prozent gefragt, müssen Sie den ermittelten Faktor noch mit 100 multiplizieren.

Hier im konkreten Beispiel geben Sie in den Taschenrechner ein:

2 [÷] 2,5 [×] 100 [=]

Ergebnis: Der Modulationsgrad beträgt 80 %.

Der Modulationsgrad sollte keinesfalls 100 % oder höher betragen! Störungen durch *Splatter* und ein sehr übersteuert klingendes Signal sind sonst die Folge. Abbildung 16.8 zeigt eine Darstellung eines »übermodulierten« Signals.

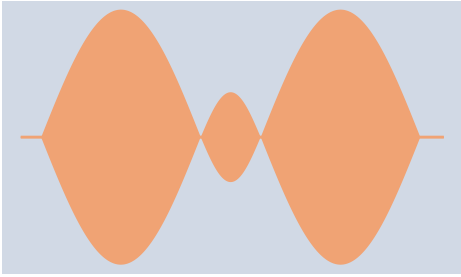


Abbildung 16.8 AM-Signal mit einem Modulationsgrad von mehr als 100 %

Amplitudenmodulation

- Die Lautstärke des Tonsignals bestimmt den Ausschlag, d. h. die Aussteuerung des Sendesignals, ohne die Trägerfrequenz zu verändern.
- Die Frequenz des Tonsignals bestimmt die Häufigkeit, mit der die Amplitude sich ändert.
- Der Modulationsgrad *m* gibt das Verhältnis zwischen der unmodulierten und der modulierten Schwingung des Ausgangssignals an.
- Um Störungen und schlechte Signalqualität zu vermeiden, muss der Modulationsgrad unter 100 % bleiben.
- Die Bandbreite des NF-Signals (Tonsignal) ergibt sich aus der Differenz zwischen seiner höchsten und niedrigsten Frequenz.
- Die Bandbreite des AM-Signals entspricht der doppelten Bandbreite des NF-Signals, da es obere und untere Seitenbänder einschließt.
- AM-Signale sind störungsanfällig. Technische Störungen (Zündfunken, Haushaltsgeräte) und natürliche Störungen (Gewitter, Entladungen) trüben den Empfang.

Einseitenbandmodulation (Single Sideband, SSB)

Bei der Amplitudenmodulation senden Sie die Information doppelt – in jedem der beiden Seitenbänder ist der von Ihnen gesprochene Text vorhanden. Hinzu kommt noch der Träger inmitten der beiden Seitenbänder. All dies benötigt Energie und belegt (unnötigerweise) Bandbreite. Wenn Sie ein Seitenband und den Träger kappen, bleibt weniger als die Hälfte an Bandbelegung übrig (siehe Abbildung 16.9).

Unterhalb von 10 MHz wird das untere Seitenband (*Lower Sideband*, LSB) benutzt (Ausnahme: das 5-MHz-Band). Über 10 MHz wird das obere Seitenband (*Upper Sideband*, USB) genutzt.

Aufgrund der geringeren Bandbreite und des fehlenden Trägers benötigen Funkverbindungen einen deutlich niedrigeren Energieaufwand im Vergleich zu AM. Gegenüber AM benötigen Sie, um beim Empfänger die gleiche Signalstärke zu erzielen, ein Viertel der Sendeleistung.

Die Sendeleistung wird durch die Lautstärke des zugeführten NF-Signals bestimmt. Natürlich kann man durch zu viel Lautstärke einen SSB-Sender übersteuern (Übermodulation) und damit *Splatter* erzeugen. Splatter sind Nebenaussendungen nahe des Nutzsignals, die andere Funkteilnehmer stören.

Darüber hinaus sind die SSB-Signale nicht so störanfällig. Bei so vielen Vorteilen gibt es aber auch Nachteile: Beim Empfang muss der fehlende Träger im Empfänger wieder hinzugemischt werden, und bei nicht exakter Einstellung der Empfangsfrequenz hören sich die SSB-Stationen quäkend hell an.

Kein Vorteil und kein Nachteil: Es gibt hier keinen Modulationsgrad zu bestimmen!

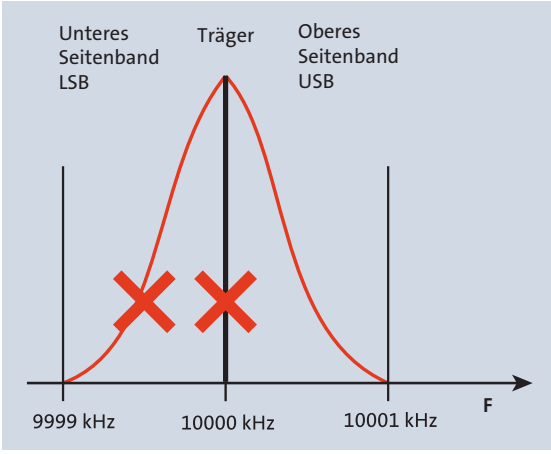


Abbildung 16.9 SSB-Signal

Das Beispiel in Abbildung 16.9 stellt das obere Seitenband dar. Das untere Seitenband und der Träger sind nicht mehr Bestandteil des Ausgangssignals.

Das Bildschirmanzeige eines SSB-Zweitonsignals sehen Sie in Abbildung 16.10.

Mit einer einzigen Tonfrequenz entspräche die Schirmbildanzeige einem einzigen »Balken«, dessen Breite von der Höhe der zugeführten Tonspannung abhängt. Erst mit dem zweiten Ton bildet sich die gewünschte Hüllkurve aus. Diese zeigt die Maxima und Minima der beiden Tonsignale.

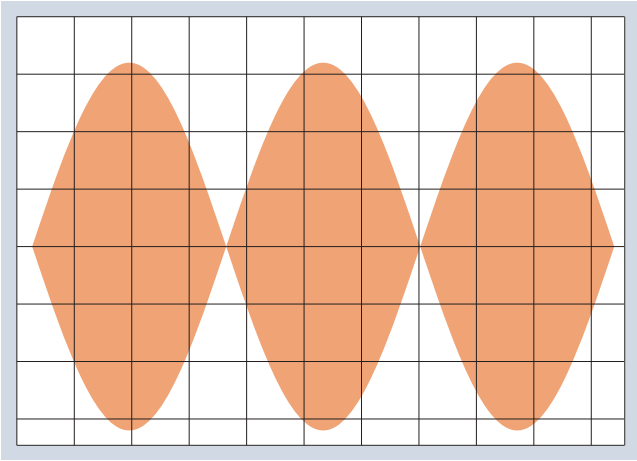


Abbildung 16.10 SSB-Zweitonsignal

Die »schulbuchmäßige« Berechnung der Bandbreite nehmen Sie mit dieser Formel vor:

$$B_{SSB} = f_{NF\text{-}max} - f_{NF\text{-}min}$$

In der Praxis lassen Sie die tiefste Tonfrequenz einfach weg. Die höchste Tonfrequenz entspricht damit in etwa der NF-Bandbreite. Es gilt damit:

$$B_{SSB} = f_{NF\text{-}max}$$

Bei der Berechnung der *Frequenzbelegung* benötigen Sie einige Angaben:

- LSB/USB (unteres/oberes Seitenband)
- die Angabe der »Null«- oder Trägerfrequenz
- die NF-Frequenz

Einseitenbandmodulation (SSB)

- Um ein SSB-Signal zu erzeugen, entfernen Sie den Träger und das nicht benötigte Seitenband eines AM-Signals.
- Die Bandbreite entspricht etwas weniger als der Hälfte eines AM-Signals.
- Für SSB-Signale können Sie keinen Modulationsgrad bestimmen!
- Bei Übermodulation eines SSB-Senders erzeugen Sie Splatter.

- Die Bandbreite des SSB-Signals errechnen Sie aus der höchsten und der tiefsten NF-Frequenz, die dem Sender zugeführt wird.
- Bei der Berechnung der Frequenzbelegung müssen Sie auf das angegebene Seitenband achten:
  unteres Seitenband (LSB): Trägerfrequenz – Bandbreite/höchstes NF-Signal
  oberes Seitenband (USB): Trägerfrequenz + Bandbreite/höchstes NF-Signal
- SSB-Signale haben neben der Morsetelegrafie das größte Störpotenzial bezüglich NF-Verstärkersystemen (Computerlautsprecher, Stereoanlagen usw.).

Übung

Die bekannten Angaben sind:

- LSB: 7,150 MHz
- NF-Signal: 1,5 kHz

Gesucht wird der belegte Frequenzbereich.

Lösung:

Berechnen Sie die untere Frequenz, da es sich um LSB handelt:

7150 kHz [-] 1,5 kHz [=] 7148,5 kHz

Ergebnis: Der Bereich von 7.148,5 kHz bis 7.150 kHz wird belegt.

In einem weiteren Beispiel rechnen Sie mit USB = 14,200 MHz, NF-Signal = 2 kHz.

Lösung:

Berechnen Sie die obere Frequenz, da es sich um USB handelt:

14200 kHz [+] 2 kHz [=] 14202 kHz

Der Bereich erstreckt sich von 14.200 kHz bis 14.202 kHz.

Frequenzmodulation (FM)

Seltener im 10-m-Band, hauptsächlich im 2-m- und 70-cm-Band, finden Sie FM-Sprechfunk im Amateurfunk. Aber auch im Betriebs- und CB-Funk finden Sie diese Sendeart. Mit höherer Bandbreite senden die Runkfunkstationen im 3-m-Rundfunkband ihre Programme, auch wenn sich DAB+ als digitale Alternative und sogar Ablösung langsam etabliert.

Im Vergleich mit AM und SSB hat FM eine deutlich höhere Störunempfindlichkeit gegenüber atmosphärischen und technischen Störungen (Blitzentladungen, Zündfunken). Zudem wirkt sich das Rauschen beim Empfang bei Weitem nicht so stark auf die Qualität aus, sodass selbst relativ schwache Signale noch wenig Rauschen aufweisen (besserer Signal-Rausch-Abstand S/N).

Der große Unterschied zwischen AM/SSB und FM besteht darin, dass bei FM eben die Frequenz durch das Tonsignal verändert wird und nicht die Amplitude des Signals. Wenn Sie eine Stimmgabel, die den Kammerton A (440 Hz) abgibt, vor dem Mikrofon eines FM-Senders anschlagen, so verändert dies seine Trägerfrequenz 440-mal je Sekunde.

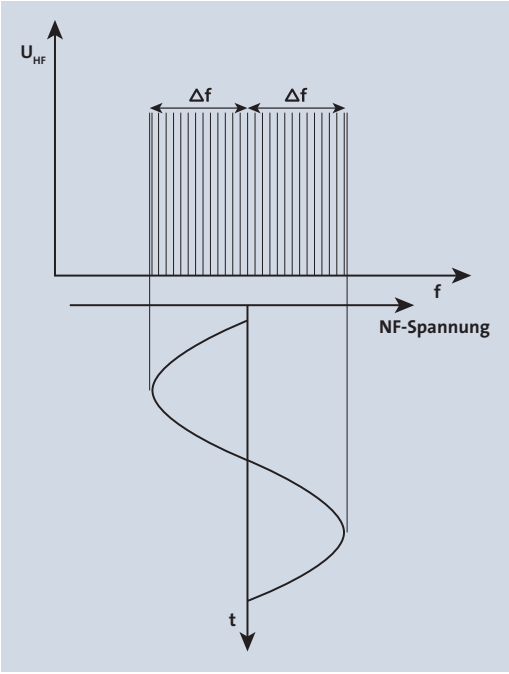


Abbildung 16.11 Aufbau eines FM-Signals

Abbildung 16.11 zeigt Ihnen den Zusammenhang zwischen dem modulierenden Tonsignal und dem FM-Signal. Der Ausschlag der Amplitude des NF-Signals bestimmt die Bandbreite des FM-Signals. Dies ist in der Abbildung durch die beiden Linien hervorgehoben, die den Scheitelpunkt des NF-Signals angeben. Je lauter also der Ton ist, desto breiter wird das FM-Signal. Den Abstand zwischen der Trägermittenfrequenz (*FM-Center*) und der Signalflanke nennt man *Hub*. In Formeln und Diagrammen wird der Hub als $\Delta f\, T$ bezeichnet.

Abbildung 16.12 zeigt Ihnen die Beschaffenheit eines FM-Signals. Die Aussteuerung des FM-Signals bleibt konstant, da die Lautstärke nicht geändert wurde. Die Häufigkeit der Frequenzänderung ändert sich durch die wechselnde Tonhöhe.

Im normalen FM-Sprechfunk (Amateurfunk, Betriebsfunk) ist ein Hub mit 3 kHz gebräuchlich. Auf vielen Empfängern finden Sie hier die Einstellmöglichkeit *NBFM*, also *Narrow-Band-Frequenzmodulation*. Der Tonrundfunk arbeitet mit *WFM*, also *Wide-Frequenzmodulation* mit 75 kHz Hub.

Wird der Hub zu groß, stören Sie Stationen auf benachbarten Frequenzen, da die Flanken Ihres Signals in den »Empfangskanal« mit hineinreichen. Falls Sie über ein älteres Funkgerät mit schlechter Justierbarkeit des Hubs verfügen, sollten Sie die Lautstärke beim Sprechen vermindern oder mithilfe von Widerständen den NF-Pegel des Mikrofons herabsetzen.

Die Bandbreite b_{FM} können Sie für Schmalband-FM ähnlich wie die Bandbreite von AM berechnen:

$$b_{FM} = 2 \times \left(\Delta f_T + f_{NF(\max)}\right)$$

Beispiel

Der Hub eines Funkgeräts ist auf 3 kHz eingestellt. Durch einen NF-Filter ist sichergestellt, dass die höchste vorkommende Tonfrequenz ebenso 3 kHz beträgt.

Mit obiger Formel berechnen Sie die Bandbreite wie folgt:

2 [×] (3 [+] 3) [=]

Das Ergebnis lautet: 12 kHz Bandbreite. So eingestellt, kann das Gerät im Amateurfunk im 12,5-kHz-Raster (Kanalraster im Amateurfunk im FM-Bereich) betrieben werden.

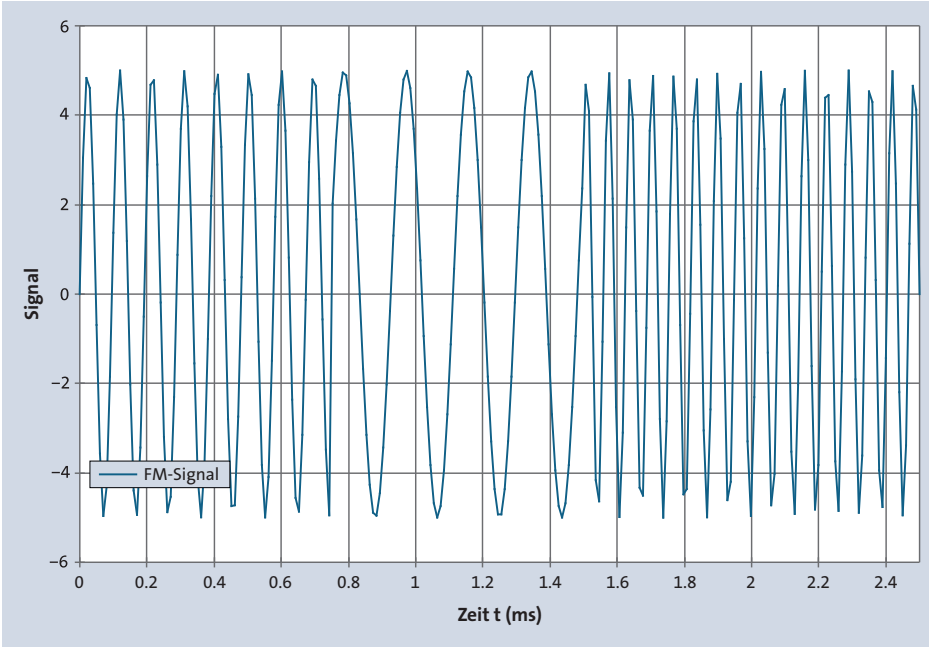


Abbildung 16.12 FM-Signal

Der *Modulationsindex m* ist eine weitere Kennzahl der Sendeart FM. Sie berechnen ihn mit dieser Formel:

$$m = \frac{\Delta f_T}{f_{mod}}$$

Verwenden Sie als Beispiel die Werte aus der Bandbreitenberechnung (Δf_t3 kHz , maximale Tonhöhe 3 kHz). In die obige Formel eingesetzt, erhalten Sie den Wert 1.

Der Wert des Modulationsindex lässt Aussagen über die Bandbreite zu (siehe Tabelle 16.3).

m ...	Bandbreite
m < 0,5	$f_{mod} > \Delta f$, damit gilt: $B_{FM} \approx 2 \times f_{mod}$
m > 2	$f_{mod} < \Delta f$, damit gilt: $B_{FM} \approx 2 \times \Delta f$

Tabelle 16.3 Auswirkung des Modulationsindex auf die Bandbreite

Das FM-Signal kann hinsichtlich der Tonqualität verbessert werden. Im Sender hebt die *Preemphasis* (»Pre« = vor, »emphasis« = Betonung) die Amplituden der höheren Modulationsfrequenzen an. Dies wirkt sich auf die Signalflanken aus und erhöht damit den Signal-Rausch-Abstand. Damit das Signal beim Empfang wieder »normal« klingt, kommt hier die *Deemphasis* zum Einsatz, die dem Tonsignal wieder zu seiner natürlichen Form verhilft. (Hi-Fi-Freunde mit Plattenspieler kennen die RIAA-Verzerrung, die einen ähnlichen Effekt hat.)

FM-Modulation

- **Vorteil**: Der Empfang von FM-Signalen wird durch Zündfunken (Kfz) oder atmosphärische Entladungen (Blitze) nur geringfügig gestört.
- **Nachteil**: Lassen FM-Stationen beim QSO zu kurze Umschaltpausen, können sich schwächere Stationen kaum bemerkbar machen.
- **Nachteil**: Die FM-Modulation belegt viel Bandbreite. Gegenüber SSB wird die vierfache Bandbreite belegt. Daher ist FM erst ab dem 10-m-Band und darüber erlaubt, da hier Amateurfunkbänder über das entsprechend notwendige Spektrum verfügen.
- Die Lautstärke eines FM-Signals wird durch die Größe der Trägerfrequenzauslenkung bestimmt.
- Die Angabe *Hub* bezeichnet den maximalen Abstand von der Trägermittenfrequenz und entspricht der Lautstärke des NF-Signals.
- Der Modulationsindex drückt das Verhältnis zwischen dem Hub und der maximalen Höhe der Tonfrequenz aus.
- Die Bandbreite entspricht bei Schmalband-FM (Modulationsindex unter 2) etwa der doppelten Frequenz des NF-Signals. Liegt der Modulationsindex über 2, entspricht die Bandbreite ungefähr dem doppelten Wert des Hubs.

Für die Datenübertragung wird oft FSK (*Frequency Shift Keying*) angewandt. Wie bei FM auch wird hier die Sendefrequenz im Takt des eingehenden Signals geändert. FSK tastet die Trägerfrequenzen direkt in Abhängigkeit des digitalen Eingangssignals um. Der Sender besitzt hierfür geeignete Signaleingänge und die entsprechende Frequenzerzeugung.

Beim AFSK (*Audio Frequency Shift Keying*) wird ein Tonsignal mit zwei Tönen verwendet. In diesem Fall kann das Signal bequem per Soundkarte eines PCs erzeugt und dem Mikrofoneingang eines SSB-Senders zugeführt werden.



FSK und AFSK

- **FSK**: direkte Modulation des Trägers
- **AFSK**: Modulation des Trägers mittels Audiosignal

16.1.3 Intermodulation und Kreuzmodulation

Alles, was durch zu laute bzw. zu leise Tonsignale bewirkt wird, ist thematisch bei der jeweiligen Modulationsart untergebracht. Unabhängig davon trifft man auf Effekte, die dem Funker im Alltag Probleme bereiten.

Intermodulation (IM) entsteht unter anderem, wenn zwei mehr oder weniger pegelgleiche Aussendungen in einer nicht linear arbeitenden Empfängerstufe aufeinandertreffen. Halbleiterbauelemente in den Kleinsignalstufen arbeiten nicht immer linear und stellen die Quelle dieser Effekte dar. Das Mischprodukt taucht im Empfangsbereich des Empfängers auf und führt zu »Geistersignalen«. Intermodulation und Kreuzmodulation werden oft unter dem Begriff *Großsignalfestigkeit* genannt.

Die Frequenzen der IM-Produkte 3. Ordnung werden wie folgt berechnet:

$$f_{IM_3} = f_1 \pm 2 \times f_2$$

bzw.

$$f_{IM_3} = f_2 \pm 2 \times f_1$$

Eine Aussage über die Intermodulationsfestigkeit macht man mit dem *Intercept Point* (IP). Sie finden diesen in den Werbeunterlagen zu Empfängern und Funkgeräten. Meist bezieht man sich hierbei auf den *IP dritter Ordnung*. Der IP ist erreicht, wenn am Mischerausgang die Pegel der IM-Produkte und der Eingangssignale gleich hoch sind.



Intercept Point (IP)

Je höher der Wert der IP-Angabe ist, desto besser verhält sich der Empfänger auf vollen Bändern mit hohen Signalpegeln.

Von *Kreuzmodulation* wird gesprochen, wenn ein starkes, unerwünschtes Signal sich mit dem Nutzsignal vermischt. Dies kann natürlich auch in Senderschaltungen vorkommen.

16.1.4 Vertiefung zu Modulationsarten

Frequency Shift Keying (FSK)

Frequency Shift Keying (FSK, F2A) ist eine besondere Form der Frequenzmodulation. Mit FSK übertragen Sie Fernschreibsignale oder Daten. Der FSK-Sender hat einen entsprechenden Anschluss, mit dem die (digitale) Information (High, Low) auf direktem Wege ohne Tonsignal auf die Sendefrequenz wirkt.

Audio Frequency Shift Keying (AFSK)

Audio Frequency Shift Keying benutzt Tonsignale, die die digitale Information transportieren. In diesem Fall wird der Fernschreiber oder das Modem mit dem Mikrofoneingang des Senders verbunden.

Phasenmodulation

Die *Phasenmodulation* wird zur Übertragung digitaler Informationen verwendet. Im Gegensatz zu FM wird hier die Phasenlage des Sendesignals abhängig vom Nutzsignal geändert. Beim (Hör-)Empfang kann man FM und PM nicht unterscheiden.

Amplitudenumtastung, Amplitude Shift Keying (ASK)

Die ASK in ihrer ursprünglichen Anwendung ist die Morsetelegrafie. Man stellt zwei Zustände dar: *Ein* und *Aus*. Allerdings ist dieses Verfahren für die Datenübertragung fehlerbehaftet: *Aus*, das Nullbit, kann hier ebenso eine Empfangstörung sein. Daher bietet es sich an, das Nullbit durch die Absenkung des Trägers darzustellen.

Abbildung 16.13 zeigt Ihnen das typische Signal.

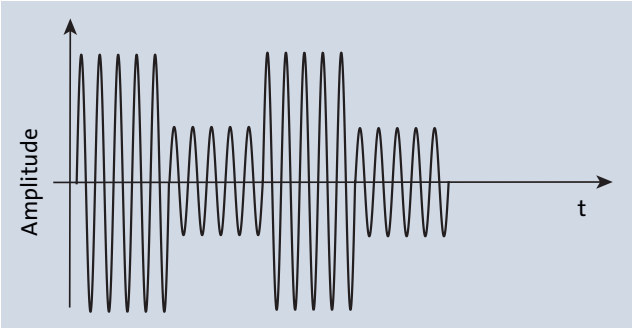


Abbildung 16.13 Amplitudenumtastung

16.1.5 Praktische Darstellung von modulierten Signalen

Mit einem SDR-Empfänger können Sie Signale ähnlich wie mit einem Oszilloskop betrachten. Die folgenden Abbildungen wurden mit *CubicSDR* erstellt. Als SDR-Empfänger dient ein *SDRPlay-RSP2*. Damit die Signale ohne störendes Beiwerk dargestellt werden konnten, wurde das 2-m-Band benutzt. Der Sender war an eine künstliche Antenne angeschlossen, der Empfänger nutzte eine kurze Teleskopantenne. Damit gelang die Darstellung, und es wurde niemand durch die Testsendungen gestört.

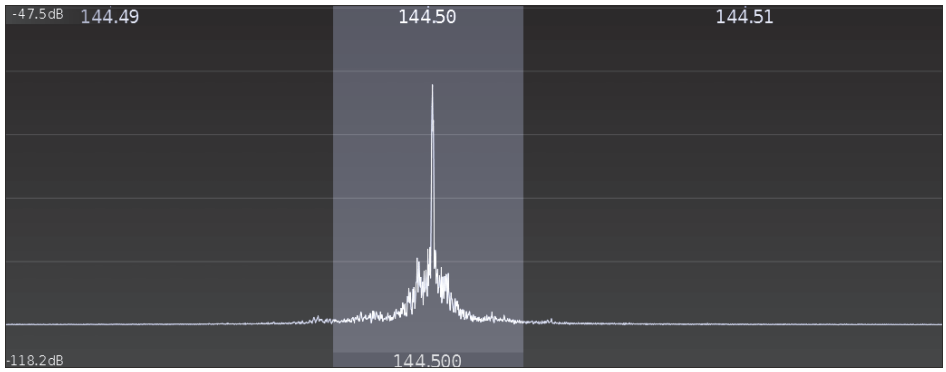


Abbildung 16.14 AM-Signal

Abbildung 16.14 zeigt Ihnen ein AM-Signal. Sie sehen das untere und das obere Seitenband, in der Mitte befindet sich der Träger.

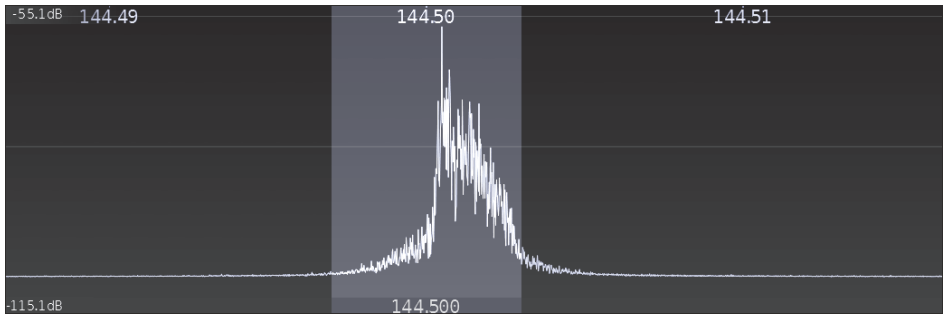


Abbildung 16.15 SSB-Signal

In der Signaldarstellung aus Abbildung 16.15 erkennen Sie, dass hier das obere, also zur höheren Frequenz zugewandte Seitenband die Sprache transportiert. Die Trägerfrequenz wirkt wie eine Schnittkante. Mit sehr niedrigem Pegel ist aber das unterdrückte untere Seitenband am Schirm sichtbar. Empfänger und Sender befanden sich in unmittelbarer Nachbarschaft, sodass dieses Seitenband erfasst werden konnte.

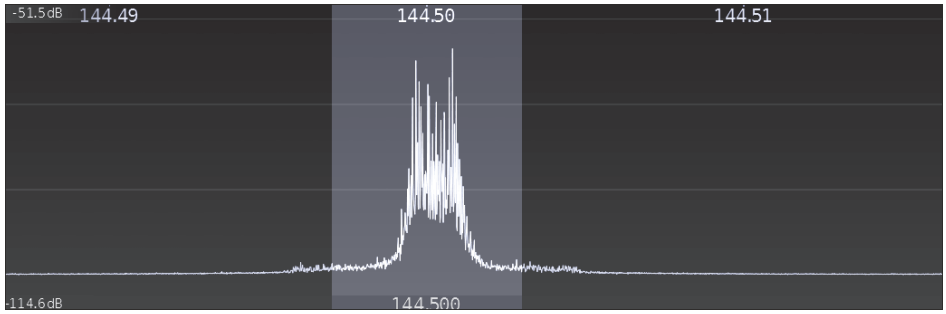


Abbildung 16.16 FM-Signal

Ein FM-Signal, das Sprache überträgt, sehen Sie in Abbildung 16.16. Hier erkennen Sie auch die Wirkung der *Preemphasis*: Die äußeren Flanken des Signals sind erhöht, was eine bessere Übertragungsqualität ermöglicht.

16.1.6 Morsetelegrafie (CW)

Die klassische Morsetelegrafie verwendet einen unmodulierten Träger. Dieser wird getastet. Das heißt, es gibt, wie in der Digitaltechnik auch, nur ein *Aus* oder *Ein*. Die Tastung erfolgt in einer eigenen Stufe. Würde man den Oszillator einfach immer ein- und ausschalten, erhielte man wegen des Anschwingverhaltens ein sehr unsauberes Signal. Anstelle eines Modulators verwendet man eine Verstärkerstufe, die das Signal eben unterbricht oder durchlässt.

Der Träger selbst ist ganz schmalbandig. Allerdings stellt auch die Häufigkeit (= Frequenz), in der die Taste betätigt wird, ein Signal dar. Das *Ein* und *Aus* stellt ein Rechtecksignal dar, das (siehe Abschnitt 7.10) Harmonische mit sich bringt.

Damit steigt die Bandbreite des CW-Signals an. In der Praxis ergibt sich daraus bei sehr schneller Gebeweise eine Bandbreite von rund 200 Hz. Telegrafisten verwenden aus diesem Grund entweder sehr schmalbandige Filter (500 Hz, 250 Hz) oder stellen ihr SDR-Gerät entsprechend ein. Damit man das Telegrafiesignal gut hören kann, mischt man im Empfänger ein Hilfssignal hinzu (BFO). Meist arbeitet man mit einer Tonhöhe um 800 Hz.

Eine zu steile Tastung (*harte Tastung*) erzeugt sogenannte *Tastklicks*, die andere Funkteilnehmer stören. Dies ergibt sich wiederum aus dem rechteckförmigen Signal, das eben Harmonische mit sich bringt. Steigt das Signal etwas langsamer an, spricht man von einer *weichen Tastung*, die das Problem behebt (siehe Abbildung 16.17).

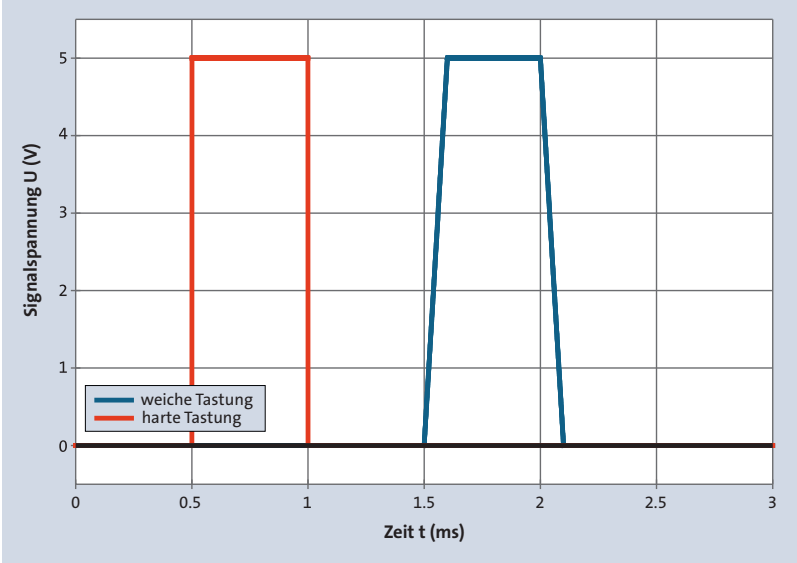


Abbildung 16.17 Harte und weiche Tastung

16.2 Betriebsarten

16.2.1 Richtungsangaben in der Kommunikation

In der Nachrichtentechnik kann die Informationsübertragung zwischen zwei Teilnehmern auf verschiedene Art und Weise geschehen.

Simplex-Verbindung

Rundfunk und Personenrufdienste sind wie Einbahnstraßen: Der Absender erhält auf dem gleichen Kommunikationsweg keine Rückmeldung oder Nachricht (siehe Abbildung 16.18).



Abbildung 16.18 Simplex

(Voll-)Duplexverbindung

Gleichzeitiges Senden und Empfangen ist heute im Mobilfunkbereich Standard, aber auch DECT-Telefone arbeiten vollduplex.

Im Amateurfunk ist dies kaum gebräuchlich, wäre aber bei einigen der neuen digitalen Verfahren möglich (siehe Abbildung 16.19).

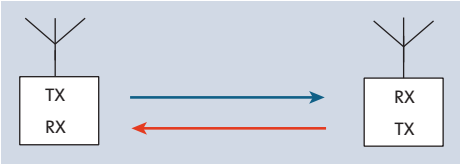


Abbildung 16.19 Vollduplex, duplex

Halbduplex

Der klassische Sprechfunk, aber auch größtenteils die Datenübertragung und die Morsetelegrafie arbeiten halbduplex (siehe Abbildung 16.20). Dabei sendet immer ein Partner, während der andere empfängt. So sind auch ohne trickreiche Zusammenschaltungen »Konferenzen« möglich, im Amateurfunk allgemein als »Runden« bekannt. Es gilt: »Wenn der Funker spricht, dann hört er nicht!«



Abbildung 16.20 Halbduplex

Amateurfunk über Relaisfunkstellen wird oft irrtümlicherweise als *Duplexübertragung* bezeichnet, was aber nicht richtig ist (siehe Abbildung 16.21). Auch wenn ein Relais die Kommunikation überträgt, kann stets nur ein Funkpartner senden. Im Digitalbereich sind zumindest theoretisch die Möglichkeiten anders.

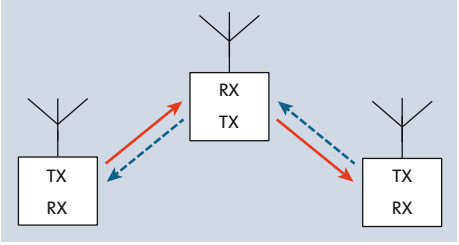


Abbildung 16.21 Halbduplexverbindung via Relaisfunkstelle

16.2.2 Übersicht der Betriebsarten im Amateurfunk

Dem Amateurfunk steht ein weites Spektrum an Möglichkeiten zur Verfügung. Bitte vergessen Sie nicht, dass es sich zudem um einen experimentellen Funkdienst handelt, bei dem es teilweise große Innovationssprünge geben kann!

Tabelle 16.4 gibt Ihnen einen **groben** Überblick über die Möglichkeiten. Halten Sie sich auf dem Laufenden; Informationen finden Sie in Fachzeitschriften und im Internet.

Anwendung	Bezeichnung	Hinweise
Sprechfunk	AM	kaum verwendet
	FM	im VHF/UHF-Bereich gebräuchlich, auch im 10-m-Band
	SSB	KW, VHF, UHF
	DMR	VHF seltener, UHF
	C4FM	VHF seltener, UHF
	D-Star	VHF seltener, UHF
	FreeDV	KW, 700 Hz Bandbreite!
Morsetelegrafie	CW	KW, VHF, UHF
Funkfernschreiben	RTTY	KW, VHF, selten UHF
Fax	FAX	KW, VHF, selten UHF
Fernsehen	ATV	UHF
Schmalbandfernsehen	SSTV	KW, VHF, selten UHF
Packet Radio	PR	VHF, UHF
HAMNET	HAMNET	2,4 GHz und 5 GHz
Textübertragung	PSK31	KW
Paketorientiertes Fernschreiben	PACTOR	KW, fehlerkorrigierend
Textübertragung	FT-8	KW, auch VHF, UHF, sehr schmalbandig
Textübertragung	FT-4	KW, auch VHF, UHF

Tabelle 16.4 Kurzübersicht über die Betriebsarten

DMR, C4FM und D-Star verwenden die Sendearten 7K60**FXD** (Daten) und 7K60**FXE** (Sprache).

Sprechfunk

In SSB und FM beträgt die (NF-)Bandbreite etwa 2,7 kHz, was für die Sprachübertragung ausreicht.

Für den Betrieb über FM-Relaisfunkstellen (siehe Abbildung 16.21) gelten einige Besonderheiten. Fast alle Relaisfunkstellen verwenden getrennte Empfangs- und Sendefrequenzen. Der Abstand im 2-m-Band beträgt 600 kHz, im 70-cm-Band (in Deutschland und einigen anderen Ländern) überwiegend 7,6 MHz. Üblicherweise liegt die »Eingabe« auf der tieferen, die »Ausgabe« auf der höheren Frequenz.

Ein Beispiel aus dem 2-m-Band wäre eine Ausgabe auf 145,600 MHz, eine Eingabe auf 145,000 MHz.

Bei einer Amateurfunkrelaisstelle läuft der Sender nur so lange, wie ein Nutzsignal anliegt. Deshalb muss die Relaisstelle aktiviert werden. Hierzu gibt es drei Möglichkeiten:

- Die Relaisfunkstelle öffnet bei (jedem) Signal.
- Zum »Öffnen« ist ein Tonruf (1.750 Hz) notwendig.
- Es wird ein Pilotton verwendet (CTCSS).

Wenn Sie CTCSS (*Continuous Tone Coded Subaudio Squelch*) verwenden, sendet Ihr Funkgerät einen Pilotton, der unterhalb des vom Sender übertragenen und vom Empfänger wiedergegebenen Tonfrequenzbereichs (300 Hz bis ca. 2,7 kHz) liegt. Dieses Verfahren bietet sich bei Relaisfunkstellen an, deren Empfang durch Störungen beeinträchtigt wird. Damit die Störungen das Relais nicht ständig öffnen, muss der Ton mitübermittelt werden.

Beispiel: Die Relaisfunkstelle DB0SL benötigt einen Pilotton von 71,9 Hz.

Mittels *Echolink* koppeln Sie zwei Relaisfunkstellen per Internet für die Dauer Ihrer Funkverbindung miteinander (siehe Abbildung 16.22).

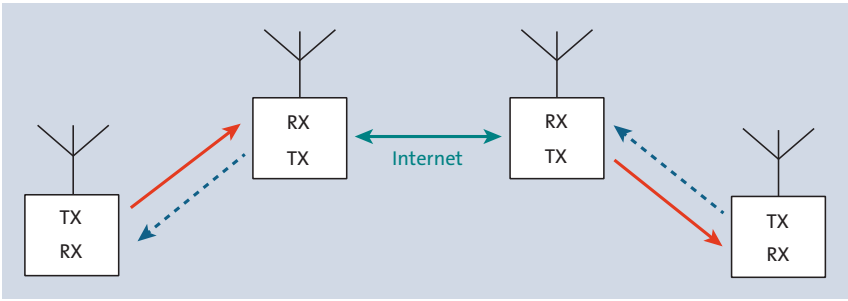


Abbildung 16.22 Relaiskopplung per Echolink

Damit das gelingt, müssen beide Relaisfunkstellen über die Echolinkanbindung verfügen und Ihr Funkgerät muss über eine DTMF-Tastatur verfügen. Sie geben damit

die Echolinknummer der gewünschten Relaisfunkstelle ein. Damit schaffen Sie es selbst mit einem kleinen Handfunkgerät »über den Teich«. Das im vorigen Beispiel genannte Relais DBOSL verfügt über die Echolinknummer 691274.

Weltweit klappt es auf VHF und höher mithilfe von *Satelliten*. Nicht nur Sprechfunk in FM oder SSB, sondern auch CW, SSTV und digitale Kommunikation (beispielsweise mit Packet Radio, PSK-31, FT4 oder FT8) ist oftmals möglich. Charakteristisch für die *Amateurfunksatelliten* ist, dass für den Uplink (Erde ⟶ Satellit) und den Downlink (Satellit ⟶ Erde) verschiedene Amateurfunkbänder benutzt werden. Das vereinfacht die technische Gestaltung der Funkstelle im Orbit. Aufwendige Filter, damit das Ausgabesignal nicht den Empfang des Eingabesignals beeinflusst, entfallen durch den großen Frequenzabstand. Die künstlichen Himmelskörper umkreisen die Erde meist auf Umlaufbahnen zwischen 800 und 1.500 km. Dadurch sind sie nicht ständig erreichbar. Durch ihre Bewegung müssen auch Sende- und Empfangsfrequenzen aufgrund des Dopplereffektes nachgestimmt werden.

Geostationäre Satelliten umkreisen genauso die Erde, »stehen« aber auf der gleichen Stelle und sind stets benutzbar. Ihr durchschnittlicher Abstand zur Erdoberfläche liegt zwischen 35.000 und 36.000 km. (Ganz exakt liegt die Geo-Kreisbahn bei 35.786 km.)

Viele Amateurfunksatelliten verfügen über *Transponder* zur Weiterleitung der Funksignale. Diese setzen einen Frequenzbereich um, anstelle eines einzigen Kanals. Dadurch kann der Satellit gleichzeitig von mehreren Funkamateuren benutzt werden. Oftmals sendet auch eine *Bake*, deren Signale zum Auffinden und Identifizieren des Satelliten genutzt werden kann. Zusätzlich ist immer ein Steuerkanal vorhanden, über den die Bodenstation in den Betrieb eingreifen kann. Amateurfunksatelliten verfügen über geringe Sendeleistungen, oftmals nur im einstelligen Watt-Bereich!

Für Bodenstationen ist es essenziell, die Sendeleistung sorgfältig zu wählen. Eine zu hohe Sendeleistung kann den Empfänger des Satelliten übersteuern, was nicht nur zu einer Beeinträchtigung der eigenen Übertragung führt, sondern auch andere Funkverbindungen stören kann. Es ist wichtig, mit der minimal notwendigen Leistung zu senden, um eine klare Kommunikation zu gewährleisten und gleichzeitig das Risiko von Interferenzen mit anderen Nutzern des Satelliten zu minimieren.

Der Amateurfunkdienst über Satelliten verwendet extra ausgewiesene Bereiche (Tabelle 357.01) in den Amateurfunkbändern. Bei den kürzeren Wellenlängen kommen anstelle von Yagi-Antennen *Parabolspiegel* (»Schüsseln«) zum Einsatz. Der Spiegeldurchmesser der Parabolspiegel sollte wenigstens die fünffache Wellenlänge der Nutzfrequenz betragen. Üblicherweise wird die Erregerantenne (*Feed*), die ein Dipol, Helix- oder Hornstrahler sein kann, nicht mehr mittig vor dem Spiegel montiert, sondern nach außen versetzt. Dies bezeichnet man als *Offsetspiegel*. Die Abstrahlung (*Strahlengang*) wird damit nicht mehr durch Abschattungseffekte behindert.

An den Spiegel wird heute meist ein LNB (*Low-Noise Block Converter*) oder seltener ein LNA (*Low-Noise Amplifier*) montiert. Während bei einem reinen LNA die Kabelstrecke zum Funkgerät von Bedeutung ist, ist die Situation bei der Nutzung eines LNBs entspannter: Der LNB verfügt über einen eingebauten, rauscharmen Vorverstärker (LNA) und setzt aber das damit empfangene Signal auf eine niedrigere Frequenz um, bei der die Kabeldämpfung weniger Auswirkungen hat. Gespeist wird die Elektronik im Parabolspiegel meist mittels BIAS-T, also per Fernspeisung. Durch die Umschaltung der Versorgungsspannung des LNB kann z. B. dort die Polarisation gewechselt werden. Optional können durch NF-Signale weitere Schaltvorgänge ausgelöst werden. Die technischen Details finden Sie in Abschnitt 14.11.

Vor einiger Zeit wurden die verschiedenen Modi hinsichtlich der Up- und Downlink-Frequenzen recht einfach bezeichnet:

- **Mode A**: Up 2 m – Down 10 m
- **Mode B**: Up 70 cm – Down 2 m
- **Mode J**: Up 2 m – Down 70 cm

Diese Bezeichnungen finden Sie teils noch bei den Beschreibungen einzelner Satelliten. Durch die Erschließung höherer Bänder reichte dieses System nicht mehr aus.

Eine Kombination verschiedener Bänder für den Up- und Downlink wird mit Buchstaben vorgenommen. Dabei bezeichnet der erste Buchstabe den Uplink, der zweite den Downlink. Tabelle 16.5 zeigt die Zuordnung.

Band	Kennzeichen
15 m	H
10 m	T
2 m	V
70 cm	U
23 cm	1 L
13 cm	S
6 cm	C1
3 cm	X
1,2 cm	K
6 mm	Q

Tabelle 16.5 Bänder und ihre Kennzeichen

Regionale Unterschiede in Bandbezeichnungen bei Amateurfunksatelliten

Beim Betrieb von Amateurfunksatelliten ist es wichtig, die regionalen Unterschiede in den Bandbezeichnungen zu beachten. Diese Bezeichnungen, die den Uplink (Sendeweg vom Nutzer zum Satelliten) und den Downlink (Sendeweg vom Satelliten zum Nutzer) kennzeichnen, können sich zwischen verschiedenen Teilen der Welt unterscheiden. Während einige Buchstabenkürzel wie V für das 2-Meter-Band oder U für das 70-Zentimeter-Band weitgehend international anerkannt sind, können die Bezeichnungen für Mikrowellenbänder und andere Frequenzbereiche variieren.

Die Zuordnung von Buchstaben zu bestimmten Bändern kann in Europa, Japan und den USA unterschiedlich sein. Dies spiegelt lokale Vorschriften und die Verfügbarkeit von Frequenzbändern wider. Funkamateure sollten sich vor dem Betrieb von Satellitenkommunikationseinrichtungen mit den spezifischen Bandbezeichnungen und Frequenzzuweisungen ihrer Region vertraut machen. Für die genauesten und neusten Informationen konsultieren Sie lokale Amateurfunkverbände, offizielle Regulierungsbehörden oder die Webseiten internationaler Amateurfunkorganisationen wie der AMSAT.

Es gibt verschiedene digitale Betriebsarten im Amateurfunk, die hier kurz vorgestellt werden. Detaillierte Informationen dazu finden Sie in Kapitel 17, »Digitale Sende- und Empfangstechnik«, und Kapitel 33, »Amateurfunk digital«.

Packet Radio

Diese mittlerweile stark im Rückzug befindliche Betriebsart ermöglicht es, unabhängig vom Internet Text und Daten paketweise per Funk zu übertragen. Weitere Informationen finden Sie in Kapitel 33, »Amateurfunk digital«. Abgelöst wird das Verfahren durch *HAMNET*, das normale Netzwerktechnik (das *IP-Protokoll*) benutzt. Packet Radio entspricht den »Mailboxen«, wie man sie aus den 80er- und 90er-Jahren aus der »Vor-Internet-Ära« kennt.

Packet Radio überträgt Texte und Daten. Dabei werden die Informationen in Pakete zerlegt, die anschließend mit einem fehlerkorrigierenden Verfahren übertragen werden. Am Anfang jedes Pakets steht das Synchronisationszeichen, der Takt wird im Empfänger aus den Daten gewonnen. Nach erfolgreicher Synchronisation werden die Daten aus dem Binärstrom gelesen. Das ist das gleiche Verfahren wie mit den »Mailboxen«, die man über das Telefonnetz erreichte. Dort konnte man ebenfalls zuhören, wie zunächst beim Verbindungsaufbau synchronisiert wurde und anschließend die Verbindung zustande kam.

Zur Teilnahme mit 1.200 Baud (»1k2«) genügt ein FM-Funkgerät, das über die notwendigen Anschlussmöglichkeiten (externes Mikrofon und Lautsprecher) verfügt, da hier die NF-Bandbreite mit 3 kHz (bei 12 kHz HF-Bandbreite) ausreicht. Die NF-Zwischenträger weisen hier 1.200 Hz und 2.200 Hz auf. Für die Nutzung mit 9.600 Baud belegen Sie 20 kHz Bandbreite. Funkgeräte mit einem extra TNC-Anschluss sind dafür vorbereitet. Das PR-Signal vom TNC wird dabei direkt auf den FM-Modulator gegeben. Beim Empfang wird ebenso der Demodulator direkt abgegriffen. Hierbei sollte die NF-Bandbreite von 6 kHz nicht überschritten werden.

Baud

Baud ist die Einheit für die Symbolrate oder Schrittgeschwindigkeit in der Fernmeldetechnik, benannt nach Emile Baudot. Es misst, wie viele Symbole pro Sekunde übertragen werden, wobei 1 Baud (Bd) der Übertragung von 1 Symbol je Sekunde entspricht.

Die Baudrate entspricht nicht immer der Bitrate in digitalen Übertragungen. In Systemen, bei denen jedes Symbol genau ein Bit repräsentiert, stimmen Baudrate und Bitrate überein. Moderne Kommunikationstechniken nutzen jedoch oft mehrere Bits pro Symbol, was zu einer Bitrate führt, die höher als die Baudrate ist.

Formel für die Bitrate: *Symbolrate* × (*Bit je Symbol*).

Die Sende-Empfangs-Umschaltung muss sehr schnell arbeiten, wenn möglich im Bereich von 100 ms bis 10 ms. Mit dem Beginn der Datenübertragung muss so lange gewartet werden, bis der Sender eingeschwungen ist. Diese Zeitspanne wird als *TX-Delay* bezeichnet.

Darüber hinaus benötigen Sie einen *Terminal Node Controller* (TNC), den Sie zwischen Ihren Rechner und das Funkgerät schalten. Dieses Gerät übernimmt die digitale Aufbereitung der Daten, aber auch die Dekodierung.

Unbemannt arbeitende Mailboxen ermöglichen den Nachrichtenversand und -empfang, auch wenn die Gegenstation nicht aktiv ist. Der DAMA-Modus ermöglicht es, dass das TNC des Teilnehmers von Netzknoten angesprochen wird und auf dessen Anforderung hin sendet.

Weil die Pakete mit den Teilinformationen zeitversetzt gesendet werden, können mehrere Stationen gleichzeitig PR-Verbindungen haben. Ein wenig erinnert das an die CSMAD-Steuerung beim guten alten Ethernet.

Packet Radio kompakt

- **Datenübertragung**: Die Daten werden in einzelne Pakete zerlegt. Die Übertragung wird mittels einer Synchronisationssequenz eingeleitet. War dies erfolgreich, werden die Pakete aus dem Binärstrom gelesen.

- **Geräte**: Ein *Terminal Node Controller* (TNC) wird mit dem PC und dem Funkgerät verbunden. Der TNC besteht aus einem Modem und einem Controller für die digitale Aufbereitung der Daten.
- **Übertragungsparameter**:
  - 1.200 Baud (Bd) mit NF-Zwischenträgern 1.200/2.200 Hz und 12 kHz Bandbreite
  - 9.600 Baud mit 20 kHz Bandbreite
- **Funktechnik**: Für 1.200 Baud reicht ein herkömmliches FM-Funkgerät aus. Für die 9k6 hingegen muss der NF-Frequenzbereich von 20 Hz bis 6 kHz linear übertragen werden. Die Sende-Empfangs-Umschaltung muss so kurz wie möglich arbeiten (< 10 bis 100 ms). Bei bestehenden FM-Funkgeräten kann das Sendesignal direkt am FM-Modulator zugeführt und das Empfangssignal direkt am Demodulator abgegriffen werden.
- **TX-Delay**: Nach dem Hochtasten des Senders muss dieser vor Beginn der Datenübertragung eingeschwungen sein.
- **Mehrfachbetrieb**: Mehrere PR-Stationen können gleichzeitig Verbindungen auf einer Frequenz haben, da die Gesamtinformationen einer Station in Teilinformationen zerlegt werden, die zeitversetzt gesendet werden. Zwischen den einzelnen Übermittlungsvorgängen nutzen andere Stationen die Frequenz.
- **DAMA**: Die TNC der Teilnehmer werden durch einen Netzknoten zum Senden aufgefordert.
- **Mailbox**: Rechner, auf denen die Texte und Daten per Funk abgelegt und abgerufen werden.

Bild- und Schriftübertragung

Funkfernschreiben, RTTY

RTTY ist streng genommen eine der ersten digitalen Übertragungsarten. Heute benötigen Sie aber nur noch einen PC mit Soundkarte und ein geeignetes Programm, um RTTY (*Radio Tele Typing*) durchzuführen. An manchen Museumsstationen finden Sie aber noch Originalfernschreiber, die notwendigen Zusatz- und Anschalteinrichtungen und die für damalige Zeiten zeitgenössische Funktechnik.

Für die Informationsübertragung kommt hier ein 5-Bit-Code mit zusätzlichen Start- und Stoppbits zum Einsatz, der *Baudot-Code*. Für RTTY ist die *CCITT-2*-Kodierung gebräuchlich. Es können insgesamt 32 Zeichen kodiert werden. Damit Ziffern, Sonder- und Verkehrszeichen (»WERDA?«) umgesetzt werden können, wird zwischen Buchstaben und Ziffern umgeschaltet. Damit erhält man einen Zeichenvorrat, mit dem man vernünftig arbeiten kann.

Die Umschaltung zwischen Ziffern (ZI) und Buchstaben (BU) ist stets notwendig. Beispiel: Der Text »A1A1« wird übermittelt (siehe Tabelle 16.6).

Zeichen	A		1		A		1
Code	00011	11011	10111	11111	00011	11011	10111
Überm.	A	ZI	1	BU	A	ZI	1

Tabelle 16.6 RTTY-Übermittlungsbeispiel

Im Amateurfunk ist eine Übermittlungsgeschwindigkeit von 45 Baud gebräuchlich.

Pactor

Mit *Pactor* übertragen Sie Texte und Daten. Dieses Verfahren passt die Übertragungsgeschwindigkeit den Übertragungsverhältnissen an. Im Gegensatz zu RTTY verfügt es über eine Fehlerkorrektur.

Sie benötigen hierfür einen speziellen Controller, den Sie, ähnlich wie den TNC, mit dem Funkgerät und Ihrem Rechner verbinden.

SSTV und ATV

Amateurfunk-Fernsehen (ATV) wird wegen der benötigten Bandbreite oberhalb von 430 MHz betrieben, meist auf dem 23-cm-Band und höher.

Bewegtbilder, auch farbig und natürlich mit Ton, werden damit übertragen, also »richtiges« Fernsehen mit Amateurfunkinhalten.

SSTV (*Slow Scan Television*) hingegen benötigt nur um die 2,5 kHz Bandbreite und wird daher auch auf Kurzwelle benutzt. Es werden nur Standbilder übertragen. Die Übertragung eines Bildes kann bis zu mehreren Minuten dauern, je nachdem, ob der Inhalt aus einem Graustufenbild oder einem Farbbild besteht.

Heute werden beide Betriebsarten mit dem PC und entsprechenden Programmen abgewickelt.

Zur Bildübertragung werden auch Faxverfahren verwendet.

PSK31

PSK31 ermöglicht eine sehr schmalbandige Textübertragung. Die theoretische Bandbreite beträgt nur 31 Hz. Leider verfügt es in dieser Form über keine Fehlerkorrektur, sodass man bei schlechten Bedingungen manche Durchgänge wiederholen muss. Durch die Schmalbandigkeit ist im Übrigen eine sehr geringe Senderausgangsleistung ausreichend.

Die Bedienungsprogramme beeinhalten ein Wasserfalldiagramm. Durch die Tatsache, dass ein Standard-SSB-Filter 2,7 kHz Durchlassbreite aufweist, empfangen Sie gleichzeitig mehrere Stationen. Das Wasserfalldiagramm stellt sie als einzelne Säulen dar. Per Fingertipp oder Mausklick bestimmen Sie die gewünschte Station.

Abbildung 16.23 zeigt Ihnen einen Bildausschnitt von *CubicSDR*. Die linke Hälfte stellt den ausgeschnittenen Frequenzbereich als Spektraldarstellung, die rechte als Wasserfalldiagramm dar.

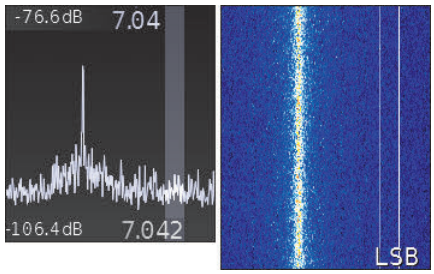


Abbildung 16.23 Spektral- und Wasserfalldiagramm

Ausblick

Derzeit entwickeln sich im Bereich Textübertragung vor allem die WSJT-Modi FT8 und FT4 rasch weiter. Zudem geschieht die Datenübertragung vermehrt über das HAMNET, ein Intranet der Funkamateure (siehe Kapitel 33). Die Zugänge liegen im 2,4-GHz- und 5-GHz-Band. Die Übertragungsbandbreite muss der AFuV entsprechen. Verschlüsselung (SSH, SFTP u. a.) sind unzulässig, da Amateurfunkverkehr in offener Sprache abgewickelt werden muss. Die MAC-Adresse des eigenen Geräts muss das eigene Rufzeichen enthalten. Die Kommunikationsprogramme sind dieselben, die Sie vom Internetzugriff her kennen: Browser, FTP-Client, TELNET (!) usw.

Halten Sie sich auf dem Laufenden!

16.3 Modulator und Demodulator

Die Aufgabe des Modulators ist, die Information mit dem HF-Signal zu vermengen. Umgekehrt extrahiert der Demodulator die Information wiederum aus dem HF-Signal zurück.

16.3.1 Amplitudenmodulation (AM)

Die AM-Modulation selbst wird im Amateurfunk nicht angewendet, abgesehen von einigen wenigen nostalgischen Anlässen. Für die Erzeugung eines SSB-Signals bildet sie aber die Grundlage.

Mit einem DualGate-FET erzeugen Sie auf einfache Weise ein AM-Signal. Die Schaltung in Abbildung 16.24 zeigt die Grundfunktion, ist jedoch stark vereinfacht und so nicht praxistauglich. Beispielsweise fehlt die Filterung des Ausgangssignals.

Die Hochfrequenz wird auf das PIN 4 (= Gate 1) gespeist. Das NF-Signal läuft über C1 auf den Spannungsteiler P1 und von hier auf PIN 3 (= Gate 2). Am Source-Anschluss (PIN 2) ist das Potentiometer P2 gegen Masse angeschlossen. Hier stellen Sie den Modulator so ein, dass das Ausgangssignal zwar kräftig klingt, aber nicht übersteuert wird. Das modulierte AM-Signal verlässt am Drain-Anschluss (Pin 1) über den C3 die Schaltung und kann am Ausgang weiter genutzt werden.

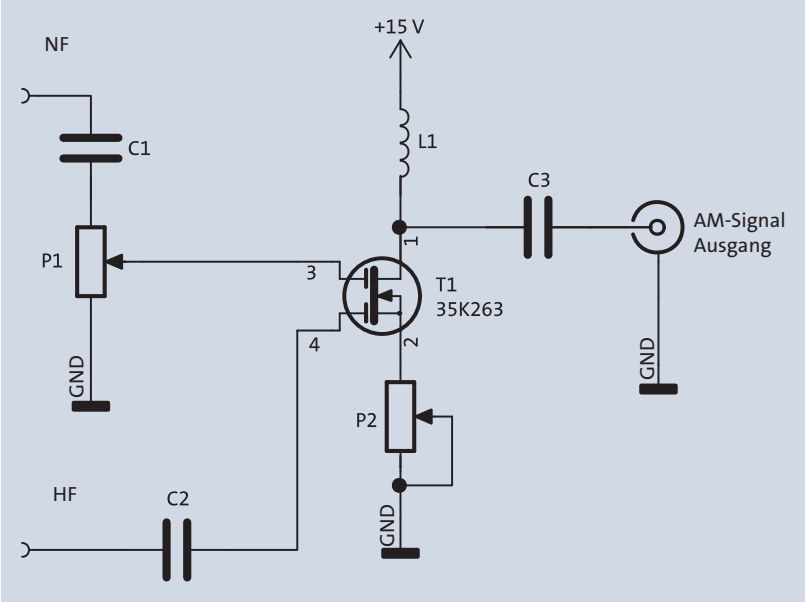


Abbildung 16.24 Erzeugung eines AM-Signals

Beachten Sie, dass AM-Signale auch durch andere, unerwünschte Effekte erzeugt werden können! Gelangt ein Stör- und Nutzsignal zur Versorgungsspannung einer Senderendstufe, wird damit ein AM-Signal erzeugt.

Die einfachste Form eines *AM-Detektors* ähnelt den Empfängern der Frühzeit des Funk- und Radiowesens, dem *Geradeausempfänger* (siehe Abbildung 16.25). Das HF-Signal wird hierbei gleichgerichtet und etwas geglättet.

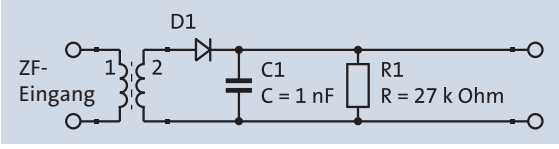


Abbildung 16.25 AM-Detektor

Der *Hüllkurvendemodulator* (siehe Abbildung 16.26) ist die Weiterentwicklung des AM-Detektors. Durch die Glättung (B) bilden die halbwelligen Signalspitzen eine nie-

derfrequente Signalspannung. Ein Teil dieses Signals gelangt über den in Serie liegenden Koppelkondensator (NF) zum NF-Verstärker. Eventuelle Gleichspannungsanteile werden hierdurch unterdrückt. Das nach dem Kondensator anliegende Signal entspricht in etwa dem, das auf den AM-Modulator gegeben wurde.

Der andere Teil des Signals am Punkt REGELSPANNUNG bildet den Mittelwert der Gleichspannung nach der Diode. Man führt diese Spannung der automatischen Regelung des Empfängers zu, mit der Signalschwankungen »weich« ausgeglichen werden können.

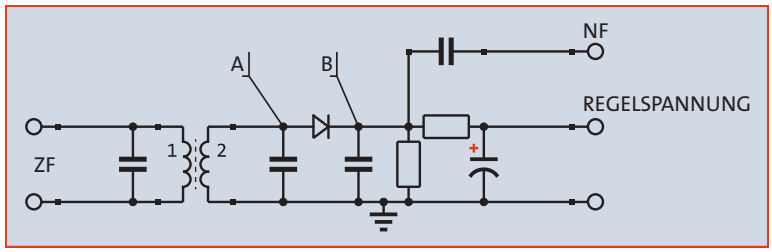


Abbildung 16.26 AM-Hüllkurvendemodulator

Am Punkt A kann das HF-Signal, das von der letzten ZF-Stufe des Empfängers stammt, abgegriffen werden (siehe Abbildung 16.27).

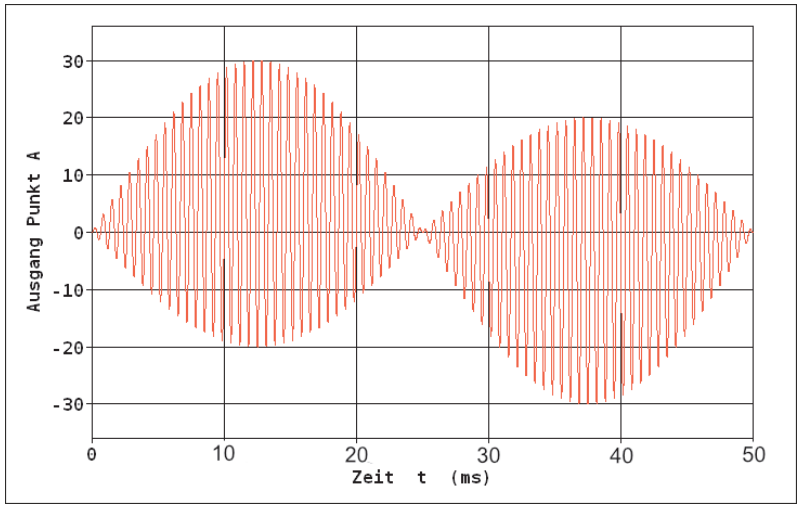


Abbildung 16.27 Das Signal am Punkt A des Hüllkurvendemodulators

Nach der Gleichrichtung durch die Diode finden Sie am Punkt B das in Abbildung 16.28 dargestellte Signal.

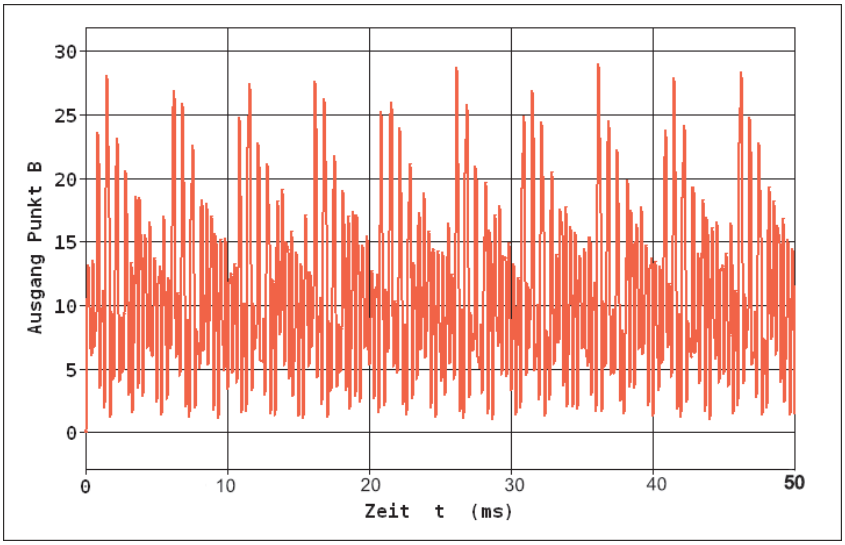


Abbildung 16.28 Das Signal am Punkt B des Hüllkurvendetektors

Der Regelspannungsausgang führt das Signal, das Sie in Abbildung 16.29 sehen.

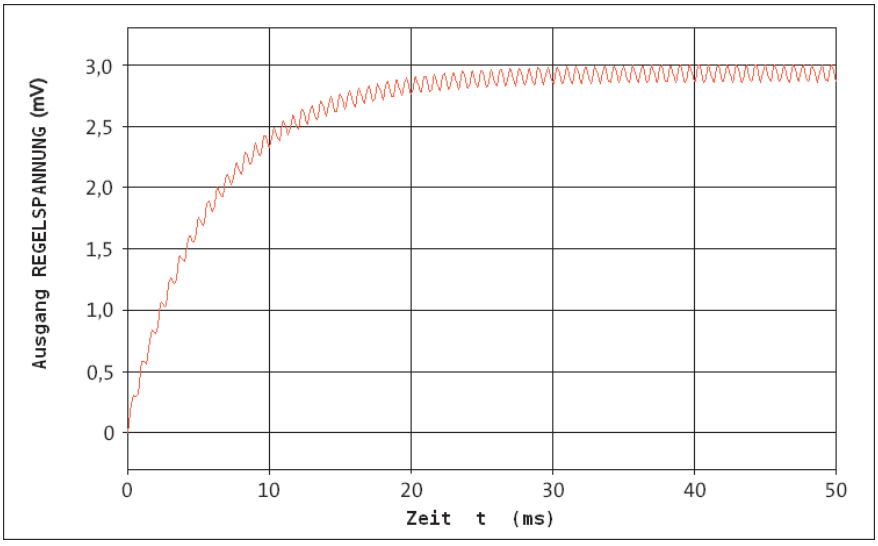


Abbildung 16.29 Das Signal am Punkt »Regelspannung« des Hüllkurvendetektors

Abbildung 16.30 zeigt das extrahierte NF-Signal, das am gleichnamigen Punkt der Schaltung abgegriffen werden kann.

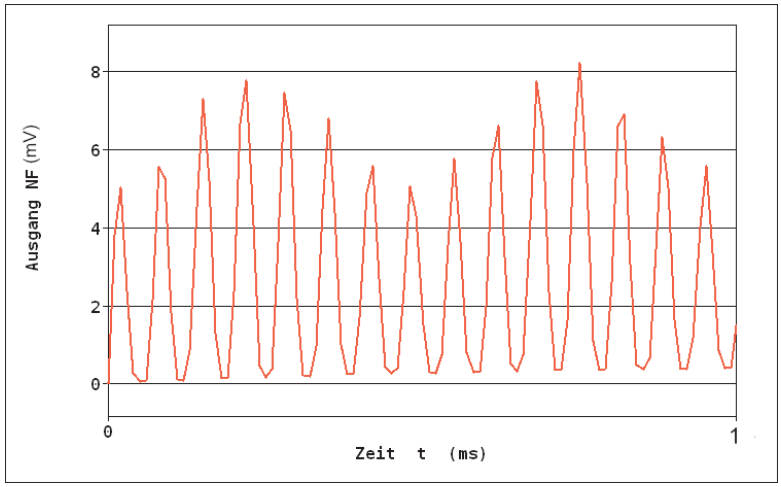


Abbildung 16.30 Das Signal am Punkt NF des Hüllkurvendetektors

16.3.2 Einseitenband, Single Sideband (SSB)

Bei der Erzeugung eines SSB-Signals werden der Träger und ein Seitenband unterdrückt oder ausgefiltert.

In einem Balancemodulator wird ein Zweiseitenband-Signal (ohne Träger) erzeugt. Das Seitenbandfilter lässt nur das gewünschte passieren.

Signalerzeugung

Um ein SSB-Signal zu erzeugen, muss der Träger des AM-Signals unterdrückt werden. Damit entsteht ein Zweiseitenbandsignal (DSB, *Double Sideband*). Von diesem wird nochmals ein Seitenband entfernt (siehe Abbildung 16.31).

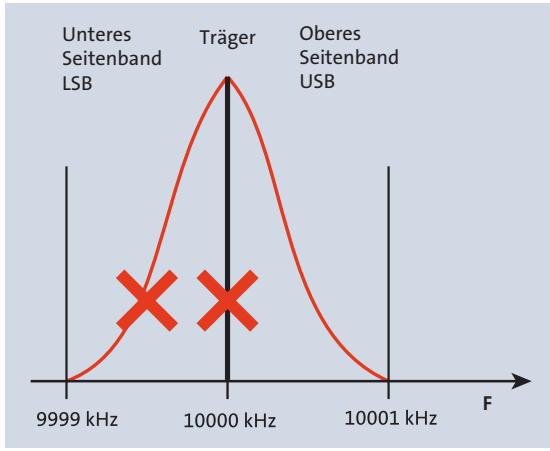


Abbildung 16.31 SSB-Signal

Wenn Sie die Sendetaste eines SSB-Senders drücken, ohne dass ein Ton an das Mikrofon gelangt, so werden Sie eine sehr geringe Ausgangsleistung messen. Dies ist die direkte Folge der Trägerunterdrückung. Wenn Sie Messungen an SSB-Sendern vornehmen, verwenden Sie einen Zweiton-Tongenerator, damit eine gleichmäßige und nachvollziehbare NF-Ansteuerung gewährleistet ist.

Das Beispiel in Abbildung 16.31 zeigt, dass ein Träger (10.000 kHz) mit einem Signal (1.000 Hz Tonhöhe) moduliert wird. Das untere Seitenband (f_{min} 9.999 kHz) und der Träger werden aus dem AM-Signal entfernt, das obere Seitenband wird verwendet.

Zunächst müssen Sie in der herkömmlichen Funktechnik (also mit elektronischen Bauelementen anstelle von Algorithmen wie bei Software Defined Radio, SDR) trotzdem ein AM-Signal erstellen, um diesem gleich die nicht mehr benötigten Anteile zu nehmen.

Ein zentrales Bauteil hierfür ist der *Ringmodulator* (siehe Abbildung 16.33), der meist als fertiger Baustein in Schaltungen verwendet wird. Er besteht aus zwei Übertragern und vier Schottkydioden. Die Dioden bilden dabei einen Ring, im Gegensatz zur Anordnung des Brückengleichrichters. Betrachten Sie Abbildung 16.32 genau, damit Sie nicht die beiden Schaltungen miteinander verwechseln! Beim Ringmodulator trifft jede Kathode einer Diode auf die Anode der folgenden! Beim Brückengleichrichter hingegen treffen auch je einmal Kathode/Kathode und Anode/Anode aufeinander.

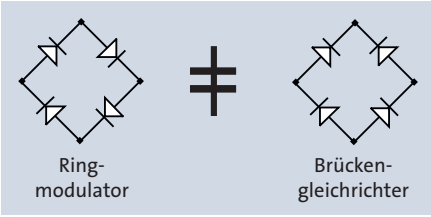


Abbildung 16.32 Diodenanordnung beim Ringmodulator und beim Brückengleichrichter

Der Träger wird vom Oszillator G erzeugt. Dieser ist an der Mittelanzapfung des Tr2 angeschlossen. Durch die Aufhebung der gegenläufigen Magnetfelder wird der Aufbau der Trägerspannung verhindert.

An der Wicklung von Tr1 wird das Tonsignal U_1 angelegt. Die positiven und negativen Halbwellen des Tonsignals passieren den Diodenring. Dieser ist mit der Spule mit Mittelanzapfung des Tr2 verbunden. Zusammen mit dem HF-Signal bildet sich die Ausgangsspannung U_3.

Führt das Tonsignal die negative Halbwelle und das HF-Signal die positive, liegt am Messpunkt U_3 eine negative Halbwelle an und umgekehrt.

In vielen Bauanleitungen taucht dieses Prinzip des Ringmischers/Ringmodulators auf. Die Schwierigkeit besteht darin, vier Dioden zu finden, deren elektrische Werte

exakt übereinstimmen, und die beiden Übertrager aufzubauen (Ringkern). Einfacher ist es, hier auf fertige Bausteine wie den IE500, den SBL1 oder den HPF505 zurückzugreifen.

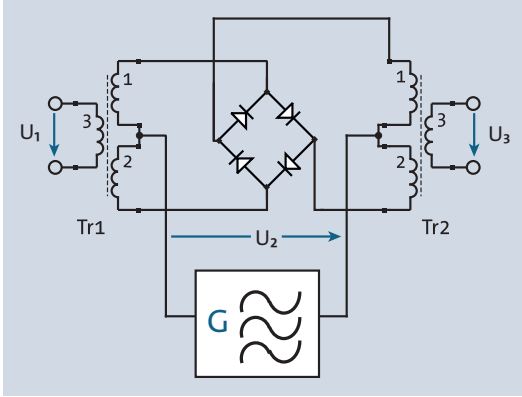


Abbildung 16.33 Ringmodulator (Balance-Modulator)

Eine einfachere Schaltung zur Erzeugung von DSB-Signalen sehen Sie in Abbildung 16.34. Diese verfügt nur über einen Übertrager. Das Tonsignal wird hier unsymmetrisch per kapazitiver Kopplung in den »Diodenring« gegeben.

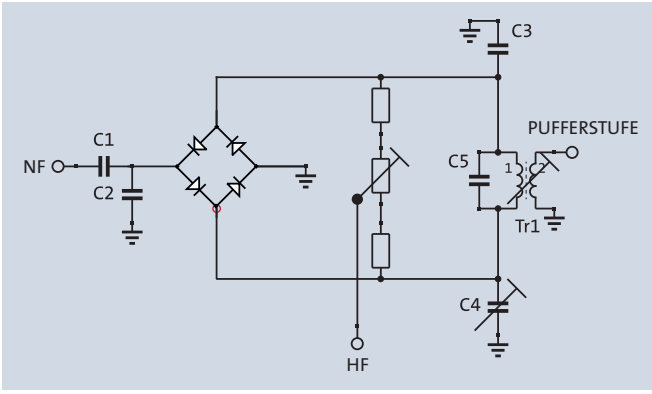


Abbildung 16.34 Ringmodulator mit einem Übertrager

Das HF-Trägersignal wird über den einstellbaren Spannungsteiler symmetrisch eingekoppelt. Hierbei wird in der Primärspule des Ausgangsübertragers das Trägersignal selbst ausgelöscht.

Das HF-Trägersignal passiert zusammen mit dem NF-Signal den Diodenring. Das dabei entstandene Signal wird über den Übertrager ausgekoppelt.

Die Primärspule des Übertragers bildet zusammen mit dem Kondensator C5 einen Schwingkreis. Der Abgleich erfolgt hier am Übertrager; alternativ kann auch ein

Trimmkondensator verwendet werden. Der Trimmkondensator C4 passt eventuelle Abweichungen bei der Diodenkapazität an.

Das Zweiseitenbandsignal muss noch weiter bearbeitet werden: Eines der Seitenbänder muss entfernt werden. Hierfür kommt z. B. die Filtermethode zum Einsatz. Die sehr schmalbandigen Filter entfernen ein Seitenband, und das Signal wird an die nachfolgenden Stufen weitergereicht (siehe Abbildung 16.35).

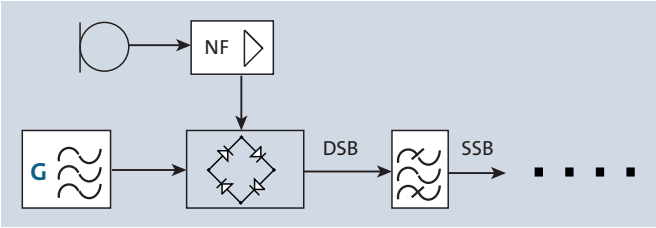


Abbildung 16.35 SSB-Signalerzeugung mit Filter

Wiedergabe von SSB-Signalen

Um ein SSB-Signal verständlich wiederzugeben, muss der fehlende Träger wieder hinzugemischt werden. Das damit entstandene Signal wird im Anschluss wie ein AM-Signal demoduliert (siehe Abbildung 16.36).

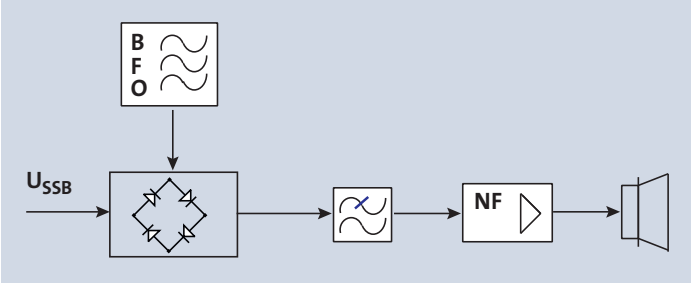


Abbildung 16.36 SSB-Demodulation (Schema)

Der Hilfsoszillator, der den Träger erzeugt, trägt die Bezeichnung *Beat Frequency Oscillator* (BFO). Für den SSB-Empfang entspricht seine Frequenz der Zwischenfrequenz.

Der BFO hilft übrigens auch, CW-Signale (A1A) hörbar zu machen! Die BFO-Frequenz sollte von der Zwischenfrequenz um ± 800 Hz abweichen. Wenn Sie ein Telegrafiesignal empfangen, hören Sie die Differenz (also die Abweichung von der ZF) als ebenso hohen Ton.

Beträgt die Zwischenfrequenz 9 MHz, kann der BFO auf 8,9992 MHz oder auf 9,0008 MHz eingestellt werden. Bei vielen Empfängern und Funkgeräten ist hierfür ein Bedienelement vorgesehen, sodass Sie sich die Tonhöhe nach Ihrem Geschmack einstellen können.

Wiederum kann man den Ringmodulator einsetzen. Diese Schaltung wird auch als *Produktdetektor* bezeichnet.

Die Schaltung eines Produktdetektors sehen Sie in Abbildung 16.37.

Das SSB-Signal aus der ZF-Stufe gelangt über TR1 an den Diodenring, das BFO-Signal über TR2. Das Signalgemisch wird über die Mittelanzapfungen von TR1 und TR2 entnommen. Die hohen Frequenzen der ZF werden durch den Kondensator an der Weiterleitung zur NF-Stufe unterdrückt. Nur das NF-Signal selbst kann zur weiteren Verstärkung die Schaltung passieren. An dieser Stelle könnten Sie auch ein »richtiges« Tiefpassfilter vorsehen.

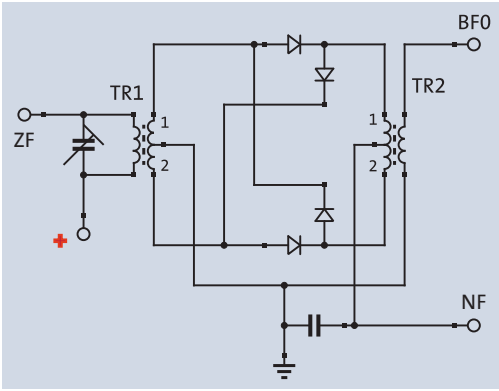


Abbildung 16.37 Produktdetektor

16.3.3 Frequenzmodulation (FM)

Die Vorzüge der FM wurden schon in Abschnitt 16.1.2 erwähnt: Gute Tonqualität und Störungsunempfindlichkeit zeichnen die Frequenzmodulation aus. Natürlich hat dies seinen Preis: Es wird eine relativ hohe Bandbreite benötigt, sodass diese Sendeart erst ab dem 10-m-Band genutzt werden darf. Üblich ist daher die Nutzung im VHF- und UHF-Bereich.

FM-Sender

Die Erzeugung von FM-Signalen ist in der Frequenzerzeugung des Senders angesiedelt (siehe Abbildung 16.38). Das NF-Signal steuert mit seiner Spannung einen VCO. Zentrales Bauelement hierfür ist die Kapazitätsdiode. Sie liegt parallel zum Kondensator eines Resonanzkreises. Sie wird in Sperrrichtung betrieben, + liegt also an der Kathode. Hier gilt: Je höher die Spannung ist, desto niedriger ist die Kapazität, desto höher ist die Frequenz. Diese Vorspannung wird um das NF-Signal (Wechselspannung) ergänzt. Die positive Halbwelle dieses Signals erhöht die Spannung, die in Sperrrichtung der Diode anliegt. Damit sinkt deren Kapazität, die Frequenz steigt in der Folge. Der Ausschlag des Signals (Amplitude) bleibt davon unberührt.

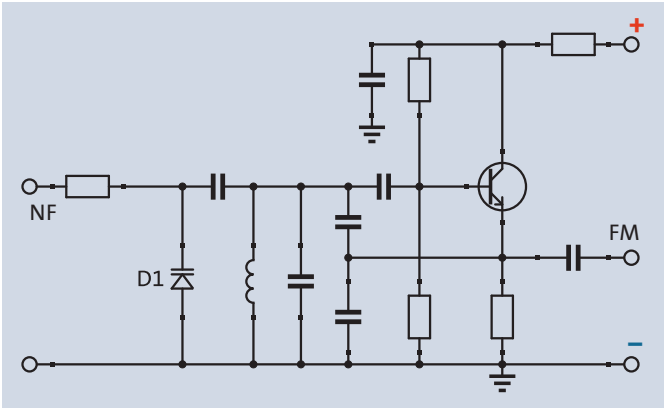


Abbildung 16.38 Erzeugung eines FM-Signals

Das Maß für die Umsetzung von Frequenz zu Spannung wird als *Empfindlichkeit des FM-Modulators* bezeichnet und in kHz/V angegeben.

Um die Übertragungsqualität weiter zu verbessern, hebt man die Lautstärke der höheren Frequenzen des NF-Signals an (*Preemphasis*). Besonders bei schwachen Signalen wird das Rauschen von diesem lauteren Anteil der übertragenen Töne überblendet.

Eigenschaften von FM-Sendern

- Die Ausgangsleistung ist unabhängig von der Modulation.
- Der FM-Hub ist abhängig von der Lautstärke des NF-Signals.
- Ist der Hub zu hoch, sprechen Sie leiser.
- Der Hub bestimmt die belegte Bandbreite.
- Die Preemphasis hebt die Lautstärke der höheren Frequenzen des NF-Signals an, was zu einer Verminderung des Rauschens beim Empfang führt (Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands).

FM-Demodulation

FM-Signale können auf mehrere Weisen demoduliert werden. Von einem *Diskriminator* spricht man, wenn bei der Demodulation der Zwischenschritt über die Amplitudenmodulation gegangen wird. Zudem kann eine PLL-Schleife (*Phase-Locked Loop*, phasengekoppelte Schleife) für diese Aufgabe herangezogen werden.

Mit Software gelingt das Vorhaben auf einem SDR-Empfänger. Algorithmen anstelle von elektronischen Bauelementen lassen Sie hier viele Möglichkeiten nutzen.

Wenn Sie auf dem 10-m-Band FM-Signale empfangen möchten, aber Ihr Empfänger nur AM »kann«, dann stellen Sie sich auf die Flanke des Signals. Sie können dann das FM-Signal empfangen – nicht in guter Qualität, aber größtenteils verständlich.

Diskriminatorschaltungen

Der *Flankendiskriminator* (siehe Abbildung 16.39) stellt die einfachste Schaltung dar. Allerdings ist hier die Wiedergabequalität nicht viel besser als die eben beschriebene mit dem AM-Empfänger. Der (umrandete) Schwingkreis führt in seiner Resonanzstelle ein Spannungsmaximum. Betrachten Sie hierfür Abbildung 16.40: Die Resonanzfrequenz liegt ein klein wenig neben der ZF-Frequenz. An einer der Flanken des Resonanzbereichs liegt die ZF (Zwischenfrequenz). Ein Teil der ZF liegt also höher, der andere niedriger an dieser Flanke. Δf, die Frequenzänderungen, geben hier die Bandbreite vor. Durch die unterschiedliche Verteilung auf der Filterflanke besteht zwischen der niedrigsten und der höchsten Frequenz damit eine Spannungsbeziehung, ΔU. Das so gewonnene »AM«-Signal wird über die restliche Schaltung weiterbehandelt.

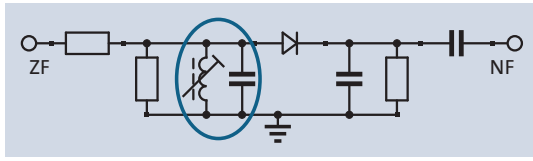


Abbildung 16.39 Flankendiskriminator

Ein qualitativ besseres Ergebnis können Sie bei der Verdoppelung der Schaltung erwarten. Sie haben damit zwei Schwingkreise, deren Resonanzfrequenzen aber keinesfalls übereinstimmen dürfen. Vielmehr sind diese leicht unterschiedlich abzustimmen.

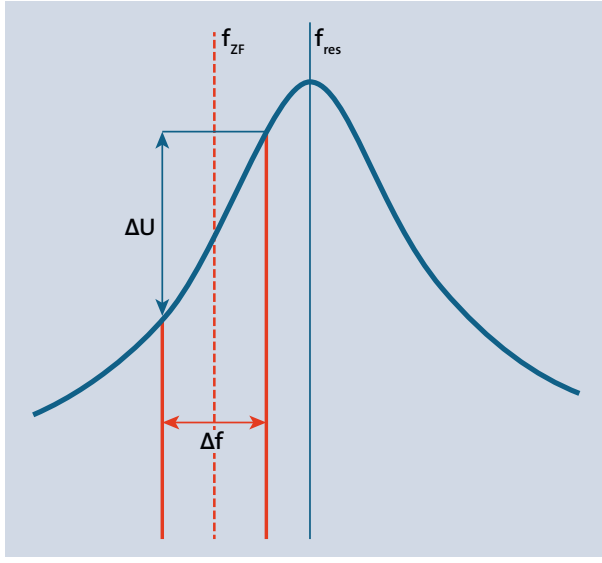


Abbildung 16.40 Spannungsunterschiede in der Filterflanke

Durch den symmetrischen Aufbau erzielen Sie auch ein entsprechendes Signal, das anschließend durch die Dioden detektiert wird. Zusammengefasst lässt sich sagen: Zwei Signalflanken führen zu besserer Qualität. Nach diesem Prinzip arbeitet der *Gegentakt-Flanken-Diskriminator* (siehe Abbildung 16.41).

Der *Ratiodetektor* (siehe Abbildung 16.42) koppelt die Eingangsspannung mit dem Übertrager ein. Er hat gegenläufig gepolte Dioden.

Mit dem *Phasendiskriminator* (siehe Abbildung 16.43) hingegen addieren Sie zur Spannung des Eingangssignals zusätzlich den Mittelwert der Spannung, die am sekundären Schwingkreis anliegt. Das Kennzeichen dieser Schaltung ist der Koppelkondensator, der den Übertrager »brückt«.

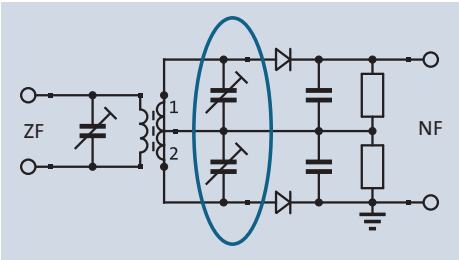


Abbildung 16.41 Gegentakt-Flanken-Diskriminator

Tabelle 16.7 zeigt Ihnen die Unterschiede der Diskriminatorschaltungen auf. In den Abbildungen selbst finden Sie das jeweilige Merkmal der einzelnen Schaltung hervorgehoben.

Name	Erkennungszeichen	Schaltbild
Gegentakt-Flanken-Diskriminator	2 abstimmbare Kondensatoren am Übertrager	Abbildung 16.41
Ratiodetektor	gegenläufig angeordnete Dioden	Abbildung 16.42
Phasendiskriminator	Koppelkondensator	Abbildung 16.43

Tabelle 16.7 Übersicht über die verschiedenen Diskriminatorschaltungen

Moderne Empfänger können auch mittels PLL-Schaltung (siehe Abbildung 16.44) FM-Signale wiedergeben. Dabei schwingt der VCO auf der Frequenz des FM-Signals, das von der ZF-Stufe des Empfängers kommt. Solange das Signal keine Modulation aufweist, hat die Steuerspannung für den VCO einen Mittelwert.

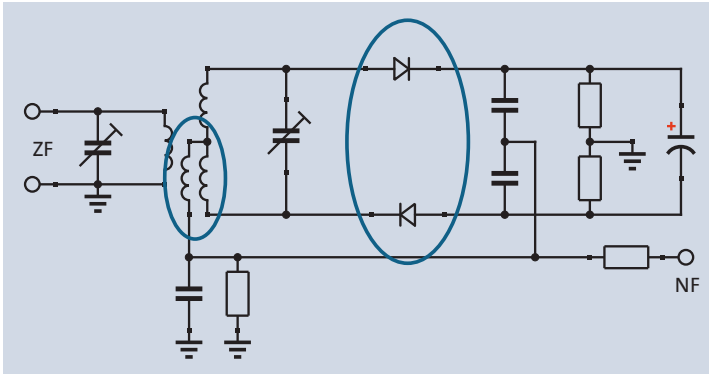


Abbildung 16.42 Ratiodetektor

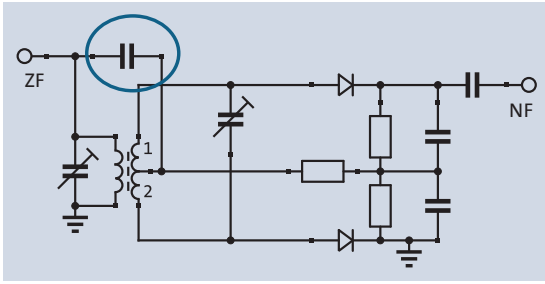


Abbildung 16.43 Phasendiskriminator

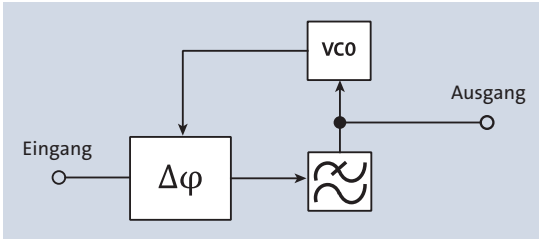


Abbildung 16.44 PLL-FM-Demodulator

Wird das FM-Signal moduliert, so ändert sich diese Steuerspannung/Regelspannung, die zwischen dem Tiefpassfilter und dem VCO abgegriffen wird. Dabei handelt es sich um das demodulierte Signal, das Sie dem Wiedergabeverstärker zuführen.

Störende Amplitudenschwankungen werden im *Begrenzerverstärker* ausgeglichen. Diese Amplitudenschwankungen sind in der Lage, das FM-Signal zu verfälschen. Die Begrenzung geschieht vor dem Diskriminator.

Sie erinnern sich: Eine Begrenzerschaltung erhalten Sie auch durch zwei antiparallel geschaltete Dioden (siehe Abschnitt 11.5). Der integrierte Baustein TBA120 enthält

einen Begrenzerverstärker und weitere Funktionen, z. B. eine Diskriminatorschaltung. Der Vorteil hierbei liegt in der vollständig symmetrischen Begrenzung der Amplitude.

Abbildung 16.45 zeigt Ihnen ein Detail aus einer Empfängerschaltung, bei der der integrierte Schaltkreis als Begrenzerverstärker und FM-Diskriminator fungiert.

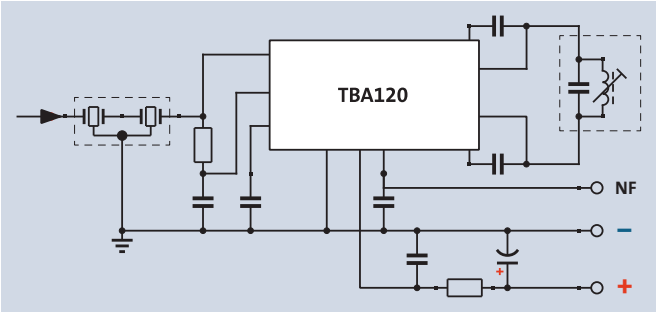


Abbildung 16.45 TBA120 als Begrenzerverstärker und Diskriminator

16.3.4 Phasenmodulator

Bei der Phasenmodulation wechselt die Phase im Takt des NF-Signals. Für die Übermittlung von Rechtecksignalen (Digitaltechnik, Datenfunk) ist dieses Verfahren besonders geeignet. Immer, wenn ein Rechteckimpuls beginnt und endet, findet eine Phasenänderung (siehe Abbildung 16.46) statt.

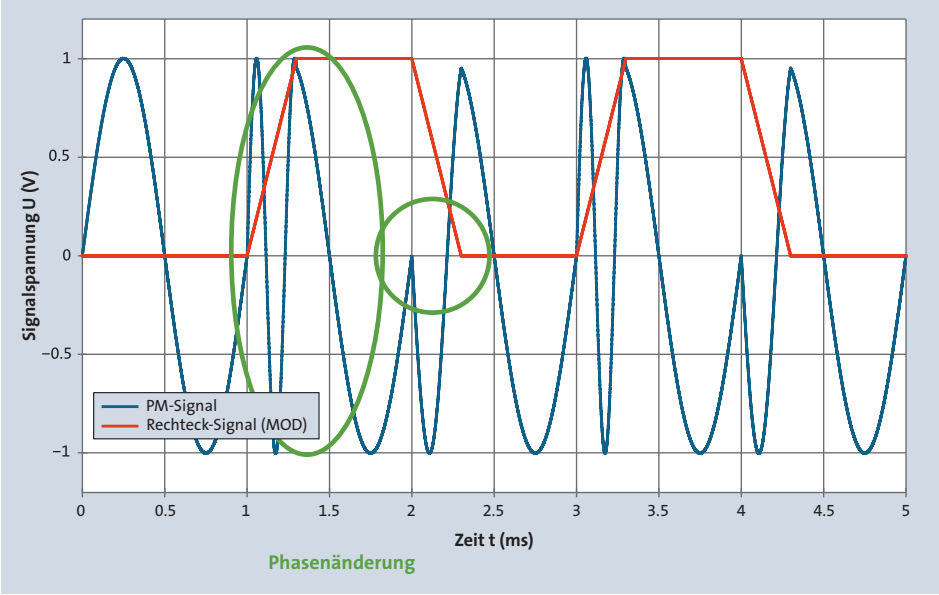


Abbildung 16.46 Phasenmodulation

In Abbildung 16.47 sehen Sie den Schaltplan für einen Phasenmodulator.

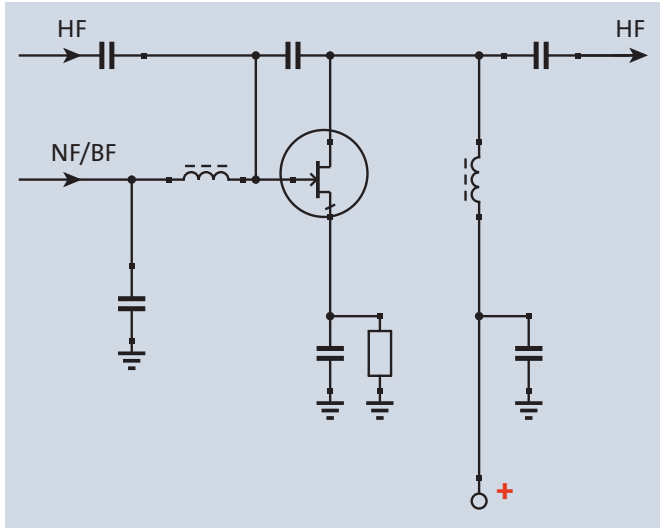


Abbildung 16.47 Phasenmodulator

16.4 Die Arbeit mit Blockschaltbildern

Um ein Gesamtbild über die Funktionsweise von elektronischen Geräten zu erhalten, benutzt man Blockschaltbilder. Diese Darstellung zerlegt den Schaltplan in die einzelnen Funktionsgruppen. Die Funktionsgruppen werden zu einem Funktionsbild zusammengestellt. Sie erhalten damit einen guten Überblick darüber, wie ein Gerät funktioniert. Abbildung 16.48 zeigt Ihnen einige gebräuchliche Symbole aus Blockschaltbildern.

Diese Symbole sind weltweit unterschiedlich. Wenn Sie also ein Funkgerät aus japanischer Produktion erwerben, sieht das Blockschaltbild anders aus als bei einem Gerät aus europäischer Fertigung. Oftmals wird eine Gerätestufe auch als Kästchen dargestellt, in dem ihre Funktion im Klartext steht.

Wichtig ist, dass Sie erkennen, was damit gemeint ist, und in der Lage sind, wenigstens einfache Blockschaltbilder anzufertigen.

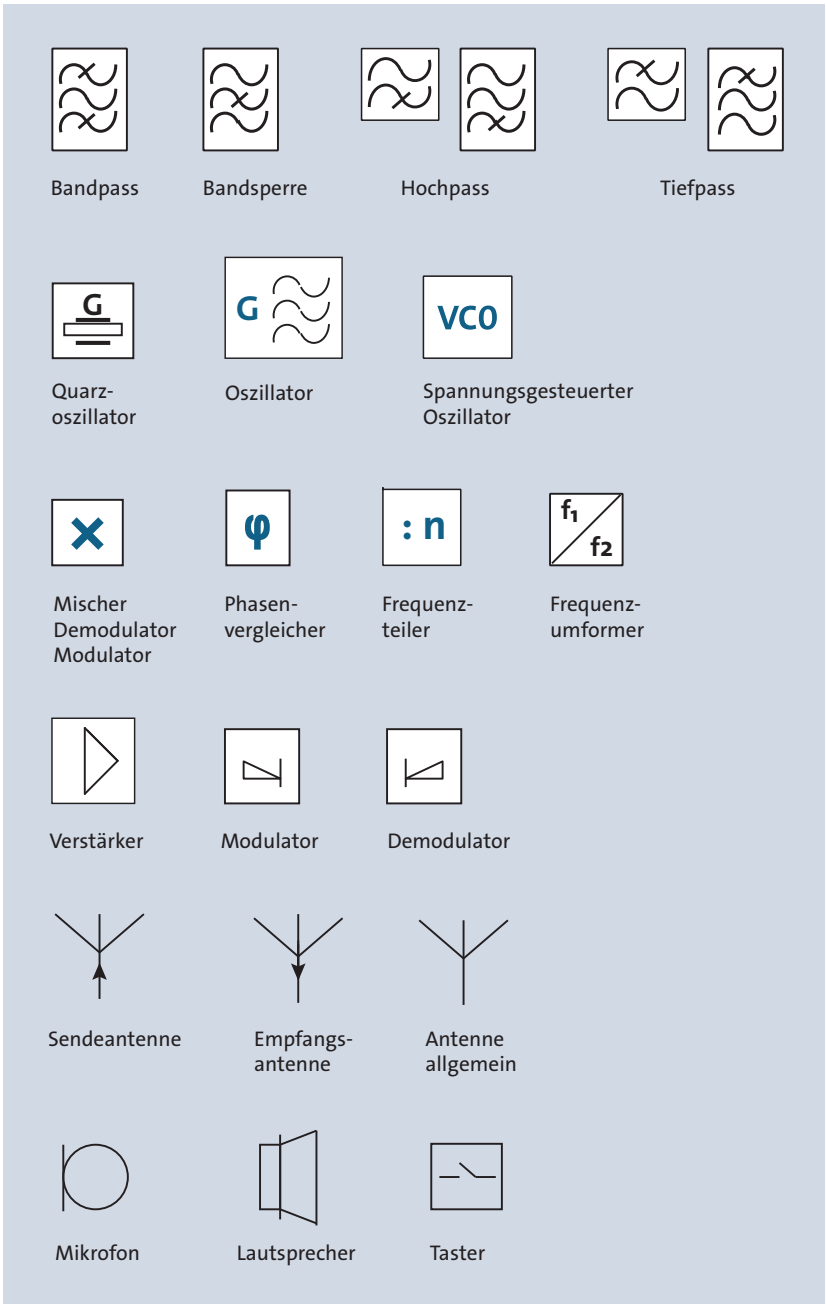


Abbildung 16.48 Übersicht über Blockschaltbilder

Abbildung 16.49 zeigt Ihnen das Blockschaltbild eines einfachen Geradeausempfängers. In Abbildung 16.50 finden Sie die Grundsätze eines einfachen Senders dargestellt. Die Darstellungen beschränken sich auf die wesentlichen Komponenten.

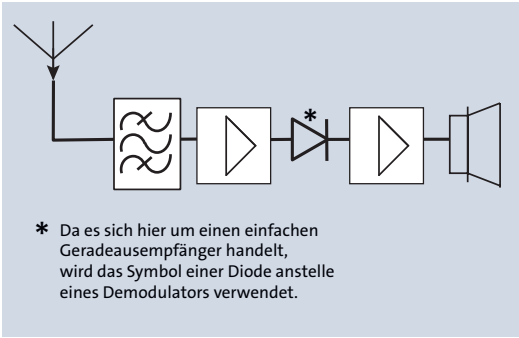


Abbildung 16.49 Blockschaltbild eines Geradeausempfängers

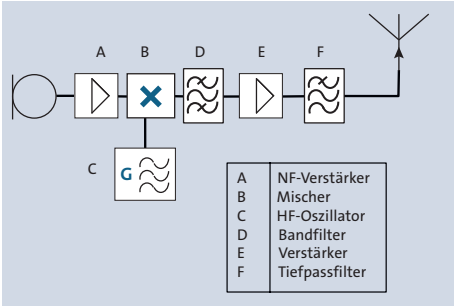


Abbildung 16.50 Blockschaltbild eines Senders

16.5 Die Arbeitsweise von Empfängern

Die ursprünglichste Form eines Empfängers ist der *Geradeausempfänger*. Sie finden ihn mehr oder weniger abgewandelt als AM-Demodulator mit der Aufgabe, das vom »Rest des Empfängers« bereitgestellte Signal für den Hörempfang nutzbar zu machen.

Geradeausempfänger (mit Experiment)

Ein kleiner Wermutstropfen besteht darin, dass der Lang- und Mittelwellenbereich für die Rundfunkversorgung größtenteils aufgegeben wurde. Dieser Kleinstempfänger benötigt starke Signale, um funktionieren zu können. Sollten Sie in Ihrer Region Sender in diesen Frequenzbereichen mit sehr starken Signalen (vor allem in den Nachtstunden) finden, können Sie sich an den Bau wagen. In anderen Fällen hilft vielleicht ein Funkamateur mit einem AM-Signal aus.

Die Schaltung (siehe Abbildung 16.51) selbst bauen Sie auf dem Experimentierbrett auf.

Alle Bauteile bis auf den Abstimmkondensator C2 sind handelsüblich. Für die Diode D1 verwenden Sie eine Schottky-Ausführung oder, ganz nostalgisch, eine Germani-

umdiode. Die Induktivitäten erhalten Sie fertig. Nehmen Sie liegende Ausführungen. Sie brauchen also keine Spulen zu wickeln. Der Abstimmkondensator C2 sollte ein Drehkondensator mit wenigstens 240 pF maximaler Kapazität sein.

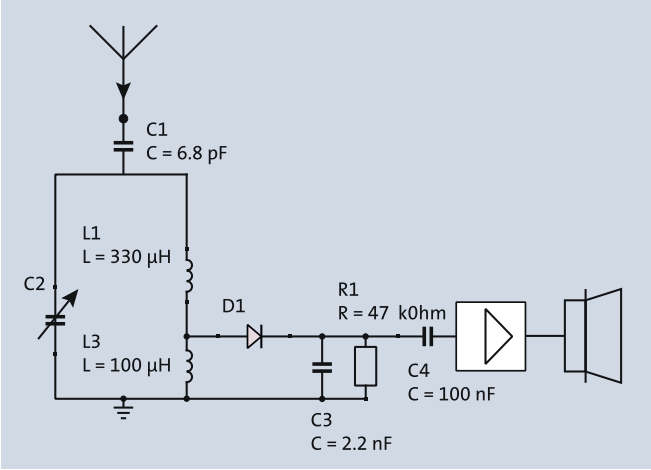


Abbildung 16.51 Diodenradio

Als NF-Verstärker verwenden Sie einen kleinen Bausatz oder, falls vorhanden, einen aus Ihrer Bastelkiste.

Wichtig ist hier ein möglichst langer Antennendraht. Und das Massesymbol in dieser Schaltung sollten Sie hier wörtlich nehmen: Verbinden Sie diesen Punkt der Schaltung mit einem Heizungs- oder Wasserleitungsrohr Ihres Gebäudes. Im Freien hilft ein Erdspieß.

Die Schaltung selbst ist simpel. Mit dem Schwingkreis filtern Sie aus dem Wellensalat einen schmalen Bereich heraus. Je länger die Antenne und je besser die Erdung sind, desto mehr Spannung liegt an der Anode der Diode an, was sich direkt an der Lautstärke des Signals bemerkbar macht.

Wenn Sie mit dieser Schaltung etwas empfangen, hören Sie unter Umständen viele Signale übereinander (außer es ist ein starker Sender vor Ort). Aber Sie haben einen Empfänger gebaut, wenn auch der einfachsten Art.

Alternativ können Sie eine »magnetische Antenne« als Schwingkreis benutzen. Verbinden Sie die restliche Schaltung (ab D1) mit ihr. Damit können Sie dann starke Kurzwellensignale »detektieren«.

Es ist also die Trennschärfe, die fehlt. Dem »Einkreiser« können Sie weitere Abstimmkreise hinzufügen. Solange Sie stets nur eine Frequenz abhören möchten, mag das Abstimmen mehrerer Schwingkreise ja noch handhabbar sein. Aber »schnell« übers Band drehen geht damit gar nicht. Die Bedienung wird zu umständlich. Abbildung 16.52 zeigt den Idealfall, bei dem sich die Trennschärfe durch das Hinzufügen eines

weiteren Schwingkreises erhöht. Sie erkennen aber auch, dass die Signalstärke dadurch zurückgeht.

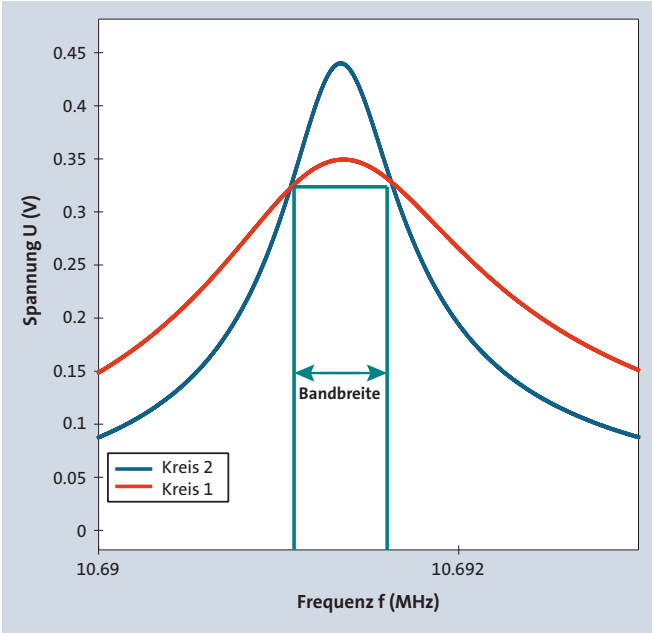


Abbildung 16.52 Bandbreite bei zwei Schwingkreisen

Direktmischempfänger (Direktüberlagerungsempfänger)

Beim *Direktüberlagerungsempfänger* (siehe Abbildung 16.53) wird das HF-Signal der Antenne mit dem Signal eines VFO gemischt und demoduliert.

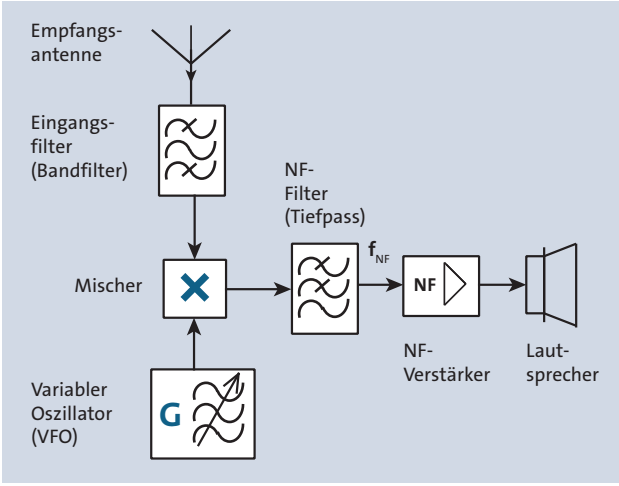


Abbildung 16.53 Blockschaltbild eines Direktüberlagerungsempfängers

Mit guten NF-Filtern wird etwas Trennschärfe gewonnen. Für den AM-Empfang liegt die VFO-Frequenz direkt auf der Empfangsfrequenz, für CW und SSB etwas daneben (ähnlich BFO).

Superhetempfänger

Beim *Superhetempfänger* (auch: *Superheterodynempfänger*, *Überlagerungsempfänger*) wird der Empfangsfrequenzbereich durch die Mischung mit einer weiteren Frequenz auf eine Zwischenfrequenz umgesetzt.

In diesem Fall spricht man von einem *Einfachsuper*. Beim *Doppelsuper* geschieht dieser Vorgang zweimal. Auch *Dreifachsuper*, also Empfänger mit drei Zwischenfrequenzen, existieren.

Abbildung 16.54 zeigt das Blockschaltbild eines Einfachsuperhetempfängers, der auch SSB- und CW-Signale wiedergeben kann.

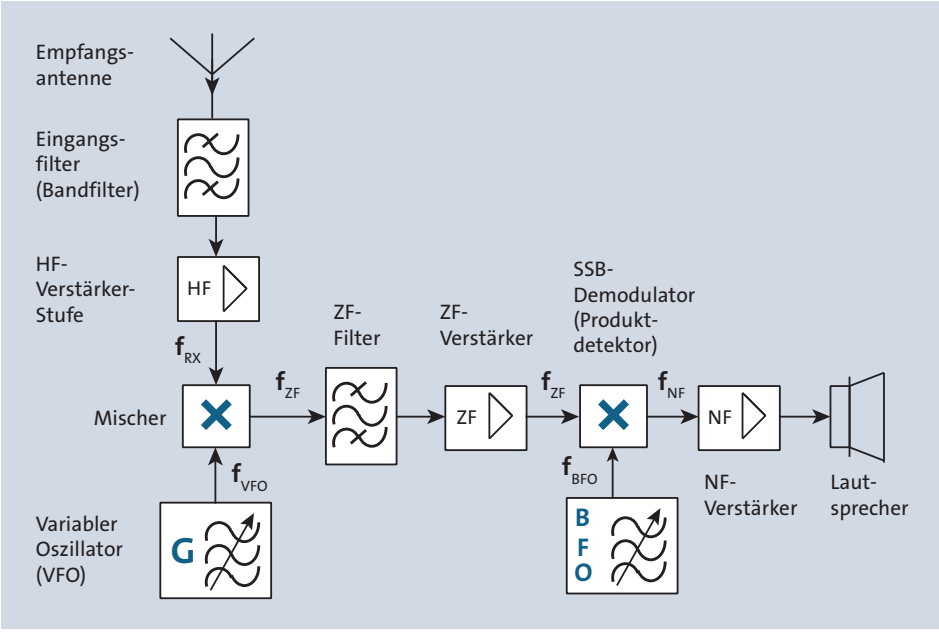


Abbildung 16.54 Einfachsuper

Über die Empfangsantenne gelangt ein breitbandiges Signalgemisch an den Eingangsfilter (Eingangskreis, Preselektor). Am Ausgang dieser Schaltung liegt nur noch der erwünschte Frequenzbereich (»Nutzband«) an. Die HF-Vorstufe verstärkt das nicht mehr so breitbandige Signalgemisch und führt es dem Mischer zu.

Der abstimmbare Oszillator (VFO) erzeugt ein Signal mit variabler Frequenz, das dem Mischer zugeführt wird. In Schaltbildern wird dieser Oszillator oftmals auch als *lokaler Oszillator* (LO) bezeichnet.

Am Mischerausgang liegen zwei Signale an: *Zwischenfrequenz* (ZF, erwünscht) und *Spiegelfrequenz* (unerwünscht). Bandfilter (Eingangskreis) mit möglichst hoher Güte sorgen für die Unterdrückung der unerwünschten Frequenz. Die Information (Basisband) bleibt unverändert! Die Mischstufe arbeitet hierbei im nichtlinearen Bereich.

Das Zwischenfrequenzsignal passiert das ZF-Filter. Dieses Filter bestimmt die Trennschärfe des Empfängers. Eine hohe Trennschärfe wird erzielt, wenn die Bandpassschaltung des ZF-Filters aus Quarzkristallen besteht. Keramische Filter sind kostengünstiger, statten das Gerät damit aber mit geringerer Trennschärfe aus. Das ZF-Signal wird vom ZF-Verstärker angehoben und dem Produktdetektor (SSB-Demodulator) zugeführt. Dies ist nichts anderes als ein Mischer. Vom BFO wird der Hilfsträger dem Produktdetektor zugeführt. Das NF-Ausgangssignal gelangt zum NF-Verstärker, der es entsprechend anhebt und dem Lautsprecher zuführt.

Der Vorteil des Superhetempfängers gegenüber dem Geradeausempfänger liegt in der besseren Trennschärfe, die durch die schmale Empfängerbandbreite bewirkt wird.

Gute Empfänger können auch schwache Signale empfangen und wiedergeben. Das Maß hierfür ist die *Empfindlichkeit*. Sie wird in µV bzw. dBm angegeben.

Empfangsfrequenzbereich durch die Mischung mit einer weiteren Frequenz auf eine Zwischenfrequenz umgesetzt und Spiegelfrequenz

Bei der Mischung des Empfangsfrequenzbereichs mit der Frequenz des Oszillators (VFO, LO) erhält man zwei Produkte:

- **Zwischenfrequenz**: erwünscht; hier wird das Signal gefiltert und verstärkt.
- **Spiegelfrequenz**: unerwünscht; sie kann den Empfang stören. Eine hohe ZF ermöglicht aufgrund des Abstands zur Empfangsfrequenz eine gute Spiegelfrequenzunterdrückung und vermeidet damit Empfangsstörungen. Ist anstelle einer einzigen festen Frequenz ein Bereich gegeben, verläuft der Spiegelfrequenzbereich entgegengesetzt zum Nutzsignalbereich!

Die Spiegelfrequenz wird zusätzlich durch eine gute Vorselektion (Eingangskreis mit entsprechend hoher Güte) unterdrückt.

- Die Frequenz des Abstimmoszillators liegt über dem Empfangsbereich.

  Berechnung der Zwischenfrequenz:

  $f_{ZF} = f_{LO(VFO)} - f_{RX}$

  Berechnung der Spiegelfrequenz:

  $f_{Spiegel} = f_{RX} + 2 \times f_{ZF}$

- Die Frequenz des Abstimmoszillators liegt unter dem Empfangsbereich.
  Berechnung der Zwischenfrequenz:
  $f_{ZF} = f_{RX} - f_{LO(VFO)}$
  Berechnung der Spiegelfrequenz:
  $f_{Spiegel} = f_{RX} - 2 \times f_{ZF}$

Das Zweifache der (ersten) ZF bildet die Frequenzdifferenz zwischen dem Nutz- und dem Spiegelsignal.

Eine hohe ZF ermöglicht durch den weiten Abstand zum Nutzsignal eine einfache und hohe Unterdrückung der Spiegelfrequenz.

Übung

Berechnen Sie die verschiedenen Frequenzen des Einfachsupers aus Abbildung 16.54.

Die bekannten Angaben sind:

- ZF: 9 MHz
- Empfangsbereich: 14–14,35 MHz (20-m-Band)

Zu berechnen sind:

- der VFO-Frequenzbereich (Seine Frequenz soll unter der Empfangsfrequenz liegen.)
- die Spiegelfrequenz

Lösung:

Berechnen Sie zunächst den VFO-Frequenzbereich mithilfe dieser Formel:

$f_{VFO} = f_{RX} - f_{ZF}$

- Berechnung minimale VFO-Frequenz: 14 MHz [-] 9 MHz [=] 5 MHz
- Berechnung maximale VFO-Frequenz: 14,35 MHz [-] 9 MHz [=] 5,35 MHz

Zur Berechnung der Spiegelfrequenz können Sie diese Formel nutzen:

$f_{Spiegel} = |f_{RX} - 2 \times f_{ZF}|$

Die |-Zeichen um die Formel bedeuten, dass die Differenz ohne Vorzeichen ausgegeben wird. Unkomplizierter gelangen Sie in diesem speziellen Fall so zum Ergebnis:

$f_{Spiegel} = f_{VFO} - f_{ZF}$

Der Spiegelfrequenzbereich geht damit von 4 MHz bis 3,65 MHz (und liegt damit im 80-m-Band).

Ein weiteres Berechnungsbeispiel hat diese bekannten Werte:

- ZF: 9 MHz
- Empfangsfrequenz: 7 MHz
- Die VFO-Frequenz liegt über der Empfangsfrequenz.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnung der VFO-Frequenz

  7 MHz [+] 9 MHz [=] 16 MHz
- Schritt 2: Berechnung der Spiegelfrequenz

  Die VFO-Frequenz liegt über der Empfangsfrequenz:

  $f_{\text{Spiegel}} = f_{\text{RX}} + 2 \times f_{\text{ZF}}$

Ergebnis: 7 MHz [+] 9 MHz [+] 9 MHz [=] 25 MHz

Schauen Sie sich dazu noch ein weiteres Beispiel an: Sie führen einem Mischer diese Frequenzen zu: 28 MHz und 37 MHz. Welche Frequenzen erhalten Sie am Ausgang des Mischers?

Lösung:

- Frequenz 1: 37 MHz [–] 28 MHz [=] 9 MHz
- Frequenz 2: 37 MHz [+] 28 MHz [=] 65 MHz

Eine weitere Anwendung des Mischprinzips liegt beim Einsatz eines *Empfangskonverters* vor. Hier können die gleichen Probleme mit der Spiegelfrequenz auftreten. Wird ein Konverter angeschlossen, machen Sie damit aus einem Einfachsuper einen Doppelsuper usw. Als »ZF« dient die Eingangsfrequenz des nachgeschalteten Empfängers.



Der Verlauf der Spiegelfrequenz

Die Spiegelfrequenz verläuft entgegengesetzt zur Nutzfrequenz: Steigt die Nutzfrequenz, sinkt die Spiegelfrequenz und umgekehrt!

Empfangskonverter

Das 2-m-Band in das 10-m-Band umzusetzen, ist keine große Sache. Die Berechnung funktioniert wie eben beim Einfachsuper auch, nur dass die »ZF« beweglich ist. Abbildung 16.55 zeigt das Blockschaltbild eines Empfangskonverters, der das 2-m-Band auf das 10-m-Band umsetzt.

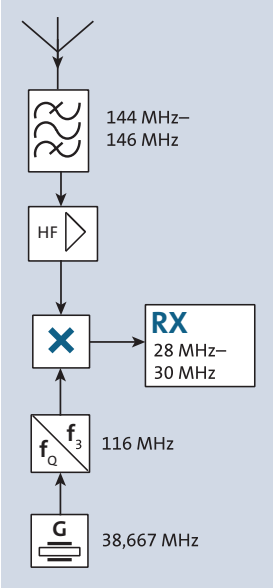


Abbildung 16.55 Blockschaltbild eines Empfangskonverters

Übung

Die Berechnungen sind die gleichen wie beim Einfachsuper. Das erste Rechenbeispiel bezieht sich auch auf Abbildung 16.55.

Bekannte Werte sind:

- Empfangsfrequenz: 144–146 MHz
- ZF: 28–30 MHz
- Frequenz LO: 38,667 MHz, verdreifacht auf 116 MHz

Berechnung der Spiegelfrequenz:

$f_{\text{Spiegel}} = f_{\text{RX}} - 2 \times f_{\text{ZF}}$
$\rightarrow \quad 144\ \text{MHz} - 28\ \text{MHz} - 28\ \text{MHz} = 88\ \text{MHz}$
bis $146\ \text{MHz} - 28\ \text{MHz} - 28\ \text{MHz} = 90\ \text{MHz}$

Die Spiegelfrequenz liegt im UKW-Rundfunkband. Hier herrschen hohe Feldstärken. Sie müssen den Konverter gut abschirmen und am Eingang das Rundfunkband durch entsprechende Filterung zusätzlich blocken.

Beim 70-cm-Band wird entweder auf das 2-m-Band oder auch auf das 10-m-Band umgesetzt. Da hier der Frequenzbereich von 430 MHz bis 440 MHz zur Verfügung steht, das nachgesetzte Funkgerät aber (10-m-Band bzw. 2-m-Band) nur 2 MHz abdeckt, setzt man entweder nur den CW/SSB-Bereich in einem 2 MHz breiten Segment um, oder man hat einen Empfänger bzw. ein Funkgerät mit durchgehendem Frequenzbereich.

Bekannte Werte:

- Empfangsfrequenz: 430–440 MHz bzw. ein Teilbereich mit 2 MHz hieraus
- Konverter-Quarzoszillator: Die Frequenz wird verneunfacht.
- ZF: 28 MHz

Gesucht sind:

- die Oszillatorfrequenz,
- die Frequenz des Quarzes, wenn der Bereich 438–440 MHz umgesetzt werden soll, und
- die Spiegelfrequenz.

Lösung:

- Lösung zur Oszillatorfrequenz

  438 MHz [−] 28 MHz [=] 410 MHz
- Lösung zur Frequenz des Quarzoszillators

  410 [÷] 9 [=] 45,556 MHz
- Lösung zur Spiegelfrequenz

  $f_{\text{Spiegel}} = f_{\text{RX}} - 2 \times f_{\text{ZF}}$
  $\rightarrow \quad 438\ \text{MHz} - 28\ \text{MHz} - 28\ \text{MHz} = 382\ \text{MHz}$
  bis $440\ \text{MHz} - 28\ \text{MHz} - 28\ \text{MHz} = 384\ \text{MHz}$

Doppelsuper, Dreifachsuper

Das Konzept des Einfachsupers hat natürlich auch wegen der Spiegelfrequenzproblematik seine Nachteile. Der Doppelsuper verwendet zwei ZFs. Damit kann man eine sehr hoch liegende erste ZF verwenden, für die sendeartabhängige Bandbreitenfilterung ist dann die tiefe zweite ZF zuständig. Die Schaltung wird hier nur um einen weiteren, festen Oszillator und einen weiteren ZF-Verstärker erweitert (siehe Abbildung 16.56). Eine niedrige zweite ZF hilft, eine gute Trennschärfe zu erreichen. Natürlich spielt auch die Art des ZF-Filters eine Rolle. Bandpassschaltungen mit Quarzkristallen bringen hier die besten Ergebnisse mit den geringsten Bandbreiten. Keramische Filter sind günstig, erreichen aber nicht die Werte von Quarzfiltern.

Eigenschaften eines Doppelsuperempfängers

- Eine hohe erste ZF ermöglicht durch den weiten Abstand zum Nutzsignal eine einfache und hohe Unterdrückung der Spiegelfrequenz.
- Eine niedrige zweite ZF ermöglicht eine hohe Trennschärfe, da es unter anderem hierfür gute Filter gibt.

Der Doppelsuperempfänger benutzt zwei Mischer und zwei Oszillatoren. In modernen Empfangskonzepten wird die erste ZF mehr als das Doppelte der maximal vorkommenden Empfangsfrequenz betragen. Hier kommt gegebenenfalls ein hochwertiges Filter zum Einsatz. Die zweite ZF hingegen wird auf eine niedrige Frequenz gelegt, damit durch geeignete Filter eine hohe Trennschärfe erzielt werden kann (siehe Abbildung 16.56).

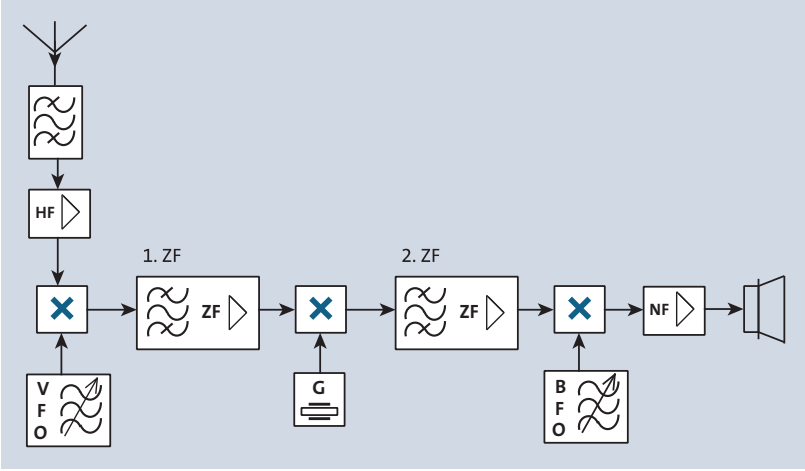


Abbildung 16.56 Blockschaltbild eines Doppelsuperempfängers

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene Standard-Zwischenfrequenzen eingebürgert: 24 kHz, 200 kHz, 455 kHz, 9 MHz, 10,7 MHz (bei Einfachsuperempfängern bzw. als zweite oder dritte ZF). Moderne Empfängerkonzepte haben höhere ZFs, z. B. um die 70 MHz.

Die genormten Zwischenfrequenzen haben auch mit der industriellen Fertigung genormter Zwischenfrequenzfilter zu tun.

Zwischenfrequenz (ZF)

Eine ZF über der höchstmöglichen Empfangsfrequenz ist für durchgehende Empfangsbereiche notwendig.

Ideal ist eine ZF, die mehr als das Doppelte der höchsten Empfangsfrequenz beträgt.

In dieser hohen ersten ZF durchläuft das Signal das Roofing-Filter, bevor es den nächsten Mischer erreicht.

Das ZF-Filter schränkt passend zur Sendeart den Durchlassbereich ein (siehe Tabelle 16.8).

Sendeart	Filterbandbreite(n)
CW (A1A)	500 Hz, 250 Hz
SSB (J3E)	2,2 kHz
RTTY (F1B)	500 Hz
FM (F3B)	200 kHz (Rundfunk), 12 kHz
AM	9 kHz (Rundfunk), 6 kHz

Tabelle 16.8 ZF-Filterbandbreiten

Übung

Benennen Sie die mit den Buchstaben A bis F gekennzeichneten Stufen des Doppelsuperempfängers in Abbildung 16.57. Füllen Sie dazu Tabelle 16.9 aus. Die Auflösung finden Sie in Tabelle 16.11.

Stufe	Funktion
A	
B	
C	
D	
E	
F	

Tabelle 16.9 Übungsaufgabe: Benennung der Empfängerstufen

Der in Abbildung 16.57 gezeigte Doppelsuperempfänger verwendet die folgenden Frequenzen:

- Empfangsfrequenz: 14 MHz
- 1. ZF: 10,7 MHz
- 2. ZF: 460 kHz

Gesucht sind die Frequenzen des VFOs und des COs.

Die Auflösung finden Sie auf der nächsten Seite.

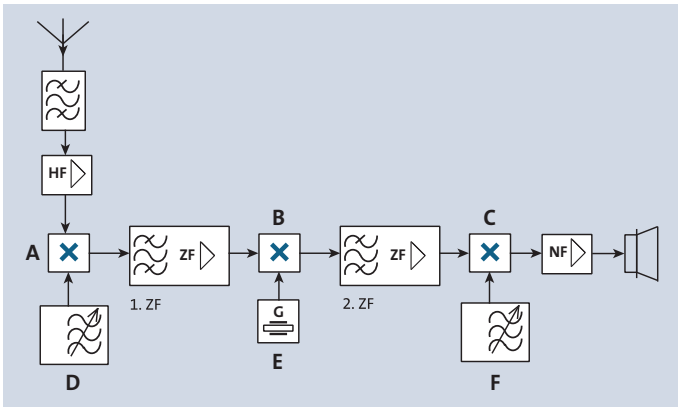


Abbildung 16.57 Blockschaltbild zur Übungsaufgabe

Abbildung 16.58 zeigt einen Dreifachsuperempfänger. Gesucht sind der Frequenzbereich des VFOs und die Frequenzen der COs. Tragen Sie Ihre Ergebnisse in Tabelle 16.10 ein.

Die Auflösung finden Sie in Tabelle 16.12.

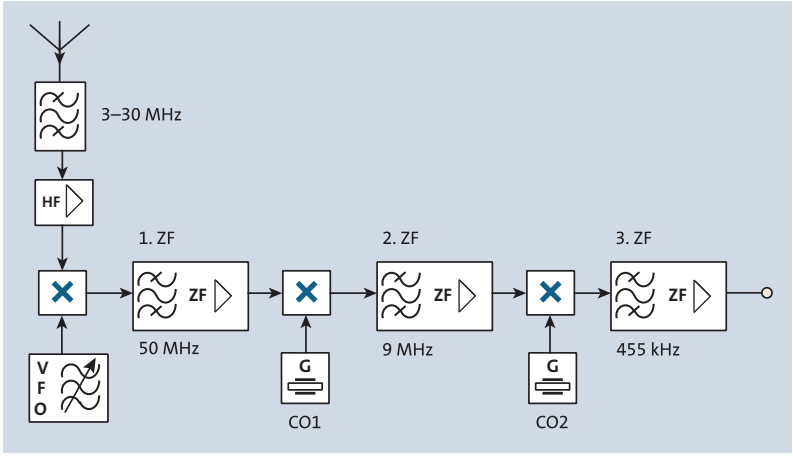


Abbildung 16.58 Blockschaltbild zur Übungsaufgabe

Stufe	Ergebnis
VFO	
CO1	
CO2	

Tabelle 16.10 Ergebnistabelle zur Berechnung für den Dreifachsuper

Die Auflösung der ersten Übungsaufgabe finden Sie in Tabelle 16.11.

Stufe	Funktion
A	Mischer
B	Mischer
C	Produktdetektor
D	VFO
E	VO
F	BFO

Tabelle 16.11 Lösungshinweis zur Übungsaufgabe

Auflösung der Übungsaufgabe zur Berechnung der Frequenzen:

- Berechnung der VFO-Frequenz:

  $f_{VFO} = f_{RX} + f_{ZF} = 14\ \text{MHz} + 10{,}7\ \text{MHz} = 24{,}7\ \text{MHz}$

- Berechnung der CO-Frequenz:

  $f_{CO} = f_{ZF1} + f_{ZF2} = 10700\ \text{kHz} + 460\ \text{khz} = 11160\ \text{kHz} = 11{,}16\ \text{MHz}$

Auflösung zur Berechnung für den Dreifachsuperempfänger:

Stufe	Ergebnis
VFO	53–80 MHz (möglich auch: 20–47 MHz)
CO1	41 MHz
CO2	9,455 MHz

Tabelle 16.12 Lösungshinweis zur Übungsaufgabe

Baugruppen und Zusatzeinrichtungen für den Empfang

Empfänger bestehen aus mehreren Stufen und Baugruppen. Einige ergänzen das Empfangskonzept und verbessern den Empfang. Störungen können ausgeblendet und verrauschte Signale besser verständlich gemacht werden.

Sie finden die Erläuterungen in Tabelle 16.13.

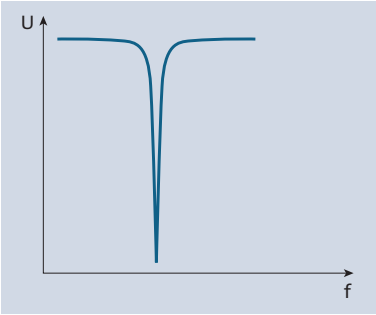
Bezeichnung	Verwendung
AGC	Die automatische Verstärkungsregelung (*Automatic Gain Control*) regelt die Verstärkung der HF-Vorstufe und der ZF-Verstärker auf ein möglichst gleichbleibendes Niveau, unabhängig von den Schwankungen des Eingangssignals. Eine Übersteuerung einzelner Empfängerstufen wird damit vermieden. Bei herkömmlichen Empfängern wird die Regelspannung am Produktdetektor abgenommen. Die AGC-Haltezeit kann oftmals umgeschaltet werden, damit Schwankungen bei der Sprachübertragung langsamer und bei der Telegrafie schneller ausgeregelt werden.
Dämpfungsglied	Um die Übersteuerung des Empfängereingangs zu verhindern, kann man ein Dämpfungsglied einsetzen. Dieses kann im Empfänger fest verbaut und schaltbar vorhanden sein, andernfalls fügt man es vor dem Antennenanschluss des Empfängers ein.
Noise Blanker (NB)	Der Noise Blanker unterdrückt impulsartige Störungen, z. B. Kfz-Zündfunken.
Notchfilter	Ein Notchfilter (Kerbfilter) blendet einen schmalen Frequenzbereich aus, in dem sich die Störungen befinden. Vorzugsweise wird dieses Filter im NF-Bereich eingesetzt. Der Sperrbereich kann meist manuell eingestellt werden. Abbildung 16.59 zeigt die Filterkurve.  **Abbildung 16.59** Filterkurve eines Notchfilters
Noise Reduction	Damit soll der Rauschanteil im Signal verringert und die Verständlichkeit verbessert werden.
Squelch	Rauschsperre; dient zur Stummschaltung des Empfängers, wenn kein Nutzsignal anliegt. Gesteuert wird die Rauschsperre durch ZF- oder NF-Signale.

Tabelle 16.13 Zusatzeinrichtungen eines Empfängers

Starke Signale nahe der Empfangsfrequenz verringern die Empfänglichkeit eines Funkempfängers. Um diesem Problem entgegenzuwirken, kann ein Saugkreis am Eingang des Empfängers angeschlossen werden. Dieser Saugkreis ist darauf ausgelegt, das störende Signal gezielt zu »filtern« und es effektiv zur Erde abzuleiten, wodurch das unerwünschte Signal aus dem Empfangspfad entfernt wird. Diese Technik kann insbesondere auf den langen Bändern wie 80 m und 40 m nützlich sein, besonders während der Abendstunden, wenn die Empfänger durch starke Trägersignale belastet werden können. Auf dem 40-m-Band treten häufig »Intruder« auf – dies sind illegale, im Amateurfunkbereich arbeitende Rundfunkdienste, die Störungen verursachen können. Auch bei Fielddays und Conteststationen, wo hohe Feldstärken aufgrund der räumlichen Nähe gleichzeitig betriebener Funkgeräte herrschen, kann der Einsatz eines Saugkreises den Empfänger entlasten und so für eine Erleichterung sorgen.

Konstruktive Details von Empfängern

Eine ausreichend hohe Frequenzstabilität ist für einen ungetrübten Empfang notwendig. Besonders wenn Sie nicht nur »über das Band drüberdrehen«, sondern gezielt Frequenzen ansteuern möchten, muss dies entsprechend treffsicher funktionieren.

In den technischen Angaben zu Empfängern und Funkgeräten finden Sie auch die Werte zur Frequenzstabilität. So gibt der Funkgerätehersteller Yaesu für sein Modell FT-818 eine Abweichung von ±0,5 ppm im Temperaturbereich von –10° C bis +60 °C an. Diese Parts-per-Million-Angabe drückt aus, um welchen Betrag die Frequenz abweichen kann.

Bleiben wir bei diesem Beispiel. Sie stellen dieses Funkgerät so ein, dass die Frequenzanzeige auf 7.100 kHz steht. In welchem Bereich kann die tatsächliche Frequenz liegen? Die 0,5 ppm entsprechen 0,00005 %, oder Sie multiplizieren die Ausgangszahl mit 10^{-6}.

Im vorliegenden Beispiel geben Sie Folgendes in Ihren Taschenrechner ein:

Entweder

- 7100 [×10ˣ] [×] 0,5 [=]

  oder

- 7100 [×] 10 [EXP] [±] 06 [×] 0,5 [=]

Ergibt: $3{,}55 \times 10^{-3}$, entspricht 0,0355 kHz.

Die tatsächliche Frequenz kann also zwischen 7.099,9645 kHz und 7.100,0355 kHz liegen.

Bei Eigenbauten und Geräterestaurationen schaffen Sie damit eine bessere Frequenzstabilität:

- VFO und andere Oszillatoren sollen einen großen Abstand zu Wärmequellen aufweisen. In einem Empfänger kann dies ein Netzteil älterer Bauart, in einem Funkgerät zusätzlich der Bereich um die Senderendstufe herum sein. Durch eine temperaturstabilisierte Stromversorgung halten Sie die Frequenz ebenfalls stabil (TXCO). In älteren, vormals hochpreisigen Empfängern und Funkgeräten finden Sie vielleicht einen »Quarzofen«, der die Temperatur eines Quarzes konstant hielt.
- Oszillatoren sollten eine gewisse mechanische Robustheit aufweisen. Andernfalls verstimmen sich diese z. B. durch leichte Erschütterungen am Tisch.
- Bringen Sie Oszillatoren in einem stabilen (Weißblech-)Kasten unter. Damit vermeiden Sie Einflüsse von außen, aber auch Abstrahlungen der Oszillatorfrequenz.

Ältere Empfänger und Funkgeräte verfügen über einen Eichmarkengeber (*Marker*). Dieser sollte unbedingt als Quarzoszillator ausgeführt sein. Mit diesem eingebauten Hilfsmittel eichen Sie mit wenigen Handgriffen die meist bei diesen Geräten noch in analoger Ausführung vorhandene Frequenzanzeige.

Zusätzliche Vorverstärker sollten Sie nicht in Gerätenähe, sondern unmittelbar an der Antenne platzieren. Die Vorverstärker heben schwache Signale an oder machen manche sogar erst hörbar. Sie werden im VHF- und UHF-Bereich eingesetzt. Ihre Stromversorgung erfolgt entweder über eine eigene Stromversorgungsleitung oder über eine Fernspeiseweiche, die die Gleichspannung für den Betrieb über das Antennenkabel zuführt.

Abbildung 16.60 zeigt einige Eigenschaften eines perfekten Empfängers.

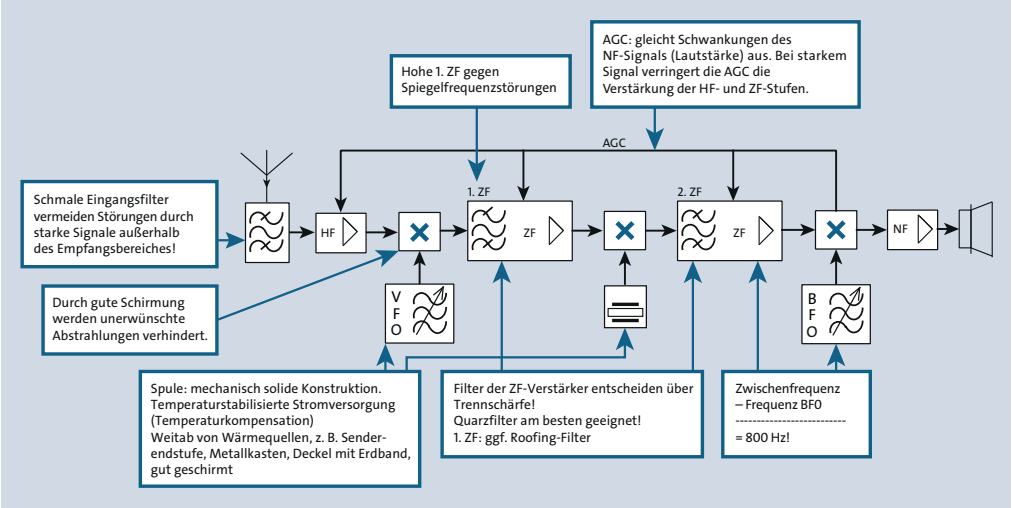


Abbildung 16.60 »Perfekter« Empfänger

Temperaturkompensation

Bei modernen Funkgeräten wird manchmal die Temperaturkompensation durch den zusätzlichen Einbau eines TCXO verbessert.

Empfängereigenschaften

Wenn Sie die Beschreibungen von Empfängern und Funkgeräten lesen, stoßen Sie auf einige Angaben und Messwerte, die im Folgenden näher erläutert werden.

Der *Signal-Rausch-Abstand* (*Signal-to-Noise*, S/N, siehe Abbildung 16.61) gibt an, um wie viel Dezibel (dB) das Nutzsignal über dem Rauschen liegt. Mit dieser Angabe werden Geräte versehen, die im VHF- und UHF-Bereich empfangen. Dabei werden das Nutz- und das Rauschsignal jeweils mit ihren Effektivwerten in Relation gesetzt.

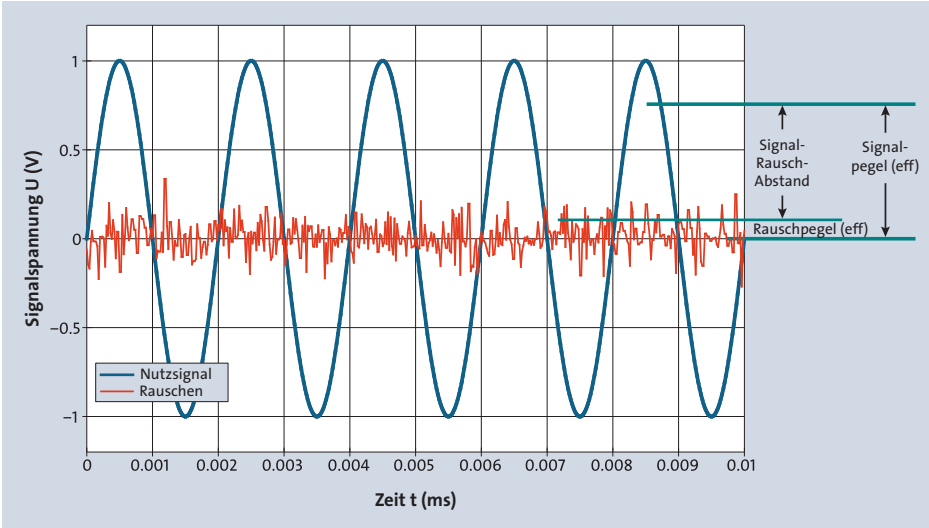


Abbildung 16.61 Signal-Rausch-Abstand

Bei einem Rauschabstand von 0 dB entschlüsseln allenfalls einige digitale Verfahren noch Informationen. Bei 3 dB Abstand hören Sie schon Telegrafiesignale, ab 10 dB auch Sprache. Bei 20 dB verstehen Sie die Sprache »praktisch störungsfrei«, perfekt wird es ab 26 dB.

Die Empfindlichkeit eines Empfängers ist maßgeblich für den Empfang schwacher Signale. Diese wird in µV, gegebenenfalls zusammen mit dem Signal-Rausch-Abstand angegeben.

Rauschzahlen (*Noise Figures*) werden für Empfänger und Empfangsvorverstärker angegeben. Die Rauschzahl *F* gibt das Verhältnis aus dem Signal-Rausch-Abstand des

Ein- und Ausgangs an. Jede verstärkende Schaltung verfügt über ein Eigenrauschen, das unter anderem temperaturabhängig ist und zum Ausgangssignal hinzuaddiert wird. Damit ist der Signal-Rausch-Abstand am Verstärkerausgang niedriger als am Eingang. Vereinfacht ausgedrückt, werden die beiden Angaben in der Formel

$$F = \frac{SNR_{\text{Eingang}}}{SNR_{\text{Ausgang}}}$$

gegenübergestellt.

Eine Rauschzahl $F = 2$ drückt aus, dass das Rauschen am Verstärkerausgang doppelt so hoch liegt wie am Eingang. Eine Leistungsverdoppelung entspricht 3 dB. Damit ist der Signal-Rausch-Abstand des Signals 3 dB geringer als jener des Eingangssignals.

Die Rauschzahl gibt nur dann die SNR-Verschlechterung an, wenn die Rauschleistung am Eingang gleich dem thermischen Rauschen bei 290 K ist.

Die Rauschzahl wird auch manchmal in dB ausgedrückt. Auch hier gilt, dass sich der Signal-Rausch-Abstand (SNR) gegenüber dem Eingangssignal entsprechend verschlechtert.

Schauen Sie sich dazu ein Beispiel an:

- SNR des Eingangssignals: 26 dB
- Rauschzahl des Verstärkers/Empfängers: 3 dB

Gesucht ist das SNR des Ausgangssignals.

Berechnung: 26 dB [-] 3 dB [=] 23 dB

Die (immer vorhandene) Minderung verschlechtert den Signal-Rausch-Abstand.

Die dazu passenden Berechnungen und Grundlagen finden Sie in Kapitel 2.

Die *Großsignalfestigkeit* wird als *Intercept Point* dritter Ordnung (IP_3) angegeben. Hohe Signalstärken »überfahren« den Empfängereingang und lassen diese unerwünschten Produkte entstehen, die den Empfang stören. Selten haben Sie es dabei mit einem deutlichen Störsignal zu tun, eher äußert sich dies als vor sich hin brabbelndes Grundgeräusch, bei dem die »echten« Signale ihre Mühe haben. Empfänger mit geringer Großsignalfestigkeit haben entsprechende Nichtlinearitäten in den HF-Stufen.

Der Wert wird in dB angegeben – und je höher der Wert ist, desto besser.

Kreuzmodulation »drückt« einem schwachen Signal ein starkes auf. Es mutet akustisch wie ein Überlagerungssignal an.

Bei schlechter Großsignalfestigkeit (bzw. »überfahrenem« Empfänger) bzw. bei Kreuzmodulation schaffen zusätzliche Vorkreise (*Preselektor*) bzw. Abschwächer die benötigte Entlastung.

Fehlersuche und Empfangsprobleme

Bei Empfängern und Funkgeräten, deren Schaltungen noch aus vielen Einzelkomponenten bestehen, können Sie selbst Fehler beheben.

Tabelle 16.14 zeigt einige ausgewählte Fehlerbilder samt deren Behebung und, wo gegeben, die Prüfungsfrage hierzu auf.

Fehlerbild	Behebung
Sie stellen alle 15.625 Hz ein unerwünschtes Signal fest. Dies können unerwünschte Abstrahlungen eines TV-Zeilenoszillators sein (Gerät mit Bildröhre).	Nehmen Sie am störenden Gerät abschirmende Maßnahmen vor.
Der Empfang aller Signale ist mit einem Brummton unterlegt.	Überprüfen Sie das Netzteil. Ist der Siebkondensator defekt bzw. ohne Kontakt? Besteht der Brummton auch bei Batteriebetrieb? Falls ja, handelt es sich um eine Einstreuung beim NF-Teil. Prüfen und schirmen Sie hier gegebenenfalls die Verbindung zwischen Demodulator und Verstärkereingang.
Auf den Bändern 160 m, 80 m und 40 m »brodelt« es beim Empfang in den Abendstunden.	Falls vorhanden, betätigen Sie den Abschwächer, andernfalls bauen Sie ihn nachträglich ein bzw. schalten die aktive Vorstufe ab.
Der Empfang ist gestört und Sie messen eine hohe Spannung am Emitterwiderstand einer Empfänger-ZF-Stufe.	Der Transistor hat einen Kurzschluss. Tauschen Sie das Bauelement. (Schließen Sie aber vorher durch Sichtprüfung fehlerhafte Lötstellen aus!)
Der Empfang ist gestört und Sie messen eine geringe oder keine Spannung am Emitterwiderstand einer ZF-Stufe.	Der Transistor leitet nicht. Tauschen Sie das Bauelement. (Schließen Sie aber vorher durch Sichtprüfung fehlerhafte Lötstellen aus!)
Das Empfangssignal ist innerhalb von Sekunden sehr stark und dann wieder kaum hörbar, es gibt ein Krachgeräusch.	Überprüfen Sie die Antennenbuchse (Kontakte, Lötstellen), aber auch den Stecker des Antennenkabels.

Tabelle 16.14 Fehlersuche am Empfänger

16.5.1 Digitale Signalverarbeitung in Empfängern und Sendern

Die *digitale Signalverarbeitung* (DSP) ermöglicht das Entfernen von verschiedenen Störgeräuschen beim Empfang (*Frequenzfilter*). Damit kann man z. B. stark verrauschte Signale verständlicher machen.

Im Sendefall arbeitet sie als Dynamikkompressor, was eine gleichmäßige Aussteuerung des Senders bewirkt. Abbildung 16.62 zeigt den Aufbau einer DSP-Stufe.

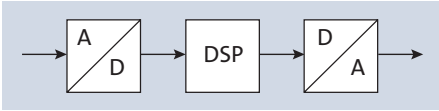


Abbildung 16.62 Aufbau einer DSP-Stufe

Zunächst gelangt das analoge Signal an den Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler). Der damit erzeugte Bitstrom (digitales Signal) durchläuft anschließend die digitale Signalverarbeitung als solche. Hier arbeiten digitale Signalprozessoren mit entsprechenden Algorithmen und geben das Rechenergebnis laufend an den Digital-Analog-Wandler (D/A). Von hier aus wird das bearbeitete Signal seiner weiteren Verwendung im Empfänger oder Sender zugeführt. Die Qualität einer DSP-Stufe ist unter anderem von der Abtastrate des A/D-Wandlers abhängig.

16.5.2 Die Bedienung von Empfängern, Sendern und Funkgeräten

Funkgeräte verfügen über einige Bedienelemente, über die Sie die Gerätefunktionen steuern. Die in diesem Kapitel besprochenen Gerätefunktionen finden Sie nicht immer an der Frontplatte als Regler oder Schalter. Seltener benötigte Funktionen werden in (Setup-)Menüs untergebracht, die Sie erst aufrufen müssen. Auch das Kurzwellenfunkgerät Icom IC-718 (siehe Abbildung 16.63) folgt dieser Bedienungsphilosophie.



Abbildung 16.63 Bedienelemente am IC-718

Stets wichtige Bedienelemente wie Abstimmknopf, Bandwahl, Sendeart, ZF-Bandbreite, Lautstärkeregler und Empfängerfeinverstimmung sind leicht erreichbar. Den Empfang verbessernde Hilfsmittel wie Vorverstärker, Abschwächer, Störaustastung und Rauschfilter sind als Tasten ausgeführt. Wenn aktiv, werden sie am Display angezeigt. Gleiches gilt für die Verbesserung des Sendesignals. Der Sprachprozessor und, falls angeschlossen, ein mit dem Funkgerät direkt zusammenarbeitendes Antennenabstimmgerät werden ebenso über die Frontplatte bedient. Einstellungen werden über das SET-Menü erreicht. Ein kurzer Druck stellt die Anzeige um (Senderausgangsleistung, Aussteuerung, Stehwellenverhältnis), und mit einem langen Druck gelangen Sie zu den Einstellungen für Mikrofonverstärkung, Sendeleistung, Ansprechpegel für die VOX usw. Abbildung 16.64 zeigt Ihnen die Einstellung des Mikrofonpegels.



Abbildung 16.64 IC-718, Einstellungen für den Mikrofonpegel

Bei kleinen Geräten, wie dem Yaesu FT-817 und Yaesu FT-818, kann die geringe Baugröße nur dadurch erreicht werden, dass auch öfter benötigte Funktionen in Menüs untergebracht werden. Abbildung 16.65 zeigt die Belegung der drei Funktionstasten (hier: HF-Vorstufe ein/aus, Abschwächer und ZF-Bandbreitenumschaltung).



Abbildung 16.65 Yaesu FT-817, variable Tastenbelegung

Durch einen kurzen Druck auf die Taste F und Drehen am SEL-Knopf kann dies rasch geändert werden. Um Einstellungen zu ändern, muss F länger gedrückt werden. Anschließend können Sie sich wie mit dem SEL-Knopf im Einstellmenü bewegen.

Tabelle 16.15 listet einige Bedienelemente und ihre Funktion auf. Die folgenden Abbildungen zeigen einige Symbole in der Praxis.

Funktion	Zweck
– (Minuszeichen)	Relaisablage; das Gerät empfängt die Ausgabe (–600 kHz im 2-m-Band, meist –7,6 MHz im 70-cm-Band). Das Symbol bezieht sich dabei immer auf die Sendefrequenz.
+ (Pluszeichen)	Relaisablage; das Gerät empfängt die Eingabefrequenz der Relaisfunkstelle und würde auf deren Ausgabefrequenz senden. Das Symbol bezieht sich dabei immer auf die Sendefrequenz.
ACC	Anschluss für Zubehör wie Endstufen, Steuerung durch PC usw.
AF, VOL	Empfang: Lautstärkeregler
AGC	Empfang: automatische Verstärkungsregelung (*Automatic Gain Control*)
ALC	Sender: Regelung der NF-Aussteuerung eines Senders. Die Anzeige ist aktiv, wenn die Begrenzungsregelung eingreift.
ANT	Antennenanschluss oder -wahl
ATT	Empfang: Abschwächer eingeschaltet
BAND	Bandwahlschaltung
BK	Telegrafie: Break-in-Betrieb
CAT	Gerätefernsteuerung über ein serielles Kommunikationsprotoll (PTT, Frequenz, ...). CAT ist bei modernen Funkgeräten über eine USB-Schnittstelle möglich, ältere benötigen ggf. einen Pegelwandler für eine serielle Schnittstelle, die heute wiederum über einen USB-Seriell-Wandler mit dem PC verbunden wird.
COMP	Sender: Kompressor, Speech-Prozessor: Anhebung leiser Sprachsignale
DATA	Anschluss für Datengeräte (PC, TNC). Dabei werden die NF-Filterung und -Verstärkung umgangen, damit eine maximale Übertragungsgeschwindigkeit von 9600 Bit/s ermöglicht wird.

Tabelle 16.15 Bedienelemente von Empfängern, Sendern und Funkgeräten

Funktion	Zweck
DC	Anschluss für die Stromversorgung
DOWN	einen Frequenzschritt/Kanal tiefer
DWN	einen Frequenzschritt/Kanal tiefer
GND	Anschluss für die Erdung an der Rückseite eines FT-817.
HI	Die maximale Senderausgangsleistung wurde eingestellt.
IF-SHIFT, ZF-SHIFT	Empfang: Verschiebung der Zwischenfrequenz, schmalbandigerer Empfang, Störungsausblendung
INPUT	Anschluss für die Stromversorgung
Key	Anschluss für die Morsetaste
LOCK	Verriegelung der Bedienelemente
LOW	Eine niedrige Senderausgangsleistung wurde eingestellt.
MIC	Anschluss für ein Mikrofon
MID	Eine mittlere Senderausgangsleistung wurde eingestellt.
MIG-Gain	Sender: Lautstärke des Sendesignals, Empfindlichkeit des Mikrofons
MODE	Sendeart wählen
NB, ANL	Empfang: Störaustaster, Noise Blanker
P.AMP	Empfang: Vorverstärker eingeschaltet
Plate und Load	Sender: Röhrenendstufe auf Sendefrequenz abstimmen
PO	
PTT	Sender: Sprechtaste (Push-to-Talk)
PWR	Sender: Ausgangsleistung
RF, RF-Gain	Empfang: manuelle Regelung der ZF-Verstärkung
RIT	Empfang: Empfängerfeinverstimmung

Tabelle 16.15 Bedienelemente von Empfängern, Sendern und Funkgeräten (Forts.)

Funktion	Zweck
RX	Empfangsbetrieb
SCAN	Empfang: Suchlauf
S-Meter	Empfang: Anzeige der Empfangsfeldstärke
SQL, SQUELCH	Empfang: Die Rauschsperre unterdrückt das Grundrauschen, wenn kein Nutzsignal zu hören ist.
SWR	Sender: Anzeige des Stehwellenverhältnisses
T, Tone	Das CTCSS (*Continuous Tone Coded Squelch System*) für den Sendebetrieb ist eingeschaltet.
TUNER	Sender: automatisches Antennenabstimmgerät (intern/extern)
TX	Sendebetrieb
UP	Einen Frequenzschritt/Kanal höher
VOX	Sender: sprachgesteuerte Sende-Empfangsumschaltung. Beachten Sie, dass damit der Sender auch unbeabsichtigt aktiviert werden kann (Hintergrundgeräusche), wodurch andere Funkteilnehmer gestört werden.

Tabelle 16.15 Bedienelemente von Empfängern, Sendern und Funkgeräten (Forts.)

Die Frequenz und die Empfangslautstärke lassen sich meist bei allen Geräten ohne Probleme einstellen. Doch im Detail lauern einige Fallen, die auch schon länger tätigen Funkamateuren eine zeitraubende Fehlersuche bescheren können. In Abbildung 16.66 sehen Sie die Anzeige eines einfachen Handfunkgeräts. Wenn über eine Relaisfunkstelle keine Verbindung zustande kommt, prüfen Sie die Relaisablage (Minuszeichen im Display).



Abbildung 16.66 Anzeigefeld eines Handfunksprechgeräts

Normalerweise wird auf der Ausgabefrequenz der Relaisfunkstelle empfangen und auf einer tieferen Frequenz (2-m-Band: -600 kHz; 70-cm-Band: meist 7,6 MHz) gesendet. Ist dies am Funkgerät umgekehrt eingestellt, sendet das Gerät auf der Ausgabefrequenz des Relais und empfängt auf dessen Eingabefrequenz. Bietet Ihr Funkgerät dafür eine schnelle Umschaltmöglichkeit (sie ist meist mit REV beschriftet), kann dies wiederum sinnvoll sein. Hören Sie Ihren QSO-Partner auf der Eingabefrequenz, können Sie ihm einen Frequenzwechsel auf eine Direktfrequenz vorschlagen, um das Relais anderen Nutzern zu überlassen.

Dann wäre da noch die Sache mit dem *Tonsquelch*. Bei vielen Relaisfunkstellen wird dies genutzt. Die Gründe hierfür sind verschieden. Das Relais soll nicht durch irgendwelche Signale geöffnet werden (z. B. durch Störungen, bei Überreichweiten durch unbeabsichtigtes gleichzeitiges »Öffnen« mehrerer Relais durch Funkstationen in guter Lage). Nur mit dem richtigen Subton lässt sich die Relaisfunkstelle nutzen. Meist hilft ein Blick auf eine Relaisliste im Internet, um die richtigen Einstellungen zu erfahren. Dies sollten Sie, falls Sie Ihr VHF/UHF-Funkgerät auf Reisen mitnehmen, auch vorher schon erledigen und gegebenenfalls auch das Gerät schon einstellen.

Das S-Meter (siehe Abbildung 16.67) zeigt einen Eingangspegel an, aber es ist nichts zu hören. Haben Sie einen Kopfhörer angeschlossen, der den Gerätelautsprecher deaktiviert? Ist die Rauschsperre (Squelch) zu hoch eingestellt? Ist ein eventuell angeschlossener Aktivlautsprecher eingeschaltet?



Abbildung 16.67 Anzeige der Feldstärke

Die Sendeleistung kann man bei Handfunkgeräten meist an Kürzeln wie LOW, MID oder HI ablesen (siehe auch Abbildung 16.66). Manche Modelle zeigen einen Laufbalken im Display an, ähnlich dem S-Meter beim Empfang. Abbildung 16.68 zeigt Ihnen, dass hier wirklich gesendet wird (TX) und die Laufbalkenskala unten auf PO gesetzt wurde. Abzulesen sind hier im Beispiel 20 Watt.

Die Anzeige des *Stehwellenverhältnisses* (SWR) sollte so wenig wie möglich anzeigen (siehe Abbildung 16.69). Keine angeschlossene Antenne oder eine schlecht abgestimmte Antenne können das Sendeteil Ihres Funkgerätes schädigen, sofern keine Schutzschaltung integriert ist, die die Leistung in diesem Fall zurückregelt. Moderne Sendeteile verkraften ein SWR bis 3:1, Sie sollten aber trotzdem die Antenne besser

abstimmen. Die SWR-Skala erkennen Sie am Unendlichkeitszeichen (liegende 8) am rechten Skalenende.



Abbildung 16.68 Anzeige der Senderausgangsleistung (PO) am Laufbalken



Abbildung 16.69 Sendebetrieb (TX), Anzeige des SWR, Skala unterhalb des Laufbalkens

Weitere Probleme beim Funkbetrieb ergeben sich, wenn zu laut in das Mikrofon gesprochen wird. Bei SSB-Sprechfunk wird das vor allem bei weiten Entfernungen weniger Probleme bereiten. Beim FM-Betrieb aber (vor allem im VHF/UHF-Bereich) mit Handfunksprechgeräten sprechen Sie einfach leiser oder erhöhen den Abstand zum eingebauten Mikrofon. Es hilft nichts, bei einer FM-Funkverbindung mit schwachen Feldstärken das Mikrofon sehr laut anzusprechen – die Sendeleistung ändert sich dadurch nicht!

Bei anderen Geräten verringern Sie *Eingangslautstärke* gegebenenfalls im SETUP-Menü oder, falls auf der Frontplatte vorhanden, mit dem entsprechenden Handregler. Dies ist vor allem dann wichtig, wenn Sie Audiosignale für digitale Übertragungen (PSK31, FT4, FT8, ...) vom PC in das Funkgerät einleiten. Falls Ihr Funkgerät eine ALC-Anzeige hat, zeigt diese in diesem Fall am besten keinen Ausschlag an. Dann ist das Gerät richtig eingestellt. Andernfalls verzerrt die Übertragung, was bei Sprache lange toleriert wird, aber bei digitalen Verfahren die Dekodierung bei der Gegenstelle stark beeinträchtigt. Schalten Sie für digitale Übertragungen den Dynamikkompressor aus.

Bandgrenzenüberschreitungen oder das Stören anderer Stationen durch die Bandbreite der eigenen Aussendung geschehen oft aus Unwissenheit. Achten Sie im FM-Betrieb darauf, dass die eingestellte Frequenz mindestens etwas mehr als die Hälfte

der Signalbandbreite Abstand von den Bandgrenzen bzw. anderen Funkteilnehmern hält. Bei gängigen FM-Funkgeräten mit einer Signalbandbreite von 12 kHz (gebräuchliches Raster: 12,5 kHz) beträgt der Sicherheitsabstand also mindestens 6 kHz. Dieses Problem ergibt sich besonders bei Gebrauchtgeräten, die noch für das früher gebräuchliche 25-kHz-Raster gebaut wurden!

Achten Sie auf folgende Bandgrenzenabstände bei SSB:

- Bei USB halten Sie sicherheitshalber 3 kHz, besser 3,5 kHz Abstand zum oberen Bandende. (Das *obere Bandende* ist die höchste Frequenz des Amateurfunkbandes). Der unteren Grenze dürften Sie sich theoretisch sehr knapp nähern, die Bandpläne lassen hier aber nur schmalbandige Verfahren (CW, Digimodes) zu.
- Bei LSB verhält es sich umgekehrt. Aber auch bei CW-Aussendungen halten Sie Abstand mit maximal 150 Hz (Schnelltelegrafie). Bandbreitenberechnungen finden Sie Abschnitt 16.1.

Auch bellende Hunde oder der Staubsauger lösen die VOX aus. Achten Sie deshalb darauf, diese Funktion nur bei Ihrer Anwesenheit zu aktivieren. Andernfalls werden andere Funkteilnehmer gestört. Auch bei der Gerätesteuerung per Computer kann es zu unbeabsichtigten Aussendungen kommen. Lassen Sie deshalb Ihre Station nie unbeaufsichtigt in Betrieb!

Der *Dynamikkompressor* hat die Aufgabe, leisere Anteile der Sprache gegenüber den lauteren leicht anzuheben. Das ist vor allem bei SSB-QSOs über weite Strecken vorteilhaft. Er verringert zudem den Dynamikumfang der Modulation. Stellen Sie eine zu hohe Kompression ein, hat Ihr Funkpartner mit abnehmender Verständlichkeit Ihrer Aussendung zu kämpfen. Und schalten Sie unbedingt den Dynamikkompressor aus, wenn Sie digitale Modi benutzen! Hier würde das NF-Signal unbrauchbar!

Ein in manchen modernen Amateurfunkgeräten verbauter Equalizer hat nichts mit dem Dynamikkompressor zu tun. Vielmehr passt er den NF-Frequenzgang an die Stimme des Gerätenutzers an.

Wenn die *Empfängerfeinverstimmung* (RIT) aktiv ist, weicht Ihre Sendefrequenz geringfügig von der Empfangsfrequenz ab. Meist werden Sie darauf hingewiesen, dass Ihr Funkgerät nicht exakt auf der Frequenz der Gegenstation sendet. Sie benutzen die RIT, wenn Sie angerufen werden und die Frequenz des Empfangssignals etwas nachgestimmt werden soll, um es verständlicher zu machen.

Wenn der SSB-Empfang nicht auf Anhieb funktioniert, kontrollieren Sie die *Seitenbandeinstellungen*. Die Einstellung LSB gilt für die Bänder 160 m, 80 m und 40 m, die Einstellung USB für 60 m und alle Bänder ab 20 m aufwärts, also auch im VHF- und UHF-Bereich! Stimmt diese Einstellung, stimmen Sie mit Feingefühl am VFO-Knopf den Empfang ab.

Auch auf der Anschlussseite eines Funkgeräts lauern einige Fehlermöglichkeiten:

- **Versorgungsspannung**: Stimmen Polarität und Spannung? Ist die Gerätesicherung intakt?
- **Key**: Wenn beim Telegrafiebetrieb kein Pieps herauskommt, prüfen Sie Folgendes: Ist die Morsetaste mit dem Anschlusskabel in Ordnung? Ist die Batterie in einer automatischen Morsetaste leer?
- **DATA**: Es wird der NF-Zweig, sowohl sende- als auch empfangsseitig umgangen, damit ein 9k6-Datensignal eingespeist bzw. entnommen werden kann. Wird ein passendes Verbindungskabel zwischen PC oder TNC und dem Funkgerät verwendet? Kommt es zu Einstreuungen in die angeschlossenen Geräte? Hier helfen meist Ferritdrosseln bzw. auch Erdungsmaßnahmen.
- **ACC**: Dieser Anschluss reduziert die Amplitude des Sendesignals vor einem Leistungsverstärker. Passt das angeschlossene Zubehör (z. B. der Leistungsverstärker und das Kabel) zum Funkgerät? Ist eine Einschaltreihenfolge einzuhalten?
- **GND**: Verbinden Sie diesen Anschluss mit der Erdung.

Eine recht spartanische Anschlussseite, nämlich die Rückseite eines Yaesu FT-817, sehen Sie in Abbildung 16.70.

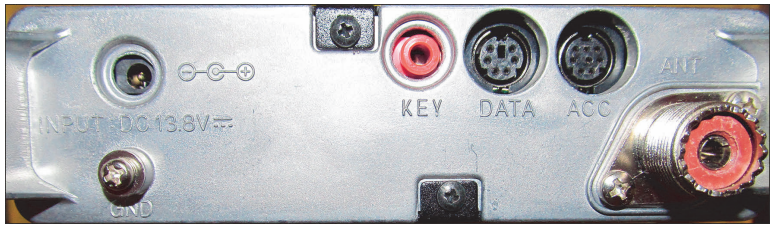


Abbildung 16.70 Anschlüsse an der Geräterückseite

Programme für den SDR-Empfang und die Fernsteuerung von Funkgeräten, aber auch neuere Funkgeräte selbst zeigen das *Amplitudenspektrum* (Frequenzanteile eines Signals, in Abbildung 16.71 mit A gekennzeichnet) und das *Wasserfalldiagramm* (B) an.

Die Frequenz steigt dabei von links nach rechts (X-Achse). Im Bereich A kommt die Darstellung der Signale (Feldstärke, Amplitude) dazu, im Bereich B der zeitliche Verlauf. Durch eine veränderliche Farbintensität werden auch hier Breite und Stärke dargestellt.

Das sind hilfreiche Anzeigen. Sie sehen die Bandbelegung und können entsprechend aktive Bereiche eines Amateurfunkbandes aufsuchen. Außerdem lässt sich bei entsprechender Einstellung der Anzeige auch ermitteln, ob ein (weiteres vorhandenes) Funkgerät sauber sendet oder viele Nebenprodukte produziert.

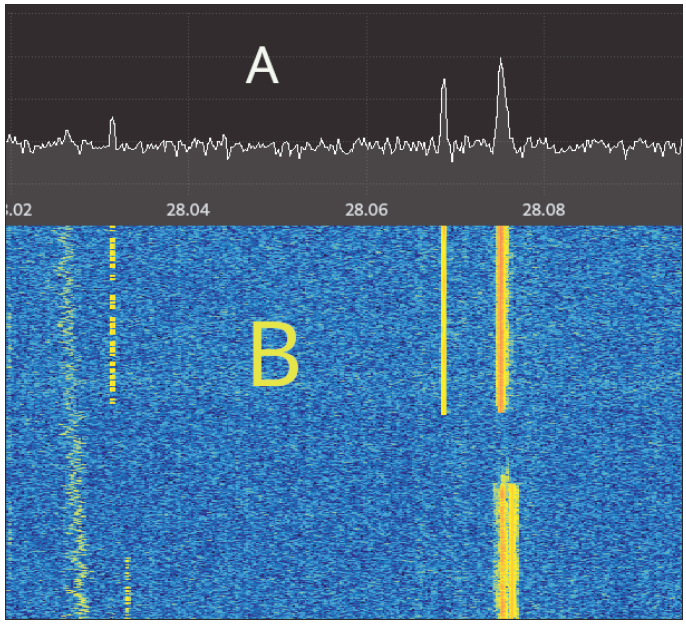


Abbildung 16.71 Amplitudenspektrum und Wasserfalldiagramm

Darüber hinaus können Funkgeräte Folgendes aufweisen:

- Bedienelemente für die Frequenzspeicherung (Speicherkanäle, Vorzugsbereiche)
- Einstellungen für Pilotton, Tonsquelch (CTCSS)
- Digitalfunkspezifika (Talkgroups, ID-Verwaltung, Erstellung von Codeplugs, Reflektoren, ...)

16.6 Sendetechnik

Vieles, was Sie jetzt schon von den Empfängerkonzepten her kennen, wiederholt sich ein wenig bei den Sendern. Dabei sollen nur die gewünschten Signale auch den Sender verlassen. Genauere Informationen zur Verstärkertechnik finden Sie in Abschnitt 16.6.3.

16.6.1 Einzelne Senderbaugruppen

In einem Sender arbeiten verschiedene Baugruppen miteinander. Althergebrachte Schaltungen sind hier wirklich getrennt. In modernen Funkgeräten kann aber ein Sender mit integrierten Schaltungen untergebracht werden, sodass die »Schaltungsgrenzen« unkenntlich werden. SDR-Konzepte legen vieles auf die Software um.

Der Balancemischer

Die Schaltung aus Abbildung 16.72 wird *Ringmischer*, *Ringmodulator* oder *Ringdemodulator* genannt (siehe Abschnitt 16.3.2). Der Aufbau ist aber stets der gleiche.

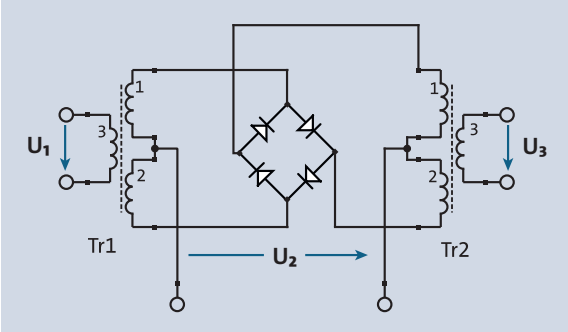


Abbildung 16.72 Balancemischer

In der Regel verwenden Sie den Ringmischer als Fertigbaustein. Dadurch ist gewährleistet, dass alle vier Dioden in ihren elektrischen Werten mehr oder weniger genau übereinstimmen und dass auch die beiden Übertrager exakt gleich aufgebaut sind. Die Arbeitsweise des Mischers ergibt sich aus der Diodenanordnung. Jede Halbwelle wird »weitergereicht«, und an einem Punkt wird das Mischprodukt abgenommen.

In einem SSB-Sender erzeugen Sie zunächst ein *Doppelseitenbandsignal* (DSB) mit diesem Mischertyp. Auch bei weiteren Mischvorgängen (auch ein Sender kann über eine ZF verfügen) setzt man diesen Mischertyp gerne ein, da er unerwünschte Ausgangssignale auf ein Mindestmaß begrenzt.

Damit keine unerwünschten Mischprodukte an die folgenden Verstärkerstufen weitergereicht werden, sollte der Mischer gut abgeschirmt sein und sein Ausgangssignal gut gefiltert werden.

Frequenzaufbereitung: VFO

In Sendern und Transvertern müssen Frequenzen oftmals vervielfacht werden. Bei diesem Prinzip gilt es, die Ausgangsfrequenz so stabil wie möglich zu halten. Beachten Sie hierzu die Ausführungen zu den konstruktiven Details von Empfängern. Darin werden bereits Grundlagen über frequenzstabile VFO vorgestellt.

Eine gute Frequenzstabilität bei einem VFO (*Variable Frequency Oscillator*, Oszillator mit veränderbarer Frequenz) erzielen Sie durch diese konstruktiven Maßnahmen:

- stabile, gegebenenfalls temperaturgesteuerte Gleichstromversorgung
- Vermeidung von Temperaturschwankungen, Unterbringung abseits von abwärmeführenden Leistungsbauteilen

- Unterbringung in gut geschirmtem, dickwandigem Metallgehäuse, um Rückkopplungen von HF-Signalen zu verhindern
- Pufferung des Ausgangssignals

Damit verhindern Sie »wandernde« Signale (*Drift*) auf den Bändern und Aussendungen außerhalb von Band- und Nutzungsgrenzen (Bandpläne!). Eine (wenn auch nur leicht) instabile Stromversorgung von Oszillatoren beeinflusst auch die Qualität des Ausgangssignals. Bei der Morsetelegrafie zeigen *Chirps* an, dass die Frequenz beim Tasten des Senders geändert wird. Meist ist eine knapp bemessene Stromversorgung die Ursache für die Chirps.

Frequenzaufbereitung: Vervielfacher (Schaltung)

Ähnlich wie beim Superhetempfänger wird bei modernen Sendern die Ausgangsfrequenz als Mischprodukt erzeugt. Dabei kommen auch Frequenzvervielfacher zum Einsatz.

Das sinusförmige Signal führt man einer nichtlinearen Verzerrerstufe (siehe Abbildung 16.73) zu. Dabei entstehen Oberwellen (Harmonische, siehe auch Abschnitt 7.10, »Nichtsinusförmige Signale«). Aus dem Verzerrprodukt filtern Sie die gewünschte Oberwelle/Harmonische heraus und führen dieses Signal der weiteren Nutzung zu. Frequenzvervielfacherschaltungen müssen unbedingt so gut wie möglich abgeschirmt werden, damit die unerwünschten Abstrahlungen so gering wie möglich gehalten werden.

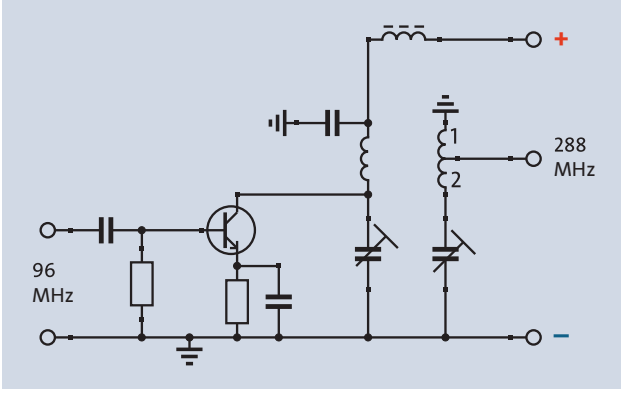


Abbildung 16.73 Schaltbild eines Frequenzvervielfachers

Mit einem Oszilloskop oder der Spektrumanalyse (z. B. mittels SDR-Empfänger) überprüfen Sie die richtige Oberwellenauswahl am einfachsten. Früher verwendete man dazu einen Absorptionsfrequenzmesser.

Frequenzaufbereitung: Vervielfacher (Berechnungen)

Im Kurzwellenbereich entsprechen die »klassischen« Amateurfunkbänder 80 m, 40 m, 20 m und 10 m mehr oder weniger den Harmonischen. Hier wird die Frequenz stets verdoppelt. Vom 40-m-Band aus erreichen Sie das 15-m-Band per Verdreifachung. Die sogenannten WARC-Bänder und der neu hinzugekommene 5-MHz-Bereich sind damit nicht darstellbar.

Das Blockschaltbild in Abbildung 16.74 zeigt die verschiedenen Multiplikatoren (die bei der Rückrechnung zu Divisoren werden). Der VFO arbeitet hier im 80-m-Band, also im Bereich von 3,5 MHz bis 3,8 MHz.

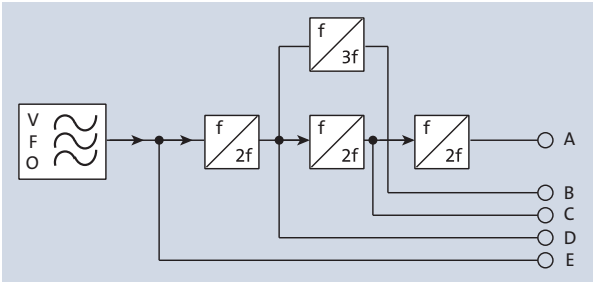


Abbildung 16.74 Mehrbandsender

Ein verwirrendes Detail dieses Blockschaltbilds besteht in der verbindungsfreien Leitungsführung nach dem Verdreifacher. Lassen Sie sich hiervon nicht verunsichern!

Tabelle 16.16 zeigt Ihnen nochmals die einzelnen Rechenwege auf.

Anschluss		Rechenweg	Ausgang
A	**VFO 3,5 bis 3,8 MHz**	$f_{VFO} \times 2 \times 2 \times 2$	28 bis 30,4 MHz
B		$f_{VFO} \times 2 \times 3$	21 bis 22,8 MHz
C		$f_{VFO} \times 2 \times 2$	14 bis 15,2 MHz
D		$f_{VFO} \times 2$	7 bis 7,6 MHz
E		ohne	3,5 bis 3,8 MHz

Tabelle 16.16 Rechenwege für Mehrbandsender

Übung

Die VFO-Frequenz beträgt 3,55 MHz. Welche Frequenz führt der Anschluss C?

Lösung: 3,55 [×] 2 [×] 2 [=]

Das Ergebnis ist also 14,2 MHz.

Am Ausgang A werden 28,500 MHz gemessen. Auf welche Frequenz ist der VFO eingestellt?

Lösung: 28,5 [÷] 2 [÷] 2 [÷] 2 [=]

Hier lautet das Ergebnis: 3,5625 MHz

Auf diese Weise können Sie auch mit einem Empfänger prüfen, ob und wie stark ein Sender unerwünschterweise Harmonische abstrahlt.

Frequenzaufbereitung für VHF- und UHF-Sender

Für den VHF- und UHF-Bereich sieht das Blockschaltbild geradliniger aus. Dafür müssen teilweise recht niedrige Frequenzen in einem Zusammenspiel mehrerer Verdoppler und Verdreifacher zusammenarbeiten.



Verwendung von Frequenzvervielfachern

Beachten Sie, dass bei FM der Hub ebenso mit vervielfacht wird. So, wie Sie die Sendefrequenz berechnen, müssen Sie auch den Hub extra berechnen bzw. die notwendige Rückrechnung vornehmen!

Abbildung 16.75 zeigt Ihnen zwei typische Blockschaltbilder von VHF- und UHF-Sendern. Sie sehen, dass man entweder sehr tiefe Grundfrequenzen und dafür mehrere Vervielfacher benutzt oder mit einer höheren Grundfrequenz »einsteigt« und dafür Vervielfacher einspart.

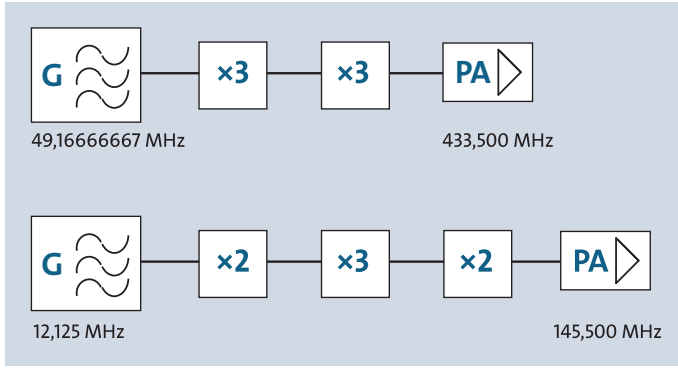


Abbildung 16.75 Erzeugung der Ausgangsfrequenz durch Vervielfacherstufen

Die Berechnungen hierzu gestalten sich einfach. Es kann aber auch der Vervielfacherfaktor gefragt sein und dafür die Oszillator- und Ausgangsfrequenz genannt sein. In diesem Fall dividieren Sie die Ausgangs- durch die Oszillatorfrequenz. Dann erhalten Sie ein Ergebnis, das zur nächsten ganzen Zahl auf- oder abgerundet wird. Diese Zahl muss dann entsprechend durch 2 und/oder 3 geteilt werden.

Für das Beispiel aus Abbildung 16.75, erstes Blockschaltbild, heißt das:

433,500 [÷] 49,16666667 [=]

Zwischenergebnis: 8,816...

Nächste ganze Zahl: 9

9 wird durch 3 × 3 gebildet, die Grundfrequenz wird also zweimal verdreifacht.

Frequenzaufbereitung: Mischsysteme

Moderne Gerätekonzepte arbeiten mit PLL-basierter Frequenzsynthese, die Sie schon bei den Empfängern kennengelernt haben. In Funkgeräten ist dies ebenso im Einsatz: Das Kennzeichen dieser Konzepte ist die mehr als doppelt so hohe ZF (über der höchstmöglichen Sendefrequenz).

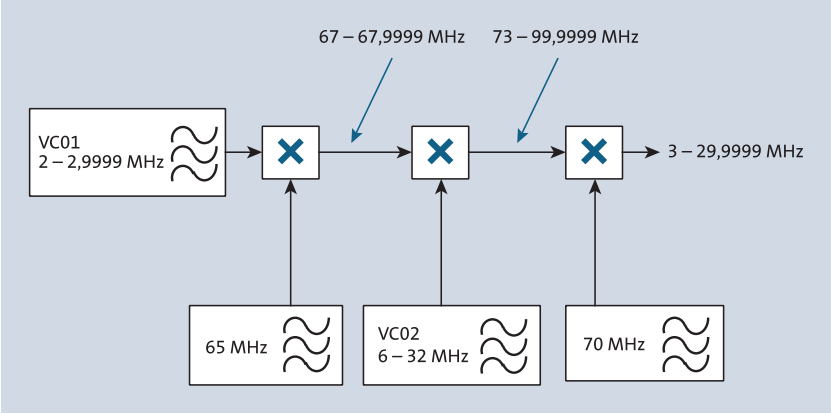


Abbildung 16.76 Schema der Frequenzsynthese

Im Wesentlichen werden hier zwei Berechnungen verlangt. Sie müssen die Ausgangsfrequenz oder die eines der beiden VCO ermitteln können.

Berechnung der Ausgangsfrequenz:

$$f_{\text{Ausgang}} = f_{\text{VCO1}} + 65\ \text{MHz} + f_{\text{VCO2}} - 70\ \text{MHz}$$

Übung

Gesucht ist die Ausgangsfrequenz, Einstellungen VCO1: 2,1 MHz; VCO2: 10 MHz.

Lösung: 2,1 [+] 65 [+] 10 [-] 70 [=]

Das Ergebnis ist also 7,1 MHz.

Frequenzen mischen

Beim Mischen von Frequenzen entstehen immer zwei Mischprodukte. Einmal wird addiert, einmal subtrahiert.

Schauen Sie sich dazu auch ein weiteres Beispiel an:

Bekannte Werte: Ausgangsfrequenz: 28,5 MHz, ZFs siehe Abbildung 16.76.

Gesucht sind die Frequenzen von VCO1 und VCO2.

Lösung:

- Schritt 1: Hinzumischen der letzten Mischfrequenz: 70 MHz
  Letzte ZF-Stufe: 28,5 MHz [+] 70 [=] 98,5 MHz
- Schritt 2: Ermittlung der Frequenz aus VCO2, der nur in ganzen MHz-Stufen einstellbar ist; siehe die Detailzeichnung (Frequenzteiler) der Prüfungsfrage. Hierzu ziehen Sie 67,5 MHz von der zweiten ZF ab:
  98,5 MHz [-] 67,5 MHz [=] 31 MHz
- Schritt 3: Abzug der festen Oszillatorfrequenz von der ersten ZF:
  67,5 MHz [-] 65 MHz [=] 2,5 MHz

Ergebnis: VCO1 schwingt auf 2,5 MHz, VCO2 auf 31 MHz.

16.6.2 Transverter (»Nachsetzer«)

Transverter setzen meist von Kurzwelle auf VHF- und UHF-Amateurfunkbänder um. Im Gegensatz zum reinen Empfangskonverter wird hier auch das Sendesignal auf eine andere Frequenz umgesetzt.

Obwohl es einige Amateurfunkgeräte auf dem Markt gibt, die Kurzwelle und VHF/UHF abdecken, sind Transverter immer noch sehr gefragt. Das mag daran liegen, dass das Zusammenspiel von oft besseren Empfangsteilen der Transverter mit einer gut ausgerüsteten Kurzwellenstation ein besseres Verhalten bezüglich Trennschärfe und Großsignalfestigkeit ergibt. Zudem gibt es für viele Bänder oberhalb des 23-cm-Bandes keine fertigen Funkgeräte – hier ist der Eigenbau von Transvertern der Schlüssel zur Bandnutzung überhaupt!

Viele Kurzwellenfunkgeräte verfügen über einen eigenen Anschluss für den Transverterbetrieb. Das steuernde Funkgerät darf den Transverter nur mit sehr niedriger Sendeleistung versorgen, 50 mW sind hier üblich. Daher baut man auch oft nachträglich Funkgeräte (es gibt Bausätze dafür) so um, dass in diesem Fall die Leistungsverstärker abgeschaltet bleiben und nur das »kleine« Signal an den Transverter gereicht wird. Der Einsatz von einem Dämpfungsglied würde grundsätzlich funktionieren. Dieses wandelt aber die nicht benötigte Sendeenergie nur in Wärme um.

Abbildung 16.77 zeigt Ihnen das »zweizügige« (Sendung/Empfang) Blockschaltbild eines Transverters. Darin ist der Empfangszweig (RX) als aktiv dargestellt.

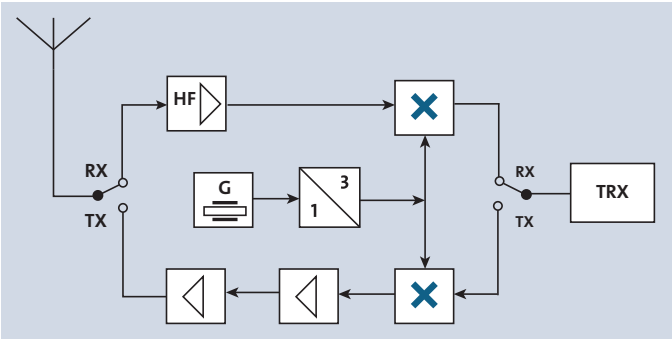


Abbildung 16.77 Blockschaltbild eines Transverters

16.6.3 (Leistungs-)Verstärker in Sendern

Der Wirkungsgrad von Verstärkern

Es gibt keine Schaltung, die mehr Energie abgibt, als hineingesteckt wird. Das Verhältnis zwischen der »Energie-Investition« und der »Ernte« nennt man den *Wirkungsgrad* (siehe auch Abschnitt 6.1).

Er ist das Verhältnis der abgegebenen Spannung zur Leerlaufspannung bzw. der abgegebenen Leistung zur eingesetzten Leistung.

- Formelzeichen: η (ausgesprochen Eta)
- Berechnung des Wirkungsgrades:

$$\eta = \frac{P_{\text{Ausgang}}}{P_{\text{Eingang}}}$$

und als Prozentwert:

$$\eta = \frac{P_{\text{Ausgang}}}{P_{\text{Eingang}}} \times 100\ \%$$

Gerade bei Verstärkern sieht man meist deutlich, dass die zugeführte Energie sich auf zwei »Kanäle« verteilt: auf die Ausgangsleistung und die Abwärme. Zum Abführen der Abwärme dienen Kühlbleche, Gebläse und im Hochleistungsbereich auch Flüssigkeitskühlungen.

Übung

Sie verwenden als Leistungsverstärker für Ihr Handfunkgerät eine kleine PA (*Power Amplifier*), die aus 5 Watt 25 Watt Ausgangsleistung hervorbringt. Diese »Endstufe« nimmt hierbei bei 12 Volt 5 Ampere Strom auf.

Berechnen Sie den Wirkungsgrad in Prozent!

Lösung:

- Schritt 1: Berechnung der Leistungsaufnahme

  Verwenden Sie hierzu diese Formel:

  $P = \text{Spannung} \times \text{Strom} = U \times I$

  Im Beispiel berechnen Sie also 12 Volt × 5 Ampere und erhalten damit eine Eingangsleistung von 60 Watt!

- Schritt 2: Berechnung des Wirkungsgrades

  Die Formel hierzu lautet:

  $$\eta = \frac{P_{\text{Ausgang}}}{P_{\text{Eingang}}} \times 100$$

  Teilen Sie also die 25 Watt durch die 60 Watt und multiplizieren Sie dies mit 100. Der Wirkungsgrad beträgt ca. 42 %.

Die einzelnen Verstärkerstufen eines Senders weisen unterschiedliche Verstärkungsfaktoren und Wirkungsgrade auf. Die gesamte Leistungsaufnahme verteilt sich daher auf die verschiedenen Stufen unterschiedlich (siehe Abbildung 16.78).

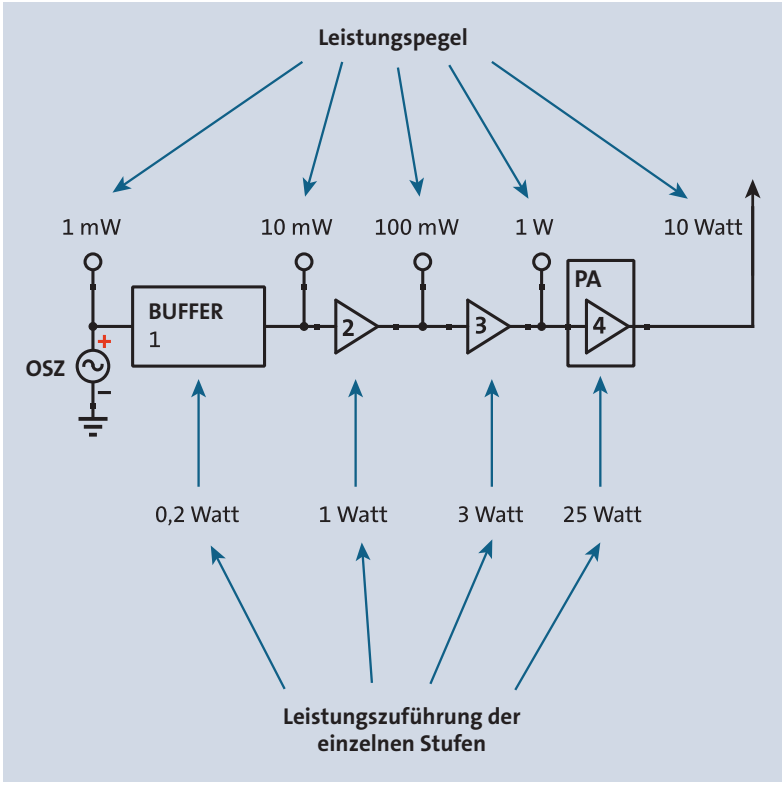


Abbildung 16.78 Leistungsverteilung im Sender

Das Oszillatorsignal gelangt an den *Buffer*. Der schützt den Oszillator vor lastbedingten Rückwirkungen. Der Buffer kann auch als Trennverstärker bezeichnet werden. Das Signal darf hier keinerlei Verzerrungen erhalten. Weitere Verstärkerstufen sind notwendig, um das Signal »in die Luft« zu bringen. Die Modulationsstufen wurden im Plan nicht dargestellt.

Wirkungsgrad und Lastanpassung

Den maximalen Wirkungsgrad eines Leistungsverstärkers erzielen Sie durch die Anpassung seiner Last an den Ausgangswiderstand.

In der Funktechnik müssen daher die Antenne, deren Zuleitung und der Senderausgang (PA) aufeinander abgestimmt werden.

An einen Senderausgang mit einer Impedanz von 50 Ω muss auch eine entsprechende Zuleitung und Antenne (ebenso 50 Ω) angeschlossen werden.

Das ABC der Verstärkerbetriebsarten

Ein Verstärker wird entweder mit einer positiven oder einer negativen Versorgungsspannung betrieben. Aus diesem Grund können auch nur positive oder negative Spannungen verstärkt werden.

Der *Arbeitspunkt* eines Verstärkers bestimmt den Wirkungsgrad und die Reinheit des Signals, das an seinem Ausgang herauskommen soll. Sie stellen den Arbeitspunkt in Form der Vorspannung, meist mit einem Spannungsteiler, an der Basis des Verstärkertransistors ein.

Genaueres finden Sie in Abschnitt 12.2.1.

Verstärkerbetriebsarten bei Röhren

Verstärkerbetriebsarten bei Röhren funktionieren mit umgekehrten Vorzeichen! Hier wird die (negative) Gitterspannung entsprechend eingestellt!

Tabelle 16.17 zeigt Ihnen die verschiedenen Eigenschaften der Betriebsarten.

Merkmal	Betriebsart		
	A	B	C
Wirkungsgrad	max. 40 %	max. 80 %	max. 87 %
Oberwellenanteil	sehr gering	gering	hoch
Ruhestrom	hoch	sehr gering	fast null
Verstärker	Eintakt	Gegentakt	Eintakt

Tabelle 16.17 Verstärkerbetriebsarten

Wie sich Strom- und Spannungspunkte auf der Steuerkennlinie verteilen, sehen Sie in Abbildung 16.79.

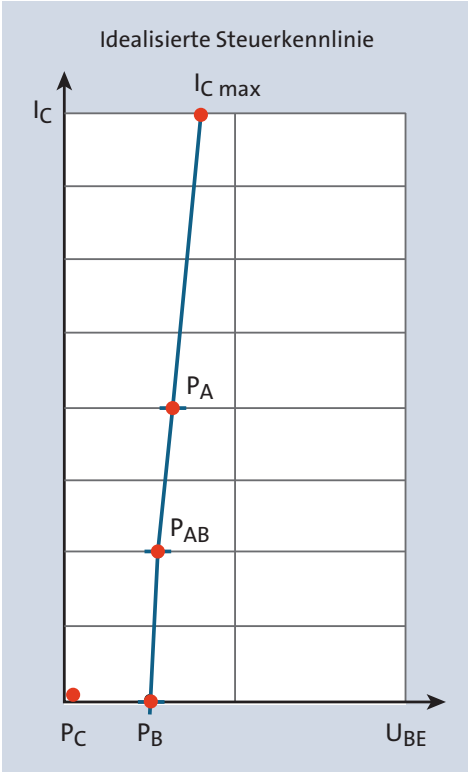


Abbildung 16.79 Steuerkennlinie eines Transistors

Die einzelnen Betriebsarten haben noch weitere Eigenheiten:

- **A**: Der Ruhestrom ist für den durchaus niedrigen Wirkungsgrad verantwortlich, aber dafür arbeitet der Verstärker linear. Der Arbeitspunkt liegt in der Mitte der Kennlinie. Es treten die wenigsten Verzerrungen und Oberwellen auf. Sie verwenden diese Betriebsart meist in den Kleinleistungsstufen eines Senders, bei denen es auf Signalqualität im Besonderen ankommt.
- **B**: Hier justieren Sie den Verstärker so, dass ganz knapp kein Ruhestrom fließt. Dafür wird aber auch nur eine Halbwelle des Eingangssignals verstärkt. In der Praxis wird diese Betriebsart in Gegentaktverstärkern verwendet, wo sich zwei identische Teilschaltungen ergänzen, indem jede für einen »Halbwellenbereich« zuständig ist. Unsaubere Signale entstehen im Augenblick des Übergangs von einer Halbwelle zur anderen. Abhilfe schafft der AB-Betrieb.

  Wenn Sie in der Betriebsart B die Basisspannung (NPN-Transistor) erhöhen, steigt der Kollektorstrom erheblich an.

- **AB**: Hier wird ein geringer Ruhestrom eingestellt, damit der Verstärker mehr Linearität aufweist (Linearverstärker).
- **C**: In dieser Betriebsart bestimmen nur die Scheitelpunkte des Eingangssignals das Ausgangssignal. Diese Betriebsart kommt für die Sendearten Morsetelegrafie, Frequenzmodulation oder Pulsweitenmodulation in Betracht.

Sendearten und Verstärkerbetriebsarten

SSB-Leistungsverstärker arbeiten im AB-Betrieb (*Linearverstärker*). FM- und reine Telegrafiesender arbeiten überwiegend im C-Betrieb.

Der Gegentaktverstärker (Breitbandausführung)

Die Schaltung in Abbildung 16.80 arbeitet breitbandig. Dies erkennen Sie daran, dass sich keinerlei frequenzbestimmende Bauelemente in der Schaltung befinden und Resonanzkreise bilden würden.

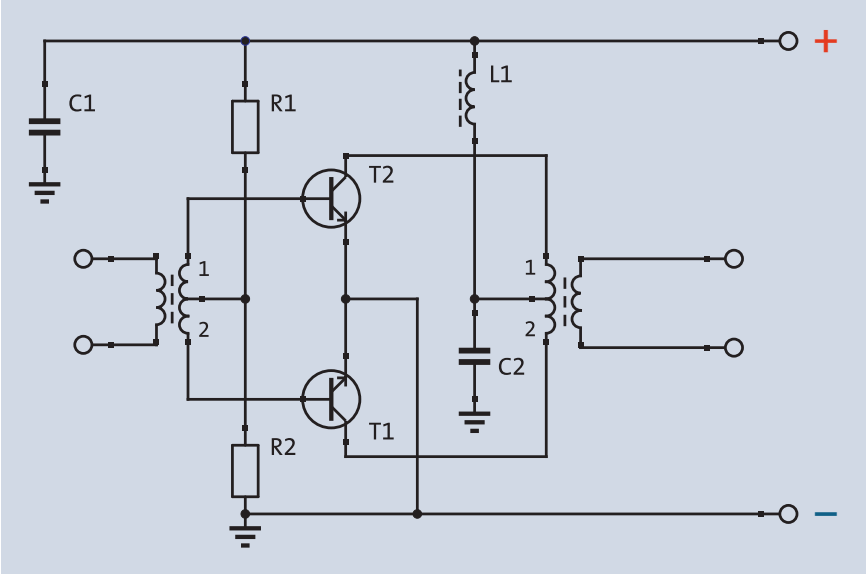


Abbildung 16.80 Breitband-Gegentaktverstärker

Der Vorteil hiervon ist die konstruktive Einfachheit. Nachteilig ist bei dieser Schaltung, dass die Ansteuerung mit einem sehr, sehr reinen Signal erfolgen muss. Nebenwellen werden hier einfach mit verstärkt und gelangen zum Ausgang.

Der Arbeitspunkt (Betriebsart B bzw. AB) wird über die Widerstände R1 und R2 eingestellt. Über die Mittelanzapfung des Eingangsübertragers gelangt die Basisvorspannung zu den Transistoren. Das Nutzsignal wird an diesem Übertrager aufgeteilt.

Die beiden Transistoren T1 und T2 arbeiten entgegengesetzt. Es arbeitet immer nur ein Transistor. Dabei sind die Aufgaben festgelegt. Ein Transistor ist stets für die positive, der andere für die negative Halbwelle des Eingangssignals »zuständig«. Der Ausgangsübertrager setzt die beiden Signalteile wieder zu einem zusammen.

In der Regel setzen Sie Bandfilter sowohl an den Schaltungsein- als auch an den Schaltungsausgang, damit unerwünschte Signale nicht zur Ausstrahlung gelangen!

Probleme beim Betrieb von HF-Verstärkern

Auf den Bändern hören Sie zuweilen Amateurfunkstationen, die sich im Frequenzbereich um die eigene Sendefrequenz herum als störendes Signal bemerkbar machen. Dies rührt daher, dass der Linearverstärker (im AB-Betrieb arbeitend) durch ein zu hohes Eingangssignal übersteuert wird.

Abhilfe schafft man, indem man den Leistungspegel am Verstärkereingang zurücknimmt.

Durch Konstruktionsfehler kann es vorkommen, dass ein Verstärker Eigenschwingungen hervorbringt. Damit wird ein Verstärker zum Sender. Dies ist aber ein unerwünschter Zustand, dem Sie durch geeignete Maßnahmen bei Schaltung und Unterbringung der Baugruppe begegnen können.

16.6.4 Details zum SSB-Sender

Für die Erzeugung des Einseitenbandsignals wird ein Balancemischer benutzt. Das davon ausgehende trägerlose Zweiseitenbandsignal durchläuft das Seitenbandfilter, sodass das nicht benötigte Seitenband unterdrückt wird. Das SSB-Signal gelangt an den Mischer, wo es mit der VFO-Frequenz gemischt wird. Hier entsteht entweder eine ZF oder schon das Signal mit der Ausgangsfrequenz.

Nach dem Mischer, der gut abgeschirmt sein sollte, passieren die beiden entstandenen Mischprodukte das Bandfilter. Das nicht benötigte Mischprodukt (Spiegelfrequenz) wird damit unterdrückt. Nunmehr wird dieses bereinigte Signal der Treiberstufe zugeführt. Hier wird das Kleinsignal so weit angehoben, dass es schließlich die Endstufe (PA) ansteuern kann.

Die automatische Leistungsregelung ALC hält den Mittelwert der Ausgangsleistung in einem bestimmten Bereich konstant. Nach der Verstärkung durchläuft das Ausgangssignal ein Tiefpassfilter, damit Oberwellen unterdrückt werden. Sollte es Probleme mit Oberharmonischen geben, unterdrücken Sie diese mit einem Sperrkreis am Senderausgang.

Ein Blockschaltbild mit allen wesentlichen Komponenten eines SSB-Senders finden Sie in Abbildung 16.81.

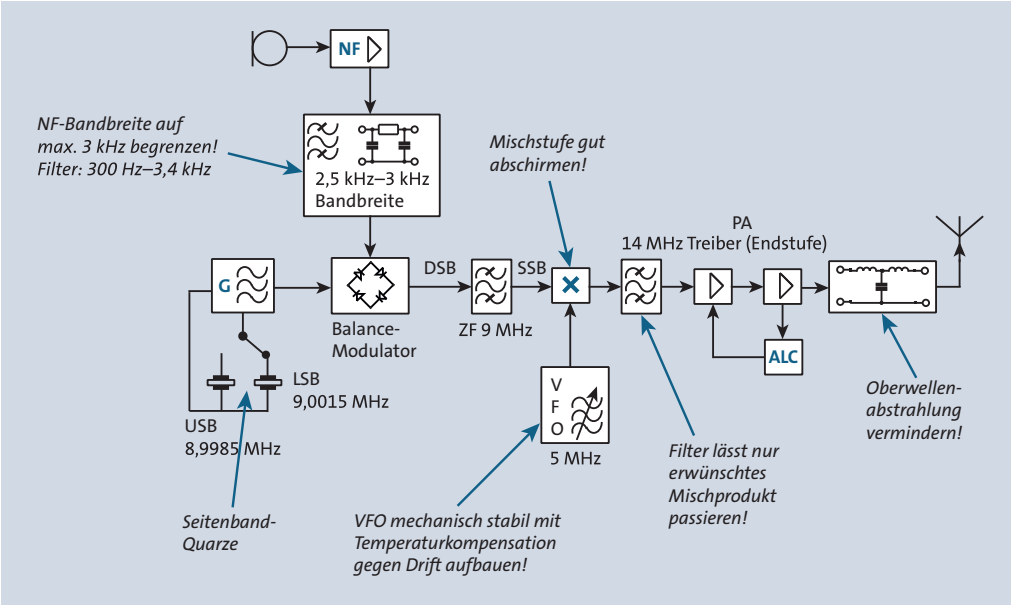


Abbildung 16.81 Blockschaltbild eines SSB-Senders

SSB-Sender: NF-Eingang

Die NF-Bandbreite des NF-Verstärkers eines SSB-Senders beträgt typischerweise 2,5 kHz. Damit das Signal nicht zu viel Bandbreite belegt und auf diese Weise Nachbarkanalstörungen (*Splatter*) verursacht, sollte die Übertragungsbandbreite maximal 3 kHz betragen.

Abbildung 16.82 zeigt Ihnen ein geeignetes Tiefpassfilter, das Sie im Mikrofonverstärker einsetzen können. Die Filterkurve sehen Sie in Abbildung 16.83.

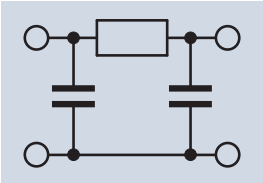


Abbildung 16.82 NF-Tiefpassfilter

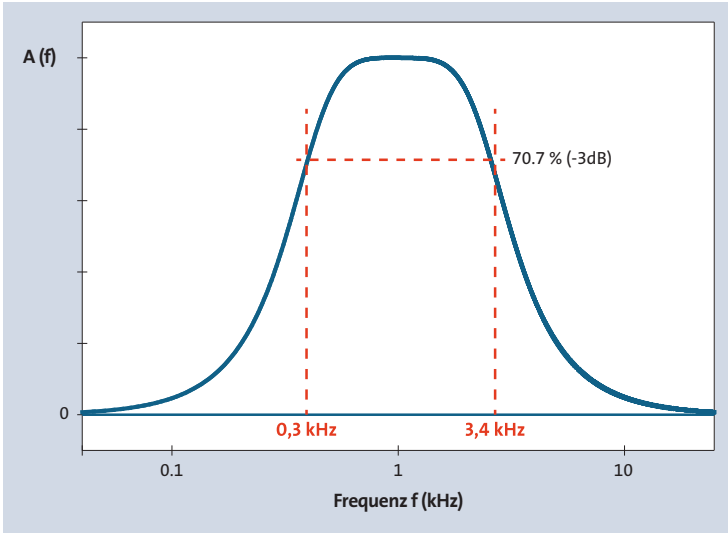


Abbildung 16.83 Frequenzgang eines NF-Tiefpassfilters

SSB-Sender: Details der Signalerzeugung

Das NF-Signal wird in den Balancemischer gespeist. Der Quarzoszillator, der den Träger erzeugt, verfügt für den SSB-Betrieb über zwei schaltbare Quarze. Das sehr schmalbandige, dem Balancemischer folgende 9-MHz-Quarzfilter filtert das unerwünschte Seitenband heraus (siehe Abbildung 16.84). Solche Filter haben in der Regel eine Bandbreite von 2,4 kHz.

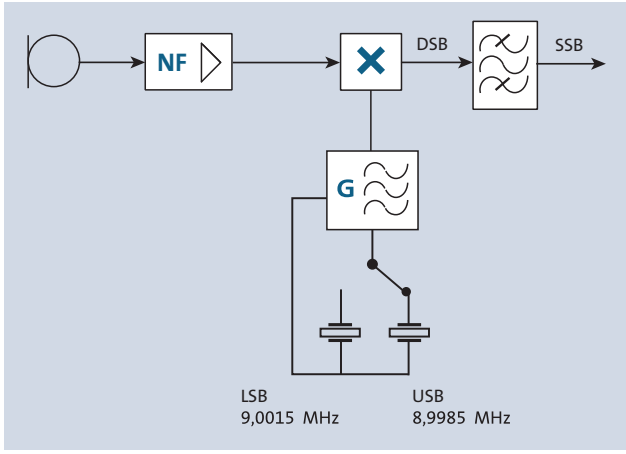


Abbildung 16.84 Details der SSB-Aufbereitung

Aus diesem Grund schalten Sie am Quarzoszillator zwischen den beiden Quarzen um. Einer dient für das untere Seitenband (LSB) und schwingt auf 9,0015 MHz, der andere

für das obere Seitenband (USB) und schwingt auf 8,9985 MHz. Jeder dieser Quarze weicht also um 1,5 kHz von der Mittenfrequenz des Quarzfilters ab. Denken Sie an die Mischprodukte, Sie erhalten nämlich zwei:

$$f_1 = f_{\text{Träger}} - f_{\text{NF}}$$

und

$$f_2 = f_{\text{Träger}} + f_{\text{NF}}$$

Übung

Sie schließen einen Tongenerator an diesen SSB-Sender an. Dessen Signalfrequenz beträgt 2 kHz, die Oszillatorfrequenz 9,0015 MHz.

- erstes Mischprodukt: 9,0015 [-] 0,002 [=] 8,9995 MHz, das den Filter passieren kann
- zweites Mischprodukt: 9,0015 [+] 0,002 [=] 9,0035 MHz, das vom Filter nicht mehr durchgelassen wird

Beim anderen Quarz mit 8,9985 MHz ergeben sich die Mischprodukte 8,9965 MHz (liegt außerhalb des Durchlassbereichs des Quarzfilters) und 9,0005 MHz.

Es wird immer das dem Durchlassbereich naheliegende Mischprodukt weiterverarbeitet.

SSB-Sender: Allgemeines zur Leistungsverstärkung

SSB-Sender benutzen einen Linearverstärker. Diese arbeiten meist im AB-Betrieb. Wenn kein Tonsignal oder nur ein sehr schwaches Tonsignal anliegt, gelangt ein sehr geringes Signal an die Antenne (z. B. Sprechpause).

Um den Mittelwert der Sendeleistung über einen bestimmten Bereich konstant zu halten, verfügen moderne Sender und Sendeempfänger über die ALC (*automatische Leistungsregelung*). Diese steuert auch die Treiberstufe des Senders mit. Sie können das in etwa mit der AGC (automatische Verstärkungsregelung) beim Empfänger vergleichen.

Die Senderendstufe muss zum einen gut gekühlt, zum anderen aber auch nach Möglichkeit abgeschirmt werden. Über die Stromversorgung darf keine hochfrequente Energie austreten. Umgekehrt müssen auch Oszillatoren und Mischer gut abgeschirmt werden, damit keine unerwünschten Signale zum Sendeverstärker gelangen.

16.6.5 Details zum VHF-FM-Sender

Über die Erzeugung von FM-Signalen gibt Abschnitt 16.3.3 Auskunft. Das NF-Signal durchläuft dabei zunächst den schmalbandigen Mikrofonverstärker. Anschließend

passiert das verstärkte Tonsignal die Pegelbegrenzung (siehe Abschnitt 11.5), die am einfachsten durch zwei antiparallel geschaltete Dioden umgesetzt wird. Über den regelbaren Spannungsteiler, der der Hubeinstellung dient, gelangt das Signal noch über ein die Bandbreite begrenzendes Tiefpassfilter zum Oszillator (siehe Abbildung 16.85).

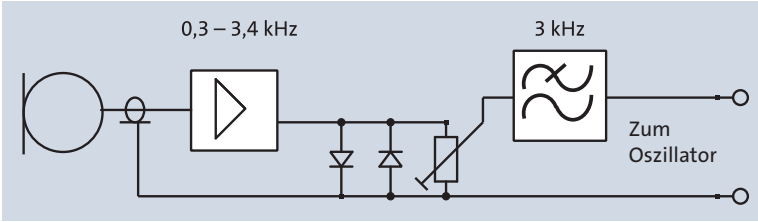


Abbildung 16.85 Hubbegrenzung und -einstellung

Ein Hinweis muss an dieser Stelle wiederholt werden: Folgen dem FM-Oszillator Vervielfacherstufen, wird der Hub ebenso wie die Sendefrequenz vervielfacht! Sie müssen ihn bei der FM-Erzeugung daher entsprechend gering einstellen.

Die Sendeverstärker von reinen FM-Geräten arbeiten im C-Betrieb. Dabei sollten Ausgangsanpassung und -filter in einem auf Masse liegenden Metallgehäuse untergebracht werden.

16.6.6 Senderschaltungen mit Transistoren

Einen einfachen, kleinen Hochfrequenzverstärker zeigt Ihnen Abbildung 16.86. Die Schaltung arbeitet im AB-Betrieb und ist damit für die Verstärkung von SSB-Signalen geeignet. Damit der hierfür notwendige kleine Ruhestrom fließen kann, müssen die Werte von R1 und R2 entsprechend gewählt werden.

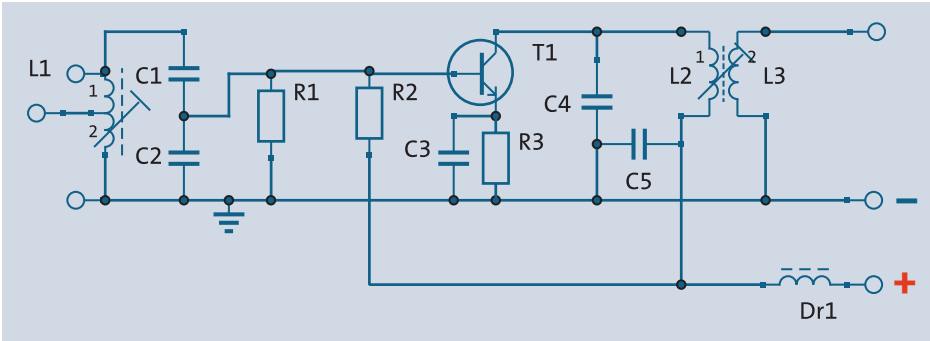


Abbildung 16.86 Hochfrequenzverstärker

Das Signal gelangt über die Mittelanzapfung von L1 in die Verstärkerschaltung. An dieser Stelle wird die Eingangsimpedanz der Stufe angepasst. In der Praxis beobachten Sie den Ausgangspegel der Schaltung, wenn Sie hier den Abgleich zusammen mit L2/L3 vornehmen. Bei maximalem Signal ist hier das Optimum erreicht.

Der Kondensator C2 legt die HF-Kopplung fest. Der Eingang wird durch das Verhältnis von C1 und C2 an den Eingangswiderstand des Transistors angepasst. Das verstärkte Signal wird über C5 ausgekoppelt. Über den einstellbaren Ausgangstransformator, der aus L2 und L3 besteht, gelangt das Signal schließlich an den Schaltungsausgang.

Die Drossel Dr1 verhindert, dass hochfrequente Schwingungen über die Stromversorgung die Schaltung verlassen.

Eine weitere HF-Verstärkerschaltung zeigt Abbildung 16.87. Die Schaltung arbeitet im C-Betrieb. Daher ist sie nur für CW oder FM geeignet. Die LC-Kombinationen am Verstärkerein- und -ausgang dienen zur optimalen Anpassung der Ein- und Ausgangsimpedanzen. In dieser Schaltung bilden C1, C2 und L1 den Eingangskreis. Mit den Trimmkondensatoren gleichen Sie die Eingangsimpedanz an den niederohmigen Transistoreingang an. Die Anpassung der Ausgangsimpedanz wird mit C4, C5 und L2 vorgenommen.

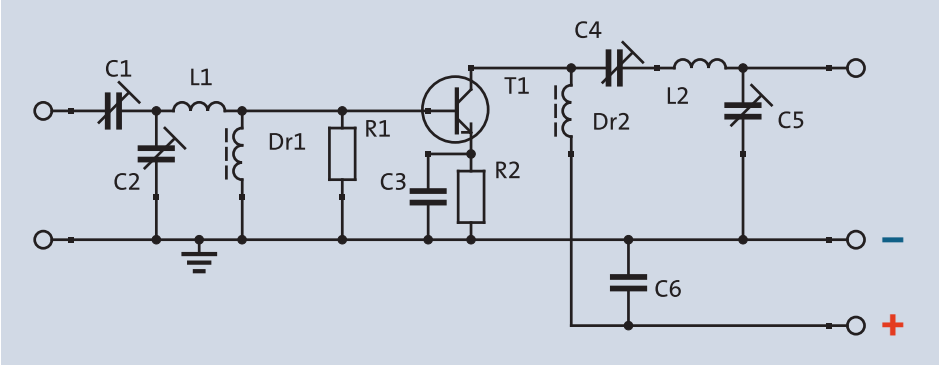


Abbildung 16.87 Kleiner HF-Verstärker

Eingangs- und Ausgangskreis sollten gut gegeneinander abgeschirmt und voneinander entkoppelt werden, am besten jeweils in einem Weißblechgehäuse. Andernfalls kann sich eine Rückkopplung (Eigenschwingung) aufbauen, und der Kleinsender würde zu einem Oszillator.

Insgesamt sollte zudem die ganze Schaltung gut geschirmt betrieben werden. Die Drossel Dr2 und der Kondensator C6 verhindern, dass Hochfrequenz an die Stromversorgung gelangt.

Abbildung 16.88 zeigt eine Treiberstufe, die das kleine Signal für den Endverstärker entsprechend anhebt. Jeder der beiden Transistoren arbeitet in Emitterschaltung. Jeder Transistor verstärkt das Signal um wenigstens das Zehnfache.

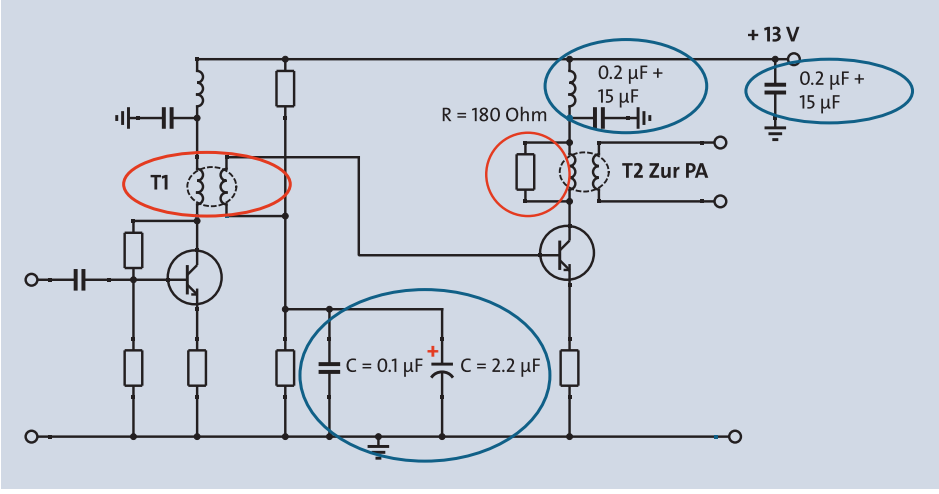


Abbildung 16.88 Breitband-Treiberstufe

Diese Verstärkerstufe arbeitet breitbandig und eignet sich damit für KW-Mehrbandsender. Anstelle abgestimmter Ein- und Ausgangskreise werden Ringkernübertrager verwendet (orange gekennzeichnet). T1 dient dabei zur Anpassung des Ausgangswiderstands der Emitterschaltung an den Eingang der folgenden Emitterschaltung.

Der Widerstand (rot umrandet) mit 180 Ω verhindert die Entstehung parasitärer Schwingungen.

Parasitäre Schwingungen

Parasitäre Schwingungen sind unkontrollierte Schwingungen. Sie entstehen durch die Eigeninduktivität und -kapazität von Leitungen, die bei Schaltungsberechnungen oft nur schlecht »vorhergesehen« werden können. Sie haben meist keinen Bezug zur Betriebsfrequenz.

- **Erkennen:** Die Leistungsanzeige eines Senders zeigt beim Abstimmen geringfügig sprunghafte Schwankungen. Man bemerkt auch eine unerklärbare, oft sprunghafte Erhöhung der Stromaufnahme, meist bei einigen wenigen Frequenzen. Denn: Auch die Verstärkung unerwünschter Frequenzen benötigt Energie.
- **Verhindern:** Bei Breitbandtransformatoren schalten Sie parallel zu den Windungen einen hochohmigen Widerstand.

  Bei VHF-Kleinsendern können Sie eine Ferritperle auf die Emitterzuleitung des Endstufentransistors aufschieben.

In Abbildung 16.88 finden Sie (blau umrandet) mehrfach parallel geschaltete Kondensatoren. Dabei ist immer ein Elektrolytkondensator (*Elko*) höherer Kapazität mit einem Folienkondensator geringer Kapazität zusammengefasst. Der Wechselstromwiderstand eines Kondensators hängt aber auch von der an ihm anliegenden Frequenz ab. So leitet der Elko mit der höheren Kapazität Signale mit tiefen Frequenzen besser. Der Folienkondensator mit der niedrigen Kapazität lässt die höheren Frequenzen besser passieren.

Die gezeigten Kombinationen dienen zum Abblocken sowohl tiefer als auch hoher Frequenzen.

16.6.7 Senderschaltungen mit Röhren

Besonders für Sender mit hohen Ausgangsleistungen ist eine Röhrenendstufe recht einfach aufzubauen. Während man bei Halbleiterendstufen mit Regelschaltungen die kostbaren Leistungstransistoren schützen muss, genügt hier ein spartanischer Aufbau. Allerdings muss der Funker die Röhrenendstufe auch richtig bedienen: Bandwechsel werden außer bei Luxusmodellen per Hand vorgenommen. Das Funkgerät steuert im Regelfall nicht den Umschaltvorgang mit. Zudem muss mittels eines einstellbaren PI-Filters die Antenne an die Ausgangsimpedanz der Röhre angepasst werden – bei fast allen Endstufenmodellen per Hand. Das macht normalerweise nichts aus, im hektischen Contestgetümmel kann dies aber zumindest Zeit kosten.

Abbildung 16.89 zeigt das Schaltbild einer Röhrenendstufe. Bei der Röhre handelt es sich um eine Triode, die in Gitterbasisschaltung betrieben wird. Das zu verstärkende Signal gelangt über C3 an die direkt beheizte Kathode. Bei einer direkten Beheizung liegen Heizung und Kathodenanschluss auf einem Leiter. Die notwendige Heizspannung liegt, von links nach rechts gesehen, an den ersten beiden Anschlüssen an (meist 6,3 Volt). Die beiden Drosseln Dr1 und Dr2 verhindern, dass Hochfrequenz an die Heizspannungsversorgung gelangen kann. Die Gitterspannung muss negativer als die Kathodenspannung sein. Der Kathodenwiderstand R1 (roter Kreis) erzeugt hierbei diese negative Gittervorspannung. Diesen Widerstand könnten Sie, falls Sie den Arbeitspunkt der Röhre unabhängig von der HF-Aussteuerung einstellen möchten, durch eine Konstantspannungsquelle ersetzen. Die Anodenspannung wird mit dem rechten unteren Anschluss zugeführt. Auch hier verhindert eine Drossel (Dr3), dass Hochfrequenz an die Spannungsversorgung gelangt.

Im grünen Kreis befinden sich C1, C2 und L1. Diese drei Bauelemente bilden das Pi-Filter (π-Filter), das die Antenne an die Ausgangsimpedanz der Röhre anpasst. Vermutlich wegen der hier oft verwendeten zylinderförmigen Luftspule wird dies in älterer Literatur auch als *Tankkreis* bezeichnet.

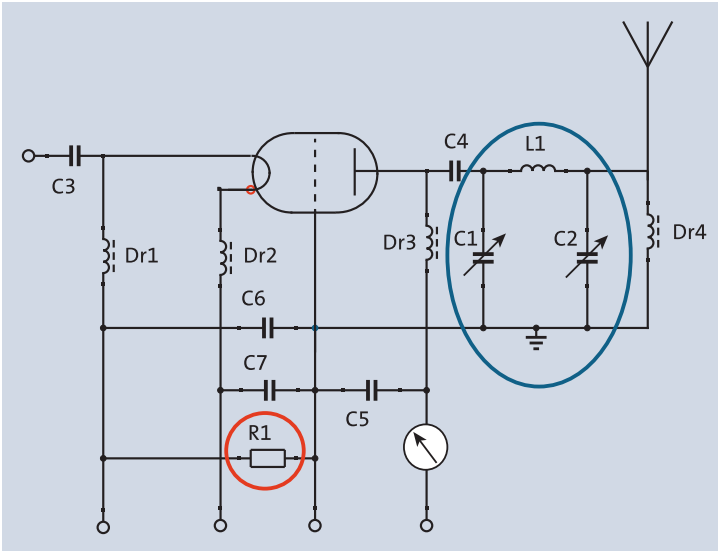


Abbildung 16.89 Röhrensenderendstufe

Dies geschieht manuell durch den Funker. Die Bedienelemente sind mit »Plate« (C1) und »Load« (C2) beschriftet. Das Anodenstrom-Messgerät zeigt bei den Abstimmarbeiten an, wie optimal Röhre und Antenne zusammenarbeiten. Der Abstimmvorgang läuft wie folgt ab:

- Vergewissern Sie sich, dass die Frequenz frei ist, auf der Sie abstimmen möchten!
- Stellen Sie ein Trägersignal (CW bzw. »TUNE«-Schalter) bereit.
- Stellen Sie beide Drehkondensatoren auf maximale Kapazität.
  - C1: Resonanz einstellen, erkennbar am minimalen Ausschlag des Messgeräts (»Dip«).
  - C2: Langsam drehen, bis wiederum der Anodenstrom steigt. Sie koppeln damit bereits etwas Leistung an die Antenne aus.
- Wechselweise fahren Sie mit diesem Vorgang fort, bis die maximale Ausgangsleistung erreicht ist.

16.6.8 Leistungsmessung

Wenn Sie Abgleicharbeiten an einem Sendegerät vornehmen, verbinden Sie dieses mit einem Lastwiderstand (*Dummy Load*, künstliche Antenne). Hierbei wird zum einen sichergestellt, dass keine anderen Funkteilnehmer gestört werden; zum anderen stellt dies die ideale Antenne dar. Je nach Leistungsbereich können diese nicht viel größer sein als ein Antennenstecker (siehe Abbildung 16.90) oder eher an einen Heizkörper erinnern.



Abbildung 16.90 Dummy Load, »künstliche Antenne«

Sie können mit geeigneten Widerständen (siehe Abschnitt 5.2) selbst so ein Hilfsmittel anfertigen. Das Leistungsmessgerät fügen Sie zwischen der Antennenbuchse des Senders und dem Lastwiderstand ein (siehe Abbildung 16.91).

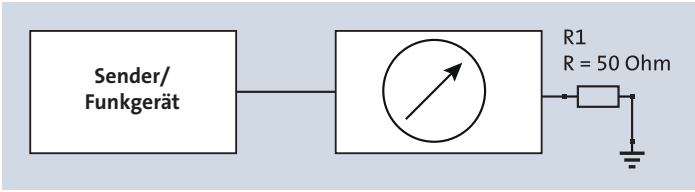


Abbildung 16.91 Anordnung zur Leistungsmessung

16.6.9 Leistungsangaben

Die Leistung geben Sie in Watt an. Aber bei Sendeleistungen gibt es unterschiedliche Angaben. Bei einem FM- oder CW-Sender haben Sie kein Problem: Taste drücken, der Träger gibt ein stabiles Signal – Leistung ablesen – fertig. Hier geben Sie die *Trägerleistung* an.

Beim SSB-Sender fehlt Ihnen der Träger für die Leistungsmessung. Sie benötigen einen Ein- oder besser einen Zweitongenerator, den Sie an die Mikrofonbuchse anschließen (siehe Abbildung 16.92).

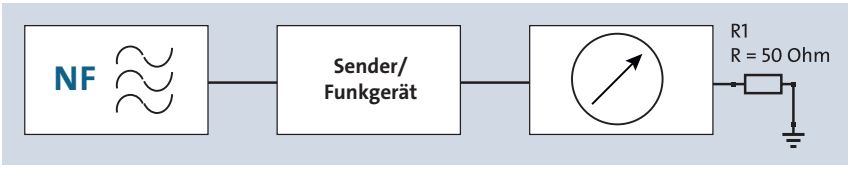


Abbildung 16.92 Aufbau der Zweitonmessung

Bei der Zweitonmessung erhalten Sie verschiedene Ergebnisse: die Spitzenleistung (PEP, *Peak Envelope Power*) und die mittlere Leistung.

Leistungsmessung

Die *Sendeleistung* wird direkt an der Ausgangsbuchse des Senders an einem Lastwiderstand gemessen.

Die HF-Spitzenleistung (PEP, *Peak Envelope Power*, Hüllkurvenspitze) stellt einen Effektivwert der Leistung der größten Periode einer HF-Schwingung dar. Dabei wird die maximale Spitze der Modulationshüllkurve gemessen.

Die mittlere Leistung eines SSB-Senders stellt einen Durchschnittswert dar. Sie wird innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters ermittelt, dessen Dauer im Verhältnis zum tiefsten Ton ausreichend lang sein muss.

Abbildung 16.93 verdeutlicht nochmals die Unterschiede zwischen der PEP und der mittleren Leistung.

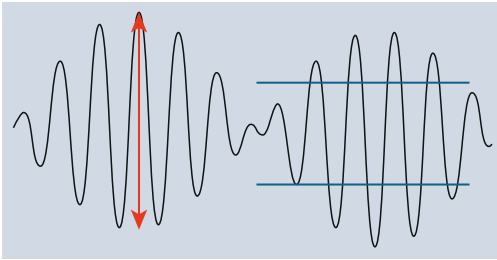


Abbildung 16.93 Spitzenleistung und mittlere Leistung eines SSB-Senders

16.7 Unerwünschte Aussendungen vermindern

Harmonische (Oberwellen) und andere Nebenaussendungen dürfen bestimmte Werte nicht überschreiten. Geregelt ist dies im § 2 Nr. 11 AFuV:

> *»unerwünschte Aussendung« jede Aussendung außerhalb der erforderlichen Bandbreite; dies ist die Bandbreite, welche für eine gegebene Sendeart gerade ausreicht, um die Übertragung der Nachricht mit der Geschwindigkeit und Güte sicherzustellen, die unter den gegebenen Bedingungen erforderlich ist.*

Damit ist festgelegt, dass *alle* Sendungen, die nicht die eigentliche Übertragung darstellen, bestimmte Leistungswerte nicht überschreiten dürfen.

Im Einzelnen gelten die in Tabelle 16.18 gezeigten Werte.

Frequenzbereich	Dämpfung gegenüber maximaler PEP des Senders	Alternativ zulässige maximale Leistung unerwünschter Aussendungen
0,15 MHz – 1,7 MHz	60 dB	0,25 µW (–36 dBm)
1,7 MHz – 35 MHz	40 dB	
50 MHz – 1.000 MHz	60 dB	
1 GHz – 40 GHz	50 dB	1 µW (–30 dBm)

Tabelle 16.18 Richtwerte für unerwünschte Aussendungen

Wenn Sie selbst Sender bauen oder nicht für den Amateurfunkdienst konstruierte Funkgeräte umbauen wollen, müssen Sie diese Messungen vornehmen und gegebenenfalls korrigierend in die Schaltung eingreifen. Aber es gilt genauso für die manchmal so beliebten »Chinakracher«. Das sind meist Handfunkgeräte im alleruntersten Preissegment, die durch den Internethandel nach Europa gelangen. Gegen viele Modelle wurden von diversen Fermeldebehörden Europas (Bundesnetzagentur, Bakom ...) bereits Import-, Vertriebs- und Betriebsverbote erlassen. Der Grund hierfür ist stets die oft eklatante Abweichung von diesen Normen. Funkhändler lassen daher oft »europataugliche« Versionen dieser Geräte fertigen. Oft enthalten diese dann wenige zusätzliche Bauelemente, die sehr wenig kosten, und so halten sie die Normen ein. Ein CE-Kennzeichen tragen sie dann ohnehin.

Die Angaben in Tabelle 16.18 sind so zu verstehen, dass die unerwünschten Aussendungen zunächst 0,25 µW (bis 1 GHz) bzw. 1 µW (ab 1 GHz) maximal erreichen. Wird dieser Wert überschritten, gilt, dass die Nebenaussendungen um den angegebenen dB-Wert gedämpft werden müssen. Bezugsgröße hierbei ist die maximale PEP-Leistung des Senders.

Die Messung der unerwünschten Aussendung erfolgt am Senderausgang zusammen mit dem verwendeten Stehwellenmessgerät und gegebenenfalls vorhandenem Tiefpassfilter. Hierzu müssen Sie wissen, dass in Stehwellenmessbrücken selbst unerwünschte Signale entstehen können.

Weiter gilt, dass Sie die von Ihnen verwendete Sendeleistung auf das für die Kommunikation notwendige Minimum einstellen müssen. Dies verringert die Wahrscheinlichkeit von Störungen und dient auch einem guten Miteinander auf den Funkbändern.

Übersteuern Sie Ihre Sendegeräte nicht, weder mit einem zu lauten NF-Signal noch mit einem zu hohen Eingangssignal an einem zusätzlichen Leistungsverstärker. Andernfalls entsteht ein hoher Nebenwellenanteil.

Die Abstrahlung unerwünschter Nebenaussendungen wird durch die Verwendung eines Ausgangsfilters verhindert. Es befindet sich nach der Senderendstufe. Falls notwendig, kann ein derartiges Filter auch nachträglich zwischen Sender/Funkgerät und Antenne eingefügt werden.

Sie können unterschiedlich dabei vorgehen. Wenn im Gerät Platz keine Rolle spielt, können Sie bei transistorisierten Mehrbandgeräten für jedes Band ein eigenes Bandpassfilter vorsehen. Der Mehraufwand besteht in der Umschaltung, dafür ist für jedes Band ein optimierter Frequenzgang vorhanden. Subharmonische und Harmonische haben hier wenig Chancen. Moderne Funkgeräte sind meist so konstruiert. Bei Röhrensendern steht Ihnen ja das Pi-Filter zur Verfügung, mit dem Sie ein resonantes Filter haben, das auf die Sendefrequenz eingestellt wird. Hier werden Sie nur in Ausnahmefällen auf weitere Filter zugreifen müssen.

Die Filtercharakteristik ist hierbei wie bei Einbandgeräten (siehe Abbildung 16.94). Man kann derartige Filter auch so konstruieren, dass das Maximum der Durchlasskurve nicht so deutlich ausgeprägt ist und die Bereiche nahe der Bandgrenzen nicht so stark bedämpft werden (siehe auch Abschnitt 10.8.7 ff.).

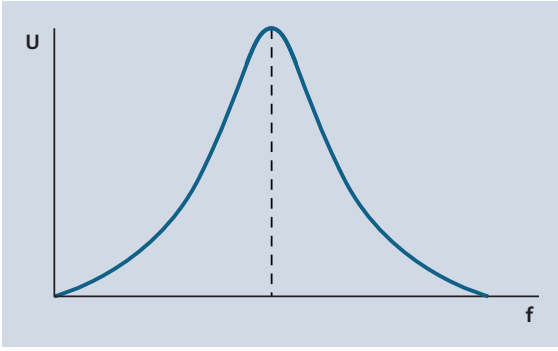


Abbildung 16.94 Filtercharakteristik eines Bandpassfilters (Einbandlösung)

Für Kurzwellensender bietet sich die Verwendung eines Tiefpassfilters an. Dabei sollte sichergestellt sein, dass keine der unerwünschten Aussendungen in den Kurzwellenbereich fällt. Die Charakteristik des Tiefpassfilters zeigt Abbildung 16.95, die Schaltung sehen Sie in Abbildung 16.96.

Wenn Ihr Sender hartnäckig eine Harmonische mit hohem Pegel an die Antenne bringt, blockieren Sie diese entweder mit einem Saugkreis oder einem Sperrkreis.

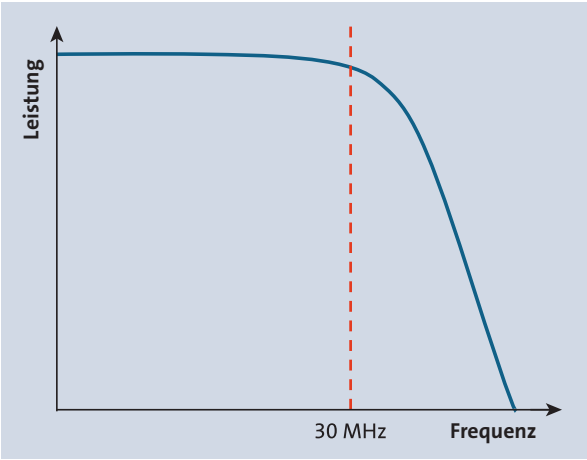


Abbildung 16.95 Filtercharakteristik eines Tiefpassfilters

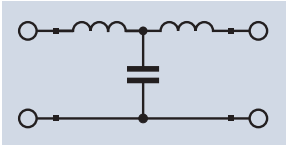


Abbildung 16.96 Schaltung eines Tiefpassfilters

Auch im eigenen Sender kann es zu Einstreuungen kommen. Schirmen Sie deshalb alle Stufen nicht nur gegeneinander, sondern auch gegen vagabundierende Hochfrequenzen ab. Ein Problem stellt dabei die Stromversorgung dar. Wenn Sie an verschiedenen Baugruppen Kabel für die Versorgung einsetzen, können Sie auf jeden Fall Ferritperlen aufschieben – vor allem kurz vor dem Eintritt. Darüber hinaus eignen sich auch Filterschaltungen und Durchführungskondensatoren für diesen Zweck. Das Stromversorgungskabel selbst, das zum Netzteil führt, sollte gegen HF-Einstrahlung gut entkoppelt sein. Dafür gibt es sogar Netzfilter mit Kaltgerätebuchse. Diese sollen zwar das Stromnetz vor Störsignalen schützen, es funktioniert aber auch in die andere Richtung.

Kapitel 17
Digitale Sende- und Empfangstechnik

Dieses Kapitel erläutert die Digitalisierung von Signalen, die Grundlagen der digitalen Signalverarbeitung und die wichtigsten Konzepte, um Daten per Funk zu übertragen.
Die wichtigsten Begriffe sind am Ende des Kapitels in einem Glossar zusammengestellt.

17.1 Die digitale Darstellung von Signalen

Digitale Signale unterscheiden sich von analogen dadurch, dass sie weder im Zeit- noch im Wertebereich (z. B. der Spannung) kontinuierlich sind, sondern dass nur Werte zu bestimmten Zeiten in bestimmten Abständen voneinander gemessen wurden. Man spricht von *zeit- und wertediskreten Signalen*. Aus dem Alltag kennen wir dies von einer Treppe in Vergleich zu einer Rampe für Fahrzeuge: Auf der Treppe gibt es nur die Möglichkeit, auf den Stufen zu stehen. Die Höhenangabe für eine Person auf einer Treppe hat also nur *diskrete* Werte, während auf der Rampe jede Höhe möglich ist und die möglichen Werte deshalb *kontinuierlich* oder *stetig* sind.

Entscheidend für eine korrekte Digitalisierung ist, dass genügend viele Werte in einem Zeitintervall bestimmt werden und dass diese in genügend feinen Stufen vorliegen. Nur dann ist in den diskreten Werten die Information enthalten, die das kontinuierliche Signal hat.

17.1.1 Digitalisierung analoger Signale

Der erste Schritt zur Digitalisierung eines analogen Signals ist die sogenannte *Abtastung* (engl. *Sampling*). Das obere Bild in Abbildung 17.1 zeigt dies anhand einer sinusförmigen Spannung mit einer Frequenz von 5 kHz. Das zeit- und wertkontinuierliche analoge Signal wird durch die blaue Kurve dargestellt. Die Abtastung erfolgt in diesem Beispiel mit einer *Abtastrate* (Anzahl der Abtastwerte bzw. Samples/Zeit) von 32 kS/s, das heißt, pro Sekunde wird die Spannung 32.000-mal gemessen. Die dabei gewonnenen Messwerte sind durch die roten Punkte in der Abbildung dargestellt. Da die Spannungswerte weiterhin kontinuierlich sind, aber nur zu diskreten Zeitpunkten vorliegen, spricht man von einem zeitdiskreten und wertekontinuierlichen Signal. Das untere Bild zeigt nur die Abtastwerte. Es ist zu erkennen, dass der ursprüngliche Verlauf der Spannung dadurch gut wiedergegeben wird.

Wird jedoch ein Signal höherer Frequenz, z. B. mit 14,25 kHz abgetastet, ergibt sich der linke Teil von Abbildung 17.2. Die ursprüngliche analoge Spannung ist nun nicht mehr so gut zu in den Samples zu erkennen, da sich eine starke Variation der Amplitude ergibt, die so im ursprünglichen Spannungsverlauf nicht vorhanden war.

Erhöht man die Frequenz auf 26 kHz (rechts in Abbildung 17.2), geben die abgetasteten Werte nicht mehr den Verlauf der ursprünglichen Spannung wieder, sondern entsprechen vielmehr wieder dem Verlauf in Abbildung 17.1 mit der Frequenz von 5 kHz. Für diesen sogenannten *Alias-Effekt* verwendet man auch im Deutschen häufig die englische Bezeichnung *Aliasing*.

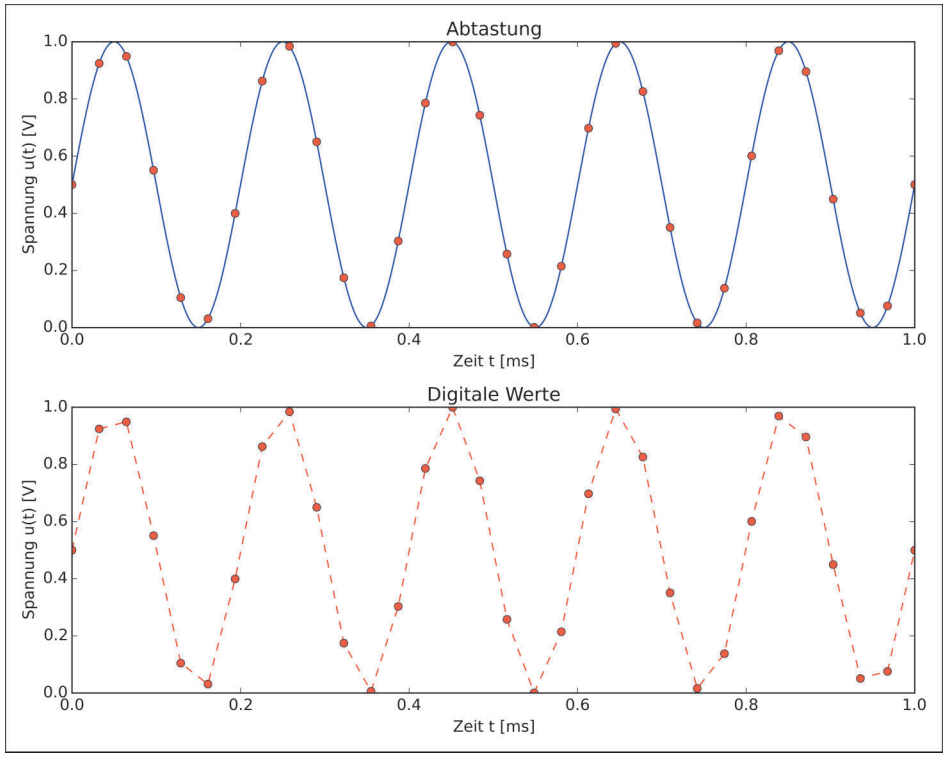


Abbildung 17.1 Abtastung eines 5-kHz-Signals mit einer Abtastrate von 32 kHz: sehr gute Wiedergabe des analogen Spannungsverlaufs durch die Abtastwerte

An diesen Beispielen wird deutlich, dass die maximale Signalfrequenz auf einen Wert unterhalb der Frequenz, die der halben Abtastrate entspricht, beschränkt bleiben muss, damit die digitalen Signale den analogen Verlauf korrekt wiedergeben. Dies ist die Aussage des *Abtasttheorems*. Vor einer Analog-Digital-Wandlung eines analogen Signals muss deshalb eine Filterung mit einem Tiefpassfilter erfolgen (*Anti-Aliasing-Filter*), das maximal die der halben Abtastrate entsprechende Frequenz passieren lässt. In der Praxis wird diese mögliche Bandbreite nur zu ca. 80 %

genutzt, um Effekte wie in Abbildung 17.2 zu vermeiden. Bei der Audio-CD reicht der Frequenzbereich bis 20 kHz, die Abtastung erfolgt jedoch mit 44,1 kHz.

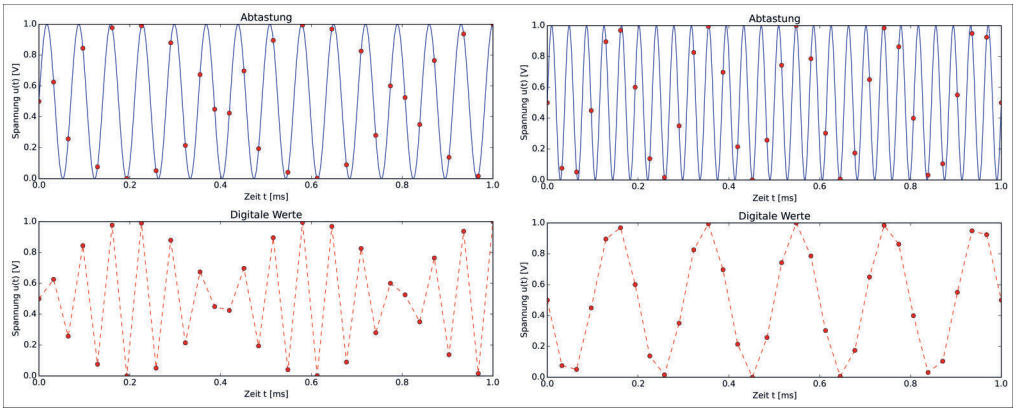


Abbildung 17.2 Abtastung eines 14,25-kHz-Signals (links) und eines 26-kHz-Signals (rechts) mit einer Abtastrate von 32 kHz: Der analoge Spannungsverlauf wird durch die Abtastwerte nicht besonders gut oder sogar falsch wiedergegeben: Es ergibt sich eine Veränderung der Amplitudenwerte und der Frequenz (Alias-Fehler).

Als weiterer Schritt bei der Digitalisierung muss nun die *Quantisierung* der Abtastwerte erfolgen. Darunter versteht man, dass keine kontinuierlichen Werte für die Spannung verwendet werden, sondern nur bestimmte diskrete Stufen, die dadurch entstehen, dass die Abtastwerte durch Binärzahlen codiert werden sollen (siehe Abschnitt 2.8.1). Wenn wie beispielsweise bei der CD 16-stellige Binärzahlen (16 Bit pro Abtastwert) verwendet werden, sind $2^{16} = 65.536$ verschiedene Spannungswerte möglich. Zur Verdeutlichung zeigt Abbildung 17.3 die Situation, wenn nur zwei Bit pro Abtastwert verwendet werden sollen und deshalb nur vier verschiedene quantisierte Spannungswerte möglich sind (gestrichelte grüne Linien).

Sie erkennen, dass die quantisierten Spannungen mehr oder weniger zufällig nach oben und unten von den abgetasteten Werten des analogen Signals abweichen. Diese Abweichung, in Abbildung 17.3 unten gezeigt, bezeichnet man als *Quantisierungsfehler* oder, da er sich bei der Digitalisierung von Tonsignalen so auswirkt, als *Quantisierungsrauschen*.

Je mehr Quantisierungsstufen verwendet werden, desto geringer ist das Quantisierungsrauschen und desto größer ist der *Dynamikbereich*, d. h., das Verhältnis zwischen der Spannung eines Signals, das den Wertebereich komplett ausnutzt, und der Spannung eines Signals, das gerade noch eine Veränderung des Bits mit dem kleinsten Stellenwert bewirkt – üblicherweise ausgedrückt in Dezibel. Da sich durch jedes zusätzliche Bit die Zahl der Quantisierungsstufen verdoppelt, erhöht sich der Dynamikbereich bzw. Rauschabstand durch ein zusätzliches Bit pro Abtastwert nähe-

rungsweise um 6 dB. Bei 8 Bit pro Abtastwert beträgt er knapp 50 dB, bei der Audio-CD mit 16 Bit pro Abtastwert ca. 98 dB.

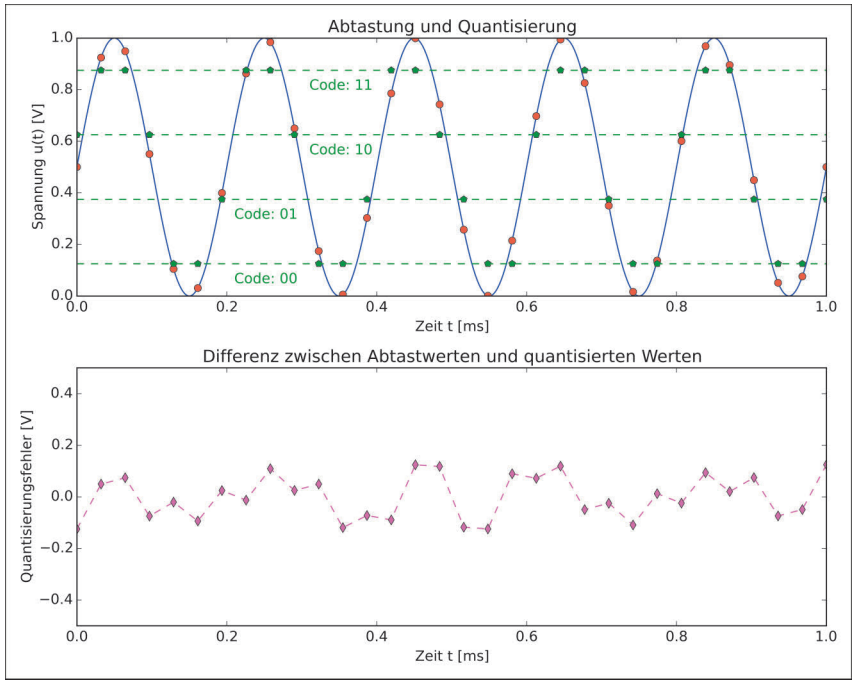


Abbildung 17.3 Oben: Abtastwerte (rot) und quantisierte Abtastwerte (grün) des 5-kHz-Signals wie in Abbildung 17.1. Die Abtastung erfolgt mit 32 kHz. Nur die diskreten Spannungswerte der grün gestrichelten Linien sind für die quantisierten Werte möglich. Die vier Werte können mit zwei Bit codiert werden. Die dadurch entstehenden Quantisierungsfehler sind im unteren Diagramm aufgetragen.

Nach der Quantisierung werden die digitalen Werte geeignet *codiert*. Dem kleinsten Wert in Abbildung 17.3 oben, der einer Spannung von 0,125 V entspricht, könnte beispielsweise die Bitfolge 00 zugeordnet werden, dem nächsthöheren 01, dann 10 und schließlich 11.

Der Vollständigkeit halber sei noch darauf hingewiesen, dass die Reihenfolge von Abtastung und Quantisierung auch vertauscht werden kann. Im Resultat erzeugt die Digitalisierung aus dem ursprünglichen zeit- und wertkontinuierlichen analogen Signal ein zeit- und wertdiskretes digitales Signal.

17.1.2 Analog-Digital-Wandlung

Das schematische Blockschaltbild für die Digitalisierung eines analogen Signals mit einer Abtastrate f_A und einer Auflösung von K Bits pro Abtastwert ist in Abbildung 17.4 gezeigt. Die analoge Quelle wird durch das Tiefpassfilter auf Frequenz-

anteile unterhalb der Frequenz beschränkt, die der halben Abtastrate entspricht. In der folgenden *Sample and hold*-Schaltung wird der Kondensator im Takt der Abtastfrequenz jeweils auf die aktuelle Spannung aufgeladen. Diese hält er so lange, bis der Quantisierer den zugehörigen Binärwert erzeugt hat, der dann mit dem nächsten Takt ausgegeben werden kann. Das entsprechende Bitmuster wird über *K* Leitungen parallel ausgegeben und kann anschließend durch Logikschaltungen in das gewünschte Datenformat zur Speicherung oder Übertragung umgeformt werden.

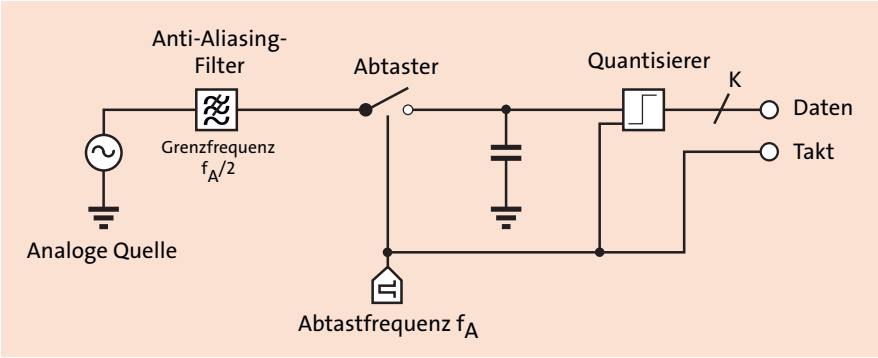


Abbildung 17.4 Schematische Darstellung der für die Analog-Digital-Wandlung erforderlichen Komponenten (siehe Text)

Für hohe Abtastraten und Auflösungen, wie sie z. B. bei *Software Defined Radios* (SDRs) erforderlich sind, werden sogenannte *Flash-Konverter* verwendet, bei denen die am Kondensator anliegende Spannung mit den Spannungen der Quantisierungsstufen durch sogenannte Komparatoren verglichen wird. Eine folgende Logikschaltung erzeugt das Bitmuster der Binärzahl. Durch Hintereinanderschalten solcher Stufen (*Pipelining*) können Abtastfrequenzen im GHz-Bereich bei bis zu 12 Bit Auflösung erreicht werden.

Damit die Anforderungen an die Filtersteilheit des analogen Anti-Aliasing-Filters nicht zu hoch werden, wird häufig eine *Überabtastung* verwendet, d. h., die Abtastfrequenz liegt erheblich höher als nach dem Abtasttheorem erforderlich wäre. Dies verhindert, dass es zum Alias-Fehler durch Signalanteile kommt, die vom Filter nicht vollständig unterdrückt werden können. Weitere Ursachen für Fehler bei der Digitalisierung sind eine ungenügend stabile Erzeugung der Abtastrate, sodass die Abtastzeitpunkte nicht genau im vorgegebenen Raster liegen (sogenannter *Jitter*), und Abweichungen von den vorgegebenen Stufen beim Quantisierer, sodass manche Abstände zwischen zwei diskreten Werten etwas kleiner oder größer sind, als sie sein müssten. Durch solche Schwächen des A/D-Wandlers ergibt sich zusätzliches Quantisierungsrauschen.

17.1.3 Digital-Analog-Wandlung

Liegen die codierten digitalen Werte eines Signals vor, können diese wieder zu einem analogen Signal *rekonstruiert* werden. Dazu müssen im Digital-Analog-Wandler nur für die Zeiten zwischen je zwei Abtastwerten die den quantisierten Werten entsprechenden Spannungen erzeugt und ausgegeben werden. Dies ist in Abbildung 17.5 oben gezeigt: Zwischen den digitalen Werten (grün) wird der Spannungsverlauf jeweils mit einer konstanten Spannung zu einem zeitkontinuierlichen Signal ergänzt (blau). Aufgrund der diskreten Werte kommt es jedoch zur Sprüngen im Signal. Deshalb muss dieses noch durch ein Tiefpassfilter geführt werden, um den ursprünglichen analogen Spannungsverlauf möglichst gut zu rekonstruieren (siehe Abbildung 17.5 unten). Wegen der geringen Anzahl an Quantisierungsstufen im Beispiel unterscheidet sich das rekonstruierte Signal wegen des Quantisierungsrauschens deutlich vom ursprünglichen Signal, das in Abbildung 17.1 oben gezeigt ist.

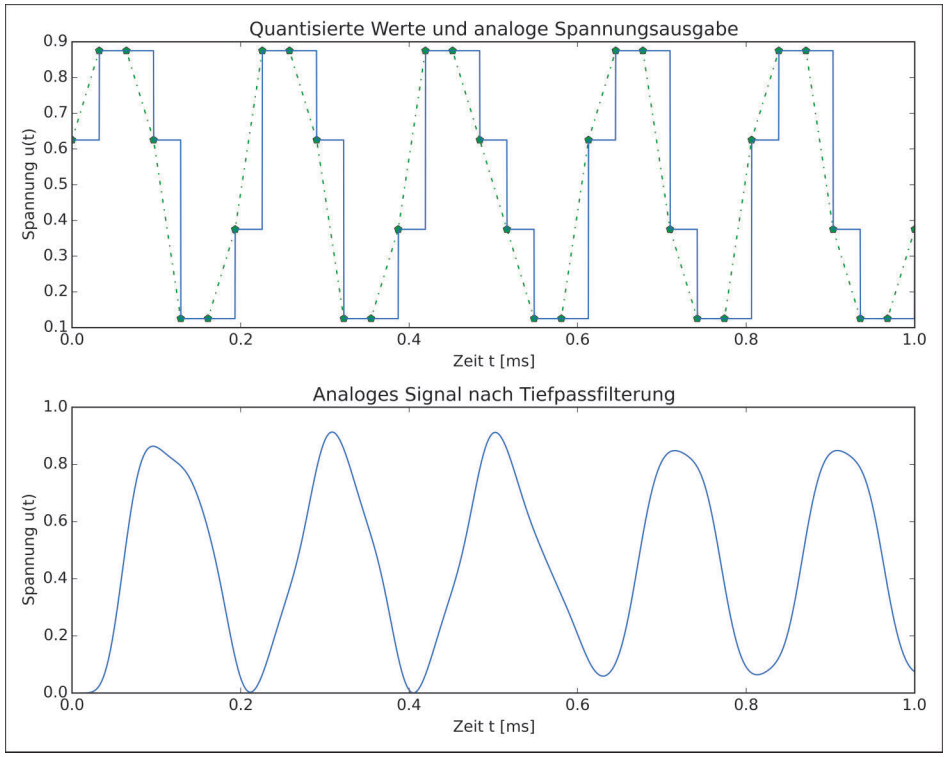


Abbildung 17.5 Digital-Analog-Wandlung: Zur Rekonstruktion muss das stufenweise erzeugte Ausgangssignal mit einem Tiefpassfilter geglättet werden. Die Abweichungen sind der Quantisierung mit nur 4 Werten geschuldet.

17.1.4 Über- und Unterabtastung

Die *Überabtastung* wurde bereits im Zusammenhang mit der Analog-Digital-Wandlung in Abschnitt 17.1.2 erwähnt. Die Verwendung einer im Vergleich zur Forderung des Abtasttheorems erheblich höheren Abtastfrequenz ermöglicht die Verwendung einfacherer analoger Filter und kann die bei der Digitalisierung entstehenden Fehler reduzieren, da über mehrere Abtastwerte gemittelt werden kann. Dadurch kann eine bessere Auflösung beziehungsweise ein geringeres Quantisierungsrauschen erreicht werden. Auch bei der *Digital-Analog-Wandlung* (Rekonstruktion) können durch Überabtastung Zwischenwerte berechnet werden, die die Signalsprünge reduzieren und dadurch eine einfachere Filterung ermöglichen.

Bei der *Unterabtastung* wird nur die Abtastrate verwendet, die der Bandbreite des Signalbereichs entspricht, der verarbeitet werden soll. Möchte man beispielsweise einen digitalen Kurzwellenempfänger realisieren, wird man zunächst den kompletten Frequenzbereich bis 30 MHz digitalisieren und dazu z. B. mit 70 MS/s und 12 Bit pro Abtastwert abtasten. Dabei entsteht allerdings eine Datenrate von 840 Mbit/s. Möchte man anschließend z. B. ein SSB-Signal im 40-m-Amateurfunkband bei 7140 kHz mit 2,7 kHz Bandbreite demodulieren, müsste man diese hohe Datenrate weiterverarbeiten, was eine erhebliche Rechenleistung und einen entsprechend hohen Stromverbrauch bedeutet.

Sie können aber auch wie folgt vorgehen: Der Bereich von 7140 bis 7142,7 kHz wird mit einem digitalen Bandpassfilter aus dem vollen Datenstrom herausgefiltert (siehe Abschnitt 17.2.2) und der gefilterte Datenstrom dann mit 5,4 kS/s abgetastet, diesmal aber ohne das Anti-Aliasing-Filter. Sie erhalten dann das SSB-Signal im 40-m-Band als digitales Alias-Signal im Bereich von 0 bis 2,7 kHz mit einer Abtastrate von 5,4 kS/s, was einer Datenrate von 81 kbit/s entspricht, zur Weiterverarbeitung. Die Abtastung erfolgt einfach dadurch, dass Sie aus dem ursprünglichen Datenstrom nur jedes 155.555ste Bit (5400/840.000.000 = 1/155.555) durchlassen (*Dezimierung*). Wollen Sie in einem *Software Defined Radio*-(SDR-)Empfänger ein SSB-Signal zur Demodulation auswählen, genügt es demnach, den Durchlassbereich des digitalen Filters entsprechend zu verschieben (siehe Abbildung 17.7).

17.2 Digitale Signalverarbeitung

17.2.1 Signale im Zeit- und Frequenzbereich, Spektrum und Wasserfalldiagramm

Bisher haben wir den Verlauf der Spannung eines Signals im *Zeitbereich* betrachtet, d. h. die Funktion $u(t)$, genau in der Art und Weise, wie ein *Oszilloskop* sie anzeigt (siehe Abschnitt 7.4). Wenn mehrere Signale bei verschiedenen Frequenzen vorhan-

den sind, führt dies allerdings zu einem Spannungsverlauf, dem man die darin enthaltenen Frequenzen und deren Spannungsamplituden nicht mehr ohne Weiteres ansieht. Vorteilhaft ist es dann, die in dem Gemisch enthaltenen Frequenzen auf einer Frequenzachse darzustellen, wobei der Wert bei einer bestimmten Frequenz umso größer ist, je stärker ein Signal der entsprechenden Frequenz im Gemisch enthalten ist.

Abbildung 17.6 zeigt schematisch das Zeitsignal der Summe von fünf sinusförmigen Spannungen und die zugehörige Darstellung im Frequenzbereich, das sogenannte *Spektrum*. Hier erkennen Sie sofort die Frequenzen und relativen Stärken der einzelnen Signalanteile. Eine solche Anzeige erhalten Sie mit einem *Spectrum Analyzer*, einem Digitaloszilloskop mit entsprechender Funktion oder mit einem *Software Defined Radio*-Empfänger mit entsprechender Software. Auf letztere Weise ist Abbildung 17.7 entstanden.

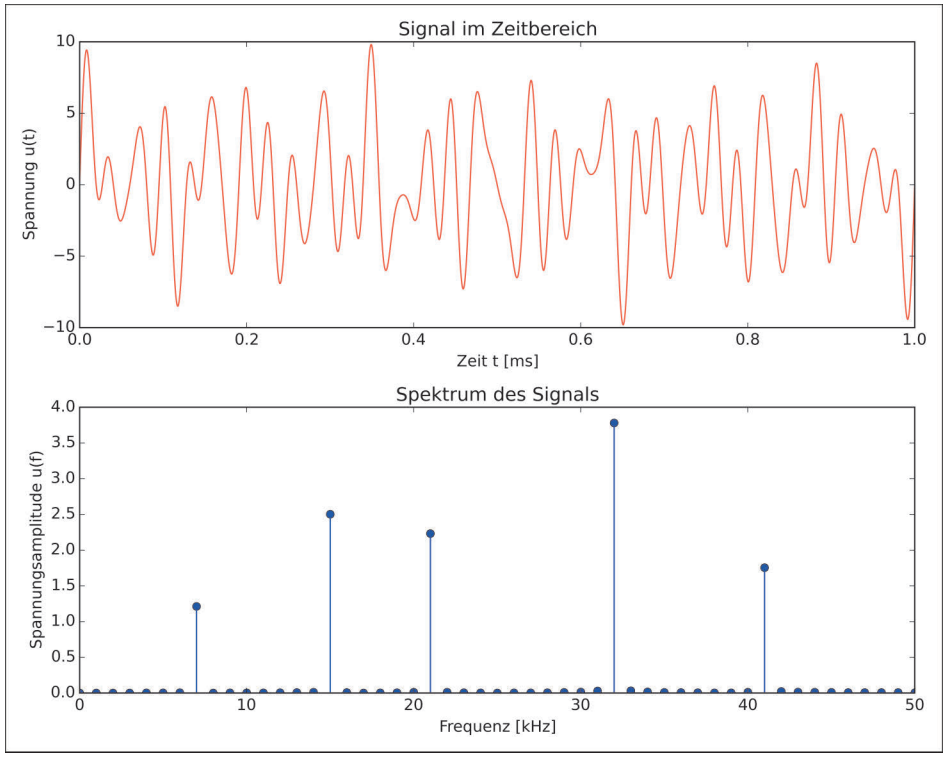


Abbildung 17.6 Signal im Zeitbereich (oben) und dessen Spektrum im Frequenzbereich (unten). Das Zeitsignal ist die Summe der Sinus-Signale mit den Frequenzen 7, 15, 21, 32 und 41 kHz und den angegebenen Spannungsamplituden.

Wenn nicht bekannt ist, welche Frequenzen in einem Signal enthalten sind, kann dies nach der Digitalisierung durch die sogenannte *Fourier-Transformation* berechnet werden. Für jeweils eine Anzahl von Abtastwerten im Zeitbereich wird eine ebenso

große Anzahl von Werten berechnet, die den darin enthaltenen Frequenzen entsprechen. Besonders vorteilhaft ist dies möglich, wenn für die Anzahl der Abtastwerte eine Potenz von 2 verwendet wird, z. B. 1024 = 2^{10} (siehe Abschnitt 2.1 zur Potenz als die vielfache Multiplikation einer Zahl mit sich selbst). Dann lässt sich die Berechnung des Spektrums durch eine sogenannte *Fast Fourier Transformation* (FFT) berechnen, die vergleichsweise wenig Rechenleistung erfordert.

Streng genommen kann man die Fourier-Transformation nur durchführen, wenn sich ein Signal im Zeitbereich jeweils nach einer bestimmten Periode wiederholt. Da dies z. B. beim Funkempfang nicht zu erwarten ist, kann man jeweils nur das momentane Spektrum berechnen. Da aber in der nächsten Gruppe der Abtastwerte nicht wieder derselbe zeitliche Verlauf der Signale vorliegt, muss am Anfang und Ende des jeweiligen Zeitintervalls das Signal sanft ein- beziehungsweise ausgeschaltet werden. Diesen Vorgang nennt man *Fensterung*, und es gibt eine Reihe von Fensterfunktionen, die bei der Fourier-Transformation verwendet werden können und die jeweils unterschiedliche Eigenschaften haben. Ein guter Kompromiss ist das sogenannte Blackman-Harris-Fenster, das eine gute Auflösung im Frequenzbereich ermöglicht.

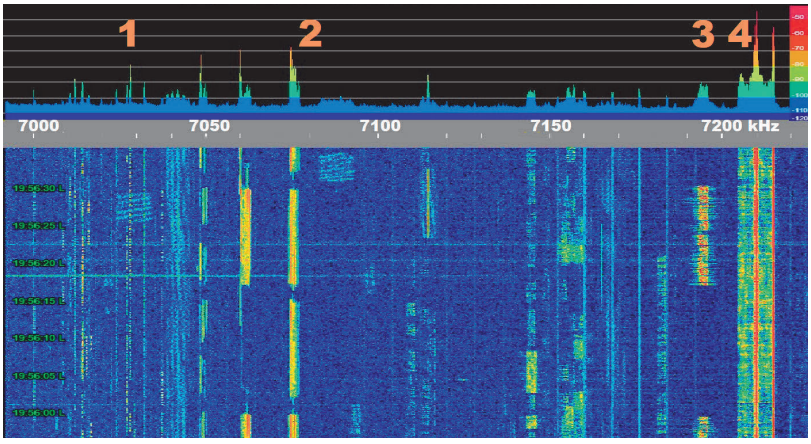


Abbildung 17.7 Spektrum (oben) und Wasserfalldiagramm (unten). Die Farbgebung im Wasserfalldiagramm entspricht der Stärke der Signale im Spektrum. Die Zeitstempel links erlauben es, die Länge der Aussendungen zu erkennen. Zum Beispiel dauern die einzelnen Sendungen in der digitalen Betriebsart FT8 bei 7074 kHz (Bereich 2) jeweils 15 s, bei FT4 bei 7050 kHz nur halb so lange. Im Bereich 1 sind schmale CW-Signale zu sehen, und von ca. 7150 bis 7200 kHz SSB-Signale mit etwa 2,7 kHz Bandbreite. Im Bereich 3 erkennt man, dass nur eine Station zu hören ist, dazwischen ist kein Signal zu sehen, vielleicht weil der Empfänger innerhalb der toten Zone der Gegenstation ist. Bei 4 ist das Spektrum eines AM-Rundfunksenders zu sehen. Sie erkennen den Träger und die beiden Seitenbänder mit je etwa 5 kHz Bandbreite.

Trägt man statt der Linien in Abbildung 17.6 die Stärke der Signale bei den verschiedenen Frequenzen in einer Zeile auf, indem man ihre relative Stärke farbig codiert, er-

hält man eine Zeile eines *Wasserfalldiagramms*. Wird das Spektrum erneut berechnet, wird eine weitere Zeile hinzugefügt, usw. So kann man erkennen, bei welchen Frequenzen Signale auftauchen und verschwinden, wie groß ihre Bandbreite ist usw.

Abbildung 17.7 zeigt ein Beispiel für das Spektrum und ein Wasserfalldiagramm im Bereich des 40-m-Amateurfunkbandes. Man erkennt verschieden breite Signale (CW, FT8, SSB) und deren zeitliche Verläufe anhand der eingeblendeten Zeitmarkierungen.

17.2.2 Elemente digitaler Signalverarbeitung

Liegt ein Signal oder liegen mehrere Signale in einem entsprechenden Spektralbereich in digitaler Form vor, können weitere Schritte wie Filterung, Frequenzumsetzung und Demodulation durch Berechnungen mit den Abtastwerten erfolgen. Analoge Signale müssen vorher digitalisiert werden und gegebenenfalls nach der digitalen Signalverarbeitung wieder in analoge Signale gewandelt werden.

Ein Beispiel soll die digitale Filterung erläutern. Grundsätzlich kann die Filterung dadurch erfolgen, dass man ein Signal mit einer gewissen Verzögerung T mit sich selbst überlagert (siehe Abbildung 17.8).

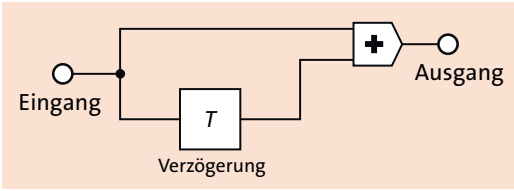


Abbildung 17.8 Die einfachste Realisierung eines FIR-Filters, bei dem das direkte Signal und das um T verzögerte Signal mit gleicher Amplitude addiert werden.

Entspricht T der Schwingungsdauer einer bestimmten Signalfrequenz oder einem Vielfachen davon, so überlagern sich die beiden Signale gleichphasig und werden von der Schaltung durchgelassen. Bei den Frequenzen, bei denen eine halbe Schwingungsdauer (oder ein ungeradzahliges Vielfaches davon) als Verzögerung vorliegt, werden die Signale gegenphasig addiert und löschen sich gegenseitig aus. Dieses Prinzip zeigt Abbildung 17.9 an einem Beispiel.

Da bei dieser Art von Filter die Signale nur addiert werden, wird das Ausgangssignal nach dem Abschalten des Eingangs nach Ablauf der Verzögerungszeit T komplett verschwunden sein. Man spricht deshalb von einem Filter mit einer endlichen Impulsantwort (*Finite Impulse Response*, FIR). Wenn hingegen ein Signalanteil auf den Eingang zurückgeführt wird, kann durch eine kurze Anregung im Prinzip ein unendlich langes Ausgangssignal erzeugt werden. Dies würde einer unendlichen Impulsantwort entsprechen (*Infinite Impulse Response*, IIR).

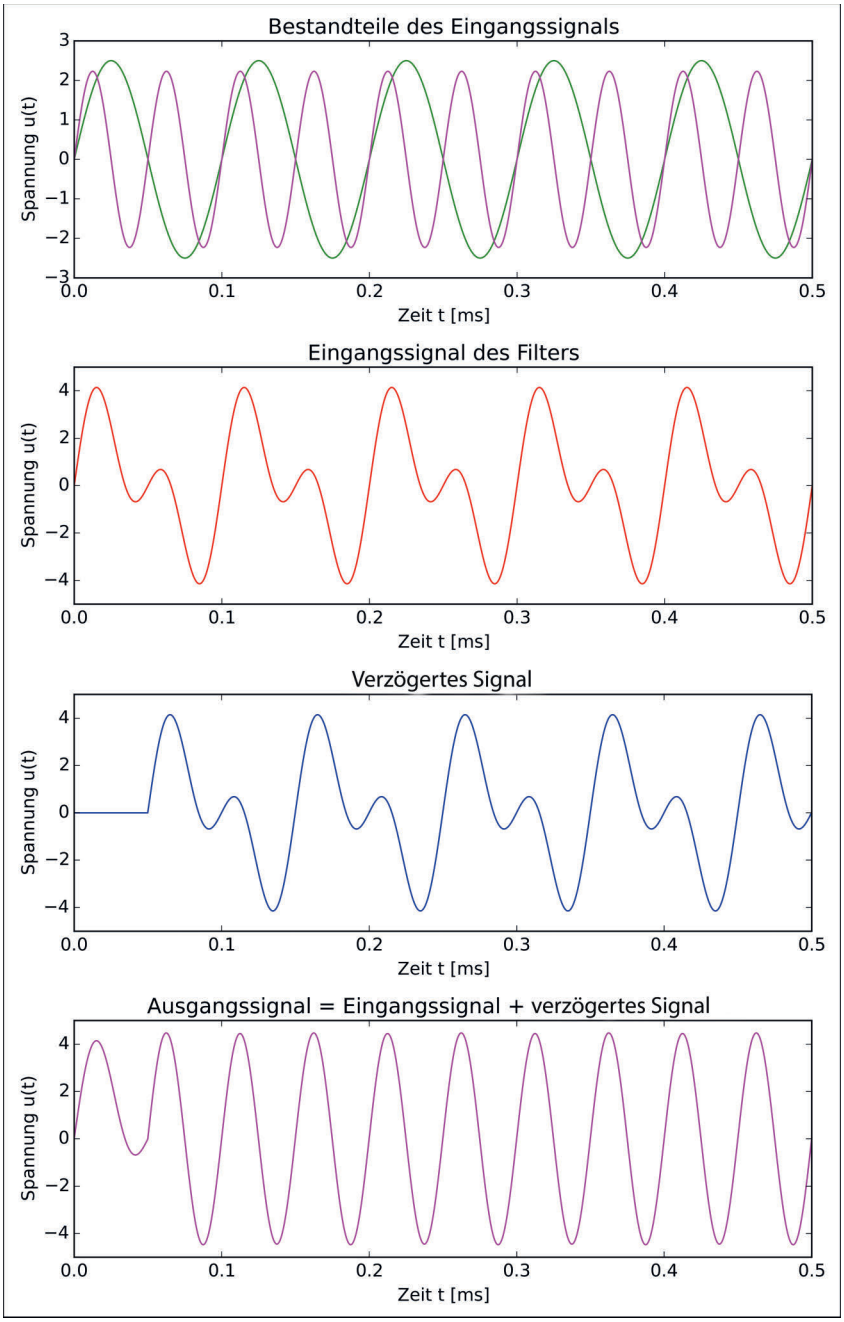


Abbildung 17.9 Einfaches Beispiel für die Wirkung eines FIR-Filters. Auf den Eingang werden zwei Signale mit Frequenzen von 10 kHz (grün) und 20 kHz (magenta) gegeben. Daraus resultiert das Eingangssignal (rot). Dieses wird um 1/20 kHz = 0,05 ms verzögert (blau) und zum Eingangssignal addiert. Das Resultat zeigt das unterste Bild: Am Ausgang des Filters ist nur das Signal mit 20 kHz (magenta) zu sehen.

Um die gewünschte Filtercharakteristik zu erreichen, werden in einem realen Filter nicht nur zwei Signalanteile, sondern viele mit unterschiedlichen Verzögerungen und Amplituden gemäß einem Satz von *Filterkoeffizienten* überlagert. Gemäß den angestrebten Eigenschaften werden diese durch entsprechende Software berechnet. Hierbei sind IIR-Filter, die die gewünschten Anforderungen an den Durchlass- und Sperrbereich und die Filtersteilheit erfüllen, häufig mit geringerem Aufwand an Rechenleistung und Speicherbedarf realisierbar als FIR-Filter.

Erheblich einfacher ist die Realisierung von FIR- beziehungsweise IIR-Filtern durch digitale Signalverarbeitung, weil hier die Abtastwerte leicht zwischengespeichert werden können und mit entsprechender Verzögerung wieder ausgelesen werden können. Hierzu dient beispielsweise eine FIFO-Schaltung (First In – First Out).

Viele der digitalen Verarbeitungsschritte lassen sich einfach programmieren. Noch besser sind aber Programmpakete geeignet, die sich mit digitalen Quellen und Senken wie SDRs oder mit der Soundkarte eines PC verbinden lassen und entsprechende Signalverarbeitungsblöcke bereitstellen. Ein verbreitetes Programm, das sehr flexibel ist und es sogar ermöglicht, dass Nutzer selbst eigene Signalverarbeitungsblöcke entwickeln, ist *GNU Radio*. Für viele Anwendungen sind komplette Signalflussgraphen (*Flowgraphs*) im Internet verfügbar, ebenso ausführliche Tutorien mit vielen Beispielen.

Wichtige Parameter, wie z. B. die Empfangsfrequenz eines SDR, die Mittenfrequenz eines Filters usw., können während des Programmlaufs durch Einstellregler verändert werden. Ebenso sind Anzeigen wie Oszilloskope und spektrale Darstellungen sowie Wasserfalldiagramme möglich, sodass Sie nach jedem Block das Ergebnis überprüfen können.

Ein einfaches Beispiel für einen Flowgraph zeigt Abbildung 17.10. Das Ziel ist es, aus einem Signalgemisch einen Bestandteil wegzufiltern. Die Blöcke links erzeugen Rauschen und drei harmonische Signale bei vorgegebenen Frequenzen. Diese werden addiert, und der *Throttle* erzeugt einen festen Takt, da hier keine Hardware eingebunden ist, die das durch die Abtastrate tun würde. Der Block in der Mitte oben stellt das Bandsperrfilter dar, mit dem Teile des Signals weggefiltert werden können. Sowohl das Signal vor dem Filter als auch nach dem Filter werden auf eine Wasserfallanzeige gegeben. Die Abtastrate ist als feste Variable definiert, zwei Eingaben während des Programmlaufs werden mit einem Schieberegler (*Slider*) ermöglicht: die Mittenfrequenz des Filters und seine Sperrbandbreite können eingestellt werden.

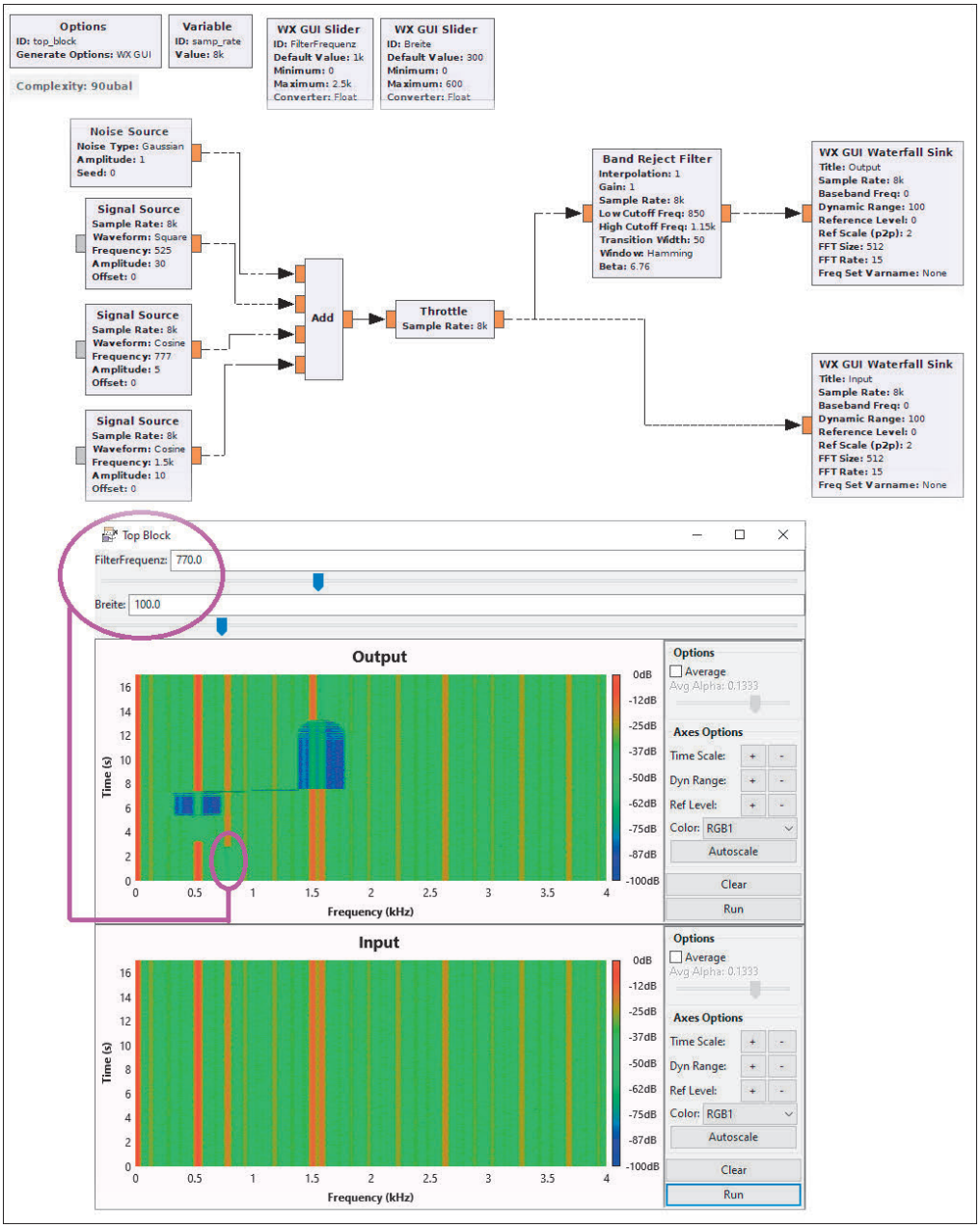


Abbildung 17.10 Beispiel für einen GNU Radio-Flowgraph. Beim Start des Programms erscheint das Fenster »Top Block«, das unten gezeigt ist (siehe Text). Sie erkennen, dass Sperrfrequenz und Bandbreite des Filters mehrfach verändert wurden. Die letzte Einstellung der Schieberegler und die dadurch bewirkte Filterung sind durch die violette Markierung hervorgehoben.

Beim Start des Programms erscheint das Fenster Top Block, das Sie unten in Abbildung 17.10 sehen. Es enthält oben die beiden Schieberegler für Frequenz und Bandbreite und unten die Wasserfallanzeigen am Ausgang und Eingang des Filters. Entsprechend der Abtastrate von 8 kS/s, ist der Frequenzbereich bis 4 kHz dargestellt.

Während des Programmlaufs wurden die Eigenschaften des Filters verändert: Zunächst wurden die beiden Signale bei 1,5 kHz und das Rauschen in einem Bereich von etwa 400 Hz um sie herum unterdrückt, dann wurde die Sperrfrequenz auf 0,5 kHz verringert. Schließlich wurde die Bandbreite auf 100 Hz verringert, und anschließend die Sperrfrequenz auf 770 Hz erhöht. Diese letzte Einstellung und deren Filterwirkung ist in der Abbildung noch zu sehen. Da es für GNU Radio Schnittstellen zu vielen SDR-Geräten und zur PC-Soundkarte gibt, eignet sich dieses Programm sehr gut für eigene Schritte in die digitale Signalverarbeitung.

17.3 Die Codierung digitaler Signale (Quellencodierung)

Bei der Digitalisierung von Signalen treten aufgrund der Anforderungen des Abtast-Theorems und der Anforderung, den Quantisierungsfehler klein zu halten, hohe Datenraten auf. Soll beispielsweise ein Sprachsignal digitalisiert werden, das Frequenzen bis etwa 2,7 kHz beinhaltet, so ist eine Abtastrate von etwa 6 kHz erforderlich. Bei 256 Quantisierungsstufen (8 Bit) würde dies eine Datenrate von 48 Kilobit pro Sekunde (kbit/s) erzeugen. Die Übertragung in einem Funkkanal von nur 12,5 kHz Bandbreite, wie sie einem analogen Schmalband-FM-Signal entspricht, oder in einem 2,7 kHz breiten Kanal für eine SSB-Übertragung wäre nur unter sehr günstigen Bedingungen möglich (siehe Abschnitt 17.4). Deshalb ist es erforderlich, bestimmte Eigenschaften eines Sprachsignals zu nutzen, um die erforderliche Datenrate stark zu reduzieren. Dies ohne allzu große Qualitätseinbußen zu bewerkstelligen, ist allgemein die Aufgabe der *Quellencodierung*.

Für Sprache wurden leistungsfähige Verfahren entwickelt, die als *Vocoder* bezeichnet werden. Für die weit verbreiteten Vocoder gibt es integrierte Schaltkreise, die in den entsprechenden Handys und Funkgeräten verbaut sind, z. B. für den AMBE+2™-Vocoder (*Advanced Multi-Band Excitation*) der Firma *Digital Voice Systems*. Gute Sprachqualität lässt sich damit schon mit Datenraten ab ca. 2 kbit/s erreichen, die sich sogar auf Kurzwelle übertragen lassen. Dieser Vocoder wird aber vor allem bei dem auch im Amateurfunk im VHF- und UHF-Bereich verwendeten DMR (*Digital Mobile Radio*) eingesetzt. Bei der Quellencodierung spricht man auch häufig von *Codecs*. Dieser Begriff setzt sich aus den Wörtern *Coder* und *Decoder* zusammen, da man beide benötigt: beim Sender den Coder, beim Empfänger den Decoder.

Generell lässt sich die Quellencodierung auf verschiedene Prinzipien zurückführen: Zunächst können Anteile im Signal, die für die Übertragung nicht unbedingt erfor-

derlich sind, weggelassen werden. Obwohl Sprache Frequenzen bis etwa 7 kHz enthält, ist sie bei einer Begrenzung auf den Bereich bis etwa 2,7 kHz gut verständlich. Kommen Signalanteile mehrfach vor, wie dies bei Sprache bei gleichlautenden Silben der Fall ist, können für diese Signale spezielle kurze Bitsequenzen übertragen werden. Diese Sequenzen sollten umso kürzer sein, je öfter die entsprechende Bitsequenz im Signal enthalten ist. Dieses Prinzip ist bereits bei der Morsetelegrafie realisiert worden, bei der den häufig auftretenden Buchstaben `e` und `t` mit einem Punkt beziehungsweise Strich die kürzesten Zeichen zugeordnet sind, wohingegen z. B. das lange Zeichen `.---` für den eher seltenen Buchstaben `j` verwendet wird. Ferner können für bestimmte Abfolgen von Signalanteilen, die sich wiederholen, spezielle Bitmuster verwendet werden, die in einer Tabelle erfasst sind. Die bei der Morsetelegrafie verwendeten Q-Gruppen sind hierfür ein Beispiel. Die Codierung von z. B. »Erhöhen Sie die Sendeleistung« mit den 3 Buchstaben QRO zeigt, welcher Gewinn an Datenmenge möglich ist.

Ein weiteres häufig verwendetes Verfahren ist die *Prädiktion*. Darunter versteht man eine Vorhersage des Signalverlaufs aus der Vergangenheit in die Zukunft hinein. Diese kann man sowohl beim Sender als auch beim Empfänger machen. Übertragen werden muss dann nur die Abweichung des tatsächlichen Signals von der Vorhersage. In einem Telegrafie-Contest beispielsweise lässt sich aus den gesendeten Zeichen RST leicht vorhersagen, dass als Nächstes die Zeichenfolge 599 übertragen wird, wobei vielleicht gelegentlich als zweite Ziffer (Signalstärke) ein geringerer Wert vorkommt. Man könnte also mit RST automatisch die 599 prädizieren und dann nur die Abweichung von S9 nach unten übertragen. Damit könnte man z. B. die Signalisierung von RST 579 auf RST 2 verkürzen.

Eine weitere Möglichkeit, die tatsächlich angewandt wird, besteht darin, die Morsezeichen für die Ziffern durch Prädiktion zu verkürzen. Zum Beispiel wird für die Ziffer 1 (`.----`) nur `.-` gesendet. Wenn klar ist, dass an dieser Stelle nur eine Ziffer gemeint sein kann, kann es nur die 1 sein. Ebenso kann rückwärts prädiziert werden, indem statt 9 (`----.`) nur `-.` gesendet wird. Die bidirektionale Prädiktion, also das Vorhersagen von Daten aus früher und später gesendeten Daten, wird hauptsächlich bei der Quellencodierung von Bewegtbildern eingesetzt. Dabei wird z. B. nur einmal pro Sekunde ein vollständiges Bild übertragen; die Bilder dazwischen werden aus den beiden vorher und nachher übertragenen vollständigen Bildern vorhergesagt, und die Abweichungen zu diesen Vorhersagen werden übertragen.

Abhängig von den zu übertragenden Daten werden verschiedene Quellencodierungsverfahren eingesetzt. Für Text gibt es neben den Morsezeichen z. B. das *Fernschreibalphabet*, das auch bei Funkfernschreiben verwendet wird. Bei ihm ist jedes Zeichen mit 5 Bit codiert. Da damit aber nicht alle Buchstaben, Ziffern und Sonderzeichen (z. B. Komma) eines Textes dargestellt werden können, wird jedes Bitmuster für 2 Zeichen verwendet, also für einen Buchstaben und eine Ziffer bzw. ein Sonderzei-

chen. Dazu wird vor dem entsprechenden Zeichen ein Umschaltzeichen gesendet, das von der Buchstaben- in die Ziffernebene bzw. in die andere Richtung umschaltet. Für längere Texte oder Ziffernfolgen ist dies sehr effizient, da das Umschaltzeichen selten verwendet werden muss. Der Nachteil ist, dass unter Umständen viele Zeichen falsch wiedergegeben werden, wenn bei der Übertragung des Umschaltzeichens ein Fehler aufgetreten ist. Für die vollständige Darstellung von Texten (z. B. in einem Computer) wird deshalb meist ASCII (*American Standard Code of Information Interchange*) verwendet. Hier werden jeweils 8 Bit für einen Buchstaben verwendet. Dadurch können Groß- und Kleinbuchstaben, Buchstaben mit Akzenten sowie Ziffern und Satzzeichen codiert werden. Beispielsweise steht `01000001` für `A`, `01100001` für `a` und `11100001` für `á`.

Speziell im Amateurfunk werden in der digitalen Betriebsart *FT8* Rufzeichen und Locatorfeld besonders effektiv komprimiert: Da normale Amateurfunkrufzeichen das Format »XYZBBB« haben (X = Ziffer oder Buchstabe oder Leerzeichen, Y = Ziffer oder Buchstabe, Z = Ziffer, B = Buchstabe) können diese z. B. durch Verweis auf die entsprechende Position in der Liste `_0123456789ABCDEFGHIJKLMNOPQRSTUVWXYZ` codiert werden.

Für X gibt es alle 37 Möglichkeiten, für Y nur 36, da nicht beide Zeichen vor der Ziffer Leerzeichen sein können. Für Z gibt es 10 und für B 27. Für jedes Zeichen kann demnach die Position in der entsprechenden (Teil-)Liste angegeben werden, z. B. für DA1AA die Positionen 14, 10, 1, 1, 1, 0.

Aus diesen Ziffern wird eine Zahl berechnet, die mit 28 Bit codiert werden kann und das Rufzeichen eindeutig darstellt. Im Vergleich zur Übertragung der sechs Zeichen als ASCII mit 48 Bit hat man also fast die Hälfte der Bits gespart.

Neben den Vocodern für Sprache und den Codes für Textelemente gibt es leistungsfähige Algorithmen für die Codierung von Bildern (z. B. JPEG) und von Video-Signalen mit Begleitton (z. B. MPEG1, 2, 4 und H.265, H.266). Letztere werden z. B. beim *digitalen Fernsehen DVB* verwendet, um hochaufgelöste Fernsehbilder (»HDTV«) mit Mehrkanalton in CD-vergleichbarer Qualität sowie Zusatzinformationen (wie Informationen zum Programm) übertragen zu können. Die Datenraten dabei betragen bis zu ca. 30 Mbit/s, je nach angestrebter Bild- und Tonqualität. Im Amateurfunk werden davon meist nur die Modes mit den geringsten Anforderungen genutzt, um mit Datenraten von unter 1 Mbit/s auszukommen, z. B. beim digitalen Amateurfunk-Fernsehen in den UHF- und SHF-Frequenzbereichen.

17.4 Funkübertragung digitaler Signale

Nach der Digitalisierung und Quellencodierung liegen Datenströme oder (falls diese abgespeichert wurden) Dateien vor, die diejenigen Daten enthalten, die die Signal-

quelle erzeugt hat, z. B. ein Vocoder-codiertes Sprachsignal. Allerdings können diese Daten nicht direkt über einen Funkkanal übertragen werden.

17.4.1 Funkkanäle, Kanalkapazität

Die wichtigsten Eigenschaften von *Funkkanälen*, die bei der Übertragung berücksichtigt werden müssen und die deshalb eine zusätzliche sogenannte *Kanalcodierung* der Daten erfordern, sind:

- **Rauschen**: Beim Empfang werden nicht nur das gesendete Signal, sondern auch Rauschen und gegebenenfalls Störsignale im Empfangskanal empfangen. Das Rauschen setzt sich zusammen aus atmosphärischem Rauschen, das durch Blitze entsteht und vor allem im Bereich unterhalb von etwa 20 MHz relevant ist, sowie durch »Man-made Noise«, also Störungen, die durch elektrotechnische Anwendungen generiert werden, z. B. durch nicht ausreichend entstörte Elektromotoren, Schweißgeräte, Stromabnehmer von elektrischen Bahnen usw. Auch mangelhaft abgeschirmte digitale Schaltungen (z. B. in Computern, Photovoltaikanlagen, LED-Leuchten) oder die digitale Übertragung auf nicht abgeschirmten Telefon- oder Stromleitungen können dazu beitragen, vor allem in dicht besiedelten Gegenden. Auch in den elektronischen Bauelementen des Empfängers selbst entsteht Rauschen, das den Empfang zusätzlich verschlechtert. Die Größe, mit der die Empfangssituation gekennzeichnet werden kann, ist der *Signal-Rausch-Abstand*. Dies ist das Verhältnis der Signalleistung S zur Rauschleistung N (von »Noise«) innerhalb der Empfängerbandbreite und wird meist als S/N oder *SNR* (Signal-to-Noise Ratio) in dB angegeben (siehe Abschnitt 16.5). Gemessen werden kann aber nur $^{(S+N)}/_{N} = 1 + {}^{S}/_{N}$, wenn wie bei der Morsetelegrafie oder FT8 der Sender zwischendurch abgeschaltet wird und man die Leistung mit und ohne Empfangssignal messen kann.
- **beschränkte Bandbreite**: Für die Übertragung steht nur eine begrenzte Bandbreite zur Verfügung, z. B. im Amateurfunk im Kurzwellenbereich 2700 Hz und im VHF-Bereich 20 kHz bzw. 12,5 kHz. Entsprechende Angaben sind in den einschlägigen Vorschriften zu finden bzw. in den Bandplänen der IARU geregelt.
- **Mehrwegeausbreitung**: Häufig erreicht das gesendete Signal den Empfänger nicht nur direkt, sondern auch auf weiteren Wegen. Im Kurzwellenbereich entsteht diese Mehrwegeausbreitung durch Reflexion des Signals an verschiedenen Ionosphärenschichten, etwa an der E- und der F-Schicht (siehe Abschnitt 23.3) oder dadurch, dass sich ein Signal mit einem Sprung mit einem Signal mit zwei Sprüngen überlagert. Bei höheren Frequenzen sind es häufig Reflexionen an Bergen oder Gebäuden, die zu mehreren Empfangspfaden führen (siehe Abschnitt 23.4). Da sich diese Ausbreitungseffekte mit der Zeit verändern, insbesondere dann, wenn sich beim Mobil- oder Portabelbetrieb eine oder beide beteiligten Funkstationen bewe-

gen, verändern sich auch die Übertragungseigenschaften des Funkkanals mit der Zeit (*Zeitselektivität*).

Bei der Mehrwegeausbreitung sind die einzelnen Wege vom Sender zum Empfänger meist unterschiedlich lang. Deshalb sind die Signale auch verschieden weit unterwegs und überlagern sich beim Empfänger mit einer Zeitverzögerung. Dies führt genau wie bei einem digitalen Filter dazu, dass nicht alle Frequenzen innerhalb eines Kanals gleich gut übertragen werden (*Frequenzselektivität*). Insbesondere wenn sich die Signale auf zwei Pfaden gegenphasig überlagern, wird das Empfangssignal stark geschwächt. Dies bezeichnet man als *Schwund* oder mit dem englischen Begriff als *Fading*.

Die Eigenschaften des Funkkanals wirken sich direkt auf die übertragbare Datenrate aus, da es durch die genannten Effekte zu Übertragungsfehlern kommt, und zwar umso mehr, je geringer das SNR ist. Dies ist die Aussage des *Shannon-Hartley-Theorems*: In einem Kanal, der lediglich von unvermeidbarem thermischen Rauschen (*Additive White Gaussian Noise*, *AWGN-Kanal*) beeinträchtigt wird und in dem für die Übertragung eine Bandbreite B zur Verfügung steht, steht abhängig vom SNR maximal eine *Kapazität* C (in Bit/s) von

$$\frac{C}{\text{bit/s}} = \frac{B}{\text{Hz}} \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

zur Verfügung. Diese Formel liefert aber nur eine theoretische Obergrenze, die in der Realität meist bei Weitem nicht erreicht wird. Sie ist aber eine gute Zielmarke für die Entwicklung von digitalen Übertragungsverfahren. Durch die leistungsfähige digitale Signalverarbeitung und die Verwendung fehlerkorrigierender Codes kommt man dieser theoretischen Grenze heute (zumindest in nur durch Rauschen begrenzten Situationen) vielfach sehr nahe.

Einfache Zahlen ergeben sich, wenn S/N = 1 = 0 dB ist, denn dann ist der Zahlenwert der Kanalkapazität gleich dem der Bandbreite, da $\log_2(2) = 1$ ist. In einem 2,7 kHz breiten Kanal, wie er dem Amateurfunk auf Kurzwelle maximal zur Verfügung steht, können dann auch maximal 2,7 kbit/s übertragen werden (siehe Abbildung 17.11). In einem 10 MHz breiten Kanal wären es 10 Mbit/s.

Der in der Formel verwendete Logarithmus zur Basis 2 (siehe Abschnitt 2.2) kann in den üblichen und auf Taschenrechnern verfügbaren Logarithmus zur Basis 10 (Taste log oder lg) umgerechnet werden:

$$\log_2 x = \frac{\log_{10} x}{\log_{10} 2} \approx 3{,}32 \cdot \log_{10} x$$

Damit ergibt sich:

$$\frac{C}{\text{bit/s}} = \frac{B}{\text{Hz}} \cdot 3{,}32 \cdot \log_{10}\left(1 + \frac{S}{N}\right)$$

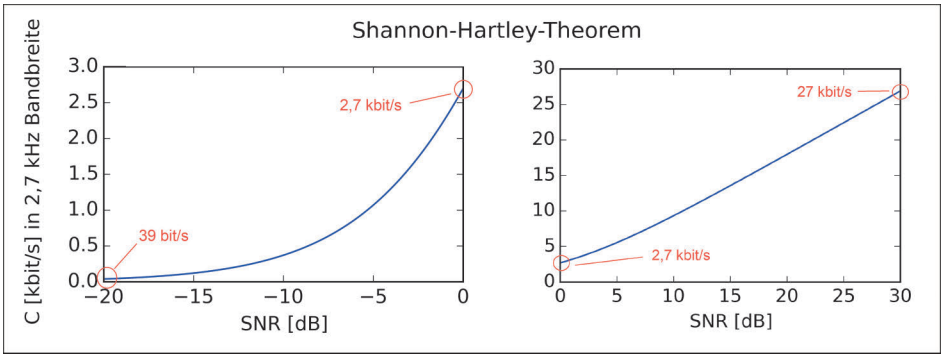


Abbildung 17.11 Aus dem Shannon-Hartley-Theorem berechnete maximale Kanalkapazität eines 2,7 kHz breiten Funkkanals

Abbildung 17.11 zeigt die damit berechnete theoretisch mögliche Datenrate. Der technisch mögliche Bereich liegt rechts und unterhalb der theoretischen Kurven. Festzuhalten ist aber, dass auch bei negativem SNR, wenn also das Signal im Rauschen »verschwindet«, noch eine Übertragung mit geringer Datenrate möglich ist. Bei S/N = –20 dB = 0,01 ist immerhin noch eine Datenrate von knapp 39 bit/s in einem 2,7 kHz breiten Kanal möglich, wie Sie mit dem Taschenrechner leicht nachrechnen können:

LOG (1 + 0,01) × 3,32 × 2700 = 38,7

Dies nutzen Übertragungsverfahren wie z. B. FT8 oder WSPR, die für schwache Signale optimiert sind. Damit können dann aber nur wenige Bits pro Sekunde übertragen werden.

Umgekehrt ist es bei der Funkübertragung meist schwierig, ein SNR von mehr als 20 bis 30 dB zu erreichen, da dies wegen des (im Vergleich zur Übertragung auf einer Leitung) erheblich höheren Störpegels beim Funkempfang sehr hohe Sendeleistungen erfordern würde. Bei S/N = 30 dB = 1000 ≈ 2^{10} wäre aber im Vergleich zu S/N = 0 dB eine 10-fach höhere Datenrate möglich – in einem 2,7 kHz breiten Kanal also 27 kbit/s, in einem 10 MHz breiten Kanal sogar 100 Mbit/s. In diesem Bereich ist z. B. DVB-T2 anzusiedeln, das in 8 MHz breiten Kanälen bis zu 40 Mbit/s übertragen kann.

Erinnern Sie sich noch an die Telefonmodems für den Internetzugang, wie sie in den 1990er-Jahren verbreitet waren? Die früheren analogen Telefonleitungen hatten eine Bandbreite von 3,1 kHz für die Sprachübertragung. Für ein Datenmodem, mit dem man einen Internetzugang über solch eine Leitung herstellen möchte, ergibt sich daraus eine maximal mögliche Datenrate von:

$$C = 3100 \cdot 3{,}32 \log_{10}\left(1 + \frac{S}{N}\right) bit/s$$

Für eine Übertragung mit 56 kbit/s wäre theoretisch ein S/N von etwa 55 dB erforderlich, in der Praxis ein noch höherer Wert. Da dies auch auf einer Leitung kaum er-

reicht werden konnte, war trotz der entsprechenden Angabe auf Modems der Datendurchsatz oft erheblich langsamer, weil er dem geringeren SNR von z. B. nur 40 dB angepasst werden musste. Dann ergab sich nur noch eine maximale Datenrate von gut 40 kbit/s.

Aus diesen Überlegungen ist auch sofort nachvollziehbar, dass für schnelle Internetzugänge mit z. B. 50 Mbit/s erheblich größere Bandbreiten erforderlich sind, zumal das SNR auf einer Telefonleitung bei höheren Frequenzen abnimmt. Deshalb werden Frequenzen bis ca. 30 MHz genutzt. In dicht besiedelten Gegenden bewirkt die unvermeidliche Abstrahlung aus den nicht abgeschirmten Telefonleitungen dann eine Beeinträchtigung des Funkempfangs in diesem Frequenzbereich. Erst wenn sich überall Glasfaseranschlüsse durchgesetzt haben und in den Häusern gut abgeschirmte Datenkabel verwendet werden, wird sich die Situation für den Funkempfang in Städten vielleicht wieder verbessern.

17.4.2 Kanalcodierung

Zur möglichst guten Ausnutzung der Kanalkapazität ist bei der Datenübertragung eine zusätzliche Codierung erforderlich, die es erlaubt, Übertragungsfehler zu erkennen und gegebenenfalls zu korrigieren. Dies wird als *Kanalcodierung* bezeichnet.

Die Kanalcodierung erfordert die Übertragung zusätzlicher (*redundanter*) Daten. Das Verhältnis der nutzbaren Daten zu den tatsächlich übertragenen Daten ist die *Coderate*. Eine Coderate von 0,5 besagt also, dass für jedes Nutzbit zwei Bits übertragen werden. Je geringer die Coderate ist, desto mehr Übertragungsfehler können meist korrigiert werden bzw. desto geringer ist der Signal-Rausch-Abstand, der zum Empfang erforderlich ist. Umgekehrt können natürlich bei geringer Coderate auch weniger Nutzdaten übertragen werden. Die Kanalcodierung macht sich wie die Quellencodierung teilweise komplizierte mathematische Verfahren zunutze, die hohe Computer-Rechenleistungen erfordern. Deshalb können hier nur die einfachsten Verfahren und diese auch nur anhand einfachster Beispiele erläutert werden.

Für die Kanalcodierung kommen verschiedene Verfahren in Betracht: Blockcodes und Faltungscodes.

Blockcodes

Bei *Blockcodes* (siehe Abbildung 17.12) werden im einfachsten Fall eine Anzahl K von Nutzbits zu einem Block zusammengefasst. An diesen werden weitere Bits angehängt, sodass das daraus ein *Codewort* mit insgesamt N Bits entsteht (*systematischer Blockcode*). Man bezeichnet einen solchen Code mit (N, K), und das Verhältnis K/N ergibt die Coderate. Im Empfänger können aus allen N empfangenen Bits die K Nutzbits

fehlerfrei decodiert werden, wenn innerhalb des Blocks nur eine maximale Anzahl an Bits fehlerhaft empfangen wurden.

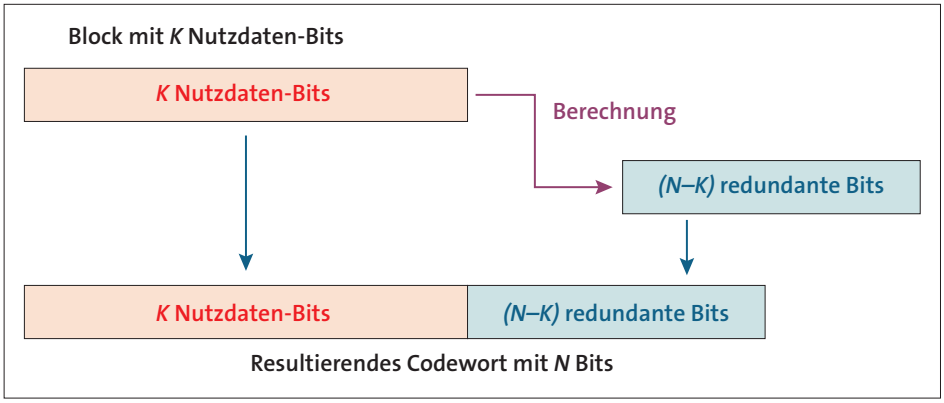


Abbildung 17.12 Erzeugung eines Codeworts bei einem systematischen (N, K)-Blockcode: Aus dem Block der Nutzdaten werden die redundanten Bits berechnet, die daran angehängt werden.

Der einfachste Blockcode, mit dem fehlerhafte Codewörter erkannt werden können, ist der *Paritätscode*, ein systematischer (K+1, K)-Blockcode. Dem K Bit langen Datenblock wird ein weiteres Bit angehängt. Bei *gerader Parität* (*Even Parity*) wird der Wert des Paritätsbits so gewählt, dass das Codewort eine gerade Anzahl von Bits mit dem Wert 1 enthält, bei *ungerader Parität* (*Odd Parity*) muss eine ungerade Zahl von Bits mit dem Wert 1 enthalten sein.

Bei einem (8, 7)-Code mit gerader Parität muss z. B. das Datenwort (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7) = (1, 1, 0, 1, 0, 0, 1) durch das Paritätsbit 0 zu dem Codewort (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8) = (1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0) ergänzt werden. Es ist unmittelbar einsichtig, dass nur einzelne Fehler in einem Codewort erkannt werden können, dass aber nicht erkannt werden kann, welches Bit fehlerhaft übertragen wurde. Deshalb können Fehler auch nicht korrigiert werden, sondern die Daten müssen beim Sender neu angefordert und erneut übertragen werden. Sind zwei Bits fehlerhaft, kann dies nicht festgestellt werden, da wieder ein gültiges Codewort entsteht. Allgemein lässt sich also bei fehlerhafter Paritätsprüfung nur feststellen, dass eine ungerade Anzahl von Bits fehlerhaft übertragen worden ist. Bei korrekter Prüfung liegt entweder kein Fehler vor oder es wurde eine gerade Anzahl von Bits fehlerhaft übertragen. Deshalb ist die Parität nur dann ein guter Mechanismus zur Fehlererkennung, wenn es extrem unwahrscheinlich ist, dass in einem Block mehr als ein Bitfehler vorkommt.

Das Prinzip der *Vorwärts-Fehlerkorrektur* (*Forward Error Correction*, FEC), mit der beim Empfang durch die redundanten Daten Fehler ohne Rückfrage beim Sender automatisch korrigiert werden können, soll am Beispiel eines speziellen Blockcodes, eines sogenannten (7, 4)-Hamming-Codes, erläutert werden:

- Die Datenworte umfassen jeweils 4 Bit, z. B. $(d_1, d_2, d_3, d_4) = (1, 1, 0, 1)$.
- Die Codeworte umfassen jeweils 7 Bit, z. B. $(c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7) = (d_1, d_2, d_3, d_4, p_1, p_2, p_3) = (1,1,0,1,0,0,1)$. Das heißt, an die 4 Bit des Datenworts werden 3 Prüfbits angehängt.

Die Berechnung der Codeworte kann durch folgende mathematische Operation erfolgen:

$$(c_1, c_2, \ldots, c_7) = (d_1, d_2, d_3, d_4) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Die Multiplikation der Datenbits mit dem rechteckigen Zahlenschema (einer 4×7-Matrix) geschieht so, dass zur Berechnung von c_1 die Datenbits mit der ersten Spalte, zur Berechnung von c_2 mit der zweiten Spalte usw. multipliziert und summiert werden. Dabei gilt $1 + 1 = 0$ ohne Übertrag.

Da in den ersten 4 Spalten der Matrix außer in der Diagonalen nur Nullen stehen, sind die ersten 4 Bit des Codeworts automatisch gleich den Datenbits. Die 3 Prüfbits ergeben sich durch die Multiplikation der Datenbits mit den drei rechten Spalten, im Beispiel also:

$$c_5 = p_1 = (1101) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} = 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 0 \cdot 1 + 1 \cdot 0 = 1 + 1 + 0 + 0$$
$$= 0$$

$$c_6 = p_2 = (1101) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = 1 \cdot 1 + 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + 1 \cdot 1 = 1 + 0 + 0 + 1$$
$$= 0$$

$$c_7 = p_3 = (1101) \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = 1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 = 1 + 1 + 0 + 1$$
$$= 1$$

Es ergibt sich also das Codewort $(1, 1, 0, 1, 0, 0, 1)$, das gesendet werden kann.

Beim Empfang können Übertragungsfehler passiert sein. Das empfangene Datenwort $(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7)$ ist dann ein Codewort, zu dem an irgendeiner Stelle eine 1 addiert wurde, das *Fehlerwort* $(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7)$. Würde in unserem Beispiel das Wort $(1, \mathbf{0}, 0,1,0,0,1)$ empfangen, wäre $(e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7) = (1,0,0,1,0,0,1) = (1,1,0,1,0,0,1) + (0,\mathbf{1},0,0,0,0,0)$ und das Fehlerwort $(f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6, f_7) = (0,1,0,0,0,0,0)$.

Zur Fehlerkorrektur muss also das Fehlerwort beim Empfänger berechnet werden. Dies geschieht dadurch, dass man das sogenannte *Syndrom* eines empfangenen Datenwortes berechnet. Dazu wird eine Matrix gebildet, die die Prüfspalten enthält, und darunter wieder die 1 nur in den Diagonalen. Multipliziert man ein gültiges Codewort mit dieser Matrix, ist das Ergebnis stets (0, 0, 0):

$$(c_1, c_2, \cdots c_7) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (0 \quad 0 \quad 0)$$

Der entscheidende Punkt ist nun, dass jedes Fehlerwort, das nur an einer Stelle eine 1 enthält, multipliziert mit der Matrix, ein anderes Ergebnis liefert, nämlich genau die entsprechende Zeile der Matrix, z. B.:

$$(1,0, \cdots 0) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (1 \quad 1 \quad 1)$$

$$(0,1, \cdots 0) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (1 \quad 0 \quad 1)$$

$$(0, 0, 0, 0, 1, 0, 0) \cdot \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = (1 \quad 0 \quad 0)$$

usw. Diese Ergebnisse sind die Syndrome des jeweiligen Fehlerworts. Betrachtet man nun ein fehlerhaftes Empfangswort, so ergibt sich bei der Multiplikation mit der Matrix genau das Syndrom des Fehlerworts, das zu einem gültigen Codewort addiert wurde, da das Codewort selbst ja das Syndrom (0, 0, 0) hat, z. B.:

$$(1,0,0,1,0,0,1)\cdot\begin{pmatrix}1&1&1\\1&0&1\\1&1&0\\0&1&1\\1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}=(1\quad 0\quad 1)$$

Durch den Vergleich mit den Syndromen der Fehlerworte erkennt man, dass das Empfangswort ein Codewort ist, zu dem das Fehlerwort (0,1,0,0,0,0,0) addiert wurde. Der Fehler befindet sich also an der 2. Stelle des Empfangsworts. Dieses Bit muss korrigiert werden, und so ergibt sich das korrigierte Datenwort zu (1, 1, 0, 1).

Dies funktioniert aber nur, wenn man weiß oder annehmen kann, dass nur ein Fehler entstanden ist. Denn das Fehlerwort (0, 0, 0, 0, **1**, 0, **1**) führt zum empfangenen Wort (1, 1, 0, 1, **1**, 0, **0**), das ebenfalls das Syndrom (1, 0, 1) hat. Aufgrund des Korrekturverfahrens würde man dann aber ebenfalls das 2. Bit korrigieren, sodass man fälschlicherweise annehmen würde, dass das ursprüngliche Datenwort (1, 0, 0, 1) war.

Wenn es aber nur darum geht, überhaupt Fehler zu erkennen, ohne feststellen zu wollen, welches Bit betroffen ist, könnte der (7, 4)-Code das für bis zu zwei Fehler im Block leisten. Dann ist nur zu prüfen, ob das Syndrom von (0, 0, 0) verschieden ist, und das ist für alle Fehlerworte der Fall, die an zwei Stellen eine 1 haben. Erst wenn drei oder mehr Fehler auftreten, kann als Syndrom (0, 0, 0) entstehen, z. B. beim Fehlerwort (0, 0, 0, **1**, 0, **1**, **1**). Dieses Fehlermuster würde also nicht erkannt werden.

Es gibt viele weitere solche Blockcodes, die sich darin unterscheiden, wie die redundanten Bits berechnet werden. Manche Blockcodes führen die Berechnungen auch nicht mit einzelnen Bits, sondern z. B. mit Bytes durch. Auf die Details kann hier nicht eingegangen werden, aber als Beispiele zum Nachschlagen seien folgende weit verbreitete Verfahren genannt:

- zyklische Redundanz-Prüfungs-Codes (*Cyclic Redundancy Check*) zur Fehlererkennung mit hoher Wahrscheinlichkeit in Datenblöcken größerer oder variabler Länge,
- BCH-Codes,
- Reed-Solomon-Codes (RS) und
- *Low Density Parity Check*-(LDPC-)Codes zur Fehlerkorrektur. Die letzteren werden z. B. bei der digitalen Rundfunk- und Fernsehübertragung mit DAB+ (RS) und DVB-T2 (LPDC) sowie im Amateurfunk bei FT4 und FT8 (LPDC) verwendet.

Faltungscodes

Als weitere Codes kommen sogenannte *Faltungscodes* infrage. Dabei wird der Datenstrom kontinuierlich durch eine Struktur geleitet, die Verknüpfungen zwischen den Werten der einzelnen Bits über einen bestimmten Bereich des Datenstroms erzeugt (siehe Abbildung 17.13). Nur der daraus entstehende neue Datenstrom wird übertragen, die ursprünglichen Bits nicht. Im Empfänger werden die Wahrscheinlichkeiten für verschiedene mögliche gesendete Datenströme berechnet und es wird angenommen, dass der wahrscheinlichste Datenstrom der tatsächlich gesendete ist (*Viterbi-Decoder*). Dies funktioniert am besten, wenn die Übertragungsfehler gleichmäßig im Datenstrom verteilt sind. Dazu werden sie über einen bestimmten Zeitraum umsortiert, damit sich die gehäuft auftretenden Übertragungsfehler durch Schwund oder durch eine atmosphärische Störung (z. B. einen Blitz) über einen längeren Zeitraum verteilen. Dadurch entsteht aber eine Verzögerung (*Latenz*) bei der digitalen Übertragung bei DAB+ und DVB-T2, die man gut am Zeitsignal bei Nachrichtensendungen oder beim Torjubel bei Fußballübertragungen erkennen kann. Von der Zeitverzögerung ist aber nur ein Teil auf dieses *Interleaving* zurückzuführen; auch die restliche digitale Signalverarbeitung, z. B. die Quellendecodierung, benötigt Zeit.

In vielen Übertragungsverfahren werden Faltungs- und Blockcodes kombiniert, um eine möglichst gute Fehlerkorrektur zu erreichen.

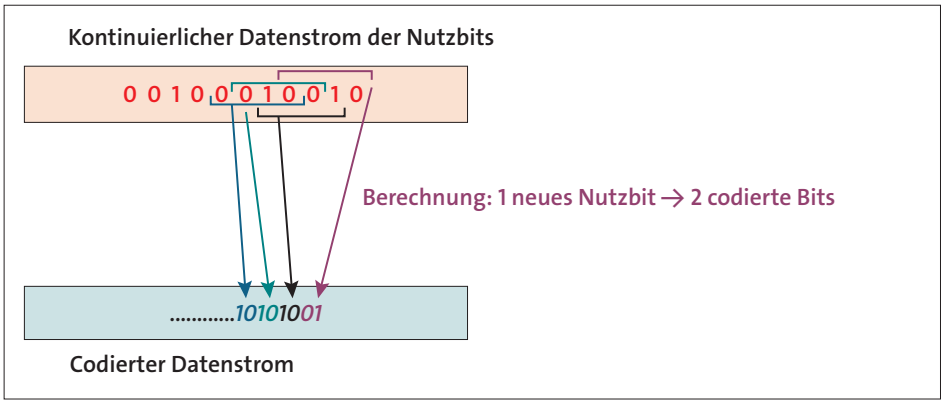


Abbildung 17.13 Erzeugung eines Faltungscodes (schematisch). Aus einem Abschnitt des Datenstroms werden die codierten Bits berechnet. In diesem Beispiel werden Abschnitte von je 4 Bits verwendet. Für jede Verschiebung des Abschnitts um 1 Bit werden 2 Bits des codierten Datenstroms erzeugt, wodurch sich die Coderate ½ ergibt. Die Berechnung der codierten Bits ist nicht nur von den Bits des momentanen Abschnitts, sondern auch von der »Vorgeschichte« abhängig.

17.5 Digitale Funkübertragungsverfahren

17.5.1 Digitale Modulationsverfahren

Nach der Analog-Digital-Wandlung, Quellen- und Kanalcodierung liegen die digitalen Informationen vor, die per Funk zu einem Empfänger übertragen werden sollen. Die Funkübertragung selbst nutzt elektromagnetische Wellen, die stets analoge Signale sind. Durch die Modulation kann die Amplitude (Stärke), Frequenz oder Phasenlage der Signale beeinflusst werden. Bei der digitalen Übertragung werden verschiedenen Werten dieser Größen bestimmte Bitfolgen zugeordnet. Moderne Verfahren nutzen auch die Veränderung der Größen zur Übertragung, z. B. eine kontinuierliche Vergrößerung oder Verkleinerung der Phase bei *Minimum Shift Keying* (MSK) – darauf soll hier aber nicht weiter eingegangen werden. Ein Beispiel wird in Abschnitt 33.1.2 vorgestellt.

Der Zeitraum, für den ein fester Wert von Amplitude und Frequenz bzw. Phase gesendet wird, wird als *Symboldauer* T_S bezeichnet, die Anzahl der Symbole pro Sekunde als *Symbolrate* R_S, angegeben in *Baud* (1 Baud = 1 Bd = 1 Symbol/Sekunde). Die digitale Übertragung besteht also aus einer Folge von gesendeten Symbolen.

Die Symbolrate hängt direkt mit der zur Übertragung erforderlichen *Bandbreite* zusammen. Betrachten wir z. B. eine einfache Amplitudentastung, bei der wie bei CW der Sender für die Symboldauer T_S eingeschaltet wird, wenn eine `1` übertragen werden soll, und ausgeschaltet bleibt, wenn eine `0` übertragen wird (*On-Off Keying*, OOK). Wird eine zufällige Folge `01101100001...` gesendet, wird der Sender also gemäß der Bitfolge im Abstand von T_S ein- bzw. ausgeschaltet. Das Spektrum kann dann mit einer Fourier-Transformation berechnet werden, und es ergibt sich der in Abbildung 17.14 gezeigte Verlauf. Die erforderliche Bandbreite ist demnach in der Größenordnung von $2/T_S$. Die Anteile weit weg von der Trägerfrequenz müssen durch Filterung entfernt werden: entweder, indem der Sender »weich« ein- und ausgeschaltet wird, oder durch ein Bandpassfilter im Frequenzbereich.

Je nachdem, wie viele verschiedene Zustände die charakteristischen Größen der Wellen einnehmen können, können pro Symbol ein oder mehrere Bits übertragen werden. Im einfachsten Fall kann pro Symbol ein Bit übertragen werden, wie z. B. bei der OOK des Beispiels oder bei einer 2-PSK oder *BPSK* (*Binary Phase Shift Keying*) wie in Abbildung 17.15 oben. Hier wird entweder die Trägerschwingung oder ein dazu gegenphasiges Signal gesendet.

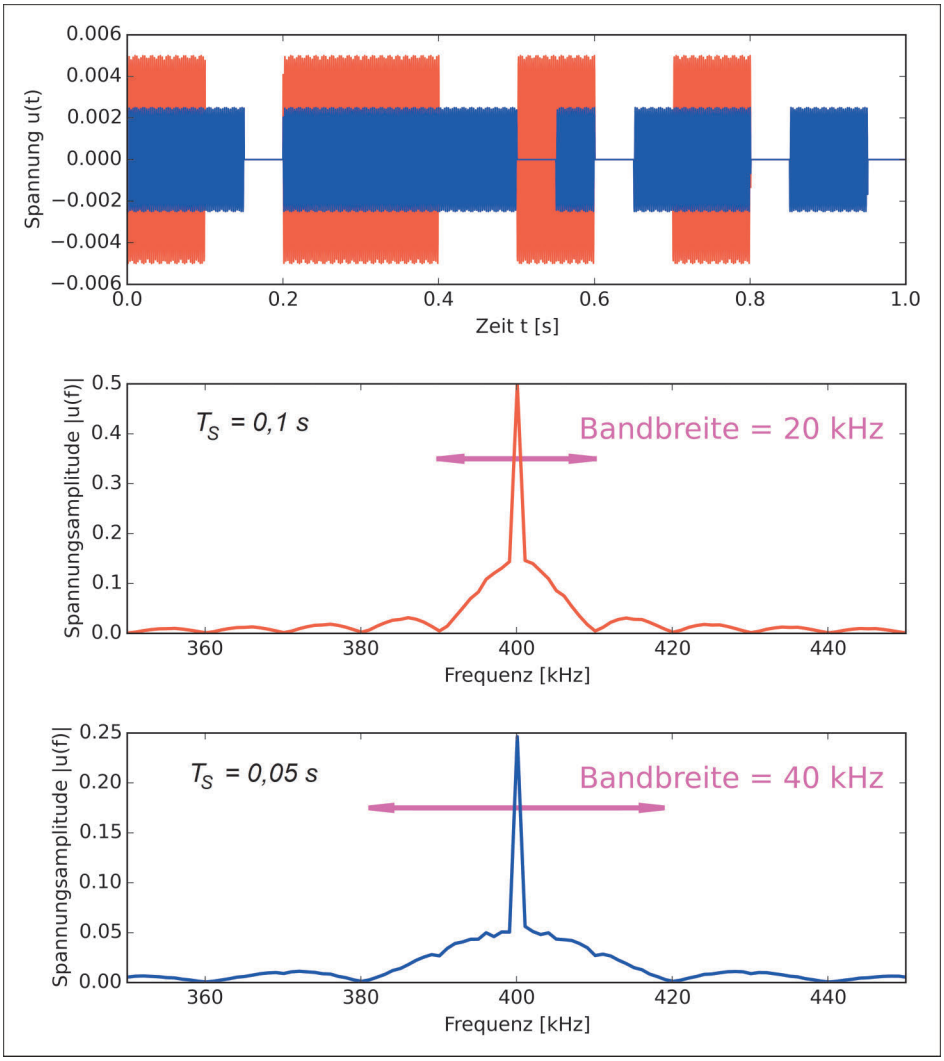


Abbildung 17.14 Ausschnitt aus dem Zeitsignal (oben) und Spektren zweier mit Symboldauer T_S = 0,1 s (oben) und T_{S2} = 0,05 s (unten) ein-aus-getasteter 400-kHz-Signale mit zufälligem Bitmuster. Der Signalanteil in der Nähe der Trägerfrequenz ist $2/T_{S1}$ = 20 kHz bzw. $2/T_{S2}$ = 40 kHz breit. Die dargestellten Spektren sind über 200 zufällige Bitmuster gemittelt.

Gibt es aber z. B. vier verschiedene Phasenlagen, spricht man von einer 4-PSK oder *QPSK* (*Quaternary Phase Shift Keying*, vierfache Phasenumtastung). Jedes Symbol umfasst hier 2 Bit, sodass die Datenrate (bits/s) doppelt so groß wie die Symbolrate ist. Kommen noch die Zustände dazwischen hinzu, erhält man eine 8-PSK und kann 3 Bit pro Symbol übertragen. Man spricht dann von einer *Symbolgröße n* von 3 Bit/

Symbol. Allgemein gilt folgender Zusammenhang zwischen der Datenrate C und der Symbolrate:

$$C = R_S \cdot n$$

Die möglichen Zustände von Amplituden und Phasen trägt man in ein Polardiagramm ein, das sogenannte *Konstellationsdiagramm*. Der Winkel zur x-Achse bezeichnet die Phase der zugeordneten Signale, der Abstand vom Ursprung deren Amplitude. Abbildung 17.15 zeigt zwei Beispiele.

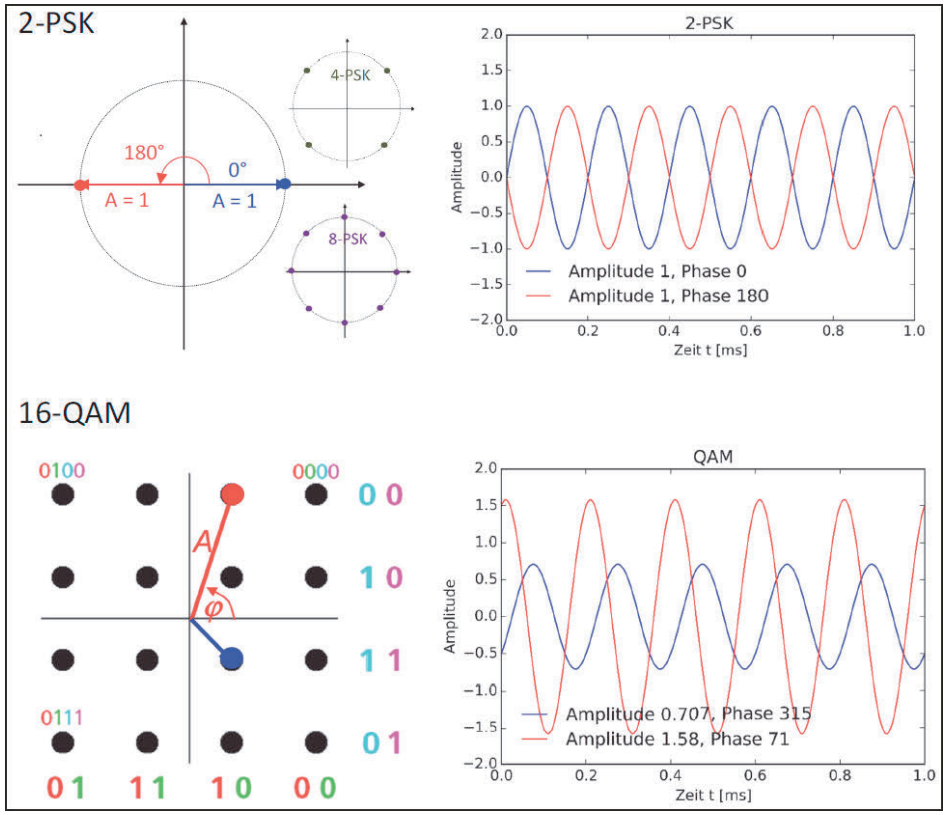


Abbildung 17.15 Konstellationsdiagramme und Signalformen bei 2-PSK (oben) und deren Erweiterung auf 4-PSK und 8-PSK, sowie 16-QAM (unten). Bei 16-QAM sind nur zwei der 16 möglichen Signalformen gezeigt, sowie eine mögliche Zuordnung der 4-Bit-Kombinationen zu den Zuständen (»Symbol Mapping«).

Oben ist 2-PSK gezeigt, es gibt nur zwei mögliche Signale, die eine Phasendifferenz von 180° aufweisen. Wie erwähnt, kann dieses Konzept auf 4-PSK (grün) und 8-PSK (violett) usw. erweitert werden. Im unteren Beispiel ist 16-QAM (*Quadratur-Amplituden-Modulation*) gezeigt, bei der sowohl die Amplitude als auch die Phase der Signale verändert werden, und zwar so, dass die Abstände der Konstellationspunkte jeweils

gleich sind. Insgesamt sind 16 verschiedene Zustände möglich. Zwei Signalformen, die ausgesendet werden, wenn ein Symbol mit dem entsprechenden Zustand gesendet werden soll, sind jeweils gezeichnet.

Bei allen Übertragungsverfahren muss vereinbart werden, was jeder Punkt im Konstellationsdiagramm bedeutet. Dies bezeichnet man als *Symbol-Mapping*. Bei 2-PSK kann jeder Signalform ein Bitwert zugeordnet werden, z. B. Phase 0 = 0, Phase 180° = 1 oder umgekehrt. Bei 16-QAM kann dagegen jeder Zustand vier Bitwerte kennzeichnen, eine mögliche zeilen- und spaltenweise Zuordnung ist ebenfalls in Abbildung 17.15 zu sehen.

Vielleicht stellt sich nun die Frage, warum man nicht immer eine Modulation mit möglichst großen Symbolen, z. B. 256-QAM, verwendet. Der Grund liegt darin, dass beim Empfang auch Rauschen und andere Störungen dazukommen (siehe Abschnitt 17.4.1). Dadurch werden die einzelnen Punkte des Konstellationsdiagramms beim Empfänger nicht mehr genau getroffen, sondern es ergeben sich Punktwolken um die möglichen Zustände herum, und die Wahrscheinlichkeit, einen falschen Zustand zu erkennen, ist bei geringem Signal-Rausch-Abstand sehr groß (siehe Abbildung 17.16). Man benötigt also bei größeren Symbolen einen höheren Signal-Rausch-Abstand zur korrekten Demodulation, kann aber eine höhere Datenrate erreichen.

Eine besondere Herausforderung an die Übertragung stellen Mehrwegekanäle dar, besonders, wenn sich Sender oder Empfänger bewegen, also bei Mobil- und Portabelbetrieb. Durch die sich überlagernden Signale mit unterschiedlichen Wegen und damit unterschiedlicher Laufzeit kommen bei hohen Datenraten verschiedene Symbole gleichzeitig beim Empfänger an und stören sich gegenseitig. Dies bezeichnet man als *Intersymbolinterferenz*.

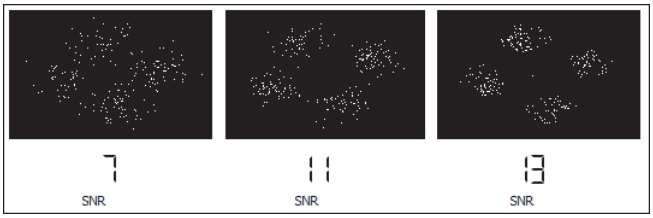


Abbildung 17.16 Empfangene Signale einer 4-PSK bei verschiedenen Signal-Rauschabständen (von links: 7, 11, 13 dB). Man erkennt, dass die Zuordnung zu den 4 möglichen Zuständen bei zunehmendem SNR eindeutiger wird. Deshalb ist bei der digitalen Übertragung ein Mindest-SNR erforderlich.

Im UKW-Bereich liegen die »Umwege« durch Reflexionen an Gebäuden oder Bergen im Bereich von einigen Kilometern, die Laufzeitdifferenzen der Signale im Bereich von ca. 1 bis 20 Mikrosekunden (3 µs entsprechen etwa 1 km). Im Kurzwellenbereich liegen sie im Bereich von mehreren Millisekunden bei der Überlagerung z. B. eines

Einfach- und eines Doppelsprungs zwischen der Erde und der Ionosphäre. Um Intersymbolinterferenzen zu vermeiden, muss die Symboldauer T_S wesentlich länger als die Laufzeitdifferenz sein, also z. B. ca. $T_S \approx 250$ µs im UKW-Bereich oder $T_S \approx 25$ ms im Kurzwellenbereich. Dadurch ist aber die Symbolrate auf ca. 4000 Symbole/s im UKW- und 40 Symbole/s im KW-Bereich beschränkt. Man erkennt, dass eine einfache Sprachübertragung mit Vocoder-komprimierter Sprache mit einigen kbit/s im UKW-Bereich gerade noch möglich ist.

Werden jedoch höhere Datenraten benötigt, bleibt nur, viele parallele Übertragungen mit jeweils geringer Datenrate vorzunehmen. Das ist das Grundprinzip von OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*). Die Frequenzen werden dabei möglichst eng benachbart gewählt; man kann sie im Abstand von $1/T_S$ (im Beispiel ≈ 4 kHz) anordnen (siehe Abbildung 17.17).

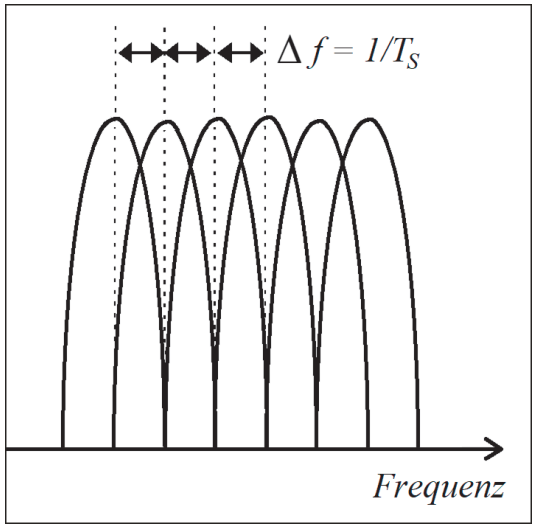


Abbildung 17.17 Anordnung der Träger bei OFDM: Durch den Frequenzabstand $1/T_S$ überlappen die Spektren, können aber im Empfänger aufgrund der »Orthogonalität« unabhängig voneinander verarbeitet werden.

Die Träger sind dann »orthogonal« und beeinflussen sich gegenseitig nicht. Je nach Bandbreite und Datenrate können dies 1000 und mehr Träger sein. Da die Signale mit einer FFT berechnet werden, orientiert man sich meist an 2er-Potenzen und verwendet z. B. bei DAB+ 1536 Träger mit $T_S \approx 1$ ms und 1 kHz Trägerabstand und eine 2048-FFT. Damit ist dann auch der Gleichwellenbetrieb eines Sendernetzes möglich, da Signale von Nachbarsendern sich genauso wie Mehrwege-Effekte auswirken, nur mit längerer Laufzeitdifferenz.

OFDM-Übertragungen sind auch unempfindlich gegen frequenzselektives Fading durch die Mehrwegeübertragung und schmalbandige Störungen im Übertragungs-

kanal, da sich eine Störung ähnlich auswirkt wie Fading: Die Daten auf einigen Trägern können zwar nicht korrekt decodiert werden, sie können aber meist durch eine Vorwärtsfehlerkorrektur wiederhergestellt werden. Man spricht dann von COFDM (*Coded OFDM*). COFDM eignet sich vor allem für Systeme mit großen Datenraten wie Radio, Fernsehen, 4G-(LTE-) und 5G-Mobilfunk sowie WLAN. Bei geringen Datenraten wie bei GSM, DMR oder Bluetooth können die adaptive Entzerrung und/oder Frequenzsprungverfahren (*Direct Sequence Frequency Hopping*) mit schmalbandigen Übertragungsverfahren verwendet werden. Diese benötigen im Vergleich zu OFDM eine weitaus geringere Rechenleistung, was sich bei batteriebetriebenen Geräten wie Handfunkgeräten positiv auf die Akku-Laufzeit auswirkt.

17.5.2 Digitale Sendertechnik

Nach der Erzeugung der zu übertragenden Symbole muss das Sendesignal auf der Sendefrequenz (oder gegebenenfalls einer Zwischenfrequenz) erzeugt werden. Das dazu verwendete *I-Q-Verfahren* beruht auf folgender Überlegung:

Während eines Symbols wird eine mögliche Konstellation des Übertragungsverfahrens gesendet, die durch ihre Phase und Amplitude festgelegt ist. Daraus werden nun zwei Größen I (*Inphase-Komponente*) und Q (*Quadratur-Komponente*) berechnet, die den Achsenabschnitten auf der horizontalen und vertikalen Achse des Diagramms entsprechen (siehe Abbildung 17.18). Mathematisch kann dies durch

$$I(t) = A(t) \cdot \cos\varphi(t), \quad Q(t) = A(t) \cdot \sin\varphi(t)$$

beschrieben werden. Die Zeitabhängigkeit soll zum Ausdruck bringen, dass sich die Werte von A und φ jeweils nach einer Symboldauer entsprechend den Bits verändern, die in dem jeweiligen Symbol übertragen werden sollen.

Daraus kann durch Anwenden der mathematischen Identität

$$\cos(\mathrm{x} + \mathrm{y}) = \cos x \cdot \cos y + \sin x \cdot (-\sin y)$$

das Signal auf die gewünschte Trägerfrequenz f_T umgesetzt werden:

$$\begin{aligned} s(t) &= A(t) \cdot \cos\varphi(t) \cdot \cos(2\pi f_T t) + A(t) \cdot \sin\varphi(t) \cdot (-\sin(2\pi f_T t)) \\ &= A(t)\cos(2\pi f_T t + \varphi(t)) \end{aligned}$$

Die Funktionen $\cos(2\pi f_T t)$ und $-\sin(2\pi f_T t)$ sind um 90° gegeneinander phasenverschoben (siehe Abschnitt 7.9), sodass sich das Blockschaltbild eines *I-Q-Modulators* in Abbildung 17.18 ergibt.

Zusammen mit der A/D-Wandlung der analogen Quelle, der Quellen- und Kanalcodierung, dem Symbol-Mapping und der I-Q-Modulation, der Digital-Analog-(D/A-) Wandlung, der Filterung und Leistungsendstufe (PA) ergibt sich das Blockschaltbild eines Senders für digitale Signale aus Abbildung 17.19.

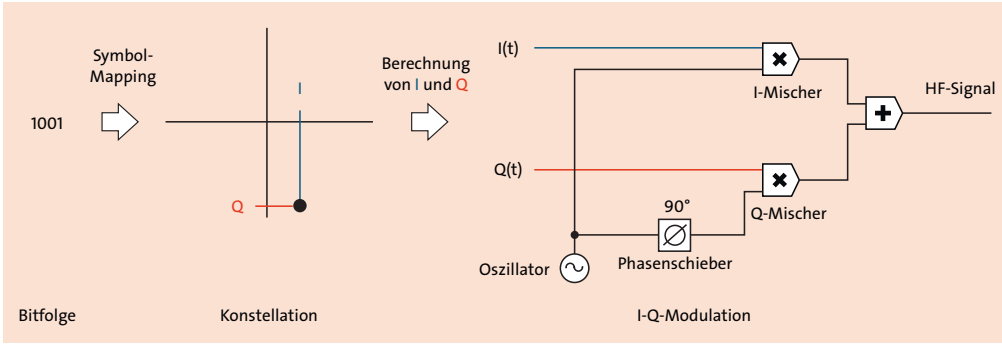


Abbildung 17.18 Das Prinzip der digitalen Modulation: Entsprechend der in einem Symbol zu sendenden Bitfolge wird der Zustand aus dem Konstellationsdiagramm ausgewählt (z. B. einer 16-QAM, siehe Abbildung 17.15) und das I- und Q-Signal berechnet. Mithilfe eines Oszillators und Phasenschiebers werden die beiden zur Mischung benötigten Signale erzeugt. Die Mischer bewirken die Multiplikation der I- und Q-Signale mit dem Kosinus bzw. negativen Sinus der Trägerfrequenz. Anschließend werden beide Signale addiert. Dadurch wird das modulierte HF-Signal auf der Trägerfrequenz erzeugt.

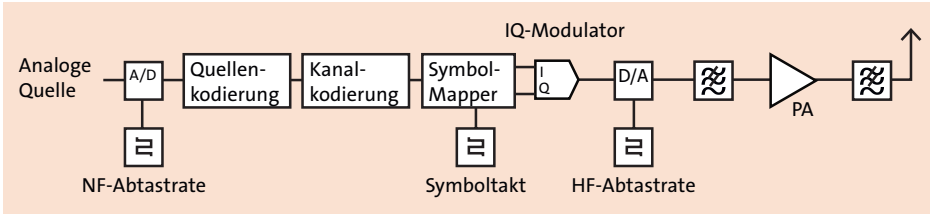


Abbildung 17.19 Digitaler Sender (schematisch), z. B. für digitale Sprache. Werden nur Daten übertragen, entfällt die A/D-Wandlung der Quelle.

Die von der analogen Modulation her bekannten Anforderungen an die Eigenschaften der Senderendstufe und nachfolgendem Tiefpass zur Oberwellenfilterung gelten entsprechend: Bei Übertragungsverfahren, die schwankende Amplitudenwerte aufweisen, wie z. B. QAM, muss die Endstufe im A oder AB-Betrieb arbeiten; nur bei Verfahren mit konstanter Leistung wie FSK kann der C-Betrieb verwendet werden.

17.5.3 Empfang digitaler Signale

Der digitale Empfänger (siehe Abbildung 17.20) hat mit der Analogtechnik das Frontend mit einem gegebenenfalls rauscharmen (UKW) oder großsignalfesten (KW) Verstärker gemeinsam. Dann erfolgt die *I-Q-Demodulation*, bei der die I- und Q-Signale wiedergewonnen werden. Dazu ist es aber erforderlich, dass der Oszillator im Empfänger genau auf die Trägerfrequenz eingestellt ist und die richtige Phasenlage hat ($\cos(2\pi f_T t)$). Dies wird üblicherweise dadurch gewährleistet, dass immer wieder be-

kannte Daten (Trainingssequenzen, Pilotsignale) übertragen werden, die es ermöglichen, Träger und Phase korrekt einzustellen und die Symbolgrenzen zur erkennen. Sender und Empfänger sind dann synchronisiert, und es können Daten übertragen werden. Bei manchen Übertragungsverfahren kann der Symboltakt auch direkt aus dem Empfangssignal zurückgewonnen werden. Ähnlich wie bei analogen Übertragungsverfahren kann die I-Q-Demodulation auch auf einer Zwischenfrequenz erfolgen. Wie beim analogen Superhet-Empfänger sind dann vor dem I-Q-Demodulator ein Spiegelfrequenzfilter, Mischer, ZF-Verstärker und -Filter eingebaut.

Aus den I- und Q-Signalen kann über einen Vergleich mit dem Konstellationsdiagramm festgestellt werden, welche Bitkombination im entsprechenden Symbol übertragen wurde, wenn die Signale nicht zu viel Rauschen enthalten (siehe Abbildung 17.16). Man spricht dann von *De-Mapping*. Wird bei viel Rauschen oder Störsignalen die Entscheidung, welcher gesendete Zustand dem empfangenen entspricht, falsch getroffen, treten *Bitfehler* im decodierten Datenstrom auf. Der fehlerbehaftete Bitstrom wird kanaldecodiert. Dabei werden bei genügend kleiner Bitfehlerrate die Übertragungsfehler korrigiert, sodass danach ein mehr oder weniger fehlerfreier Datenstrom an den Quellendecoder weitergeleitet werden kann. Dieser gibt wieder das ursprüngliche Signal (z. B. Text, Ton, Bild oder Video) aus, das dann dargestellt oder zu Gehör gebracht werden kann.

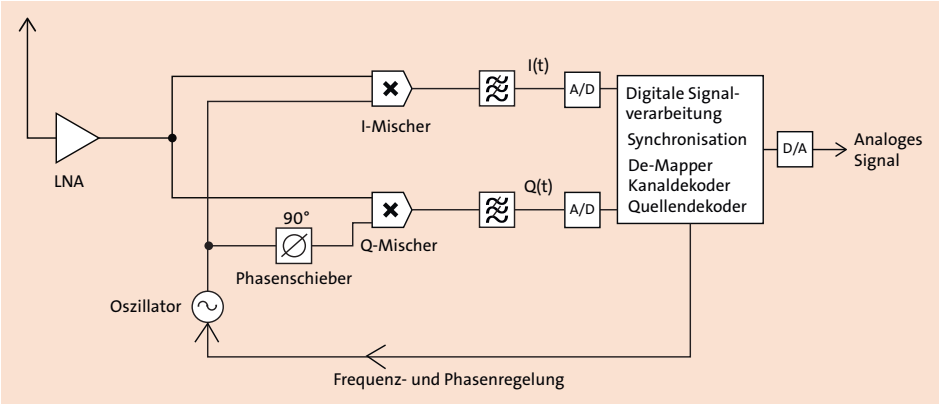


Abbildung 17.20 Digitaler Empfänger, schematisch. Zur Funktionsweise siehe den oben stehenden Text.

17.6 Software Defined Radio (SDR)

Die digitale Signalverarbeitung erlaubt es, die gleiche Hardware für eine Vielzahl von Funkanwendungen zu verwenden. Das allgemeine Konzept eines *Software Defined Radio*-(SDR-)Transceivers sehen Sie in Abbildung 17.21.

SDRs können heute nur bei niedrigen Frequenzen (etwa für den KW-Bereich) nach diesem Prinzip realisiert werden, da sonst zu hohe Abtastraten mit vielen Quantisierungsstufen erforderlich sind, die dazu führen, dass sehr hohe Datenraten verarbeitet werden müssten. Im Kurzwellenbereich bis 30 MHz sind Abtastraten von 70 MS/s bei mindestens 12 Bit pro Abtastwert erforderlich, was zu einer Datenrate von knapp 1 Gbit/s führt. Vor der aufwendigen digitalen Signalverarbeitung für die Kanal- und Quellencodierung ist aber eine Unterabtastung möglich, sobald man den Empfangskanal ausgewählt hat. Dies wird meist noch auf dem SDR-Board durchgeführt, bevor die Daten z. B. über USB zu einem PC übertragen werden.

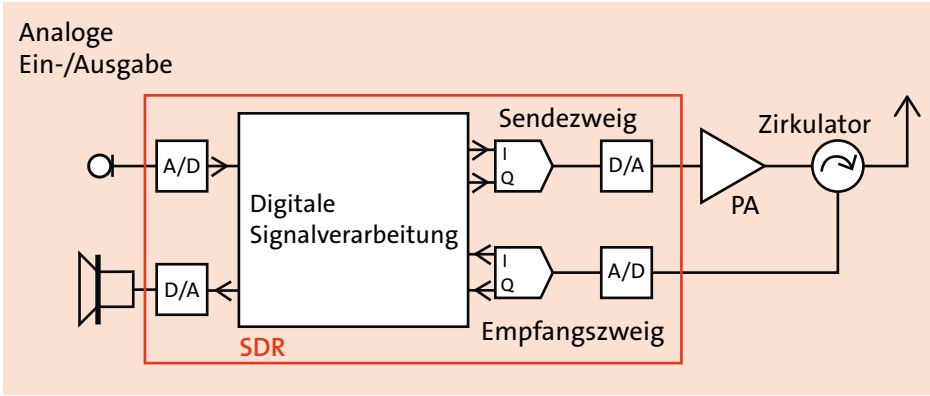


Abbildung 17.21 Allgemeines Konzept eines Software Defined Radio (SDR), hier gezeigt für Sprechfunk. An das SDR müssen nur noch die NF- und HF-Komponenten angeschlossen werden. Der Zirkulator leitet das Sendesignal an die Antenne weiter; das empfangene Signal gelangt nur in den Empfangszweig. Dadurch kann gleichzeitig über dieselbe Antenne gesendet und empfangen werden. AM, SSB, FM, DMR usw. mit verschiedenen Parametern können durch entsprechende Software (z. B. mit GNU Radio) realisiert werden.

SDRs für höhere Frequenzen arbeiten häufig nach dem *Direct Conversion*-Prinzip, bei dem nicht nur ein Kanal, sondern das gesamte Empfangsband, z. B. das 70-cm-Amateurfunkband (430–440 MHz), direkt mit der Oszillatorfrequenz in der Bandmitte (435 MHz) auf I- und Q-Signale mit jeweils 5 MHz Bandbreite gemischt und diese beiden sogenannten *Basisbandsignale* mit je einem A/D-Wandler mit z. B. 12 MS/s digitalisiert werden (siehe Abbildung 17.20). Dadurch wird die sonst erforderliche hohe Abtastrate von ca. 1 GS/s vermieden. Beachten Sie, dass bei diesem Verfahren die Bandbreite etwa 80 % der Frequenz ist, die der Abtastrate entspricht.

Dies ist kein Widerspruch zum Abtasttheorem, weil zwei Signale mit dieser Abtastrate abgetastet werden. Die Auswahl des Empfangskanals, die Demodulation, Kanaldecodierung und Quellendecodierung erfolgt dann per Software, z. B. mit GNU Radio oder OpenWebRX oder anderen Programmen auf einem PC. Dadurch können prinzipiell alle analogen und digitalen Übertragungsverfahren mit derselben SDR-Hard-

ware realisiert werden, sofern die Bandbreite, die Signal-Rausch-Abstände und die Rechenleistung des PCs dafür ausreichen. Die Sendeseite funktioniert in umgekehrter Reihenfolge ebenso: Es werden die I- und Q-Signale digital aus den zu übertragenden Daten erzeugt, D/A-gewandelt und dann mit zwei Mischern auf die Sendefrequenz gemischt und addiert (siehe Abbildung 17.18 und Abbildung 17.19).

17.7 Kanalzugriffsverfahren

Unabhängig vom Modulationsverfahren gibt es in digitalen Kommunikationssystemen Verfahren, die es mehreren Teilnehmern ermöglichen, in geordneter Weise auf den Funkkanal zuzugreifen. Im Gegensatz zu vielen analogen Verfahren können nämlich bei digitalen Verfahren meist mehrere Teilnehmer gleichzeitig senden und empfangen. Dazu gibt es folgende Möglichkeiten:

- **Zeitmultiplex-Verfahren** (*Time Division Multiple Access*, TDMA): Die Teilnehmer senden mit einer höheren Datenrate, als es zur Übertragung erforderlich ist. Für eine Sprachübertragung mit Vocoder-Quellencodierung sind z. B. 4 kbit/s erforderlich, bei einer Kanalcodierung mit Coderate ½ werden daraus 8 kbit/s, die zu übertragen sind. Wenn das Übertragungsverfahren eine Datenrate von 16 kbit/s erlaubt, können die Daten, die für eine Sekunde Sprache erforderlich sind, schon innerhalb einer halben Sekunde übertragen werden. In der restlichen Zeit können die Daten eines anderen Teilnehmers übertragen werden, sodass zwei Funksignale gleichzeitig auf demselben Kanal übertragen werden können.

  Dazu ist es notwendig, jede Sekunde in zwei *Zeitschlitze* zu unterteilen, sodass das Funkgerät des ersten Teilnehmers immer in der ersten Hälfte, das des zweiten Teilnehmers immer in der zweiten Hälfte jeder Sekunde sendet und sich die Geräte nicht untereinander stören. Allerdings müssen die Daten zwischengespeichert und dann nach der Decodierung mit halber Datenrate wieder ausgegeben werden. Deshalb sind in der Regel die Zeitschlitze sehr kurz, z. B. im Millisekundenbereich. Beispielsweise hat DMR zwei Zeitschlitze von je 30 ms, die am Funkgerät eingestellt werden können. Durch TDMA sind Anwendungen wie Gleichkanal-Relaisfunkstellen oder Duplex-QSOs (gleichzeitige Übertragung in beide Richtungen wie beim Telefon) möglich.
- **Frequenzmultiplex-Verfahren** (*Frequency Division Multiple Access*, FDMA): Im Gegensatz zu TDMA wird hier der nutzbare Übertragungsbereich auf verschiedene Kanäle aufgeteilt, die von den Teilnehmern gleichzeitig genutzt werden können. Ein Beispiel dafür ist ein 30 kHz breiter Lineartransponder, auf dem 10 SSB-QSOs mit je 2,7 kHz Bandbreite parallel geführt werden können.
- **Codemultiplex-Verfahren** (*Code Division Multiple Access*, CDMA): Bei diesem Verfahren werden spezielle Spreizcodes verwendet, wodurch die Datenrate und

damit die Bandbreite eines Signals erheblich vergrößert wird. Zum Beispiel wird zu dem quellcodierten Sprachsignal mit 4 kbit/s eine *Spreizsequenz* mit 1 Mbit/s addiert, wodurch sich ein Signal mit 1 Mbit/s ergibt. Der Empfänger decodiert das gewünschte Signal, indem er das Empfangssignal wieder mit dem teilnehmerspezifischen Spreizcode addiert, dadurch erhält er wieder das 4-kbit/s-Signal. Die Spreizcodes der Teilnehmer sind verschieden, sodass alle im selben Kanal gleichzeitig senden können. Bei der Decodierung ergeben die Signale aller nicht zu decodierenden Teilnehmer nur zufällige Anteile, die sich ähnlich wie Rauschen auswirken. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die Übertragung aufgrund der großen Bandbreite unempfindlich gegen Mehrwegeausbreitung und schmalbandige Störungen ist. Gut funktioniert es aber nur, wenn beim Empfänger alle Signale mit etwa gleicher Leistung ankommen. Deshalb ist eine Leistungsregelung bei den Sendern erforderlich.

17.8 Glossar zur Digitaltechnik

Die wichtigsten Begriffe aus diesem Kapitel sind hier noch einmal zusammengestellt und kurz erläutert.

- **Abtastrate**: Anzahl der Abtastwerte pro Sekunde
- **Abtasttheorem**: Die Abtastrate muss mindestens doppelt so groß sein wie die höchste im Signal enthaltene Frequenz.
- **Abtastung**: Messung einer Größe in festen Zeitabständen
- **Alias-Effekt**: Auftreten von unerwünschten Signalen bei Verletzung des Abtasttheorems
- **Blockcode**: gemeinsame Codierung eines Datenblocks von K Nutzbits
- **BPSK**: Phasenumtastung mit zwei verschiedenen Phasenwerten
- **Codec**: Coder und Decoder für ein Quellencodierungs- oder Übertragungsverfahren
- **Coderate**: Verhältnis der Anzahl der Nutzbits zur Anzahl der übertragenen Bits
- **Codewort**: Datenbits plus redundante Bits zur Fehlererkennung
- **Digitales Signal**: zeit- und wertdiskrete Darstellung eines Signals
- **Faltungscode**: Verfahren, bei dem die redundanten Daten kontinuierlich aus dem Datenstrom erzeugt werden
- **FFT**: *Fast Fourier Transformation*; effizientes Berechnungsschema für das Spektrum eines Signals
- **FIR**: *Finite Impulse Response*; digitales Filter ohne Signalrückführung vom Aus- zum Eingang

- **GNU Radio**: Programm zur digitalen Signalverarbeitung, arbeitet mit Signalflussgraphen.
- **IIR**: Infinite Impulse Response; digitales Filter mit Signalrückführung vom Aus- zum Eingang
- **Interleaving**: Umsortieren der Reihenfolge der Bits bei der Übertragung, um Bitfehler möglichst gleichmäßig im Datenstrom zu verteilen
- **Intersymbolinterferenz**: gegenseitige Störungen zwischen aufeinanderfolgenden Signalen bei unterschiedlichen Signallaufzeiten. z. B. durch Mehrwegeausbreitung
- **I-Q-Modulator**: Mischung des Inphase- und Quadratursignals mit um 90° phasenverschobenen Oszillatorsignalen und Addition dieser Signale
- **Kanalcodierung**: Hinzufügen redundanter Daten zur Erkennung und/oder Korrektur von Übertragungsfehlern
- **Kanalzugriffsverfahren**: Verfahren, die den Zugriff mehrerer Teilnehmer auf einen Funkkanal regeln, z. B. Zeitmultiplex (TDMA), Frequenzmultiplex (FDMA) und Codemultiplex (CDMA)
- **Konstellationsdiagramm**: grafische Darstellung der möglichen Amplituden und Phasen der Signale während eines Symbols
- **OFDM**: *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*; parallele Übertragung vieler Signale mit geringer Datenrate, um Intersymbolinterferenz zu reduzieren. Der Frequenzabstand der Träger entspricht dem Kehrwert der Symboldauer.
- **Paritätscode**: einfacher Blockcode, bei dem an den Datenblock ein Paritätsbit angehängt wird
- **QAM**: Quadratur-Amplituden-Modulation, bei der Amplitude und Phase der Signale verändert werden
- **QPSK**: Phasenumtastung mit vier verschiedenen Phasen
- **Quantisierung**: Auf- bzw. Abrundung eines Messwerts in endlich viele feste Stufen, die dann z. B. durch eine bestimmte Anzahl von Bits codiert werden können
- **Quantisierungsfehler**: durch die Quantisierung entstehende Abweichung des digitalen Signals vom analogen Signal
- **Quellencodierung**: Reduzierung der Datenrate einer digitalen Quelle mit geringen Qualitätseinbußen
- **Rekonstruktion**: Wiederherstellung eines analogen Signals aus einem digitalen Signal
- **Sample**: Abtastwert
- **SDR**: Software Defined Radio; Sender oder Empfänger, bei dem die Signalverarbeitung (Quellencodierung, Kanalcodierung, Symbol-Mapping) weitgehend digital erfolgt

- **Spektrum**: Darstellung der in einem Signal enthaltenen Frequenzen
- **Symboldauer**: Dauer, während der eine gemeinsame Bitfolge übertragen wird
- **Symbolgröße**: Anzahl der Bits, die pro Symbol übertragen werden
- **Symbol-Mapping**: Zusammenhang zwischen den Zuständen im Konstellationsdiagramm und den damit übertragenen Bitfolgen
- **Symbolrate**: Anzahl der übertragenen Symbole pro Sekunde, angegeben in Baud
- **Syndrom**: Muster, das aus den empfangenen Daten berechnet wird und aus dem die Position eines Bitfehlers in einem Datenblock erkannt werden kann
- **Überabtastung**: Verwendung einer höheren Abtastrate, als nach dem Abtasttheorem erforderlich ist
- **Unterabtastung**: Verwendung einer geringeren Abtastrate, als nach dem Abtasttheorem erforderlich ist
- **Vocoder**: Verfahren zur Reduzierung der Datenrate bei digitalen Sprachsignalen
- **Vorwärts-Fehlerkorrektur**: Verfahren, bei denen durch Übertragung redundanter Daten Fehler beim Empfang automatisch ohne Rückfrage beim Sender korrigiert werden können
- **Wasserfalldiagramm**: Zeilenweise Darstellung von zeitlich aufeinander folgenden Spektren durch Farbcodierung

Kapitel 18
Antennen

Eine gute Antenne ist der beste Hochfrequenzverstärker, lautet ein uralter Spruch der Funkergemeinde. Ohne eine Antenne finden weder Empfang noch Sendung statt. Funkamateure bauen ihre Antennen oft selbst. Aber auch manches Werbeversprechen der Antennenhersteller ist kritisch zu hinterfragen, will man kein Geld verschenken.

Die wichtigsten Grundlagen lernen Sie in diesem Kapitel kennen. Vertiefen können Sie das Thema Antennen mit folgender Literatur:

- Rothammels Antennenbuch, Alois Krischke, ISBN: 978-3886920655
- The Antenna Book, ARRL, ISBN: 978-1-62595-114-4 (Englisch)
- Praxisbuch Antennenbau, Max Ruegger, ISBN: 978-3910159358

Antennen, kurz erklärt

Es gibt keine Wunderantennen!

Welche Antenne Sie verwenden sollten, ist stets eine Einzelfallentscheidung, bei der Sie vor allem diese Punkte berücksichtigen:

- **Frequenzbereich**: KW, UKW ... Die Wellenlänge bestimmt in der Regel die Größe!
- **Aufbaumöglichkeit**: Dach, Garten oder nur Balkon? Portabelbetrieb?
- **Umweltbedingungen**: Störnebel, Grund- und Erdungsverhältnisse, Wind
- **Kosten**: Masten, Rotor, Antenne ...

18.1 Antennenformen

Fast ohne Ausnahme bestimmt die Wellenlänge die Ausmaße einer Antenne. Daher finden Sie im Kurzwellenbereich weniger Richtantennen, da diese große Ausmaße aufweisen. Meist kommen hier Drahtantennen oder Vertikalantennen zum Einsatz, also solche, die aus einem senkrechten »Stab« bestehen. Für den mobilen Einsatz sind diese Stabantennen recht kurz. Die Wellenlänge wird mit Spulen oder Kapazitäten »untergebracht«. Der Preis hierfür ist ein niedriger Wirkungsgrad. *Magnetische Antennen* bilden einen Sonderfall. Bezogen auf ihre Größe bieten sie bei wenig Platz

die Möglichkeit, mit einigen Einschränkungen trotzdem Funkverkehr auf Kurzwelle abzuwickeln.

Anders sieht die Lage oberhalb von 30 MHz aus. Hier werden aufgrund der abnehmenden Wellenlängen Richtantennen, aber auch gestockte Vertikalantennen mit entsprechendem Gewinn alltagstauglich. Die Antennen für den mobilen Betrieb sind hier keine »Leistungsvernichter«.



Wiederholung: Berechnung der Wellenlänge und Ausbreitungsgeschwindigkeit

Wissenswertes zur Wellenlänge:

- Je höher die Frequenz ist, desto kürzer ist die Wellenlänge. (Wissenschaftlich ausgedrückt: Die Wellenlänge verhält sich umgekehrt proportional zur Höhe der Frequenz.)
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von elektromagnetischen Wellen beträgt:
  - im Freiraum: 300.000 km/s
  - leitungsgebunden: 190.000 bis 280.000 km/s
  - Formelzeichen: λ (ausgesprochen: Lambda)
  - Einheit: m
- Berechnung der Wellenlänge:

  $$\lambda = \frac{300000}{f\ (\mathrm{kHz})}\ \mathrm{m}$$

  Zur besseren Handhabung werden die Frequenzen meist in kHz oder MHz in die Formel eingesetzt. Bei der Verwendung von MHz setzen Sie die Zahl 300 als Zähler ein.
- Umrechnung aus der Wellenlänge auf die Frequenz:

  $$f = \frac{300000}{\lambda(\mathrm{m})}\ \mathrm{kHz}$$

In Tabelle 18.1 finden Sie Antennenbezeichnungen und deren Einsatzgebiete.

Antennentyp	Kurzwelle	VHF/UHF
Langdraht	X	–
Groundplane	X	X
Dipol	X	X
Yagi	X (gebräuchlich ab 14 MHz)	X

Tabelle 18.1 Übersicht über Antennentypen

Antennentyp	Kurzwelle	VHF/UHF
Windom	X	–
Delta-Loop	X	–
W3DZZ	X	–
Ringantenne	X (strahlt im Nahfeld ein starkes magnetisches Feld ab)	–
G5RV	X	–
Fuchsantenne	X	–
Parabolspiegel	–	X
LPDA	X (bedingt durch Größe)	X

Tabelle 18.1 Übersicht über Antennentypen (Forts.)

Im Mikrowellenbereich verwirklichen Sie Antennen, die im Kurzwellen- und UKW-Bereich wegen ihrer Abmessungen mehr oder weniger unmöglich zu realisieren sind. Die hier gebräuchlichen Parabolspiegelantennen haben einen Reflektordurchmesser von mindestens 5 Wellenlängen. Vor diesem Reflektor wird die Erregerantenne (*Feed*) angebracht.

Fast alle Antennen lassen sich als *Vertikal-* oder *Horizontalstrahler* montieren. Ausnahmen bilden *Spiegelantennen*, z. B. die *Parabolantenne* und solche mit senkrechtem Strahler, z. B. die *Groundplane* (GP). Die GP kann konstruktionsbedingt nur als Vertikalstrahler montiert werden. Drahtantennen allgemein können eine beliebige Länge aufweisen, die zusammen mit der unmittelbaren Umgebung und der Anbringung über Erfolg und Misserfolg entscheidet.

Jede Antenne verfügt über einen *Strahlungswiderstand* R_S. Diesen berechnen Sie stets für einen einzigen Punkt an der Antenne. Zur Berechnung dividieren Sie die abgestrahlte Wirkleistung durch das Quadrat des Antennenstroms (Ansatz mit dessen Effektivwert):

$$R_S = \frac{P_S}{I^2}$$

Bitte verwechseln Sie den Strahlungswiderstand nicht mit der Impedanz, die im Speisepunkt der Antenne vorliegt. So hat ein sehr kurzer (Hertzscher-)Dipol nur einen sehr kleinen Strahlungwiderstand, aber im Speisepunkt eine große Impedanz mit Blindanteil.

Der Strahlungswiderstand wird sowohl durch die Abmessungen der Antenne als auch durch Umgebungseinflüsse bestimmt, z. B. durch die Aufbauhöhe. Dies gilt, von einigen wenigen Ausnahmen abgesehen, für fast alle Antennenbauformen. Im Verhältnis zur Wellenlänge verfügen kleine Antennen normalerweise über einen sehr niedrigen Strahlungswiderstand.

18.2 Der Korrekturfaktor (Verkürzungsfaktor)

Mit der Formel zur Berechnung der Wellenlänge erhalten Sie im Ergebnis einen Wert, der in der Praxis zu lang ist. Die Formel geht hierbei von einem unendlich dünnen Antennenleiter im Freiraum aus. Die Verkürzung wird hauptsächlich durch die Kapazitäten an den Strahlerenden bewirkt. Zudem wirkt sich bei waagrechter Anbringung auch der Erdboden (je nach Montagehöhe) verkürzend aus. Die Materialstärke des Leiters hat ebenso eine Auswirkung auf den Verkürzungsfaktor: Je dicker das Material ist, desto höher ist der Faktor.

Die Berechnung der Wellenlänge gilt für die Freiraumausbreitung. In der Antenne aber läuft die Welle am metallischen Leiter, was die Ausbreitungsgeschwindigkeit ein wenig mindert. Die Wellenlänge aber berechnet sich unter anderem anhand der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Damit gibt der Verkürzungsfaktor (*Korrekturfaktor*) ein Verhältnis an:

$$k = \frac{V_{\text{Leitungsgebunden}}}{V_{\text{Freiraum}}}$$

Der *Verkürzungsfaktor* wird mit *k* bezeichnet und kommt in den Prüfungsfragen vor.

In der Praxis hilft, wenn die Antenne gebaut wird, entweder das Kürzen oder das Einfügen eines Abstimmkondensators. Mit dem Kürzen müssen Sie sich millimeterweise vorarbeiten – ist er zu kurz geraten, muss der Leiter wieder verlängert werden. Den Drehkondensator oder Trimmer stellen Sie ein, bis die Antenne »passt«, fertig!

Beachten Sie beim Abgleich Ihrer Antennen außerdem, dass Sie diese normalerweise für einen *Bandbereich* und nicht für eine Einzelfrequenz einstellen. Ähnlich wie beim Bandpassfilter gibt es also den mehr oder weniger breiten »Nutzkanal« der Antenne, und alles, was zu weit von der Mittenfrequenz entfernt ist, wird bedämpft.

Die Verkürzungsfaktoren schwanken in der Praxis zwischen 0,95 und 0,97.

Ist eine Antenne zu lang, verringert sich die Resonanzfrequenz. Daher müssen Sie eine Antenne, die Sie gegebenenfalls ohne Verkürzungsfaktor berechnet haben, stets kürzen!

18.3 Der Dipol und seine Varianten

Wenn man vom »Dipol« spricht, ist damit im Allgemeinen der $\lambda/2$-Dipol gemeint (siehe Abbildung 18.1).

Ein Dipol lässt sich waagrecht (horizontal), aber auch vertikal montieren (wenn das von den Abmessungen her möglich ist). Dabei muss er nicht unbedingt gestreckt sein, auch abgewinkelt kann er eingesetzt werden. Beim Aufbau als *Inverted Vee* benötigen Sie nur einen Mast. Damit können Sie einen Dipol auch auf einem kleinen Grundstück, ja selbst auf einer Dachterrasse verwenden. Der Dipol ist ebenfalls bei vielen Richtantennen als »Erreger« in Verwendung.

Ein Dipol kann auch ein ganzzahliges Vielfaches von der halben Wellenlänge aufnehmen und in Resonanz betrieben werden: Ganzwellendipol, doppelte Wellenlänge, dreifache Wellenlänge.

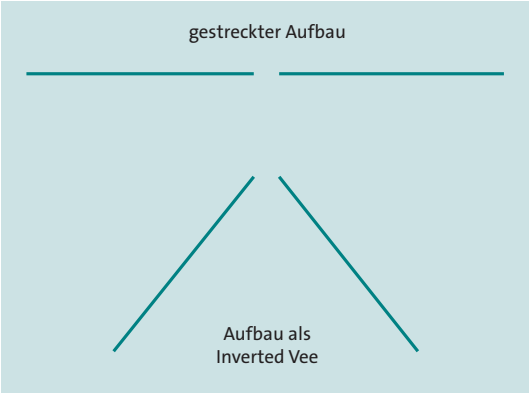


Abbildung 18.1 Bauformen eines Dipols

Dipol kurz erklärt

Der Dipol ...

- ist eine symmetrische Antenne,
- wird üblicherweise als Halbwellenantenne ausgeführt,
- hat dabei, abhängig von der Aufbauhöhe, eine Impedanz zwischen 40 und 80 Ω,
- wird auf seiner Grundfrequenz in der Antennenmitte stromgespeist und
- kann bei Mitteneinspeisung direkt mit einem Koaxialkabel verbunden werden. Auf diesem Kabel können Mantelwellen auftreten. Dagegen hilft die Mantelwellendrossel und/oder ein Balun (Symmetrierglied).
- Er hat einen Gewinn gegenüber dem isotrophen Strahler von 2,15 dB und
- ist in der Realität kürzer als bei der Freiraumberechnung (97 bis 95 %, Draht).

18.3.1 Horizontales und vertikales Strahlungsdiagramm

Die Aufbauhöhe formt auch das vertikale Strahlungsdiagramm! Je höher über dem Erdboden die Antenne angebracht wird, desto flacher, also für Weitverkehr, strahlt die Antenne ab.

Im VHF/UHF-Bereich mag es kein Problem darstellen, den Dipol gegebenenfalls mehrere Wellenlängen über dem Grund zu befestigen. Bei Kurzwelle wird der waagrecht gespannte Dipol fast immer zu nah über dem Boden hängen. Dies wirkt gegebenenfalls auch verlängernd.

Betrachten Sie zunächst das Horizontaldiagramm eines Dipols (siehe Abbildung 18.2). Die »Keule« des niedriger hängenden Dipols ($\lambda/4$) ist deutlich gedrängter als jene mit der vierfachen Wellenlänge als Anbringungshöhe. Dafür ist sie breiter.

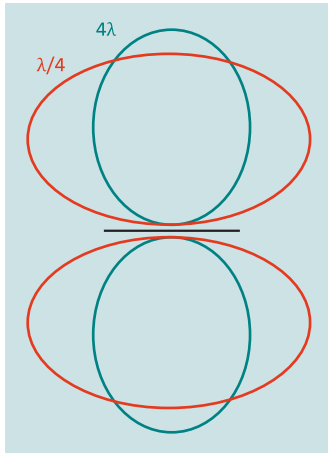


Abbildung 18.2 Horizontaldiagramm eines Dipols

Das Vertikaldiagramm (siehe Abbildung 18.3) zeigt die flachere Abstrahlung des höher hängenden Dipols. Dies ist für den Weitverkehr förderlich; die niedrigere Aufhängung bedient ein engeres Gebiet und ist vor allem auch als *NVIS*-(*Near Vertical Incidence Skywave*-)Antenne für den Notfunk von Interesse.

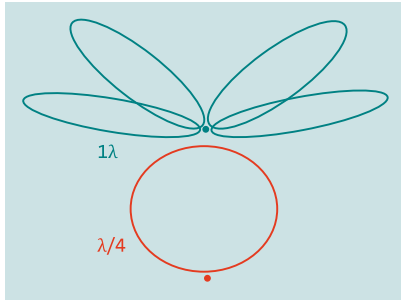


Abbildung 18.3 Vertikaldiagramm eines Dipols

18.3.2 Strom- und Spannungsverteilung beim Halbwellendipol

Die Länge des Halbwellendipols umfasst eine halbe Sinusschwingung des hochfrequenten Signals. Spannung und Strom verteilen sich hierbei gegensätzlich. Herrscht eine hohe Spannung, fließt kaum Strom und umgekehrt. Und es gilt hinsichtlich Verkürzungsmaßnahmen: Strom strahlt. Wenn Sie also eine Antenne verkürzen, nehmen Sie dies am besten nicht im Strombauch einer Antenne vor.

Abbildung 18.4 zeigt Ihnen die Verteilung von Strom und Spannung bei einem Halbwellendipol.

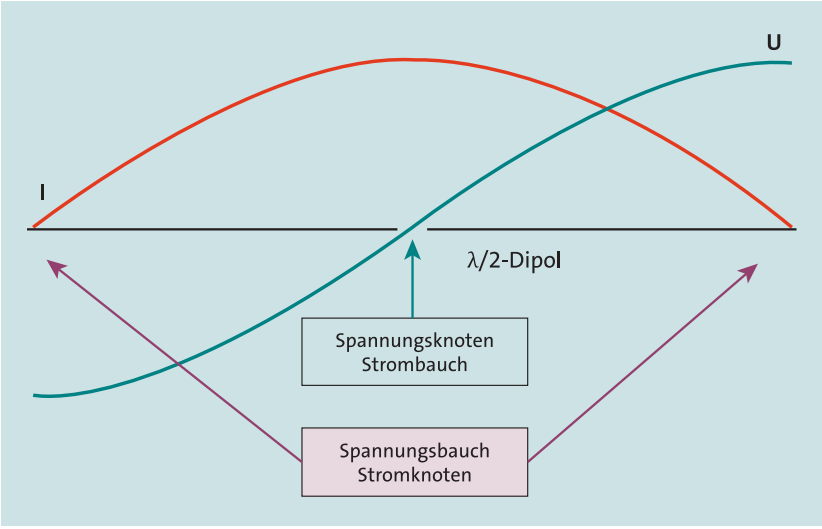


Abbildung 18.4 Strom- und Spannungsverteilung beim Halbwellendipol

Strom- und Spannungsverteilung beim Halbwellendipol

- Stromknoten: Stromminimum
- Spannungsbauch: Spannungsmaximum
- Spannungsknoten: Spannungsminimum
- Strombauch: Strommaximum
- Dipolende: Stromknoten + Spannungsbauch
- Dipolmitte: Spannungsknoten + Strombauch
- Stromspeisung Dipol: niederohmig; der Einspeisepunkt liegt am Strombauch und Spannungsknoten.
- Spannungsspeisung: hochohmig; der Einspeisepunkt liegt am Stromknoten und Spannungsbauch.
- Impedanz unterhalb der Grundfrequenz: kapazitiv
- Impedanz oberhalb der Grundfrequenz: induktiv

Die Dipolantenne ist in Resonanz, wenn die Länge λ/2 oder ein ganzzahliges Vielfaches davon beträgt (siehe Abbildung 18.5). Der Eingangswiderstand bei der Mittenspeisung zeigt sich hier als reeller Widerstand bei den Resonanzfrequenzen. Allerdings unterscheidet sich der Eingangswiderstand in Abhängigkeit von der Erregungsfrequenz, sodass in der Praxis eine Anpassung notwendig ist. Wenn Sie einen Dipol auf den Harmonischen seiner Resonanzfrequenz betreiben, ändert sich dessen horizontales Strahlungsdiagramm erheblich!

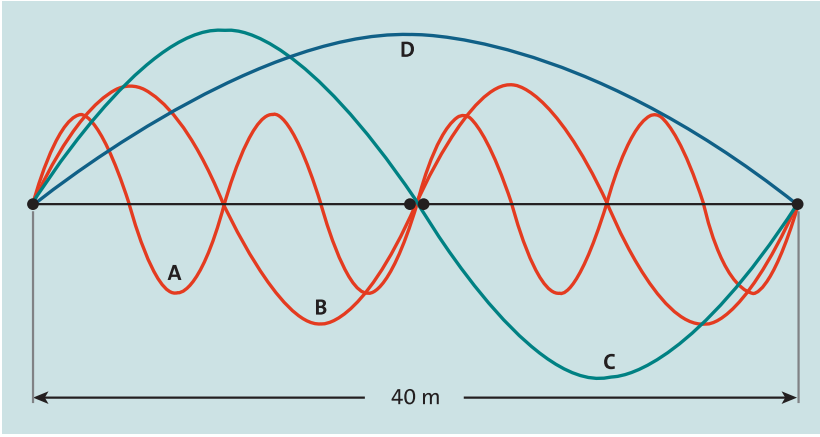


Abbildung 18.5 Stromverteilung am Dipol bei verschiedenen Resonanzfrequenzen

In Abbildung 18.5 finden Sie die schematische Darstellung des Stromverlaufs verschiedener Erregungsfrequenzen. Da die Antenne eine Länge von 40 m aufweist, können Sie die Frequenzen der einzelnen Kurven bestimmen:

- D: Halbwellenresonanz, 80 m (3,5 MHz)
- C: Ganzwellenresonanz: 40 m (7 MHz)
- B: zweifache Wellenlänge: 20 m (14 MHz)
- A: vierfache Wellenlänge: 10 m (28 MHz)

Wenn Sie den Dipol nur 20 m lang bauen, ist das 80-m-Band stark verkürzt, eine Halbwelle entspricht 40 m, eine Ganzwelle 20 m usw.

Auch der Dipol ist ein Schwingkreis. Um jeden Leiter baut sich ein elektromagnetisches Feld auf. Damit bildet der Leiter eine Induktivität. Jeder Leiter verfügt aber auch über eine Kapazität, abhängig von seiner Länge. So ergibt sich für den Dipol ein Ersatzschaltbild (siehe Abbildung 18.6).

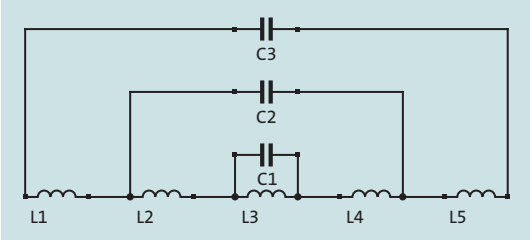


Abbildung 18.6 Ersatzschaltbild des Dipols

18.3.3 Außermittig gespeiste Halbwellenantennen

Der Dipol wird für gewöhnlich, da er eine symmetrische Antenne ist, in seiner Mitte gespeist. Die Antenne wird dabei, je nach deren Ankopplung an die Speiseleitung, meist getrennt, sodass sich auch mechanisch zwei Hälften mit je einer viertel Wellenlänge ergeben. Durchgehende Antennenleiter werden entsprechend anders angekoppelt, z. B. per Gamma-Match.

Das Problem hierbei besteht darin, dass der Dipol nur für die Grundfrequenz richtig an die Speiseleitung angepasst ist. Schon früh suchte man deshalb nach Lösungen für dieses Problem. Aus diesem Grund experimentierte man mit der Ankopplung der Antenne außerhalb ihrer Mitte. Denn: Der Impedanzverlauf des Halbwellendipols entspricht der Spannungsverteilung. An den Enden ist die Antenne sehr hochohmig (ca. 2.500 Ω), in der Mitte ist sie niederohmig (ca. 50 Ω). Abbildung 18.7 zeigt Ihnen den Verlauf.

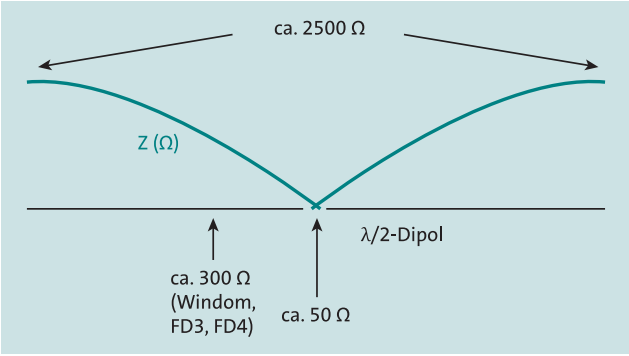


Abbildung 18.7 Impedanzverlauf des Halbwellendipols

Die Speisung eines Dipols in seiner Mitte stellt auch ein mechanisches Problem dar. Das Antennenkabel belastet mit seinem Gewicht zusätzlich die Antennenkonstruktion. Darüber hinaus kann sich dadurch die Speiseleitung mit ihrer dämpfenden Wirkung verlängern. Auch passt es bei mancher Örtlichkeit nicht, dass »so einfach« ein

Kabel »vom Himmel her« kommt. Auch aus diesem Grund haben außermittig gespeiste Antennen ihre Vorteile.

Fuchskreis/Fuchsantenne

Bei der *Fuchsantenne* wird der Antennenleiter (Halbwelle) direkt an den Abstimmkreis angeschlossen. Der Abstimmkreis sollte sich aber nicht am Funktisch befinden, sondern am Abspannpunkt der Antenne. Für den Selbstbau bietet sich die Fernsteuerung des Drehkondensators an. Abbildung 18.8 zeigt Ihnen die Konstruktionsdetails. Fuchskreise werden teilweise als Bausatz für den Portabelfunk angeboten.

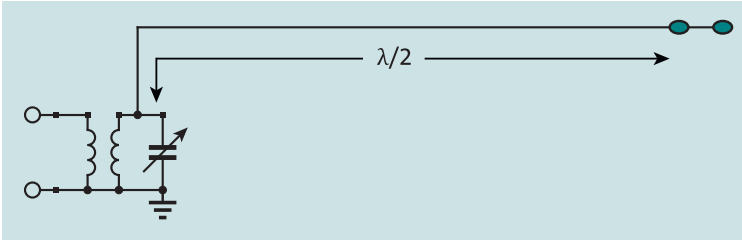


Abbildung 18.8 Fuchsantenne

Betreibt man die Anordnung nach Abbildung 18.8 mit einem Antennenleiter, der nicht $\lambda/2$ an Länge aufweist, spricht man von einer *Langdrahtantenne*.

Zeppelinantenne

Eine andere Form des Halbwellenstrahlers stellt die *Zeppelinantenne* (siehe Abbildung 18.9) dar. Anstelle des Abstimmkreises kommt bei ihr eine $\lambda/4$-Leitung hinzu, die die notwendige Transformation vornimmt. Die Abstimmung der »Hühnerleiter« erfolgt gegebenenfalls am Funktisch.

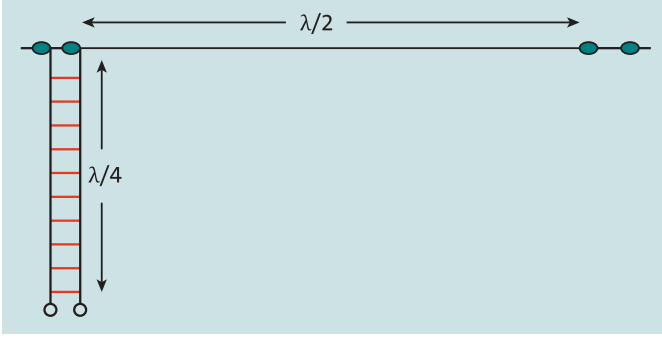


Abbildung 18.9 Zeppelinantenne

Windomantenne

Die *Windomantenne* (siehe Abbildung 18.10) verfügte in ihrer ursprünglichen Form über eine Eindrahtspeisung, die auf einer Dipolseite nach rund 0,2 λ angeschlossen war. Diese Speiseleitung strahlt selbst Hochfrequenz ab. In der heutigen Zeit wird diese Grundform nicht mehr verwendet. In zeitgemäßen Ausführungen trennt ein Breitbandübertrager den Antennenleiter und den Halbwellenstrahler in einen Ast mit zwei Drittel und in einen Ast mit einem Drittel der Länge. An dieser Stelle kann eine Impedanz von rund 300 Ω erwartet werden. Streng genommen darf man diese moderne Bauform nicht als »Windom« bezeichnen, in der Praxis wird diese Antenne aber trotzdem so genannt.

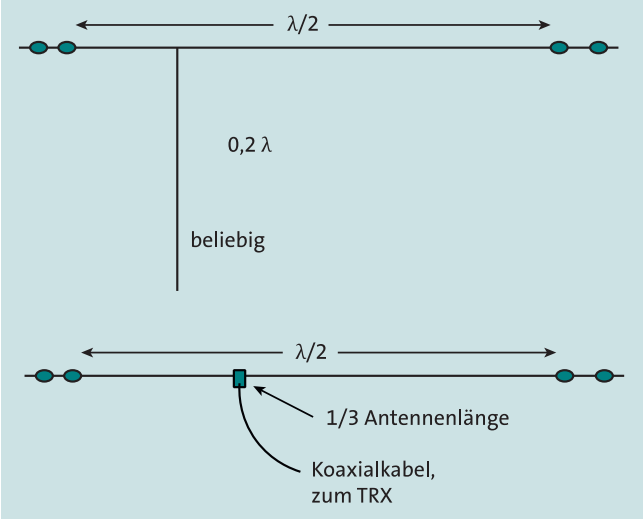


Abbildung 18.10 Windomantennen (alte und moderne Bauform)

Moderne endgespeiste resonante Multibandantenne EFHW (End Fed Half Wave)

Diese endgespeiste Antenne verwendet anstelle des Fuchskreises eine breitbandige Anpassung. Da hier ein hohes Übersetzungsverhältnis bei der Transformation (1:49, 1:50 oder noch höher) verwendet wird, eignet sich die Antenne für den Mehrbandbetrieb. Sie wird von verschiedenen Herstellern angeboten, den Transformator können Sie aber leicht selbst anfertigen. Wie alle Dipolantennen können diese waagrecht, senkrecht oder als Inverted V gespannt werden. Abbildung 18.11 zeigt eine Ausführung der Firma HyEndCompany aus den Niederlanden. Die Antenne ist knapp 12 m lang und arbeitet auf den Bändern 10 m, 20 m und 40 m. Diese Ausführung ist speziell für den Betrieb unterwegs mit Funkgeräten kleiner Leistung gedacht. Daher wurde für das 40-m-Band die Verkürzungsspule eingefügt. Es gibt Ausführungen, die mit 100 W und mehr belastbar sind.



Abbildung 18.11 HyEndFed für unterwegs

Bei diesem Antennentyp hat es sich bewährt, eine Mantelwellensperre, wie sie in Abbildung 21.1 gezeigt wird, ca. 2 m von der Einspeisung entfernt in die Zuleitung einzufügen.

Abbildung 18.12 zeigt Ihnen das Schaltungsprinzip. Der Antennenstrahler weist hier eine Länge von einer halben Wellenlänge der tiefsten Nutzfrequenz auf.

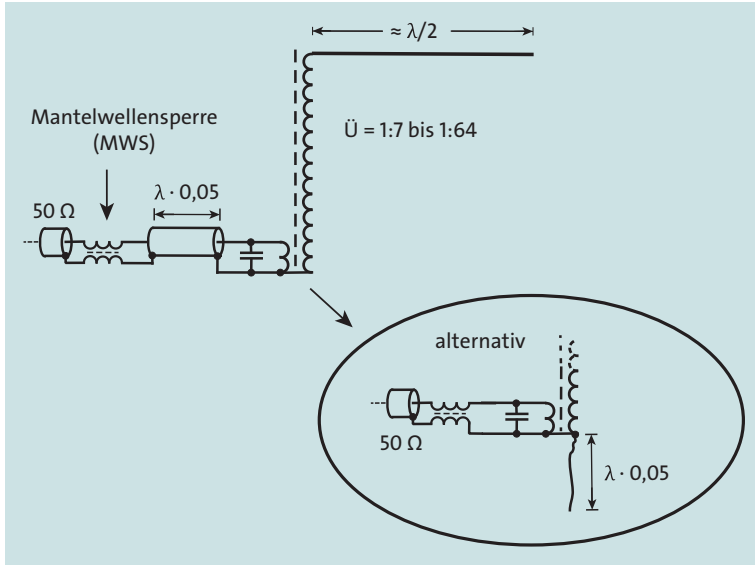


Abbildung 18.12 Schaltung einer EFHW

Die Übersetzungsverhältnisse variieren. Niedrige, wie 1:7 oder 1:9, erfordern überwiegend die zusätzliche Nutzung eines Antennentuners. Dies entfällt bei den hohen Verhältnissen, wie 1:49 bis 1:64. Kommerzielle Antennenhersteller verwenden überwiegend die hohen Übersetzungsverhältnisse. Das Innenleben eines UNUN zeigt Abbildung 22.9. In Abschnitt 18.3.2 wurde die Stromverteilung eines Dipols bei verschiedenen Resonanzfrequenzen dargestellt.

18.4 Dipol-Weiterentwicklungen: Trapantennen und W3DZZ

Sperrkreise (eng. *Trap*, dt. »Falle«) schneiden den am Antennenleiter entlanglaufenden Wellen im Resonanzfall den Weg ab. Damit kann man Mehrbandantennen konstruieren. Dieses Sperrkreisprinzip wird im Übrigen auch bei Vertikal- und Kurzwellenrichtantennen verwendet.

18.4.1 Die W3DZZ-Antenne

Eine bekannte Vertreterin der Trapantennen ist die W3DZZ, benannt nach dem Rufzeichen ihres Entwicklers. Die Grundkonstruktion sehen Sie in Abbildung 18.13. Für die Einspeisung können Sie auch einen 1:1-Breitbandübertrager zur Vermeidung von Mantelwellen einsetzen.

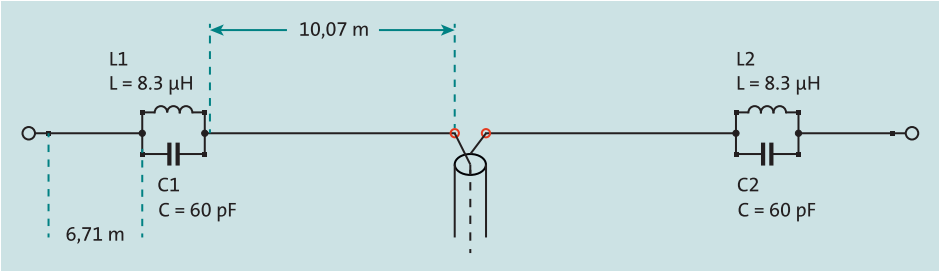


Abbildung 18.13 W3DZZ-Antenne

Die Besonderheit dieser Antenne besteht darin, dass sie mit nur einem Sperrkreis je Dipolschenkel auskommt. Dafür muss die Länge entsprechend passen. Die Antenne bedient die fünf klassischen Amateurfunkkurzwellenbänder (siehe Tabelle 18.2).

Band	Modus
80 m	λ/2
40 m	λ/2

Tabelle 18.2 Modi der W3DZZ

Band	Modus
20 m	3×λ/2
15 m	5×λ/2
10 m	7×λ/2

Tabelle 18.2 Modi der W3DZZ (Forts.)

Den Traps kommt hier eine besondere Rolle zu, da sie für mehrere Bänder bestimmend sind:

- **80-m-Band:** Hier besteht keine Sperrwirkung; die Traps wirken als induktive Verlängerung und stellen damit die Halbwellenresonanz her.
- **40-m-Band:** Hier besteht die volle Sperrwirkung, da die Traps für dieses Band abgestimmt sind. Die beiden Antennenleiter, die nach den Sperrkreisen folgen, bleiben außer Ansatz, es besteht Halbwellenresonanz.
- **20-m-Band bis 10-m-Band:** Die Sperrkreise lassen diese Frequenzen passieren. Dabei wirken sie aber leicht verkürzend (durch den Kondensator im Sperrkreis).

Abgesehen von der optimierten Bauweise für fünf Bänder können Sie eine solche Antenne, mit anderen Längenmaßen und Resonanzfrequenzen, immer als Zweibandantenne bemessen, z. B. für 160 m und 80 m. Das kürzere Band (also das mit der höheren Frequenz) liegt immer zwischen den Sperrkreisen. Die mechanische Länge sollte hier jener eines Halbwellendipols entsprechen.

18.4.2 Trapantennen allgemein

Sie können für jedes Band einen Sperrkreis setzen. Besonders für die »höheren« Kurzwellenbänder wird dies bei Dipolen, den Erregern von Richtantennen, aber auch bei Vertikalantennen so praktiziert. Nachteilig ist hier die zunehmende Einschränkung der nutzbaren Bandbreite dieser Antennen, besonders für das längste Band. Die Traps wirken dabei verlängernd, sodass die Antenne insgesamt kürzer gegenüber einem Halbwellendipol für die niedrigste Frequenz ausfällt.

Beachten Sie, dass die »inneren« Sperrkreise für das Band mit der höchsten Frequenz und damit kleinsten Wellenlänge in Resonanz sind. Anschließend folgt das nächstlängere Band, für das die nächsten beiden Traps resonant und damit sperrend sind. Nur für das längste Band gibt es keinen Sperrkreis.

Abbildung 18.14 zeigt Ihnen eine Dreibandantenne für 10 m, 15 m und 20 m. Im Handel erhalten Sie einen fertig konfektionierten Dipol, dessen Länge rund 8 m beträgt.

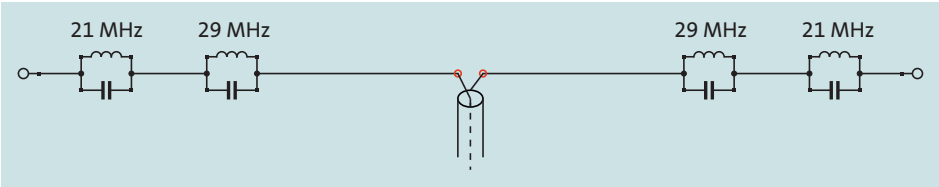


Abbildung 18.14 Mehrband-Trap-Dipol

18.5 Die G5RV-Antenne

Die G5RV-Antenne ermöglicht Mehrbandbetrieb. Die Länge der Hühnerleiter darf nicht verändert werden. Sie gehört zum Antennenkonstrukt.

Die Längen A und B (siehe Abbildung 18.15) ergeben zusammen die Länge eines Halbwellendipols. Die Impedanz beträgt 75 Ω. Sie können die Antenne an ein Koaxialkabel direkt anschließen, die Verwendung eines 1:1-Baluns ist empfehlenswert. Auch ein Antennenanpassgerät ist meist erforderlich.

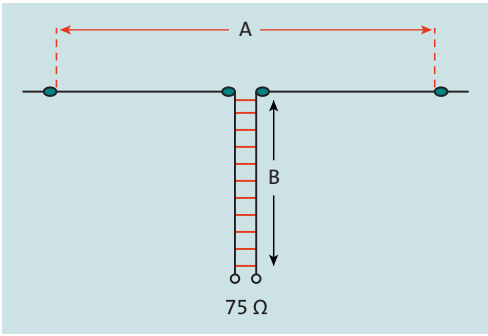


Abbildung 18.15 G5RV-Antenne

Die Längenangaben A und B hängen von der tiefsten genutzten Frequenz (d. h. der größten Wellenlänge) ab. Tabelle 18.3 zeigt Ihnen mögliche Maße für A und B.

Die Längenangaben B gelten für eine Hühnerleiter mit 450 Ω. Sie verkürzen sich etwas bei 300 Ω.

Abmessungen	Amateurfunkbänder		
	40 m – 10 m	80 m – 10 m	160 m – 10 m
A	16 m	31,2 m	63 m
B	5,2 m	10,3 m	20,6 m

Tabelle 18.3 Abmessungen der G5RV-Antenne

18.6 Der Faltdipol

Zwei halbwellenlange Antennenleiter werden parallel geschaltet und miteinander verbunden. Die Länge des zu verarbeitenden Antennenleiters entspricht etwa einer Wellenlänge. Der Abstand der beiden Leiter beträgt weniger als 0,05 λ. Damit erhalten Sie einen Faltdipol (siehe Abbildung 18.16). Im VHF/UHF-Bereich wird er als Erreger in Richtantennen geschätzt. Gegenüber dem gestreckten Dipol verfügt er über eine höhere Bandbreite. Die Eingangsimpedanz der Antenne beträgt 240 Ω. Der Faltdipol kann in der Mitte, also »gegenüber« seiner Einspeisung, geerdet werden (Blitzschutz). Hier befindet sich eine »Nullstelle« im Spannungsverlauf der Antenne, sodass keine Energie gegen Erde abfließt.

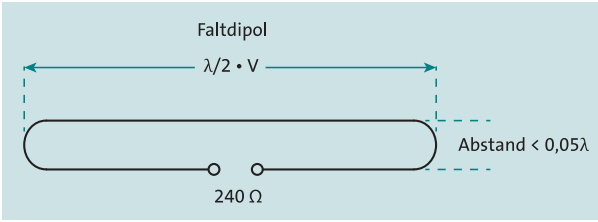


Abbildung 18.16 Faltdipol

18.7 Die Delta-Loop (Dreiecksschleife)

Die Delta-Loop-Antenne (siehe Abbildung 18.17) wird gerne für die langen Bänder eingesetzt. Sie kann als gleichschenkeliges Dreieck aufgebaut werden (Seitenlänge = $\lambda/3$, Gesamtlänge 1 × λ). Die Abstrahleigenschaften und Impedanzen hängen zum einen vom konkreten Aufbau (Ort der Einspeisung), zum anderen aber auch von der Form selbst (ungleichmäßiges Dreieck) ab.

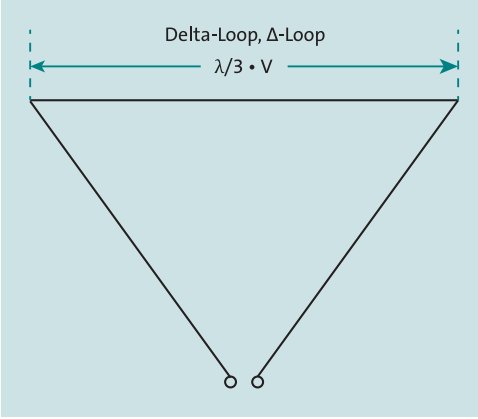


Abbildung 18.17 Delta-Loop-Antenne

18.8 Die Quadantenne

Diese Ganzwellenschleife weist vier Kanten mit je $\lambda/4$ als Länge auf. Das Quadrat kann entweder mit einer Längsseite oder auf einer Spitze stehend montiert werden (siehe Abbildung 18.18).

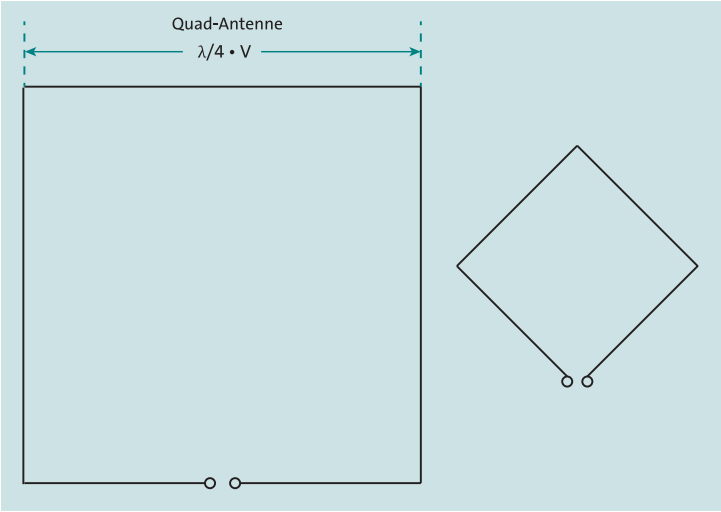


Abbildung 18.18 Quadantenne

Liegt die Einspeisung »unten«, so hat die Antenne eine horizontale Polarisation. Liegt sie um 90° versetzt seitlich, strahlt die Antenne vertikal polarisiert ab.

Gibt man dieser Antenne ein ähnlich großes Element hinzu, entsteht die *Qubical-Quad*.

18.9 Praxis: Drahtantennen bauen

Drahtantennen können Sie einfach und relativ kostengünstig selbst bauen. Allerdings müssen Sie auf gutes Material zurückgreifen.

Was Sie bisher nur angedeutet gesehen haben, sind die Isolatoren. Die Enden einer Drahtantenne müssen ja abgespannt werden, denn an einem Dipol herrschen teilweise hohe Spannungen an diesen Stellen. Daher muss vermieden werden, dass Sendeenergie auf die Befestigung überspringt.

Es gibt spezielle Antennenisolatoren (siehe Abbildung 18.19) und Klemmen für den Antennendraht. Diese Isolatoren bestehen aus Porzellan (»Antennen-Ei«) oder Kunststoff, der beständig gegen die ultraviolette Sonnenstrahlung ist. Holz kann feucht und damit leitend werden. Nicht UV-beständiger Kunststoff bricht ohne Vorwarnung nach einigen Monaten im Freien.

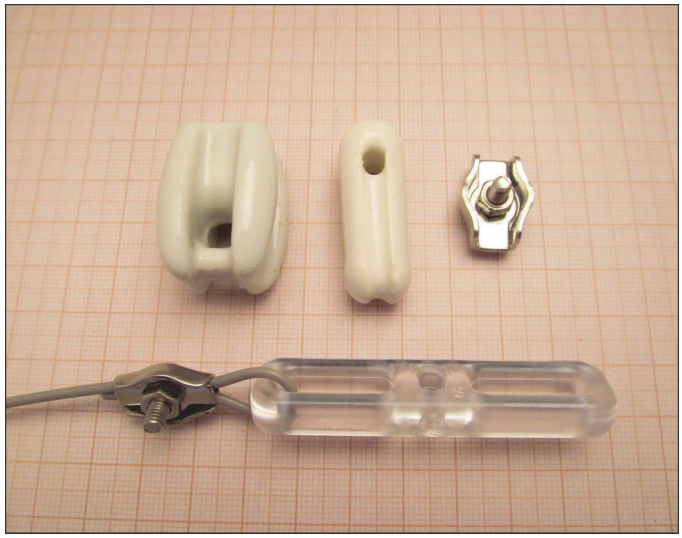


Abbildung 18.19 Antennenisolatoren und Drahtklemmen

Darüber hinaus ist die Auswahl des Antennendrahtes wichtig. Ein normaler Kupferdraht oder eine Lautsprecherlitze eignet sich nur für kurze Unterdachantennen, z. B. ein 5 m langer Dipol für das 10-m-Band. Zugfestigkeit, Leitfähigkeit und Schutz gegen Verwitterung/Korrosion müssen gewährleistet sein. Antennendraht wird im Fachhandel unter der Bezeichnung *Antennenlitze* geführt. Der Kern besteht aus hochzugfestem Kunststoff oder Edelstahl. Um diesen Kern herumgesponnen ist ein meist verzinntes Kupferdrahtgeflecht, der eigentliche Antennenleiter. Geschützt wird dieser durch eine UV-beständige Isolierung. Trotzdem haben diese Litzen ein geringes Metergewicht.

Ein leichtes Durchhängen einer Drahtantenne ist unschädlich für die Abstrahleigenschaften. Können sich Abspannpunkte z. B. bei Sturm bewegen, befestigen Sie ein Ende der Antenne fix, und das andere wird mit einem Abspannseil mittels Umlenkrolle und Spanngewicht gehalten. So darf sich dann auch ein Baum im Wind bewegen, und die Antenne nimmt keinen Schaden.

Abspannseile sind aus Kunststoff und müssen unbedingt eine hohe UV-Beständigkeit aufweisen. Prüfen Sie jeweils im Frühjahr und Herbst, ob diese Seile zu verwittern beginnen, auffasern oder nicht mehr reißfest sind.

18.10 Richtantennen

Richtantennen bündeln die hochfrequente Energie in eine Richtung. Auch umgekehrt, beim Empfang, werden Signale aus einer Richtung stärker empfangen.

Es gibt viele verschiedene Formen unter den Richtantennen. Parabolspiegel, Backfires, Cubical Quad, Beam und Yagi sind einige der Vertreter.

18.10.1 Aufbau von Yagi-Antennen

Eine Yagi-Antenne besteht mindestens aus einem Reflektor, dem Dipol (gestreckt oder Faltausführung) und einem Direktor.

Der *Reflektor* ist ca. 5 % länger als der Dipol. Auf dieser Seite der Antenne ist die »Strahlungskeule« nur sehr schwach ausgebildet. Der *Dipol* speist die Antenne. Der *Direktor* ist ca. 5 % kürzer als der Dipol. In seine Richtung bündelt sich die Energie bzw. das Empfangssignal. Die Direktoren sind mit ca. 0,1 λ Abstand vom Dipol und untereinander montiert. Der Reflektor wird mit ca. 0,2 λ vom Dipol entfernt angebracht. Abbildung 18.20 zeigt den Prinzipaufbau.

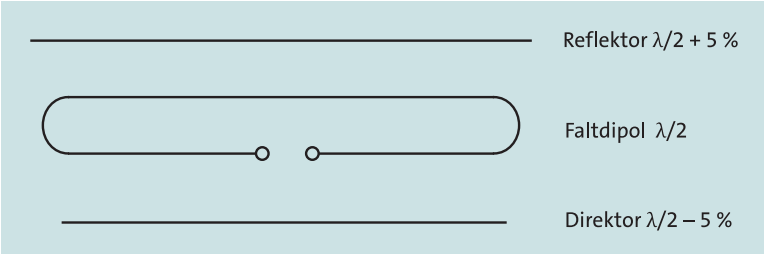


Abbildung 18.20 Prinzipaufbau einer Yagi-Antenne

18.10.2 Details zu Yagi- und Richtantennen

Zu den Richtantennen gibt es einige Grundlagen und Berechnungen. Interessant ist stets die Frage, was der Mehraufwand gegenüber einem Dipol an Signalgewinn wirklich einbringt. Dies kann man messen und berechnen. In der Praxis aber stellen sich andere Probleme.

Eine gute, mit vielen Elementen aufgebaute Richtantenne hat eine schlanke Strahlungskeule. Wenn Sie nun mit einer »Viel-Element-Yagi« an einem Funkwettbewerb teilnehmen, klappt das immer in eine Richtung ganz gut. Sie hören durch die schlanke Strahlungskeule aber die schwachen Signale links und rechts von ihr kaum oder gar nicht. Gleiches gilt für alles, was sich an der Rückseite der Antenne abspielt. Ein gutes Vor-Rück-Verhältnis lässt auch hier Signale nur sehr schwach oder eben nicht mehr wahrnehmbar an den Empfänger.

Ein Rotor läuft langsam. Wenn Sie also stets im Beinahe-Kreis mit der Antenne absuchen, kann Zeit verloren gehen. Abhilfe schafft die mehrfache Montage solcher Leistungsantennen. Sie werden umgeschaltet. So erhalten Sie in wenigen Sekunden einen »Rundumblick«.

Es bietet sich auch an, zum Erkunden weniger stark bündelnde Antennen, z. B. Doppel-Quads, zu verwenden. Aufgrund ihres Keulenbilds reichen vier, maximal fünf dieser Antennen aus. Die Hersteller geben hierfür einen Gewinn um die 10 dB bei einem Öffnungswinkel von rund 70° an. Sie sind für die Vormastmontage ausgelegt und ragen durchschnittlich 1 m vom Masten weg. Damit können Sie das jeweilige Band schnell auf eventuell vorhandene Funkpartner hin kontrollieren und gegebenenfalls die Richtantenne auf die Zielrichtung justieren.



Grundwissen zu Yagis und verwandten Richtantennen

- Yagi-Antennen werden meist im VHF/UHF-Bereich verwendet.
- *Parasitäre Elemente*: Dies ist eine Bezeichnung für den Reflektor und die Direktoren. Diese geraten in Resonanz. Sie strahlen einen Teil der aufgenommenen Leistung phasenverschoben wieder ab. Beim Reflektor tritt eine Phasenauslöschung ein. Die Direktoren formen durch die Anhebung der Feldstärke die Hauptstrahlrichtung.
- Die *Zahl der Direktoren* verringert die Keulenbreite.
- Die *Impedanz* des Faltdipols sinkt durch das Hinzufügen von Reflektor und Direktor(en) von 240 Ω auf rund 50 Ω oder weniger. Dies wird auch durch die Abstände zwischen dem Reflektor und den Direktoren bestimmt.
- Die *Halbwertsbreite* (der *Öffnungswinkel*) beschreibt den Winkelbereich, in dem die Feldstärke und Leistungsdichte um maximal 3 dB absinken. Bei der Feldstärke entspricht dies dem 0,707-fachen, bei der Leistungsdichte dem 0,5-fachen des Maximums.
- *Hauptkeule*: Das ist die Hauptstrahlrichtung der Richtantenne.
- *Nebenkeule(n)*: nicht beabsichtigte »Nebenzipfel«, »Nebenstrahlrichtungen«
- *Rückkeule*: der Bereich entgegengesetzt der Hauptkeule
- Das *Vor-Rück-Verhältnis* gibt das Verhältnis der Signalpegel zwischen der Hauptkeule und hinter dem Reflektor an. Je höher das Verhältnis ist, desto besser bündelt die Antenne.
- Der *Antennengewinn* errechnet sich aus dem Verhältnis der Leistung, die an der Hauptkeule gemessen wird, und der Leistung, die am speisenden Dipol anliegt.
- Das *Richtdiagramm* zeigt die gemessene Richtwirkung mit Haupt- und Nebenkeulen im Kreis an.
- Öffnungswinkel: Eine Antenne hat einen *horizontalen* und einen *vertikalen Öffnungswinkel*.

Damit Sie Größen wie Antennengewinn und das Vor-Rück-Verhältnis ermitteln können, vergleichen Sie die Strahlungsdiagramme von Dipol und Richtantenne (siehe Abbildung 18.21). Sie sehen deutlich, dass der Dipol zwei gleichmäßig ausgeformte

Strahlrichtungen aufweist (schwarz), wohingegen die Richtantenne (blau) eine stark ausgebildete Hauptkeule und eine sehr kleine Rückkeule besitzt.

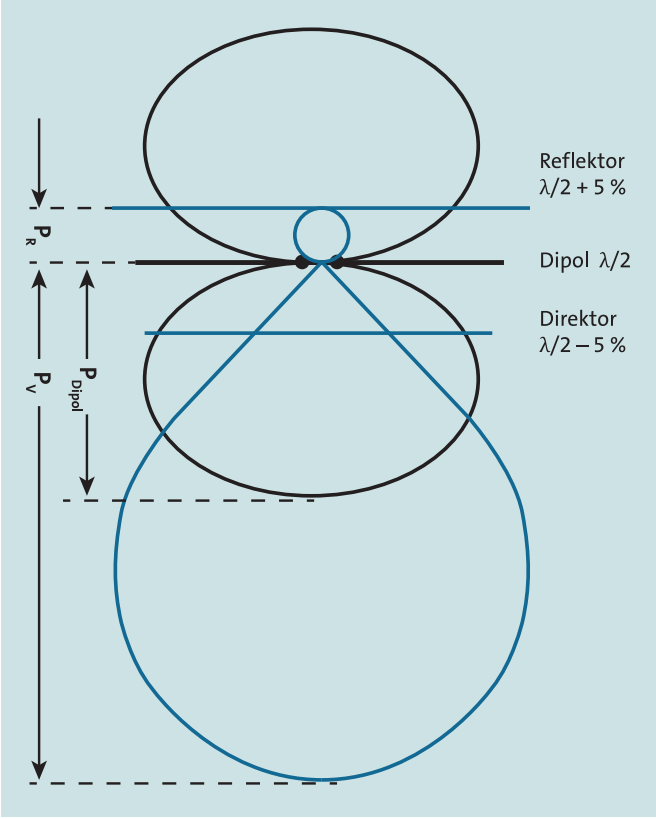


Abbildung 18.21 Strahlungskeulen eines Dipols und einer Richtantenne im Vergleich

Das Vor-Rück-Verhältnis wird durch das Verhältnis zwischen der Leistung oder Spannung an der Hauptkeule (vorwärts) und der Rückkeule (rückwärts) ausgedrückt:

$$\text{Vor-Rück-Verhältnis} = \frac{P_{\text{vorwärts}}}{P_{\text{rückwärts}}}$$

Übung

Ihnen liegen folgende Messergebnisse vor:

- Richtantenne vorwärts: 250 µV/m
- Richtantenne rückwärts: 15 µV/m

Gesucht ist das Vor-Rück-Verhältnis in dB.

Lösung:

Zuerst erinnern Sie sich, dass bei Spannungsvergleichen mit 20 multipliziert werden muss (siehe Abschnitt 2.4)!

Sie verwenden diese Formel:

$$\text{Vor-Rück-Verhältnis (dB)} = 20 \times \text{LOG} \times \left(\frac{\text{Feldstärke } (\mu\text{V/m})_{\text{vorwärts}}}{\text{Feldstärke } (\mu\text{V/m})_{\text{rückwärts}}}\right)$$

In den Taschenrechner geben Sie dies wie folgt ein:

- [LOG] [(] 250 [÷] 15 [)] [×] 20 [=]

  Alternativ:

- [(] 250 [÷] 15 [)] [LOG] [×] 20 [=]

Das Ergebnis (gerundet) lautet jeweils 24,44 dB.

Berechnung des Antennengewinns einer Richtantenne

Das Vor-Rück-Verhältnis wird durch das Verhältnis zwischen der Leistung oder Spannung an der Hauptkeule (vorwärts) und dem Dipol ausgedrückt.

$$\text{Gewinn} = \frac{P_{\text{vorwärts}}}{P_{Dipol}}$$

Ein weiteres Berechnungsbeispiel liefert Ihnen folgende Messergebnisse:

- Richtantenne vorwärts: 250 µV/m
- Dipol: 100 µV/m

Gesucht: Antennengewinn **in dB**

Für die Lösung der Aufgabe verwenden Sie diese Formel:

$$\text{Antennengewinn (dB)} = 20 \times \text{LOG} \times \left(\frac{\text{Feldstärke } (\mu\text{V/m})_{\text{vorwärts}}}{\text{Feldstärke } (\mu\text{V/m})_{\text{Dipol}}}\right)$$

In den Taschenrechner geben Sie dies wie folgt ein:

- [LOG] [(] 250 [÷] 100 [)] [×] 20 [=]

  Alternativ:

- [(] 250 [÷] 100 [)] [LOG] [×] 20 [=]

Das Ergebnis (gerundet) lautet 7,96 dB.

Die Halbwertsbreite (den Öffnungswinkel) ermitteln Sie anhand des Strahlungsdiagramms der Antenne. Falls dieses nur als Messblatt (siehe Abbildung 18.22) zur Verfügung steht, nehmen Sie einen Zirkel zur Hand.

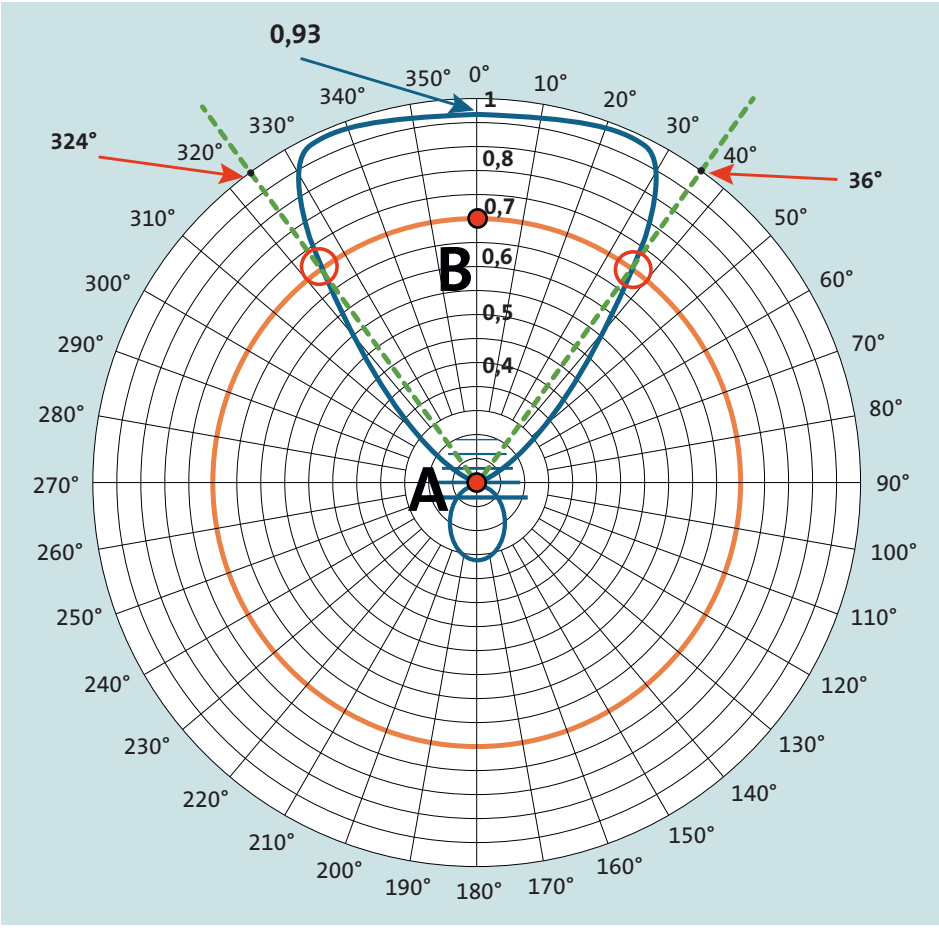


Abbildung 18.22 Strahlungsdiagramm der Richtantenne

Das Strahlungsdiagramm zeigt die Verhältnisse einer Rundummessung (360°). Im Messblatt sind die Feldstärke und die Antenne blau.

- Ermitteln Sie den Maximalwert auf der senkrechten Achse, hier: 0,93.
- Berechnen Sie hieraus 70 %: 0,93 [×] 70 % [=] 0,65
- Stechen Sie die Zirkelspitze in die Mitte des Diagramms (Punkt A), und stellen Sie die Mine auf den Wert 0,65 (Punkt B) des Kreisgitters ein. Im Diagramm ziehen Sie damit einen Kreis (im Bild: orange).
- Ermitteln Sie die Schnittpunkte des Kreises (im Bild: orange) mit dem Feldstärkeverlauf (im Bild: blau); hier als rote Kreise dargestellt.

- Vom Mittelpunkt durch die Schnittpunkte (rote Kreise) bis zum Diagrammrand zeichnen Sie zwei Geraden (im Bild: grün).
- Lesen Sie die beiden Winkel auf jeder Seite (324°, 36°) ab.
- Berechnen Sie den 3-dB-Öffnungswinkel: 360 [−] 324° [=] 36° (linke Seite) und 0 [+] 36° (rechte Seite) ergeben zusammen 72°.

18.10.3 Parabolspiegelantennen

Parabolspiegelantennen sind besonders für den Zentimeter- und Millimeterwellenbereich geeignet. Bei kompakter Größe bieten sie neben einer eng gebündelten Abstrahlung auch einen hohen Antennengewinn. Der Spiegel selbst dient dabei als Reflektor, während ein Dipol, Helix- oder Hornstrahler als eigentliche Antenne (*Feed*) fungiert. Der Feed kann vor dem Spiegel montiert werden, was aber Abschattungen durch die Feed-Halterung und den Feed selbst ergibt. Beim *Offset-Spiegel* hingegen ist der Feed nach außen abgesetzt montiert, was diese Nachteile vermeidet.

Zur Berechnung des Antennengewinns benötigen Sie wenigstens folgende Angaben:

- Spiegeldurchmesser D in m
- Arbeitsfrequenz in GHz

Für überschlägige Berechnungen kann für die wirksame Antennenfläche A deren geometrische Fläche angesetzt werden. Für den Wirkungsgrad (Aperturеffizienz) η_{eff} nehmen Sie den Wert 1 an. In Wirklichkeit liegt dieser Wert jedoch niedriger, nämlich zwischen 0,5 und 0,7.

Der Gewinn g wird mit dieser Formel ermittelt:

$$g(dBi) = 10 \times \log\left(\frac{\pi \times D \times \sqrt{\eta_{\text{eff}}}}{\lambda}\right)^2$$

oder alternativ mit:

$$g(dBi) = 20 \times \log\left(\frac{\pi \times D \times \sqrt{\eta_{\text{eff}}}}{\lambda}\right)$$

Beispiel: Die Betriebsfrequenz beträgt 10,4 GHz, der Spiegeldurchmesser ist 1,00 m. η_{eff} wird mit 0,7 angegeben.

Zuerst wird die Wellenlänge λ berechnet. Um sich dabei die Tipparbeit mit dem Taschenrechner zu sparen, werden die Ausbreitungsgeschwindigkeit in $^{\text{Gm}}/_{\text{s}}$ und die Frequenz in GHz angegeben. Die Werte werden in die Formel eingesetzt:

$$\lambda = \frac{0{,}3\ ^{\text{Gm}}/_{\text{s}}}{10{,}4\ \text{GHz}} = 0{,}0288\ \text{m}$$

Anschließend wird der Gewinn *g* mit der zweiten Formel berechnet:

20 × LOG (π × 1 × √ 0,7 → ÷ 0,0288) =

Bei anderen Modellen kann die Eingabe auch anders funktionieren:

(0,7 √ × (π × 1 ÷ 0,0288)) LOG × 20 =

Als Ergebnis erhalten Sie, dass der Gewinn *g* 39,2 dBi beträgt.

18.11 Vertikalantennen und Rundstrahlantennen

Rundstrahlantennen für den VHF- und UHF-Bereich sind vor allem für den Funkverkehr im näheren Umkreis empfehlenswert. Viele der umliegenden Relaisstationen werden damit erreicht, aber auch Mobilstationen und natürlich feste Amateurfunkstellen. Im Kurzwellenbereich bieten Rundstrahlantennen weltweite Verbindungen.

Vertikalantennen werden meist aus Rohren oder anderen selbsttragenden Materialien angefertigt. Selbstverständlich können Sie vertikale Drahtantennen anfertigen. Diese fädeln Sie an einem GFK-Rohr auf. Vertikalantennen mit einem einzigen Element arbeiten als Rundstrahler. Sie benötigen weder einen Rotor noch haben sie, wenn die Antenne frei steht, eine oder mehrere Vorzugsrichtungen.

Die meisten Rundstrahlantennen zählen zu den unsymmetrischen Antennen. Bedenken Sie aber, dass Sie besonders auf den höheren Bändern auch Vertikaldipole benutzen können – die sind aber wiederum symmetrisch!

Vertikalantennen, deren Strahlerlänge unter $\lambda/2$ beträgt, benötigen ein elektrisches Gegengewicht. Diese Gegengewichte werden als *Radiale* bezeichnet. Auch diese sollten auf die Betriebsfrequenz abgestimmt sein. Genau genommen bilden der Strahler und das Gegengewicht wiederum einen Dipol. Kann der Strahler auf einem Blechdach, einer »Salzwiese« oder, bei VHF/UHF, an einer Fahrzeugkarosserie aus Metall angebracht werden, entfallen die Radiale.

Vertikalantennen

- Vertikalantennen weisen einen flachen Abstrahlwinkel auf,
- verfügen über elektrische Gegengewichte, die als Radiale bezeichnet werden, und
- zählen zu den unsymmetrischen Antennen.
- Groundplane-Antennen weisen eine Impedanz zwischen 30 Ω und 50 Ω auf.

Eine *Groundplane*-Antenne verfügt über drei oder vier Radiale. Die Anzahl der Radiale und deren Winkel zum Strahler bestimmen die Impedanz. Die Ausführung mit drei Radialen (siehe Abbildung 18.23) hat ein kleeblattförmiges Richtdiagramm (siehe Abbildung 18.24). Die Radiale stehen im Winkel von 120° zueinander.

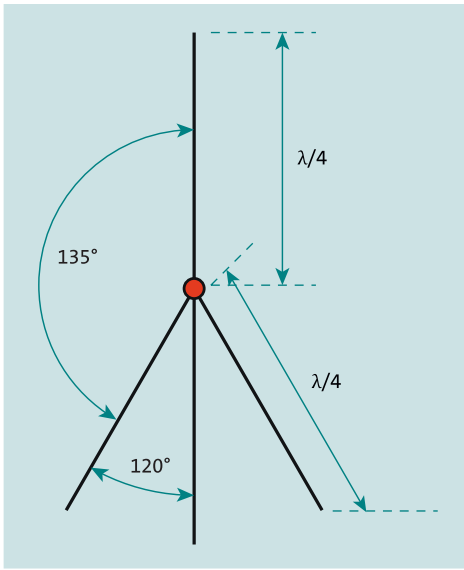


Abbildung 18.23 Groundplane-Antenne mit drei Radialen

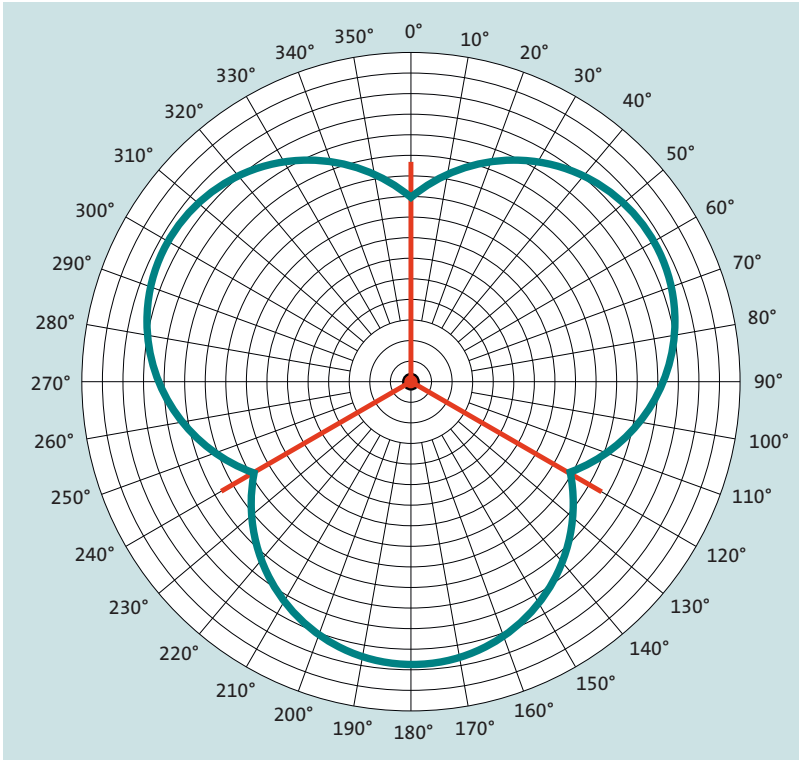


Abbildung 18.24 Groundplane-Antenne mit drei Radialen, Richtdiagramm

Sie erkennen im Richtdiagramm deutlich, wie die Radiale die Abstrahlung beeinflussen. Über schlechtem Grund bzw. ohne Radiale würde der größte Teil der Sendeenergie durch Steilstrahlung verloren gehen.

Groundplane-Antennen können auch vier Radiale aufweisen, was ein Richtdiagramm hervorruft, das einem vierblättrigen Kleeblatt ähnelt. Die Radiale haben zueinander einen Winkel von 90°. Sie können den Vertikalstrahler etwas länger als $^{\lambda}/_{4}$ bauen, z. B. $^{5}/_{8}$ λ. Damit verbessern Sie die flache Abstrahlung, die für den Weitverkehr von Vorteil ist. Die Anpassung für den Sender stellen Sie mit einem Kondensator her. Abbildung 18.25 zeigt Ihnen eine Groundplane-Antenne mit vier Radialen und einem Verkürzungskondensator.

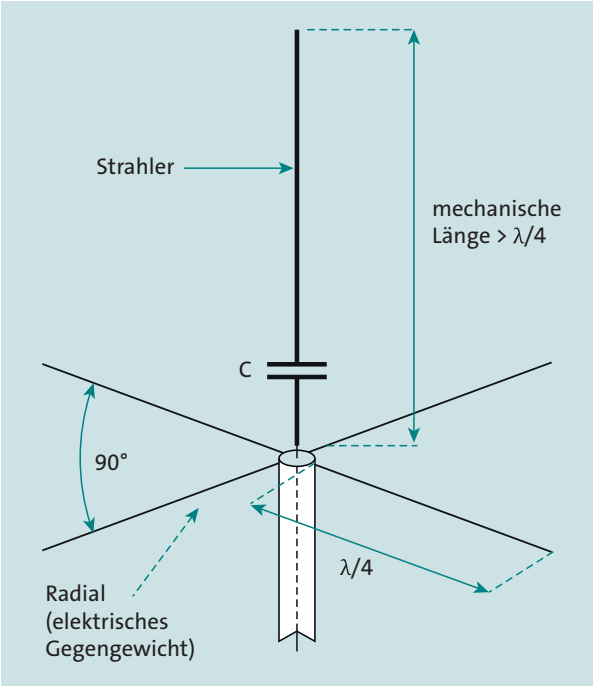


Abbildung 18.25 Groundplane-Antenne mit vier Radialen und verlängertem Strahler

Kurzwelle: In der Praxis können Sie die Hälfte eines Trap-Dipols als Vertikalstrahler verwenden. Viele Antennenhersteller bieten solche Antennen auch an. Sie sollten für jedes Band drei möglichst gleichförmig verteilte Drahtradiale verwenden.

Ein Vertikalstrahler mit einer Länge von $^{5}/_{8}$ λ weist die besten Abstrahleigenschaften auf. Im höheren Kurzwellenbereich, aber auch für VHF/UHF (hier: Mobilantennen) wird diese Bauform gerne verwendet. Abbildung 18.26 zeigt den Aufbau eines $^{5}/_{8}$ λ-Strahlers, wie man ihn als Mobilantenne kennt. Hier übernimmt die Feder die Aufgabe einer Induktivität. Selbstverständlich benötigt diese Antenne entweder Ra-

diale, einen gut leitenden Untergrund (»Salzwiese«) oder eine große metallische Fläche (Karosserie, Blechdach).

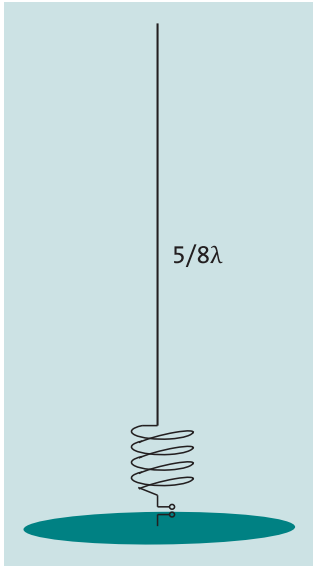


Abbildung 18.26 5/8λ-Strahler

Die Urform des Vertikalstrahlers ist die *Marconi-Antenne* (siehe Abbildung 18.27). Diese Antenne wird gegen Erde erregt und hat eine Länge von $\lambda/4$. Sie wird zur Groundplane, wenn man ihr Radiale spendiert.

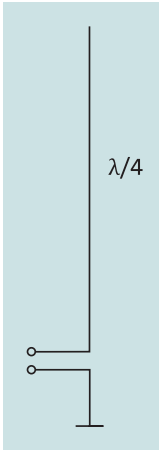


Abbildung 18.27 Marconi-Antenne, λ/4-Strahler

Verwenden Sie einen $\lambda/2$-Strahler als Vertikalantenne (siehe Abbildung 18.28), so müssen Sie wie beim endgespeisten Dipol auch im Spannungsbauch, also bei einer sehr

hohen Impedanz (ca. 2.500 Ω) einspeisen. Sie können dazu einen Fuchskreis oder einen *UNUN* mit 1:49 verwenden. Diese Antenne benötigt keine Radiale. Eine Antenne wie die HyEndFed können Sie so auch als vertikale Portabelantenne mit einem Glasfibermast verwenden.

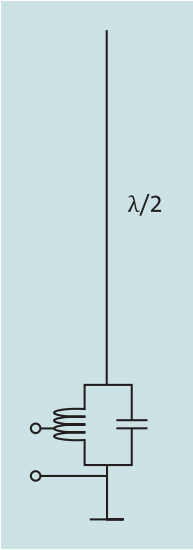


Abbildung 18.28 λ/2-Vertikalstrahler

Im VHF/UHF-Bereich ist der *Sperrtopf* (siehe Abbildung 18.29) eine beliebte Rundstrahlantenne. Seine Gesamtlänge beträgt 0,75 λ.

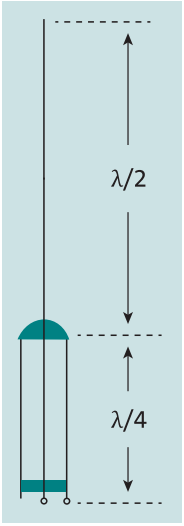


Abbildung 18.29 Sperrtopf-Antenne

18.12 Praxis: Besondere Antennenformen

18.12.1 Magnetische Ringantennen

Magnetische Ringantennen weisen einen Umfang von mindestens 0,10 λ, höchstens aber 0,2 λ auf. Damit sind sie relativ klein in Bezug auf die Wellenlänge.

Beim Bau dieser Antennen zu Sendezwecken benötigen Sie einen Abstimmkondensator mit hoher Spannungsfestigkeit, also großem Plattenabstand. Zudem müssen alle Übergänge zwischen den Komponenten sehr sauber hergestellt werden. Es fließen sehr hohe Ströme, selbst bei 10 Watt Speiseleistung. Die Antenne sollte beim Senden auf keinen Fall berührt werden, da insbesondere beim Abstimmkondensator die hohe Spannung anliegt!

Aufgrund des starken magnetischen Feldes in der unmittelbaren Umgebung der Antennen sollten sich hier weder Menschen noch Tiere aufhalten. Natürlich sollten solche Antennen auch einen Abstand zu elektronischen Geräten einhalten. Verwenden Sie deshalb eine Fernabstimmung. Diese kann mit einem Getriebemotor am Drehkondensator (siehe Abbildung 18.30) oder einem Modellbauservo umgesetzt werden.



Abbildung 18.30 Abstimmkondensator für magnetische Ringantennen

Auch Schrittmotore sind möglich. Alle Fernabstimmantriebe müssen mit der Kondensatorachse isoliert verbunden werden. Der in Abbildung 18.30 gezeigte Abstimmkondensator verfügt über einen Kapazitätsbereich von 15 bis 430 pF bei 2,3 kV Spannungsfestigkeit.

Viele magnetische Antennen bestehen aus einer Koppelschleife (siehe Abbildung 18.33), dem eigentlichen Antennenring und dem Drehkondensator. Auch wenn die Theorie am besten ofenrohrdicke Antennenleiter verlangt, funktionieren auch solche aus dickem, foliengeschirmtem Antennenkabel oder Heizungsrohr. Die runde Form (wie in Abbildung 18.31) ist anzustreben, ist aber nicht Pflicht (siehe Abbildung 18.32).



Abbildung 18.31 Antennenleiter aus Kupferrohr



Abbildung 18.32 Aufbau aus Kupferrohr, Koppelschleife und Fernabstimmung

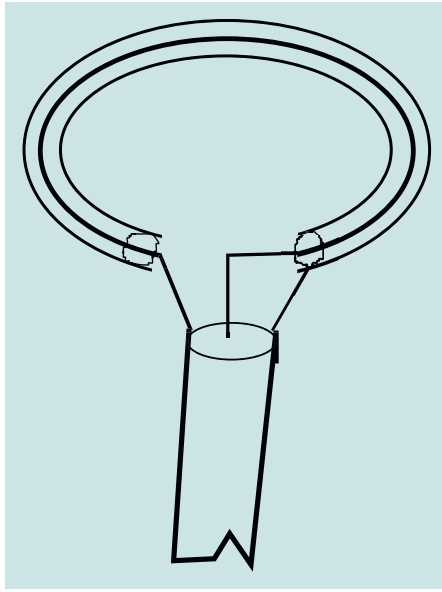


Abbildung 18.33 Koppelschleife

Tabelle 18.4 zeigt Ihnen zu Ihrer Orientierung die Abmessungen bei kreisförmigem Aufbau unter Verwendung des in Abbildung 18.30 gezeigten Drehkondensators.

Bänder	Umfang des Rahmens	Umfang der Koppelschleife	Durchmesser
20 m – 10 m	2,10 m	0,43 m	0,70 m
40 m – 15 m	2,85 m	0,57 m	0,90 m
40 m – 20 m	4,30 m	0,90 m	1,35 m
80 m – 40 m	8,60 m	1,75 m	2,75 m

Tabelle 18.4 Abmessungen für Ringantennen

Magnetische Ringantennen haben ein anderes Richtdiagramm (siehe Abbildung 18.34), als Sie es vermutlich erwartet haben: Diese Antennen strahlen entlang des Leiters und nicht wie eine Induktivität. Sie können solche Antennen stehend betreiben. Das Strahlungsdiagramm ähnelt dem eines Dipols. Liegend montiert, strahlen sie flach ab wie Vertikalstrahler.

Neben der Speisung mittels Koppelschleife ist auch die rein kapazitive Kopplung (siehe Abbildung 18.35) möglich. Sie benötigen hierzu einen zweiten Drehkondensator, ebenso fernbedient. Der Abstimmkondensator (C2) verfügt über zwei Statorpakete, die über das Rotorpaket praktisch einen Doppelkondensator bilden. Der verwendete

Typ aus der Schemazeichnung hat 2 × 15 – 280 pF bei 4 kV Spannungsfestigkeit. Der Koppelkondensator C1 entspricht dem der gerade besprochenen Ausführung. Für den Bereich von 20 bis 10 m muss der Ring einen Umfang von 3 m (ca. 95 cm Durchmesser) aufweisen.

Der Vorteil dieser Ankopplungsart besteht darin, dass Sie keine Koppelschleife aufbauen müssen.

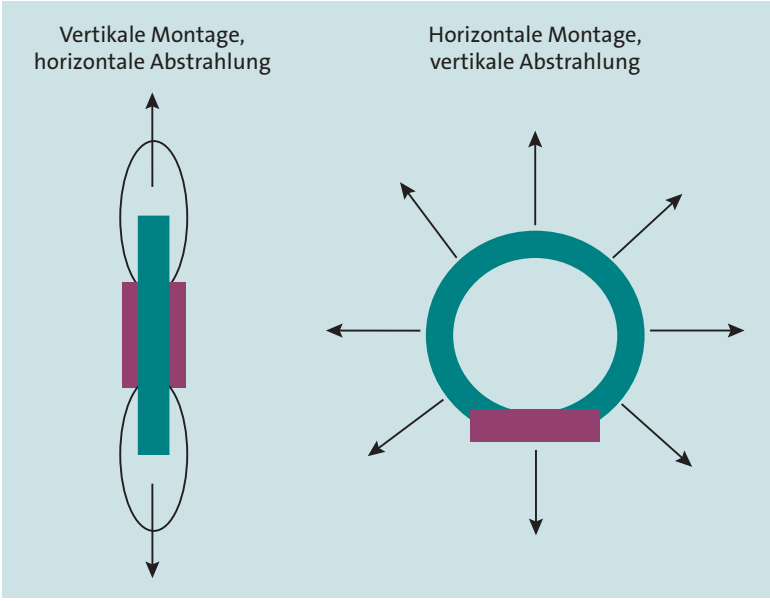


Abbildung 18.34 Magnetische Ringantenne, Abstrahlung

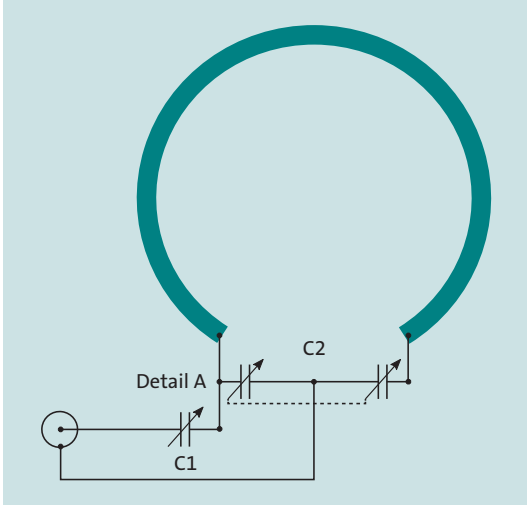


Abbildung 18.35 Alternativer Aufbau einer magnetischen Ringantenne

Magnetische Ringantennen

Magnetische Ringantennen

- ermöglichen Funkbetrieb bei eingeschränkten Platzverhältnissen, aber auch für den Portabelbetrieb,
- benötigen maximal 0,2 λ an Umfang,
- sind sehr schmalbandig und müssen teilweise alle 50 kHz nachgestimmt werden,
- erreichen in der Regel nicht (ganz) den Gewinn eines Dipols,
- unterdrücken unerwünschte Nebenaussendungen sehr effektiv und
- entlasten den Empfängereingang durch die hohe Güte.
- Im Nahbereich ist nur die magnetische Komponente aktiv, daher gibt es fast keine Aufnahme von elektrischen Nahfeldstörungen!

Halten Sie genügend Abstand, wenn mit solchen Antennen gesendet wird!

18.12.2 Aperiodische Antenne: die T2FD (Tilted Terminated Folded Dipole)

Die T2FD-Antenne (siehe Abbildung 18.37) ist eine mit einem Leistungswiderstand abgeschlossene Antenne. Sie ähnelt einem Faltdipol, überstreicht aber einen großen Frequenzbereich (Verhältnis 5:1). Dieser Antennentyp ist nicht resonant, der Schluckwiderstand (siehe Abbildung 18.36) wandelt einen Teil der Sendeenergie (bis zu 40 %) in Wärme um. Gespeist wird die Antenne über einen 1:6-Balun. Umgekehrt sorgt die Antenne für ruhigeren Empfang.

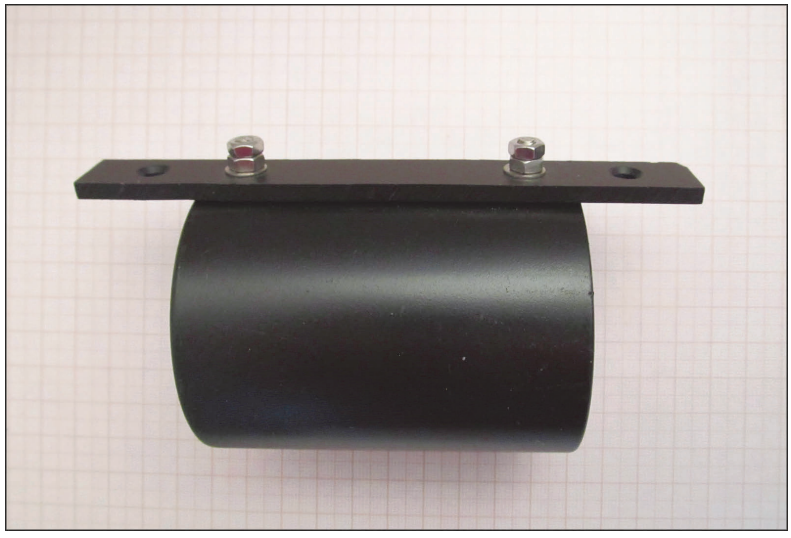


Abbildung 18.36 Widerstand für T2FD-Antenne (390 Ω)

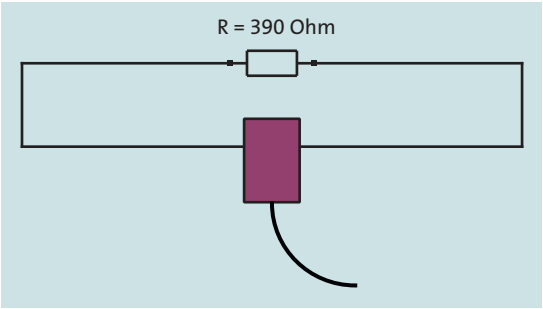


Abbildung 18.37 T2FD-Antenne

Diese Antenne gehört zu den wohl am meisten umstrittenen Bauformen:

- Sie ist einfach aufzubauen, es ist kein Abgleich notwendig.
- Empfangssignale werden abgeschwächt, was auf Bändern mit starken Signalen aber den Empfänger entlastet.
- Empfangsrapporte liegen, je nach Länge der Antenne, 1 bis 3 S-Stufen niedriger gegenüber einem Dipol.
- Ihre maximale Länge ist umstritten: $\lambda/2$ der tiefsten Frequenz (Die Fachliteratur nennt $1/3$ λ, Erfahrungen vieler Anwender weisen aber auf die Notwendigkeit der größeren Länge hin.)

18.13 Verkürzung von Antennen

Eine Kurzwellenantenne kann recht sperrige Ausmaße erreichen. Es gibt aber Möglichkeiten, Antennen mechanisch zu verkürzen (siehe Abbildung 18.38):

- **Induktiv**: Fügen Sie eine Spule ein. Diese sollte sich aber nicht im Strombauch befinden (»Strom strahlt«). Im Spannungsbauch ist die Auswirkung nicht so hoch bezüglich des Abstrahlungsverhaltens. Die Verkürzung (elektrische Verlängerung) mittels Spule führt zu einer Beschränkung der Bandbreite der Antenne.
- **Kapazitiv**: Verlängern Sie die Antenne mit einer Dach- bzw. Endkapazität. Hier genügt oft schon ein Stückchen Draht oder Rohr. Diese Maßnahme führt zu einer Bandbreitenbeschränkung, allerdings nicht in dem Maße wie bei der Verwendung von Spulen.
- Jede Verkürzung bewirkt, dass weniger Sendeleistung von der Antenne abgestrahlt wird. Entscheidend ist hier vor allem die Anbringung von Induktivitäten.

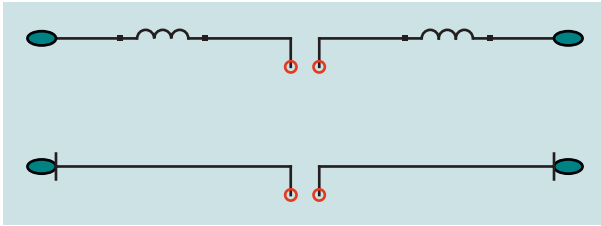


Abbildung 18.38 Verkürzungsmöglichkeiten

Bei Mobilantennen (besonders für Kurzwelle) stellt die Verkürzung ein Spannungsfeld zwischen mechanischen und elektrischen Anforderungen dar:

- Handelt es sich um einen Viertelwellenstrahler oder $^5/_8$ λ-Strahler und liegt die Spule ganz unten, eventuell sogar im Fußteil integriert, so ist das mechanisch die beste Lösung. Der Schwerpunkt der Antenne liegt unten, die (Federstahl-)Rute löst bei der Fahrt keine so großen Biegemomente aus. Allerdings befindet sich die Speisung im Strombauch – und hier läge auch die Spule, was die Abstrahlung behindert.
- Liegt die Spule in der Mitte, kann die Antenne bei der Fahrt schwanken und sich in Kurven schon einmal neigen. Die Abstrahlung der hochfrequenten Sendeenergie aber klappt besser.
- Mit einer Spule am oberen Ende der Antenne bekommt man ein schwankendes Gebilde. Die Kräfte wirken sehr auf den Fuß und das umliegende Karosserieblech ein. Allerdings wird mit dieser Konstruktion am wenigsten Sendeenergie in der Spule »verbraten«. Eine bekannte Konstruktion dieser Art ist die DV27 S mit ca. 1,4 m Länge. Sie wird zwar für den CB-Funk hergestellt, ist aber durch Kürzen für das 10-m-Band nutzbar. Haben Sie ein längeres Federstahlteil parat, funktioniert die Antenne auch für 24 MHz und 21 MHz.

18.14 Polarisation von Antennen

Wie schon gezeigt wurde, können viele Bauformen der Antennen horizontal (also waagrecht) oder vertikal (senkrecht) montiert werden. Dabei ändert sich jeweils die Polarisation. Die Angabe der *Polarisation* ergibt sich aus der Ausrichtung der elektrischen Feldkomponente in der Hauptstrahlrichtung in Bezug auf die Erdoberfläche.

Besonders im VHF/UHF-Bereich gilt:

- **Horizontal polarisierte Antennen** dienen Weitverbindungen in den Sendearten SSB und den digitalen Betriebsarten.

- **Vertikal polarisierte Antennen** dienen Verbindungen in der Sendeart FM. Damit Mobilstationen in Fahrzeugen mit einfachen Antennen betrieben werden können (Stabantenne), wurde dies so festgelegt.
- **Zirkular polarisierte Antennen** dienen u. a. dem Satellitenfunk. Hierbei wird eine *Kreuz-Yagi* verwendet. Kreuz-Yagis bestehen aus zwei um 90° versetzt montierten Yagi-Antennen. Jede dieser Antennen kann für sich allein arbeiten. Um nun eine zirkulare Abstrahlung zu erreichen, muss für eine der Antennen die Welle um λ/4 verzögert werden. Dies erreichen Sie, indem Sie entweder eine Viertelwellenverzögerungsleitung einfügen oder die beiden Antennen mechanisch um eine Viertelwelle versetzen.

Auf Kurzwelle geht bei der Raumwelle die von der Antenne geprägte Polarisation verloren. Die zurückfallenden Wellen sind überwiegend elliptisch polarisiert.



Abbildung 18.39 Horizontal montierte LPDA-Antenne



Abbildung 18.40 Vertikal montierte LPDA-Antenne

Abbildung 18.39 und Abbildung 18.40 zeigen eine *logarithmisch-periodische Dipolantenne* (LPDA) für das 2-m- und das 70-cm-Band. (Diese kompakten und dennoch leistungsfähigen Antennen eignen sich auch für den Portabeleinsatz.)

18.15 Installation von Sendeantennen

Bringen Sie Sendeantennen so weit wie möglich von anderen elektrischen Leitungen, Antennen- und Fernmeldeleitungen entfernt an, am besten im Außenbereich. Ist dies nicht möglich, verbannen Sie die Antennen wenigstens auf den Dachboden. Zum einen reduzieren Sie damit beim Empfang den »Störnebel«, zum anderen wird die Kopplung mit den anderen Leitungen auf ein Minimum beschränkt. Damit vermeiden Sie Störungen des Rundfunk- und Fernsehempfangs, Einstreuungen in Lautsprecherkabel und Beeinflussungen anderer Elektronik im Haus.

Drahtantennen verlaufen am besten rechtwinkelig zum Gebäude. VHF/UHF-Richtantennen sollten nicht auf andere Empfangsantennen ausgerichtet werden.

Kapitel 19
Übertragungsleitungen

Außer bei Handfunksprechgeräten befindet sich immer eine Leitung zwischen dem Funkgerät, dem Sender oder Empfänger und der Antenne bzw. den Zusatzgeräten.

19.1 Allgemeines zu Übertragungsleitungen

Jeder Leiter verfügt über eine Induktivität und Kapazität. Sie können die Werte für den Leiter, gültig auf seiner gesamten Länge, als L und C angeben. Die Angaben je Meter werden als L' und C' geführt.

Für jeden Leiter ergibt sich ein Wellenwiderstand, die Impedanz (Z, Z_W). Dieser Wert ist über den HF-Bereich relativ konstant. Sie berechnen Z mit dieser Formel:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$

Achten Sie bei den Berechnungen auf die richtigen SI-Zahlenpräfixe! Rechnen Sie also die Werte z. B. auf pH oder pF um, damit der Wert auch in Ω stimmt!

Übung

Die bekannten Werte sind:

- L' = 0,4 µH/m
- C' = 70 pF/m

Sie suchen die Impedanz.

Lösung:

- Schritt 1: Gleichen Sie zunächst die SI-Zahlenpräfixe an:
  - L' = 400 nH/m
  - C' = 0,07 nF/m
- Schritt 2: Setzen Sie die Werte in die Formel ein:

$$Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}} = \sqrt{\frac{400\ [^{\mathrm{nH}}/_{\mathrm{m}}]}{0{,}07\ [^{\mathrm{nF}}/_{\mathrm{m}}]}}$$

Und berechnen Sie sie mit dem Taschenrechner:

– [√■] 400 [÷] 0,07 [=]

bzw. so:

– 400 [÷] 0,07 [=] [√]

Das ergibt in beiden Fällen 75,59 Ω.

Wenn Sie eine hochfrequente Signalquelle (Funkgerät, Sender ...) mit einer Antenne oder einem anderen Gerät verbinden, so müssen an beiden Enden des Leiters die Komponenten den gleichen Widerstand (Impedanz *Z*) wie der Leiter aufweisen. Dann ist die Übertragungsleitung richtig angepasst.

19.2 Paralleldrahtleitung

Die *Paralleldrahtleitung* (siehe Abbildung 19.1) besteht aus zwei in stets gleichem Abstand zueinander verlaufenden Leitern.

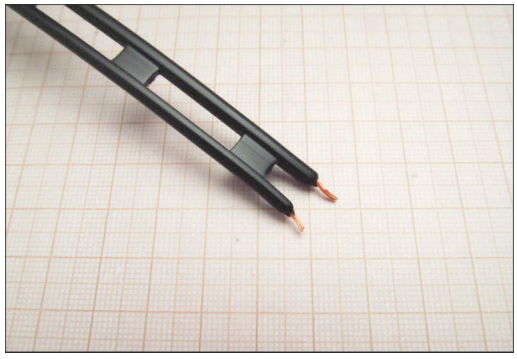


Abbildung 19.1 Paralleldrahtleitung

Sie können auch selbst eine Paralleldrahtleitung aufbauen, indem Sie entsprechende isolierende Spreizer anfertigen und Antennenlitze als Leiter auffädeln.

Vor- und Nachteile der Paralleldrahtleitung

Vorteile

- geringe Dämpfung gegenüber anderen Speiseleitungen
- hohe Spannungsfestigkeit

Nachteile

- offenes Hochfrequenzfeld
- Verlegung umständlich
- Streufelder in unmittelbarer Umgebung

Eigenschaften symmetrischer Übertragungsleitungen

- Die Werte von Strom und Spannung sind in beiden Leitern gegenüber Erde gleich hoch und gegenphasig.
- Der Verkürzungsfaktor beträgt bei Luftisolierung etwa 1.

Um den Wellenwiderstand Z_0 einer Paralleldrahtleitung zu berechnen, benötigen Sie folgende Angaben:

- den Leiterdurchmesser *d* [mm]
- den Abstand der Leiter *a* [mm]
- den Verkürzungsfaktor *V* (1) oder die relative Dielektrizitätszahl ε_r (1)

und eine Formel:

$$Z_o = \frac{120\ \Omega}{\sqrt{\varepsilon_r}} \times ln\ \frac{2 \times a\ [mm]}{d\ [mm]}$$

Übung

Die bekannten Werte sind:

- Drahtdurchmesser d = 2 mm
- Abstand a = 200 mm
- Dieelektrizitätskonstante ε_r (Luft) = 1

Lösung:

Setzen Sie die Werte in die Formel ein:

Beachten Sie: $\sqrt{1} = 1$! Daher sieht die Formel plötzlich einfacher aus!

$$Z_o = \frac{120\ \Omega}{1} \times ln\ \frac{2 \times 200\ [mm]}{2\ [mm]}$$

Geben Sie die Werte in den Taschenrechner ein. (Hinweis: Einige Taschenrechner öffnen selbst eine Klammer nach der [ln]-Taste!)

- 120 [×] [ln] 2 [×] 200 [÷] 2) [=]

  Alternative Eingabe:
- 2 [×] 200 [÷] 2 [=] [ln] [×] 120 [=]

  Ergebnis: 635,7 Ω

Wellenwiderstände handelsüblicher Paralleldrahtleitungen

Die Wellenwiderstände handelsüblicher Paralleldrahtleitungen betragen zwischen 150 Ω und 600 Ω.

19.3 Koaxialkabel

Koaxialkabel zählen zu den asymmetrischen, also unsymmetrischen Leitungen in der Funktechnik, denn die beiden Leiter sind unterschiedlich geformt.

19.3.1 Der Aufbau von Koaxialkabeln

Abbildung 19.2 zeigt Ihnen den Aufbau von Koaxialkabeln.

Kabel für kurze Strecken und Frequenzen unterhalb 30 MHz verfügen über den Innenleiter (*Seele*) und das Abschirmgeflecht. Hochwertige Kabel, auch für hohe Frequenzen, sind mit einem zusätzlichen Schirm aus Metallfolie ausgestattet. Damit wird ein sehr hohes Schirmungsmaß erzielt.

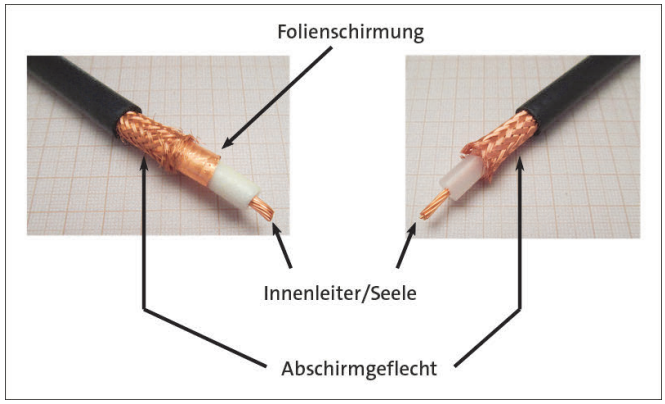


Abbildung 19.2 Aufbau von Koaxialkabeln

Hochwertige Koaxialkabel verhindern unerwünschte Abstrahlungen bei der Übertragung hochfrequenter Signale. Gleiches gilt beim Empfang. Störungen aller Art gelangen nicht über die Antennenzuleitung an den Empfänger.

Nachteilig sind oftmals die mechanischen Eigenschaften dieser Kabel. Besonders jene Ausführungen mit Folienschirm sind relativ starr und damit schwer bei engen Radien zu biegen. Auch das Gewicht kann z. B. bei Mittenspeisung von Drahtantennen von Bedeutung sein.

19.3.2 Berechnung des Wellenwiderstands Z

Um den Wellenwiderstand Z berechnen zu können, benötigen Sie diese Angaben:

- die relative Dielektrizitätszahl ε_r der Isolierung des Innenleiters (siehe Tabelle 19.1)
- den Innendurchmesser der Abschirmung bzw. des Folienschirms D
- den Durchmesser des Innenleiters d

Zur Berechnung selbst wenden Sie diese Formel an:

$$Z = \frac{60\ \Omega}{\sqrt{\varepsilon_r}} \times \ln\frac{D}{d}$$

Übung

Berechnen Sie ein Kabel, über das Sie folgende Daten haben:

- Material der Isolierung: Voll-PE
- Durchmesser des Innenleiters: 0,7 mm
- Durchmesser der Isolierung: 4,4 mm
- Außendurchmesser des Kabels: 7,4 mm

Gesucht ist der Wellenwiderstand *Z*.

Lösung:

Der Außendurchmesser des Kabels ist für die Berechnung nicht notwendig!

Die relative Dielektrizitätszahl für Voll-PE beträgt 2,29. Setzen Sie diese Werte in die Formel

$$Z = \frac{60\ \Omega}{\sqrt{2{,}29}} \times \ln\frac{4{,}4}{0{,}7}$$

ein und berechnen Sie sie mit dem Taschenrechner. (Beachten Sie, dass sich nach Eingabe der [ln]-Taste gegebenenfalls eine Klammer öffnet!)

- 60 [÷] [√■] 2,29 [=] [×] [ln] 4,4 [÷] 0,7 [)] [=]

  Alternative Eingabe:

- 4,4 [÷] 0,7 [=] [ln] [×] 60 [÷] 2,29 [√] [=]

Abgelesen und gerundet: 72,9

Z beträgt also rund 75 Ω.

Koaxialkabel

Im Amateurfunk verwendete Koaxialkabel haben meist einen Wellenwiderstand von 50 Ω, seltener auch von 60 Ω oder 75 Ω.

19.3.3 Verminderte Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die hochfrequenten Signale werden in Koaxialkabeln ausgebremst. Sie sind aufgrund der kapazitiven Belastung mit deutlich weniger als der Lichtgeschwindigkeit wie im Freiraum unterwegs. Daher sind, wenn frequenzabhängige Kabelzuschnitte angefertigt werden müssen, diese nach der herkömmlichen Berechnungsmethode

zu lang. Sie können aber sowohl die verringerte Ausbreitungsgeschwindigkeit v als auch einen Verkürzungsfaktor k berechnen.

Zur Berechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit können Sie mit der Formel

$$v = \frac{1}{\sqrt{L' \times C'}}\,(\mathrm{km/s})$$

arbeiten, wenn Sie C' in pF/m und L' in pH/m einsetzen.

Übung

Bekannte Werte eines Koaxialkabels sind:

- Induktivität (L') = 1,2 µH/m
- Kapazität (C') = 15 pF/m

Gesucht ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit v.

Lösung:

Gleichen Sie die SI-Präfixe (hier pH) an: 1,2 µH/m → 1.200.000 pH/m, und setzen Sie die Werte in die Formel ein:

$$v = \frac{1}{\sqrt{1200000 \times 15}}\,(\mathrm{km/s})$$

Berechnen Sie dann mit dem Taschenrechner:

- 1 [÷] [√] [(] 1200000 [×] 15 [)] [=]

Alternative Eingabe:

- 1 [÷] [(] 1200000 [×] 15 [)] [=] [√]

Abgelesenes Zwischenergebnis: $2{,}3570 \times 10^4$

Berücksichtigen Sie, dass die Induktivität in µH vorliegt, aber in pH eingegeben wurde. Multiplizieren Sie das Ergebnis im Taschenrechner mit 10^9, damit Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit von 236.000 km/s erhalten.

19.3.4 Der Verkürzungsfaktor k

Der Verkürzungsfaktor ergibt sich aus dem Umstand, dass für gewöhnlich die Berechnung der Wellenlänge mit der angenommenen Freiraumausbreitung und damit der höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit (knapp 300.000 km/s) erfolgt. Diese ist aber tatsächlich im Kabel geringer. Anstatt für jedes Kabel die korrekte Ausbreitungsgeschwindigkeit zu bestimmen, berechnet man einen Verkürzungsfaktor k. Sie benötigen k z. B. für die Berechnung und Anfertigung von Anpassleitungen.

Bei der Berechnung des Verkürzungsfaktors zieht man die relative Dielektrizitätszahl ε_r heran. Sie finden einige Beispiele in Tabelle 19.1.

Material Dielektrikum/Isolierung	ε_r	k
Luft	1,00059	1,0
Polyethylen-(PE-)Vollmaterial	2,29	0,66
Polyethylen-(PE-)Schaum	1,3–1,5	0,82–0,85
Teflon (PTFE)	2,0	0,7

Tabelle 19.1 Relative Dielektrizitätszahlen

Den Verkürzungsfaktor k berechnen Sie so:

$$k = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}}$$

Übung

Ermitteln Sie den Verkürzungsfaktor für Kabel mit Voll-PE-Isolierung.

Lösung:

Setzen Sie die Werte in die Formel ein, und rechnen Sie mit dem Taschenrechner:

$$k = \frac{1}{\sqrt{2{,}29}}$$

▸ 1 [÷] [√■] 2,29 [=]

Alternative Eingabe:

▸ 1 [÷] 2,29 [√] [=]

Gerundetes Ergebnis: 0,66

Diesen Faktor können Sie bei den meisten handelsüblichen Koaxialkabeln anwenden!

19.3.5 Kabeldämpfung

Koaxialkabel haben durchweg eine höhere Dämpfung als Paralleldrahtleitungen. Je höher der Durchmesser des Kabels und je größer der Luftanteil im Dielektrikum ist, desto geringer fällt die Dämpfung aus. Die Dämpfung steigt mit der Frequenz und Kabellänge.

Die Hersteller geben die Dämpfung a_0 in dB je 100 m an.

Um die Dämpfung eines Kabels in Abhängigkeit von dessen Länge und der benutzten Frequenz zu ermitteln, gehen Sie wie folgt vor:

- Schritt 1: Ermitteln Sie die Grunddämpfung je 100 m »Ihres« Kabels aus den Herstellerangaben. Die Angaben hierfür sollten wenigstens in der Abstufung 10 MHz, 100 MHz, 400 MHz oder 500 MHz und gegebenenfalls 1 GHz vorliegen, je nachdem, welchen Bereich Sie nutzen möchten. Wählen Sie die Angaben für die nächsthöhere Frequenz in den Herstellerangaben. Sollte ein Dämpfungsdiagramm des Herstellers für das Kabel vorliegen, können Sie einen genaueren Wert ermitteln.
- Schritt 2: Rechnen Sie das Verhältnis Ihrer Kabellänge zu 100 m aus.
- Schritt 3: Multiplizieren Sie das Verhältnis mit dem dB-Wert für 100 m.

Übung

Ermitteln Sie die Kabeldämpfung für 15 m des RG58U bei 10 MHz.

Lösung:

- Schritt 1: Ermitteln Sie die Grunddämpfung des Kabels. Auf einem Infoblatt des Herstellers finden Sie die Dämpfung mit 5 dB je 100 m bei 10 MHz angegeben.
- Schritt 2: Berechnen Sie die gegebene Kabellänge mit dieser Formel:

  $$a = \frac{\text{tatsächliche Länge (m)}}{100\ \text{m}} \times \text{Dämpfung(dB)}$$

- Schritt 3: Geben Sie die Werte in den Taschenrechner ein:

  15 [÷] 100 [×] 5 [=]

  Lesen Sie nun das Ergebnis ab: 0,75 dB beträgt die gesuchte Dämpfung.

Einige Hersteller geben die Werte nicht für die Amateurfunkbänder passend, sondern z. B. für 10 MHz, 100 MHz, 500 MHz usw. an, da die Kabel ja für alle möglichen Funkdienste angeboten werden. Sie müssen die Werte dann für Ihren genutzten Frequenzbereich umrechnen.

Dazu setzen Sie die beiden Frequenzen in ein Verhältnis und ziehen daraus die Wurzel. Sie erhalten dann den Faktor, mit dem der niedrigere Wert multipliziert wird:

$$\text{Faktor} = \sqrt{\frac{f_{\text{hoch}}}{f_{\text{niedrig}}}}$$

Übung

Ihr Kabel verfügt bei 10 MHz über 2 dB Dämpfung je 100 m. Sie möchten es für 50 MHz einsetzen, haben aber keine Herstellerangabe für diese Frequenz. Zudem muss es 8 m lang sein. Wie hoch wird die Dämpfung ausfallen?

Lösung:

- Schritt 1: Ermitteln Sie den Faktor zur Umrechnung mit dem Taschenrechner:
  - [√■] [(] 50 [÷] 10 [)] [=]

  Alternative Eingabe:
  - 50 [÷] 10 [=] [√]

  Faktor abgelesen und gerundet: 2,24
- Schritt 2: Berechnen Sie die Dämpfung für 100 m Kabel bei 50 MHz:

  2 dB [×] 2,24 [=] 4,48 dB je 100 m bei 50 MHz
- Schritt 3: Berechnen Sie die Dämpfung für die tatsächliche Kabellänge mit dem Taschenrechner:

  8 [÷] 100 [×] 4,48 [=]

  Ergebnis: 0,36 dB Dämpfung

Koaxialkabel

- Koaxialkabel sind asymmetrisch aufgebaut. Sie bestehen aus dem Innenleiter und der Abschirmung, die als Drahtgeflecht aufgebaut ist. Zusätzlich kann eine Metallfolie die Schirmung verstärken (siehe Abbildung 19.2).
- Hochwertige Koaxialkabel verhindern unerwünschte Abstrahlungen von Sendeenergie, aber auch das Einstreuen von unerwünschten Signalen aus dem Nahfeld beim Empfang.
- Koaxialkabel benötigen oft einen größeren Biegeradius und sind daher manchmal schwer zu verlegen.
- Im Amateurfunk werden Koaxialkabel mit 50 Ω, aber auch mit 60 Ω oder 75 Ω verwendet.
- Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Funkwellen ist im Koaxialkabel niedriger gegenüber jener im Freiraum.
- Daraus ergibt sich auch der Verkürzungsfaktor, da die Berechnung der Wellenlänge üblicherweise mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit im Freiraum vorgenommen wird. Der Verkürzungsfaktor wird mittels der relativen Dielektrizitätszahl ε_r berechnet.
- Die Dämpfungswerte von Koaxialkabeln sind höher als jene der Paralleldrahtleitungen.
- Die Dämpfungswerte werden bestimmt durch Leitungsdicke, Frequenz und Dielektrikum (sehr gut: Luft; gut: PE-Schaum; üblich: PE-Vollmaterial).

19.4 Übersicht über Koaxialkabel

Auf dem Markt finden Sie eine Vielzahl von Koaxialkabeln (siehe Abbildung 19.3), von denen ich Ihnen eine Auswahl vorstellen möchte.



Abbildung 19.3 Koaxialkabel

Die Koaxialkabel unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Dicke, Biegsamkeit und Dämpfung. Dünne Kabel verwenden Sie für kurze Strecken: Meist schließen Sie Handfunksprechgeräte an Außenantennen an. Dies wird vor allem durch den hierfür hauptsächlich verwendeten SMA-Stecker vorgegeben.

Lange Strecken im Gebäude und an Masten benötigen Kabel mit geringer Dämpfung. Diese haben Luft- oder Schaumisolierung, sind aber wenig flexibel. Kabeltrassen müssen entsprechende Biegeradien vorsehen, auch für Mauer- und Mastdurchlässe.

Tabelle 19.2 stellt Ihnen einige Kabeltypen vor. Alle weisen einen Wellenwiderstand von 50 Ω auf. Die Werte wurden verschiedenen Listen und Herstellerunterlagen entnommen.

Außen-durchmesser	Typ	Dielek-trikum	Dämpfung je 100 m			Verk.-Faktor
			10 MHz	100 MHz	400 MHz	
2,8 mm	RG 174 AU	PE	9,5 dB	25,8 dB	54,9 dB	0,66
5 mm	RG 58 CU	PE	4,1 dB	13,9 dB	30 dB	0,66
5,4 mm	H 155	PE + Luft	3,0 dB	9,1 dB	18 dB	0,80

Tabelle 19.2 50-Ω-Koaxialkabel (Auswahl)

Außen-durchmesser	Typ	Dielek-trikum	Dämpfung je 100 m			Verk.-Faktor
			10 MHz	100 MHz	400 MHz	
7,3 mm	Aircell 7	PE + Gas	2,2 dB	6,3 dB	13 dB	0,83
7,3 mm	H 2007	PE-Schaum	2,2 dB	6,3 dB	13 dB	0,83
7,3 mm	HIGHFLEXX 7 (Ultraflex 7)	PE-Schaum	1,9 dB	5,8 dB	11,8 dB	0,83
10,3 mm	RG 213 U	PE	1,8 dB	6,4 dB	13,7 dB	0,66
10,3 mm	H 2000 Flex	PE-Schaum	1,0 dB	3,9 dB	8 dB	0,83
10,3 mm	H 2010 (Ultraflex 10)	PE-Schaum	1,13 dB	3,99 dB	8,35 dB	0,83
10,3 mm	Hyperflex 10	PE-Schaum	1,34 dB	3,95 dB	8,3 dB	0,87
13 mm	Hyperflex 13	PE-Schaum	0,85 dB	2,88 dB	6,19 dB	0,86

Tabelle 19.2 50-Ω-Koaxialkabel (Auswahl) (Forts.)

19.5 Steckverbinder für Koaxialkabel

Der *UHF-(»PL«-)Stecker* (siehe Abbildung 19.4) wird seinem Namen nicht gerecht. Tatsächlich war diese Norm einmal vor 60 Jahren oder noch früher für UHF-Leitungen gedacht. Auch heute noch sind z. B. Mobilfunkgeräte, die auch das 70-cm-Band abdecken, mit derartigen Anschlüssen ausgestattet. Es gibt aber Besseres!

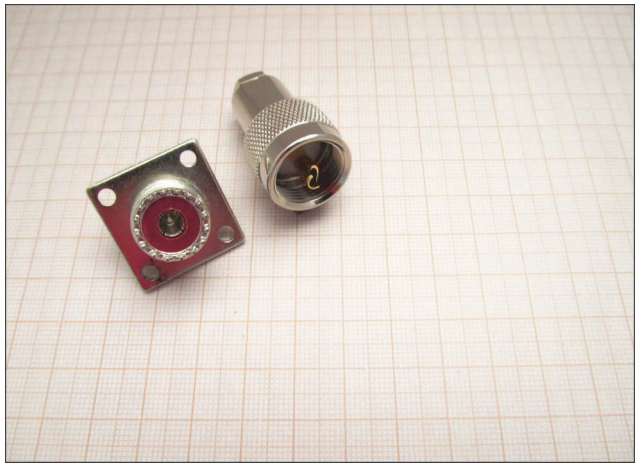


Abbildung 19.4 UHF-Buchse und Stecker (bzw. »PL« für »Plug«)

Der *BNC-Stecker* (siehe Abbildung 19.5) ist hier schon eher geeignet, aber hohe Leistungen verkraftet er weniger. Charakteristisch für ihn ist die Verriegelung der Verbindung mittels eines federnden Bajonettverschlusses anstelle der sonst üblichen Verschraubungen. Im Bild sind Stecker und Buchse richtig bezeichnet: Der Stecker verfügt über den Bajonett-Überwurf, was ihn eigentlich wie eine Buchse aussehen lässt!

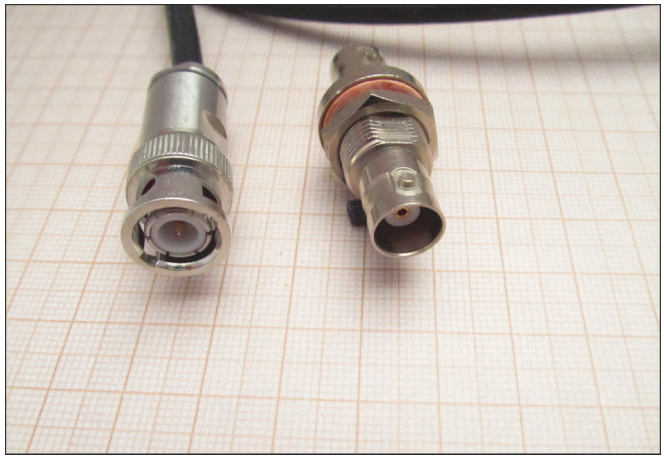


Abbildung 19.5 BNC-Stecker (links) und BNC-Buchse (rechts)

Exzellent, aber eher für Handfunkgeräte oder Messtechnik geeignet, ist die *SMA-Norm*. Abbildung 19.6 zeigt eine SMA-Buchse, Abbildung 19.7 den SMA-Stecker eines Koaxialadapters.



Abbildung 19.6 SMA-Buchse

Kommen sehr hohe Frequenzen und hohe Leistungen zusammen, verwenden Sie Stecker, Kupplungen und Buchsen der N-Norm (siehe Abbildung 19.8). Bei ihnen wird die Verbindung klassisch mittels Überwurfverschraubung gesichert.

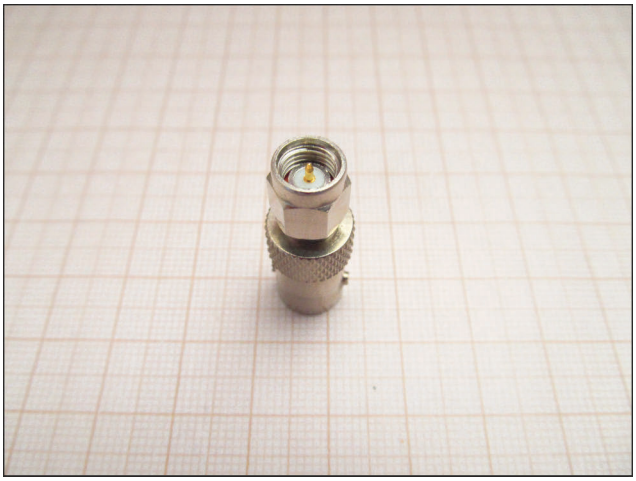


Abbildung 19.7 SMA-Steckerseite eines Adapters



Abbildung 19.8 N-Buchse und N-Stecker

Falsch oder fehlerhaft mit dem Koaxialkabel verbundene Steckverbinder können das Empfangs- und Sendevergnügen nachhaltig trüben.

Wenn Sie bisher noch nicht Koaxialstecker an die entsprechenden Kabel montiert haben, besuchen Sie am besten einen versierten Funkamateur. Unter seiner Aufsicht und mit seiner Hilfe führen Sie Ihre ersten Montagen durch.

Steht Ihnen dieser »Königsweg« nicht zur Verfügung, sollten Sie sich diverse Videos im Internet hierzu ansehen. In den meisten dieser Anleitungen erhalten Sie ebenso gute Erklärungen und arbeiten Schritt für Schritt mit. Auch Elektronik- und Funkhändler bieten oftmals bebilderte Anleitungen zur Steckermontage an.

Sie benötigen nur wenig Werkzeug und Material:

- Lötkolben
- Seitenschneider oder spezielle Kabelschere
- ggf. Flachzange
- Messer

Kapitel 20
Stehwellen und Leistungsrückfluss

Ist an einem Sender eine Antenne angeschlossen, die nicht den gleichen Wellenwiderstand wie jenen der Koaxialleitung aufweist, wird ein Teil der Sendeleistung reflektiert. Der »Rücklauf« gelangt damit zurück zum Sender und wird nicht über die Antenne abgegeben (siehe Abbildung 20.1).

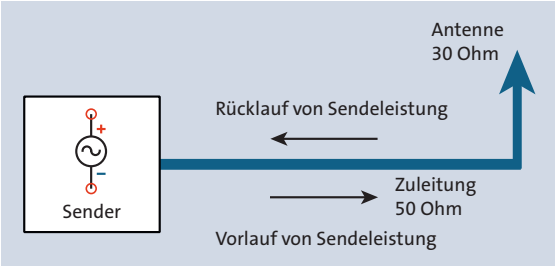


Abbildung 20.1 Fehlanpassung der Antenne

Vielfach wird ein eingebautes oder nahe beim Funkgerät installiertes Antennenanpassgerät benutzt. Dies führt dazu, dass für den Sender der optimale Abschluss geschaffen wird; die Antennenzuleitung und Antenne werden dann angepasst, ohne Rücksicht auf Verluste (siehe Abbildung 20.2).

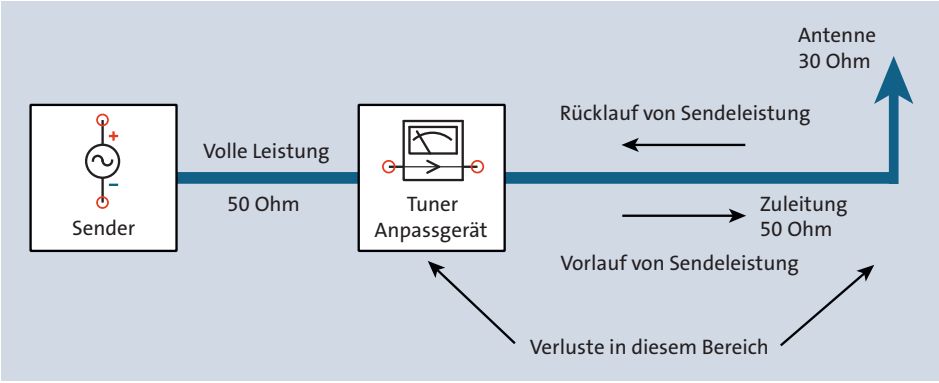


Abbildung 20.2 Anpassung mit Tuner

Besser ist es immer, die Antenne am Fußpunkt bzw. die Antenne selbst entsprechend anzupassen, damit die verlustarme Speisung mit dem Koaxialkabel möglich ist (siehe Abbildung 20.3).

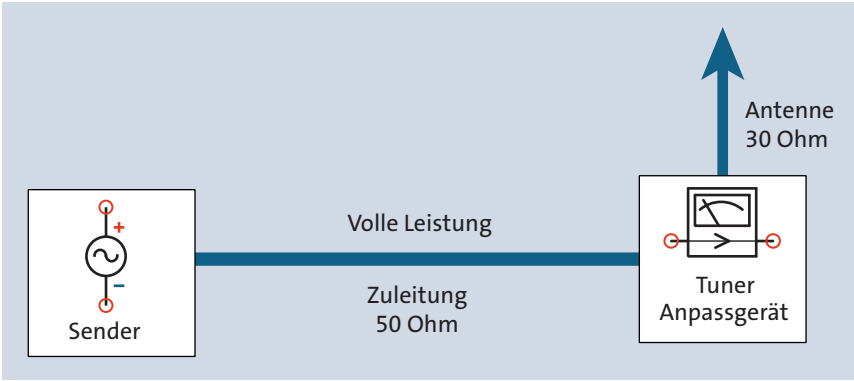


Abbildung 20.3 Antennennahe Anpassung

Stehwellen

Stehwellen sind Reflexionen des Sendesignals auf der Speiseleitung. Sie werden durch Fehlanpassungen oder Kabelschäden hervorgerufen. Auch das Eindringen von Wasser begünstigt Stehwellen.

Das Stehwellenverhältnis (*Standing Wave Ratio* [SWR], *Voltage Standing Wave Ratio* [VSWR]) beschreibt das Verhältnis zwischen rück- und vorlaufender Sendeleistung. Vom Schluss der Leitung an gerechnet, treten alle $^{\lambda}/_{2}$ Überlagerungen der hin- und rücklaufenden Wellen auf und bilden dabei Wellenberge oder -täler. Um das Verhältnis zu bestimmen, benötigen Sie entsprechende Messvorrichtungen, wie z. B. ein Reflektometer oder Stehwellenmessgerät. Das Stehwellenmessgerät wird in die Antennenleitung zwischen Funkgerät und Antenne eingefügt.

Eine Antenne ist bei einem Stehwellenverhältnis von 1 am besten an die Speiseleitung angepasst!

Liegt ein Stehwellenverhältnis von »unendlich« (∞) vor, ist entweder keine Antenne angeschlossen oder das Leitungsende weist einen Kurzschluss auf. Wie man einfache Antennen abgleicht, lesen Sie in Abschnitt 31.1.5.

Sie haben mehrere Berechnungsmöglichkeiten, um das SWR s zu ermitteln. Mit den Werten der Spannungen von vorlaufender (U_v) und rücklaufender (U_r) Welle bzw. vorlaufender (P_v) und rücklaufender Leistung (P_r) können Sie die Berechnungen vornehmen:

$$s = \frac{U_v + U_r}{U_v - U_r} = \frac{\sqrt{P_v} + \sqrt{P_r}}{\sqrt{P_v} - \sqrt{P_r}} = \frac{1 + |r|}{1 - [r]}$$

Darüber hinaus kann der Reflexionsfaktor *r* bestimmt werden. Dieser wird aber auch für die SWR-Berechnung mit herangezogen, je nach Aufgabenstellung.

$$|r| = \frac{R_{\text{Ant}} - Z_{\text{Leitung}}}{R_{\text{Ant}} + Z_{\text{Leitung}}} = \frac{s-1}{s+1} = \frac{U_r}{U_v} = \sqrt{\frac{P_r}{P_v}}$$

Der Reflexionsfaktor *r* ist hierbei eine absolute Zahl. Dies bedeutet, dass hier nur die Zahl – aber ohne Vorzeichen – verwendet wird und dass *r* damit stets größer als null ist.

Wenn die Impedanzen von Antenne und Leitung bekannt sind, kommen diese Formeln zum Einsatz:

$$\text{Wenn } R_{\text{Ant}} > Z_{\text{Leitung}}\text{: } s = \frac{R_{\text{Ant}}}{Z_{\text{Leitung}}}$$

$$\text{Wenn } R_{\text{Ant}} < Z_{\text{Leitung}}\text{: } s = \frac{Z_{\text{Leitung}}}{R_{\text{Ant}}}$$

Das Stehwellenverhältnis

Die korrekte Angabe des Stehwellenverhältnisses erfolgt in der Form »Rücklauf zu Vorlauf«, z. B. als 2:1!

Übung

Sie lesen an einem Richtkoppler, der in die Antennenzuleitung eingefügt ist, folgende Werte ab:

- Spannung des Vorlaufs: 5 V
- Spannung des Rücklaufs: 2,5 V

Gesucht ist das Stehwellenverhältnis *s*.

Lösung:

Wählen Sie zunächst die richtige Formel aus. Zum Ermitteln von *s* haben Sie die Spannungswerte des Vor- und Rücklaufs.

Daher verwenden Sie diese Formel und setzen die Daten gleich ein:

$$s = \frac{U_v + U_r}{U_v - U_r} = \frac{5 + 2{,}5}{5 - 2{,}5}$$

Mit dem Taschenrechner führen Sie die Berechnung durch:

(5 + 2,5) ÷ (5 - 2,5) =

Dies sollte bei jedem Modell funktionieren! Vergessen Sie die Klammern nicht! Das Ergebnis ist 3, es liegt also ein SWR von 3:1 vor.

Ein weiteres Beispiel zur Berechnung in die andere Richtung ist ebenfalls nicht sehr kompliziert. Gesucht wird in diesem Fall die zurücklaufende Leistung, wenn diese Werte bekannt sind:

VSWR: 3

Vorlaufende Leistung: 200 Watt

- Schritt 1: Berechnen Sie den Reflexionsfaktor *r*

  Zunächst wählen Sie die zutreffende Formel aus und setzen die Werte ein:

  $$|r| = \frac{s-1}{s+1} = \frac{3-1}{3+1}$$

  In den Taschenrechner tippen Sie:

  [(] 3 [-] 1 [)] [÷] [(] 3 [+] 1 [)] [=]

  Sie erhalten dieses Zwischenergebnis: 0,5.

- Schritt 2: Berechnen Sie die rücklaufende Leistung durch Umstellung der Formel mit dem Reflexionsfaktor. Aus der Formel

  $$|r| = \sqrt{\frac{P_r}{P_v}}$$

  wird durch Umstellung die folgende, damit P_r ermittelt werden kann:

  $$P_r = r^2 \times P_v = 0{,}5 \times 0{,}5 \times 200$$

Sie erhalten das Ergebnis, dass 50 Watt wieder zurückfließen! Was rechnerisch sehr dramatisch wirkt, ist in der Praxis mehr oder weniger unbedeutend. Es gehen immer noch 150 Watt über die Antenne! Das Signal wird ja nur um 1,3 dB gedämpft (siehe Abschnitt 2.2), was man am Empfänger der Gegenstation im Alltagsbetrieb nicht bemerken wird (vor allem, weil der Vergleich mit 200 Watt abgestrahlter Leistung fehlt). Wenn also die Verbindung mit den 150 Watt nicht zustande kommt, wird es mit 200 Watt in der Regel auch nicht funktionieren!

Seien Sie aber trotzdem in einem solchen Fall misstrauisch! Prüfen Sie einfach mal, ob die Antenne auch wirklich abstrahlt. Wenn das Kabel nur lang genug ist, zeigt das SWR-Messgerät zwar ein SWR von 3:1 an, die Antenne selbst ist aber fehlerhaft und es findet (fast) keine Abstrahlung statt.

Übung

Sie sollen berechnen, wie viel Prozent der vorlaufenden Leistung bei einem SWR von 3 von der Antenne abgestrahlt werden.

Lösung:

- Schritt 1: Ermitteln Sie den Reflexionsfaktor. Wählen Sie die zutreffende Formel aus, und setzen Sie die Werte gleich ein:

$$|r| = \frac{s-1}{s+1} = \frac{3-1}{3+1}$$

(3 - 1) ÷ (3 + 1) =

Zwischenlösung: Der Reflexionsfaktor ist 0,5.

- Schritt 2: Berechnen Sie den prozentualen Anteil der abgestrahlten Sendeenergie (Leistung).

  Sie können hier, da kein Leistungswert gegeben ist, die Berechnung abkürzen.

  Multiplizieren Sie den Reflexionsfaktor mit sich selbst (»zum Quadrat«), dann haben Sie den Verlustanteil. Diesen ziehen Sie von 100 % ab; es verbleibt die übrige, abzustrahlende Leistung.

  Mit dem Taschenrechner erledigen Sie dies in einem Zug:

  100 - (0,5 × 0,5) × 100 =

  Ergebnis: 75 % werden abgestrahlt.

Kabeldämpfung

Die Kabeldämpfung wirkt sich auch auf das gemessene SWR aus! Der Rücklauf wird genauso gedämpft. Oft wird dann der trügerische Schluss gezogen, dass man eine gut abgestimmte Antenne verwendet … wenn die Zuleitung nur lang genug ist!

In einer weiteren Aufgabe sind folgende Werte bekannt:

- Leistung: 10 Watt
- Dämpfung der Leitung: 5 dB
- VSWR, gemessen am Leitungseingang: 1

Gesucht ist das VSWR, wenn die Antenne abgesteckt wird.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie die Leistung nach dem Passieren der Leitung.

  Bei offenem Ende wird die volle Leistung reflektiert. Das Signal passiert die Strecke doppelt, also liegt auch die doppelte Dämpfung vor, nämlich 2 × 5 dB, also 10 dB.

  Schlagen Sie einfach in Tabelle 2.9 nach. 10 dB entsprechen hier ca. einem Zehntel bzw. einer Verzehnfachung. Somit fließt 1 Watt zurück.

- Schritt 2: Berechnen Sie den Reflexionsfaktor.

  Zur Berechnung verwenden Sie diese Formel, setzen die Werte gleich mit ein und geben Folgendes in den Taschenrechner ein:

$$|r| = \sqrt{\frac{P_r}{P_v}} = \sqrt{\frac{1}{10}}$$

√ 1 ÷ 10 =

Alternative Eingabe:

1 ÷ 10 = √

So erhalten Sie als Zwischenergebnis den Reflexionsfaktor: 0,316.

- Schritt 3: Berechnen Sie das VSWR:

  Hierzu benutzen Sie diese Formel und setzen die Werte gleich mit ein:

$$s = \frac{1 + |r|}{1 - [r]} = \frac{1 + 0{,}316}{1 - 0{,}316}$$

  Eingabe in den Taschenrechner:

  (1 + 0,316) ÷ (1 – 0,316) =

  Ergebnis: Das VSWR beträgt 1,9.

Was passiert, wenn man einen Faltdipol, Z = 240 Ω, an ein Kabel mit niedrigem Wellenwiderstand (75 Ω) anschließt, können Sie nachberechnen.

Wählen Sie die zutreffende Formel aus, und füllen Sie diese mit den Werten:

Wenn $R_{\text{Ant}} > Z_{\text{Leitung}}$: $s = \frac{R_{\text{Ant}}}{Z_{\text{Leitung}}} = \frac{240}{75}$

Ergebnis: Das VSWR beträgt 3,2.

Kapitel 21
Mantelwellen

Mantelwellen breiten sich auf dem Koaxialkabel zwischen Funkgerät und Antenne aus. Sie liegen vor, wenn ein Teil der Sendeenergie über die Abschirmung des Koaxialkabels zum Sender zurückfließt. Dabei liegen Gleichtaktanteile vor. Beim Senden wird ein mehr oder weniger hoher Anteil der Sendeenergie über den Kabelmantel abgestrahlt.

Symmetrische Antennen wie der Halbwellendipol erfordern für eine optimale Anpassung die Verwendung eines Baluns. Bei der Speisung mittels Koaxialkabel wird der Balun zum einen mit dem Speisekabel und zum anderen mit den Antennenelementen verbunden. Man vermeidet damit nicht nur eine Beeinträchtigung der Richtcharakteristik, sondern auch das Auftreten von Mantelwellen. Abbildung 21.1 zeigt die Entstehung von Mantelwellen auf einem ohne Balun direkt aus dem Koaxialkabel gespeisten Dipol und die Wirkung einer Mantelwellendrossel.

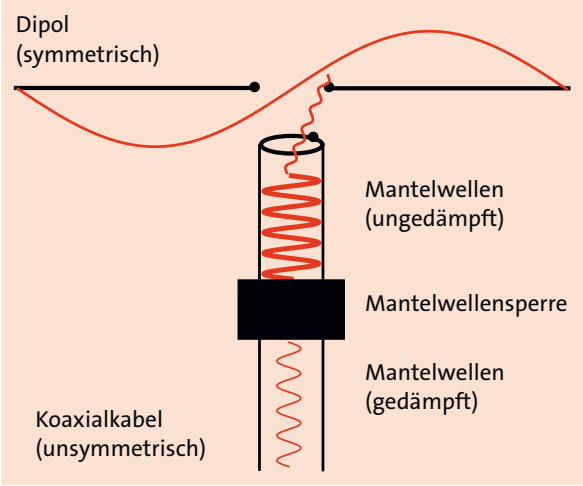


Abbildung 21.1 Entstehung von Mantelwellen am direkt gespeisten Dipol

Noch mehr als beim mittengespeisten Halbwellendipol treten Mantelwellen bei außermittig gespeisten Antennen (OCF) auf. Die Antennen sind unter anderem unter den Bezeichnungen *FD-3* oder *FD-4* bekannt. Auch die beliebten endgespeisten Antennen (EFHW) sind davon betroffen. Hier wird die Anpassung an das 50-Ohm-Koa-

xialkabel mittels Spannungsbalun vorgenommen, der das passende Übersetzungsverhältnis aufweist. Ein Spannungsbalun wirkt nicht gegen Mantelwellen, weshalb trotzdem eine Mantelwellensperre eingefügt werden muss.

Mantelwellen entstehen auch, wenn eine Speiseleitung nahe und mehr oder weniger parallel zu einem Antennenelement verläuft (siehe Abbildung 21.2). Durch die räumliche Nähe zum aktiven Antennenelement werden die Mantelwellen auf die Abschirmung des Koaxialkabels induziert.

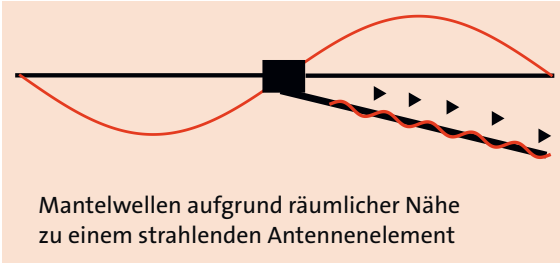


Abbildung 21.2 Mantelwellenentstehung aufgrund räumlicher Nähe zu aktivem Antennenelement

Der Mantel des Koaxialkabels kann auch Störungen aus dessen unmittelbarem Nahfeld aufnehmen. Parallel und nahe verlaufende Strom- oder Netzwerkkabel führen Störsignale, die sich dann auch über die Abschirmung des Antennenkabels weiterverbreiten. Gleiches gilt übrigens im Falle gebündelt verlaufender Antennenkabel, wenn mit mehreren Geräten und Antennen zeitgleich Sendebetrieb erfolgt (*Conteststation* auf Kurzwelle mit Mehrbandbetrieb).

Sie bemerken Mantelwellen auf verschiedene Weise:

- Beim Berühren metallischer, leitender Teile des Funkgeräts und daran angeschlossener Peripherie (Mikrofon, Morsetaste, Gehäuse des PCs usw.) spüren Sie ein unangenehmes, »heißes« Kribbeln während des Sendevorganges.
- Ihr Funksignal beim Sprechfunk wird nicht gut beurteilt, obwohl am Funkgerät alle Einstellungen optimal sind.
- Direkt mit dem Funkgerät verbundene Geräte, z. B. PCs, reagieren während des Sendevorganges mit Absturz, Neustart oder Soundproblemen. Über LAN-Kabel verbundene Router können ebenso mit Fehlfunktionen reagieren.
- Geräte (IT, Unterhaltungselektronik), die sich im Gebäude in der Nähe des Koaxialkabels befinden, reagieren während des Sendevorgangs durch Fehlfunktionen und gestörte Audioausgaben. Oft wird dies mit einer direkten Einstrahlung durch das Signal von der Antenne verwechselt!
- Eventuell schlechte Empfangsqualität durch hohen »Störnebel«, aufgenommen aus der unmittelbaren Umgebung des Antennenkabels.

Abhilfe bei diesen Problemen schafft die *Mantelwellensperre* (weitere Begriffe: Mantelwellendrossel, Strombalun). Sie wirkt hochohmig gegenüber Gleichtaktanteilen und niedrigohmig gegenüber Gegentaktanteilen. Sie kann auf verschiedene Weise umgesetzt werden:

- *Ferritringe* bzw. Klappferrite werden über das Koaxialkabel geschoben. Diese werden gegebenenfalls mit einem Schrumpfschlauch fixiert (siehe Abbildung 21.3). Bei manchen Modellen oder Anleitungen werden Ringkerne mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet. Damit wird eine gleichmäßige Dämpfung der Mantelwellen über einen großen Frequenzbereich erzielt.



Abbildung 21.3 Mantelwellensperre, bestehend aus auf das Koaxialkabel aufgeschobenen Ferritkernen

- Das Koaxialkabel wird auf einen Ringkern gewickelt siehe Abbildung 21.4 und Abbildung 21.5.

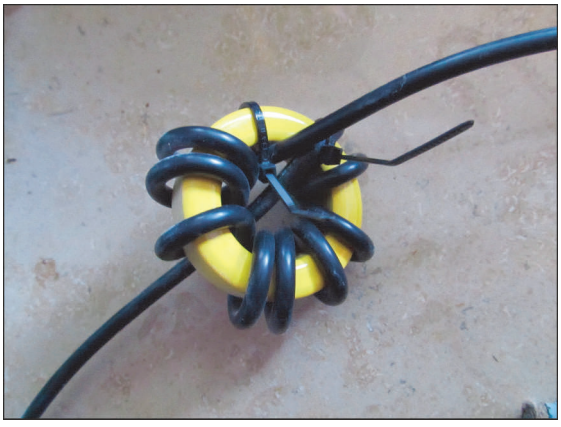


Abbildung 21.4 Praktisch aufgebaute Mantelwellendrossel

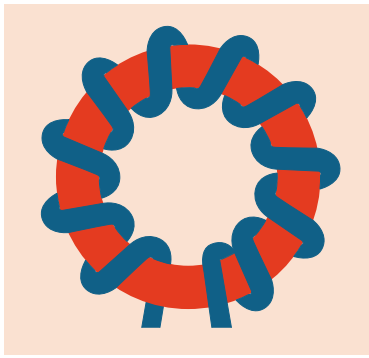


Abbildung 21.5 Prinzip der Mantelwellendrossel aus Abbildung 21.4

Eine andere Wickeltechnik verwendet der *Reisert-Balun*, auch als *W1JR-Balun* bekannt. Hier ändert sich die Wicklungsrichtung nach der Hälfte der Windungen. Für das Beispiel aus Abbildung 21.6 wurden ein RG-58-Kabel und ein Ringkern vom Typ FT 240-43 verwendet. Den Wickelsinn zeigt detailliert Abbildung 21.7.



Abbildung 21.6 W1JR-Balun auf FR-240-43-Ringkern mit RG-58-Kabel

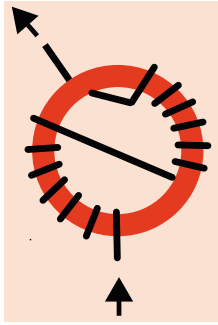


Abbildung 21.7 Wickelprinzip des W1JR-Baluns

- Das Koaxialkabel wird zu einer Luftspule aufgewickelt. Diese Methode weist den geringsten Nutzen bei großen Abmessungen und hohem Gewicht auf.

In hartnäckigen Fällen kann es notwendig sein, an mehreren Stellen der Antennenzuleitung Mantelwellendrosseln anzubringen. In der Richtung von der Antenne zum Funkgerät gilt diese Reihenfolge: Mantelwellendrossel, Verbindung mit der Erdung, Funkgerät.

Manchmal sind Mantelwellen aber durchaus erwünscht. Bei endgespeisten Antennen (EFHW) setzt man die Mantelwellensperre einige Meter vom Speisepunkt entfernt in die Zuleitung ein, was die Antenneneigenschaften verbessern soll. Im experimentellen Antennenbau kann man auch die zusätzliche Abstrahlung über das Antennenkabel nutzen und probiert aus, wo die beste Einfügestelle für die Mantelwellensperre hinsichtlich guter Abstrahlung und gutem Empfang ist.

Zusammenfassung

Mantelwellen entstehen beim Übergang von einer unsymmetrischen Speisung (Koaxialkabel) auf eine symmetrische Antenne (z. B. Dipol) oder durch eine Kabelführung nahe strahlender Antennenteile.

Mit einer Mantelwellensperre wird Mantelwellen entgegengewirkt.

Weitere Begriffe: Strombalun, Mantelwellendrossel

Spannungsbalune unterdrücken keine Mantelwellen! Ergänzen Sie das Antennensystem um eine Mantelwellendrossel!

Kapitel 22
Anpassung, Transformation und Symmetrierung

Eine Transformationsleitung hat zwei Enden. An einem Ende befindet sich der Sender, der gegebenenfalls an die Kabelimpedanz angepasst wird. Am anderen Ende ist die Antenne angeschlossen. Auch diese muss an die Kabelimpedanz angepasst werden. Nur wenn Sender, Antennenkabel und Antenne die gleiche Impedanz aufweisen, funktioniert das Zusammenspiel dieser Komponenten.

Die *Lecherleitung* wird besonders bei Anwendungen oberhalb von 500 MHz eingesetzt, da sie hier aufgrund der kurzen Wellenlängen direkt auf Leiterplatten aufgebracht werden kann. Für den Kurzwellen- und VHF-Bereich würde sie entsprechend sperrig ausfallen.

22.1 Die λ/4-Leitung

Bei $\lambda/4$-Leitungen steht auch fest, dass deren mechanische Abmessungen von der verwendeten Frequenz abhängig sind und umgekehrt die Resonanzfrequenz von der Leitungslänge.

Die Verteilung von Strom und Spannung ist nicht an allen Stellen dieser Leitung gleich. Die offene $\lambda/4$-Leitung (siehe Abbildung 22.1 und Abbildung 22.2) verhält sich im Grunde wie ein Reihenschwingkreis. Am Eingang ist sie niederohmig, d. h., die Spannung ist niedrig, dafür fließt ein hoher Strom. An deren Ende kehren sich diese Zustände um; sie ist hochohmig. Dabei ist die Spannung hoch, es fließt kaum Strom. Die offene $\lambda/4$-Leitung vollführt eine Phasenverschiebung des Signals um 90°.

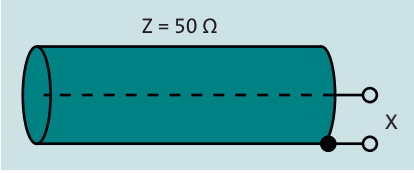


Abbildung 22.1 Koaxialkabel als offene Viertelwellenleitung

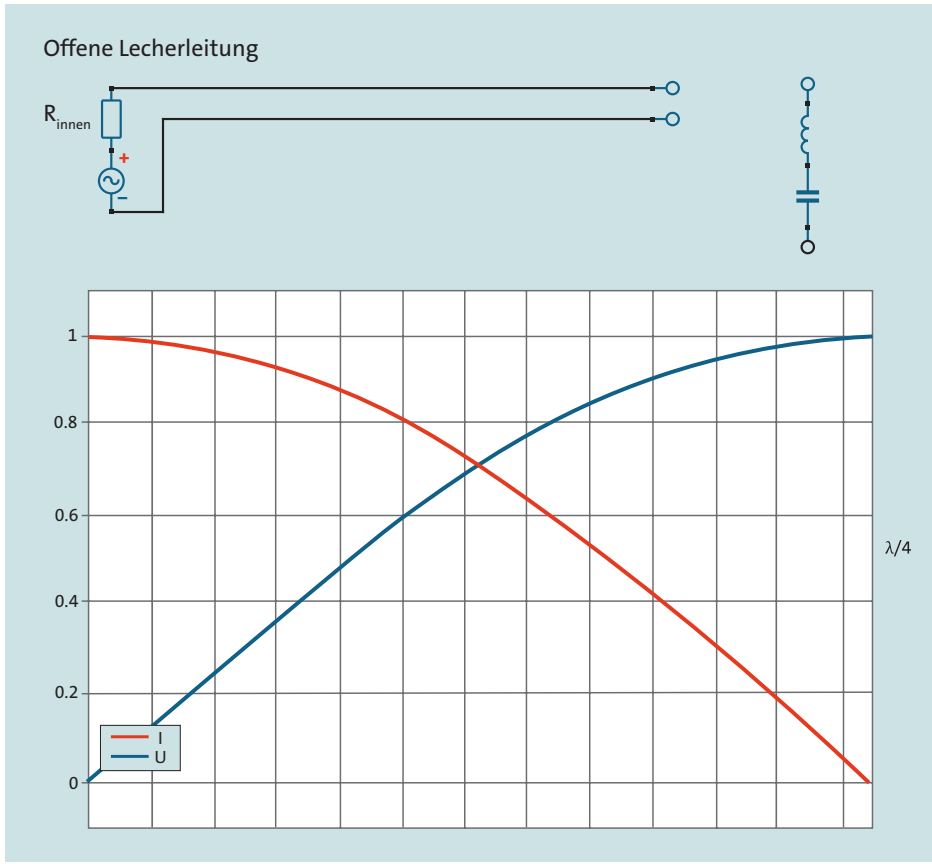


Abbildung 22.2 Offene λ/4-Leitung

Die $^{\lambda}/_{4}$-Leitung kann an ihrem offenen Ende kurzgeschlossen werden (siehe Abbildung 22.3 und Abbildung 22.4). Damit wird sämtliche hochfrequente Energie reflektiert. Sie ist an ihrem Speiseende hochohmig, die Spannung ist hoch, es fließt kaum Strom. An ihrem Ende ist dies umgekehrt: Es ist kaum Spannung vorhanden, es fließt aber ein kräftiger Strom. Das Verhalten entspricht dem eines Parallelschwingkreises.

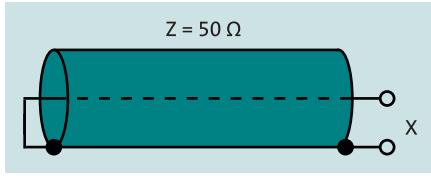


Abbildung 22.3 Koaxialkabel als geschlossene λ/4-Leitung

$^{\lambda}/_{4}$-Wellenleitungen werden in der Praxis z. B. zum Zusammenschalten von Antennen benutzt (Gruppenantennen, zirkular polarisierte Lang-Yagi). Wenn z. B. der Sen-

der und die Antenne unterschiedliche Wellenwiderstände aufweisen, können Sie diese mittels $^{\lambda}/_{4}$-Leitung anpassen.

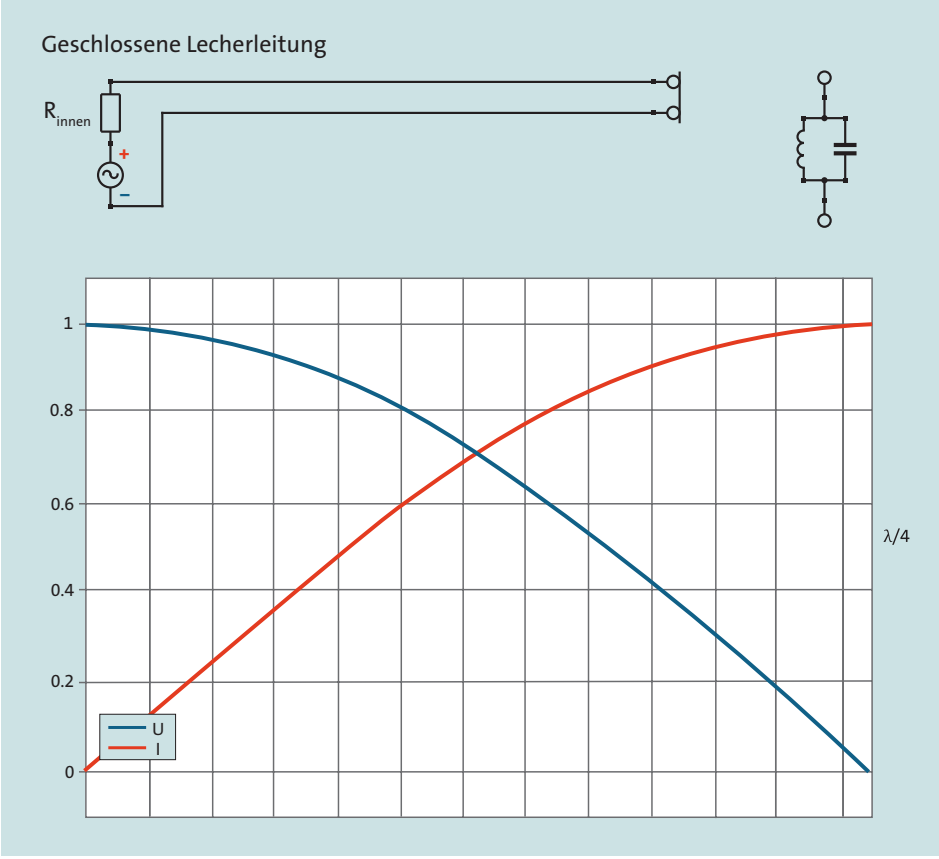


Abbildung 22.4 Geschlossene λ/4-Leitung

Den Wellenwiderstand der Transformationsleitung ermitteln Sie mit:

$$Z_t = \sqrt{Z_1 \times Z_2}$$

Die mechanische Länge beträgt $^{\lambda}/_{4}$ × *Verkürzungsfaktor*.

Übung

Transformation einer 15-m-Loop-Antenne an 50-Ω-Kabel

Bekannte Werte:

- f = 21,150 MHz
- Z_{Ant} = 100 Ω

- Z_{Kabel} = 50 Ω
- Verkürzungsfaktor k = 0,83 (hochwertiges Kabel)

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie Z_t mit dem Taschenrechner:

  [√■] 100 [×] 50 [=]

  Alternative Eingabe:

  50 [×] 100 [=] [√]

  Ergebnis: 70,71 Ω
- Schritt 2: Berechnen Sie die Länge:

  Wellenlänge: 299999 [÷] 21150 kHz [=]

  14,18 m, davon ¼: 3,54 m
- Schritt 3: Abschließend müssen Sie den Verkürzungsfaktor berücksichtigen:

  3,54 [×] 0,83 [=]

  Länge: 2,94 m

22.2 Die λ/2-Leitung

Die $^{\lambda}/_{2}$-Transformationsleitung (siehe Abbildung 22.5) führt zu einer Phasenverschiebung von 180°. Grundsätzlich gilt hierbei:

- Ist der Eingang niederohmig beschaltet, ist auch der Ausgang niederohmig.
- Ist der Eingang hochohmig beschaltet, ist auch der Ausgang hochohmig.

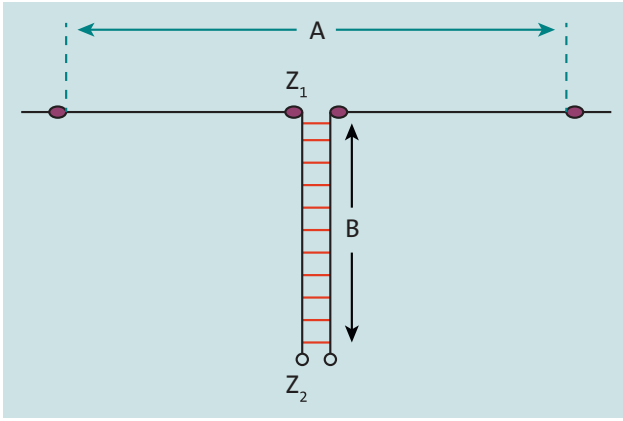


Abbildung 22.5 Halbwellenleitung (B)

In der Praxis beträgt B elektrisch $^{\lambda}/_{2}$. Z_1 und Z_2 sind gleich.

Stellt A einen (hochohmigen) Ganzwellendipol dar, so wird dies zum Ende der Halbwellenleitung nach Z_2 durchgereicht. Wird ein Halbwellendipol (A) verwendet, so ist Z_2 niederohmig.

22.3 Symmetrierung

Wenn Sie eine symmetrische Antenne, z. B. einen Halbwellendipol, an ein unsymmetrisches Koaxialkabel anschließen, mag das zwar von der Impedanz her passen, aber es kommt zu Verformungen der Richtcharakteristik und vor allem zur Bildung von Mantelwellen. Die Speiseleitung muss also zur Antenne passen:

- symmetrisch zu symmetrisch
- unsymmetrisch zu unsymetrisch

Mittels Umwegleitungen und Baluns (*Balanced-Unbalanced*, also symmetrisch zu unsymmetrisch, siehe Abbildung 22.6) wird es ermöglicht, symmetrische Antennen an unsymmetrische Speiseleitungen anzuschließen.



Abbildung 22.6 Baluns im Gehäuse

Ein Balun kann, muss aber nicht gleichzeitig die Impedanz anpassen. Ein Beispiel finden Sie in Abbildung 22.7. Die Berechnung dieser Symmetrierglieder finden Sie in Abschnitt 9.11.

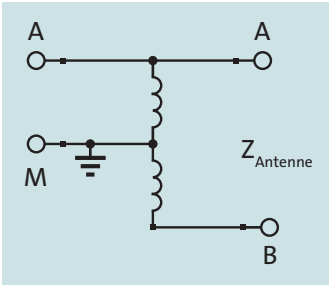


Abbildung 22.7 Balun-Schaltung

Die Baluns für den Kurzwellenbereich baut man mit einem Ringkern auf. Für den VHF-UHF-Bereich werden andere Symmetrierglieder verwendet, wie z. B. die *Umwegleitung* oder der *Gamma-Match*.

Eine $\lambda/_2$-Umwegleitung ermöglicht aufgrund der Phasendrehung um 180° eine Widerstandstransformation von 4:1 (doppelte Spannung am Speisepunkt bei gleicher Leistung). Damit lässt sich ein Faltdipol (240 Ω) an ein 60-Ω-Koaxialkabel anschließen (siehe Abbildung 22.8).

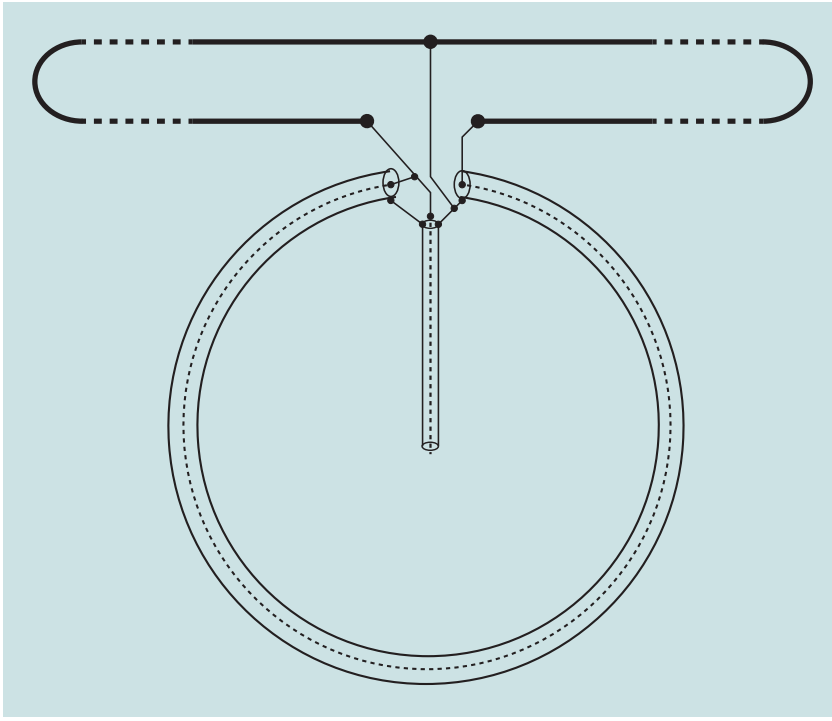


Abbildung 22.8 λ/2-Umwegleitung zur Anpassung und Symmetrierung

Es gibt zur Widerstandstransformation auch die *UNUNs*. Bei ihnen sind Speiseleitung und Antenne unsymmetrisch. Bekannt sind hier z. B. die *HyEndFed-Antennen*, endgespeiste Dipole. Da der Dipol am Ende hochohmig ist, muss die hohe Impedanz entsprechend herabtransformiert werden, von ca. 2.500 Ω auf 50 Ω. Hierzu kommen UNUNs mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:49 oder 1:50 zum Einsatz (siehe Abbildung 22.9).

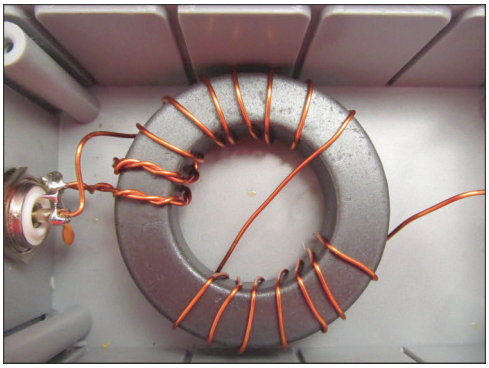


Abbildung 22.9 UNUN mit 1:49 für endgespeisten Dipol

22.4 Grundschaltungen von Antennenanpassgeräten

Antennenanpassgeräte nehmen Impedanztransformationen vor. Einige Schaltungen verringern zudem mögliche Oberwellen des Senders. Nur in seltenen Fällen stimmen die Impedanzen des Sendeempfängers und der Antenne überein.

Bei den eingebauten Antennentunern wird noch die koaxiale Speiseleitung in die Abstimmung mit einbezogen. In der Praxis geht das oftmals gut; die hochfrequente Energie wird im schlimmsten Fall aber wegen der Fehlanpassung in den Induktivitäten des Tuners in Wärme umgesetzt.

In der Selbstbaupraxis fertigen Sie die Induktivität aus einer Ringkernspule mit vielen Anzapfungen, die Sie mit einem entsprechend belastbaren Stufenschalter abgreifen. Sie können auch ein Variometer verwenden, was den Vorteil hat, dass hier, im Gegensatz zu den Rollspulen, kein Kontaktabbrand vorkommt und auch die Handhabung leichter ist. Drehkondensatoren müssen ausreichend spannungsfest sein.

Also: Optimieren Sie schon mal, wenn es denn möglich ist, die Antenne selbst mit einem Netzwerkanalysator (NVA).

Aber gerade bei der Arbeit mit Kompromissantennen, Langdrähten oder kurzen Vertikalantennen auf Fahrzeugen oder irgendwo in der freien Landschaft sind diese Anpassgeräte trotzdem nützlich.

Die einfachste, da mit wenig Bauteilen bestückte Konstruktion ist das L-Glied. Es besteht aus nur einem Drehkondensator und einer variablen Spule. Abbildung 22.10 und Abbildung 22.11 zeigen Ihnen diese minimalistische Anordnung. Das gezeigte Gerät MFJ-16010 fungiert hier zusätzlich als Tiefpassfilter. Die beiden PL-Buchsen an der Geräterückseite sind mit »Transmitter« und »Antenna« beschriftet. In dieser Anordnung werden Antennen mit einer höheren Impedanz als die des Funkgerätes angepasst. Haben Sie kurze Drähte oder Teleskopantennen zum Anpassen, also Antennen mit einer Impedanz unter 50 Ω, so schließen Sie Funkgerät und Antenne einfach anders herum an, die Aufwärtstransformation ist damit möglich.



Abbildung 22.10 Vorderseite des L-Tuners MFJ-16010

Sowohl die Auf- als auch die Abwärtstransformation der Impedanz angeschlossener Antennen ermöglichen der T-Tuner und das π-Filter. Die T-Schaltung kann, wenn die beiden Induktivitäten im Signalweg liegen, als Tiefpassfilter, sonst als Hochpassfilter arbeiten. Das π-Filter vermindert ebenfalls Oberwellen.

Abbildung 22.12 zeigt Ihnen eine Übersicht dieser Grundschaltungen.

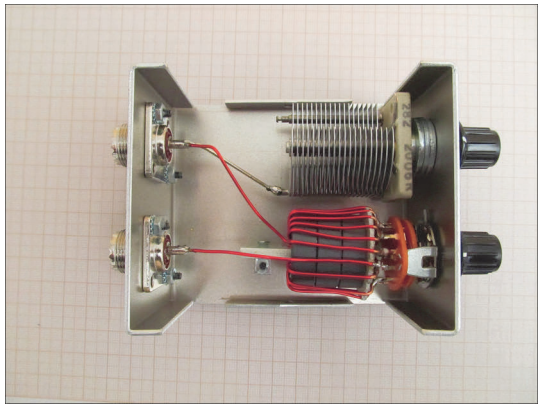
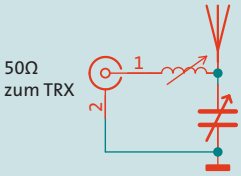
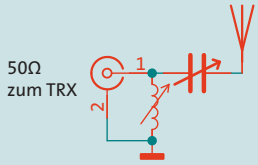


Abbildung 22.11 Geöffneter L-Tuner MFJ-16010

L-Tuner



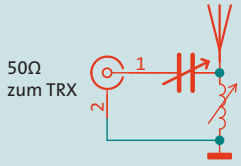
Z(Ant) > 50Ω
Tiefpass



Z(Ant) < 50Ω
Hochpass

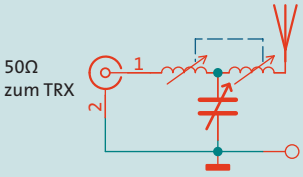


Z(Ant) > 50Ω
Tiefpass

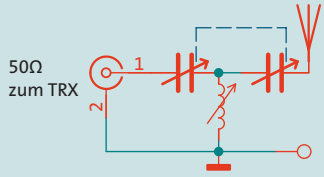


Z(Ant) < 50Ω
Hochpass

T-Tuner

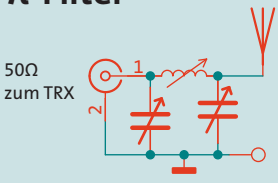


Z(Ant) < 50Ω oder Z(Ant) > 50Ω
Tiefpass



Z(Ant) < 50Ω oder Z(Ant) > 50Ω
Hochpass

π-Filter



Z(Ant) < 50Ω oder Z(Ant) > 50Ω

Abbildung 22.12 Grundschaltungen L-, T-Tuner und π-Filter

Kapitel 23
Das elektromagnetische Feld

Das elektromagnetische Feld bildet den Kern der Funktechnik. Aber auch in der Natur existieren elektromagnetische Felder: Die *Sferics* werden durch elektrische Vorgänge in der Atmosphäre ausgelöst. In der Technik bilden sich elektromagnetische Felder entlang von elektrischen Leitungen aller Art, und natürlich gehen sie auch von Antennen aus.

- **Begriffe**
  - vertikal = senkrecht
  - horizontal = waagrecht
- **Entstehung**
  - In einem elektrischen Leiter fließt ein zeitlich schnell veränderlicher Strom.
- **Bestandteile**
  - Das Feld besteht aus der elektrischen Feldkomponente (E-Feld) und der magnetischen Feldkomponente (H-Feld).
- **Ausbreitung**
  - Aufgrund der Wechselwirkung zwischen elektrischem Feld (E-Feld) und magnetischem Feld (H-Feld) breiten sich elektromagnetische Wellen aus.
  - Es kommt zu einer Polarisation von elektromagnetischen Wellen (Wellenausbreitung waagrecht oder senkrecht):
    - Die Angabe wird durch die Ausrichtung des elektrischen Feldes (E-Feld) bestimmt.
    - Der Winkel zwischen den Feldkomponenten beträgt 90° im (ungestörten) Fernfeld.
    - Der Feldwellenwiderstand des Freiraums verknüpft die elektrische und die magnetische Komponente eines elektromagnetischen Feldes im Fernfeld.

23.1 Polarisation von Antennen

An dieser Stelle finden Sie mehr oder weniger noch einmal eine kleine Wiederholung zur Polarisation von Antennen. Maßgebend für diese Angabe ist die Abstrahlung des E-Feldes.

Anhand des Vertikaldipols in Abbildung 23.1 sehen Sie die Ausrichtung von H- und E-Feld dargestellt. Der Winkel zwischen der H- und der E-Ebene beträgt 90°.

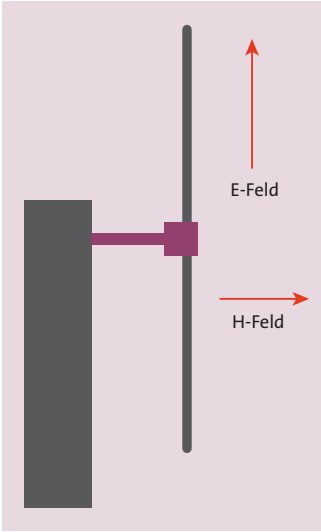


Abbildung 23.1 Ausrichtung des E- und des H-Feldes

Abbildung 23.2 zeigt ein Beispiel für eine horizontal abstrahlende Antenne.

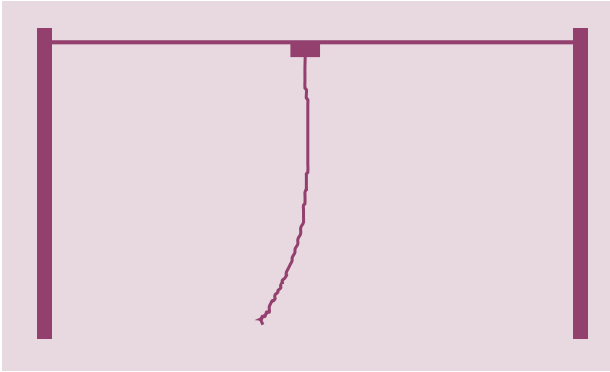


Abbildung 23.2 Horizontal gespannter Dipol

Dipolantennen im Kurzwellenbereich werden oftmals zwischen Bauwerken oder Masten waagrecht gespannt und haben damit eine horizontale Polarisation.

23.2 »Von der Antenne in den Äther«

So wie in der Überschrift hätte man früher die Erklärung überschrieben, wie sich die hochfrequente Energie von der Antenne »ablöst« und im Raum ausbreitet.

Eine Antenne bildet einen offenen Schwingkreis (siehe Abbildung 23.3), von den magnetischen Ringantennen einmal abgesehen.

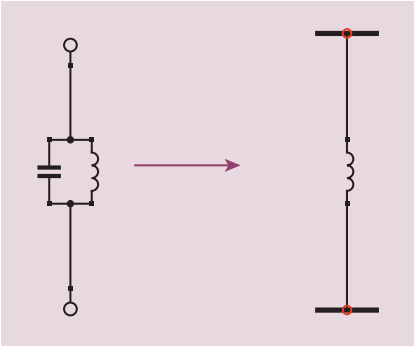


Abbildung 23.3 Antenne = Schwingkreis

Der Antennenleiter bildet die Induktivität, dessen Enden die Kapazität.

Dieser Ansatz erklärt die »Ablösung« der elektromagnetischen Wellen von der Antenne. Man kann elektromagnetische Wellen leider nicht mit bloßem Auge erkennen, sodass man auf solche Erklärungsmodelle zurückgreifen muss. (Eine weitere schöne Darstellung finden Sie unter *https://www.didaktikonline.physik.uni-muenchen.de/programme/dipolstr/DipoleRadiation.html*.)

Betrachten Sie hierzu Abbildung 23.5. Punkt A zeigt das Strommaximum. Über den stromdurchflossenen Leiter bildet sich das magnetische Feld aus. Der Strom gelangt zum Minimum, während sich nun ein Spannungsmaximum aufbaut und über den kapazitiven Anteil der Antenne ein elektrisches Feld (B) aufbaut. Wiederum nach einer Viertelwelle erreicht der Strom im Punkt C sein Maximum, allerdings mit anderer Polarität. Das so gegenläufig verlaufende Feld schiebt das Magnetfeld A vom Leiter weg. Genauso verhält es sich mit dem elektrischen Feld D, das sich nun ebenso »umgepolt« aufgebaut hat und das in B entstandene Feld nicht mehr an den Leiter zurücklässt, damit sich dessen Feldlinien schließen könnten.

Der Wechselstrom erzeugt zunächst ein Magnetfeld, das den Antennenleiter ringförmig umschließt und dessen Stärke sich mit dem Wechselstrom ändert. Das sich ändernde Magnetfeld erzeugt ein ringförmig geschlossenes, sich änderndes elektrisches Feld. Das sich ändernde elektrische Feld erzeugt wiederum ein ringförmig geschlossenes magnetisches Feld usw. Dadurch kann die hochfrequente Energie, die zu diesem Zeitpunkt in die andere Richtung läuft, teilweise nicht mehr in den Antennenleiter zurück und breitet sich leitungsunabhängig aus. Der Strom (die Ladungsträger) fließen hierbei nicht durch den gesamten Leiter, sondern pendeln um ihre Ruhelage. Lange Antennen kann man sich aus pendelnden Ladungen zusammengesetzt vorstellen.

Abbildung 23.4 zeigt Ihnen den Ablösevorgang anhand des Hertz'schen Dipols. Mit T wird die Schwingung bzw. ein Bruchteil davon bezeichnet.

- $t = t_0$: Maximaler Stromfluss, das magnetische Feld entsteht. (Dies ist nicht in der Abbildung dargestellt.)
- $t = t_0 + \frac{1}{4}\,T$: Die Spannung steigt an; längs der Antenne entsteht das elektrische Feld, quer dazu das magnetische Feld (nicht dargestellt, siehe Abbildung 23.5).
- $t = t_0 + \frac{1}{2}\,T$: Maximaler Stromfluss, das magnetische Feld entsteht und das elektrische Feld hat sich von der Antenne gelöst.
- $t = t_0 + \frac{3}{4}\,T$: Die Stromrichtung wechselt. Das gegenläufige Feld baut sich auf und schiebt das bisher entstandene Feld von der Antenne weg.
- $t = t_0 + T$: Die Ladungen sind ausgeglichen. Das elektrische Feld löst sich von der Antenne und drückt das entgegengesetzte Feld noch weiter von der Antenne weg.

Die gleichen Vorgänge finden auch bei den magnetischen Feldern statt. Diese bauen sich ebenso gegenläufig auf.

Das elektrische Feld (*B*, *D*) baut sich dabei längs der Antenne auf, das magnetische quer dazu. Die Richtung des Magnetfeldes wechselt mit der Stromrichtung (*A*, *C*) (siehe Abbildung 23.5).

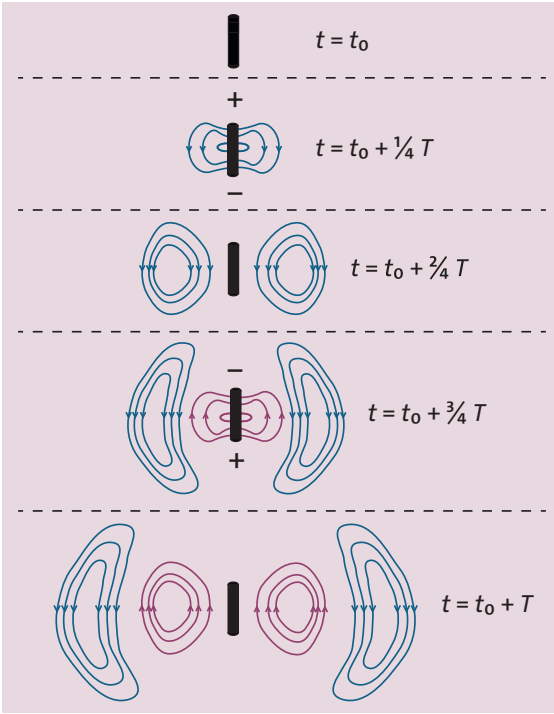


Abbildung 23.4 Strom- und Spannungsverteilung am Dipol

Bei der Empfangsantenne influenzieren (bei magnetischen Loop-Antennen und Ferrit-Antennen induzieren) die mit stets wechselnder Polarität auftreffenden Funkwellen eine hochfrequente Wechselspannung, die an den Empfänger gegeben wird. Bei fast allen Antennen sind die magnetischen und elektrischen Komponenten wie beschrieben getrennt. Nach einem Abstand von 5λ zur Antenne hebt sich diese Unterscheidung auf.

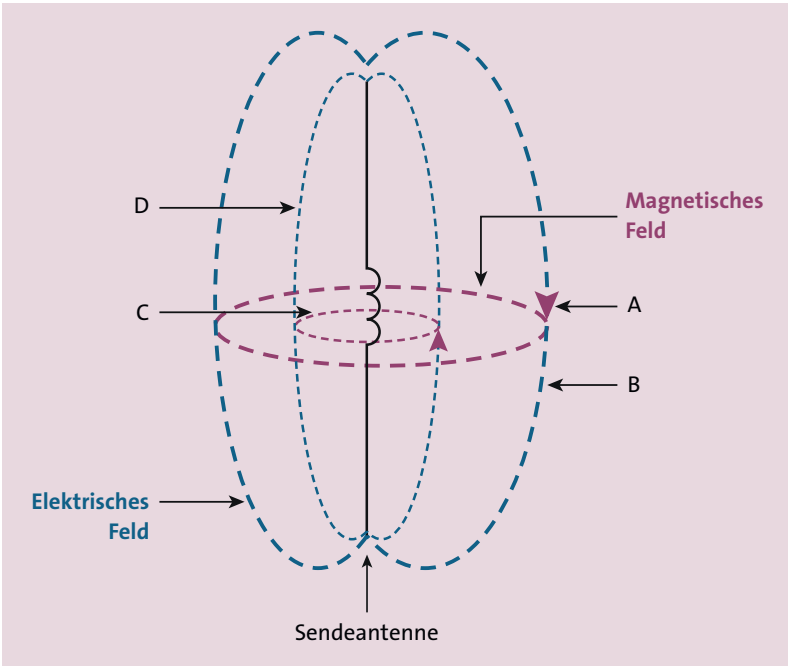


Abbildung 23.5 Elektrisches und magnetisches Feld, Ablösung

23.3 Die Wellenausbreitung der Kurzwelle

Freie Funkwellen breiten sich mit 300.000 km/s aus.

Die Kurzwelle breitet sich im Nahbereich aus, also meist um die 50 km im flachen Gelände. Sie folgt ein wenig der Erdkrümmung und ist deshalb auch ein Stück über den optischen Horizont hinaus nutzbar. Dies funktioniert Tag und Nacht. Hier werden OV-Runden, gegebenenfalls Notfunkverkehr und Versuche abgewickelt. Man spricht hier von der *Bodenwellenausbreitung*.

Der Fernverkehr findet über die Raumwelle statt. Die *Raumwellenausbreitung* ist stark abhängig von der Tages- und Jahreszeit sowie von der Sonnenfleckenaktivität. Raumwellen werden an der Ionosphäre reflektiert. Abbildung 23.6 zeigt Ihnen die Zusammenhänge im Bild.

Vom Sender aus macht sich die hochfrequente Energie auf den Weg:

- Der Strahl A ist zu steil oder die maximal nutzbare Frequenz (MUF) liegt zu tief und geht somit in die unendliche Weite des Weltalls.
- Der Strahl B zeigt die kurze Bodenwellenausbreitung.
- Der Strahl C zeigt eine Verbindung im Bereich um die 2.000 km.

Das Auftreffen eines Signals nennt man *Skip*, die Distanz zwischen dem Sender und dem Auftreffen *Sprungentfernung*. Das Ende des Strahls C auf der Erde entspricht hier dem ersten Skip. Zwischen dem Auftreffen von B und C auf der Erde liegt die tote Zone. Sie kann mit der verwendeten Frequenz nicht erreicht werden, auch nicht mit höchster Sendeleistung. Das Auftreffen des Strahls D auf der Erdoberfläche kennzeichnet den zweiten Skip. Es ist auch möglich, dass die Funkwellen auf die Erde zurückfallen, z. B. über Wasseroberflächen erneut zur Ionosphäre reflektiert werden und ihren Weg um die Erde fortsetzen.

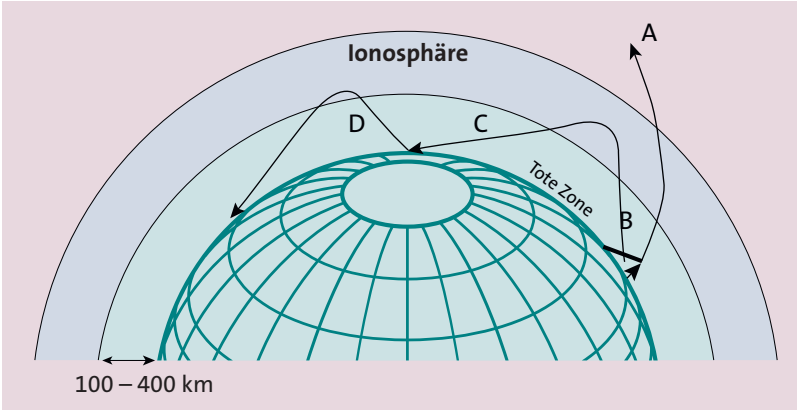


Abbildung 23.6 Ionosphäre und Kurzwellenausbreitung

23.3.1 Bodenwellenausbreitung

Die Bodenwelle folgt ein wenig der Erdkrümmung. Daher sind die Funkwellen auch noch über den sichtbaren Horizont hinaus aufnehmbar. Hohe Kurzwellenfrequenzen werden dabei stärker gedämpft als niedrige. So gelangen Verbindungen im 160-m- und 80-m-Band bis 100 km, im 10-m-Band aber nur bis knapp 30 km via Bodenwelle, wenn Sender und Empfänger sich nicht auf erhöhten Standorten befinden.

23.3.2 Vorgänge in der Ionosphäre

Trifft energiereiche Strahlung auf Atome und Moleküle, werden Elektronen aus deren äußeren Schichten herausgeschlagen. Diesen Vorgang nennt man *Ionisierung*. Das Restatom oder -molekül ist dadurch für eine bestimmte Zeit elektrisch positiv ge-

laden – und damit ein Ion. Das herausgeschlagene Elektron ist ebenso ungebunden. Die damit geladenen Teilchen sind immerhin so zahlreich vorhanden, dass die darunterliegende Erde vor der harten Strahlung aus dem Weltall relativ gut geschützt wird. Zudem bilden sie durch ihre Ladung je nach Ort mehrere Schichten.

Dieser Vorgang wird durch die Tages- und Jahreszeit beeinflusst. Der der Sonne zugewandte Teil der Ionosphäre dehnt sich im Sommer auf über 500 km aus. Auf der Nachtseite bleibt die Strahlungszufuhr der Sonne aus – es wird nichts ionisiert. Einige der Schichten der Ionosphäre lösen sich schnell wieder auf: die D-, E- und F1-Schicht. Die F2-Schicht bleibt bestehen, sinkt aber ab.

Dies alles hat Auswirkungen auf die Fernausbreitung der Kurzwelle. Nachts sind die »langen« Bänder die brauchbaren (160 m, 80 m, 40 m), 20 m »geht immer«, darüber liegen »Tagbänder«.

Die Jahreszeiten der Erde beruhen auf der Änderung der vertikalen Lage zur Sonne. Die Strahlung der Sonne trifft flacher auf den Winterbereich, was zu mehr Ionisierung führt. Die maximal nutzbare Frequenz (MUF) ist deshalb an einem Wintertag in der Regel höher.

23.3.3 Sonnenfleckentätigkeit und Ionosphäre

Die Sonnenflecken werden von Astronomen seit Jahrhunderten beobachtet, doch vor der Erforschung der Radiowellen konnte man sich diese dunkleren Regionen auf der Sonnenoberfläche nicht erklären.

Heute weiß man, dass es sich hierbei um sehr starke lokale Magnetfelder der Sonne handelt, die diese Regionen um bis zu ein Drittel dunkler erscheinen lassen.

Das Vorkommen der Sonnenflecken unterliegt einem rund 11-jährigen Zyklus. Bis vor Kurzem konnte man sich diesen nicht erklären. In der Pressemitteilung des Helmholtz-Zentrums Dresden vom 27. Mai 2019 (»Die Sonne im Rhythmus der Planeten«) wird ein neuer Erklärungsansatz dargestellt, der auf Gezeitenkräften einiger Planeten im Sonnensystem beruht. Ein Sonnenfleckenmaximum besteht demnach dann, wenn Venus, Erde und Jupiter in einer Linie zur Sonne stehen.

Die Häufigkeit der Sonnenflecken wird durch die *Sonnenfleckenrelativzahl* angegeben. Eine andere Maßzahl für die Sonnenaktivität ist der solare *Radioflussindex* (»solarer Flux«). Hier wird die 10,7-cm-Strahlung gemessen. Die Werte werden bei Ausbreitungsvorhersagen mit bekannt gegeben. Für die Ionisierung selbst sind aber UV- und Röntgenstrahlung verantwortlich (sie zählen zur ionisierenden Strahlung wie die α-, β- und γ-Strahlung).

Je höher die Zahl der Sonnenflecken bzw. der Wert des solaren Fluxes ist (> 100), desto besser kann auch der höherfrequente Bereich der Kurzwelle für Weitverkehr genutzt werden. Beim Sonnenfleckenmaximum gelingen weltweite Verbindungen mit wenig

Sendeleistung und einfachen Antennen auf den Bändern ab 21 MHz mit hohen Empfangsfeldstärken. Beim Sonnenfleckenminimum läuft der Interkontinentalfunkverkehr bis maximal 14 MHz, es sind höhere Sendeleistungen und gute Antennen (und Geduld) erforderlich.

23.3.4 Partikelstrom, Sonnenwind

Die Sonne gibt einen aus Elektronen, Protonen und Heliumkernen bestehenden Plasmastrom an ihre Umgebung ab. Das Magnetfeld der Erde schützt uns vor diesem Teilchenstrom, indem es diesen umleitet. Manchmal führen koronare Massenauswürfe der Sonne aber zu einem verstärkten Partikelstrom, dessen Teilchen dann die obersten Schichten der Atmosphäre erreichen. In diesem Fall treten Polarlichter auf, aber das Erdmagnetfeld wird beeinflusst und schränkt die Kurzwellenausbreitung zum Teil enorm ein.

23.3.5 Schichten der Ionosphäre (Übersicht)

Die Ionosphäre setzt sich aus verschiedenen Schichten zusammen (siehe Abbildung 23.7). Welche Schichten aktiv sind, hängt sowohl von der Tages- als auch von der Jahreszeit ab (siehe Tabelle 23.1).

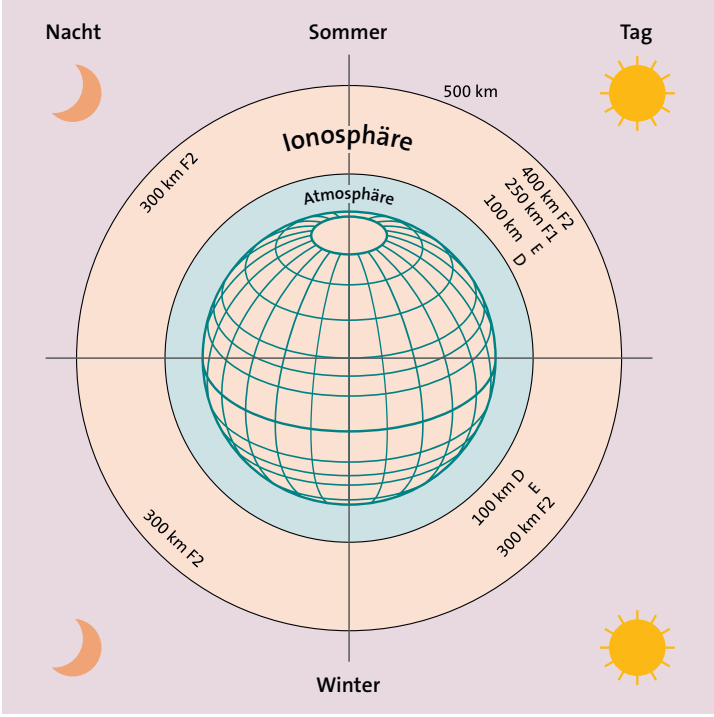


Abbildung 23.7 Aufbau und Schichten der Ionosphäre

Sommer (Tag)	Nacht	Winter (Tag)
D-Schicht (70–90 km)	–	D-Schicht (80–100 km)
E-Schicht (90–120 km)	–	E-Schicht (100 km)
F1-Schicht (ca. 200 km)	–	–
F2-Schicht (ca. 400 km)	F2-Schicht (ca. 300 km)	F2-Schicht (ca. 300 km)

Tabelle 23.1 Schichten der Ionosphäre

Schauen Sie sich die einzelnen Schichten von unten nach oben an.

Die D-Schicht

Die unterste Schicht innerhalb der Ionosphäre schluckt die Signale des Mittel- und Grenzwellenbereichs während ihres Bestehens am Tag. Betroffen sind hierbei das 160-m-Band, aber auch noch das 80-m-Band. Während der Wintermonate ist dieser Effekt aufgrund der kürzeren Tage nicht so stark ausgeprägt.

Die E-Schicht

Die E-Schicht steht uns in der Zeit von Juni bis August auf der Nordhalbkugel (Südhalbkugel: Dezember bis Februar) sporadisch zur Verfügung. Da diese Schicht sich in knapp 100 km Höhe befindet, werden bei der Reflexion unserer Signale über sie nicht allzu große Reichweiten erzielt. Europaverkehr und das Erreichen angrenzender Kontinente sind jedenfalls möglich. Wenn also *Sporadic-E* vorliegt, können Verbindungen via 15-m-Band bis 10-m-Band, aber auch im UKW-Bereich (6-m-Band und 2-m-Band) getätigt oder beobachtet werden. Im Kurzwellenbereich spricht man auch von Short-Skip-Verbindungen, da Entfernungen bis meist 1.000 km überbrückt werden.

Die F1-Schicht

Nur in den Sommermonaten bildet sich die F1-Schicht aus. Diese lässt am Tage keine oder wenig Funksignale zur wesentlich höher liegenden F2-Schicht durch. Dies führt dazu, dass tagsüber auf manchen Bändern Europaverkehr, nachts aber weltweite Verbindungen möglich sind.

Die F2-Schicht

Die F2-Schicht ist rund um die Uhr und zu jeder Jahreszeit ausgeprägt. Allerdings liegt sie im Winter und in der Nacht tiefer (bei 250 km), an den Sommertagen höher (bei

400 km). Sie ermöglicht die Interkontinentalverbindungen, zumindest aber solche mit mehreren Tausend Kilometern an überbrückter Entfernung.

23.3.6 Kritische Frequenz, MUF und Co. im Detail

Trifft ein Funksignal senkrecht (Abstrahlwinkel 90° (In Abbildung 23.8 mit β bezeichnet), Einfallswinkel 0°) auf die Ionosphäre und wird gerade noch reflektiert, nennt man dessen Frequenz die »kritische Frequenz« f_c. Wegen des Einfallswinkel in die Ionosphäre von 0° wird die kritische Frequenz auch als f_0 bezeichnet. Signale mit darüber liegender Frequenz durchdringen die Ionosphäre und gelangen ohne weiteren Nutzen für eine Funkverbindung ins Weltall. Die Funkfrequenzen für die Kommunikation per Satellit liegen stets bedeutend höher als die »kritische Frequenz«. In diesem Falle ist es ja erwünscht, dass die Signale die Ionosphäre durchdringen.

Mit der »MUF« (*Maximum Usable Frequency*) wird die höchste Frequenz bezeichnet, welche für die zu überbrückende Entfernung zwischen Sender und Empfänger noch nutzbar ist. Diese hängt zum einen von der räumlichen Entfernung zwischen Sender und Empfänger ab. Weiter sind der Auftreffwinkel des Signals an der Ionosphäre als auch der Abstrahlwinkel der Signale entscheidend. Bei Antennen mit flacher Abstrahlung treffen die Signale normalerweise ziemlich flach auf die Ionosphäre und werden gut reflektiert. Damit sind in der Praxis Frequenzen bis etwa zum Dreifachen der kritischen Frequenz nutzbar (Beispiel: Kritische Frequenz 10 MHz (30m-Band), MUF bis 30 MHz (10m-Band)). Beim Sonnenfleckenmaximum sowie in der Winterzeit tagsüber liegt die MUF besonders hoch!

Um Verbindungen mit zufriedenstellender Qualität abwickeln zu können, ziehen Sie 10 bis 15 % von der MUF ab. Damit erhalten Sie die »FOT« (*Frequency of Optimum Transmission*, die optimale Frequenz). In der Praxis verwenden Sie einfach das nächste »tiefer« liegende Amateurfunkband.

Abbildung 23.8 zeigt im Detail, worauf es ankommt. Vom Ausgangspunkt links gehen drei Aussendungen ab. Die Frequenz liegt jeweils über der kritischen Frequenz fc. Die erste trifft die reflektierenden Schichten rechtwinkelig. Sie verliert sich, ohne zur Erde zurückgeworfen zu werden, im Weltall. Die zweite Aussendung trifft zwar schräg auf, passiert aber trotzdem aufgrund ihrer zu hohen Frequenz und dem zu steilen Winkel die reflektierenden Schichten. Nur die dritte wird in der Ionosphäre gebrochen und wieder zurückgeworfen, der Winkel β der Abstrahlung ist flach genug!

Bei den Schichten der Ionosphäre handelt es sich nicht um harte Materie, sondern um diffuse, elektrisch geladene Gebilde. Darin wird der Strahl gebrochen. Aus diesem Grund verwendet man anstelle des Begriffes »Reflektion« hier »Brechung« oder »Refraktion«, und auch die MUF wird »ungefähr« angegeben.

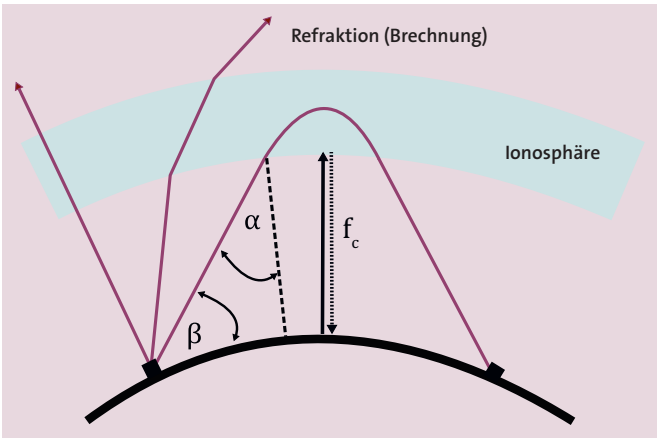


Abbildung 23.8 Brechung bei ausreichend flachem Winkel α

In der Regel bezieht man sich bei den Berechnungen auf die Höhe der F2-Schicht in der Ionosphäre, da diese den ganzen Tag über, wenn auch in verschiedener Höhe, vorhanden ist. Zudem ist diese für den Weitverkehr auf Kurzwelle entscheidend. Mit der gezeigten Formel können Sie näherungsweise die »MUF« berechnen. Der konstante Wert 6370 km bezieht sich dabei auf den Erdradius. Mit *h* wird die virtuelle Höhe angegeben, sie liegt höher als die durch Messungen ermittelte. Der Abstrahlwinkel β (siehe Abbildung 23.8) wird in Grad angegeben.

$$MUF\ (\text{MHz}) \approx \frac{f_c\ (\text{MHz})}{\sqrt{1 - \left(\frac{\cos\beta}{1 + \frac{h\ (\text{km})}{6370\ (\text{km})}}\right)^2}}$$

Beispielwerte:

- Kritische Frequenz f_c: 9,1 MHz
- Höhe der F2-Schicht: 230 km
- Abstrahlwinkel β: 45°

  Mit dem »moderneren« Taschenrechner kommen Sie auf diese Weise zum Ergebnis:

  9,1 ÷ (√ 1 − (cos 45) ÷ (1 + (230 ÷ 6370))) x^2 =

  Die MUF beträgt 12,45 MHz.

  Rechnen Sie einige Beispiele hinsichtlich des Abstrahlwinkels verschiedener Antennen durch!

  Aktuelle Informationen zu den Ausbreitungsbedingungen erhalten Sie im Internet unter folgenden Adressen (Auswahl):

- Ionosonde Juliusruh des Leipnizinstituts für Atmosphärenphysik (IAP): *https://www.ionosonde.iap-kborn.de/*
- (Rund)-Funkempfang: *https://www.fading.de/funkwetter/das-aktuelle-funkwetter*
- Paul L. Herrman, NONBH: *https://www.hamqsl.com/solar.html* und *http://www.dk0wcy.de/*
- Die Bake DK0WCY sendet auf 10,144 MHz Funkwetterberichte den ganzen Tag über im 10-Minutentakt in den Sendearten CW, RTTY und PSK31/BPSK.

Die niedrigstmögliche Frequenz (LUF)

Bei der LUF handelt es sich um die niedrigstmögliche Frequenz für eine Verbindung per Raumwelle. Diese ist von der Stärke der Ionisierung der D-Schicht abhängig. Je stärker die D-Schicht ionisiert ist, desto höher ist die LUF.

Kurzwellenfading, Schwund, Inteferenzen

In einigen Fällen überlappen sich Boden- und Raumwelle. Dies trifft meist auf das 160-m-Band zu. Mal führt dies zu sprunghaften Signalanhebungen, aber auch zu Auslöschungen, wenn nämlich die Signale um 180° phasenverschoben an der Antenne zusammentreffen. Kommt es nicht zur Auslöschung, kann die Verständlichkeit durch das phasenverschobene Zusammentreffen trotzdem leiden.

Rückstreuung, Backscatter

Rückstreuung (*Backscatter*) tritt auf, wenn Inhomogenitäten der Ionosphäre oder Troposphäre auftreten und die Sendefrequenz deutlich über der MUF liegt. Backscatter-Signale erkennen Sie am *Flatterfading*, ähnlich dem aus einem bewegten Fahrzeug im VHF/UHF-Bereich.

Der Mögel-Dellinger-Effekt oder: Wenn nichts mehr geht

Besonders in Zeiten des Sonnenfleckenmaximums kann die Röntgenstrahlung der Sonne stark ansteigen und die D-Schicht besonders stark ionisieren. In der Folge schluckt diese Schicht aufgrund der erhöhten Plasmadichte Kurzwellensignale mehr oder weniger vollständig. Nur noch Bodenwellenausbreitung ist möglich. Dieser Effekt tritt stets am Tage auf und kann einige Minuten bis mehrere Stunden andauern. Dann hilft nur, abzuwarten. Das Funkgerät und die Antenne sind nicht kaputt!

Die tote Zone

Die tote Zone beschreibt den Bereich, der mit der Bodenwelle nicht mehr erreicht wird, aber auch noch nicht von der Raumwelle. Die Weite der toten Zone ist abhängig von der Frequenz, der Tages- und Jahreszeit sowie von der Sonnenfleckenaktivität.

Greyline DX

Während der Dämmerung (morgens/abends) sind besonders hohe Reichweiten zu erzielen. Die D-Schicht ist dann kaum mehr wirksam, die F2-Schicht aber noch aktiv, da sie aufgrund der Höhe noch von der Sonne beschienen wird.

Langer Weg – kurzer Weg

Sie können zwischen Ihrem Standort und dem Ihres Funkpartners am Globus zwei Linien ziehen: einen kürzeren (»kurzer Weg«) und einen langen (»langer Weg«). Gleiches gilt bei entsprechenden Ausbreitungsbedingungen. Sie können eine Verbindung über den »langen Weg« (*Long Path*) herstellen. Dabei verläuft die (Kreisbogen-) Linie entgegengesetzt zum »kurzen Weg«.

Hilfreich ist dabei eine Azimut-Karte. Die Gradzählung beginnt mit 0 und verläuft im Uhrzeigersinn. In der Prüfung werden Ihnen Antennenrichtungen in Grad angegeben. Die Berechnung des »anderen« Weges ist einfach:

Wenn Angabe < 180: Neuer Gradwert = Angabe $+ 180$

Wenn Angabe > 180: Neuer Gradwert = Angabe $- 180$

Zwei Beispiele verdeutlichen dies:

- Angabe 231°, es wird der Grad der Gegenrichtung gesucht:
  231 [-] 180° [=] 51°
- Angabe 28°, es wird der Grad der Gegenrichtung gesucht:
  28 [+] 180° [=] 208°

Sprungentfernung

Die *Sprungentfernung* ist die Distanz, die bei der Raumwellenausbreitung zwischen dem Sender und dem ersten Auftreten des Signals auf der Erde besteht. Je flacher der Abstrahlwinkel der Antenne ist, desto größer wird die Sprungentfernung.

Für Notfunkzwecke und Inlandsverbindungen verwendet man spezielle *Steilstrahlerantennen* (NVIS), die eine geringe Sprungentfernung ermöglichen. Die Strahlungsleistung hingegen hat keinerlei Auswirkung auf die Sprungentfernung.

Bei der Reflexion an der F2-Schicht beträgt die maximale Sprungentfernung 4.000 km, an der E-Schicht ca. 2.200 km.

Ausbreitungseigenschaften der Kurzwellenbänder

Die Frequenzbänder zwischen dem 160-m-Band und dem 10-m-Band haben unterschiedlichste Eigenschaften. Diese hängen zudem von der Tages- und Jahreszeit und der Sonnenfleckentätigkeit ab (siehe Tabelle 23.2).

Band	Tag	Nacht
160 m	starke Dämpfung durch D-Schicht	hohe Reichweiten
80 m	starke Dämpfung durch D-Schicht	hohe Reichweiten
40 m	teilweise Dämpfung durch D-Schicht, aber Funkverkehr bis 1.000 km möglich	hohe Reichweiten, auch interkontinental
30 m	teilweise Dämpfung durch D-Schicht, aber Funkverkehr bis 1.000 km möglich	hohe Reichweiten, auch interkontinental
20 m	fast immer Europa- und Interkontinentalverbindungen möglich	fast immer Europa- und Interkontinentalverbindungen möglich, außer beim Sonnenfleckenminimum
17 m 15 m	während Sonnenfleckenmaximum Europa- und Interkontinentalverbindungen möglich, sonst nur kurze Zeit nutzbar; Sporadic-E möglich	während Sonnenfleckenmaximum Europa- und Interkontinentalverbindungen möglich, sonst keine Raumwellenausbreitung möglich
12 m 10 m	während Sonnenfleckenmaximum Europa- und Interkontinentalverbindungen selbst mit einfachsten Antennen und geringen Sendeleistungen möglich; außerhalb des Sonnenfleckenmaximums keine Raumwellenausbreitung, aber Sporadic-E möglich	während Sonnenfleckenmaximum Europa- und Interkontinentalverbindungen selbst mit einfachsten Antennen und geringen Sendeleistungen möglich; außerhalb des Sonnenfleckenmaximums keine Raumwellenausbreitung, aber Sporadic-E möglich

Tabelle 23.2 Ausbreitungsverhalten der Kurzwellenbänder



Zusammenfassung zur Kurzwellenausbreitung

- **Bodenwelle:** Umfasst den Nahbereich bis ca. 50 km vom Sender entfernt. Sie reicht über den geografischen Horizont hinaus.
- **Raumwelle:** Sie wird an der Ionosphäre reflektiert und ermöglicht damit weltweite Verbindungen.
- **Ionosphäre:** Sie besteht aus der D-, E-, F1- und F2-Schicht. Diese Schichten ändern sich in Abhängigkeit von der Tages- und Jahreszeit.
- **Kritische Frequenz:** Höchste Frequenz von Signalen, die senkrecht auf die Ionosphäre treffen und gerade noch reflektiert werden.
- **MUF, maximal nutzbare Frequenz:** Höchste Frequenz von Signalen, die mit dem Abstrahlwinkel der Standorte von Sender und Empfänger an der Ionosphäre noch reflektiert werden und damit eine Funkverbindung ermöglichen.

- **FOT, optimale Frequenz:** Sie entspricht rund 85 % der MUF.
- **Mögel-Dellinger-Effekt:** Die Dämpfung der D-Schicht nimmt derart zu, dass keine Raumwellenausbreitung mehr möglich ist.
- **Tote Zone:** Bereich um den Sender, der mittels Bodenwelle nicht mehr erreicht wird und noch vor dem ersten Auftreffen der Raumwelle liegt.
- **Solarer Flux:** Gemessene Intensität der 10-cm-Strahlung.

23.4 UKW-Ausbreitung

23.4.1 Normales Ausbreitungsverhalten

Wenn nicht besondere Überreichweiten herrschen, reicht der Funkhorizont ungefähr 15 % über den geografischen Horizont hinaus. Man spricht auch von einer *quasi-optischen* Reichweite.

Die Reichweite wird durch den Standort, die Antennenhöhe, die Umgebung und zum Teil natürlich auch durch die Sendeleistung bestimmt.

Abbildung 23.9 zeigt, dass die Ausbreitung oberhalb von 30 MHz vor allem von der Topografie (Landschaft) und Bebauung abhängt. Die Verbindung vom TX zu RX1 geht über den optischen, geografischen Horizont ein Stück hinaus. Optimal ist die Verbindung von TX zu RX2: Freie Sicht und keine Hindernisse ermöglichen eine stabile Verbindung.

RX3 kann nicht erreicht werden. Er wird durch den Berg abgeschattet. Die gestrichelte Linie zeigt an, wie hoch dessen Standort liegen müsste, um eine Verbindung herstellen zu können. Allerdings können unter bestimmten Umständen wetterbedingte Reflexionen zum Empfang führen. Auch eine Änderung an der möglichen Reflexionsstelle im Gelände, z. B. durch Abholzung oder den Bau eines größeren Gebäudes, kann den Empfang doch plötzlich ermöglichen.

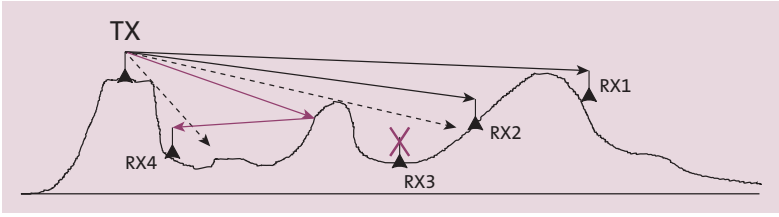


Abbildung 23.9 Wellenausbreitung im VHF- und UHF-Bereich

Berge und Gebäude, sogar die Ionisationsspuren von Meteoren können die »harten« VHF- und UHF-Funkwellen reflektieren. Daher ist RX4 erreichbar, obwohl eine direkte Verbindung durch Geländeabschattung nicht möglich ist.

Auf den Amateurfunkbändern, aber auch bei anderen Funkanwendern dienen Relaisfunkstellen und Satelliten zur Erweiterung der Reichweite.

23.4.2 Troposphärische Überreichweiten

In der Troposphäre, dem unteren Teil der Atmosphäre, findet unter anderem das Wettergeschehen statt. Das Wettergeschehen kann eine Ausbreitung sehr weit über den Horizont hinaus bewirken.

Nicht nur an »harten« Schnee- und Regenwolken finden Reflexionen statt, sondern allgemein am Übergang von dünneren zu dichteren Luftschichten. Die dünneren Luftschichten sind warm. Durch die erhöhte Teilchenbewegung finden weniger Atome und Moleküle Platz. Die dickeren Luftschichten sind kalt. Hier halten sich mehr Atome und Moleküle auf. Am Übergang vom dünneren zum dickeren Medium findet die Reflexion statt. Sicher kennen Sie diese Erscheinung vom Tauchen her, wenn Sie unter der Wasseroberfläche waren und nach oben blickten.

Troposphärische Überreichweiten entstehen, wenn eine Inversionswetterlage vorliegt: Normalerweise sinkt die Temperatur je 100 m Höhenanstieg um 0,6 °C bis knapp 1 °C. Durch das Wettergeschehen kann es aber passieren, dass eine höhere Luftschicht plötzlich wärmer ist als die darunterliegende. Über der warmen Luftschicht muss ebenso eine kalte liegen.

In manchen Gegenden lässt sich eine Inversionslage auch bodennah beobachten: So steigt im Winter der Rauch aus den Kaminen nur 20 m bis 100 m auf, um sich dann waagerecht auszubreiten. Der Übergang zur wärmeren Luftschicht »sperrt« den Abzug der Abgase.

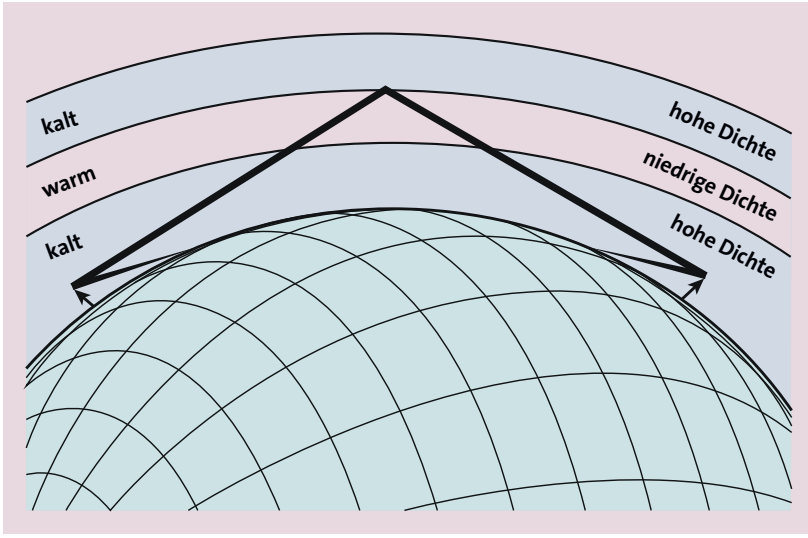


Abbildung 23.10 Reflexionen in der Troposphäre

Auch Reflexionen innerhalb der Troposphäre sind möglich, sodass das Signal wie in einem Schlauch (*Duct*) mehrfach von den kalten oberen und unteren Luftschichten zurückgeworfen wird. Mit *Tropo-DX* können über 2.000 km überbrückt werden. Der überwiegende Teil der Überreichweiten kommt auf diese Art und Weise zustande.

23.4.3 Sporadic-E

Sporadic-E ist auch im VHF-Bereich möglich. Wenn diese Schicht besonders stark ausgebildet ist (vermutlich durch die Anreicherung von Eisen aus Meteoren durch Windströmungen in der hohen Atmosphäre), lassen sich Entfernungen von 2.000 km und mehr überbrücken. Sporadic-E tritt in Europa häufig um die Sommersonnwende herum auf.

Die Sporadic-E-Schicht innerhalb der E-Schicht

Die Sporadic-E-Schicht ist eine besondere Erscheinungsform innerhalb der E-Schicht der Ionosphäre. Die reguläre E-Schicht liegt in einer Höhe von etwa 90 bis 120 Kilometern über der Erdoberfläche und trägt unter normalen Bedingungen zur Reflexion von Radiowellen bei, insbesondere im Kurzwellenbereich. Die Sporadic-E-Schicht, oft als *Es* bezeichnet, ist eine unregelmäßig auftretende Anhäufung von ionisierten Gasen in der E-Schicht, die deutlich stärkere Reflexionen ermöglicht, die sich auch auf VHF-Frequenzen erstrecken können. Diese sporadischen E-Schichten sind daher eine Besonderheit oder ein temporär verstärkter Teil der E-Schicht, nicht eine separate Schicht per se.

23.4.4 Aurora

Besonders in der Zeit eines Sonnenfleckenmaximums reichert sich durch den dann sehr starken Teilchenstrom des Sonnenwindes zusätzliche Ladung in der E-Schicht-Region an. Über den Polarregionen treten dann Polarlichter auf. Die Reflexionen an diesen stark ionisierten Regionen bringen allerdings ein flatterndes, verbrummtes Empfangserlebnis mit sich. Daher eignet sich nur Morsetelegrafie (CW) für einen Funkverkehr über diesen natürlichen Reflektor. Sprachsignale via Aurora sind mehr oder weniger unverständlich.

Hinweis zur Betriebstechnik für Morsetelegrafie bei Aurora: Beim Empfangsbericht verwenden Sie für »T« anstelle einer Zahl den Buchstaben »A« für Aurora. Damit berücksichtigen Sie den durch Aurora verbrummten Ton. Als Beispiel: ur rst 59a

23.4.5 Meteorscatter

Treten Sternschnuppen (Meteore) oder auch Teile von Raumfahrzeugen in die Erdatmosphäre ein, sind diese mit Geschwindigkeiten im Bereich von 30 bis 70 km/s unterwegs. Durch die hohe Geschwindigkeit beginnen die Teile zu glühen, gleichzeitig werden die Luftmoleküle ionisiert. Dies geschieht in der E-Schicht in 90 bis 110 km Höhe. Hinter den glühenden Teilchen baut sich ein ionisierter Bereich auf, der Reflexionen ermöglicht. Dieser Bereich löst sich aber nach maximal zwei Minuten wieder auf.

Die Verbindungen müssen deshalb kurz und knapp abgewickelt werden. Verwenden Sie hierzu aus dem Programm WSJT den Modus FSK441. Am besten eignet sich das 6-m-Band, gefolgt vom 2-m-Band.

Maximal rund 2000 km können damit überbrückt werden, beide Funkpartner müssen die Leuchtspuren am Himmel erkennen können.

Einige bedeutende Meteorschauer sind:

- Quadrantiden: Ende Dezember bis Mitte Januar
- Perseiden: Maximum Mitte August
- Geminiden: erste Dezemberhälfte

23.4.6 Rainscatter

Mikrowellen werden an Gewitter- und Regenwolken reflektiert. Diesen Umstand nutzt man auch beim Regenradar aus, um Niederschläge vorherzusagen. Im Amateurfunk wird Rainscatter hauptsächlich im 10-GHz-Band angewandt. Bei 3 cm Wellenlänge ist der Einsatz von Antennen mit hohem Gewinn kein Problem. Die Verbindungen gehen weit über den optischen Horizont hinaus bis einigen hundert Kilometern. Die Signale sind oftmals verbrummt. Günstige Zeitpunkte für solche Verbindungen erfährt man aus Wetterkarten und auch auf Internetseiten, die sich mit dieser Ausbreitungsart beschäftigen.

23.4.7 Aircraft-Scatter

Überwiegend auf dem 23-cm-Band, aber auch in anderen VHF/UHF- und SHF-Amateurfunkbändern werden vor allem große Personen- und Frachtflugzeuge als Reflektoren genutzt. Durch den Umstand, dass sich Verkehrsmaschinen in einer Höhe zwischen 10.000 und 12.000 m bewegen, ergeben sich Reichweiten von mehreren Hundert Kilometern. Beide Stationen müssen freie Sicht im funktechnischen Sinne zum reflektierenden Flugzeug haben.

Der Funkverkehr wird ähnlich dem mit Meteorscatter abgewickelt. Da die Flugzeuge sich bewegen, treten Frequenzverschiebungen (Doppler-Effekt) auf.

Kapitel 24
Leistung und Feldstärke

24.1 Effektiv abgestrahlte Leistung am Dipol (ERP) und am isotropen Strahler (EIRP)

Die ERP (*Effective Radiated Power*) bezieht sich auf die von einem Dipol abgestrahlte Leistung. Sie wird mit dieser Formel berechnet:

$$P_{\text{ERP}} = (P_{\text{Sender}} - P_{\text{Verluste}}) \times G_{\text{Antenne (Dipol)}}$$

Bei der Berechnung der Verluste addieren Sie alle Umstände, die nach der letzten verstärkenden Stufe (Sender, Leistungsverstärker) auftreten (Kabel, Stecker, Messgeräte). Gewinnangaben »über Dipol« werden einfach in dB oder manchmal in dBd angegeben.

Die EIRP (*Equivalent Isotropically Radiated Power*) verwendet als Bezugsantenne den isotropen Strahler, der nur in der Theorie existiert. Dessen Gewinn beträgt 0 dB, da er über keine Vorzugsrichtung und -ebene verfügt. Die EIRP-Angabe ist das Produkt von zugeführter Leistung und Gewinnfaktor der Antenne. Sie stellt die Leistung dar, die man einem isotropen Strahler zuführt, damit dieser im Fernfeld die gleiche Feldstärke erzeugt wie die Antenne.

Die Berechnung der EIRP erfolgt mit dieser Formel:

$$P_{\text{EIRP}} = (P_{\text{Sender}} - P_{\text{Verluste}}) \times G_{\text{Antenne (isotrop)}}$$

Gewinnangaben werden in dBi angegeben.

Antennenhersteller geben ihre Gewinnangaben oftmals »über Dipol« an. Wenn Sie auf die EIRP umrechnen müssen, erledigen Sie dies durch eine Multiplikation mit dem Gewinnfaktor 1,64.

$$P_{\text{EIRP}} = P_{\text{ERP}} \times 1{,}64$$

Müssen Gewinnangaben umgerechnet werden, addieren Sie zur Gewinnangabe, die sich auf einen Dipol bezieht, 2,15 dB hinzu. Es gilt:

$$G_{\text{Isotrop}} = G_{\text{Dipol}} + 2{,}15\ \text{dB}$$

Arbeiten Sie gegebenenfalls Abschnitt 2.2.2 bezüglich Gewinn und Gewinnfaktor zur Wiederholung nochmals durch.

Übung

Sie kennen folgende Daten:

- Sendeleistung: 25 Watt
- Kabelverluste: 2 dB
- Antennengewinn: 8 dBd

Gesucht ist die EIRP.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie den »Nettogewinn«: 8 dB [−] 2 dB [=] 6 dBd
- Schritt 2: Ermitteln Sie die ERP: 6 dB entspricht einer S-Stufe, und die entspricht einer Leistungsvervierfachung: 25 [×] 4 [=] 100 W ERP
- Schritt 3: Ermitteln Sie die EIRP: 100 [×] 1,64 [=] 164 W EIRP

Schauen Sie sich dazu auch noch eine weitere Aufgabe an:

Bekannt ist der Antennengewinn: 10 dBd

Gesucht ist der Antennengewinn in dBi:

Lösung: 10 dB [+] 2,15 [=] 12,15 dBi Antennengewinn

Vielleicht hilft Ihnen Abbildung 24.1, sich die Berechnungen besser einzuprägen.

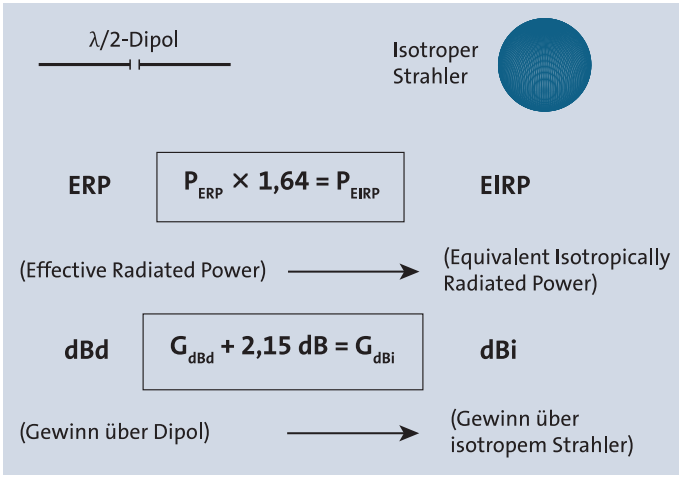


Abbildung 24.1 ERP/EIRP und dBd/dBi

Zusammenfassung zu ERP und EIRP

- dBd und ERP: Die Angaben beziehen sich auf den Dipol als Vergleichsantenne.
- dBi und EIRP: Die Angaben beziehen sich auf den isotropen Strahler als Vergleichsantenne.

- Leistungsumrechnung von ERP in EIRP: Leistung ERP × 1,64
- Gewinnberechnung: Gewinn dBi = Gewinn über Dipol (dBd) + 2,15

Für Viertelwellen-Vertikalstrahler wird die ERP mit dem Gewinnfaktor 3,28 multipliziert bzw. wird zum Gewinn in dB 5,15 dB addiert, um den dBi-Wert zu erhalten.

24.2 Errechnung der EIRP aus Sendeleistung und Antennengewinn dBi

Neuer Beam und 100 Watt – wie viel Leistung wird abgestrahlt bzw. sollte abgestrahlt werden?

Dabei hilft Ihnen diese Formel:

$$P_{\text{EIRP}} = P_{\text{Sender}} \times 10^{\frac{G_i}{10}}$$

In G_i wurde der Antennengewinn in dBi bereits mit den Übertragungsverlusten (Stecker, Kabel ...) verrechnet. Der Beam hat einen Gewinn von 8 dB über Dipol. Die Verluste durch Kabel und Stecker belaufen sich auf 2 dB. Gesucht ist die abgestrahlte Leistung EIRP.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie den Gewinn in dBi:
  8 dB [+] 2,15 dB [-] 2 dB [=] 8,15 dBi
- Schritt 2: Setzen Sie die Werte in die Formel ein:

  $$P_{\text{EIRP}} = 100\ \text{W} \times 10^{\frac{8{,}15}{10}}$$

  Berechnung mit dem Taschenrechner:
  100 [×] 10 [$x^{\blacksquare}$] [(] 8,15 [÷] 10 [)] [=]
  Alternative Eingabe:
  100 [×] 10 [x^y] [(] 8,15 [÷] 10 [)] [=]
  Ergebnis: 653 Watt

24.3 EIRP/ERP des Rückverhältnisses bei Richtantennen

Die Berechnung des Vor-Rück-Verhältnisses bei Antennen wurde bereits in Abschnitt 18.10 erklärt.

Die ERP und EIRP der rückwärts abgestrahlten Sendeenergie können einfach berechnet werden, wenn das Vor-Rück-Verhältnis in dB gegeben ist.

Die bekannten Daten sind dann:

- Gewinn einer Richtantenne: 15 dBd
- Vor-Rück-Verhältnis: 25 dB
- Sendeleistung: 10 Watt
- Kabelverluste: ohne Ansatz

Gesucht ist die EIRP-Abstrahlung auf der Rückseite.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie den Rückwärtsverlust: 15 dBd [−] 25 dB [=] –10 dB
- Schritt 2: 10 dB Verlust senken die Leistung auf 1/10: 1 Watt ERP.
- Schritt 3: Berechnen Sie EIRP: 1 [×] 1,64 [=] 1,64 Watt werden rückwärts abgestrahlt!

24.4 Feldstärkeberechnungen

Die Berechnung der Feldstärke benötigen Sie für die *Anzeige nach BEMFV*, aber auch, um Wunsch und Wirklichkeit beim Selbstbau von Antennen überprüfen zu können. Allerdings gelingt die Berechnung nur mit der Fernfeldformel. Im Nahfeld verhält sich jede Antenne anders. Am einfachsten hilft Ihnen ein Feldstärkemessgerät, wenn Sie die Verhältnisse um Ihre Antenne herum im Nahbereich erfassen möchten.

Feldwellenwiderstand des Freiraums

Der Feldwellenwiderstand des Freiraums verknüpft die elektrische und magnetische Komponente des elektrischen Fernfeldes!

Die Feldstärke E wird in V/m angegeben. Mit der Formel

$$E\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}\right] = \frac{\sqrt{30\ \Omega \times P_{\mathrm{EIRP}}[\mathrm{W}]}}{d\ [\mathrm{m}]}$$

können Sie die Berechnung vornehmen, wenn Ihnen die EIRP und die Entfernung zur Antenne bekannt sind. Diese Formel liefert den Effektivwert. Eine weitere wichtige Formel lautet

$$E\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}\right] = \frac{U\ [\mathrm{V}]}{d\ [\mathrm{m}]}$$

wenn die Spannung und Entfernung bekannt sind.

Übung

Die EIRP im Beispiel beträgt 635 Watt. Wie hoch ist die Feldstärke nach 10 m Freiraumausbreitung?

Lösung:

Füllen Sie die Formel mit den Werten:

$$E\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}\right] = \frac{\sqrt{30\ \Omega \times 635\ \mathrm{W}}}{10\ [\mathrm{m}]}$$

Geben Sie dann Folgendes in den Taschenrechner ein:

- [√■] 30 [×] 635 [→] 10 [=]
  ([→] = Cursor 1 Stelle nach rechts)

Alternative Eingabe:

- 30 [×] 635 [=] [√] [÷] 10 [=]

Die Feldstärke beträgt 13,8 V/m.

24.5 Personenschutz, Berechnung von Schutzabständen

Gesundheitliche Schäden durch Funkemissionen dürfen nicht vorkommen, daher wurden abhängig von den Frequenzbereichen Grenzwerte für den Schutz von Personen festgelegt (siehe Tabelle 24.1). Die elektrische Feldstärke wird in V/m (Volt je Meter) und die magnetische Feldstärke in A/m (Ampere je Meter) angegeben.

In der Anlage 1 b der *Sechsundzwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV*, siehe dort *Kapitel 1 (zu den §§ 2, 3, 3a und 10)*) werden die Grenzwerte aus Tabelle 24.1 genannt.

Sie finden in Tabelle 24.1 verschiedene Frequenzbereiche und die dazugehörigen Feldstärken. Der menschliche Körper absorbiert hochfrequente Strahlung abhängig von deren Frequenz.

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke E [V/m]
unter 10 MHz	$\frac{87}{f_{[MHz]} \times 0{,}5}$
10 MHz bis 400 MHz	28
400 MHz bis 2.000 MHz	$1{,}375 \times f_{[MHz]} \times 0{,}5$
über 2.000 MHz	61

Tabelle 24.1 Personenschutzgrenzwerte

Tabelle 24.1 zeigt Maximalwerte, die sich auf 6-minütige Intervalle beziehen. Diese Werte reduzieren sich für

- SSB um den Faktor 0,167 bei einem Sende-/Empfangsverhältnis von 2/4 Minuten (TX2-RX4),
- CW um 0,25 bei einem Sende-/Empfangsverhältnis von 3/3 Minuten (TX3-RX3).

Für alle anderen Sendearten (FM, SSTV, DIGI, RTTY) bleibt es bei 1!

Details für den tieferen Einstieg finden Sie in der Norm EN 50413 aus dem Jahr 2013.

In diesem Kapitel haben Sie bereits die Berechnung der effektiv abgestrahlten Leistung kennengelernt. Hierfür gibt es noch eine weitere Formel, die in den Prüfungsfragen auftauchen kann:

$$P_{\text{ANT}} = D \times P_{\text{Sender}}$$

Das *D* steht hierbei für den *Dämpfungsfaktor*. Diesen ermitteln Sie aus allen Verlusten (Kabel, Stecker, eingefügte Messgeräte). Dazu ermitteln Sie jeden einzelnen Leistungsabfall nach der unten stehenden Formel und addieren die Ergebnisse. Der gesamte Leistungsabfall kann auch per Messung ermittelt werden. Anschließend berechnen Sie den Dämpfungsfaktor.

$$D = \frac{P_{\text{Leitungsanfang}}\,[W]}{P_{\text{Leitungsende}}\,[W]}$$

Möchten Sie dies in dB ausdrücken, verwenden Sie diese Formel:

$$\text{Dämpfungsmaß } \alpha[dB] = 10 \times lg\frac{P_{\text{Eingang}}\,[W]}{P_{\text{Ausgang}}\,[W]}$$

Dies wird *Dämpfungsmaß* genannt. Die Kabeldämpfung berechnen Sie so, wie in Abschnitt 19.3 gezeigt.

Hinzu kommen noch 0,2 dB je Steckverbindung. Haben Sie also ein Kabel zwischen Funkgerät und Antenne, so können 0,4 dB an Dämpfung zu jener des Kabels hinzugerechnet werden.



Feldstärke

Die Feldstärke nimmt mit dem Kehrwert der Entfernung zur Antenne ab!

Die Formel zur Berechnung des Schutzabstands (*Fernfeld*) *r* lautet:

$$r[m] = \frac{\sqrt{30\Omega \times P_{\text{EIRP}}\,[W]}}{E\,[\frac{V}{m}]}$$

wobei es sich bei E um den Grenzwert handelt. Allerdings gilt das Ergebnis nicht innerhalb des strahlenden Nahfeldes. Für einfache Antennen, die klein gegenüber der Wellenlänge bemessen sind (Dipol, »Gummiwurst«), gilt diese Formel für das strahlende *Nahfeld* für die Ermittlung des räumlichen Bereichs:

$$d \geq \frac{\lambda}{2 \times \pi}$$

bzw. das Fernfeld mit 4 × λ! Für besondere Antennen wie magnetische Antennen oder das reaktive Nahfeld

$$d \leq \frac{\lambda}{2 \times \pi}$$

finden andere Formeln bzw. Messungen Anwendung.

Liegt nun der von Ihnen ermittelte Schutzabstand nach der Fernfeldformel innerhalb des strahlenden Nahfeldes, können Sie dieses Ergebnis nicht verwenden!

Übung

Sie kennen folgende Werte:

- Sendeleistung: 10 Watt
- Frequenz: 14 MHz
- Antenne: Dipol

Gesucht ist der Schutzabstand *r*.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie EIRP: 10 Watt [×] 1,64 [=] 16,4 Watt
- Schritt 2: Finden Sie den Grenzwert in der Tabelle: E = 28 $^{V}/_{m}$
- Schritt 3: Füllen Sie die Formel aus:

$$r[\mathrm{m}] = \frac{\sqrt{30 \times 16{,}4}}{28}$$

Mit dem Taschenrechner berechnet:

- [√■] 30 [×] 16,4 [→] 28 [=]

  Fernfeld-Schutzabstand *r*: 0,79 m

  Nunmehr wird das strahlende Nahfeld berechnet:

  Wellenlänge für 14 MHz: 21,43 m

  Berechnung mit dem Taschenrechner: 21,43 [÷] [(] 2 [×] [π] [)] [=] 3,41 m

Das strahlende Nahfeld beläuft sich aber auf 3,41 m! Somit können Sie diese Berechnung nicht verwenden. Wenn Sie aber 750 W EIRP an die Antenne bringen, würde der Schutzabstand nach der Fernfeldformel 6,86 m betragen und wäre korrekt, weil im Fernfeld.

Zusammenfassung Personenschutz und Schutzabstände

Die Grenzwerte finden Sie in der *Sechsundzwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV), Anhang 1*, nicht aber in fernmelderechtlichen Bestimmungen. Diese verweisen auf diese Regelungen.

Die Feldstärke nimmt mit dem Kehrwert der Entfernung ab.

Da die elektrische und magnetische Komponente im Nahfeld keine konstante Phasenbeziehung aufweisen, ist keine einfache Umrechung der Größen E, H und S möglich. Die Formel

$$r[\mathrm{m}] = \frac{\sqrt{30 \times P_{\mathrm{EIRP}}}}{E}$$

gilt nur für Abstände

$$d > \frac{\lambda}{2 \times \pi}$$

bei gegenüber der Wellenlänge kleinen elektrischen Antennen und Dipolen.

Der Dämpfungsfaktor D berechnet sich aus dem Verhältnis von Ein- und Ausgangsleistung.

Der Sicherheitsabstand muss zu jedem Punkt der Antenne eingehalten werden.

Die Einhaltung der Schutzabstände muss ab einer EIRP von über 10 Watt nachgewiesen werden (BEMV-Selbsterklärung)!

In den gängigen Berechnungsprogrammen *Watt32* und *Wattwächter* wird das strahlende Nahfeld abhängig von der tatsächlich verwendeten Antenne berücksichtigt!

Übung

Ein 2-m-Band-Mobilfunkgerät (FM, 50 Watt) wird an einer Antenne X50N (Gewinn: 4,5 dBi) betrieben. Gerät und Antenne sind über ein Kabel RG58U mit 10 m Länge verbunden. Das Antennenkabel ist jeweils mit einem Stecker an das Gerät und die Antenne angeschlossen.

Gesucht sind EIRP und der Schutzabstand.

Lösung:

- Schritt 1: Ermitteln Sie die Kabeldämpfung.

  Verwenden Sie das Diagramm aus dem Anhang des amtlichen Fragenkatalogs *Technik*. Dort finden Sie bei 145 MHz für das Kabel RG58U eine Dämpfung von 20 dB je 100 m. Sie verwenden aber nur 10 m; rechnen Sie mit dieser Formel die anteilige Dämpfung aus:

$$a = \frac{\text{tatsächliche Länge (m)}}{100\ \text{m}} \times \text{Dämpfung(dB)}$$

Geben Sie in den Taschenrechner ein:

10 [÷] 100 [×] 20 [=]

Zwischenergebnis: 2 dB Kabeldämpfung

Die Kabeldämpfung finden Sie in Abschnitt 19.3 erklärt.

- Schritt 2: Sie dürfen noch für jede Steckverbindung 0,2 dB abziehen:

  0,4 dB Steckerdämpfung.

- Schritt 3: Berechnen Sie die Gesamtdämpfung

  Kabeldämpfung 2 dB + Steckerdämpfung 0,4 dB ergeben die Gesamtdämpfung von 2,4 dB.

- Schritt 4: Berechnen Sie die EIRP.

  Mit der Formel

  $$P_{\text{EIRP}} = P_{\text{Sender}} \times 10^{\frac{G_i}{10}}$$

  berechnen Sie nun die EIRP.

  Dabei steht G_i bereits für den um die Kabelverluste bereinigten Antennengewinn in dBi!

  Hier im Beispiel ziehen wir vom Antennengewinn in Höhe von 4,5 dBi 2,4 dB ab, es verbleiben als Gewinn 2,1 dBi.

  Füllen Sie die Formel aus:

  $$P_{\text{EIRP}} = 50\ \text{W} \times 10^{\frac{2{,}1\ \text{dBi}}{10}}$$

  Berechnung mit dem Taschenrechner:

  50 [×] 10 [$x^{\blacksquare}$] [(] 2,1 [÷] 10 [)] [=]

  Alternative Eingabe:

  50 [×] 10 [x^{y}] [(] 2,1 [÷] 10 [)] [=]

  Ergebnis: Die EIRP beträgt 81 Watt.

- Schritt 5: Wählen Sie den Reduktionsfaktor aus.

  Für FM beträgt er 1. Es bleibt beim Ansatz der EIRP von 81 Watt.

- Schritt 6: Berechnen Sie den Schutzabstand.

  Für 145 MHz beträgt die maximal zulässige Feldstärke 28 $^{\text{V}}/_{\text{m}}$. Setzen Sie dies zusammen mit der EIRP in diese Formel ein:

  $$r[\text{m}] = \frac{\sqrt{30 \times P_{\text{EIRP}}}}{E\ ^{\text{V}}/_{\text{M}}}$$

Befüllt mit den Eingabewerten:

$$r[\mathrm{m}] = \frac{\sqrt{30 \times 81}}{28}$$

Die Taschenrechnereingabe erfolgt so:

[√■] 30 [×] 81 [→] 28 [=]

([→] = Cursor 1 Stelle nach rechts)

Alternative Eingabe:

30 [×] 81 [=] [√] [÷] 28 [=]

Der Schutzabstand r beträgt also 1,76 m.

In der Praxis verwenden Sie Programme wie Wattwächter oder Watt32, die Ihnen die Rechenarbeit abnehmen. Die Aufgabe wurde mit dem Programm Wattwächter der Bundesnetzagentur getestet. Dabei wurde eine Antennenhöhe (also die Höhe des Einspeisepunkts) von 5 m angegeben. Außerdem setzt das Programm für das Kabel einen anderen Dämpfungsfaktor je 100 m an, nämlich 18,3 dB. Das Ergebnis in Abbildung 24.2 zeigt aber, dass der manuelle Rechenweg ebenso gültig ist.

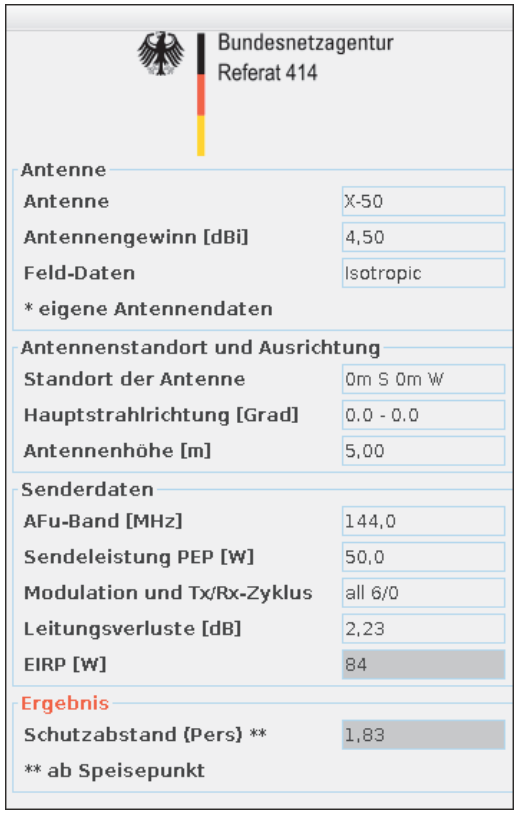


Abbildung 24.2 Berechnung der Aufgabe mit Wattwächter, Ergebnisspalte

Kapitel 25
Messungen und Messgeräte

Die Messaufgaben im Funkbereich sind vielfältig. Es gibt bisher kein »Allesmessgerät«, das vom Batterietest bis hin zur Bestimmung des Stehwellenverhältnisses einer Antenne sämtliche Aufgaben übernimmt. Tabelle 25.1 zeigt Ihnen eine Übersicht der Messaufgaben und geeigneter Geräte.

Messaufgabe	Messmittel
Gleich- und Wechselstrom	Dreheisenmesswerk (analog), digitales Messwerk, Multimeter, Oszilloskop
Gleichstrom	Dreheisen- und Drehspulmesswerk (analog), digitales Messwerk, Multimeter, Oszilloskop
Gleichspannung	Dreheisen- und Drehspulmesswerk (analog), digitales Messwerk, Multimeter, Oszilloskop
Gleichstrom	Dreheisen- und Drehspulmesswerk (analog), digitales Messwerk, Multimeter, Oszilloskop
Signale, Signalformen, Signalspannungen	Oszilloskop
ungefähre Bestimmung der Resonanzfrequenz von Schwingkreisen und Antennen	Dipmeter
Stehwellenverhältnis von Antennen, Anpassung von Antennen	Stehwellenmessgerät
genaue Frequenzmessung	Frequenzzähler (mit stabiler Zeitbasis)
weniger genaue Frequenzmessungen, Feststellung von Harmonischen	Absorptionsfrequenzmesser
genaue Erfassung von Harmonischen eines Signals	Spektrumanalysator

Tabelle 25.1 Übersicht der Messmittel

Messaufgabe	Messmittel
Effektivwertmessung sinusförmiger Signale	Gleichrichterinstrument
Effektivwertmessung nicht sinusförmiger Ströme	Messeinrichtung mit Thermoumformer, Hitzdraht-Amperemeter
Anpassung, Filterkurven	Netzwerkanalysator (bzw. entsprechende Software für SDR-Empfänger)

Tabelle 25.1 Übersicht der Messmittel (Forts.)

25.1 Arten der Messwerke

Es gibt analoge und digitale Messwerke. Sie unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Gebrauchs- und Einsatztauglichkeit.

Analoge Messwerke benötigen keine Betriebsspannung, wie dies bei den digitalen Ausführungen der Fall ist. Bei analogen Messwerken müssen Sie mit Skalenteilungen zurechtkommen, die Werte sind mehr oder weniger immer ein wenig geschätzt. Aber dafür erkennen Sie Tendenzen und Verläufe anhand der Zeigerbewegungen. Bei digitalen Anzeigen erhalten Sie einen absoluten Wert, erkennen aber bei ständig wechselnden Werten nicht unbedingt eine Tendenz.

Neben dem Messbereich verfügen Messgeräte über eine weitere Kenngröße, die Auflösung. Die Auflösung gibt die kleinste Einteilung der Anzeige an, sei es eine Skala mit Zeiger oder die (Nachkomma-)Stellen einer digitalen Messeinrichtung.

In jedem Fall sollen Spannungsmesser so hochohmig wie möglich sein, um das Messergebnis nicht zu beeinflussen. Umgekehrt soll ein Strommesser den Stromfluss nicht unnötig drosseln und soll damit einen sehr geringen Widerstand aufweisen.

Der *Spannungsmesser*, auch Voltmeter genannt, kommt in der Praxis als *Einbaumessgerät* für Eigenbaugeräte und Schalttafeln vor. Diese Geräte gibt es als analoge oder digitale Ausführung. Gleiches gilt für die *Strommesser* (Amperemeter).

Beachten Sie den richtigen Anschluss beim Einbau (Polarität)!

Für Messgeräte gibt es Schaltzeichen, die Sie in Abbildung 25.1 finden. Es gibt auch rechteckige Zeichenformen für sie.

Die digitalen und analogen Bauformen haben allesamt ihre Daseinsberechtigungen. Digitale Messwerke benötigen eine Versorgungsspannung, analoge hingegen keine (außer für die Messwerksbeleuchtung, falls eingesetzt).

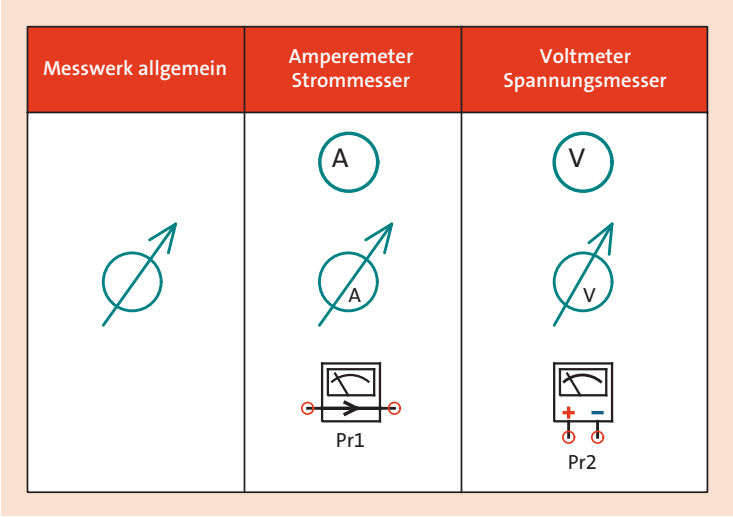


Abbildung 25.1 Schaltsymbole für Messwerke

25.1.1 Drehspulmesswerke

Ausschließlich zur Messung von Gleichspannung und -strom sind die *Drehspulmesswerke* geeignet. Sie verfügen über einen Dauermagnet, der gegen die Kraft der stromdurchflossenen Spule mit dem Zeiger wirkt. Diese Messwerke benötigen nur wenig Energie und sind daher auch für Messungen im Kleinsignalbereich einsetzbar. Ein Drehspulmesswerk wird durch einen nach unten zeigenden Hufeisenmagnet gekennzeichnet.

Abbildung 25.2 zeigt Ihnen ein kleines Drehspul-Amperemeter mit einer Besonderheit: Es hat eine Skala, bei der der Zeiger seine Nullstellung in der Mitte hat.

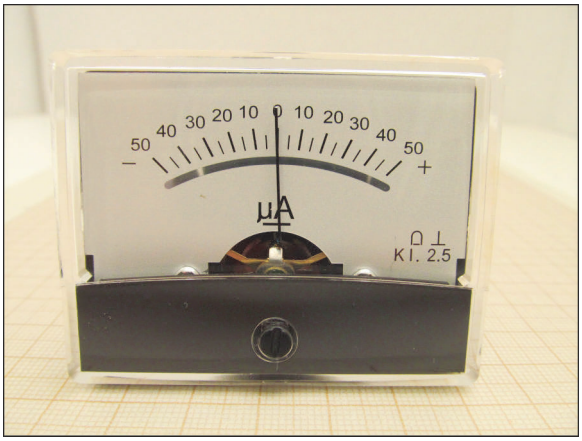


Abbildung 25.2 Drehspulmesswerk

Mit diesem Messwerk lassen sich Gleichströme in beide Richtungen messen. Beachten Sie auch den linearen Verlauf der Skala! Durch die zusätzlich vorhandene Spiegelskala ist es möglich, genauer abzulesen, da diese es Ihnen ermöglicht, den Blick mithilfe des Spiegels exakt senkrecht auszurichten.

Drehspulmesswerke ermöglichen die Messung von Gleichspannungen und -strömen. Ihr Wirkungsprinzip beruht auf der Wechselwirkung der Kräfte zwischen einem permanent magnetischen und einem elektromagnetischen Feld. Den Aufbau zeigt Abbildung 25.3.

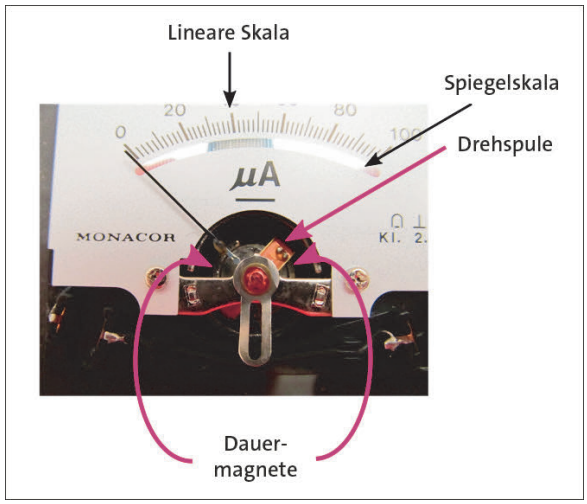


Abbildung 25.3 Aufbau eines Drehspulmesswerks

Drehspulmesswerke verfügen über eine lineare Skalenteilung.

Marktübliche Drehspulmesswerke haben eine Genauigkeit von 1,5 %. Preislich günstigere Ausführungen begnügen sich mit 2,5 %. Dieser Wert bezieht sich auf den Endausschlag der Skala, den Messbereichsendwert!

Drehspulmesswerke werden mit dem »Hufeisensymbol« gekennzeichnet (siehe Abbildung 25.4).



Abbildung 25.4 Kennzeichnung für ein Drehspulmesswerk

25.1.2 Dreheisenmesswerke

Das *Dreheisenmesswerk* hingegen verfügt über eine feststehende und eine bewegliche Spule (mit dem Zeiger). Daher kann man mit ihm sowohl Gleich- als auch Wechselspannungen und -ströme messen. Der Eigenverbrauch ist deutlich höher, die Skala

ist nicht linear. Dreheisenmesswerke tragen als Kennzeichnung eine stilisierte Spule mit zylindrischem Kern. (Leider ist das Symbol nicht am Modell in Abbildung 25.5 aufgedruckt.)

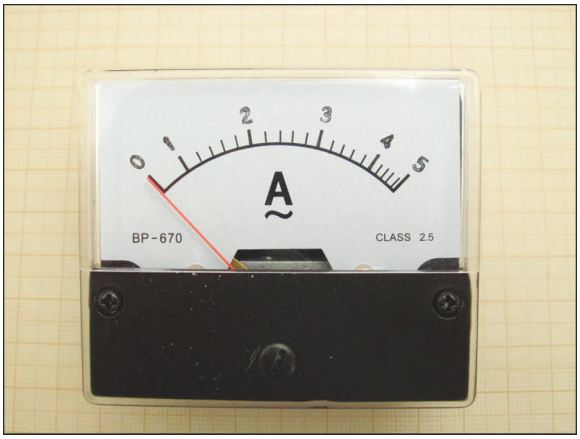


Abbildung 25.5 Dreheisenmesswerk

Sie können Dreheisenmesswerke für Gleich- und Wechselspannung bzw. Gleich- und Wechselstrom einsetzen. Dreheisenmesswerke zeigen bei Wechselspannung und -strom stets den Effektivwert an. Sie bestehen aus einer stromdurchflossenen Spule, die einen beweglichen Eisenkern magnetisiert. Ein zweiter, feststehender Eisenkern wird ebenso magnetisiert. Die magnetischen Kräfte wirken auf den beweglichen Eisenkern. Der bewegliche Eisenkern wird aber durch Spiralfedern in seiner Bewegung gehindert. Die Skala ist nicht linear zum Stromdurchfluss. Im Handel finden Sie diese Messwerke als Einbauinstrumente mit einer Genauigkeit von 1,5 % oder 2,5 %. Sie treffen auf diese Messwerke bei älteren Geräten, sie werden aber auch noch heute verbaut, vor allem in Schalttafeln der Stromversorgung. Das Kennzeichnungssymbol finden Sie in Abbildung 25.6.

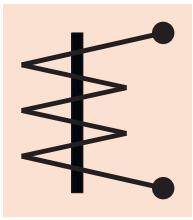


Abbildung 25.6 Kennzeichnung für ein Dreheisenmesswerk

25.1.3 Einbaulagen analoger Messinstrumente

Sie müssen die Einbaulage analoger Messinstrumente beachten! Messinstrumente für den stehenden Einbau in Frontplatten dürfen nicht liegend eingebaut werden

und umgekehrt. Andernfalls werden aufgrund der Schwerkraftverhältnisse falsche Messwerte angezeigt. Beachten Sie die Herstellerangaben!

Die vorgeschriebene Einbaulage entnehmen Sie entweder dem Datenblatt oder dem Symbol auf dem Skalenblatt (siehe Abbildung 25.7).

Gebrauchs- und Einbaulagen für analoge Messinstrumente

Gebrauchslage	Symbol
senkrecht	
waagrecht	
Gebrauchs- bzw. Einbaulage mit Winkelangabe	

Abbildung 25.7 Kennzeichnung der zulässigen Einbaulagen

25.1.4 Digitale Messinstrumente

Digitale Messwerke (siehe Abbildung 25.8) verfügen im Regelfall über die höhere Messgenauigkeit. Sie sind hinsichtlich ihrer Einbaulage unkompliziert, da sie keinerlei mechanische Komponenten besitzen, die durch die Schwerkraft beeinflusst werden. Allerdings benötigen die meisten digitalen Messwerke eine eigene Stromversorgung, an die Sie beim Einbau denken müssen.



Abbildung 25.8 Digitales Einbauinstrument eines Batteriekoffers

25.2 Messbereichserweiterungen

Analoge und digitale Messwerke erhalten Sie mit gängigen (Standard-)Messbereichen. Diese beginnen bei 25 µA und enden bei 25 A. Bei den Spannungen verhält es sich ähnlich.

Bei Eigenbauprojekten können Sie nicht immer auf ein passendes Messwerk zurückgreifen. Mit Widerständen verändern Sie den Messbereich entsprechend.

Den Spannungsbereich eines Voltmeters erweitern Sie dadurch, dass Sie einen Widerstand in Serie schalten; den Messbereich eines Amperemeters erweitern Sie durch einen Parallelwiderstand (siehe Abbildung 25.9).

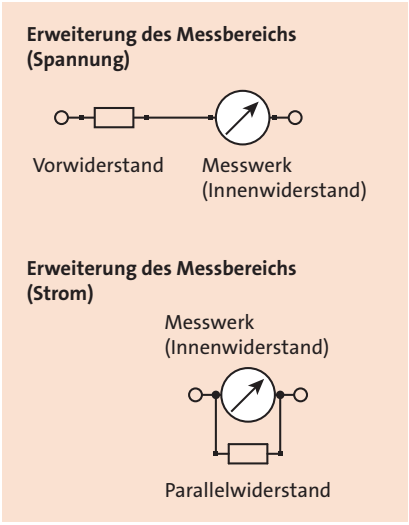


Abbildung 25.9 Messbereichserweiterungen

Übung

Sie haben ein Messwerk mit Endausschlag bei 100 µA und einem Innenwiderstand von 1 kΩ. Gesucht ist der Vorwiderstand für den Endausschlag bei einer Spannung von 50 Volt.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie den Gesamtwiderstand, bei dem 100 µA bei 50 Volt fließen. Nutzen Sie dazu diese Formel:

  $$R = \frac{U}{I}$$

  Mit den richtigen SI-Präfixen lautet die Taschenrechnereingabe:

  50 [÷] 0,0001 [=]

  Der Gesamtwiderstand der Schaltung ist also 500.000 Ω = 500 kΩ.

- Schritt 2: Berechnen Sie den Vorwiderstand: Ziehen Sie den Innenwiderstand des Messgeräts vom Gesamtwiderstand ab:

  ($R_{Vorwiderstand} = R_{Gesamt} - R_{Messgerät}$)

  Ergibt: 499 kΩ für den Vorwiderstand

Um Messbereichserweiterungen zu berechnen, wiederholen Sie gegebenenfalls die Grundlagen aus Abschnitt 5.3 bis Abschnitt 5.8.

Messungen und Sicherheit

Achten Sie auf Ihre Sicherheit beim Messen von Spannungen:

- Berühren Sie keine leitenden Teile!
- Fassen Sie die Messkabel an den Isoliergriffen an!
- Verursachen Sie keine Kurzschlüsse!

25.3 Arbeiten mit dem Multimeter/Vielfachmessgerät

Vielfachmessgeräte ersparen Ihnen die Anschaffung von vielen einzelnen Messwerken für die gewünschten Arbeitsbereiche. Die einfachsten Modelle verfügen wenigstens über Messbereiche für:

- Gleichspannung
- Gleichstrom
- Wechselspannung
- Widerstand

»Bessere« analoge Modelle verfügen über den notwendigen Wandler für die Wechselstrommessung. Digitale Vielfachmessgeräte bieten auch die Messgrößen *C*, *L*, Durchgangsprüfer (akustisch) und einen Bauteiletester (Halbleiter).

Für die sichere Benutzung sind mit einem entsprechenden Berührungsschutz ausgestattete Messkabelsätze notwendig (siehe Abbildung 25.10). Die Stecker sollen fest in den Buchsen (4 mm) am Messgerät stecken und damit nicht leicht herausfallen können. Die Messspitzen sind so kurz wie möglich blank. Hierbei wird für die Messkategorie CAT III maximal eine freie Kontaktlänge von 4 mm zugelassen.

Griffe verhindern das Abrutschen zu den Messspitzen. Insgesamt werden damit Kurzschlüsse, aber auch (gesundheitsgefährdende) Berührungen vermieden.

Ältere Multimeter verfügen nur über Anschlussbuchsen mit 2 mm oder weniger. Aus diesem Grund kann für solche Geräte nur noch der Einsatz im Bereich der Schutzkleinspannung (Messkategorie CAT I) empfohlen werden.

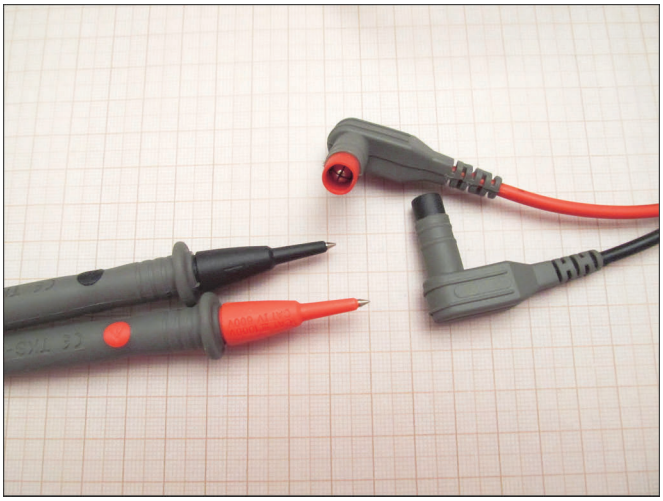


Abbildung 25.10 Sichere Messschnüre

Farben der Messkabel

Das schwarze Kabel wird stets mit der Buchse COM (–) (= Minuspol) verbunden. Das rote Kabel wird in Abhängigkeit von der Messung mit der jeweiligen Buchse verbunden. Oftmals sind die Eingänge für Spannungs- und Strommessungen getrennt. Bitte lesen Sie die Betriebsanleitung Ihres Multimeters aufmerksam durch!

Tabelle 25.2 gibt Ihnen eine kurze Übersicht über die Messkategorien.

Messkategorie	Bereich und Anforderung
CAT I	batteriebetriebene Geräte, Schutzkleinspannung
CAT II	wie CAT I, zusätzlich Messungen an Geräten, die über einen Netzstecker versorgt werden
CAT III	Umfasst CAT I und CAT II sowie Messungen in der elektrischen Gebäudeinstallation. Messspitzen dürfen maximal 4 mm blank sein. Der Bereich oberhalb der Schutzkleinspannung ist nur entsprechend ausgebildetem Fachpersonal vorbehalten.
CAT IV	Umfasst CAT I bis CAT III, zusätzlich sind aber Messungen außerhalb von Gebäuden im Niederspannungsbereich zulässig.

Tabelle 25.2 Messkategorien

Abbildung 25.11 zeigt ein älteres analoges Vielfachmessgerät.



Abbildung 25.11 Analoges Multimeter

Es verfügt über ein Drehspulmesswerk mit einer Spiegelskala (siehe Abbildung 25.12). Normalerweise lesen Sie senkrecht die Werte ab. Blicken Sie aber von der Seite her auf den Zeiger, erhalten Sie durch den Parallaxenfehler ein unzutreffendes Ableseergebnis. Die Spiegelskala zeigt Ihnen die tatsächliche Lage des Zeigers für die darüber und darunterliegende Skala.

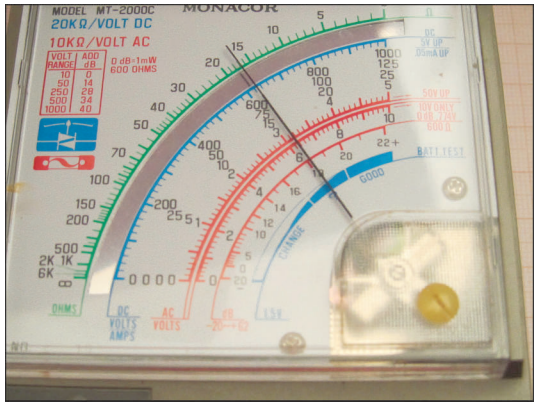


Abbildung 25.12 Spiegelskala

Ein Missverständnis ergibt sich bei der Widerstandsmessung: Es ist ein Unterschied, ob kein Widerstand oder ein unendlich hoher Widerstand gemessen wird. Ein sehr niedriger Widerstand wird am Messgerät mit nahe oder gleich 0 Ω angezeigt. Ein sehr hoher hingegen am Ende der Skala mit dem ∞-Zeichen.

Übung

Welchen Messwert lesen Sie in Abbildung 25.13 ab? Betrachten Sie die Einstellung am Messgerät, und finden Sie die richtige Skala!



Abbildung 25.13 Ableseübung

Lösung: Der Drehschalter ist auf den Gleichspannungsmessbereich bis 5 Volt eingestellt. Somit verwenden Sie die rote Skala, die mit 5 endet. Im konkreten Fall lesen Sie 3,1 ab. Es wird also eine Gleichspannung mit 3,1 Volt gemessen.

Digitale Multimeter (siehe Abbildung 25.14) ermöglichen das Ablesen des Messwertes im Klartext. Überdies sind sie relativ unempfindlich gegenüber mechanischen und elektromagnetischen Einflüssen aus dem Umfeld. Die Bedienung ist die gleiche:

Wählen Sie den gewünschten Messbereich aus, und legen Sie die Messspitzen an den Messpunkt der Schaltung oder das Bauteil.

Das hier im Bild gezeigte Multimeter weist Sie auch auf die verwendeten Messbuchsen am Gerät hin und zeigt den Messbereich. Durch Druck auf den grauen Taster im Schaltrad wechseln Sie unter anderem zwischen Gleichstrom/-spannung und Wechselstrom/-spannung. Darüber hinaus verfügt das Gerät über einen Frequenzzähler bis 10 MHz.



Abbildung 25.14 Digitalmultimeter

Sie finden auch spezielle Messgeräte wie LCR-Meter in digitaler Ausführung (siehe Abbildung 25.15). Solche Geräte ergänzen die Funkwerkstatt in sinnvoller Weise.

Multimeter erhalten Sie auch als Tischgeräte

Meist verfügen diese über eine größere Anzeige. In jedem Fall ist sitzendes Arbeiten mit besserem Blick auf die Anzeige möglich.

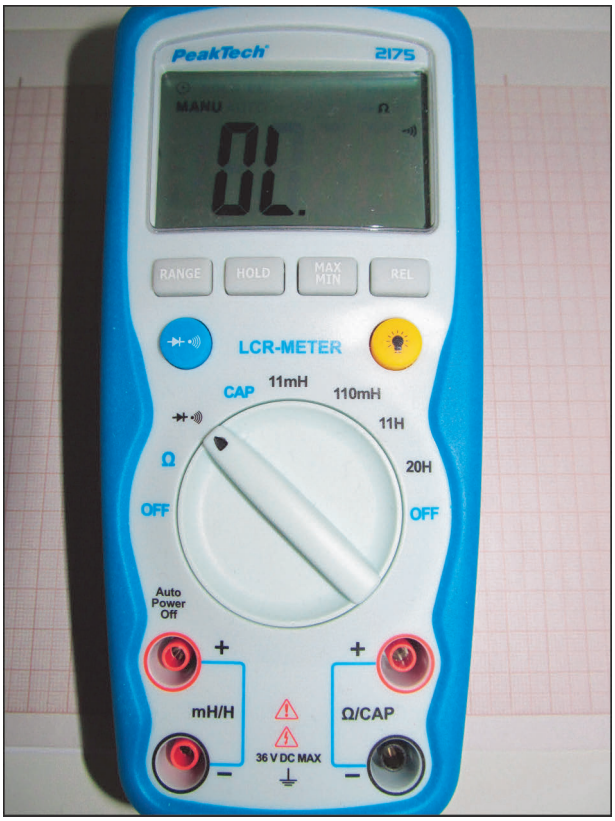


Abbildung 25.15 Digitales LCR-Messgerät

25.4 Widerstandsmessung

Steht kein Vielfachmessgerät zur Verfügung, kann mithilfe einer Kombination aus Volt- und Amperemeter (siehe Abbildung 25.16) eine Widerstandsmessung durchgeführt werden. Allerdings funktioniert dies nicht bei kurzen Drahtstücken. In diesem Fall platzieren Sie das Voltmeter parallel zu *R*!

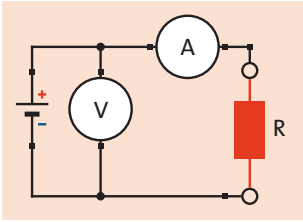


Abbildung 25.16 Schaltung für eine Widerstandsmessung

Übung

Sie lesen am Voltmeter 9 V und am Amperemeter 0,02 A ab. Gesucht ist der Widerstand R.

Lösung: Benutzen Sie die Widerstandsberechnung aus dem ohmschen Gesetz mit dieser Formel:

$$R = \frac{U}{I}$$

Mit dieser Taschenrechnereingabe kommen Sie zum Ergebnis:

9 [÷] 0,02 [=]

Ergebnis: 450 Ω

Die Grundlagen der Widerstandsberechnung finden Sie in Abschnitt 5.3.

25.5 Empfindlichkeit und Innenwiderstand von Messinstrumenten für Strom- und Spannungsmessungen

Die Empfindlichkeit eines Messgeräts wird in Ω/V ausgedrückt. Betrachten Sie hierzu Abbildung 25.11. Hieraus können Sie für den gewählten Messbereich eines Multimeters den Innenwiderstand berechnen:

$$R_{\text{Innenwiderstand}} = \text{Empfindlichkeit } (\Omega/\text{V}) \times \text{Endwert}_{\text{Messbereich}}$$

Übung

Nehmen Sie das hier im Buch gezeigte Beispiel aus Abbildung 25.13. Für den Gleichspannungsbereich wird eine Empfindlichkeit von 20 kΩ/V angegeben. Eingestellt ist der Messbereich für eine Gleichspannungsmessung, das Ende des Messbereichs liegt bei 5 V.

Berechnen Sie für diese Schalterstellung den Innenwiderstand des Multimeters.

Lösung (gleich mit dem Taschenrechner):

20 [×] 5 [=]

Ergebnis: Der Innenwiderstand beträgt 100 kΩ!

Die Falle ist hier mal wieder das SI-Präfix! Wenn kΩ als Eingangswert verwendet wird, kommt das Ergebnis auch mit kΩ heraus!

Den Innenwiderstand benötigen Sie für das Nachrechnen von Messwerten. Aus dem Innenwiderstand heraus können Sie aber auch Strom und Spannung am Messwerk sowie den Endausschlag berechnen.

Den für den Endausschlag notwendigen Strom berechnen Sie mit dieser Formel:

$$I_{\text{Endausschlag}} = \frac{U_{\text{Messbereich}}}{\text{Empfindlichkeit}_{(\text{R/V})}}$$

Übung

Wie hoch ist der Strom am Messwerk bei Vollausschlag, wenn eine Empfindlichkeit von 10 $^{\text{k}\Omega}/_{\text{V}}$ angegeben ist?

Lösung:

Die Aufgabe gibt Ihnen nicht direkt den Messbereich an, aber die Empfindlichkeit. So rechnen Sie einfach mit 1 V!

Geben Sie in den Taschenrechner ein:

1 ÷ 10000 =

Sie erhalten dann 0,0001 A, entsprechend 100 µA.

25.6 Die Genauigkeit von Messinstrumenten

Für Messinstrumente werden Genauigkeitsklassen bestimmt. Meist gilt leider: Je höher die Genauigkeit ist (also je geringer die Abweichung von Anzeigewert und tatsächlichem Wert ist), desto höher ist der Anschaffungspreis. Um die »Genauigkeit« einer Messung anzugeben, spricht man von der *Unsicherheit* eines Messwertes, also der Ableseunsicherheit einer Anzeige oder auch der Messunsicherheit.

Es wurden verschiedene *Messgeräteklassen* geschaffen. Die Klasse gibt die prozentuale maximale Abweichung des Skalenendwertes an. Für analoge Messinstrumente existieren die Klassen in Tabelle 25.3.

Betriebsmessgeräte (Einbaumodelle, Multimeter)	Feinmessgeräte (Labor)
–	0,1
–	0,2
–	0,5
1,0	–
1,5	–

Tabelle 25.3 Messgeräteklassen

Betriebsmessgeräte (Einbaumodelle, Multimeter)	Feinmessgeräte (Labor)
2,5	–
5,0	–

Tabelle 25.3 Messgeräteklassen (Forts.)

Analoge Messwerke werden vom Handel in den Klassen von 0,5 bis 2,5 angeboten. Die Zahl der Genauigkeitsklasse gibt die prozentuale Abweichung beim Skalenendausschlag an. Abweichungen bei den Analogmessgeräten können Sie also recht einfach berechnen.

Übung

Sie arbeiten mit einem Einbau-Drehspulmesswerk mit dem Skalenendausschlag 25 V, Klasse 2,5. Gesucht sind der minimale und der maximale mögliche Wert der Spannung, wenn das Messgerät 10 V anzeigt.

Lösung:

Es gibt verschiedene Rechenwege.

- Schritt 1: Berechnen Sie die Abweichungen des Skalenendwertes.

  Abweichung absolut:

  $$\text{Abweichung}_{\text{Messwert}} = \frac{\text{Skalenendwert}}{100} \times \text{Klassenangabe}$$

  Sie geben also in den Taschenrechner ein:

  25 [÷] 100 [×] 2,5 [=]

  Die Abweichung beträgt nach oben und unten je 0,625 V.
- Schritt 2: Berücksichtigen Sie die Abweichung bei der gemessenen Spannung.
  - Minimaler Wert: 10 V [–] 0,625 V [=] 9,375 V
  - Maximaler Wert: 10 V [+] 0,625 V [=] 10,625 V



Genauigkeit

Die Abweichung des Skalenendwertes gilt für alle Messungen des Messbereichs!

- Minimaler Wert: Messwert – Abweichung
- Maximaler Wert: Messwert + Abweichung

Bei digitalen Messgeräten werden die Genauigkeit und weitere Eigenschaften meist durch mehrere Angaben ausgedrückt (siehe Tabelle 25.4).

Angabe	Bedeutung
%-Wert der Genauigkeit	%-Abweichung vom Ablesewert
Fehlergrenze G, bestehend aus dem %-Wert der Abweichung und der Angabe der Digits, bezogen auf den Mess- oder Endwert des Messbereichs	Beachten Sie, ob sich die Angaben auf den Mess- oder den Endwert beziehen. Digits bedeuten in diesem Fall Ziffernschritte an der letzten Stelle des Ablesewertes.
Digit (1)	Anzahl der Anzeigestellen (Ziffern), Messumfang
Digit (2)	Ziffernschritt
Auflösung	Schrittweite, Angabe in V oder A

Tabelle 25.4 Kennwerte von Digitalmesswerken

Übung

Der Spannungsmessbereich eines digitalen Multimeters reicht bis 600 Volt. Als Genauigkeit werden 0,5 % vom Messwert + 3 Digits angegeben. Die Auflösung des Messbereichs erfolgt in Schritten zu 100 mV. Berechnen Sie die oberste und unterste Abweichung bei einem Ablesewert von 48 V.

Lösung:

- Schritt 1: 0,5 % vom Ablesewert berechnen:

  48 [÷] 100 [×] 0,5 [=]

  Zwischenergebnis: 0,24 Volt
- Schritt 2: Berechnung der Digit-Abweichung:

  Die 3 Digits je 100 mV ergeben 300 mV (0,3 V).
  - Abweichung insgesamt: 0,24 V + 0,3 V = 0,54 V
  - Minimaler Wert: 47,46 V
  - Maximaler Wert: 48,54 V

25.7 Details zu Strom- und Spannungsmessungen

25.7.1 Bestimmung der Eingangsleistung

Häufig müssen Messungen an der Energieversorgung von funktechnischem Gerät vorgenommen werden. Zum einen erkennt man an einer zu hohen Stromaufnahme, ob z. B. ein Leistungsverstärker nicht korrekt eingestellt oder gar defekt ist. Zudem

können Sie die Eingangsleistung bestimmen und, falls Ihnen die Ausgangsleistung bekannt ist, den Wirkungsgrad ermitteln.

In jedem Fall muss, falls an einer Stromversorgung mehrere Abnehmer gleichzeitig betrieben werden, das Strommessgerät »exklusiv« in die Stromzufuhr des zu messenden Geräts eingefügt werden. Andernfalls addieren sich die Ströme der weiteren Geräte hinzu und verfälschen das Messergebnis. Abbildung 25.17 zeigt Ihnen, wie die einzelnen Messgeräte zu setzen sind. Dargestellt sind die notwendigen Messgeräte an den zutreffenden Messpunkten, um die Eingangsleistung, also die aufgenommene Leistung eines Verstärkers zu bestimmen. Die Berechnung der Leistung sei hier wiederholt:

$P = U \times I$

Die Grundlagen der Leistungsberechnung finden Sie in Kapitel 6.

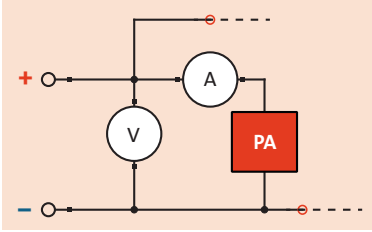


Abbildung 25.17 Messung von Spannung und Stromaufnahme einer Endstufe

25.8 Berücksichtigung des Innenwiderstands der Messgeräte bei Messungen

Der Innenwiderstand eines Messgeräts wirkt sich auf das Messergebnis aus. Je hochohmiger ein Voltmeter ist, desto weniger Verfälschung tritt ein.

Übung

Abbildung 25.18 zeigt eine Messschaltung. Es wird ein analoges Messgerät verwendet, dessen Endausschlag in der Schaltung bei 10 Volt erreicht wird.

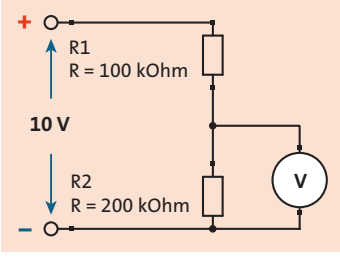


Abbildung 25.18 Messschaltung

Weitere Angaben: Empfindlichkeit 20 kΩ je Volt

Gesucht: Innenwiderstand, Wert des Parallelzweiges R2 und des Messgeräts

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie zunächst den Innenwiderstand des Messgeräts (siehe Abschnitt 25.5): 20 [×] 10 [=]

  Ergebnis: Der Innenwiderstand beträgt 200 kΩ.

  (Falle: das SI-Präfix! Wenn kΩ als Eingangswert verwendet wird, kommt das Ergebnis auch mit kΩ heraus!)

- Schritt 2: Berechnen Sie die Parallelschaltung der Widerstände R_2 und $R_{\text{Messgerät}}$.

  Mit der Formel $R_{\text{gesamt}} = \frac{R_{\text{Einzelwert}}}{\text{Anzahl}}$ (siehe Abschnitt 5.7) können Sie bei gleichen Widerstandswerten auch die vereinfachte Rechnung anwenden.

  Aus 200 kΩ Einzelwiderstand erhalten Sie 100 kΩ für den Parallelzweig. Damit wird die Spannung im Verhältnis 50:50 aufgeteilt, und Sie messen 5 Volt. Rechnerisch kämen Sie bei einem Messinstrument mit einem unendlich hohen Innenwiderstand auf einen anderen Wert:

  $$\text{Teilspannung } U_2 = \frac{U_{\text{ges}} \times R_2}{R_1 + R_2}$$

  Mit dem Taschenrechner berechnet:

  [(]10 [×] 200[)] [÷] [(]100 [+] 200[)] [=]

  Das ergibt 6,67 Volt, den Wert, der ohne das angelegte Messgerät hier vorhanden ist! Wenn Sie ein digitales Messgerät verwenden, das über einen Innenwiderstand von 10 MΩ verfügt, fallen die Abweichungen geringer aus:

  [(]1 [÷] 200[)] [+] [(]1 [÷] 10000[)] [=] [1/X]

  Ergebnis für die Parallelschaltung: 196 kΩ

  [(]10 [×] 196[)] [÷] [(]100 + 196[)] [=]

  Messwert: 6,62 Volt! Das ist gegenüber der Messung mit dem analogen Messwerk schon nahe an der Realität.

Messwertverfälschungen

Messwertverfälschungen werden meist durch Messgeräte mit zu niedrigem Innenwiderstand verursacht. Die Verwendung von digitalen Messgeräten, die durchweg einen sehr hohen Innenwiderstand aufweisen, ist von Vorteil.

25.9 Hilfsschaltungen für Messaufgaben

Für viele Messungen werden Hilfsschaltungen eingesetzt.

25.9.1 Künstliche Antenne (Dummy Load)

Künstliche Antennen gibt es zwar fertig zu kaufen, sie sind aber mit den entsprechenden ungewendelten Schichtwiderständen leicht aufzubauen. Die Belastbarkeit sollte etwas über der maximal zu messenden Leistung liegen.

Aufbau von »künstlichen Antennen«

- Verwenden Sie ungewendelte Schichtwiderstände (Kohle/Metall).
- Meist werden Sie mit einer Parallelschaltung mehrerer gleichwertiger Widerstände arbeiten (»Kirchhoff«), vereinfachte Formel:

$$R_{\text{gesamt}} = \frac{R_{\text{Einzelwert}}}{\text{Anzahl}}$$

- Für einen direkten Anschluss eines Messgerätes kann ein Spannungsteiler-Abgriff durch Serienschaltung vorgesehen werden.

Wenn Sie die künstliche Antenne nicht direkt mit einem einzigen Hochleistungswiderstand aufbauen, können Sie für Leistungsmessungen einen Abgriff vorsehen (siehe Abbildung 25.19). **Dieser Abgriff bildet einen Spannungsteiler!** Natürlich können Sie diesen Abgriff auch für weitere Messungen verwenden, z. B. für die Signalform oder Nebenwellen. Meist schalten Sie zwischen den Messabgriff und das Messgerät einen Tastkopf.

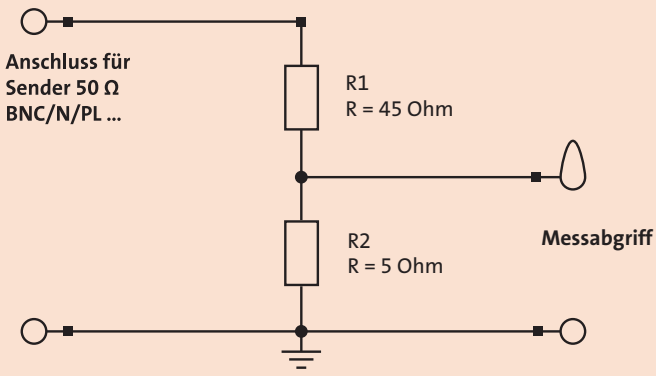


Abbildung 25.19 Künstliche Antenne mit Messabgriff

25.9.2 HF-Tastkopf

Der HF-Tastkopf (siehe Abbildung 25.20 und Abbildung 25.21) wird zusammen mit einem Oszilloskop, aber auch mit anderen Messgeräten für Abgleicharbeiten von HF-Schaltungen verwendet.

Die beiden Dioden D1 und D2 sind Schottkydioden mit einem Spannungsabfall von 0,2 Volt. Die beiden 1-kΩ-Widerstände ermöglichen Messungen an Sendern, deren Leistung im zweistelligen Bereich liegt. Entfallen diese beiden Widerstände, so können schwache Signale, z. B. aus einzelnen Senderstufen, damit gemessen werden.



Abbildung 25.20 Tastkopf mit Masseklemme und aufgestecktem Federgreifer

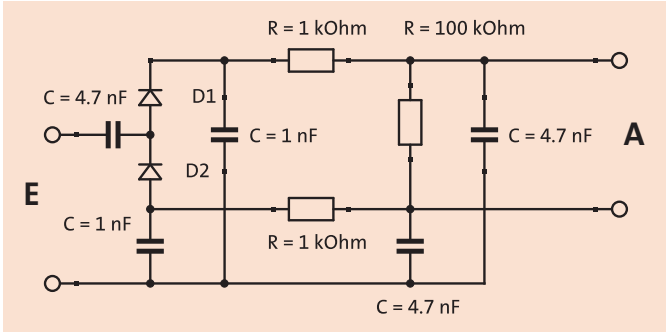


Abbildung 25.21 Schaltung eines Tastkopfes

Übung

Sie benutzen eine künstliche Antenne mit Messabgriff (siehe Abbildung 25.19, Spannungsteiler!) mit diesem Tastkopf. Ihr hochohmiges Digitalvoltmeter zeigt eine Spannung von 18 Volt an. Wie hoch ist die (ungefähre) Sendeleistung?

Lösung:

- Schritt 1: Ermitteln Sie die Effektivspannung.

  Hierzu halbieren Sie zunächst die gemessene Spannung. Der Tastkopf arbeitet ja mit zwei Dioden, die einmal die positive, aber auch die negative Halbwelle gleichrichten. Aus diesem Grund müssen Sie die gemessene Spannung halbieren!

  Zudem müssen Sie noch den Spannungsabfall der Schottkydioden in Höhe von 0,2 Volt hinzurechnen. Der Spitzenwert beträgt also 9 V + 0,2 V, also 9,2 V!

  Den Effektivwert berechnen Sie, indem Sie den Spitzenwert durch die Wurzel aus 2 teilen. (Vergessen? Schlagen Sie in Abschnitt 7.6 nach!)

  9,2 [÷] [√] 2 [=]

  Alternativ:

  9,2 [÷] [(] 2 [√] [)] [=]

  Zwischenergebnis: Der Effektivwert beträgt 6,505 Volt.

  Die künstliche Antenne bildet aufgrund des Messabgriffs einen Spannungsteiler mit dem Verhältnis 10:1. Für die Messung wurde nur $^1/_{10}$ der Spannung abgegriffen. Damit muss der Effektivwert mit 10 multipliziert werden, damit die Spannung, die an der künstlichen Antenne anliegt, ermittelt wird: 65,05 Volt.

  Die Leistung aus der Spannung berechnen Sie mit:

  $$P = \frac{U^2}{R}$$

  (Informationen zur Leistungsberechnung finden Sie in Abschnitt 5.3.)

  Der Widerstand der künstlichen Antenne beträgt 50 Ω.

  Mit dem Taschenrechner kommen wir zum Ergebnis:

  [(] 65,05 [×] 65,05 [)] [÷] 50 [=]

  Abgelesen: 84,63

  Ergebnis: Die Sendeleistung beträgt rund 85 Watt.

25.9.3 Leistungsmesskopf

Der Leistungsmesskopf (siehe Abbildung 25.22) ist eine Abwandlung des Tastkopfes, die speziell für Leistungsmessungen eingesetzt wird. Das Signal vom Sender wird über den 1:1-Spannungsteiler, der parallel zum 55-Ω-Schluckwiderstand verläuft, in abgeschwächter Form über die Diode zum Messgerät geleitet. Der 55-Ω-Widerstand wird üblicherweise aus mehreren Werten zusammengesetzt.

Messwiderstände mit entsprechender Genauigkeit sind nicht immer für hohe Leistungen verfügbar. Wenn Sie eine derartige Schaltung damit aufbauen und hohe Leistungen messen möchten, benötigen Sie ein (geeichtes oder genaues) Dämpfungs-

glied mit 20 dB oder 40 dB Abschwächung. Andernfalls würden die Messschaltung und das angeschlossene Messgerät Schaden nehmen.

Als Diode D1 können Sie entweder eine Schottkydiode oder eine Siliziumdiode verwenden. Bei den Berechnungen muss der halbleitertypische Spannungsabfall berücksichtigt werden.

Wenn Sie einen Sender haben, dessen Ausgangsleistung präzise gemessen wurde, können Sie aus diesen Vergleichsmessungen Korrekturwerte verwenden, die Sie beim Anwenden der Schaltung berücksichtigen können.

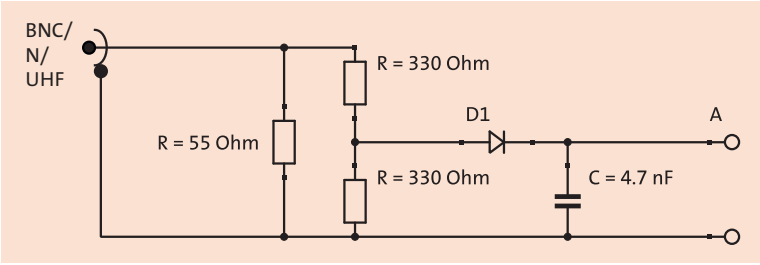


Abbildung 25.22 Schaltung eines Leistungsmesskopfes

Übung

D1 ist eine Siliziumdiode. Sie messen eine Spannung von 20 Volt am Ausgang. Gesucht sind der Gesamtwiderstand der Schaltung (nur Widerstände, Messgerät außer Ansatz) sowie die Leistung am Eingang der Schaltung.

Lösung:

- Schritt 1: Berechnen Sie den Gesamtwiderstand. Wenn Sie die Grundlagen noch mal nachlesen wollen, finden Sie sie in Abschnitt 5.6.

  Der Gesamtwiderstand ist der Kehrwert aus $^1/_{R1} + {}^1/_{R2}$. R_1 ist hierbei der 55-Ω-Widerstand, R_2 ist zusammengesetzt aus 2 × 330 Ω, also 660 Ω.

  Mit dem Taschenrechner kommen Sie zum ersten Ergebnis:

  [(] 1 [÷] 55 [)] [+] [(] 1 [÷] 660 [)] [=] [X⁻¹]

  bzw.

  [(] 1 [÷] 55 [)] [+] [(] 1 [÷] 660 [)] [=] [1/X]

  Der Gesamtwiderstand beträgt 50,77 Ω.

- Schritt 2: Berechnen Sie die anliegenden Leistungen. Aber Achtung: Der Rechenweg führt vom Ausgang zum Eingang der Schaltung, also rückwärts!

  Die gemessene Spannung beträgt 20 Volt. Hinzu kommen 0,7 Volt Spannungsabfall von D1.

  Die Spannung am Spannungsteiler beträgt 20,7 Volt.

Der Spannungsteiler halbiert den Eingangswert, wir verdoppeln also und erhalten eine Spannung von 41,4 Volt.

Es liegt der Scheitelwert einer Wechselspannung vor! Zur Leistungsberechnung benötigen Sie aber den Effektivwert der Spannung (siehe Abschnitt 7.6)!

$$U_{\text{eff}} = U \times 0{,}707$$

Die Effektivwertberechnung mit dem Taschenrechner ist dann einfach:

41,4 [×] 0,707 [=]

29,27 Volt

- Schritt 3: Nun wird die Leistung mit dieser Formel ermittelt (nachzulesen in Abschnitt 5.3):

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Auch diese Berechnung ist mit dem Taschenrechner nicht kompliziert:

29,7 [×] 29,7 [÷] 50,77 [=]

17,34 Watt liegen also am Eingang der Schaltung an.

25.10 Der Absorptionsfrequenzmesser

Der Absorptionsfrequenzmesser (siehe Abbildung 25.23) ist ein Einkreisempfänger, der anstelle eines Lautsprechers ein empfindliches Drehspulmesswerk verwendet. Den Kreis aus L1 und C1 stimmen Sie dabei mit dem Drehkondensator ab. D1 richtet die HF-Energie gleich, C2 glättet die Spannung. Ist die Spannung zu hoch, sodass sich das Drehspulmesswerk auf Vollanschlag befindet, vermindern Sie die Spannung am als Spannungsteiler verwendeten Potentiometer.

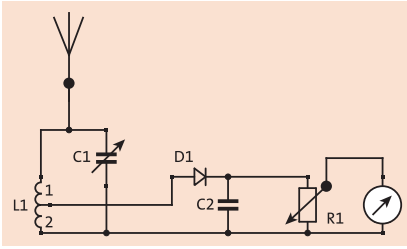


Abbildung 25.23 Schaltung eines Absorptionsfrequenzmessers

Ein Absorptionsfrequenzmesser arbeitet mit einer Genauigkeit von 5 % und dient

- zur Feststellung von Harmonischen,
- zur Überprüfung von Quarzoszillatoren hinsichtlich des richtigen Obertons eines Quarzes,

- zur Erkennung von Oberwellenausstrahlungen und
- zur Überprüfung von Vervielfachern hinsichtlich der richtigen Oberwellenauswahl.

In der Praxis ist dieser Empfänger manchmal in ein Dipmeter integriert (siehe Abschnitt 25.12). Drehen Sie langsam über die Skala, und stellen Sie die Empfindlichkeit des Messwerks mit dem Potentiometer auf den maximalen Wert.

Sie können damit natürlich auch überprüfen, ob von einem Sender an der Antenne überhaupt etwas abgestrahlt wird. Dazu stellen Sie das Dipmeter auf die Betriebsfrequenz des Senders ein. Normalerweise überstreichen Sie mit Ihrer Suche aber die Bereiche möglicher Oberwellen.

Zur Frequenzmessung selbst verwenden Sie präzise digitale Messgeräte.

25.11 (Einfacher) Feldstärkeanzeiger

Für die einfache Überprüfung, ob von einer Antenne hochfrequente Energie abgestrahlt wird, eignet sich der in Abbildung 25.24 gezeigte Feldstärkeanzeiger. Bei Richtantennen kann das Gerät helfen, ein Richtdiagramm zu erstellen.

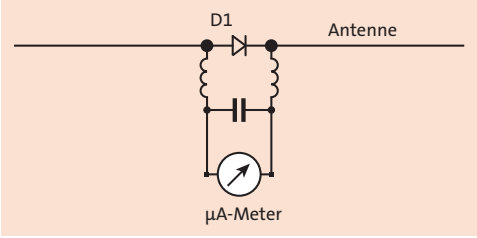


Abbildung 25.24 Einfacher Feldstärkeanzeiger

Selbsterklärung nach der BEMV

Ein derartiger Frequenzmesser eignet sich aber nicht zur Erstellung der Selbsterklärung nach der BEMV! Hierfür benötigen Sie ein geeichtes Messgerät, das die Messwerte genau anzeigt.

25.12 Das Dipmeter

Ein Dipmeter (siehe Abbildung 25.25) besteht aus einem abstimmbaren Oszillator (VFO). Ein Messgerät zeigt an, wenn von einem angekoppelten Messobjekt (Antenne, Resonanzkreis) Energie aufgenommen oder abgegeben wird. Bei herkömmlichen

Dipmetern geschieht die Wahl des Messbereichs durch das Anstecken der entsprechenden Spule (siehe Abbildung 25.26). Deren Farbmarkierung entspricht der Farbe der Skala am Abstimmrad.

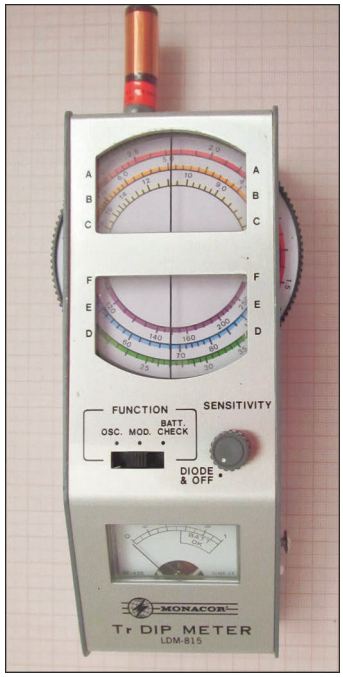


Abbildung 25.25 Dipmeter mit angesteckter Spule

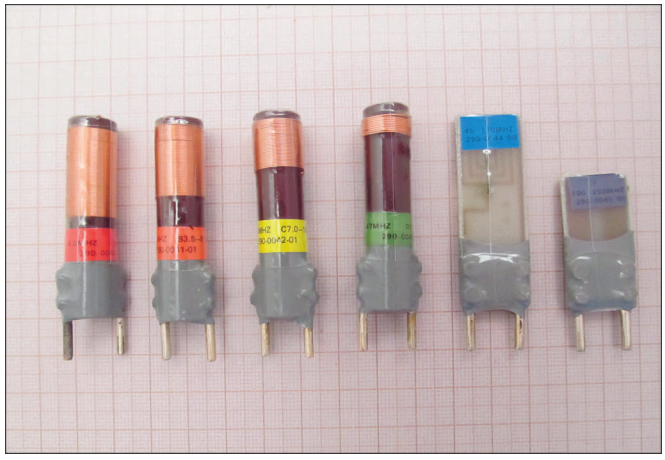


Abbildung 25.26 Steckspulen für das Dipmeter

Sie ermitteln mit diesem Messgerät die ungefähre Resonanzfrequenz eines Schwingkreises oder einer Antenne. Darüber hinaus können Sie, da die Induktivitäten der

Steckspulen bekannt sind, Kapazitäten aufgrund der Resonanzfrequenz ermitteln. Zusammen mit einem Kondensator mit bekanntem Wert lassen sich auch Induktivätswerte annähernd herausfinden.

Die Genauigkeit eines Dipmeters beträgt rund 10 %.

Moderne Dipmeter

In moderne Dipmeter weisen eine Digitalanzeige und eine höhere Genauigkeit und weitere Messmöglichkeiten auf.

Ein Dipmeter kann herangezogen werden, um den Wert einer Spule oder eines Kondensators zu ermitteln. Zwei Werte müssen bekannt sein: die Frequenz und entweder der Kondensator oder die Spule.

Berechnung von Komponenten eines Schwingkreises

Ermitteln von *C*:

$$C = \frac{1}{(2 \times \pi \times f)^2 \times L}\ F$$

Ermitteln von *L*:

$$L = \frac{1}{(2 \times \pi \times f)^2 \times C}\ H$$

Die Schwingkreisberechnungen werden in Abschnitt 10.8.5 besprochen.

Übung

Die bekannten Werte sind die Resonanzfrequenz (5,5 MHz) und der Kondensator (220 pF). Gesucht ist die Induktivität der Spule.

Die obige Formel setzen Sie mit dem Taschenrechner um:

- 1 [÷] [(] [(] 2 [×] [π] [×] 5,5 [×10ˣ] 6 [)] [xʸ] [×] 220 [×10ˣ] [±] 12 [)] [=]

Alternativ:

- [(] 5,5 [×] 6 [10ˣ] [×] [π] [×] 2 [)] [xʸ] [×] 220 [×] 12 [±] [10ˣ] [=] [1/x]

Eine sehr unübersichtliche Tipparbeit! Sie sollten die Formel nochmals in Einzelschritte gliedern, damit Sie beim Nachrechnen eventuelle Eingabefehler erkennen:

- (f (in Hz) × 2 × π)²
- 5,5 MHz in Hz: 5500000 Hz
- 5500000 × π × 2: 34557519,19
- zum Quadrat: 1,194222133^{15}

- das Zwischenergebnis mit dem Kondensatorwert multiplizieren: $1{,}194222133^{15} \times 220 \times 10^{-12}$: 262728,8692
- hieraus den Kehrwert bilden: 3,806...$^{-6}$ ergibt 3,8 µH.
- Die Induktivität der Spule beträgt also 3,8 µH.

Das Dipmeter wird in der Regel lose an das Messobjekt angekoppelt. Das Messgerät darf den zu prüfenden Kreis nicht verstimmen. Es genügen einige lockere Windungen eines Hilfskabels (siehe Abbildung 25.27). Wenn die Spule des Schwingkreises gut zugänglich ist, reicht es, die Spule des Dipmeters in deren Nähe zu bringen.

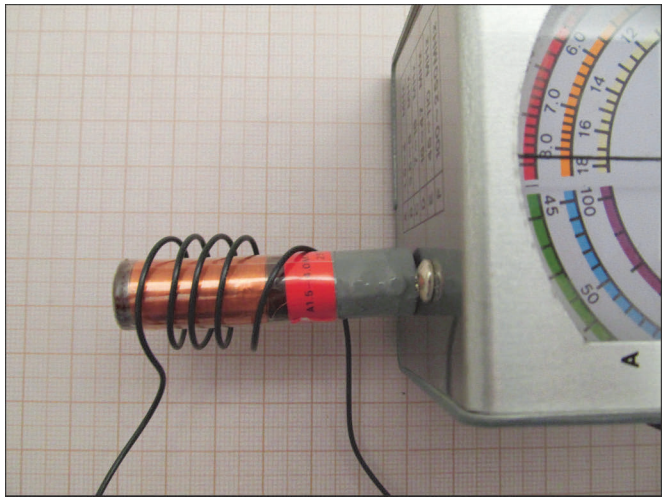


Abbildung 25.27 Lose Kopplung

25.13 Das Stehwellenmessgerät (SWR-Meter)

Das Stehwellenverhältnis einer Antenne misst man mit einem *Stehwellenmessgerät*. Zur Messung wird stets Sendeenergie benötigt. (Die Grundlagen und Berechnungen zum Stehwellenverhältnis wurden in Kapitel 20 erklärt.)

Dieses Messgerät, auch als *VSWR-Messbrücke* bezeichnet, dient zur Kontrolle der Antennenanpassung bzw. es wird hierfür eingesetzt. Es muss direkt am Sender eingefügt werden, noch vor Filtern und Antennenanpassgeräten und vor Beginn der Speiseleitung zur Antenne (siehe Abbildung 25.28).

Oberwellenfilter

Oberwellenfilter sollen immer nach dem SWR-Meter in die Zuleitung der Antenne eingefügt werden, da diese Geräte auch Störungen durch Oberwellen verursachen können.

Das Stehwellenmessgerät ist klassischerweise ein einzelnes Messgerät (siehe Abbildung 25.29), aber vielfach ist diese Messvorrichtung in moderne Funkgeräte integriert und bedarf keiner weiteren Bedienung (siehe Abbildung 25.30).

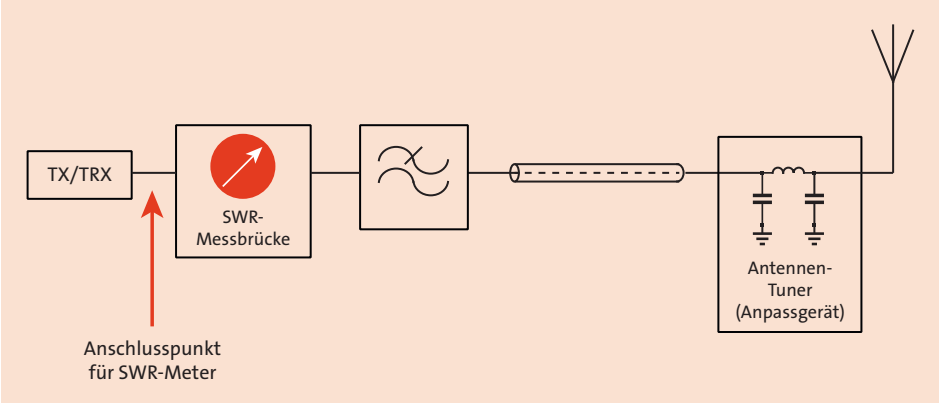


Abbildung 25.28 Einfügepunkt des SWR-Meters



Abbildung 25.29 SWR-Messgerät



Abbildung 25.30 Interne SWR-Messfunktion des Yaesu FT-817ND

Bei einem SWR-Verhältnis von 1 ist die Antenne optimal angepasst.

Das Stehwellenmessgerät misst die an einer HF-Leitung auftretenden Summenspannungen, die kapazitiv und induktiv bei einer Koppelschleife einkoppeln. Hierfür wird ein Richtkoppler benutzt, der zum einen die vorlaufende, zum anderen die rücklaufende Leistung aufnimmt, diese gleichrichtet und einem Messwerk zur Anzeige zuführt.

Moderne Stehwellenmessgeräte (sowohl in Funkgeräte eingebaute als auch externe) sind mit zwei Richtkopplern ausgestattet. Ein Richtkoppler misst hierbei den Vor-, der andere den Rücklauf. Damit ist auch das im Anschluss erforderliche Prozedere mit dem Umschalten zwischen Vor- und Rücklauf nicht mehr notwendig und der Messvorgang wird vereinfacht.

Eine besondere Darstellung von SWR und Vorlauf gelingt mit einem Kreuzzeigerinstrument. Es beinhaltet zwei Messwerke und eine Skala, von der am Kreuzungspunkt der beiden Zeiger der SWR-Wert abgelesen wird.

Außerdem gibt es hochwertige SWR-Messgeräte mit abgesetzten Richtkopplern.

Im UHF-Bereich kann ein Reflektometer zur Anzeige der Anpassung verwendet werden.

Ein Messvorgang besteht aus mehreren Schritten:

1. Verbinden Sie die Antenne mit dem Ausgang des Messgeräts. Er ist meist mit »ANT« beschriftet.
2. Verbinden Sie mit einem möglichst kurzen Kabel das Funkgerät oder den Sender mit dem Eingang des Messgeräts. Die Beschriftung lautet meist »TX«, »TRX«, »Transc« oder »Radio«.
3. Stellen Sie – wenn möglich – die Senderausgangsleistung auf einen sehr niedrigen Wert ein. So vermeiden Sie, unbeabsichtigt andere Funkteilnehmer zu stören.
4. Suchen Sie sich eine freie Frequenz.
5. Schalten Sie das Messgerät auf Vorlauf (FWD).
6. Betätigen Sie die Sendetaste, und stellen Sie mit dem Regler den exakten Vollausschlag auf der Messskala her (SET). Abbildung 25.31 zeigt die notwendigen Einstellungen.
7. Schalten Sie das Messgerät auf SWR oder REF um, und lesen Sie das Ergebnis ab (siehe Abbildung 25.32).
8. Lassen Sie die Sendetaste wieder los.



Abbildung 25.31 Vorlaufkalibrierung des SWR-Meters

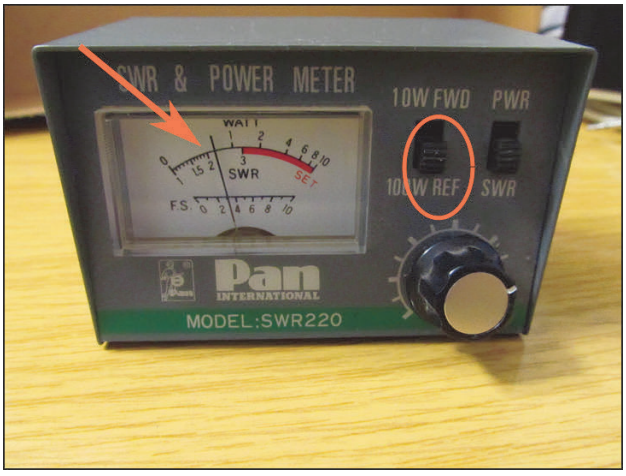


Abbildung 25.32 Messung des SWR-Wertes

25.14 Das Oszilloskop

Elektrische Signale sichtbar machen – das ist die Aufgabe des Oszilloskops. Sie erkennen anhand der Signalverläufe, ob ein Signal Verzerrungen aufweist oder eine Verstärkerstufe übersteuert ist. Sie können auch Spannungswerte mit diesem Messgerät ermitteln; genauso können Sie anhand des Signalbilds auch auf die Eingangsfrequenz umrechnen. Das Oszilloskop zeigt Ihnen den zeitlichen Verlauf eines Signals an. Das Amplitudenspektrum dagegen stellt die Frequenzanteile des Signals dar.

Abbildung 25.33 zeigt Ihnen dieses Messgerät in der Gesamtansicht. In Abbildung 25.34 sehen Sie den Schirm mit einer Signaldarstellung, und das Bedienfeld finden Sie in Abbildung 25.35.

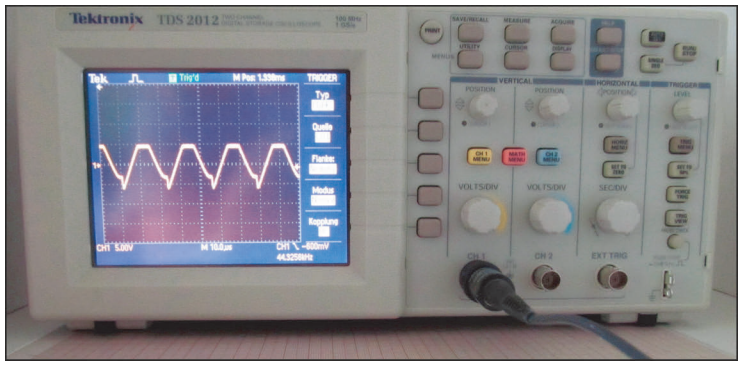


Abbildung 25.33 Oszilloskop

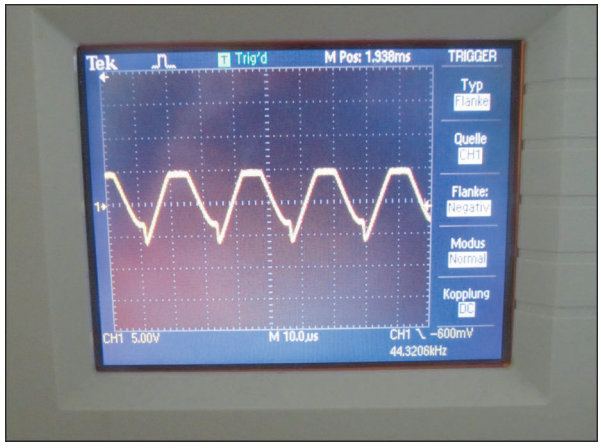


Abbildung 25.34 Schirmbild auf dem Oszilloskop



Abbildung 25.35 Bedienfeld des Oszilloskops

Das hier gezeigte, relativ moderne Oszilloskop arbeitet nicht mehr mit einer Katodenstrahlröhre als Anzeige, sondern mit einem Halbleiterdisplay (LCD). Sie können hiervon Bildschirmabzüge ausdrucken. Es gibt diese Messgeräte auch ohne jede Anzeige und Bedienmöglichkeit. In diesem Fall übernimmt ein PC entweder per USB-Anschluss oder über das lokale Netzwerk die Steuerung.

Aber auch Oszilloskope mit Anzeige und Bedienfeld lassen sich mittlerweile per USB oder LAN mit einem Rechner verbinden. Die Messwerte werden dann zu Dokumentationszwecken auf dem PC gespeichert, und umgekehrt werden Anweisungen an das Gerät übermittelt.

Die Anzeige ist in Kästchen unterteilt, die *Divisions*. Das Kästchen drückt einen Messschritt aus (*Auflösung*).

Aus einem Sinussignal im Schirmbild (siehe Abbildung 25.36) können Sie dessen Frequenz berechnen.

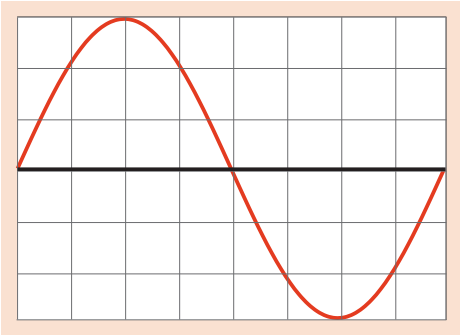


Abbildung 25.36 Schirmbild als Berechnungsgrundlage

Übung

Bekannte Werte: Skalenteil (*Division*) 0,5 ms.

Der Zeitverlauf entspricht stets der X-Achse, also der waagerechten. Die Y-Achse gibt den Spannungswert an, der hier in der Aufgabe nicht weiter von Belang ist. Gesucht ist die Frequenz des dargestellten Signals.

Lösung:

- Schritt 1: Zählen Sie die waagerechten Skalenteile (Kästchen): 8
- Schritt 2: Berechnen Sie die Periodendauer: 8 [×] 0,5 [=] 4 ms. (Die Berechnung der Frequenz aus der Periodendauer finden Sie in Abschnitt 7.4.)
- Schritt 3: Berechnen Sie die Frequenz aus der Periodendauer.

  Die Frequenz f berechnet sich aus dem Kehrwert der Periodendauer:

  $$f = \frac{1}{T}\ \text{Hz}$$

Mit dem Taschenrechner kommen Sie ganz einfach zum Ergebnis. Um auf Hz zu kommen, müssen Sie die ms entsprechend nach s umrechnen:

1 [÷] 0,004 [=]

Ergebnis: Die Frequenz beträgt 250 Hz.

Die einfache Spannungsmessung wurde schon in Abschnitt 7.7 kurz behandelt.

Ein Oszilloskop erhält die zu messenden Signale mittels eines Tastkopfes (siehe Abschnitt 25.9). Dieser kann über ein Spannungsübersetzungsverhältnis verfügen. Meist handelt es sich dabei um eine Abschwächung (*Dämpfung*) des Signals (der Eingang ist also größer als der Ausgang, z. B. 2:1). Im umgekehrten Fall käme ein Messverstärker zum Einsatz.

Zudem lässt sich, wenn das Oszilloskop entsprechend breitbandig ist, auch die Signalhüllkurve darstellen. Aus dem Schirmbild einer Sendermessung können Sie *auch* auf die Leistung umrechnen.

Eines der wichtigsten Bedienelemente des Oszilloskops ist der *Trigger*. Damit ermöglichen Sie es, ein stehendes Bild anstelle der durchlaufenden Signalform darzustellen. Natürlich sind auch die Regler für die Auflösung und die Bildverschiebung notwendig.

Wenn Sie die Pulsbreite eines Signals messen möchten, geschieht dies bei 50 % der Amplitude.

Eine Übersteuerung eines Leistungsverstärkers erkennen Sie an der Wellenform. Sie legen an dessen Eingang ein reines Sinussignal an. Wenn das Ergebnis, das Sie am Ausgang abgreifen und dem Oszilloskop zuführen, eine mehr oder weniger gekappte, ins Eckige übergehende Form aufweist, so liegen Oberwellen vor (siehe auch Abschnitt 7.10 und Abschnitt 16.7). Zur Signalbeurteilung und Leistungsmessung können Sie den Leistungsmesskopf bzw. den Abgriff einer künstlichen Antenne zusammen mit dem notwendigen Tastkopf anwenden (siehe Abschnitt 25.9).

Übung

Ein Beispiel für eine Leistungsberechnung aus dem Schirmbild ist in Abbildung 25.37 dargestellt.

Bekannte Werte hierzu:

- künstliche Antenne, R = 50 Ω
- abgelesene Scheitelspannung: 100 V
- Tastkopf: 2:1

Gesucht wird die Leistung.

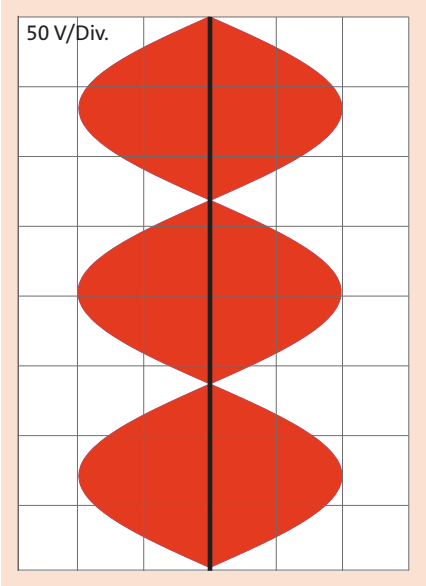


Abbildung 25.37 Schirmbild für die Leistungsberechnung

Lösung:

- Schritt 1: Rechnen Sie die Messspannung mit dem Dämpfungsfaktor des Tastkopfes um:

  100 Volt, Tastkopf 2:1 = 200 Volt

- Schritt 2: Die Leistung berechnet sich aus dem Effektivwert der Spannung. (Zur Berechnung des Effektivwertes siehe Abschnitt 7.6.)

  Hierzu multiplizieren Sie den Messwert der Scheitelspannung mit dem Kehrwert der Wurzel aus 2 bzw. einfacher mit 0,707.

  200 [×] 0,707 [=] 141,4 Volt

- Schritt 3: Berechnen Sie die Leistung aus der Effektivspannung und dem Widerstand.

  Hierzu benötigen Sie diese Formel, die Sie bereits aus Abschnitt 5.3 kennen sollten:

  $$P = \frac{U^2}{R}$$

Mit dem Taschenrechner berechnen Sie dann das Ergebnis:

141,4 [×] 141,4 [÷] 50 [=]

Ergebnis gerundet: 400 Watt PEP (*Hüllkurvenspitzenleistung*, engl. *Peak Envelope Power*).

25.15 Der Frequenzzähler

Genaue Frequenzmessungen sind mit einem Frequenzzähler möglich.

Frequenzzähler gibt es als einzelnes Gerät, oder sie sind als Messfunktion in Multimeter integriert (siehe Abbildung 25.38). Auch in älteren Funkgeräten mit einer rein analogen Frequenzaufbereitung ohne PLL, DDS usw. können Frequenzzähler als Frequenzanzeige vorhanden sein.

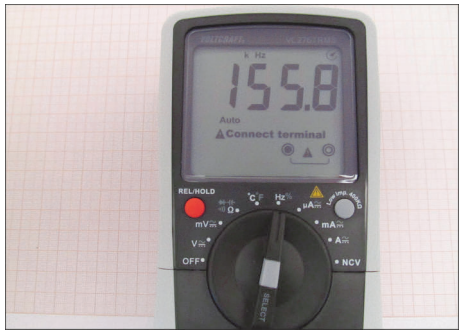


Abbildung 25.38 Frequenzmessung mit Multimeter

Ein Frequenzzähler zählt Impulse innerhalb einer Zeit. Diese Zeit wird als *Torzeit* bezeichnet. Die Auflösung des Frequenzzählers hängt ebenso davon ab: Je mehr Impulse gezählt werden sollen, desto länger ist die Torzeit, desto höher die Auflösung.

Ein Frequenzzähler ist so genau wie die Zeitbasis, die er verwendet. Deshalb verfügen hochwertige Ausführungen über eine temperaturkompensierte Quarzzeitbasis oder einen DCF-77-Empfänger für den Abgleich mit der Normalzeit (»Atomzeit«).

Um sehr hohe Frequenzen messen zu können, werden Vorteiler eingesetzt, z. B. mit dem Faktor 100 oder 10. Damit messen Sie auch VHF- oder UHF-Frequenzen.

Die Genauigkeit eines Frequenzzählers wird in ppm (*Parts per Million*) bemessen. Eine Abweichung im Prozentbereich wäre zu hoch, und damit wäre das Gerät zu ungenau. Ein ppm entspricht 0,000001 des Ausgangswertes (siehe Abschnitt 2.1).

Übung

Für einen Frequenzzähler, der maximal 50 MHz verarbeiten kann, wird eine Genauigkeit von ±1 ppm angegeben. Um wie viel Hz kann die Frequenz nach oben und unten abweichen?

Lösung:

Umstellen von MHz auf Hz und Eingabe in den Taschenrechner:

50000000 [×] 0,000001 [=]

Das Ergebnis ist also 50 Hz.

Frequenzmessungen an Sendern

- FM-Sender müssen unmoduliert sein. (Ein modulierter FM-Sender wechselt ja ständig die Frequenz.)
- Bei Funkgeräten mit mehreren Sendearten wählen Sie für diese Messung CW.
- Benutzen Sie einen entsprechend bemessenen Leistungsmesskopf oder ein Dämpfungsglied für den Anschluss des Frequenzzählers an die künstliche Antenne. Beachten Sie die Bedienungsanleitung des Zählers hinsichtlich der maximal zulässigen Signalspannung!

Das Ablesen klappt besser, wenn Sie vom Komma her nach rechts die SI-Präfixe herunterzählen: 100 kHz, 10 kHz, 1 kHz, 100 Hz, 10 Hz (wenn die Frequenzangabe in MHz erfolgt).

25.16 Antennen mit dem vektoriellen Netzwerkanalysator (VNA) messen

Mit einem vektoriellen Antennenanalysator gestalten sich die Abgleicharbeiten komfortabler: Sie müssen nicht auf Sendung gehen, und das Gerät stört keine Funkpartner am Band.

Die Messfrequenz stellen Sie am Analysator ein. Abbildung 25.39 zeigt eine Einzelmessung. Neben dem SWR zeigt das Gerät auch die Impedanz (Z) der Antenne sowie deren Blindwiderstand (+j = induktiver Blindanteil und –j = kapazitiver Blindanteil) an.



Abbildung 25.39 Einzelmessung mit einem Antennenanalysator

Der VNA enthält einen HF-Generator. Dieser gibt an das zu messende Objekt ein frequenzveränderliches Signal ab. Das zu messende Objekt verändert Amplituden und Phasen des Signals. Aus diesen werden das Stehwellenverhältnis, die Blind- und Wirkanteile und die Impedanz ermittelt und am Ende grafisch dargestellt. Vor der Messung können Sie Ihren VNA hinsichtlich der Anzeigewerte bei Anpassung, Leerlauf und Kurzschluss prüfen.

Die SWR-Anzeige zeigt bei einem Kurzschluss und bei Leerlauf unendlich, bei Anpassung genähert 1 an.

Darüber hinaus können Sie sich mit solchen Messgeräten die Resonanzkurve der Antenne anzeigen lassen (siehe Abbildung 25.40).

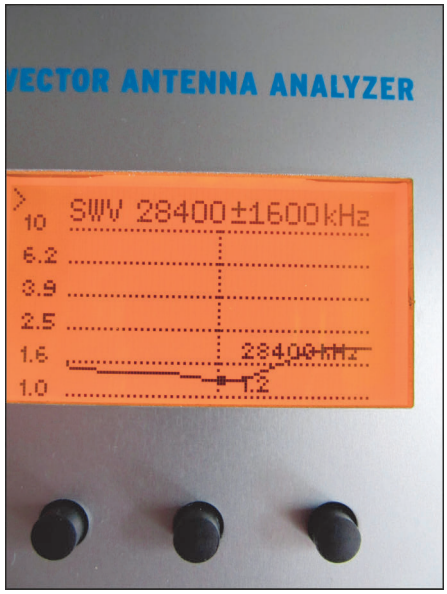


Abbildung 25.40 Resonanzkurve einer Antenne

Das SWR von Mehrbandantennen wird besonders komfortabel dargestellt. Alle gewünschten Bänder können auf einmal abgelesen werden.

Kapitel 26
Störungen und andere Probleme

Funksignale können elektronische Geräte stören. Dabei muss das »Störsignal« nicht einmal gegen irgendwelche Bestimmungen verstoßen. Viele Hersteller von Geräten für den »Verbraucher« sparen sich Filterungen und Abschirmungen ein, nach dem Motto: »Soll's der Kunde richten« und sich mit mangelhafter passiver Störfestigkeit herumärgern ...

Aber auch Geräte, die durchaus dem Stand der Technik entsprechen, können gestört werden.

Amateurfunkstationen können sich untereinander stören, wenn ihre Standorte nahe beieinanderliegen. Dies ist z. B. bei Contest-Stationen der Fall, wenn gleichzeitig Betrieb auf mehreren Bändern von einem Standort aus vorgenommen wird. Hier sind dann teilweise sehr große Anstrengungen für einen störungsfreien Betrieb notwendig.

26.1 Störungen des Empfangs

Starke Signale können einen Empfänger überfordern. Er wird dann unempfindlich, und man glaubt, auf dem eingestellten Frequenzbereich herrschen schwache Ausbreitungsbedingungen. Sie können aber auch Brodelgeräusche vernehmen.

Darüber hinaus kann Intermodulation auftreten. Sie nehmen dann Phantomsignale auf, also Sendungen, die auf der eingestellten Frequenz nicht stattfinden.

Abhilfe bei »zugestopftem« Empfänger, Brodelgeräuschen oder Intermodulation

So schaffen Sie bei diesen Problemen Abhilfe:

- Vorverstärker bzw. aktive Vorstufe abschalten (Die Taste bzw. der Menüpunkt ist meist als IPO oder P-AMP bezeichnet, siehe Abbildung 26.1.)
- Abschwächer betätigen (Die Taste bzw. der Menüpunkt ist meist als ATT bezeichnet.)

Meist reicht das Abschalten der aktiven Vorstufe aus. In den Abendstunden, speziell auf dem 40-m-Band, ist oft auch der Abschwächer nötig. Der Abschwächer dämpft meist mit 20 dB. Verschiedene Geräte bieten weitere Stufen mit 10 dB und 40 dB.

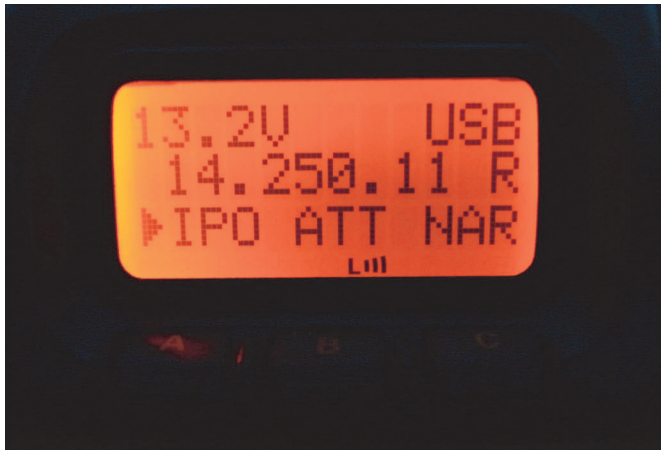


Abbildung 26.1 IPO- und ATT-Funktion beim Yaesu FT-817ND

TV-Zimmerantennen liefern oftmals ein schwaches Signal, sodass ihr Nutzsignal durch das des Amateurfunksenders überdeckt wird. Abhilfe schaffen Sie durch Verwendung einer Außenantenne, die dem betroffenen TV-Gerät ein besseres Signal anbietet. Auch ein Ausweichen auf einen Satellitenempfänger oder einen Breitbandkabelanschluss kann das Problem beheben.

Jeder Teil einer Empfangsanlage kann durch starke Signale überfordert werden. Bei Rundfunkempfangsanlagen sind Breitbandverstärker, also unselektive Vorverstärker, leicht zu übersteuern. Dies stört dann ebenso den Empfang.

Abhilfe bei Übersteuerung eines unselektiven TV-Vorverstärkers

So beheben Sie dieses Problem:

- Schleifen Sie einen Bandpass- oder Hochpassfilter für den TV-Bereich am Verstärkereingang ein.
- Ersetzen Sie den Breitbandverstärker durch einen selektiven Verstärker.

In einem Neubauviertel wird Ihnen dieses Problem kaum begegnen, wohl aber im älteren Gebäudebestand. Hier arbeiten diese Verstärker oft noch für DVB-T-Bereiche. Der einfachste Weg besteht hier wirklich im Austausch des Breitbandverstärkers.

Hochpassfilter lassen nur den VHF/UHF-Bereich passieren. Störungen durch Kurzwellensignale werden damit wirksam reduziert (siehe Abbildung 26.2). Passive Hochpassfilter sollten nur über eine geringe Einfügedämpfung verfügen (maximal 2 dB bis 3 dB!).

26.2 Einströmungen

Elektromagnetische Wechselfelder breiten sich bevorzugt entlang metallischer Leiter aus. Sie nutzen diesen Umstand beim Antennenbau, z. B. beim Gegengewicht bei Groundplane-Antennen. Leider unterscheiden die Wechselfelder nicht zwischen erwünschter und unerwünschter Ausbreitung.

Und so sind die Schirmungen der TV- und Netzwerkkabel oft problematische Wellenfänger: Das TV-Bild ist gestört, Rechner können abstürzen.

Einströmungen

Von *Einströmungen* spricht man, wenn Hochfrequenz über die Zuleitungen eines gestörten Geräts gelangt!

Zudem kommen Einströmungen in das Stromnetz vor. Diese geschehen über die Antenne, aber auch über die Stromversorgung. Dann gelangt die Störung über das Netzteil in das elektronische Gerät. Umgekehrt kann auch ein Sender, der über keine gute HF-Erde verfügt, über sein Netzteil hochfrequente Störungen per Stromnetz verursachen. Schließen Sie deshalb Sender, Empfänger, Endstufen, Anpass- und Messgeräte an eine gute HF-Erde an. An den Geräten ist hierfür oftmals eine Schraubklemme vorhanden, zum Teil mit einer Flügelmutter für den werkzeuglosen Anschluss. Eine gute HF-Erde vermindert die Wahrscheinlichkeit von Störungen im eigenen Haus.

Gegen Einströmungen helfen verschiedene Maßnahmen. Oft begünstigt die Lage der Sendeantenne parallel zu anderen Leitungen Einströmungen. Besonders Drahtantennen mit großen Abmessungen können in anderen Kabeln Signalspannungen hervorrufen, die den Betrieb der daran angeschlossenen Geräte stören. Aber auch Richtantennen im VHF/UHF-Bereich können dies bewirken, wenn die »Opferleitung« sich in der Hauptstrahlungskeule befindet.

Ist eine Änderung der Antennenanbringung nicht möglich, kommen Filter und Drosseln zum Einsatz (siehe Abbildung 26.2).

Ferritdrosseln »schlucken« Mantelwellen auf Koaxialkabeln. Bei der Materialauswahl müssen Sie auf den zu dämpfenden Frequenzbereich achten.

Zu den Ferritdrosseln zählen:

- **Klappferrite**: Diese kennen Sie sicherlich von den EDV-Geräten her. Sie bestehen aus zwei in Kunststoff gefassten Ferrit-Halbschalen. Sie werden nach der Kabelanfertigung um das Kabel gelegt und zusammengeklipst.
- **Ferrithülsen und -ringe**: Sie werden vor der Kabelfertigung über dessen Ende geschoben.
- **Ferrit-Ringkerne**: Es werden einige Schläge mit dem Kabel um den Ringkern gelegt (siehe auch Abbildung 21.1 und Abbildung 21.2).

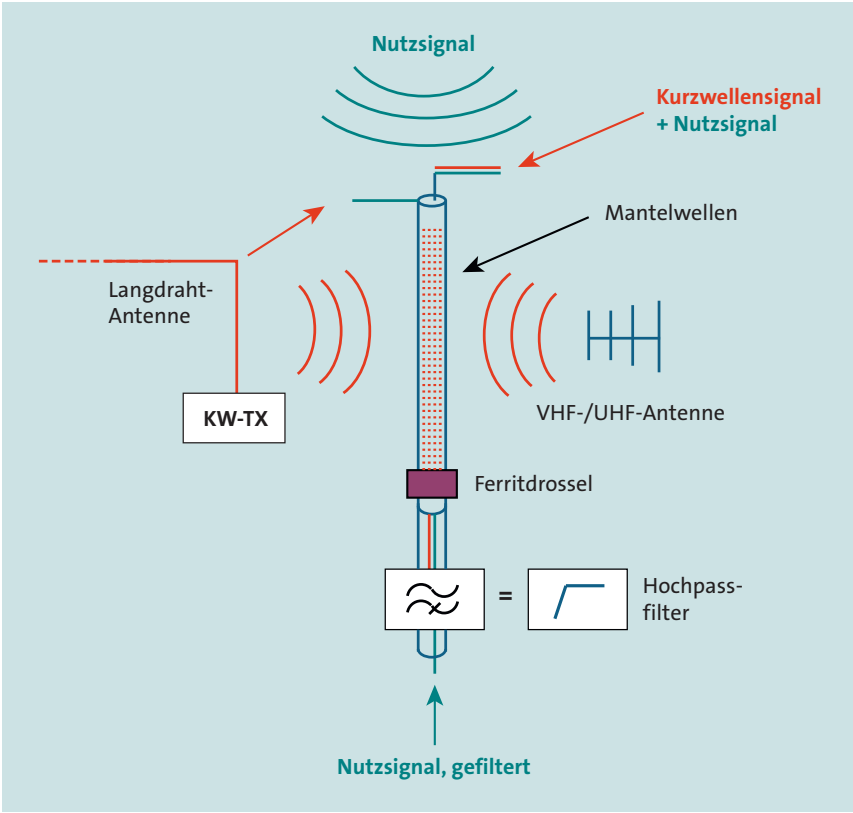


Abbildung 26.2 Drosseln und Filter

Ferritmaterial wird nicht nur bei Störungen des Rundfunk- und Fernsehempfangs verwendet. Auch die Einströmungen über Lautsprecherleitungen und in Stromzufuhrkabel können mit diesen Mitteln wirksam beseitigt werden.



Ferrite in der Funkentstörung

Das Kernmaterial ist für kleine Güte vorgesehen. Eine geringe Güte schafft hohe Verluste – und dies ist hier genau erwünscht!

Eine weitere Maßnahme gegen Einströmungen besteht in der Unterbrechung der Leitung und im Einfügen eines HF-Trenntransformators.

Geschirmte Leitungen für Lautsprecherverbindungen, aber auch zum Teil für die Stromzufuhr oder für die Telekommunikation, gegebenenfalls im Zusammenwirken mit Ferritmaterialien, beseitigen Einströmungen in Hi-Fi-Anlagen, PC-Lautsprecher, Router und Telefonkomponenten. Der Kabelschirm sollte dabei geerdet werden. In der Praxis können Sie dazu gute Netzwerkkabel (Cat. 7) bzw. Antennenkabel verwenden.

26.3 Einstrahlungen in Geräte

Unterhaltungselektronik packt man heutzutage oftmals in ein Kunststoffgehäuse. Das für den Handel notwendige CE-Kennzeichen auf diesen Geräten ist kein Garant dafür, dass es nicht zu Störungen kommen kann.

Einstrahlungen

Von *Einstrahlungen* spricht man, wenn hochfrequente Energie aufgrund ungenügender Abschirmung an die Elektronik im Geräteinneren gelangt.

Halbleiter richten die hochfrequente Energie gleich. Die Basis-Emitter-Strecke von Transistoren wirkt dabei wie eine Diode (siehe Abbildung 26.3).

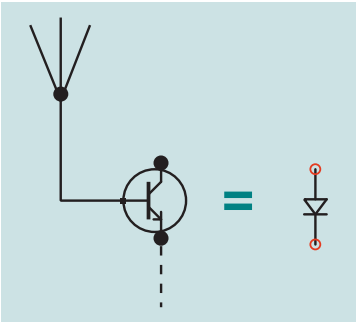


Abbildung 26.3 Diodenstrecke, Basis-Emitter-Übergang

In NF-Verstärkern führt dies zu hörbaren Erscheinungen. Andere elektronische Geräte verweigern eventuell ihre korrekte Funktion.

Besonders SSB- und CW-Signale sind dann aus den Lautsprechern zu hören, natürlich als unverständliches Gemurmel oder Klickgeräusche.

DAB+-Empfänger können davon ebenso betroffen sein. Neben den gerade beschriebenen Geräuschen kann es aber auch zu einer Stummschaltung kommen, wenn der Empfängereingang überfordert wird und kein brauchbares Signal zum Dekodieren bereitsteht.

Für Abhilfe würde eine (Teil-)Abschirmung mit Weißblechteilen sorgen. Allerdings lassen sich viele Geräte nicht ohne Weiteres öffnen und um die Bleche ergänzen. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, das Gerät selbst in ein Metallgehäuse zu setzen. Auch eine unauffällige Unterbringung in einem mit Drahtgewebe ausgeschlagenen Täschchen ist möglich, sofern keine ästhetischen oder technischen Gründe dagegensprechen. Allerdings sind diese Maßnahmen stets eine Einzelfallentscheidung.

Speziell in NF-Verstärkern helfen keramische Kondensatoren, mit denen die Basis-Emitter-Strecke überbrückt wird, gegen die unerwünschten Effekte.

26.4 Empfangsstörungen durch Korrosion an Antennenanschlüssen

Ein korrodierter Anschluss an Empfangsantennen kann eine halbleiterähnliche Wirkung entfalten. In Verbindung mit einem Signal aus der näheren Umgebung entstehen Mischprodukte, die den Empfang stören.

Vor allem bei im Freien montierten Antennen sollten Sie von Zeit zu Zeit eine Wartung durchführen. Dabei prüfen Sie die Stand- und Sturmfestigkeit, aber genauso, ob das Koaxialkabel noch »dicht« ist, also ob kein Wasser unter den Außenmantel gelangt ist und alle Verschraubungen und Steckkontakte frei von Korrosion sind.

Bereits beim Aufbau von Antennen sollten Sie darauf achten, dass Kontaktstellen (Antennenbuchsen, Klemmanschlüsse) weder direkt beregnet noch der Sonne ausgesetzt werden. Eine hermetische Abdichtung ist aber auch nachteilig: Luftfeuchtigkeit sollte stets aus Anschlusskästen entweichen können, andernfalls sammelt sich Schwitzwasser, was wiederum zu Korrosion führt.

Antennen in der Nähe von Kaminen sind ebenso gefährdet, auch wenn die Zeit schwefligen Heizöls oder von Kohleöfen eigentlich vorbei sein sollte. Trotzdem enthalten Verbrennungsabgase, wenn auch in geringerem Maße als früher, immer noch aggressive Bestandteile, die zusammen mit Wasser eine Säure bilden.

26.5 Einstreuungen in das Stromnetz

Wenn Störungswirkungen auch ohne angeschlossene Antenne zu bemerken sind, aber eine Einstrahlung auszuschließen ist, kommt die Störung über das Stromnetz in das Gerät (eine Direkteinstrahlung schließen Sie z. B. durch das Überstülpen eines geerdeten Maschendrahtgewebes aus).

Oftmals werden Antennen- und Stromkabel im Umfeld der Funkanlage zusammen in Kabel- oder Tischkanälen geführt. Was ordentlich aussieht, kann aber beim Senden zu Einkopplungen in das Stromnetz führen. Deshalb können Sie zunächst durch das getrennte Führen von Antennen- und Stromkabeln versuchen, die Störung zu beheben. Nur wenn dies nicht hilft, greifen Sie auf einen Netzfilter zurück.

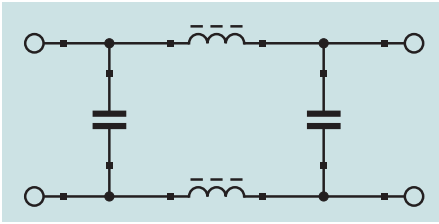


Abbildung 26.4 Schaltplan eines Netzfilters

Ein Netzfilter wie in Abbildung 26.4 dämpft wirksam über das Stromnetz fließende HF-Ströme. Einstreuungen in das Stromnetz können durch zur Antenne parallel verlaufende Stromleitungen geschehen. Ein Sender kann aber auch bei schlechter HF-Erde in das Stromnetz einstreuen.

Prüfen Sie deshalb in dieser Reihenfolge:

1. HF-Erde
2. Netzfilter am Stromanschluss des Senders
3. Netzfilter am gestörten Gerät

Umgekehrt stören heute viele Schaltnetzteile, LED-Leuchtmittel und andere Elektronik den Empfang allgemein und den der Amateurfunkstation.

Auch hier bietet sich die Verwendung von Netzfiltern an. Abbildung 26.5 zeigt ein Fertiggerät.

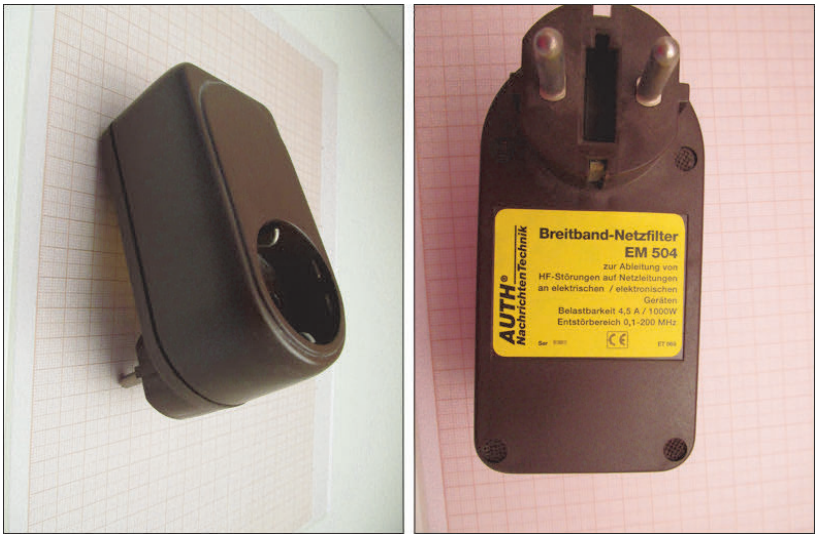


Abbildung 26.5 Netzfilter

26.6 Störungen beim Sendebetrieb vermeiden

Betreiben Sie Ihren Sender so, dass er keine unerwünschten Aussendungen hervorbringt. Dazu gehört, dass Sie ihn nicht übersteuern und ihn auch ab und zu auf Nebenwellenentwicklung kontrollieren. Verwenden Sie gegebenenfalls einen Antennentuner oder ein Tiefpassfilter, um eine gute Nebenwellenunterdrückung zu gewährleisten.

Verwenden Sie nur so viel Sendeleistung, wie notwendig ist, um eine Funkverbindung sicher abwickeln zu können. Nachbarn und »Mit«-Funker danken es Ihnen!

26.7 Vorgehensweise im Störungsfall

Ein Nachbar meldet sich bei Ihnen, weil er den Verdacht hat, dass Sie möglicherweise mit Ihrer Sendetätigkeit eines seiner Empfangsgeräte stören. Bei solch einem Störungsfall gibt es keine pauschalen Lösungen, aber die folgende Liste kann Ihnen möglicherweise bei der Vorgehensweise behilflich sein.

26.7.1 Vorbereitung

- Informieren Sie sich über die Störung und die möglichen Ursachen, da Sie in dieser Situation möglicherweise über spezifisches Fachwissen verfügen.
- Bieten Sie Ihre Hilfe an, beteiligen Sie sich aktiv an der Störungssuche.
- Falls erforderlich, bitten Sie einen weiteren Funkamateur um Unterstützung. Vier Augen sehen mehr als zwei.
- Stellen Sie sicher, dass Sie Kontakt zu einem erfahrenen Helfer haben, der über die gleiche oder höhere Lizenzklasse verfügt und Ihre Funkstation bedienen kann, während Sie beim Nachbarn die Störung untersuchen.
- Erstellen Sie mithilfe des Nachbarn einen Störungszeitplan, den Sie bei der Störungssuche verwenden können. Dadurch wird es einfacher, festzustellen, auf welchem Frequenzband, mit welcher Modulationsart und welcher Sendeleistung Störungen auftreten oder auftraten. So können Sie die Zeitpunkte, zu denen eine Störung auftrat, mit Ihrem Logbuch vergleichen und möglicherweise die ersten Hinweise erhalten, unter welchen Bedingungen Störungen auftreten.

26.7.2 Vorgehen beim Nachbarn

- Um das gestörte Empfangsgerät zu überprüfen, trennen Sie vorübergehend die Antenne ab und lassen Ihren Helfer die vereinbarten Tests durchführen. Wenn keine Störung auftritt, schließen Sie die Antenne wieder an. Tritt die Störung erneut auf, liegt die Ursache höchstwahrscheinlich am Antennenweg.
- Versuchen Sie, die Störung durch Entstörungsmethoden wie Verdrosseln oder durch das Hinzufügen von Hochpassfiltern zu beheben. In den meisten Fällen sollte dies erfolgreich sein. Dies gilt auch für Störungen an Computerlautsprechern und Hi-Fi-Anlagen. Hier können Sie einen Kopfhörer direkt an die Verstärkereinheit anschließen. Wenn Sie im Kopfhörer keine Störung hören, drosseln Sie die Lautsprecherkabel. Lassen Sie das benötigte Material beim Nachbarn.
- Wenn die Störung weiterhin besteht, überprüfen Sie, ob sie über das Stromnetz eingespeist wird. Verwenden Sie dazu einen steckbaren Netzfilter, den Sie zwi-

schen die Stromversorgung und die Steckdose stecken. Wenn das Problem dadurch behoben wird, hinterlassen Sie das Filtermaterial ebenfalls beim Nachbarn.

- Wenn sich die Störung durch die bisherigen Maßnahmen nicht ändert, könnte es sich um eine Direkteinstrahlung handeln. In diesem Fall kann es hilfreich sein, das gestörte Gerät an einem anderen Ort aufzustellen und zum Test mit einem unisolierten Draht-Maschengeflecht zu bedecken, das Sie leitend mit einem Heizkörper oder der Wasserleitung verbinden. Wenn die Störung dadurch verschwindet, könnte eine unzureichende Abschirmung im Gerät vorliegen. Hier sollten Sie gemeinsam mit Ihrem Nachbarn individuell entscheiden, welche Maßnahmen am Gerät ergriffen werden können, z. B. das Einbringen von Weißblechstreifen ins Gehäuse oder das Anbringen von Ferritmaterial an der internen Verkabelung. Diese Arbeiten können Sie gegebenenfalls zusammen mit Ihrem Nachbarn durchführen.
- Haben alle Maßnahmen nichts geholfen, ermutigen Sie Ihren Nachbarn, sich mit der Bundesnetzagentur in Verbindung zu setzen und eine Störungsmeldung abzugeben. Minimieren oder vermeiden Sie nach Möglichkeit den spezifischen Funkbetrieb, der zu der Störung führt, bis die Bundesnetzagentur eine Störungssuche durchführt hat. Halten Sie sich gegenseitig auf dem Laufenden, bis die Störung beseitigt werden konnte.
- Alternativ können Sie, sofern es sich um ein Gerät ohne hohen Wert handelt, in Betracht ziehen, ein neues Gerät zu erwerben, bei dem die Störung nicht auftritt. Dies ist zwar nicht verpflichtend, zeigt jedoch eine kooperative Haltung und kann Sympathie erwecken. In einigen Fällen hat auch die Kontaktaufnahme mit dem Hersteller oder Importeur Erfolg gezeigt, indem ein Ersatzgerät ohne Einstrahlschwäche geliefert wurde.

26.7.3 Zusammenarbeit und ein gutes Verhältnis sind entscheidend

Es ist von großer Bedeutung, während des gesamten Prozesses der Störungsbeseitigung eine kooperative und freundliche Herangehensweise zu bewahren. Die friedliche Zusammenarbeit und offene und freundliche Kommunikation zwischen Funkamateuren ist ein wesentlicher Aspekt unseres Hobbys, und dies sollten wir auch nach außen tragen. Und selbst wenn Störungen auftreten, sollte dies nicht zu einer Konfrontation führen: Stellen Sie sicher, dass Sie offen und freundlich kommunizieren, Informationen teilen und sich gegenseitig unterstützen.

In solchen Situationen ist es ratsam, Geduld zu zeigen und Verständnis für die Gefühle und Bedenken Ihres Nachbarn zu haben. Eine offene und respektvolle Kommunikation kann dazu beitragen, Missverständnisse zu vermeiden und gemeinsam an einer Lösung zu arbeiten. Denken Sie daran, dass wir alle unser Hobby repräsentieren und dass es in unserem Interesse liegt, ein harmonisches Funkumfeld zu bewahren.

Die Störungsbeseitigung kann eine Herausforderung darstellen, aber sie bietet auch die Möglichkeit, die Gemeinschaft mit Ihrem Nachbarn zu stärken und wertvolle Erfahrungen zu sammeln. Gemeinsam können wir daran arbeiten, Störungen zu identifizieren und zu beseitigen, sodass wir unser Hobby in vollen Zügen genießen können, ohne dabei das freundliche Miteinander aus den Augen zu verlieren.

Kapitel 27
Sicherheit

27.1 Gefahren durch Stromschlag

Der direkte Körperkontakt zu mehr als 50 Volt Wechselspannung oder 120 Volt Gleichspannung kann für einen Erwachsenen bereits lebensgefährliche Folgen haben. Strömt solche Elektrizität durch den Körper, führt das oftmals zu Herzrhythmusstörungen, Muskelverkrampfungen oder Verbrennungen. Ein eventuell auftretender Störlichtbogen führt ebenso zu Verbrennungen. Außerdem kann ein Sekundärunfall geschehen, z. B. ein Sturz von einer Leiter oder Treppe oder das Zusammenbrechen über einer laufenden Werkzeugmaschine. Auch ein Schockzustand ist möglich.

Die Muskelverkrampfungen dauern so lange an, wie die Einwirkung des Stromes anhält. Die Verbrennungen findet man als sogenannte *Strommarken*. Dabei handelt es sich um die Ein- und Austrittsstellen der Durchströmung. Weitere Folgen des Stromschlages können auch Bewusstlosigkeit, Herz-Kreislauf-Stillstand oder Atemlähmung sein. Die Sekundärfolgen eines Stromunfalls beruhen vor allem auf der Zerstörung von Zellgewebe. Die dabei entstehenden giftigen Eiweißzerfallprodukte führen zu Vergiftungserscheinungen oder Nierenschäden. Ebenso sind dauerhafte Muskel- und Nervenschäden möglich.

Allgemein noch ein Hinweis: Legen Sie bei Elektroarbeiten aller Art vorher Ihre Armbanduhr, metallische Armbänder oder Ringe ab!

Bei ungeerdeten Draht- und Vertikalantennen bilden sich während starken Regens, Schneefalls oder Hagel elektrostatische Aufladungen. Wenn Sie den Antennenstecker berühren, kommt es ebenso zum Stromschlag. Es gibt spezielle Überspannungsableiter, die in die Antennenleitung eingeschleift werden. Diese beinhalten eine Gasentladungspatrone, die Sie aber alle zwei bis drei Jahre austauschen sollten, weil sie altert.

Alternativ verwenden Sie einen hochohmigen Ableitwiderstand zwischen dem aktiven Antennenelement und Erde.

27.2 Gefahren durch Hochfrequenzeinwirkung

Bei der Berührung von Antennen, offenen Speiseleitungen, blank liegenden Anschlusselementen oder Komponenten in offenen Endstufen besteht die Gefahr von *Hochfrequenzverbrennungen*. Diese sind äußerst unangenehm, und die Folgesymp-

tome können sehr lange anhalten. Durch den Skineffekt spielen sich die Vorgänge meist allerdings mehr an der Körperoberfläche ab.

Achten Sie darauf, niemals – auch nicht bei QRP-Betrieb – magnetische Antennen (*MagLoops*) zu berühren!

Wenn Sie im Mikrowellenbereich Sendebetrieb durchführen, stellen Sie sich niemals vor die Antenne! Blicken Sie auch nicht in die Antenne, wenn Sie sich innerhalb des Sicherheitsabstandes befinden!

Wenn sich Ihr Kurzwellenfunkgerät oder -sender während des Sendens heiß anfühlt, so kann eine Viertelwellenresonanz der Erdleitung vorliegen (λ/4 oder ungeradezahliges Vielfaches davon). Verkürzen oder verlängern Sie diese Leitung etwas, damit dieser Effekt nicht mehr auftritt.

27.3 Im Notfall

Im Notfall gilt es, rasch und entschlossen zu handeln:

- Wenn Sie eine Person nach »Stromkontakt« auffinden: Rufen Sie den Notruf 112!
- Achten Sie auf Ihre eigene Sicherheit! Berühren Sie den Verletzten nicht! Es besteht Stromschlaggefahr!
- Umstehende über die Gefahr informieren!
- Bei Niederspannung (Haushaltsstrom, bis 1 kV Wechselspannung, 1,5 kV Gleichspannung):
  - Stromkreis wenn möglich unterbrechen (RCD oder Lastschalter in der Unterverteilung abschalten, Kabel aus der Steckdose abziehen). Ist dies nicht möglich, mittels isolierenden Gegenständen (Wolldecke, Holzbesenstiel, Holzbretter) den Verletzten vom Stromkreis trennen.
  - Falls der Verletzte bewusstlos und ohne Atmung ist: Mit Herz-Lungen-Massage und Beatmung beginnen!
  - Falls der Verletzte bewusstlos ist, aber aktiv atmet: Den Verletzten in stabile Seitenlage bringen!
  - Wenn der Verletzte ansprechbar ist: Den Verletzten beruhigen!
  - Brandwunden keimfrei bedecken (Verbandskasten)! Dabei Schutzhandschuhe benutzen!
- Bei Hochspannungsunfällen (Wechselspannung ab 1 kV, Gleichspannung ab 1,5 kV)
  - Sofort Notruf (112) absetzen und dabei auf die Hochspannung hinweisen! Wenn möglich und bekannt, Fachpersonal zum Abschalten/Freischalten und gegebenenfalls Erden der Hochspannungsanlage anfordern.

– Keinesfalls sich dem Verletzten nähern und Rettungsversuche unternehmen! Es besteht gegebenenfalls Lebensgefahr beim Rettungsversuch, auch wenn isolierende Gegenstände verwendet werden. Denken Sie an den Spannungstrichter! Abstand mindestens 10 bis 20 Meter einhalten!

Personen mit Stromunfällen werden in der Regel klinisch untersucht und behandelt.

Besuchen Sie in regelmäßigen Abständen einen Ersthelferkurs! Im Ernstfall können Sie sofort helfen!

27.4 Unfallverhütung für Funkamateure

Damit die Beschäftigung mit der Funktechnik ohne negative Folgen bleibt, sehen Sie hier einige Hinweise:

- **Werkzeuge allgemein**: Machen Sie sich mit der Benutzung vertraut. Verwenden Sie nur Werkzeug, das den Sicherheitsvorschriften entspricht und sich in ordnungsgemäßem Zustand befindet.
- **Prüf- und Messgeräte**: Die Geräte sollten den Vorschriften genügen und natürlich in betriebssicherem Zustand sein. Verwenden Sie den einpoligen, guten alten Phasenprüfer allenfalls noch als Schraubendreher, und verwenden Sie sonst an seiner Stelle ein zweipoliges Prüfmittel (siehe Abbildung 27.1). Messkabel verfügen über berührungssichere Steckverbinder und Messspitzen. Die alten Kabel mit den dünnen 2-mm-Steckern fallen oft regelrecht aus den Buchsen des Messgeräts, und die Messspitzen können leicht berührt werden. Solche Messmittel sind allenfalls für Einsteigerversuche mit Taschenlampenbatterien noch geeignet (siehe Abbildung 27.2). Lesen Sie auch die Ausführungen zu den Messmitteln in Kapitel 25!

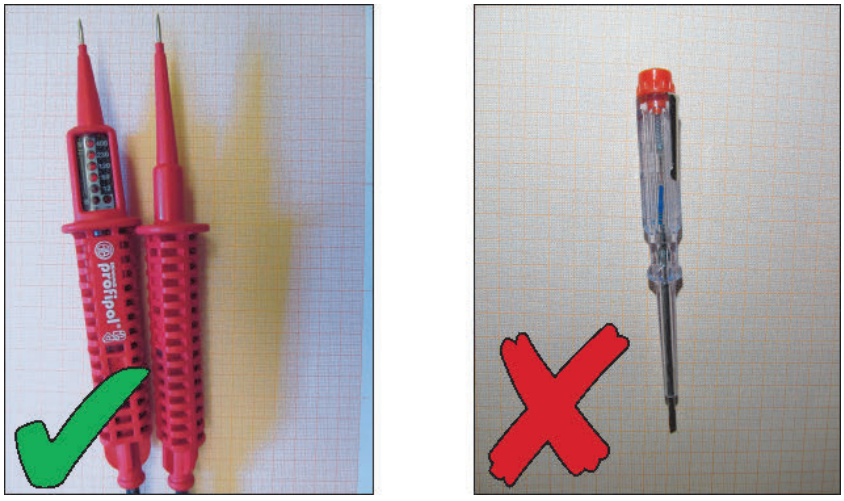


Abbildung 27.1 Sichere und unsichere Prüfmittel

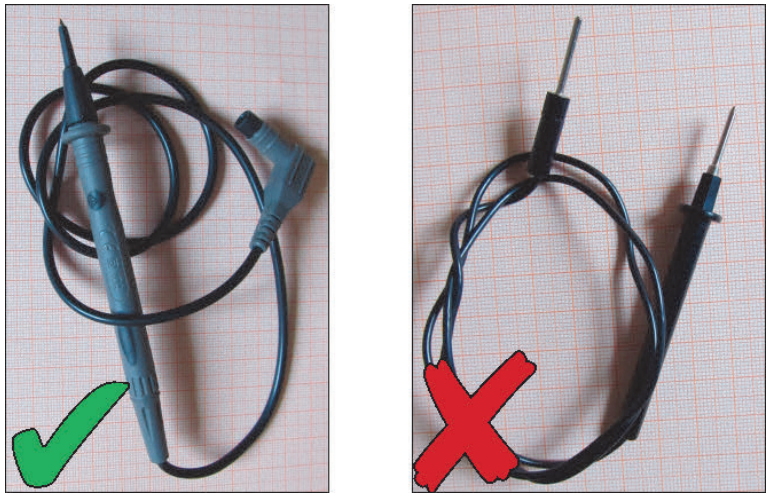


Abbildung 27.2 Sichere und unsichere Messkabel

- Bevor Sie Kabelkanäle, Regale usw. an Wänden montieren, prüfen Sie, ob sich Strom-, Wasser- oder gar Gasleitungen im Mauerwerk befinden. Hierzu gibt es Metall- und Leitungssucher.
- Bevor Sie Elektrogeräte öffnen, trennen Sie diese vom Stromnetz oder entnehmen die Akkumulatoren bzw. Batterien. Nur Fachleute dürfen an der Elektroinstallation mit Niederspannung arbeiten. Diese trennen die Bereiche, an denen sie arbeiten wollen, durch Auslösen des RCD oder des Lastschalters ab und prüfen auf Spannungsfreiheit! In KFZ-Bordnetzen oder an Schutzkleinspannung (12 Volt) allgemein ziehen Sie die Sicherung des Stromkreises ab, an dem Sie arbeiten möchten.
- Wenn Sie an Röhrengeräten arbeiten – seien es historische Stücke oder moderne Hochleistungsendstufen –, trennen Sie diese vor Eingriffen erst einmal vom Stromnetz. Doch das genügt nicht immer! Während in modernen Geräten Deckelschalter die Hochspannung zusätzlich automatisch abschalten und die Hochvoltkondensatoren über eingebaute hochohmige Widerstände (200 kΩ oder mehr) entladen werden, geschieht dies in den alten Schätzchen oft nicht. Hier entladen Sie die Hochvoltkondensatoren manuell. Verbinden Sie diese Kondensatoren nicht ohne Widerstand mit der Gehäusemasse! Der sonst folgende Kurzschluss kann zu Schäden am Kondensator oder dem Gerät allgemein führen. Wenn der Kondensator entsprechend geladen ist, hinterlässt diese Methode meist unschöne Einbrennstellen am Gehäuse!

  Ein Ende ist mit der Gehäusemasse per Kabel verbunden, das andere, freie Ende geben Sie an den Hochvoltkondensator, jedoch ohne hier mit der blanken Hand die Verbindung zu berühren. Nach einiger Zeit sollte die Spannung abgebaut sein. Prü-

fen Sie das! Abbildung 27.3 zeigt Ihnen ein Entladekabel, oben zusammengebaut und unten die Einzelteile. Der Widerstand (220 kΩ) befindet sich unter dem Schrumpfschlauch zwischen dem grünen Stecker und der roten Kabelbuchse. Alle anderen Kabel und Klemmen befinden sich sowieso im Messgerätekoffer.

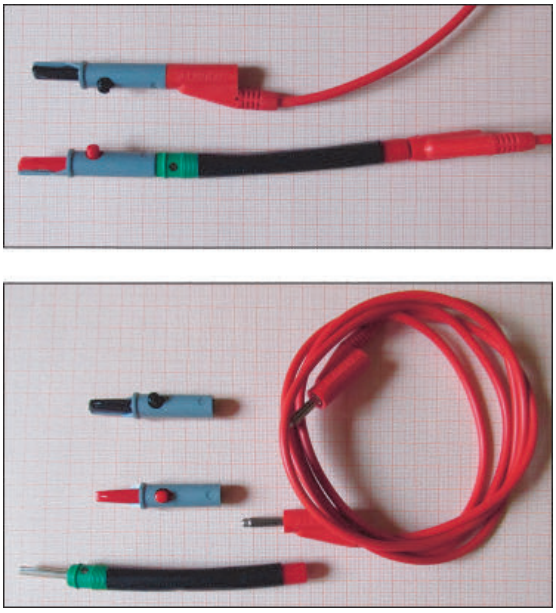


Abbildung 27.3 Entladekabel

- **Kurzschlüsse** sollten Sie natürlich vermeiden! Weitere Informationen finden Sie auch in Abschnitt 4.1.4.

  Die Folgen eines Kurzschlusses können enorm sein: Brände, Explosionen (bei Lithium-Ionen-Akkus) und auch zerstörte Elektronik!

  Auch Handfunkgeräte können in dieser Hinsicht gefährlich werden, wenn sie blanke, außenliegende Kontakte aufweisen, die spannungsführend sind. Diese Kontakte werden für das Laden in einem Standlader benötigt. Meist sind es drei Kontakte an der Rückseite des Funkgeräteakkus (siehe Abbildung 27.4). Sie sind mit +, - und dem Ausgang eines temperaturabhängigen Widerstandes zur Ladeüberwachung belegt.

  Wenn Sie so ein Gerät in die Tasche stecken, besteht Kurzschlussgefahr durch Schlüssel, Schlüsselringe und Uhrenketten und andere leitende Kleinteile. Mit einem Vielfachmessgerät, das Sie als Spannungsmesser einstellen, können Sie feststellen, ob an den Kontakten Spannung anliegt. Ist dies der Fall, benutzen Sie das Handfunkgerät in einer meist dafür erhältlichen Tasche oder stellen eine Art Kappe aus Kunststoff mittels 3D-Druck her. Im Notfall reicht auch eine kleine Plastiktüte aus.



Abbildung 27.4 Rückseiten von Handfunkgeräten

27.5 Adernkennfarben

Die Adernkennfarben dreiadriger isolierter Stromkabel sollten Sie in jedem Fall kennen (siehe Tabelle 27.1).

Farbe	Bezeichnung	Hinweis
Grün/Gelb	Schutzleiter, PE-Leiter	Fließt hierüber Strom (»Fehlerstrom«), wird der RCD-Schalter (»FI«-Schalter) ausgelöst und die Stromversorgung unterbrochen.
Braun oder Schwarz	Außenleiter	Führt Spannung!
Blau	Neutralleiter	Null-Leiter
Rot	Pluspol	bei Gleichstromversorung 12 Volt
Schwarz	Minuspol	bei Gleichstromversorung 12 Volt

Tabelle 27.1 Adernkennfarben

Der Schutzkontakt eines Schutzkontaktsteckers (Schuko-Steckers) stellt die Verbindung zum PE-Leiter (Schutzleiter) in der Steckdose her (siehe Abbildung 27.5).

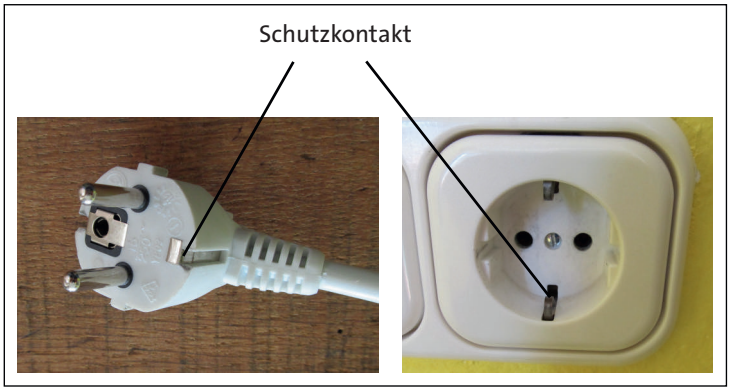


Abbildung 27.5 Schutzkontakt an Stecker und Steckdose

27.6 Die Sicherheit von Antennen

Bauen Sie Ihre Antenne sturm- und standsicher auf. Als Standrohre dürfen Sie keine Installationsrohre verwenden, denn diese halten den Belastungen bei Sturm nicht stand. Antennenmastrohre sind eigens dafür konstruiert, auch höheren Biegelasten standzuhalten. Darüber hinaus sind diese Rohre auch für den Einsatz im Freien hinsichtlich Korrosion ertüchtigt.

Die Antenne selbst muss ebenso mechanisch fest genug aufgebaut werden. Falls Antennen oder Masten z. B. durch starke Unwetter beschädigt werden, dürfen die abfallenden oder umstürzenden Teile keinen Kontakt zur Energieversorgung bekommen!

Die Antenne und ihre Zuleitung müssen berührungssicher konstruiert sein. Bei einem Koaxialkabel ist dies kein Problem, wohl aber bei Hühnerleiter- und Eindrahtspeisung. Unbeteiligte, die versehentlich so eine Leitung im Sendefall berühren, können unter Umständen große gesundheitliche Schäden erleiden.

Keinesfalls dürfen Sie den Blitzschutz außer Acht lassen: Jede Antenne am und auf dem Gebäude benötigt eine Blitzschutzerdung. Antennen unter Dach oder solche, die nur temporär auf dem Balkon aufgestellt werden, benötigen keinen Blitzschutz. Solange eine Antenne nicht mehr als 1,5 m von der Außenmauer entfernt ist und mindestens 2 m unterhalb der Dachoberkante angebracht ist, benötigt sie ebenso keinen Blitzschutz, da man hier davon ausgeht, dass ein direkter Blitztreffer unwahrscheinlich ist.

Je nach Bauvorschrift verfügt ein Gebäude bereits über einen äußeren Blitzschutz. Dieser dient der Ableitung der Blitzenergie außerhalb des Hauses zur Erde. Sie können das Standrohr Ihrer Antenne auf dem kürzesten Weg mit der vorhandenen Blitzschutzanlage verbinden (siehe Abbildung 27.6).

Als Verbindung für diesen Anschluss sind die in Tabelle 27.2 genannten Materialien zulässig.

Material	Hinweise
Kupfer	Einzelmassivdraht, Mindestquerschnitt 16 mm², isoliert oder blank
Aluminium	Einzelmassivdraht, Mindestquerschnitt 25 mm², isoliert
Stahl	Einzelmassivdraht, Mindestquerschnitt 50 mm²

Tabelle 27.2 Mindestanforderungen an Erdleiter

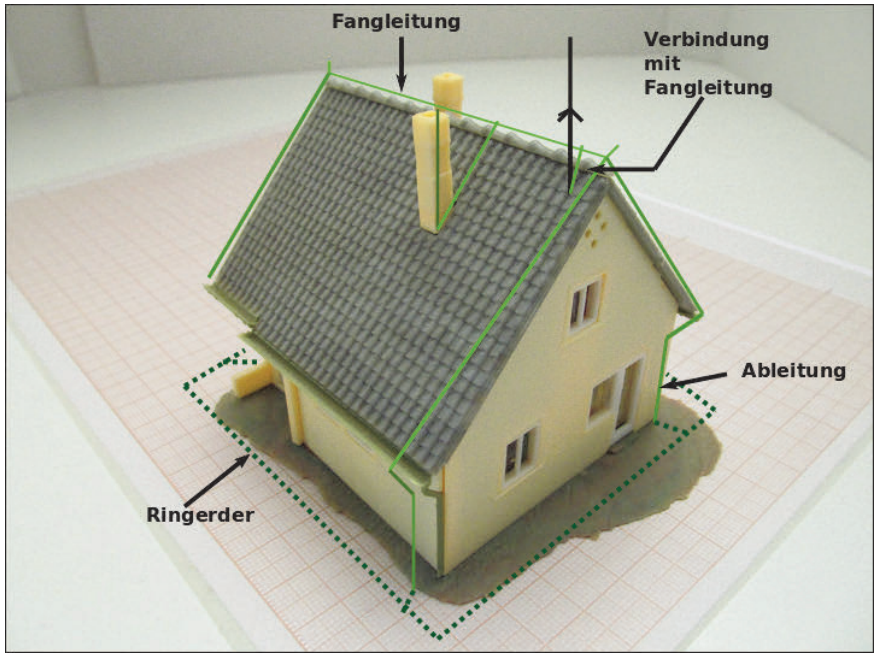


Abbildung 27.6 Anschluss des Standrohrs an vorhandener Blitzschutzanlage

Jeder Fundamenterder kann als Blitzschutzerder verwendet werden, solange alle Blitzschutzleitungen bis zur Potenzialausgleichsschiene geführt werden. Mit der Potenzialausgleichsschiene müssen auch die Außenleiter sämtlicher Koaxialkabel verbunden sein, die von den Außenantennen zum Funkraum verlaufen! Andernfalls kann bei einem Blitzeinschlag bei abgezogenem Antennenkabel ein Lichtbogen entstehen, der einen Gebäudebrand auslösen kann. Ist die Leitung am Funkgerät angeschlossen, fließt der Blitzstrom über die Geräte ab, was ebenso schwere Sach- und Personenschäden mit sich bringen kann!

Innerhalb von Gebäuden sind diese Leitungen zum Potenzialausgleich mit wenigstens 4 mm² Querschnitt zu führen. Die Kennfarbe der Isolierung ist Grün/Gelb. Andere Farben dürfen nicht verwendet werden.

Verfügt ein Gebäude nicht über einen äußeren Blitzschutz, so müssen Sie die Antenne einzeln erden (siehe Abbildung 27.7). Dabei verbinden Sie das Standrohr mit dem Erdleiter, der mit einem Band- oder Staberder verbunden ist.

Der Staberder muss eine Mindestlänge von 2,5 m aufweisen und wird senkrecht in den Boden getrieben. Der Banderder besteht aus korrosionsfestem Edelstahl V4a mit 30 mm Breite und 3,5 mm Stärke und wird rund einen halben Meter tief neben dem Gebäude verlegt. Er muss mindestens 5 m lang sein.

Außerdem müssen Sie diese Antennenerdung mit der Potentialausgleichsschiene des Gebäudes verbinden. Das gilt auch, wenn sich der Antennenmast nicht auf dem Dach, sondern neben dem Gebäude befindet. Auch hier verhindert oder begrenzt der Zusammenschluss von Antennen- und Gebäudeerdung Personen- und Sachschäden.

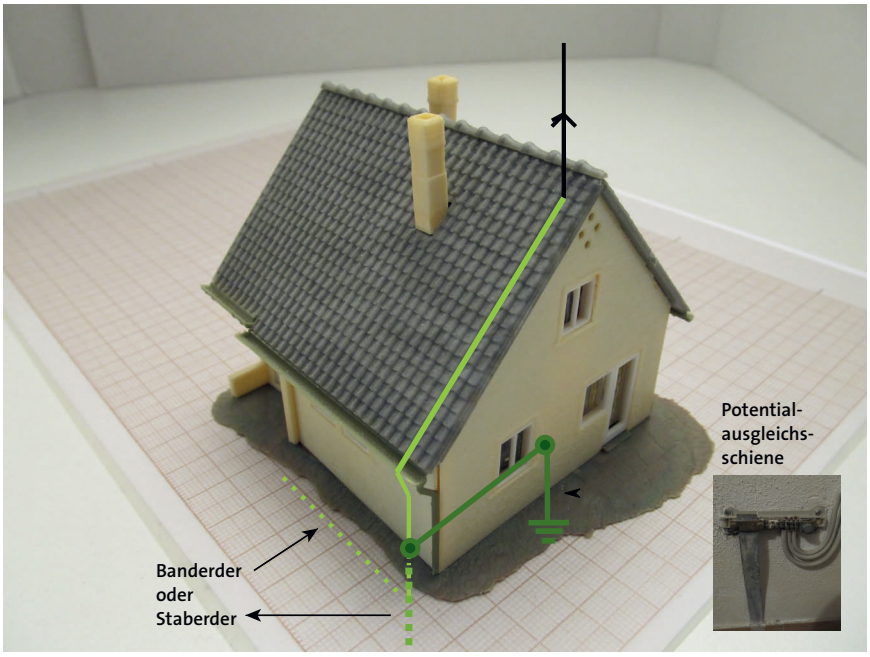


Abbildung 27.7 Gebäude ohne äußeren Blitzschutz

Vor dem Aufbau Ihrer Antenne konsultieren Sie bitte die örtlich geltenden Bauvorschriften. In jedem Bundesland gilt ein eigenes Baugesetz, und Kommunen erlassen ergänzende Bausatzungen. Darin sind neben den Abmessungen oftmals auch Vorschriften hinsichtlich des Blitzschutzes zu finden. Gegebenenfalls ziehen Sie einen Blitzschutzfachbetrieb hinzu, der über die neuesten Erkenntnisse im Bilde sein sollte.

Ergänzende Literatur zum Bereich Blitzschutz:

- Blitzschutzsysteme 1 (44) ISBN 978-3-8007-3511-2
- Blitzschutzsysteme 2 (160) ISBN 978-3-8007-3653-9
- Antennenerdung, Blitz- oder Überspannungsschutz, CQ-DL 6/2024, ab S. 30
- Weitere Informationen finden Sie auch unter *https://www.dehn.de*.

27.7 Sicherer Amateurfunk im Kraftfahrzeug

Der Einbau von Funkgeräten in Kraftfahrzeuge und ihr Betrieb sind seit den 90er-Jahren nicht mehr ohne Weiteres möglich. Grundsätzlich müssen Sie beim Einbau Ihres Funkgeräts die Anweisungen des KFZ-Herstellers beachten. Andernfalls erlischt die Zulassung/Betriebserlaubnis des Fahrzeugs!

Die Funkantenne soll vorzugsweise in der Mitte des Autodachs angebracht werden. Damit ist sie zum einen weit genug von der empfindlichen Fahrzeugelektronik entfernt und bietet zum anderen die bestmögliche Abstrahlung der Sendeenergie. Die zulässigen Anbringungspunkte am Fahrzeug regelt auch die StVO.

Das Antennenkabel sollte abseits des Kabelbaums im Fahrzeug verlegt werden. Mögliche Mantelwellen stören dann die Bordelektronik nicht. Umgekehrt kommen keine Störungen über die Kabelabschirmung an das Funkgerät. Meist empfehlen die KFZ-Hersteller auch den Stromanschluss direkt über eine eigene Leitung an der Starterbatterie.

Die Amateurfunkvereinigungen haben hierzu weitergehende Informationen, die Sie meist über das Internet abrufen können.

Nicht nur in Deutschland, auch in anderen europäischen Staaten dürfen Sie während der Fahrt kein Mobiltelefon in die Hand nehmen. Diese Vorschriften gelten natürlich auch für Funkgeräte und Mikrofone. Sie benötigen daher eine Freisprechmöglichkeit, wenn Sie als Fahrer Funkbetrieb durchführen möchten. Mit ein wenig Zeit- und Materialaufwand können Sie sich selbst eine Freisprecheinrichtung anfertigen. Im Grunde fertigen Sie dabei einen Ersatz für das Handmikrofon an. Die Sendetaste ersetzen Sie durch einen Fußtaster, der am besten knapp unterhalb links beim Fahrersitz platziert wird. Natürlich darf der Taster nicht verrutschen und die Pedalbedienung beeinträchtigen. Das Mikrofon selbst befestigen Sie z. B. an der Sonnenblende. Einzig die Kabelverbindungen zum Funkgerät müssen noch unscheinbar untergebracht werden. Natürlich darf die gesamte Konstruktion den Fahrer während der Fahrt nicht beeinträchtigen!

Für einige Mobilfunkgeräte gibt es schon fertige Freisprecheinrichtungen zu kaufen. Sie müssen diese dann nur noch in den Kraftwagen einbauen.

Einige Mobil- und Handfunkgeräte, die sich Stand 2024 auf dem Markt befinden, ermöglichen auch die Nutzung von Bluetooth. Verbindungen zu Headsets oder der im Kraftwagen eingebauten Freisprechanlage sind damit relativ unkompliziert möglich. Hierzu müssen Sie nur die Konfiguration an den Geräten vornehmen. Headsets verfügen in der Regel über eine eingebaute Sendetaste (PTT). Und für die Nutzung der Freisprechanlage gibt es beispielsweise für das Anytone AT-D878UVPlus einen PTT-Taster, den Sie mit Klettband am Lenkrad befestigen (siehe Abbildung 27.8).



Abbildung 27.8 Bluetooth-PTT-Taster

Einen kleinen Nachteil hat die kabellose Technik allerdings: Die Akkus, die in Headsets oder PTT-Tastern eingebaut sind, müssen auch immer wieder geladen werden.

TEIL II

Praxis und Projekte

Kapitel 28
SDR-Empfang mit dem SDRplay RSP2pro

Der *RSP2pro* des Herstellers SDRplay steht hier stellvertretend für viele SDR-Empfänger, die Sie per USB an den Rechner anschließen können. Der Empfänger steckt in einem Metallgehäuse, die Anschlüsse sind aus hochwertigen Materialien. Tabelle 28.1 zeigt Ihnen die technischen Daten des Modells.

Merkmal	Daten
Stromversorgung	per USB-Kabel (gleichzeitig Datenverbindung)
Frequenzbereich	1 kHz bis 2 GHz, also von Längstwellen bis Dezimeterwellen
Antennenanschlüsse	2 mit SMA-Buchse, für den kompletten Frequenzbereich
	1 Klemme, Eingang hochohmig für Wurfantenne, bis 30 MHz
USB-Anschluss	Typ-B-Buchse
Audioausgang	3,5-mm-Klinke
Frequenzstabilität	durch hochstabilen Quarzoszillator (feinabstimmbar) bis 0,01 ppm Abweichung
Analog-Digital-Wandler	12 Bit
Bandfilter	10
	bis 12 MHz Tiefpass
	12–30 MHz
	30–60 MHz
	60–120 MHz

Tabelle 28.1 Technische Daten des SDRplay RSP2pro

Merkmal	Daten
Bandfilter (Forts.)	120–250 MHz
	250–300 MHz
	300–380 MHz
	380–420 MHz
	420–1.000 MHz
	ab 1 GHz Hochpass

Tabelle 28.1 Technische Daten des SDRplay RSP2pro (Forts.)

Abbildung 28.1 zeigt das Gerät mit den Antennenanschlüssen.



Abbildung 28.1 Antennenanschlüsse des SDRplay RSP2pro

Für alle gängigen Betriebssysteme gibt es Programme, mit denen Sie den Empfang steuern können. Diese Programme füllen allerdings den Bildschirm mit einer Viel-

zahl von Einstellmöglichkeiten und Signaldarstellungen. Am Beispiel von *CubicSDR* wird diese Vielfalt hier erklärt. In Abbildung 28.2 sehen Sie zunächst einmal die grobe Einteilung des Steuerungsbildschirms.

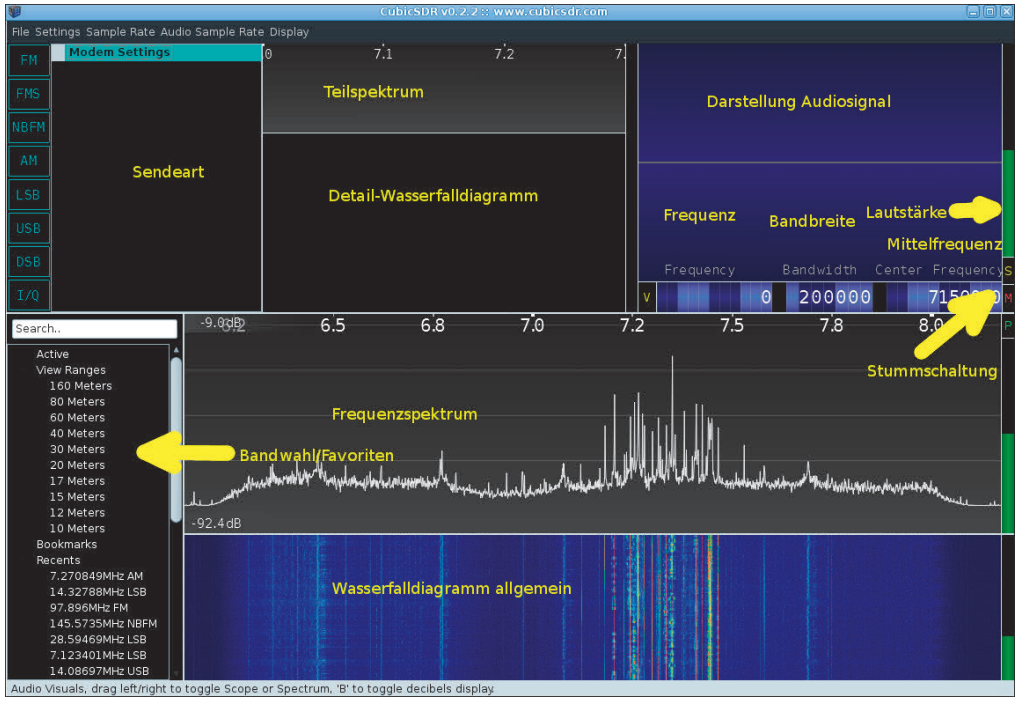


Abbildung 28.2 CubicSDR: Einteilung des Steuerungsbildschirms

Die Empfangsfrequenz und das umgebende Spektrum werden als Wasserfalldiagramm und in Spektraldarstellung angezeigt. Das Wasserfalldiagramm zeigt eine zeitliche Abfolge des Signalverlaufs. Im Bild erkennen Sie deshalb sogar Morsezeichen! Die Spektraldarstellung hingegen zeigt in Echtzeit den Frequenzbereich mit den angezeigten Feldstärken und den Signalformen. Ein Teilspektrum und einen engen detaillierten Ausschnitt des Wasserfalldiagramms finden Sie im mittleren oberen Bildbereich. Das gewonnene Audiosignal finden Sie rechts oben dargestellt.

Abbildung 28.3 zeigt den arbeitenden Empfänger. Die Empfangsbandbreite wird in allen vier Signaldarstellungen durch graue transparente Balken bzw. durch senkrechte Abgrenzungsstriche dargestellt.

Zum Starten müssen Sie das Programm mit dem Gerät verbinden. Hierzu kann es per USB angeschlossen sein (siehe Abbildung 28.4). Im Device-Dialog (File • SDR-Devices) wählen Sie das oder die Geräte aus.

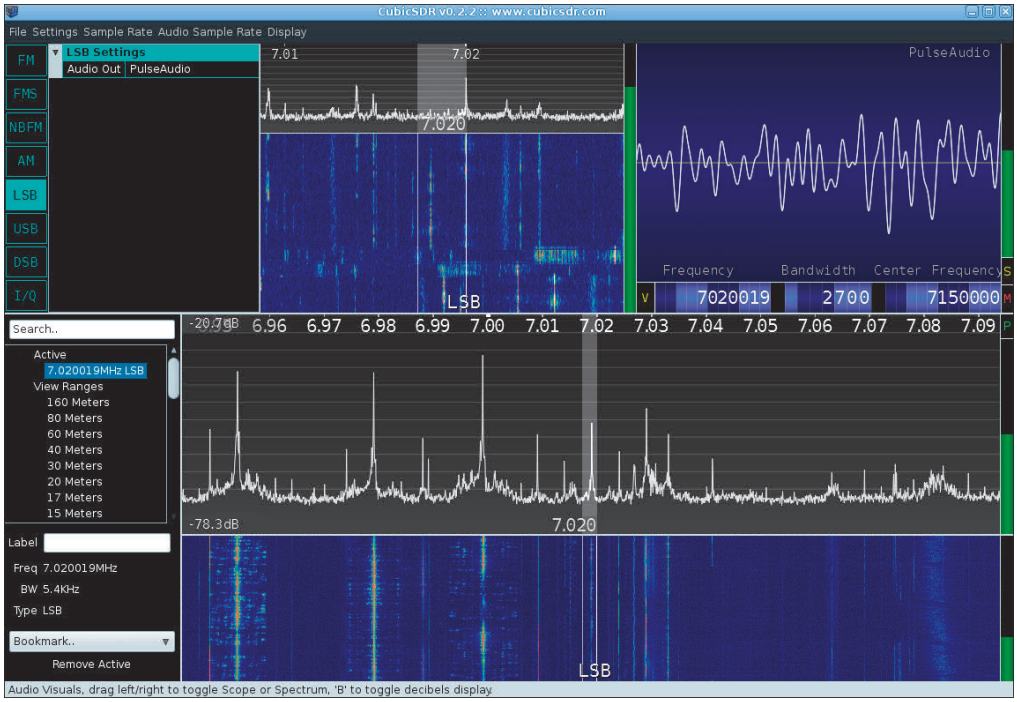


Abbildung 28.3 CubicSDR: Betriebsdarstellung

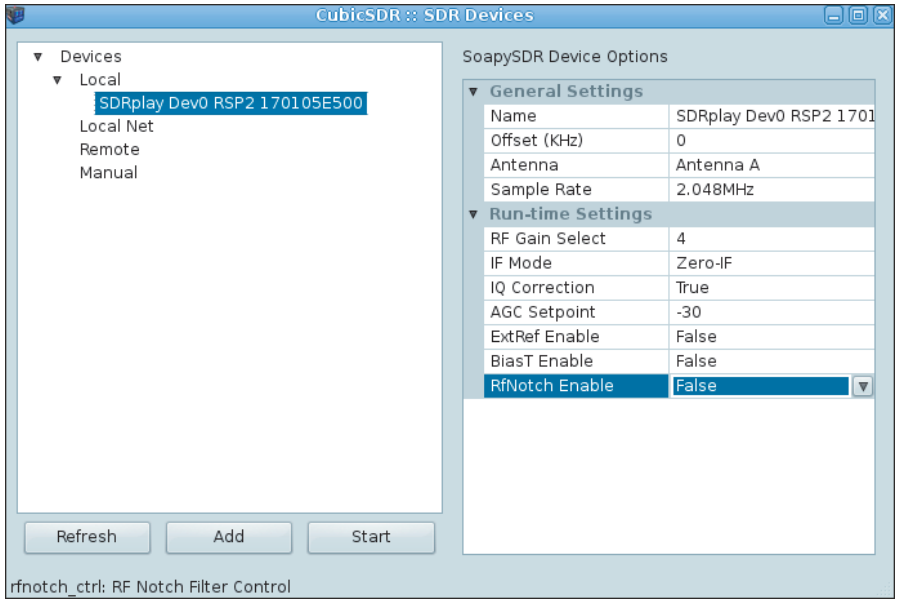


Abbildung 28.4 CubicSDR: Geräteverbindung beim Programmstart herstellen

Klicken Sie in diesem Fenster noch auf START, damit die Verbindung zustande kommt und der Empfang anläuft.

Sie können unter SETTINGS einige Einstellungen wie zur Antenne oder zur HF-Verstärkung vornehmen (siehe Abbildung 28.5).

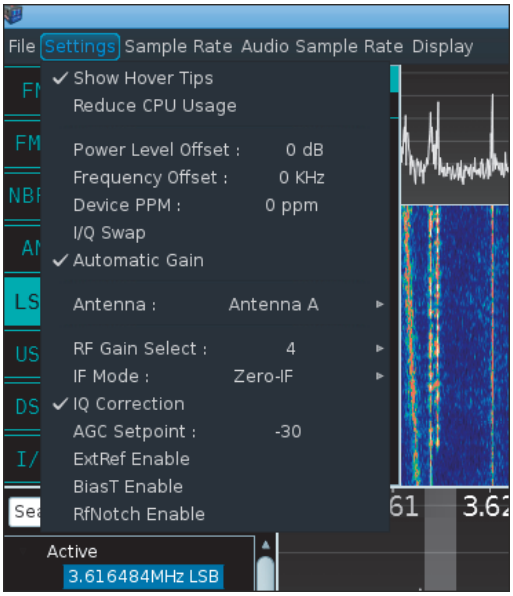


Abbildung 28.5 Empfangseinstellungen

Die Frequenzeinstellung nehmen Sie entweder per Mausrad oder direkt im betreffenden Teilbereich des Steuerungsbildschirms vor (siehe Abbildung 28.6). Dabei klicken Sie auf die jeweilige Stelle oben oder unten, und entsprechend ändert sich der Wert. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass Sie auch große Sprünge in der Empfangsfrequenz vornehmen können.

Bei dicht belegtem Band verengen Sie die Bandbreite mit den gleichen Handgriffen.

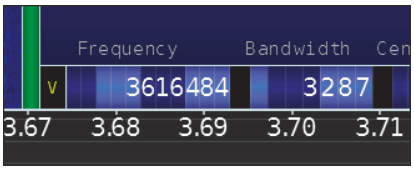


Abbildung 28.6 Einstellung von Frequenz und Bandbreite

Um den Empfang zu verbessern, können Sie auf den SDR-Empfänger auch aus der Ferne zugreifen. So können Sie ihn zusammen mit einem Raspberry Pi betreiben und per Netzwerk/Internet darauf zugreifen. Platzieren Sie das Gespann dort, wo Sie bes-

sere Antennen anbringen können oder wo der Empfang störungsfrei funktioniert, also auf dem Dachboden, im Garten oder gleich abseits der Stadt – kurzum, überall dort, wo Sie ein Netzwerk/Internet nutzen können und Strom zur Verfügung steht.

Haben Sie keine Angst vor dem Raspberry Pi! Den kleinen Linux-Rechner können Sie einfach installieren. Hierzu stellt der Gerätehersteller des SDRplay RSP2 eine eigene Abbilddatei (Image-Datei) für die SD-Karte bereit, in der die gesamte Empfangssoftware ebenso vorinstalliert ist. Hierzu gehört u. a. ein DAB+-Empfänger. Das Image finden Sie unter *https://www.sdrplay.com/community/viewtopic.php?f=6&t=4135*, beachten Sie aber bitte, dass es nur für den Raspberry Pi 3 getestet wurde.

Soll der Raspberry Pi den Empfänger für den Netzwerkzugriff anbieten, müssen Sie darauf den SOAPY-Dienst starten (siehe Abbildung 28.7). Dazu melden Sie sich per SSH auf dem Gerät an (Windows-Benutzer verwenden hierfür `putty`) und starten den Dienst mit diesem Befehl:

```
SoapySDRServer --bind
```

Damit Sie sich anmelden können, benötigen Sie die IP-Adresse, den Benutzernamen (hier: `pi`) und das Kennwort.

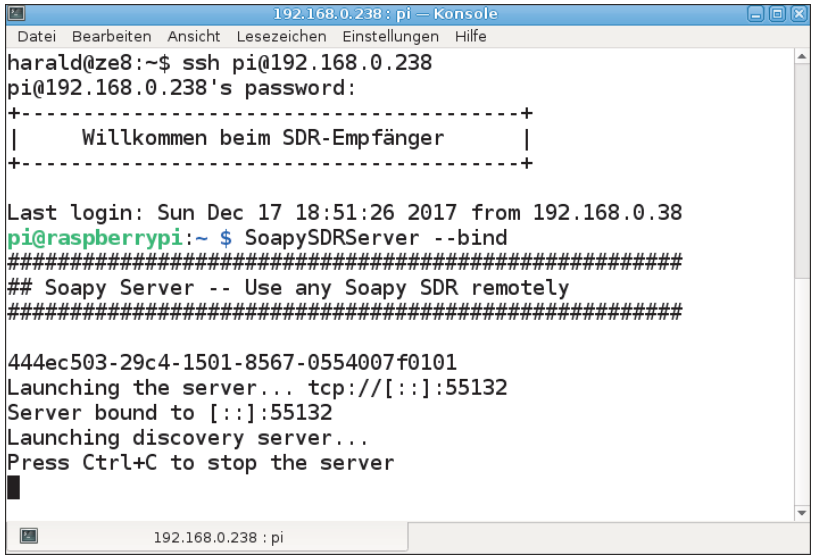


Abbildung 28.7 Anmeldung am Raspberry Pi und Start des SDR-Servers

Die Verbindung wird im gleichen Menü aufgebaut, nur eben mit den Netzwerkparametern (siehe Abbildung 28.8). Dabei benötigen Sie auch die Portnummer, die Sie der Zeile `Server bound to ...` entnehmen.

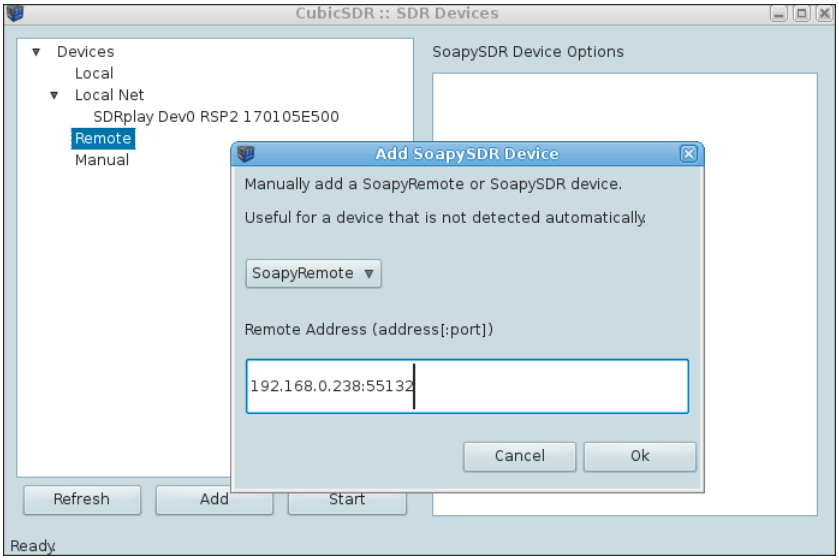


Abbildung 28.8 Verbindung per Netzwerk

Zusammen mit dem Raspberry Pi und einem passenden Touch-Display können Sie aus dem SDR-Empfänger ein schickes Kofferradio machen (siehe Abbildung 28.9).



Abbildung 28.9 »Kofferradio«

Sie müssen hier nur noch das Steckernetzteil, das alle Komponenten versorgt, sowie Computerlautsprecher und die Antenne anschließen – fertig ist das Superradio! Der »Koffer« besteht aus einem normalen CD/DVD-Aufbewahrungskoffer. Damit das Display aufliegt, wurden zwei kleine Vierkantlattenstücke eingeschraubt. Die Kofferöffnung passt optimal zu dem verwendeten 7-Zoll-Display. An den herausgeführten Antennenanschluss wurde eine »Scannerantenne« mit SMA-Stecker angeschlossen. Eine Funktastatur ermöglicht auch die Fernbedienung, solange man das Display ablesen kann.



Downloads für den SDRPlay-Empfänger

Downloads für den SDRPlay-Empfänger finden Sie unter:

https://www.sdrplay.com

Mit dem `gnuradio-companion` können Sie mit Ihrem SDR-Empfänger weitere interessante und umfangreiche Experimente durchführen. Die Beschäftigung damit macht Sie zum Empfängerprofi.

Kapitel 29
Die Amateurfunkprüfung

29.1 Wo wird eine Amateurfunkprüfung abgelegt?

Die Amateurfunkprüfung wird in den Räumlichkeiten der Bundesnetzagentur (BNetzA) abgelegt. Es gibt über das ganze Bundesgebiet verteilt, an ausgewählten Standorten der BNetzA, Termine für die Prüfungen, zu denen Sie sich anmelden können. Eine aktuelle Liste der Termine finden Sie mithilfe der Stichworte »Bundesnetzagentur Termine Amateurfunkprüfung« mit einer Suchmaschine im Internet.

29.2 Anmeldung zu einer Amateurfunkprüfung

Das jeweilige aktuelle PDF, das die BNetzA zu den aktuellen Terminen der nächsten Amateurfunkprüfungen veröffentlicht, enthält die Kontaktdaten für die Anmeldung zur Prüfung. Sie können auf diesem Weg via Post, Telefon oder E-Mail die Zulassung zur Teilnahme an der Amateurfunkprüfung beantragen. Melden Sie sich mindestens 6 Wochen vor dem gewünschten Prüfungstermin an. Die Bundesnetzagentur sendet Ihnen nach der Zulassung eine Zahlungsaufforderung zu. Sie müssen für die Prüfung schon vorher bezahlen.

29.3 Der Ablauf der Amateurfunkprüfung

Am Tag der Amateurfunkprüfung finden Sie sich rechtzeitig am Standort der Bundesnetzagentur ein. Bringen Sie Ihren Personalausweis mit! Genaue Angaben zum Standort, zum Raum und zur Uhrzeit wurden Ihnen bis zu diesem Zeitpunkt schon von der Bundesnetzagentur zugesendet.

Für die Prüfung haben Sie insgesamt drei Stunden Zeit, und sie unterteilt sich in die Themenblöcke »Technik«, »Betrieb« und »Vorschriften«. Die einzelnen Teile können sich im Umfang unterscheiden, je nachdem, zu welcher Amateurfunkklasse Sie die Prüfung ablegen. Die jeweilige Bearbeitungszeit liegt bei 60 Minuten.

Die Fragen in der Prüfung sind ausschließlich die Fragen, die Sie in den offiziellen und momentan aktuellen Fragenkatalogen der Bundesnetzagentur finden. Lediglich die Reihenfolge der Antworten wird verändert. Die aktuellen Fragenkataloge sind immer

auf der Website der Bundesnetzagentur zu finden. Die Einstiegsseite, für die Fragenkataloge und alle anderen relevanten Veröffentlichungen der Behörde, befindet sich auf der Webseite unter: Fachthemen • Telekommunikation • Funk und Frequenzen • Spezielle Anwendungen • Amateurfunk

Da Webseiten ständig Änderungen unterliegen, kann die Einstiegsseite zum Amateurfunk sich verändern. Nutzen Sie in diesem Fall das Suchfeld der Webseite.

Zugelassen zur Prüfung sind nur ein nicht programmierbarer Taschenrechner, ein paar Stifte und ein leeres Blatt Papier, das als Schmierzettel genutzt werden kann.

Nachdem Sie alle Fragen beantwortet haben, können Sie sich in den Warteraum begeben. Sollten Sie bestanden haben, wird ihnen dies vor Ort mitgeteilt, sobald alle Prüflinge die Prüfung abgelegt haben und die Fragebögen ausgewertet wurden. In diesem Fall werden Sie im Nachgang zur Prüfung gefragt, welches Rufzeichen Sie in Zukunft führen möchten. Sollten Sie nicht bestanden haben, können Sie sich mitteilen lassen, welche Teile der Prüfung nicht ausgereicht haben, und sich auch gegebenenfalls gleich zu einem neuen Prüfungstermin anmelden. Bei dem neuen Prüfungstermin müssen Sie dann nur den Teil der Prüfung wiederholen, den Sie bislang nicht bestanden haben.

Direkt nach der erfolgreichen Prüfung erhalten Sie noch vor Ort das Amateurfunkzeugnis, das das Bestehen der Prüfung der gewählten Amateurfunkklasse bescheinigt. Nun sind Sie bereits Funkamateur, dürfen aber den Sendebetrieb noch nicht aufnehmen, weil dieses Dokument noch kein Rufzeichen zuweist. Wenige Tage nach der Prüfung erhalten Sie als neuer Funkamateur oder neue Funkamateurin auf dem Postweg die »Zulassung zur Teilnahme am Amateurfunkdienst« und bekommen gleichzeitig ein personengebundenes Amateurfunkzeichen zugeteilt. Damit dürfen Sie nun den Funkbetrieb aufnehmen!



Die Amateurfunkklassen A, E und N

In Deutschland, wie auch in vielen anderen Ländern, gibt es mehrere Amateurfunkklassen. Deshalb werden Amateurfunkzeugnisse in die Klassen A, E und N eingeteilt. Die Klassen unterschieden sich in Ihren Möglichkeiten und dem Schwierigkeitsgrad. Die Klasse N, die ab Juni 2024 in Kraft tritt, gilt dann als einfache Einstiegsklasse. Weiter Informationen dazu finden Sie unter:

https://www.funklizenz.de/info-klasse-n/index.html

Wo genau die Unterschiede liegen und welche Klasse zu Ihnen passt, können Sie in der Amateurfunkverordnung nachlesen und anhand der Fragenkataloge eruieren. Wichtig ist zu wissen, dass Sie nicht gleich die schwierigste Klasse A absolvieren müssen, sondern sich langsam hocharbeiten können.

Kapitel 30
Nach bestandener Prüfung – Stationsaufbau

Sie haben die Amateurfunkprüfung bestanden! Herzlich Glückwunsch! In diesem Kapitel geht es nun darum, wie Sie sich Ihre ganz eigene Station aufbauen. Die Größe und der Geräteumfang Ihrer eigenen Funkstation ergeben sich aus Ihren persönlichen Vorstellungen und Möglichkeiten:

- Wie viel möchten bzw. können Sie ausgeben?
- Wie viel und welchen Platz haben Sie in Ihrer Wohnung?
- Ist die Installation von Außenantennen möglich?

30.1 Funkgeräte – Typenkunde

Sie werden im Funkalltag auf unterschiedliche Typen von Funkgeräten stoßen. Hier finden Sie eine Auswahl.

30.1.1 Handfunksprechgeräte

Ein Handfunkgerät wird über seinen Akku betrieben, kann aber auch an eine externe Spannungsversorgung angeschlossen werden. Handfunkgeräte sind klein und handlich und benötigen wenig Platz. Sie können überall betrieben werden. Diese Geräte decken vor allem das 2-m-Band und/oder das 70-cm-Band ab. Alle beherrschen FM. Bei den digitalen Sendearten bestehen Unterschiede: C4FM (nur Yaesu), D-Star (meist ICOM) und DMR (mehrere Hersteller) bieten oftmals eine unterschiedliche Handhabung und auch Übertragungsqualität.

Das Zubehör kann den Nutzen eines Handfunksprechgeräts aufwerten. Tabelle 30.1 zeigt Ihnen eine Übersicht mit den entsprechenden Bildhinweisen. Einige der Teile gehören zur Serienausstattung, anderes ist Sonderzubehör.

Dargestellt wird dies anhand des Yaesu FT-60.

Teil	Verwendung	Abbildung
Gürtelklemme am Akku	Dient zum Anklemmen an der Kleidung, aber auch an einem stabilen Winkel an einer Grundplatte für den stationären Einsatz mit Handmikrofon.	Abbildung 30.1
Leistungsfähigere Antenne	Die meist längeren Antennen verbessern deutlich die Reichweite. Achten Sie bitte auf den Typ der Antennenbuchse! Im Bild gezeigt ist die *Diamond RH771*.	Abbildung 30.2
Batteriekasten	nicht für alle Geräte verfügbar	
KFZ-Stromanschluss	für den Anschluss im Kraftwagen oder an ein Netzteil, meist mit HF-Filter	
Handmikrofon	für bequemen Funkbetrieb (Gerät im Rucksack, Mikro an Jacke) oder für den Stationärbetrieb	Abbildung 30.3
Bluetooth-Freisprech-einrichtung	darf im KFZ-Betrieb verwendet werden	–

Tabelle 30.1 Zubehör für Handfunksprechgeräte



Abbildung 30.1 Gürtelklemme



Abbildung 30.2 Übersicht über das Zubehör



Abbildung 30.3 Handmikrofon an Funkgerät

Handfunksprechgeräte geben meist eine maximale Leistung von 5 Watt ab. Mit direkt angesteckten Antennen haben Sie bezüglich der BEMV-Selbsterklärung keine Probleme, beim stationären Betrieb hingegen können die 10 Watt EIRP schnell überschritten werden. Dann müssen Sie sich trotzdem an die Arbeit machen.

30.1.2 Portabelfunkgeräte

Portabelfunkgeräte sind wie die Handfunkgeräte auch tragbar, aber auch im KFZ oder zu Hause einsetzbar. Sie verfügen meist über einen Akkumulator zur Stromversorgung und können mit einer externen Stromversorgung gespeist werden. Die meisten dieser Geräte decken den Kurzwellenbereich ganz oder teilweise ab. Zudem bieten einige Modelle die Kommunikation auf dem 2 m- und 70 cm-Band. Damit ist dieser Gerätetyp auch für Camping, Fieldday, Bootseinsatz usw. ideal. Die maximale Ausgangsleistung dieser Geräte liegt zwischen 5 und 10 Watt.

Diese Geräte verfügen in der Regel über sehr empfindliche Empfänger. Es sollen ja auch bei Behelfsantennen brauchbare Empfangsleistungen erzielt werden. Dies führt bei manchen Modellen an langen Drähten oder Kurzwellenrichtantennen regelmäßig zu Übersteuerungen, die aber durch das Betätigen des Abschwächers und das Abschalten der Vorverstärkung meist beseitigt werden.

Zu Hause können Sie diese Geräte problemlos verwenden. Es genügt ein relativ kleines Netzteil für die Stromversorgung. Befestigen Sie das Gerät in einer entsprechenden Halterung, damit es nicht durch Zug am Handmikrofon »über den Tisch« gezogen wird. Wenn mehr Sendeleistung gefordert wird, kann diese durch einen externen Leistungsverstärker geliefert werden.

Für den Einsatz unterwegs werden diverse Tragetaschen, Schutzrahmen und Funkrucksäcke angeboten. Darin sind Gerät und Zubehör geschützt untergebracht. Von der Firma ICOM stammt das Portabelgerät IC-705. Neben dem Kurzwellenbereich bietet es auch den Betrieb auf dem 2 m- und 70 cm-Band in SSB, CW und FM sowie RTTY und verschiedenen Daten-Modi. Auch UKW-Rundfunkempfang ist möglich.

Im Akkubetrieb werden 5 Watt Sendeleistung erreicht, an einer externen Stromversorgung 10 Watt. Durch das Wasserfalldiagramm und die vielen Einstellungsmöglichkeiten bietet das Gerät alles, was man auch von einem modernen Stationsgerät kennt. Allerdings ist alles kleiner und kompakter. Abbildung 30.4 zeigt das Gerät von vorne, Abbildung 30.5 seitlich, jeweils im Schutz- und Tragerahmen Windcamp ARK-705, der das Gerät schützt und die Handhabung unterwegs erleichtert. Er ist als Zubehör extra erhältlich.



Abbildung 30.4 Die Bedienseite des IC-705



Abbildung 30.5 IC-705 mit Windcamp ARK-705 in der Seitenansicht

Ein neues Gerätekonzept stammt von Gerätehersteller *Yaesu*. Als reines Portabelgerät mit der Bezeichnung FTX-1F Field bietet es Funkbetrieb in AM, SSB, FM, CW und C4FM und weiteren digitalen Übertragungsarten auf den Kurzwellenamateurfunkbändern, sowie dem 6 m-, 2 m- und dem 70 cm-Band. Im Akkubetrieb sendet das Funkgerät mit 6 Watt, mit externer Stromversorgung mit 10 Watt.

Mit der Bezeichnung FTX-1F Optima erhält man das gleiche Gerät, aber zusammen mit einer Geräteaufnahme, das einen Sendeverstärker enthält. Damit verfügen Sie über ein Stationsgerät, aus dem Sie dann für unterwegs das FTX-1 entnehmen.

Auf die Vorgänger dieser Geräte treffen Sie häufig (Yaesu FT-817ND, FT-818). Sie bieten 5 Watt Ausgangsleistung auf allen Bändern in AM, SSB, CW und FM. Vielfach werden Gebrauchtgeräte mit viel Zubehör wie Tasche oder Halterung angeboten. Abbildung 30.6 zeigt ein FT-817ND.



Abbildung 30.6 Ein Yaesu FT-817ND im Größenvergleich mit einem kleinen Werkzeughandkoffer

30.1.3 Mobilgerät, im Kraftwagen, portabel und als Feststation

Mobilfunkgeräte gibt es als Monobander für das 2-m-Band und für das 70-cm-Band. Ebenso verbreitet sind Zweibandausführungen. Auch mit dem Kurzwellenbereich ausgestattete Modelle sind im Handel erhältlich.

Allen Typen gemeinsam ist die höhere Senderausgangsleistung. Darüber hinaus muss in jedem Fall eine externe Antenne angeschlossen werden. Alle benötigen eine Stromversorgung mit 12 Volt Gleichspannung. In der Bedienung gibt es große Unterschiede: Vom spartanisch ausgestatteten Gerät, das es in ähnlicher Form als Betriebsfunkgerät zu kaufen gibt, bis hin zu mehrfarbigem Touchscreen und Bluetooth-Freisprecheinrichtung wird für jeden Geschmack etwas geboten.

Besonders beim Fahrzeugeinbau ist ein Frontlautsprecher vorteilhaft. Sie sparen sich damit die Anschaffung eines Zusatzlautsprechers, wenn sich das Funkgerät (ausgenommen die Frontpartie natürlich) hinter der Innenverkleidung befindet.

So ein Gerät können Sie zu Hause an einem Netzteil und einer Außenantenne betreiben. Man kann es aber auch zusammen mit einem Akku in einen kleinen Koffer einbauen und erhält so einen »Funkkoffer« für viele Einsatzzwecke.

Abbildung 30.7 zeigt Ihnen das Yaesu FTM-7250D. Für den Einsatz zu Hause wurde es mit der umgedrehten Gerätehalterung auf ein Buchenleimholzbrett montiert, das auf seiner Unterseite noch vier Filzfüßchen spendiert bekam.



Abbildung 30.7 Yaesu FTM-7250D

Mobilgeräte haben eine höhere Stromaufnahme als Hand- und Portabelgeräte, auch beim Empfang. Das bedeutet, die Starterbatterie eines Autos kann bei längerem Funkbetrieb im Stand »leergefunkt« werden. Mit einer entsprechenden Zusatzbatterie können Sie dies vermeiden, zumal Starterbatterien für diesen Einsatz nicht konstruiert sind.

30.1.4 Geräte für den stationären Einsatz

Grundsätzlich kann jedes Funkgerät für den stationären Einsatz eingesetzt werden. Während es aber bei den Hand-, Portabel- und Mobilfunkgeräten auch auf die Größe ankommt, haben die Geräte für den stationären Einsatz keine Beschränkungen. Viele Funktionen erreichen Sie bei den »kleinen« Geräten nur über ein Wahlmenü, das zudem mehrere Ebenen aufweisen kann. Beim »Großen« finden Sie die Funktion per Taste, Drehschalter oder -regler übersichtlich auf der Frontplatte.

Hinsichtlich der Stromversorgung gibt es Unterschiede. So finden Sie auch Stationstransceiver, die mit 12 Volt Gleichspannung versorgt werden. Damit *können* diese auch z. B. im Campingfahrzeug betrieben werden. Andere verfügen über ein eingebautes Netzteil, das natürlich genau auf das Gerät abgestimmt ist. Hier nimmt mancher Gerätehersteller die Möglichkeit wahr, besonders die Senderendstufe mit einer höheren Spannung, z. B. 48 Volt, zu betreiben. Da muss die Schaltung weniger Verzerrungen bekämpfen und liefert von Haus aus ein saubereres Signal.

Das Angebot ist groß. Vom SDR-Transceiver, der entweder mittels PC oder über eine Frontplatte mit Touchscreen gesteuert wird, bis hin zum riesigen »Tastengrab« ist alles zu finden.

Stellvertretend für diese Gerätekategorie sehen Sie in Abbildung 30.8 den (älteren) Icom IC-718. Das ist ein einfaches, aber zweckmäßiges Gerät.



Abbildung 30.8 Icom IC-718

30.1.5 Zusammenfassung

Die gezeigten Funkgeräte wurden bewusst ausgewählt, da diese auch in großer Zahl auf dem Gebrauchtgerätemarkt zu finden sind. Im Sinne der Nachhaltigkeit haben Gebrauchtgeräte durchaus ihre Daseinsberechtigung.

Informationen zu der aktuellen Neugeräteauswahl finden Sie auf den Internetseiten der Funkfachhändler und der Gerätehersteller. Sprechen Sie auch mit erfahrenen Funkfreunden über Ihre Geräteideen. Mancher Fehlkauf wird damit vermieden!

Zudem können Sie viele Gerätebewertungen im Internet unter *https://www.eham.net* in der Rubrik PRODUCT REVIEWS lesen (leider nur in englischer Sprache).

Natürlich können Sie auch Bausätze erwerben und Ihr Funkgerät damit selbst anfertigen. Das ist der beste Weg, um mit der Funktechnik vertraut zu werden. Allerdings benötigen Sie entsprechende Messmittel für den Abgleich.

30.1.6 Wichtiges Zubehör: Das Netzteil

Das wohl wichtigste Zubehör einer Funkstation ist die Stromversorgung. Die technischen Grundlagen finden Sie hier in Kapitel 14, »Schaltungskunde: Stromversorgung«. Die typische Nennspannung beträgt 13,8 Volt.

Das Netzteil sollte mehr Strom liefern können, als Ihr Funkgerät aufnimmt. Eine Leistungsreserve von 25 % hat sich in der Praxis bewährt. Es gibt *regelbare Netzteile*, die Sie auch für andere Zwecke einsetzen können, z. B. für Experimente oder Reparaturen. Wenn Sie für Ihr Funkgerät ein regelbares Netzteil verwenden, müssen Sie sehr sorgfältig mit diesem umgehen, erreichen doch die meisten dieser Netzteile Ausgangsspannungen von rund 30 Volt. Damit zerstören Sie ein Funkgerät, da hier üblicherweise 13,8 Volt bzw. 12 Volt als gängige Versorgungsspannung verwendet werden.

Abbildung 30.9 zeigt Ihnen eine kompakte Ausführung dieser auch als *Labornetzteile* bezeichneten Geräte. Einige Modelle speziell für den Funker haben eine geringere Höchstspannung, meist zwischen 13 und 14 Volt, und das Bedienelement für die Spannungsregelung ist nicht so leicht zugänglich.

Festspannungsnetzteile weisen eine unveränderliche Ausgangsspannung auf. Sie sind, als Schaltnetzteil, oft kompakt gestaltet. Manche verfügen über ein Strommessgerät, sodass der Ausgangsstrom überwacht werden kann. Abbildung 30.10 zeigt ein älteres Modell, das aber immer noch gute Dienste verrichtet.

Die heute erhältlichen Netzteile, die im Amateurfunk zur Stromversorgung eingesetzt werden, verfügen oftmals über eine Kurzschlussstrombegrenzung und thermische Abschaltung. Dies bewahrt vor allem das Netzteil selbst vor Überhitzungsschäden bei Überlastung oder vor den Folgen eines Kurzschlusses. Wichtig ist aber trotzdem, Funkgeräte polungsrichtig (rot = +, schwarz = -) mit dem Netzteil zu verbinden. Bei einer Verpolung wird das Funkgerät beschädigt.



Abbildung 30.9 Labornetzteil



Abbildung 30.10 Festspannungsnetzteil

In manche Funkgeräten ist eine antiparallel zur Versorgungsspannung geschaltete Diode eingebaut. Diese verursacht bei einer Falschpolung einen Kurzschluss und lässt in der Folge z. B. die Feinsicherung in der Gerätezuleitung durchbrennen. In diesem Fall bleibt es beim Austausch der Sicherungen, dem Gerät ist dann nichts passiert.

Wenn Sie ganz sichergehen wollen, können Sie einen Brückengleichrichter zwischen den Anschlusskontakten und dem Funkgerät einfügen. Dieser muss mit den auftretenden Stromstärken arbeiten können. Diese »Geräteversicherung« verursacht allerdings einen Spannungsabfall und ist daher höchstens für den Einsatz abseits eines hellen Stationsraums in der Natur für Funkgeräte mit kleiner Sendeleistung geeignet.

30.2 Aufbewahrung und Funkmöbel

Funkgeräte sind empfindliche elektronische Geräte. Deshalb sollten Sie diese nicht dauerhaft starker Staubentwicklung, Küchendunst und Zigarettenqualm aussetzen. Kontakte und Regler werden dadurch geschädigt.

Ein Handfunksprechgerät legen Sie einfach in eine Schublade oder eine kleine Werkzeugkiste – fertig! Stationsgeräte werden durch entsprechende Staubschutzhüllen geschützt, die Sie auch leicht aus Stoff oder Verpackungsmaterial selbst fertigen können. Auch ein umgedrehter Karton bewirkt dasselbe, auch wenn er nicht so schön aussieht.

Falls Sie den Platz haben, ein Möbelstück für den Amateurfunk unterzubringen, dann kann die Station dauerhaft aufgebaut werden. Es genügt ein Tisch oder Schreibtisch. Geeignete Möbelstücke erhalten Sie auch auf dem Gebrauchtmarkt. Zudem sondern große Firmen und Behörden oftmals solche Dinge aus.

Soll der unvermeidliche Kabelsalat dezent untergebracht werden, so hilft ein Kabelkanal, den Sie auf der Wandseite des Tisches anbringen. Schaffen Sie mehrere Öffnungen nach oben, sodass Sie die Kabel leicht einführen können. Auch ein »Oberteil«, das auf dem Tisch steht, kann die Funktechnik aufnehmen. Allerdings sind hier z. B. nach oben aufspringende Klapptüren, aber auch normale, nach der Seite hin zu öffnende Schwenktüren oft störend und schränken Ihre Bewegungsfreiheit ein. Hier bewähren sich Rollläden: Sie ragen nie in den Raum und lassen so allen Platz frei. Wer Möbel selbst baut, bekommt diese im Beschlägehandel. Stöbern Sie auch einmal durch die »Fundgruben« großer Möbelhäuser. Bei den Büro- und Küchenmöbeln stößt man oft auf interessante Stücke.

Abbildung 30.11 zeigt ein sehr schmales Möbelstück aus einem europaweit vertretenen Möbelhaus.



Abbildung 30.11 Funkmöbel

Die Rückwand bekam Aussparungen, damit zum einen die Kabelzuführung geschaffen wurde und zum anderen das Möbelstück mittels zweier Schraubzwingen fest mit dem Tisch verbunden werden konnte. Die Einlegeböden erhielten mit einer Lochsäge einen kreisrunden Ausschnitt, in dem Kabel »zwischen den Etagen« geführt werden können.

Beim Selbstbau eines Funktisches sind Ihnen keine Grenzen gesetzt. Antennen- und Stromversorgungsanschlüsse, Steuergeräte und Anzeigen können Sie hier ganz nach Ihrem Geschmack unterbringen.

30.3 Die Antennenwahl

Welche Stationsantenne(n) Sie verwenden, hängt stark von Ihren persönlichen Möglichkeiten ab. Wenn Sie ein großes Grundstück auf dem Land haben, haben Sie mehr Freiheiten als in einer kleinen Mietwohnung in einem Hochhaus in der Stadt.

Tabelle 30.2 zeigt Ihnen, was Sie *vor* dem Aufbau abklären müssen.

Rechtsstellung	Abklären
Grundstückseigentümer	BEMV, Baurecht, Bebauungsplan, gegebenenfalls Denkmalschutz, Blitzschutz
Wohnungseigentümer	Zustimmung der Miteigentümer, gegebenenfalls Eintrag als Nutzungsrecht in das Grundbuch, BEMV, Baurecht, Bebauungsplan, Denkmalschutz, Blitzschutz
Wohnungsmieter	Zustimmung des Vermieters erforderlich, Antennenvertrag mit Haftungsregeln möglich, BEMV, Baurecht, Bebauungsplan, Denkmalschutz, Blitzschutz

Tabelle 30.2 Vorarbeiten zum Antennenbau

30.3.1 Wenn gar nichts geht ...

Unabhängig davon können Sie immer eine kleine, unauffällige Antenne, z. B. eine *Diamond X-30* oder analog eine Kfz-Funkantenne für das 2-m- und 70-cm-Band am Balkon oder an ähnlicher Stelle anbringen. Mit Kurzwellenantennen ist das schwieriger. Sogenannte *magnetische Antennen* sollten wegen des starken Nahfeldes außerhalb der Wohnräume betrieben werden. Vielleicht können Sie ja, falls der Dachboden nicht ausgebaut ist, wenigstens dort eine Antenne unterbringen. Natürlich sind dann keine weltumspannenden Verbindungen möglich, aber mitmischen können Sie trotzdem.

Bleibt noch der Mobil- und Portabelbetrieb. Dort brauchen Sie Antennen, die gegebenenfalls leicht und schnell auf- und abzubauen sind. Es reicht aber schon aus, im Kleingarten einen Fahnenmast zu haben. Damit können Sie schon eine Kurzwellendrahtantenne spannen, die wenigstens die Bänder 20 m bis 10 m abdecken kann.

30.3.2 Was nehmen?

Kurzwellenrichtantennen benötigen einen stabilen Mast mit entsprechendem Fundament oder einem tragfähigen Gebäude. Nicht das Gewicht ist hier der entscheidende Faktor, sondern die Windlast: Die komplette Konstruktion muss auch starken Stürmen ohne Schaden standhalten können.

Im Funkfachhandel werden *Gittermasten* angeboten, die per Seilwinde einfahrbar sind. Dies erleichtert Montage und Wartung, aber ist auch bei Sturm eine Möglichkeit, die Schadensgefahr zu verringern. Einige Modelle haben einen feststehenden Mast, auf dem ein Schiebeschlitten per Seilwinde geführt wird. Dies ist ebenso eine gute Alternative. In jedem Fall erspart man sich mit solchen Masten teilweise gefährliche Klettereien, und man braucht beim Aufbau und bei der Wartung oftmals keinen zweiten Helfer.

Deutlich weniger Aufwand verursachen *Drahtantennen*. Sie sind leicht und oft relativ unsichtbar. Bei waagrechter Spannrichtung sollten diese Antennen so hoch wie möglich angebracht werden. Im günstigsten Fall können Sie Ihre Antenne zwischen dem Haus und einem Mast spannen. Allerdings sollten Sie hier an Dachlawinen denken, die eben nicht auf den Antennendraht fallen dürfen. Sie können Drahtantennen auch als »Inverted V« auf einen Mast spannen.

Drahtdipole werden in der Mitte gespeist. Hier zieht das Speisekabel die Konstruktion entsprechend nach unten. Außermittig gespeiste Drahtantennen wie die FD-4 haben hier Vorteile. Endgespeiste Drahtantennen (Fuchskreis, HyEndFed) werden mit der Speisung an einem Ende befestigt; hier treten die Zuglasten des Koaxialkabels in der Regel nicht auf.

Magnetische Ringantennen haben in Bezug zur Wellenlänge einen kleinen Durchmesser. Nur weisen sie im Nahfeld eine hohe Energiedichte auf. Auf einen kleinen, stabilen Mast oder auch auf dem Hausdach/Dachboden mit genügend Abstand montiert, kann diese Antennenform Ihnen zu vielen QSOs verhelfen. Sie müssen aber wissen, dass Sie stets selbst innerhalb eines Bandes per Fernbedienung die Antenne in Resonanz bringen müssen. Dafür wird aber der Empfänger Ihres Funkgeräts durch die hohe Vorselektion entlastet.

Vertikalstrahler lassen sich auf Hausdächern und Masten gleichfalls anbringen. Auch hier spielt die Windlast eine Rolle. Stark verkürzte »Wunderantennen« ermöglichen zwar das eine oder andere QSO, aber Sie werden damit wohl nicht so zufrieden sein. Vertikalstrahler in Viertelwellentechnik benötigen zudem eine Abspannmöglichkeit für Radiale.

Auf den VHF- und UHF-Bändern haben Sie weniger Platzprobleme. Für FM- und Digitalsprechfunk benutzen Sie *vertikal polarisierte Antennen*. Da genügt schon eine Diamond X-30 oder X-50 (siehe Abbildung 30.12) mit noch sehr geringen Abmessungen.

Rundstrahlantennen mit horizontaler Ausrichtung gibt es ebenso. Hierzu gehören das »Big Wheel«, aber auch die VGR-Antenne nach DF6SJ. Beide Antennentypen sind Monoband-Antennen. Sie benötigen also, wenn Sie auf 2 m und 70 cm senden möchten, für jedes Band eine Antenne. Die VGR-Antenne für 145 MHz weist einen Gewinn von 11 dBi bei 2 m Aufbauhöhe auf, für das 70-cm-Band beträgt die Höhe 80 cm.



Abbildung 30.12 X-50 in Dachbodenmontage

Richtantennen für den VHF- und UHF-Bereich benötigen einen Rotor, mit dem Sie die optimale Richtung zum Funkpartner einstellen. Eine »Antenne für alles« ist die logarithmisch-periodische Antenne (siehe Abbildung 30.13).



Abbildung 30.13 LP145435E von Anjo (LPDA-Antenne)

Diese breitbandigen Antennen können Sie leicht anhand der Angaben in der Antennenfachliteratur selbst bauen. In Deutschland baut die Firma Anjo (*http://www.joachims-gmbh.de/*) solche Antennen. Eine kurze Ausführung, die den Bereich vom 2-m-Band bis zum 70-cm-Band abdeckt, weist rund 7 dBi Gewinn auf, das Tragrohr ist knapp einen halben Meter lang. Ansonsten können Sie auch mit einer verschachtelten Yagi-Antenne arbeiten, die diese zwei Bänder abdeckt, z. B. die *Eantenna Dualband Yagi 144/432 MHz*. In allen anderen Fällen benötigen Sie für jedes Band eine Antenne.

30.3.3 Zuleitungen

Verwenden Sie möglichst dämpfungsarme Antennenkabel. Führen Sie diese in Kabelkanälen oder Leerrohren. Antennenkabel dürfen nicht zusammen mit Netzspannung führenden Leitungen in einem gemeinsamen Kanal geführt werden! Das Befestigen mit Nagelschellen darf nicht zur Verformung des Kabels führen! Wenn wenig »Trassenbreite« zur Verfügung steht, können Sie mit einem ferngesteuerten Antennenumschalter arbeiten. Im Funkraum steht dabei das Bediengerät, in der Nähe der Antennen kommt die (einzige) Zuleitung vom Funkraum zum Fernschalter. Dieser benötigt zusätzlich die Schaltleitung, die bei kürzeren Entfernungen durch ein Netzwerkkabel realisiert wird. Möchten Sie nur zwei Antennen umschalten, genügt ein entsprechendes Koaxialrelais, das mittels Zweidrahtleitung (ein/aus) gesteuert wird.

Alternativ setzen Sie ein modernes, fernsteuerbares (SDR-)Funkgerät ein, das im besten Fall mehrere Antennenanschlüsse hat. Es benötigt nur eine Netzwerkverbindung, gegebenenfalls mittels Glasfaser, und eine Stromversorgung. Im Funkraum steht entweder ein gerätespezifisches Fernbedienteil, oder die Software auf Ihrem Rechner übernimmt die Fernsteuerung. Auch damit sparen Sie viele Meter Koaxialkabel ein – und damit auch Signaldämpfung, besonders im VHF/UHF-Bereich.

30.4 Musteraufbau – die BEMV-Erklärung

In diesem Abschnitt geht es um den Aufbau einer kleinen Station für das 2-m- und 70-cm-Band. Der Schwerpunkt liegt auf der Erstellung der BEMV-Selbsterklärung.



Aufbau der Station

- **Gerät**: *Yaesu FTM-7250D*, Sendeausgangsleistung dreistufig: 5 W, 25 W und 50 W (für 2 m und 70 cm)
- **Antennenkabel**: *H 2000Flex*, Dämpfung je 100 m: 4,80 dB (2 m) und 8,50 dB (70 cm), Länge: 10 m

- **Antenne**: *Diamond X-50N*, Gewinn 2 m: 4,5 dBd; 70 cm: 7,2 dBd, Fußpunkt 7 m Höhe
- **Steckverbindungen**: Antenne auf Kabel: 1, Kabel auf Adapter (N-PL) 1, Adapter auf Funkgerät: 1; insgesamt: 3

Die BEMV-Selbsterklärung wird für das Beispiel mit dem Programm *Wattwächter* der Bundesnetzagentur (*https://www.bundesnetzagentur.de/*) erstellt. Wenn Sie Mitglied im DARC sind, können Sie *Watt32* verwenden. Dieses Programm bietet einige weitere Möglichkeiten, läuft allerdings nur unter Microsoft Windows. Wattwächter ist ein Java-Programm und damit plattformunabhängig.

Beim Programmstart können Sie zunächst zwischen zwei Modi (ASSISTENT oder ERWEITERTER MODUS) wählen. Für das Beispiel wurde ERWEITERTER MODUS gewählt (siehe Abbildung 30.14).



Abbildung 30.14 Der Begrüßungsbildschirm von Wattwächter

Anschließend gelangen Sie in die Arbeitsblattansicht (siehe Abbildung 30.15). Beginnen Sie in der Spalte A. Klicken Sie in das leere Feld ANTENNE.

Sie können nun Ihre Antenne und deren Betriebsfrequenz auswählen (siehe Abbildung 30.16). Bei Mehrbandbetrieb wird je Funkband eine Spalte im Arbeitsblatt belegt. Sie füllen stets eine Spalte vollständig aus. Mit Klick auf OK gelangen Sie zu den geometrischen Gegebenheiten Ihrer Antenne (siehe Abbildung 30.17).

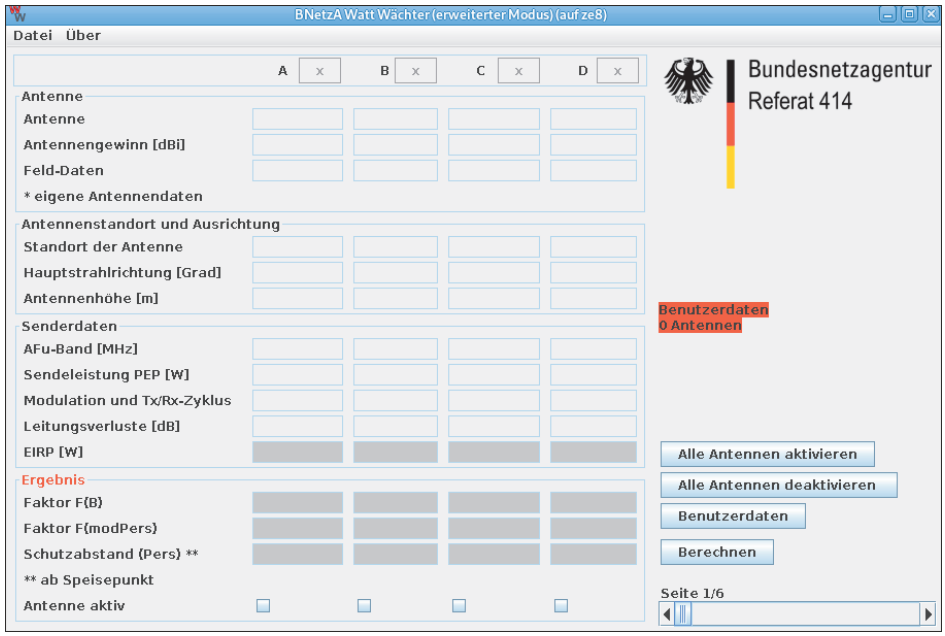


Abbildung 30.15 Arbeitsblattansicht

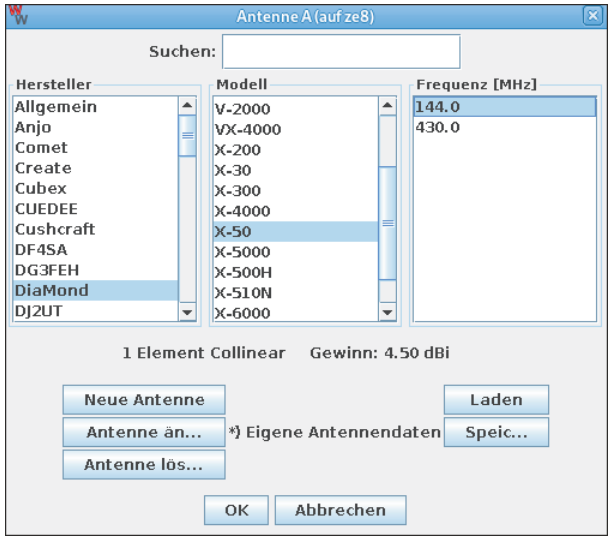


Abbildung 30.16 Auswahl von Antenne und Betriebsfrequenz

Wichtig ist die HÖHE ÜBER BODEN. Diese muss in jedem Fall eingetragen werden, außer der Strahler ist direkt, ohne Masten, am Erdboden befestigt. Die Höhe bemisst sich aus der Strecke zwischen dem Erdboden und dem ersten erreichbaren Teil der Antenne.

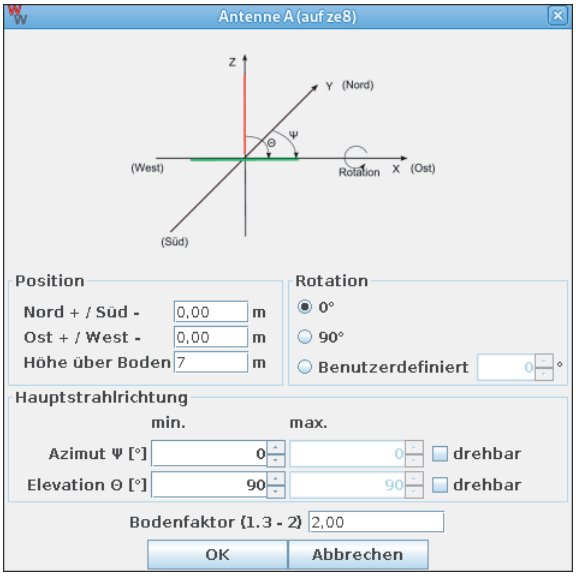


Abbildung 30.17 Eintragung der Höhe der Antenne

Wenn Sie die Höhe und gegebenenfalls weitere Daten eingegeben haben, klicken Sie auf OK, um in das Menü für die Sendeart, die Zyklenbeschaffenheit und die Sendeleistung zu gelangen (siehe Abbildung 30.18). Nehmen Sie am Anfang das maximal Mögliche an. Sie wählen ALLE BETRIEBSARTEN, TX6-RX0 und tragen die Leistung ein.

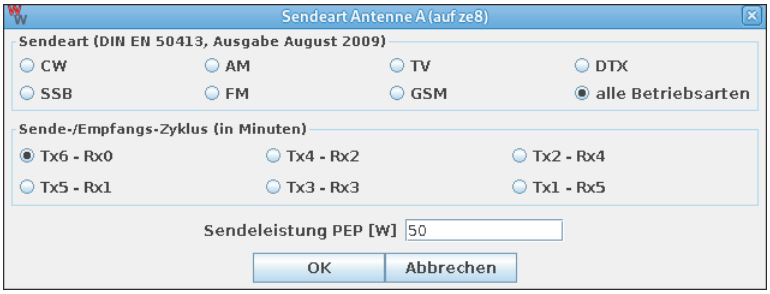


Abbildung 30.18 Eintrag der Betriebsarten, der Sende-/Empfangs-Zyklen und der Sendeleistung

Wenn Sie ALLE BETRIEBSARTEN wählen, brauchen Sie später auf neu hinzugekommene Betriebsarten keine Rücksicht zu nehmen. Bei den Sende-/Empfangs-Zyklen können Sie auch ein »günstigeres« Verhältnis wählen, denn niemand sendet ununterbrochen. »Halbe-halbe« ist für Normalfunker sicher der richtige Ansatz.

Nach dem Bestätigen der Einträge mit OK geben Sie nun den Kabeltyp, die genutzte Länge und gegebenenfalls die zusätzliche Dämpfung an. Je Steckverbindung können Sie 0,1 dB ansetzen (siehe Abbildung 30.19).

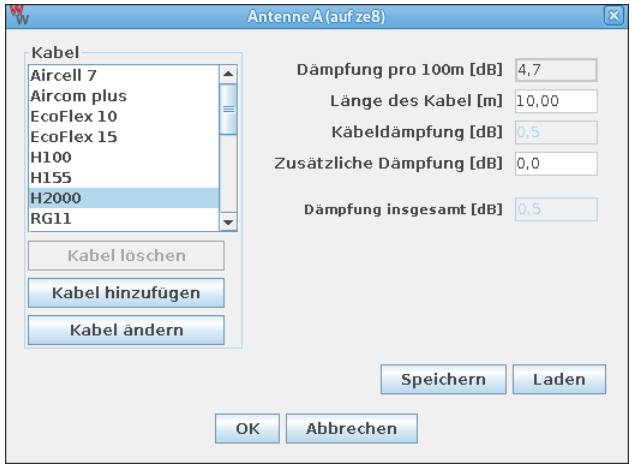


Abbildung 30.19 Angaben zum Antennenkabel

Nach Bestätigung mit OK gelangen Sie zum Arbeitsblatt zurück (siehe Abbildung 30.20). Setzen Sie den Haken unten bei ANTENNE AKTIV.

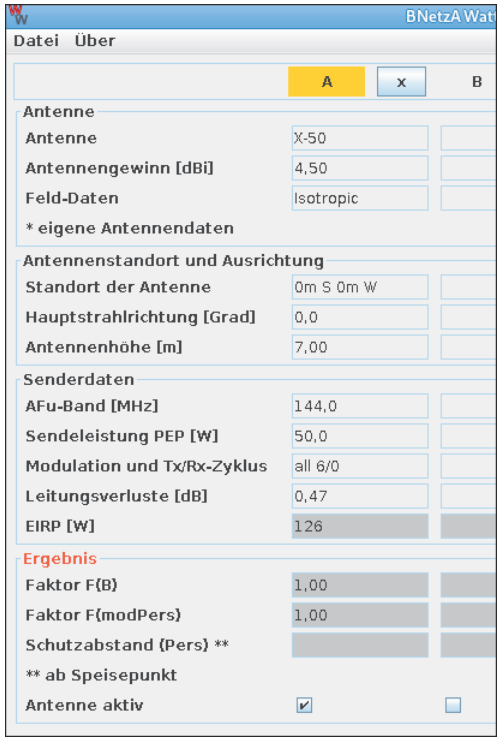


Abbildung 30.20 Spalte A ist schon mal ausgefüllt ...

Beginnen Sie nun, Spalte B auszufüllen. Wählen Sie bei der Antenne allerdings das noch nicht angegebene Band, hier 435 MHz. Betrachten Sie nochmals Abbildung 30.17. Bei POSITION geben Sie ebenso nur die HÖHE ÜBER BODEN ein. Wenn Sie aber eine zweite Antenne eintragen möchten, geben Sie deren Position ein. Dabei wird als Ausgang die erste eingetragene Antenne aus Spalte A herangezogen. Wie in einem Koordinatensystem müssen Sie das erste erreichbare Teil der Antenne bestimmen.

Wenn Sie das Beispiel für das 70-cm-Band eingegeben haben, landen Sie wieder im ausgefüllten Arbeitsblatt. Setzen Sie hier wieder den Haken bei ANTENNE AKTIV (siehe Abbildung 30.21).

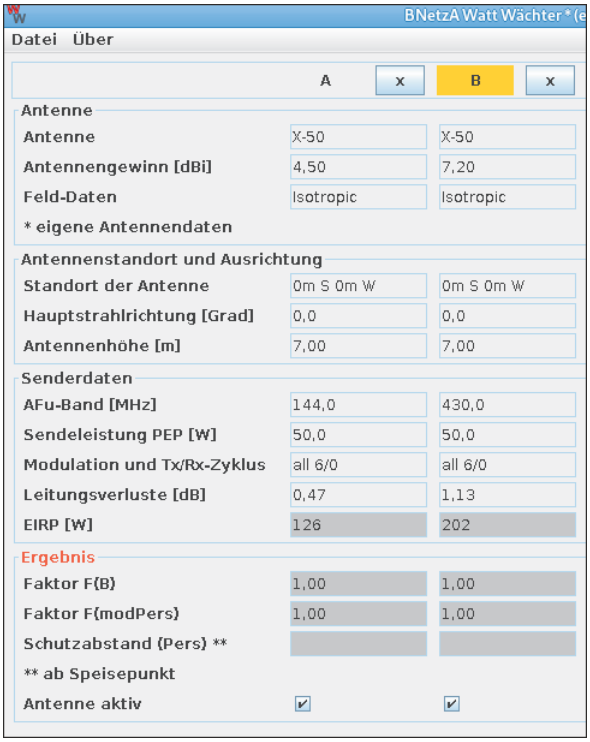


Abbildung 30.21 Ausgefülltes Arbeitsblatt

Klicken Sie nun auf BENUTZERDATEN, um Ihre Anschriftsdaten zu erfassen (siehe Abbildung 30.22).

Nachdem Sie bei den Benutzerdaten auf OK geklickt haben, können Sie die Konfiguration berechnen lassen. Klicken Sie auf BERECHNEN. Für die Standardberechnung des Schutzabstands klicken Sie hier wiederum nur auf BERECHNEN (siehe Abbildung 30.23).

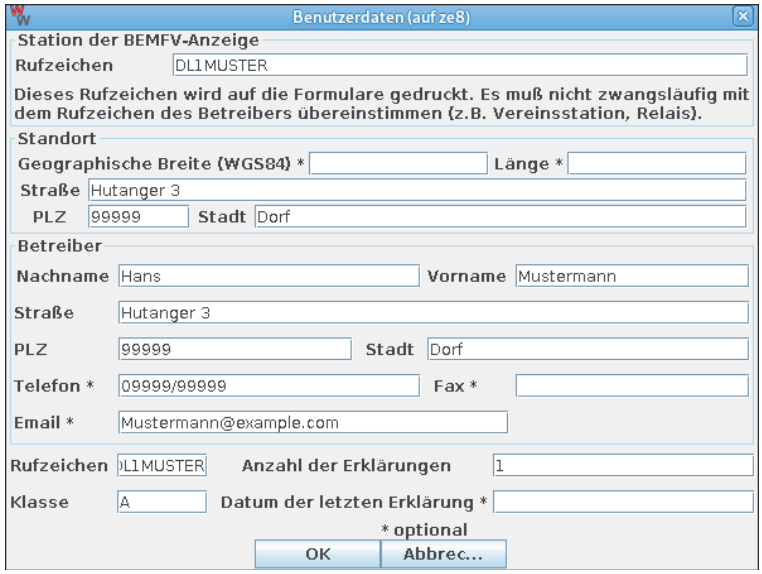


Abbildung 30.22 Eingabe der Benutzerdaten

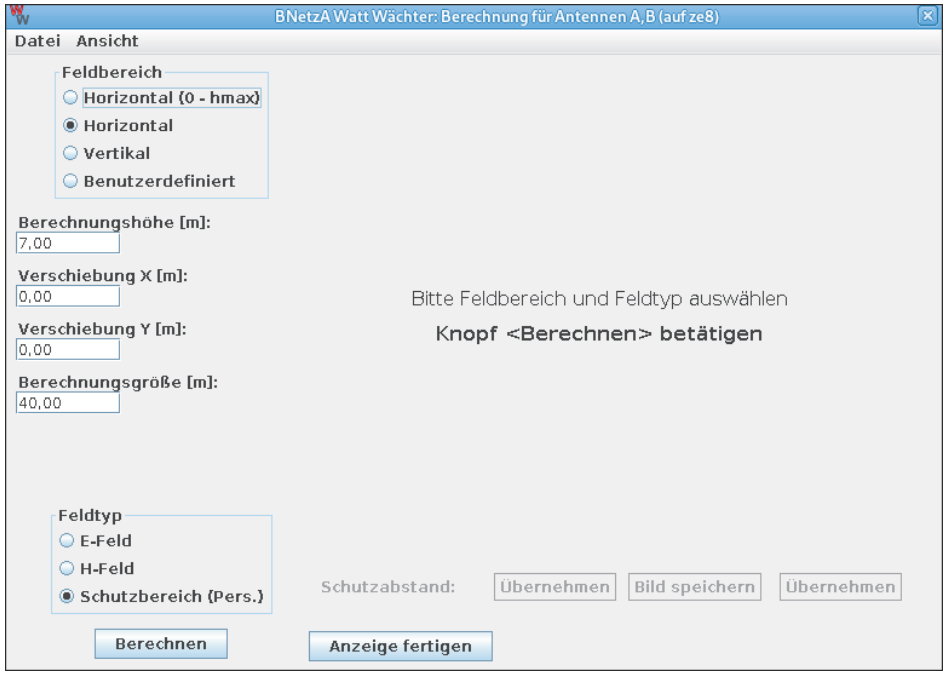


Abbildung 30.23 Schritt 1 der Berechnungen

In Abbildung 30.24 finden Sie das Ergebnis. Wenn Sie damit hinsichtlich des Schutzbereichs klarkommen, klicken Sie auf ANZEIGE FERTIGEN.

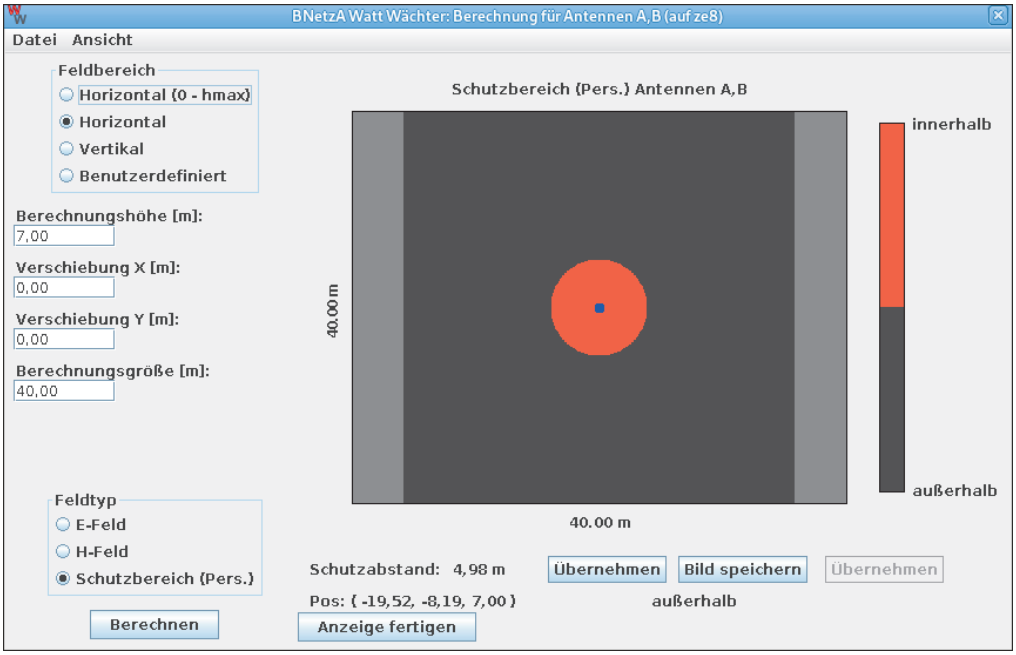


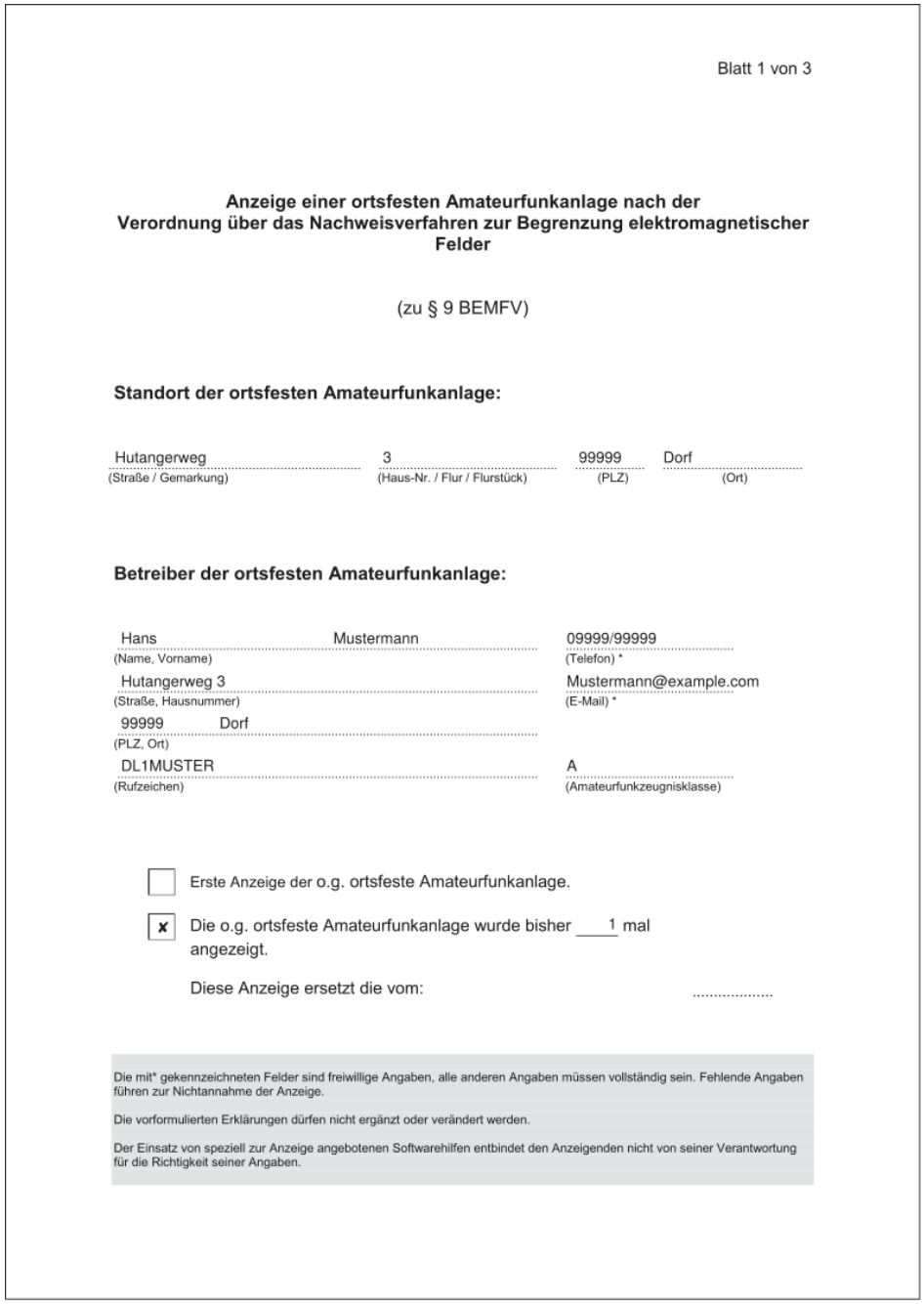
Abbildung 30.24 Ergebnis der Berechnungen

Sie werden noch nach dem Zielverzeichnis gefragt. Darin finden Sie dann die Ergebnisdateien:

- *DL1MUSTER_2020-03-15_2C65DE152CD6B132.xml*
- *DL1MUSTER_Anzeige.pdf*
- *DL1MUSTER_Konfiguration.pdf*

Die XML-Datei kann gegebenenfalls von der Bundesnetzagentur angefordert werden, damit die Eintragung in die EMV-Datenbank mit Ihren Daten erfolgen kann.

Den Inhalt der PDF-Datei *DL1MUSTER_ Anzeige.pdf* zeigen Abbildung 30.25, Abbildung 30.26 und Abbildung 30.27. Die Datei enthält die Anzeige einer ortsfesten Amateurfunkanlage und die entsprechenden Erklärungen.



Blatt 1 von 3

Anzeige einer ortsfesten Amateurfunkanlage nach der Verordnung über das Nachweisverfahren zur Begrenzung elektromagnetischer Felder

(zu § 9 BEMFV)

Standort der ortsfesten Amateurfunkanlage:

Hutangerweg	3	99999	Dorf
(Straße / Gemarkung)	(Haus-Nr. / Flur / Flurstück)	(PLZ)	(Ort)

Betreiber der ortsfesten Amateurfunkanlage:

Hans Mustermann	09999/99999
(Name, Vorname)	(Telefon) *
Hutangerweg 3	Mustermann@example.com
(Straße, Hausnummer)	(E-Mail) *
99999 Dorf	
(PLZ, Ort)	
DL1MUSTER	A
(Rufzeichen)	(Amateurfunkzeugnisklasse)

☐ Erste Anzeige der o.g. ortsfeste Amateurfunkanlage.

☒ Die o.g. ortsfeste Amateurfunkanlage wurde bisher 1 mal angezeigt.

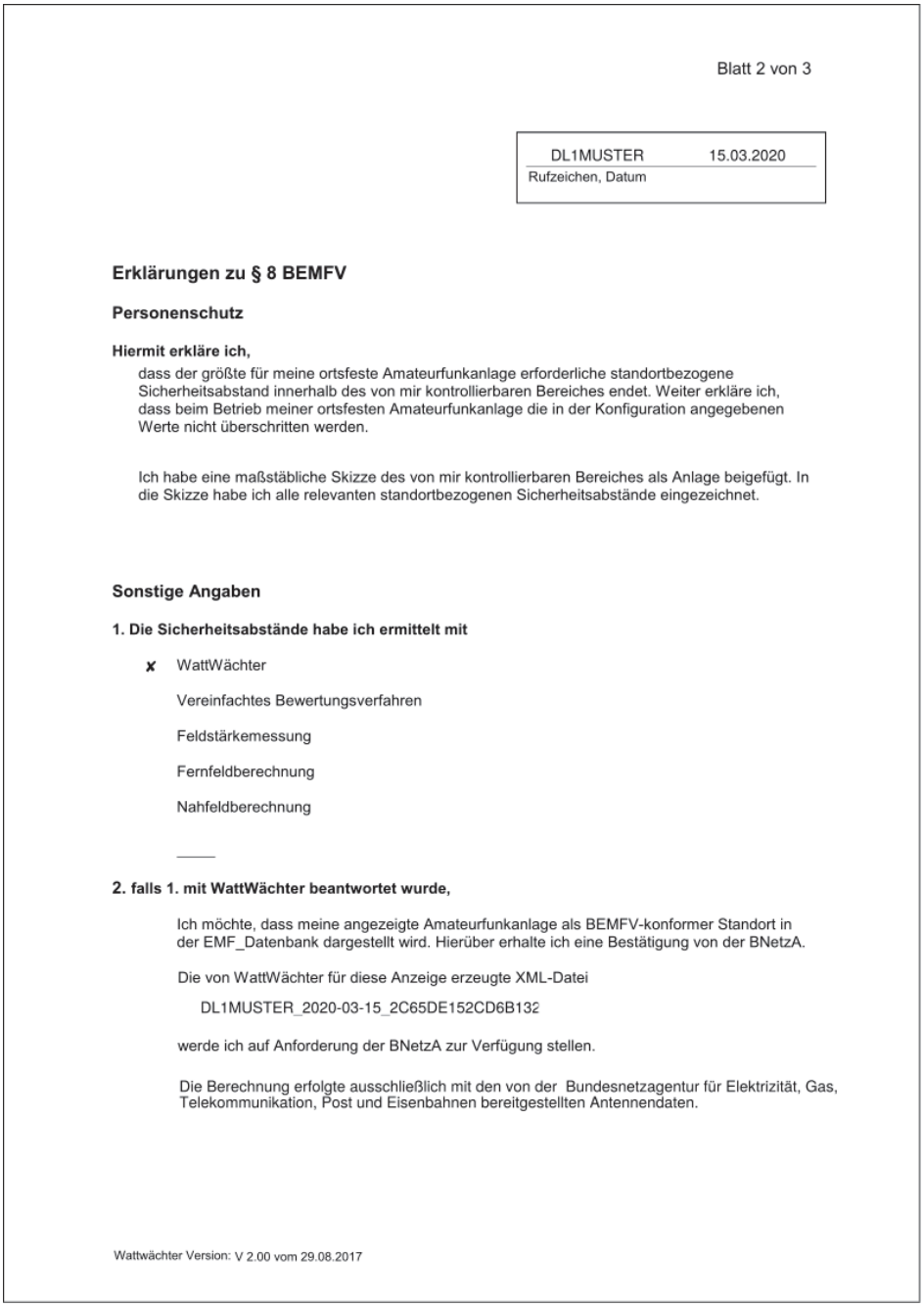
Diese Anzeige ersetzt die vom: .....

Die mit* gekennzeichneten Felder sind freiwillige Angaben, alle anderen Angaben müssen vollständig sein. Fehlende Angaben führen zur Nichtannahme der Anzeige.

Die vorformulierten Erklärungen dürfen nicht ergänzt oder verändert werden.

Der Einsatz von speziell zur Anzeige angebotenen Softwarehilfen entbindet den Anzeigenden nicht von seiner Verantwortung für die Richtigkeit seiner Angaben.

Abbildung 30.25 Anzeige, Seite 1



Blatt 2 von 3

DL1MUSTER 15.03.2020
Rufzeichen, Datum

Erklärungen zu § 8 BEMFV

Personenschutz

Hiermit erkläre ich,

dass der größte für meine ortsfeste Amateurfunkanlage erforderliche standortbezogene Sicherheitsabstand innerhalb des von mir kontrollierbaren Bereiches endet. Weiter erkläre ich, dass beim Betrieb meiner ortsfesten Amateurfunkanlage die in der Konfiguration angegebenen Werte nicht überschritten werden.

Ich habe eine maßstäbliche Skizze des von mir kontrollierbaren Bereiches als Anlage beigefügt. In die Skizze habe ich alle relevanten standortbezogenen Sicherheitsabstände eingezeichnet.

Sonstige Angaben

1. Die Sicherheitsabstände habe ich ermittelt mit

✘ WattWächter

Vereinfachtes Bewertungsverfahren

Feldstärkemessung

Fernfeldberechnung

Nahfeldberechnung

2. falls 1. mit WattWächter beantwortet wurde,

Ich möchte, dass meine angezeigte Amateurfunkanlage als BEMFV-konformer Standort in der EMF_Datenbank dargestellt wird. Hierüber erhalte ich eine Bestätigung von der BNetzA.

Die von WattWächter für diese Anzeige erzeugte XML-Datei

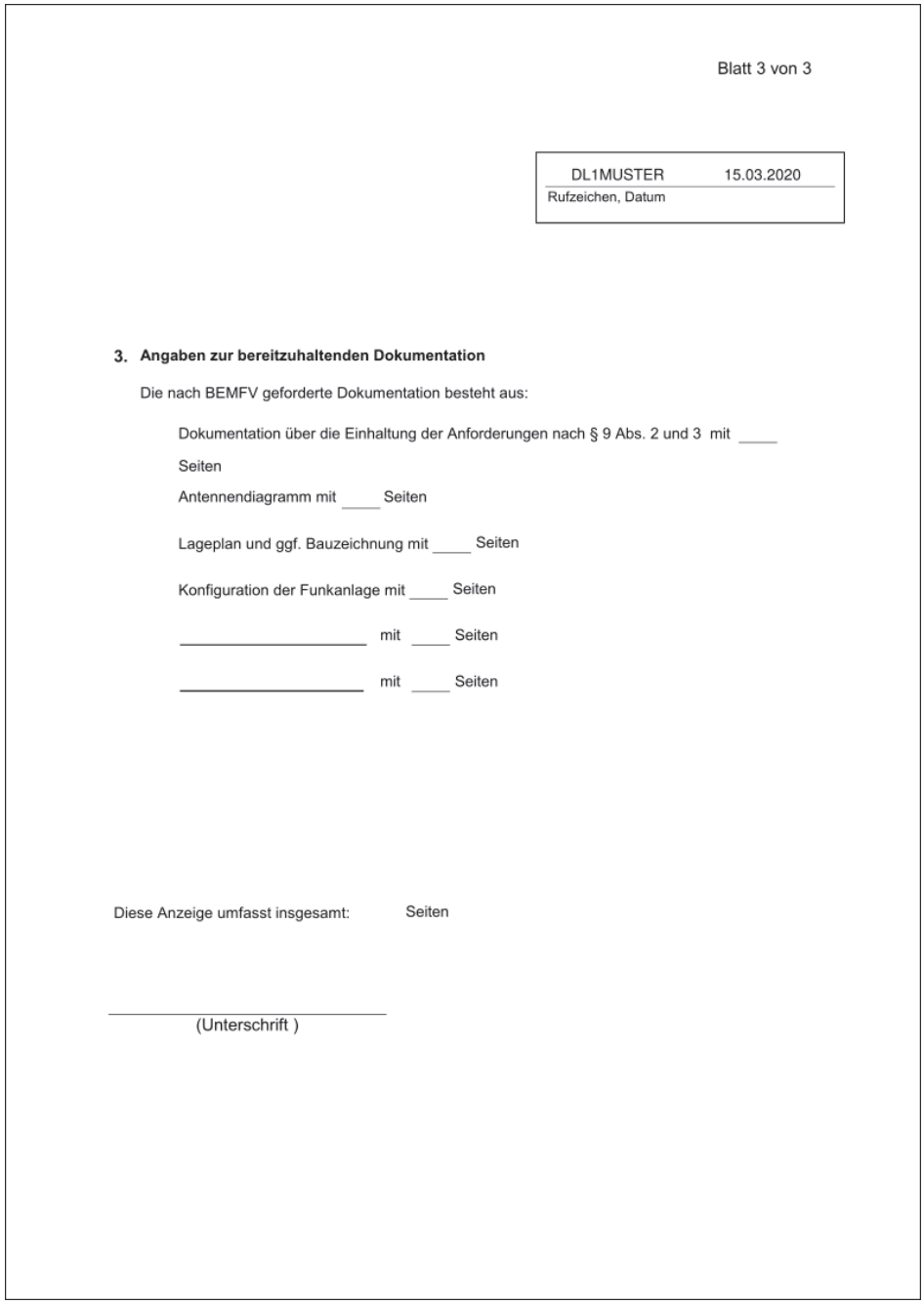
DL1MUSTER_2020-03-15_2C65DE152CD6B132

werde ich auf Anforderung der BNetzA zur Verfügung stellen.

Die Berechnung erfolgte ausschließlich mit den von der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen bereitgestellten Antennendaten.

Wattwächter Version: V 2.00 vom 29.08.2017

Abbildung 30.26 Anzeige, Seite 2



Blatt 3 von 3

DL1MUSTER 15.03.2020
Rufzeichen, Datum

3. Angaben zur bereitzuhaltenden Dokumentation

Die nach BEMFV geforderte Dokumentation besteht aus:

Dokumentation über die Einhaltung der Anforderungen nach § 9 Abs. 2 und 3 mit ____ Seiten

Antennendiagramm mit ____ Seiten

Lageplan und ggf. Bauzeichnung mit ____ Seiten

Konfiguration der Funkanlage mit ____ Seiten

_____ mit ____ Seiten

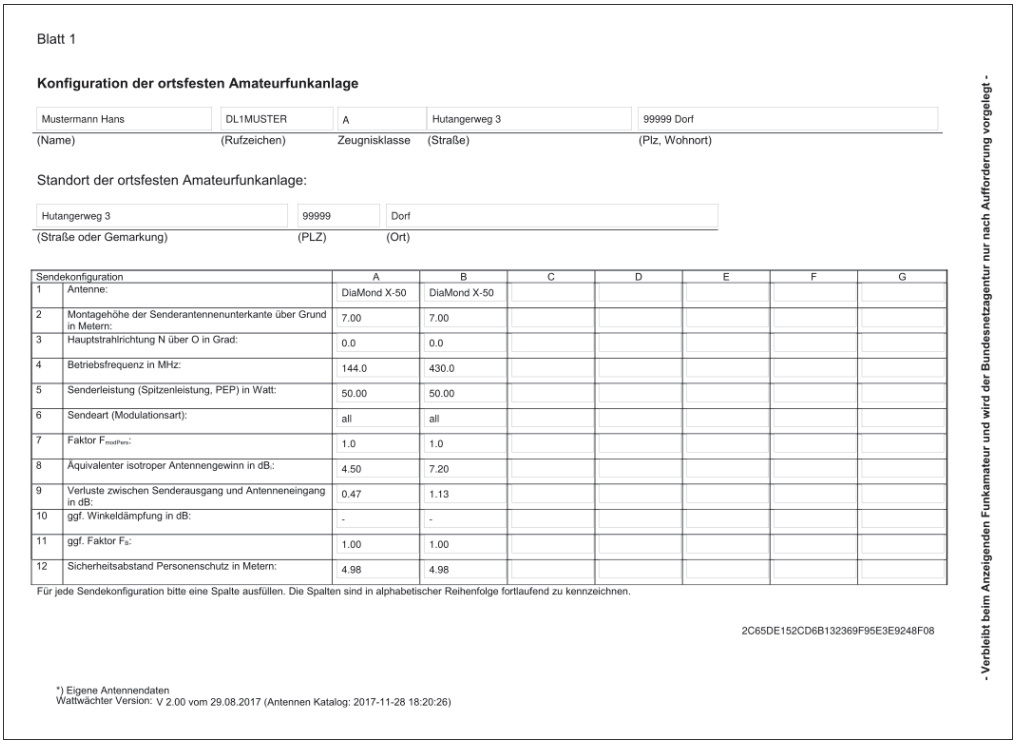
_____ mit ____ Seiten

Diese Anzeige umfasst insgesamt: Seiten

_____
(Unterschrift)

Abbildung 30.27 Anzeige, Seite 3

Die Berechnungen (*Konfiguration*) befinden sich in der Datei *DL1MUSTER_Konfiguration.pdf* (siehe Abbildung 30.28).



Blatt 1

Konfiguration der ortsfesten Amateurfunkanlage

Mustermann Hans	DL1MUSTER	A	Hutangerweg 3	99999 Dorf
(Name)	(Rufzeichen)	Zeugnisklasse	(Straße)	(Plz, Wohnort)

Standort der ortsfesten Amateurfunkanlage:

Hutangerweg 3	99999	Dorf
(Straße oder Gemarkung)	(PLZ)	(Ort)

Sendekonfiguration		A	B	C	D	E	F	G
1	Antenne:	DiaMond X-50	DiaMond X-50					
2	Montagehöhe der Senderantennenunterkante über Grund in Metern:	7.00	7.00					
3	Hauptstrahlrichtung N über O in Grad:	0.0	0.0					
4	Betriebsfrequenz in MHz:	144.0	430.0					
5	Senderleistung (Spitzenleistung, PEP) in Watt:	50.00	50.00					
6	Sendeart (Modulationsart):	all	all					
7	Faktor F_{modPwr}:	1.0	1.0					
8	Äquivalenter isotroper Antennengewinn in dB.:	4.50	7.20					
9	Verluste zwischen Senderausgang und Antenneneingang in dB:	0.47	1.13					
10	ggf. Winkeldämpfung in dB:	-	-					
11	ggf. Faktor F_R:	1.00	1.00					
12	Sicherheitsabstand Personenschutz in Metern:	4.98	4.98					

Für jede Sendekonfiguration bitte eine Spalte ausfüllen. Die Spalten sind in alphabetischer Reihenfolge fortlaufend zu kennzeichnen.

2C65DE152CD6B132369F95E3E9248F08

*) Eigene Antennendaten
Wattwächter Version: V 2.00 vom 29.08.2017 (Antennen Katalog: 2017-11-28 18:20:26)

- Verbleibt beim Anzeigenden Funkamateur und wird der Bundesnetzagentur nur nach Aufforderung vorgelegt -

Abbildung 30.28 Konfiguration

Darüber hinaus müssen Sie Zeichnungen anfertigen. Hilfreich hierfür sind amtliche Unterlagen aus dem Vermessungsamt/Katasteramt.

Im Übersichtsplan (siehe Abbildung 30.29) kennzeichnen Sie die Lage und den von Ihnen *kontrollierbaren Bereich*. Hierunter versteht man alle Flächen, die Sie gegebenenfalls absperren können, damit Personen während des Sendebetriebs keinen Feldstärken ausgesetzt sind, die die Grenzwerte übersteigen. Geben Sie auch die Nutzung der umliegenden Grundstücke an. Eine Maßstabsangabe muss vorhanden sein.

Detaillierter stellen Sie Ihr Grundstück dar. Hier zeichnen Sie die Antennen und ihren umliegenden Schutzbereich ein. Ein Hinweis auf den Maßstab und ein Richtungspfeil (»Nordpfeil«) gehören dazu (siehe Abbildung 30.30).

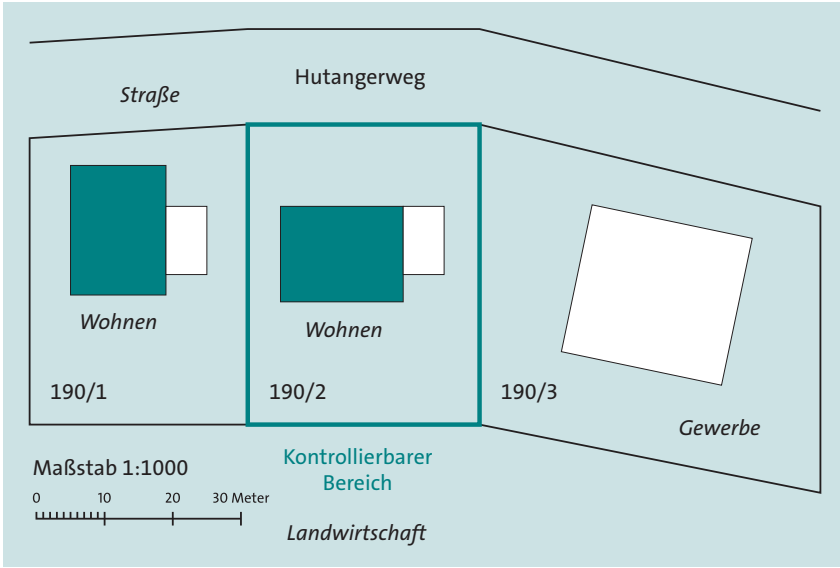


Abbildung 30.29 Lageplan (Die hier gezeigten Beispiele sind fiktiv.)

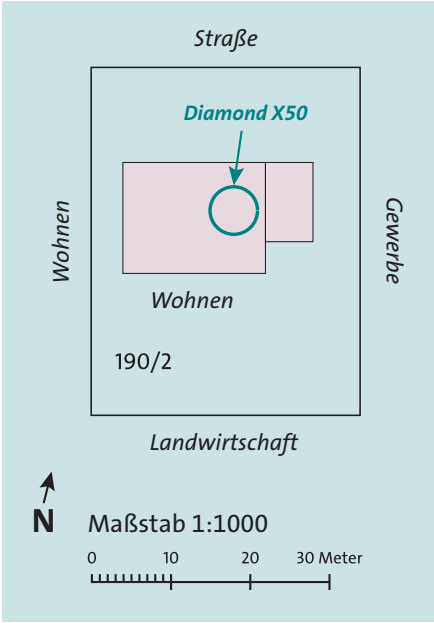


Abbildung 30.30 Lageplan der Antennen

Dann müssen Sie noch eine Zeichnung von Ihrer Sendekonfiguration anfertigen, in der Sie die Kabellängen und -typen, die Steckverbindungen, die Antennen und die verwendeten Geräte nennen. Abbildung 30.31 zeigt ein Beispiel.

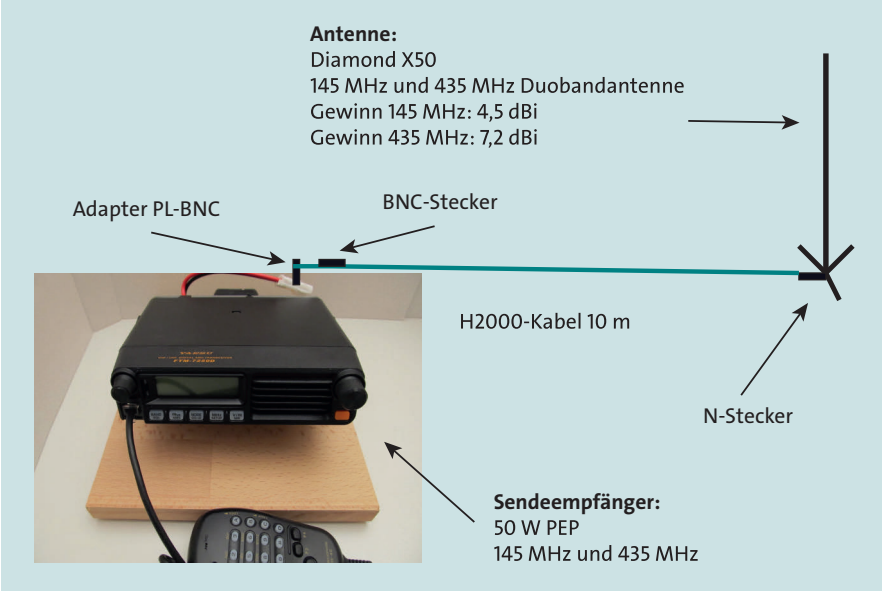


Abbildung 30.31 Sendekonfiguration

Einen Teil dieser Unterlagen senden Sie an die für Sie zuständige Außenstelle der Bundesnetzagentur, ein anderer verbleibt bei Ihrer Station, um im Bedarfsfall vorgelegt zu werden. Tabelle 30.3 zeigt, wer welche Unterlagen bekommt.

Zur Bundesnetzagentur	Verbleibt beim Funkamateur
Anzeige, Seiten 1 bis 3	Anlage 2 der Anzeige (Konfigurationsblatt)
Zeichnungen mit Ausweis des kontrollierbaren Bereichs und der Lage der Antennen	Lageplan mit Bauzeichnung
	Schema der Sendekonfiguration
	Berechnungsblätter
	Richtdiagramme von Antennen

Tabelle 30.3 Aufteilung der Unterlagen

Änderungen an der Stationskonfiguration

Ändern Sie etwas an der Stationskonfiguration (z. B. neue Antenne, weitere genutzte Frequenzbereiche, Erhöhung/Minderung der Sendeleistung), müssen Sie erneut eine BEMV-Erklärung erstellen. Beachten Sie dabei die Einträge auf der ersten Seite des Anzeigeformulars! Das Formular können Sie mit einem aktuellen PDF-Reader wie folgt ergänzen:

»Die oben genannte ortsfeste Amateurfunkstelle wurde bisher [x] Mal angezeigt. Diese Anzeige ersetzt die vom [Datum].«

Natürlich müssen Sie meist auch die Zeichnungen und Hilfsskizzen überarbeiten.

Obwohl das Berechnen der Werte für die BEMV-Erklärung ausreicht, können Sie optional auch *Feldstärkemessungen* durchführen. Die Berechnungen zeigen zwar, welche Feldstärken zu erwarten sind, die Messungen zeigen hingegen die Wirklichkeit. Einflüsse von Gebäuden und Gelände können Sie nämlich nicht vorausberechnen. So können sich bezüglich des Sicherheitsabstands durchaus Unterschiede zur Berechnung ergeben. Und nicht alle Antennentypen finden sich in den Berechnungsprogrammen. Auch hier ist die Messung dann ein sicheres Verfahren, um den Sicherheitsabstand bestimmen zu können.

Sie benötigen ein geeignetes *Feldstärkemessgerät*, das über die notwendigen Sonden (E- und H-Feld) und ein gültiges Kalibrierzertifikat verfügt. Dieses Zertifikat müssen Sie samt den Messblättern zu den Unterlagen nehmen. Zudem zeichnen Sie im Lageplan die Messpunkte ein: In der Vertikalansicht zeichnen Sie die Messpunkte mit der Höhe der Messsonde ein (z. B. 2 m Höhe).

Einige Programme, z. B. Watt32, unterstützen direkt einige Feldstärkemessgeräte. So ersparen Sie sich das Umrechnen, wenn das Gerät in einer anderen Einheit als V/m anzeigt.

Abbildung 30.32 zeigt das Messgerät *PWRM1* der Firma SAT-Schneider mit der E-Feldsonde (Quadrat) und der H-Feldsonde (Kreis).

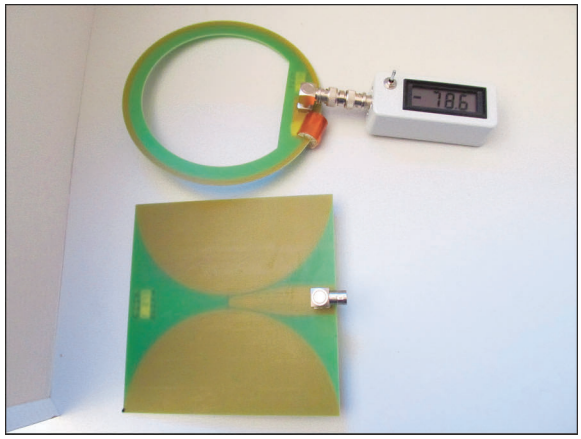


Abbildung 30.32 Das PWRM1 der Firma SAT-Schneider

Mitglieder des DARC können entsprechend kalibrierte Messgeräte zur Erstellung der BEMV-Anzeige ausleihen. Darüber hinaus bietet der Verein auch einen Kalibrierservice für verschiedene Feldstärkemessgeräte an.

Kapitel 31
Antennenbau für Einsteiger

Echte Maker schrecken natürlich auch nicht vor dem Antennenselbstbau zurück. Aber der Aufbau räumlich großer Antennen für Kurzwelle erfordert einiges Wissen und Können.

31.1 Projekt: Ein Dipol für das 10-m-Band

Zum Einstieg können Sie einen Drahtdipol für das 10-m-Band (CB-Funker: 11-m-Band) bauen. Sie lernen in diesem Abschnitt die notwendigen Arbeitsschritte kennen.

31.1.1 Bauteile

Der Dipol erhält einen Balun (siehe Abbildung 31.1). Damit vermeiden Sie, dass der Außenmantel des speisenden Koaxialkabels Gleichtaktausgleichströme führt.



Abbildung 31.1 Balun für leichte Drahtantennen und kleine Leistung

Für den Anschluss des Baluns benötigen Sie Ringkabelschuhe (hier mit einem Ösendurchmesser von 3,2 mm). Für eine höhere mechanische und elektrische Beanspruchung gibt es Baluns in größeren Ausführungen, die über entsprechende Aufnahmen für die Antennenlitze verfügen. Einen Vergleich der unterschiedlichen Bauformen sehen Sie in Abbildung 31.2.



Abbildung 31.2 Baluns für Drahtantennen in unterschiedlichen Bauformen

Es gibt zudem noch Ausführungen mit einer dritten Öse, mit der ein Halteseil angebracht werden kann, das die Last des Baluns und des hängenden Speisekabels aufnimmt. Dadurch wird die Antennenlitze entlastet.

Für die Dipolschenkel benötigen Sie Antennenlitze. Diese bekommen Sie in vielen Ausführungen: mit und ohne Stahldrahtseele, mit und ohne Isolierung oder aus Bronze. Besonders bei größeren Abmessungen ist die Zugfestigkeit wichtig. Das nach unten ziehende Speisekabel, der Wind und die gespannte Konstruktion als solche lassen Kräfte wirken.

Die Enden des Antennenleiters fixieren Sie mit Kastenklemmen an den Isolatoren. Dazu bilden Sie eine Öse aus dem Material und führen sie durch das »Antennenei«. Bei sehr hohen Sendeleistungen verwenden Sie mehrere Isolatoren hintereinander. Die klassischen Antennenisolatoren bestehen aus Porzellan. Sie sind wetterfest, und Luftschadstoffe können ihnen nichts anhaben. Sie können solche Isolatoren aber auch aus Kunststoff selbst herstellen. Der Kunststoff sollte eine gute UV-Beständigkeit aufweisen, damit er nicht im Laufe der Zeit durch das einwirkende Sonnenlicht spröde wird und im schlimmsten Fall zerbröselt.

Abbildung 31.3 zeigt eine Kastenklemme, einen Miniaturisolator aus Porzellan und einen aus Kunststoff; Abbildung 31.4 zeigt das klassische »Antennenei«.

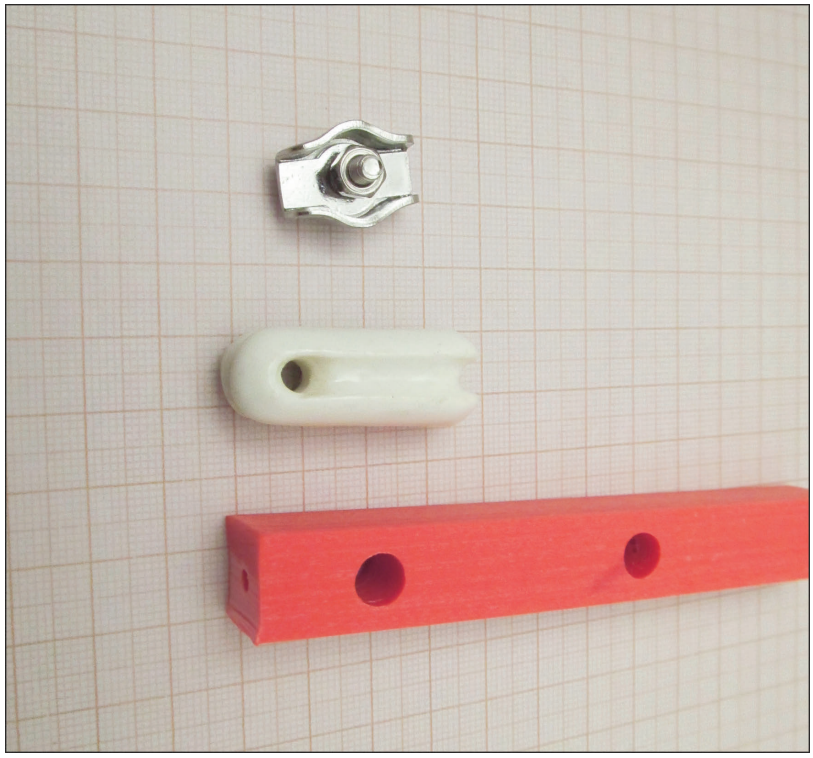


Abbildung 31.3 Kastenklemme und Isolatoren

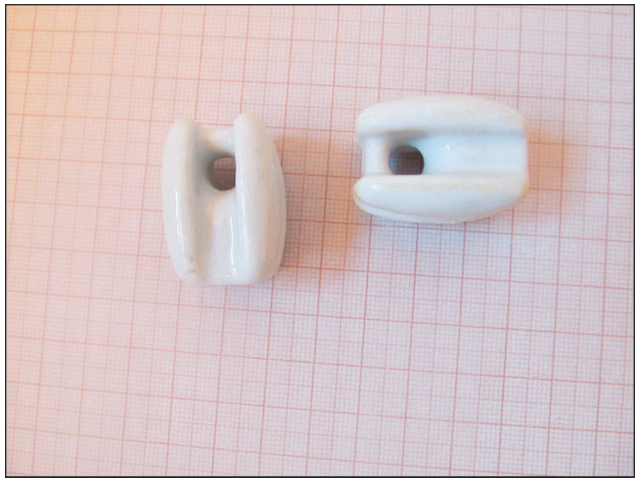


Abbildung 31.4 Porzellanisolatoren, »Antenneneier«

Antennenlitze bei Porzellanisolatoren

Die Antennenlitze wird bei Porzellanisolatoren in der Rille um den Körper herumgeführt. Damit wird eine hohe Zugfestigkeit erzielt!

31.1.2 Berechnung

Für das 10-m-Band nehmen Sie die Frequenz 28,400 MHz (CB-Funker nehmen 27,050 MHz für den 80-Kanal-Betrieb, sonst 27.200 MHz). Den Verkürzungsfaktor (0,95 bis 0,97) lassen wir außer Acht, da meist sowieso eingekürzt werden muss!

Wir berechnen nun den Halbwellendipol. Ein Schenkel ist also $^{\pi}/_{4}$ lang!

Berechnen Sie die Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{300000\ \mathrm{m/s}}{f\,(\mathrm{kHz})}\ (\mathrm{m})$$

Für das 10-m-Band tippen Sie ein:

300000 [÷] 28400 [=]

Sie lesen 10,56 m Länge ab. Dieses Zwischenergebnis teilen Sie noch durch 4 und erhalten 2,64 m Schenkellänge.

31.1.3 Zurichten der Teile

Schneiden Sie die Antennenlitze wie berechnet zu.

Die Antennenlitze isolieren Sie so weit ab, dass das blanke Metall am Ösenende sichtbar ist und auf der Schaftseite die Isolierung gerade eintaucht. Quetschen Sie die Antennenlitze fest. Zusätzliches Verlöten an der Ösenseite verleiht einen besseren elektrischen Kontakt und eine hohe Festigkeit der Verbindung. Für den direkten Zug (beim kleinen Balun) knicken Sie die Öse um 90°.

Sie können den Dipolast am Balun festschrauben. Allerdings empfehle ich diese Vorgehensweise nur für leichte, kurze Drahtantennen. Bei rund 5 m Gesamtlänge und einem kurzen Koaxialkabel halten sich die Kräfte noch im Rahmen. Wenn Sie einen Balun mit entsprechenden Ösen für die Aufnahme der Zugkräfte verwenden, ziehen Sie den Antennenleiter als Schlaufe durch und fixieren diese mittels Kastenklemmen. Die kurzen, offenen Enden tragen jeweils die Ringkabelschuhe, die Sie an den elektrischen Anschlüssen des Balungehäuses festschrauben.

31.1.4 Erster Aufbau

Die langen Enden verbinden Sie mit den Endisolatoren (siehe Abbildung 31.5). Schließen Sie das Speisekabel an, und hängen Sie die Antenne auf.

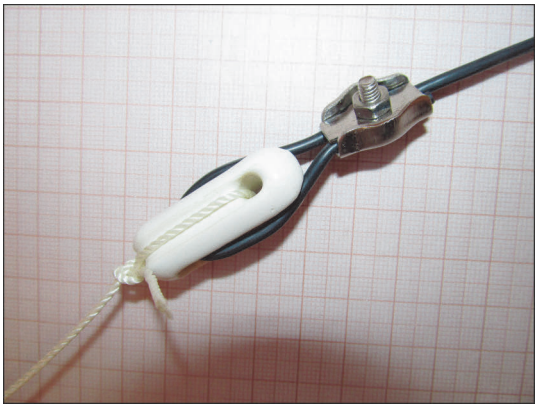


Abbildung 31.5 Dipolende mit Kunststoffseil, Isolator und Kastenklemme

31.1.5 Abgleich

Drahtantennen werden durch Kürzen und, wenn notwendig, auch mal durch Verlängern in Resonanz gebracht. Das Kürzen geht einfacher, deshalb berechnet man die Länge des Antennenleiters ohne Verkürzungsfaktor.

Ist die Antenne zu lang, liegt die Resonanzfrequenz unter der gewünschten Arbeitsfrequenz (siehe Abbildung 31.6).

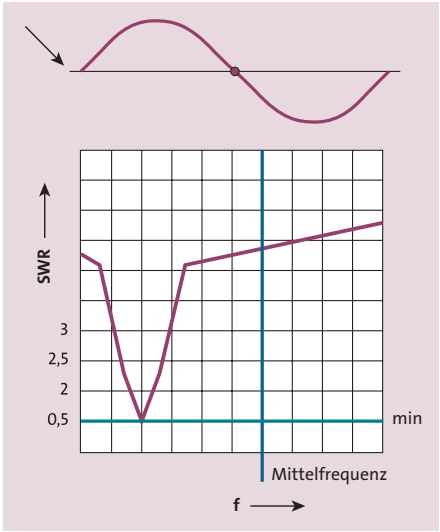


Abbildung 31.6 Diese Antenne ist zu lang.

Kürzen Sie die Antenne beidseitig mit gleich langen Abschnitten. Dabei sollten Sie nicht zu großzügig abschneiden, sonst wird die Antenne zu kurz (siehe Abbildung 31.7)! Die Resonanzfrequenz der Antenne liegt dann über der Betriebsfrequenz. In diesem Fall muss der Antennenleiter wieder verlängert werden. Greifen Sie zum Lötkolben ...

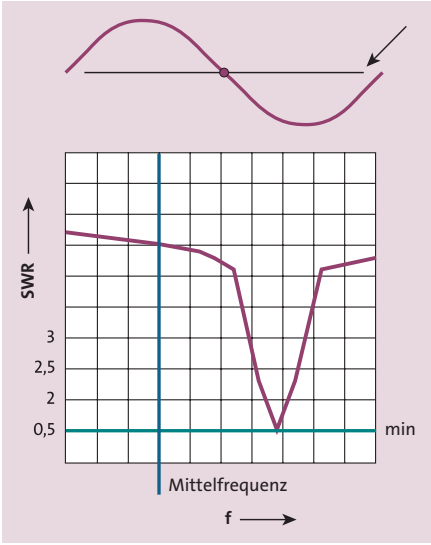


Abbildung 31.7 Diese Antenne ist zu kurz.

Ist der Abgleich geglückt, passen die Antennenlänge und die Betriebsfrequenz zueinander (siehe Abbildung 31.8).

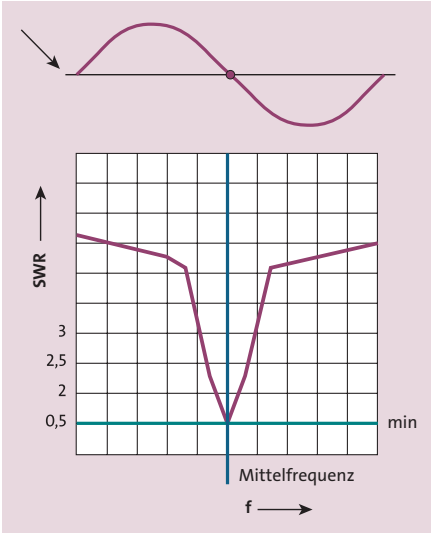


Abbildung 31.8 Resonante Antenne

Sie können ein Funkgerät und ein Stehwellenmessgerät (SWR-Meter, siehe Abschnitt 25.13) verwenden. In diesem Fall messen Sie jeweils am unteren und oberen Bandende. Bitte arbeiten Sie nur mit der unbedingt notwendigen Sendeleistung! Sie stören sonst andere Funkteilnehmer! Notieren Sie das gemessene SWR (Stehwellen-Ratio), und verfahren Sie wie in Tabelle 31.1.

Unteres Bandende	Oberes Bandende	Vorgehen
SWR niedriger	SWR höher	Antennenleiter kürzen
SWR höher	SWR niedriger	Antennenleiter verlängern

Tabelle 31.1 SWR-Messung und Veränderung des Antennenleiters

Mit einem *vektoriellen Netzwerkanalysator* (VNA) gelingt der Antennenabgleich schneller und übersichtlicher. Dieses Messgerät wird in Abschnitt 25.15 beschrieben, und Abbildung 31.9 zeigt es im Einsatz.

Zu wenig Platz? Sie können Ihren Dipol mechanisch verkürzen, indem Sie am besten an den Schenkelenden den Antennenleiter zu einer Spule aufwickeln. Allerdings schränkt dies die Bandbreite ein! Alternativ kürzen Sie den Leiter und setzen am Ende einen Querstab oder ein Stück Blech an. Damit haben Sie eine kapazitive Verlängerung durchgeführt. Bei diesen Arbeiten hilft Ihnen ein Antennenanalysator sehr, da Sie auch ablesen können, auf welcher Frequenz die Antenne aktuell in Resonanz ist.

Für dieses kleine Projekt sollten Sie anfangs schon einmal mindestens einen Nachmittag einplanen!

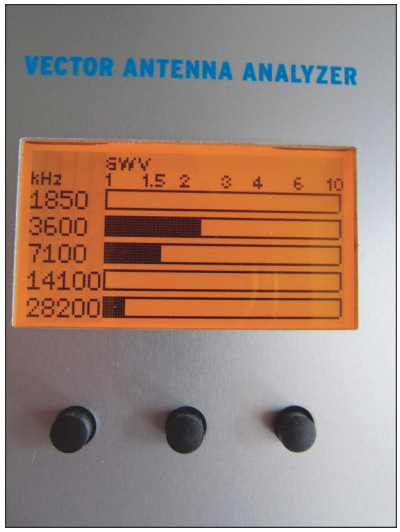


Abbildung 31.9 Messung einer Mehrbandantenne

31.2 Drahtantennen richtig spannen

Drahtantennen sollten immer (mechanisch) in Spannung gehalten werden. Allerdings müssen Sie Kräfte durch Wind, aber auch Temperaturänderungen sowie gegebenenfalls das nach unten ziehende Speisekabel ausreichend berücksichtigen (siehe Abbildung 31.10):

- Sie können die Antenne etwas stärker nach unten durchhängen lassen.
- Sie können eine Spannrolle verwenden.
- Bei temporären Aufbauten und kürzeren Drahtantennen spannen GFK-Masten die Antenne.

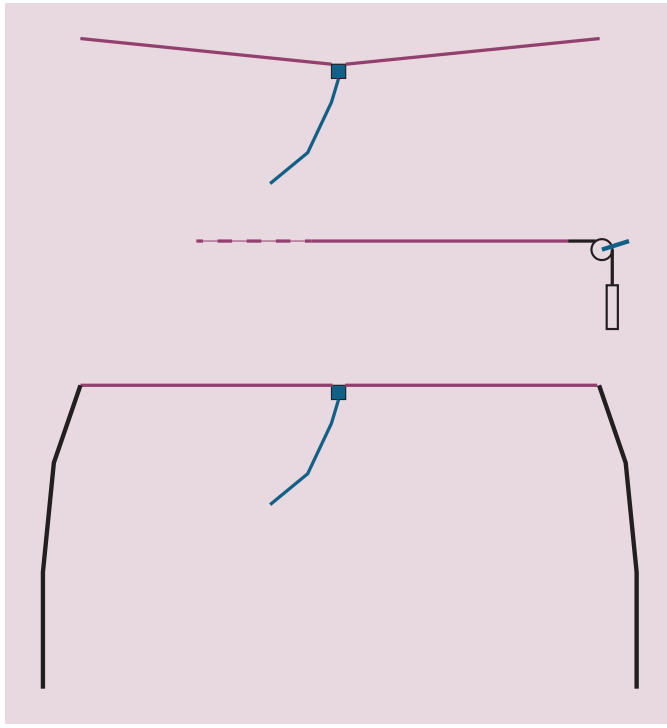


Abbildung 31.10 Spannmöglichkeiten von Drahtantennen

Außermittig oder endgespeiste Antennen sind vorteilhafter, was die mechanische Belastung des Antennenleiters angeht.

Was Sie – wenn die Möglichkeit besteht – immer anbringen können, sind zusätzliche Abspannungen (*Tragwerke*). Bei endgespeisten Antennen ist der Speisepunkt fest montiert, das freie Ende kann beweglich gelagert werden, etwa mit einem biegsamen Mast oder einer Spannrolle.

31.3 Die »magnetische Antenne« – eine Sonderform unter den Antennen

Wenn Sie unter Platzmangel leiden oder auch dem häuslichen Störnebel entfliehen wollen, den moderne Leuchtmittel, Schaltnetzteile und PLC-Modems verursachen, versuchen Sie es mit einer *Magnetic-Loop-Antenne*.

Der Nachteil dieser Antenne besteht darin, dass Sie die Resonanz sehr scharf einstellen müssen und dass Sie darum manchmal sogar beim »Drüberdrehen« über ein Kurzwellenband nachstimmen müssen.

Bei einer Magnetic-Loop-Antenne erkennen Sie das Prinzip des Schwingkreises, der aus einer Spule und einem Kondensator besteht. Das macht diese Antenne auch für physikalische Experimente interessant.

Achtung, Feldstärken!

Im Umfeld solcher Antennen herrschen hohe Feldstärken! **Berühren Sie keinesfalls Teile der Antenne während des Sendebetriebs!**

31.3.1 Materialbedarf

Sie benötigen für den Ring einen dicken Kupferdraht oder ein dünnes Heizungsrohr. Alternativ kann der Schirm eines hochwertigen, dicken Koaxialkabels verwendet werden. Darüber hinaus muss ein Drehkondensator beschafft werden. Dies erledigen Sie entweder auf einem der bekannten Funkflohmärkte oder Sie kaufen sich einen Bausatz hierfür (z. B. bei der Firma Schubert, *http://www.schubert-gehaeuse.de*). Hier bekommen Sie auch recht günstige Fertigmodelle dieses Antennentyps.

Bei der Auswahl des Drehkondensators müssen Sie abwägen, ob Sie einen großen Abstimmbereich wollen oder ob die Abstimmung selbst feinfühlig funktionieren soll. Einen weit nutzbaren Frequenzbereich erhalten Sie mit einem Kondensator, der eine hohe Endkapazität aufweist. Für das feine Abstimmen benötigen Sie einen mit wenig(er) Endkapazität. Der Königsweg besteht darin, beide zu verwenden: Mit dem »großen« stellen Sie das Band grob ein, mit dem »kleinen« stimmen Sie feiner ab. Bei Empfangsantennen ist dies ohne große Probleme machbar. Bei einer Fernabstimmung mit Elektromotor genügt ein »großer« Drehkondensator und eine wie auch immer geartete Drehzahlregelung.

31.3.2 Maße und Material für den Rahmen

Der Umfang der Antenne bestimmt den Frequenzbereich. Sie arbeitet am besten, wenn der Umfang knapp weniger als ein Viertel der maximal vorkommenden Wel-

lenlänge beträgt. Bei der halben Frequenz liegt das Maß bei rund einem Achtel. Meist können Sie zwei oder mehrere Kurzwellenbänder nutzen. Tabelle 31.2 zeigt Ihnen einige Beispiele.

Amateur-funkbänder	Umfang des Rahmens	Umfang der Koppelschleife	Durchmesser bei kreis-förmigem Aufbau
20 m – 10 m	2,10 m	0,43 m	0,70 m
40 m – 15 m	2,85 m	0,57 m	0,90 m
40 m – 20 m	4,30 m	0,90 m	1,35 m
80 m – 40 m	8,60 m	1,75 m	2,75 m

Tabelle 31.2 Maßangaben für den Nachbau

Als Material für den Eigenbau bietet sich Kupfer- oder Aluminiumflachband oder -rohr bzw. ein Koaxialkabel mit Folienschirm an. Sie benötigen Werkzeug für die Metallverarbeitung. Nehmen Sie die Breite (beim Flachband) oder den Durchmesser (bei Rohr und Kabel) so groß wie erhältlich und von der Verarbeitung her möglich.

31.3.3 Abstimmbox (Gehäuse und Kondensator)

Für die Abstimmung wurde hier der Drehkondensator-Bausatz DK7 aus dem Hause Schubert mit passendem Motor für die Fernabstimmung erworben (15–430 pF, 2,3 kV Spannungsfestigkeit). Für den Zusammenbau dieser Einheit mit den dabei notwendigen Entgratungsarbeiten sollten Sie rund zwei Stunden einplanen. Der Kondensator weist eine Länge von 145 mm ohne Motor auf. Mit ihm zusammen nimmt die Konstruktion ca. 230 mm in Anspruch. Den aufgebauten Drehkondensator mit Motor sehen Sie in Abbildung 31.11.

Das Gehäuse wurde vom Funkflohmarkt erworben. Für ein Neuteil müssen Sie rund 50 EUR einplanen. Wenn Sie so ein Gehäuse mit Gewebeband zusätzlich abdichten, steht einem Langzeiteinsatz auf der Dachterrasse oder dem Balkon nichts im Wege. Das hier verwendete Gehäuse verfügt über einen Druckausgleich auf der Unterseite. Damit steht bei Temperatur- und Luftdruckschwankungen ein definierter Ausgleichspunkt zur Verfügung, was die Abdichtung schont.

Nun müssen noch die Anschlüsse für die Fernbedienung und natürlich für den Antennenrahmen eingebracht werden. Die Fernbedienung wird per Cinch-Stecker angeschlossen. Für den Antennenrahmen, der aus Rohr oder Kabel gefertigt werden kann, verwenden Sie N-Einbaubuchsen. Die interne Verkabelung besteht aus dickem KFZ-

Installationskabel, das mittels Ringkabelschuhen mit den Komponenten verbunden wird. Diese werden zusätzlich verlötet! Wenn vorhanden, können Sie stattdessen Streifen aus Messingblech verwenden. Von den Buchsen verbinden Sie sowohl den Innenleiter als auch das Gehäuse zusammen mit dem jeweiligen Anschluss des Drehkondensators!



Abbildung 31.11 Fertig aufgebauter Drehkondensator mit Motor für die Fernabstimmung

Für die Anschlüsse des Antennenrahmens werden hier N-Buchsen (Gehäuse) und N-Stecker (Rahmen) verwendet. Damit lässt sich der Strahlerwechsel schnell und unkompliziert handhaben, da der Kasten nicht geöffnet werden muss. Die Verbindungen sind mechanisch gut belastbar. Sie müssen diese Verbinderkomponenten aber stets sauber halten, damit die Übergangswiderstände klein bleiben. Bei Nichtgebrauch schützen Sie den Strahleranschluss und den Abstimmkasten vor Staub und Feuchtigkeit! Abbildung 31.12 zeigt die geöffnete Abstimmeinheit.

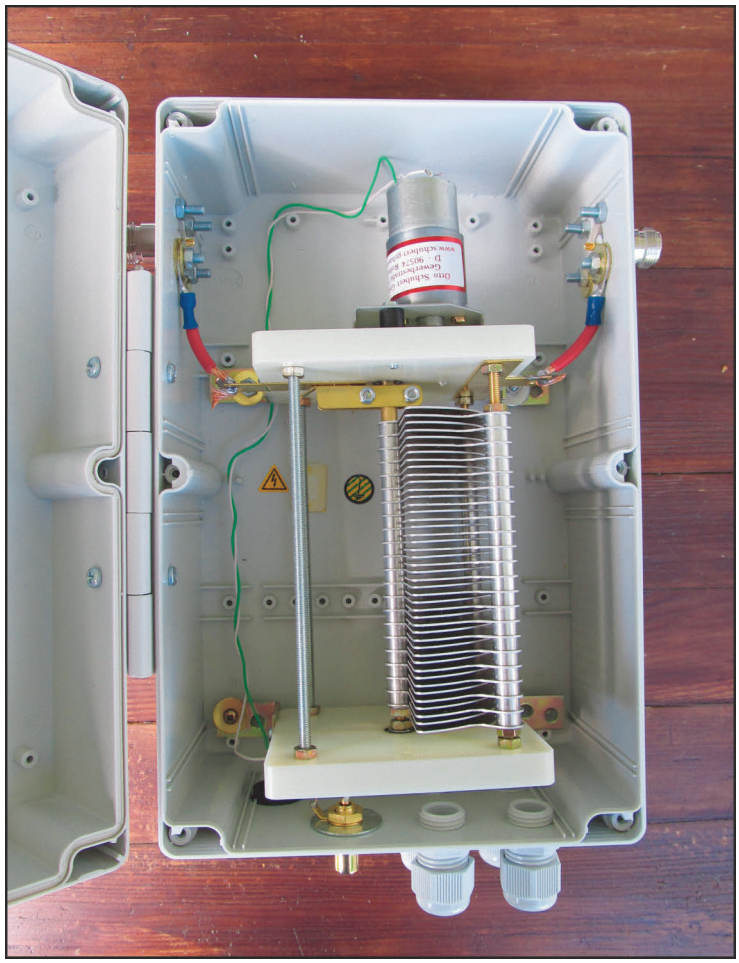


Abbildung 31.12 Geöffnete Abstimmbox

31.3.4 Fernabstimmung

Die Fernabstimmung ermöglicht es Ihnen, die Antenne außerhalb Ihrer Reichweite aufzustellen und zu betreiben, z. B. auf dem Dachboden oder dem Balkon.

Der Drehkondensator verfügt über eine relativ hohe Kapazität. Wenn Sie seinen Rotor mit der Nennspannung (12 Volt) des Motors bewegen, haben Sie große Mühe, den Resonanzpunkt zu treffen. Für die Grobabstimmung (Bandwechsel) verwende ich 9 Volt, für die Feinabstimmung 4,5 Volt. Damit gelingt es, ohne große Mühe die Antenne schnell auf die gewünschte Frequenz einzustellen.

Der Einfachheit halber verwende ich Mignon-Einwegbatterien. Sie müssen alle zwei bis drei Jahre ersetzt werden. Sie stecken in einem 6er-Batteriegeschirr. Darin habe ich bei der Hälfte der Zellen einen weiteren Spannungsabgriff angelötet, der die

4,5 Volt für den Langsamgang bietet. Falls Sie das Bedienkästchen über einen 12-Volt-Anschluss betreiben, sehen Sie entweder zwei Festspannungsregler oder einen regelbaren Spannungsregler vor.

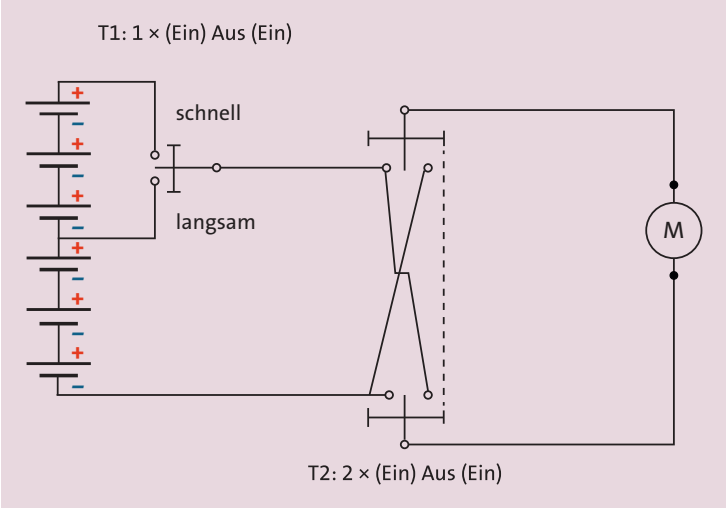


Abbildung 31.13 Schaltplan des Bediengeräts

Die Schaltung in Abbildung 31.13 ist schnell erklärt: Die 4,5 Volt und 9 Volt liegen an einem Wechseltaster (T1) an; hier bestimmen Sie die Abstimmgeschwindigkeit. Der Abgang von T1 wird zusammen mit dem Minuspol des Batteriegeschirrs zum Zwei-Ebenen-Taster T2 geführt, der als Polwender arbeitet. Die beiden Potenziale liegen entgegengesetzt auf beiden Ebenen an. Die Abgänge werden mit der Anschlussbuchse verbunden. Gestalten Sie die Anbringung der beiden Kipptaster so, dass Sie mit einer Hand bequem arbeiten können. Tabelle 31.3 zeigt Ihnen den Materialbedarf. Abbildung 31.15 zeigt Ihnen das Bedienfeld, Abbildung 31.16 das geöffnete Gerät.

Komponente	Menge	Hinweis
Kipptaster 1× (ein) aus (ein)	1	z. B. Conrad 703052
Kipptaster 2× (ein) aus (ein)	1	z. B. Conrad 703117
Batteriegeschirr für 6 Stück AA-Zellen (Mignon)	1	
Cinch-Einbaubuchse	1	Weitere Buchse für die Abstimmeinheit nicht vergessen!
Kleingehäuse nach Wahl	1	

Tabelle 31.3 Materialliste für die Fernabstimmung

Modellbahntrafos

Eine gute Alternative zum gezeigten Steuergerät sind »Modellbahntrafos« (siehe Abbildung 31.14) für Gleichstrombetrieb. Mit einem Knopf regeln Sie Richtung und Geschwindigkeit!



Abbildung 31.14 Modellbahntrafo

Geräte für mit Wechselstrom betriebene Modellbahnen (»Märklin«) sind dafür jedoch nicht brauchbar!

Benutzen Sie den »Bahnanschluss« dieser Geräte. Dieser ist meist mit einem eisenbahntypischen Symbol (Gleis, Schienenfahrzeug) markiert. Die anderen Anschlüsse geben meist 16 Volt Wechselspannung (»Magnetartikel«) ab und können daher nicht für die Fernsteuerung benutzt werden.

Sie können auch fein reagierende Modellbauservos verwenden. Zusammen mit einer Funkfernsteuerung entfällt die Steuerleitung, allerdings müssen Sie für den Servo den Empfänger mit der Stromversorgung an der Antenne anbringen.



Abbildung 31.15 Fernbedienung

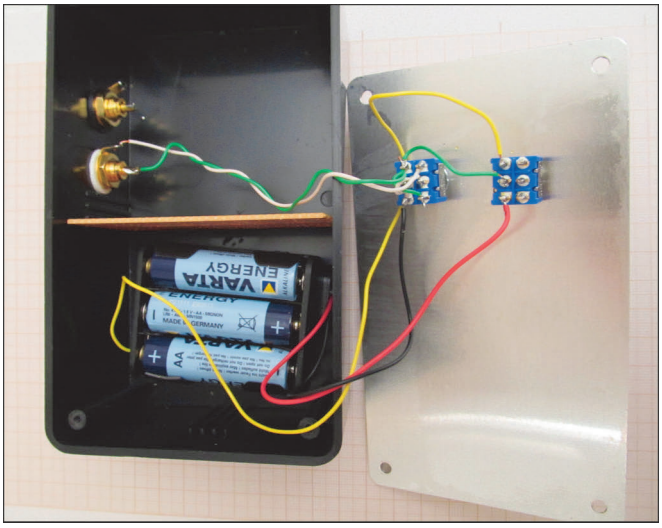


Abbildung 31.16 Fernbedienung geöffnet

31.3.5 Koppelschleife

Die Koppelschleife (siehe Abbildung 31.17) stellt die Anbindung des Empfängers oder Funkgeräts an den Senderahmen dar. Hierzu gibt es mehrere Methoden. Beim hier gezeigten Bauvorschlag wird die induktive Methode angewandt. Sie werden mit einem störungsärmeren Empfang belohnt, weil Nahfeldstörungen nur in geringerem Maße aufgenommen werden.

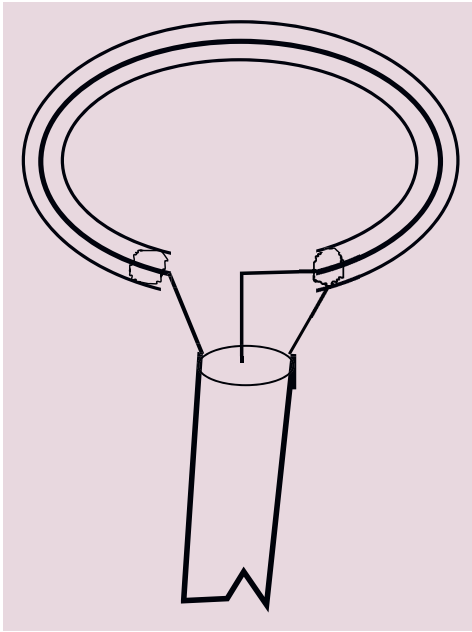


Abbildung 31.17 Koppelschleife

Der Umfang der Koppelschleife beträgt ein Fünftel des Antennenrahmenumfangs. Verwenden Sie hierfür den Kabeltyp *RG 58-U*.

Die Koppelschleife wird direkt mit einem weiteren Stück des gleichen Kabels verlötet. Dies dient als Anschlusskabel. Alle blanken Kabelstellen isolieren Sie gegeneinander ab.

Die Koppelschleife binden Sie mit Kabelbindern straff an den Rahmen.

31.3.6 Aufgebaut!

Wie Sie in Abbildung 31.18 und Abbildung 31.20 sehen, wurden zwei Rahmen aufgebaut. Einer wurde aus hochwertigem H2000-Kabel gefertigt. Sie können die Antenne einfach zusammenrollen und leicht transportieren. Der Antennenrahmen aus dem Kabel wird von einem Spreizer aus GFK-Rohrresten getragen (siehe Abbildung 31.18). Sie können auch Bambusstangen hierfür nutzen.

Für den festen Dachbodeneinsatz wurde 22 mm starkes, starres Kupferrohr verwendet und zu einem Rechteckrahmen verbaut (siehe Abbildung 31.20). Wünschen Sie stattdessen eine Ringform, verwenden Sie WICU-Rohr.

Die N-Stecker, die für das H2000-Kabel verwendet werden, passen auch auf das 22 mm starke Kupferrohr. Sie können einen Rechteckrahmen löten oder einen Ring aus gleich starkem WICU-Rohr verwenden.



Abbildung 31.18 Magnetic-Loop aus Koaxialkabel

Vor dem Auflöten des N-Steckers, der im Rohrinneren noch etwas Spiel hat, bringen Sie an dem Rohrende einen kurzen Schlitz ein. Sie drücken dort das Rohr zusammen und verwenden anschließend eine großzügige Menge an Lötzinn (Abbildung 31.19). Ein Gaslöter mit entsprechender Heizleistung erleichtert die Arbeit.

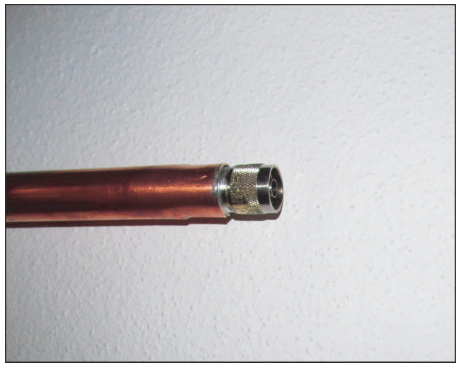


Abbildung 31.19 Anbringung des N-Steckers am Kupferrohr

Der gelötete Rahmen bekommt einen Schutzanstrich verpasst, damit die Oberfläche vor Feuchtigkeitseinflüssen geschützt ist. Im Sanitärbedarf erhalten Sie Kunststoffklammern, die als Aufnahme für den Antennenrahmen dienen. Das Rohr wird damit aufgeklipst.

Die Koppelschleife bringen Sie stets in der Mitte des Umfangs mittels Kabelbinder an. Richten Sie diese hinsichtlich ihrer Form so aus, dass Sie auf den gewünschten Frequenzen die Signale recht stark hören können. (Zuvor schon mit dem Drehkondensator grob abstimmen!) Achten Sie auch darauf, dass die Schleife »Linie auf Linie« zum Rahmen steht!



Abbildung 31.20 Magnetic-Loop aus Kupferrohr

Bauen Sie die Antenne auf. Verbinden Sie das Antennenkabel mit Ihrem Funkgerät. Die Fernbedienung verbinden Sie mit einem Kabel, das an beiden Enden Cinch-Stecker hat, mit der Abstimmeinheit (Abbildung 31.15 und Abbildung 31.16).

Die Abstimmung ist einfach: Mit dem Taster T2 bestimmen Sie die Richtung und schalten den Motor ein. Mit T1 wird zwischen halber (langsam) und voller Spannung (schnell) gewählt. Beide Kipptaster müssen gleichzeitig betätigt werden, damit sich der Abstimmmotor bewegt.

Bezüglich der Montage gilt:

- Es dürfen keine brennbaren Gegenstände im unmittelbaren Umfeld vorhanden sein.
- stehende Montage: alle Erhebungswinkel vorhanden, daher für Regional- und Fernverbindungen (DX) geeignet
- liegende Montage: extrem flacher Abstrahlwinkel, gut für Fernverbindungen

Bezüglich der Berechnung der BEMV-Sicherheitsabstände helfen die Programme Watt32 bzw. Wattwächter weiter (siehe Abschnitt 30.4). Bei einem Eigenbau wählen Sie im Programm eine Ausführung, die vom Durchmesser her Ihrer Eigenbauantenne am nächsten kommt. Auf dieser Grundlage führen Sie Ihre Berechnungen durch. Grob abgeschätzt gilt, dass es bei einer Sendeleistung kleiner-gleich 5 Watt zu keiner Überschreitung der 10-Watt-EIRP kommt.

Der Eigenbau rentiert sich hier, denn die Preise für industriell hergestellte magnetische Antennen sind hoch – es ist schließlich Präzisionsarbeit notwendig.

31.4 Aufbau von industriell hergestellten Antennen

Ein Teil der Antennen stammt aus Asien oder den USA – und damit von außerhalb des metrischen Maßsystems! Sie finden bei diesen Antennen die für den Aufbau notwendigen Maßangaben manchmal nur in Inch vor. Wenn Sie sich ein Maßband mit Inch- und Meterskala anschaffen, gestaltet sich die Arbeit leichter. Im anderen Fall müssen Sie umrechnen.

Umrechnung von Inch in Meter und umgekehrt

- 1 inch (in.) = 25,4 mm
- 1 foot (ft) = 12 inch = 304,8 mm
- 1 m = 39,370 inch

Besonders bei Kurzwellenantennen für die längeren Bänder müssen Sie sich beim Aufbau entscheiden, welchen Teil eines Funkbands Sie überwiegend nutzen möchten. Aus den Bandplänen der IARU erkennen Sie die Regel, dass das Band an der unteren Frequenz mit den schmalbandigen Sendearten belegt ist und dass zum oberen Bandende hin jene Sendearten mit mehr Bandbreite liegen. In den Anleitungen finden Sie die Bezeichnungen CW, MIXED und PHONE.

Zu den schmalbandigen Sendearten zählen Morsetelegrafie (CW), aber auch viele digitale Spielarten (PSK-XX, FT-8). So müssen Sie beim Aufbau Ihre Entscheidung treffen.

Antennen für die mechanisch kurzen Bänder (VHF/UHF) sind beim Zusammenbau weniger anspruchsvoll. Sie müssen weder Drähte über lange Distanzen spannen noch benötigen Sie irgendwelche Anpassvorrichtungen.

31.5 Von Masten und Rotoren

Der freistehende Mast auf dem eigenen Grundstück ist für viele Amateurfunker sicherlich ein Traum. Aber auch für jene, bei denen dies Wirklichkeit ist, gibt es einiges zu beachten:

- das Baurecht (unterschiedlich von Bundesland zu Bundesland) und kommunale Bauvorschriften
- Gegebenenfalls ist eine Blitzschutzerdung notwendig bzw. eine Verbindung mit bestehendem Blitzschutz.
- die Windlast der gesamten Anlage
- Gegebenenfalls müssen Sie den Rotor durch Oberlager entlasten (das reduziert das Biegemoment).
- wartungsfreundlicher Aufbau: Nutzen Sie eine Kurbelwinde zum Umlegen oder ein Schlittensystem.

Kann wenigstens das Hausdach genutzt werden, gilt im Grunde das Gleiche, nur dass der Aufbau mit meist weniger Aufwand gelingt. Hier müssen Sie in jedem Fall für den geeigneten Blitzschutz sorgen.

Rotoren sind über ein Steuerkabel mit dem Funkraum verbunden. Dies müssen Sie für die notwendigen Kabeltrassen mit einplanen. Rotoren müssen zur Wartung und Pflege erreichbar sein. Sie können auf dem Dach die notwendigen Tritte (wie für den Rauchfangkehrer/Kaminkehrer) anbringen und den Mast als Schiebemast ausführen. Denken Sie auch an Befestigungsmöglichkeiten für Ihren Sicherheitsgurt, der schlimme Unfälle verhindert.

Kapitel 32
Funkbetrieb außerhalb der eigenen vier Wände

Funkbetrieb mit zum Teil vereinfachter, tragbarer Ausrüstung kann viele Anlässe haben:

- »Bergfunker« (*Summits on the Air* [SOTA]): Funkbetrieb von Berggipfeln aus – eine sehr sportliche Mischung aus Bergwandern/Bergsteigen und Funken (Wettbewerbscharakter)
- »Inselfunker« (*Islands on the Air* [IOTA]): Funkbetrieb von Inseln aus (Wettbewerbscharakter)
- Notfunk, meist im Übungsbetrieb, aber auch im Echteinsatz
- *Fieldday* der Amateurfunkvereine
- vom Schrebergarten aus und aus Spaß am Funken draußen

Auch alle, die zu Hause keinen vernünftigen Funkbetrieb einrichten können, sind oftmals von Gärten oder Campingplätzen aus QRV.

Solange die Funkstelle während des Betriebs bewegt werden kann, z. B. Handfunksprechgerät, Portabelfunkgerät mit direkt befestigter Antenne, brauchen Sie bezüglich der BEMV-Vorschriften nichts zu unternehmen. Sobald eine Komponente der Anlage irgendwo befestigt wird, müssen Sie beim Überschreiten der 10-Watt-EIRP eine BEMV-Anzeige für den Außeneinsatz fertigen. Mit einer Senderausgangsleistung von 5 Watt ERP an einem Dipol bleiben Sie gerade noch unter dieser Grenze. Gleiches gilt für eine Trap-Groundplane wie die *Fritzel GPA-50*. Bei regelmäßigem Betrieb vom gleichen Grundstück aus kann auch die Meldung des weiteren Standorts bei der Bundesnetzagentur notwendig sein.

Oftmals kommt bei diesen Einsätzen abseits des heimischen Funkraumes eine QRP-Ausrüstung zum Einsatz. Um als QRP-Station zu gelten, dürfen bei Morsetelegraphie (CW) maximal 5 Watt Senderausgangsleistung auf die Antenne gegeben werden. Bei SSB werden von vielen Amateurfunkvereinigungen 10 Watt PEP als oberste Leistungsgrenze genannt. Es gibt keine offizielle Regelung dazu.

QRP ist auch für Selbstbauer interessant, da die Funkgeräte oder auch nur die Sender wegen der geringen Leistungen oftmals auch hinsichtlich der Bauweise spartanisch ausfallen können. Es gibt spezielle Seriengeräte für den QRP-Betrieb (Yaesu FT-818, nur noch gebraucht erhältlich, ICOM IC-705). Leistungsstärkere Funkgeräte verfügen meist über eine manuelle Einstellmöglichkeit für die Senderausgangsleistung, so dass Sie damit ebenso QRP-Betrieb durchführen können.

Auch von zuhause aus können Sie natürlich QRP-Betrieb durchführen.

32.1 Stromversorgung

32.1.1 Kabelverbindungen

Das hier Gesagte gilt auch für den stationären Funkbetrieb, wenn eine Gleichstromversorgung genutzt wird.

Nach der Norm IEC 60228 sollten Sie die Kabelquerschnitte bezüglich der maximalen Stromstärke beachten (siehe Tabelle 32.1). Im schlimmsten Fall wird ein zu dünnes Kabel warm, sogar heiß und löst unter Umständen einen Brand aus!

Kabelquerschnitt (mm²)	Maximaler Strom (A)	Absicherung (A)
1,5	15	10
2,5	20	16
4	25	20

Tabelle 32.1 Kabelquerschnitt und maximaler Strom

Als Sicherungen verwenden Sie die bekannten Kfz-Schmelzsicherungen oder auch Automaten. Diese gibt es als Flachsteckeinsätze (analog den Schmelzsicherungen) und für den Frontplatteneinbau (technische Informationen hierzu finden Sie unter *https://www.e-t-a.de*).

Wegen des Spannungsabfalls halten Sie die Kabelverbindungen so kurz wie nur möglich. Ein Mehr an Länge gleichen Sie durch einen höheren Kabelquerschnitt aus.

Netzteil, Funkgerät und Zusatzgeräte müssen miteinander verbunden werden. Dabei darf es keine großen Kontaktprobleme geben, und die Verbindungen sollten, wenn möglich, verpolungssicher sein. Speziell für 4-mm-Buchsen mit Verschraubung kommen Gabelkabelschuhe (siehe Abbildung 32.1) zum Einsatz.

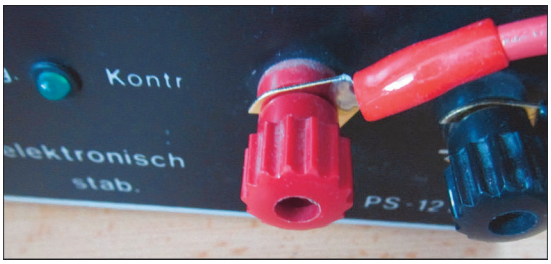


Abbildung 32.1 Verbindung mit Gabelkabelschuhen

Hier können Sie auch hohe Ströme übertragen. Leider ist diese Methode nicht verpolungssicher, außer Sie verwenden z. B. einen Gabelkabelschuh für den Pluspol und einen 4-mm-Stecker für den Minuspol.

Klassisch werden seit Jahrzehnten die 4-mm-Bananenstecker (siehe Abbildung 32.2) und -buchsen verwendet. In der Hektik und bei schlechter Beleuchtung können aber die Farben und damit die Pole vertauscht werden.

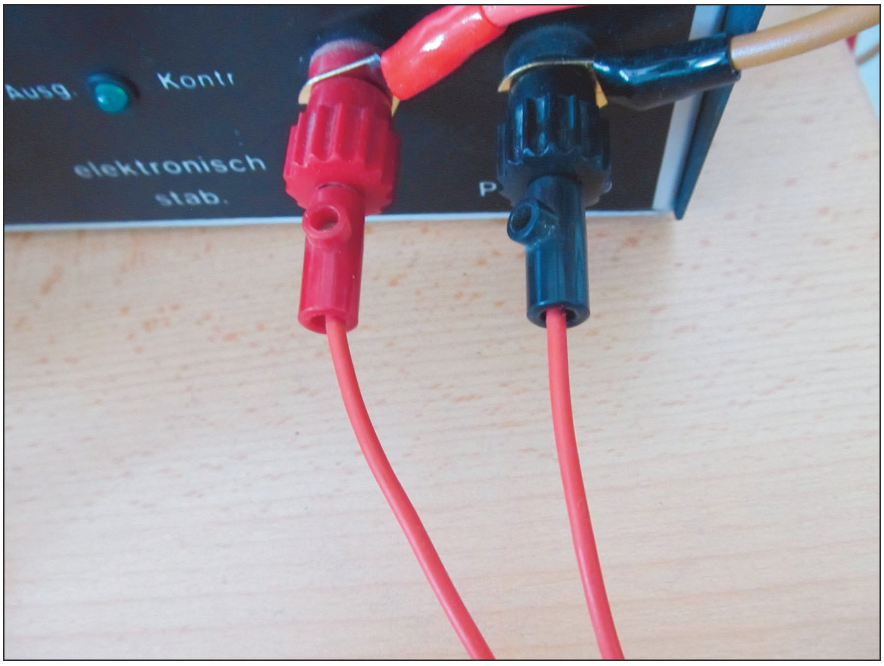


Abbildung 32.2 Bananenstecker

Als Alternative zu den Bananensteckverbindungen bietet sich das Anderson-Power-Pole-System an. Hier gibt es keine Stecker und Buchsen; jeder Steckverbinder kann jede Aufgabe übernehmen. Es gibt hier genauso Einbaukontakte für die Gehäusemontage wie Kabelverbinder. Stromstärken bis 120 Ampere (z. B. in Flurförderzeu-

gen) sind damit möglich. Für die Belange im Amateurfunkbereich reichen meist Ausführungen bis 30 Ampere. Die Kabel müssen gecrimpt werden. Details erfahren Sie auf der Herstellerseite unter *https://www.andersonpower.com* und im Funkfachhandel.

Aus dem Boots- und KFZ-Bereich stammen die DIN-Einbau-Normsteckverbinder (siehe Abbildung 32.3). Diese sind verpolungssicher. Es gibt Kupplungen und Einbaudosen, auch mit Schutzdeckel. Die Dosen werden meist per 6,3-mm-Flachstecker mit dem Kabel verbunden. Die Normstecker sind auch als Universalmodelle für die (kleineren) Einbaudosen und den Zigarettenanzünderanschluss erhältlich, zum Teil mit eingebauter Schmelzsicherung. Adapter, um Geräte mit dem größeren Zigarettenanzünderstecker an einer Normeinbaudose anzuschließen, existieren ebenfalls. Normstecker gibt es in Ausführungen mit 8, 16 und 20 Ampere Strombelastung, die Dosen ebenso bis 20 Ampere (bei 2,5-mm^2-Kabel).



Abbildung 32.3 Kfz-Normstecker und Einbaudosen

32.1.2 Energiequellen

Wenn Ihre Gartenlaube oder der Campingplatz an das öffentliche Stromnetz angeschlossen ist, verwenden Sie natürlich Ihr Netzteil.

Abseits vom öffentlichen Stromnetz aber benötigen Sie zumindest für den zeitweisen Einsatz entweder Einwegbatterien (Primärelemente) oder – viel besser – Akkumulatoren. Die Nutzung von Einwegbatterien bietet sich in nur ganz wenigen Notfällen an. Für (ältere) Handfunksprechgeräte gibt es im Sonderzubehör Batterieaufnahmen, in die sowohl Akkus als auch Einwegzellen passen, meist in den Größen AA oder AAA.

Für den 12-Volt-Bereich kommen »Weidezaun«- oder »Laternenbatterien« (siehe Abbildung 32.4) in Betracht. Diese haben eine Spannung von 6 Volt, sodass immer zwei Stück benötigt werden. Sie finden sie im Verkaufssortiment des Landwirtschaftsbedarfs.



Abbildung 32.4 Weidezaun- bzw. Laternenbatterie

Passend dazu gibt es von diversen Campingartikelherstellern Behälter mit einer Zigarettenanzünderdose (siehe Abbildung 32.5). Der Universalstecker kann hier zum Einsatz kommen.



Abbildung 32.5 Batteriebehälter

In Tabelle 32.2 finden Sie einen Vergleich der für den Amateurfunk einsetzbaren Akkutypen. Nicht aufgeführt sind jene Akkus, die »offen« sind, also gasen oder auslaufen können (z. B. Nickel-Eisen-Akkus oder Blei-Säure-Akkus). Diese können Sie

aber durchaus fest installiert in einem Gartenhaus oder einer Berghütte vorhalten. Beachten Sie hier aber unbedingt die Einbau- und Betriebshinweise (Temperaturen, Knallgasbildung).

Akkutyp	Eigenschaften
Lithium-Ionen-Akku	▸ Sie sind oft bereits bei neueren Handfunksprechgeräten in Verwendung. ▸ »Power-Banks« für 5-Volt-USB-Anschlüsse können an solchen Geräten verwendet werden. ▸ Bei falscher Handhabung kann der Akku explodieren oder Brände auslösen. ▸ Benötigt spezielle Zellenüberwachung und Ladetechnik.
Blei-Vlies-Akku (AGM)	▸ Kann mit jedem (einstellbaren) Bleibatterieladegerät geladen werden. ▸ hohes Gewicht ▸ unkomplizierte Handhabung
$LiFePO_4$-Akku	▸ hohe Energiedichte; bei gleicher Kapazität nur 1/3 des Gewichts eines vergleichbaren Blei-Vlies-Akkus ▸ Mit Blei-Vlies-Akkus kompatible Akkublöcke sind erhältlich.
Nickel-Hydrid-Akku	▸ in Standardgrößen (A, AA, AAA und 9-Volt-Block) erhältlich. ▸ Zellen mit Anschlussfahnen sollten punktverschweißt werden. ▸ robust und unkompliziert

Tabelle 32.2 Akkutypen

Verwenden Sie passende Ladegeräte, die auf die einzelnen Akkutypen eingestellt sind. Ziehen Sie die Datenblätter der Akkus zurate. Wählen Sie eine etwas niedrigere Ladeschlussspannung und eine etwas höhere Entladeschlussspannung. Dies erhöht die Lebensdauer (Zyklenzahl) teilweise erheblich.

Achten Sie auch auf die Hinweise bezüglich des Temperaturbereichs, in dem der Akku benutzt werden kann: Ein Zuviel an Hitze oder Kälte schränkt die Nutzbarkeit ein oder führt gar zu Beschädigungen.

Überwachen Sie die Akkuspannung beim Empfangsbetrieb. Einige Funkgeräte (z. B. FT-817 und FT-818) können die Betriebsspannung im laufenden Betrieb anzeigen.

Die Größe und damit das Gewicht des transportablen Energiespeichers werden durch die Leistungsaufnahme des Funkgeräts und die Betriebsdauer bestimmt. Die Kapazität (C) steigt natürlich mit dem Gewicht des Akkus – das Sie dann aber eventuell im Rucksack auf den Berg schleppen müssen.

2 Ah bis 4 Ah reichen für viele Stunden Funkbetrieb mit einem FT-817/818 aus, Gleiches gilt für Handfunksprechgeräte. Wenn Sie ein Funkgerät verwenden, das schon beim Empfang 0,5 Ampere und mehr schluckt, sollten Sie schon zwischen 10 Ah und 30 Ah vorsehen. Die Reduzierung der Sendeleistung auf das Notwendige verhilft ebenso zu einer längeren Betriebsdauer. Natürlich wird die Größe auch von der Lademöglichkeit beeinflusst. Kann mittels einer weiteren Stromversorgung geladen oder gar gepuffert werden, darf der Energiespeicher kleiner ausfallen.

32.1.3 »Strom verpackt«

Niemand steckt einfach so einen Akkublock in den Rucksack und macht sich damit auf den Weg ins Grüne. Allein die Möglichkeit, dass leitende Gegenstände die Anschlüsse miteinander verbinden und damit zu einem Kurzschluss führen, sollte Sie davon abhalten. Das Hantieren mit Polzangen und anderen Anschlussmöglichkeiten ist auch nicht die Lösung. Zudem muss der Akkublock abgesichert und gegebenenfalls mit einer Spannungsüberwachung versehen werden.

Spendieren Sie Ihrem Funkakku also eine schützende Behausung! Und auf dieser bringen Sie einen Aufkleber mit allen wichtigen Daten an:

- Typ
- maximaler Ladestrom
- Absicherung (A)
- Ladeschlussspannung
- Entladeschlussspannung

Größere Blei-Vlies- oder auch die leichteren $LiFePO_4$-Akkumulatoren passen gut in einen kleinen Werkzeugkoffer. Das in Abbildung 32.6 gezeigte Modell verfügt im Deckel über zusätzliche Staufächer. Darin sind gut geschützt ein schaltbares digitales Voltmeter und eine Normsteckdose untergebracht (siehe Abbildung 32.7).

Anstelle der sonst üblichen Kippschalter wurde ein Druckschalter verwendet. Bei der Auswahl des Messwerks muss darauf geachtet werden, dass es keine eigene Stromversorgung benötigt, sondern mit der Messspannung gespeist werden kann – bei Drehspul- oder Dreheisenmesswerken ist das kein Problem. Leider sind diese elektromechanischen Anzeigen größer und empfindlicher.



Abbildung 32.6 Stromkoffer



Abbildung 32.7 Steckdose und schaltbares Voltmeter

Der Akkumulator (12 V, 12 Ah) selbst muss dann gut im Koffer befestigt werden (siehe Abbildung 32.8).

Dieser Koffer wird für den Funkbetrieb mit einem IC-718 oder FT-817 verwendet. Allerdings speist er auch einige LED-Lampen, wenn auf dem Land wieder mal ein Schneesturm oder ein Baum die örtliche Stromversorgung unterbrochen hat.

Vor allem auf den kleinen Yaesu FT-818 und seinen Vorgänger zugeschnitten ist der »Flachmann« in Abbildung 32.10. Das Gehäuse ist eine Transportbox für 3,5-Zoll-Festplatten. Sie ist ausreichend stabil und vor allem kompakt.

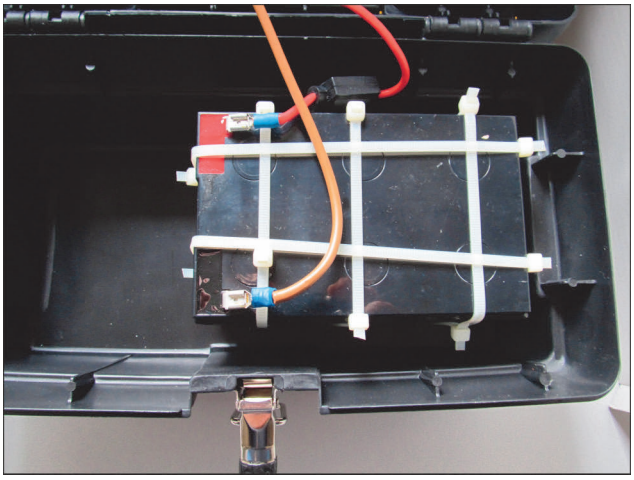


Abbildung 32.8 Befestigter Blei-Vlies-Akku mit Sicherung

Das Innenleben, das Sie in Abbildung 32.9 sehen, besteht aus folgenden Teilen:

- 10 NiMH-Akkus 2,4 Ah
- 1 Batteriehalterung für 10 Zellen der Größe AA
- 1 KFZ-Sicherungshalter im Kabel
- 1 KFZ-Schmelzsicherung 7,5 A
- ca. 25 cm Kabel, 1,5 mm^2, schwarz
- 1 KFZ-Normsteckdose mit Schutzdeckel
- 2 KFZ-Flachstecker 6,3 mm zum Crimpen
- 1 langer Kabelbinder oder ein Stück Verpackungsband aus Kunststoff

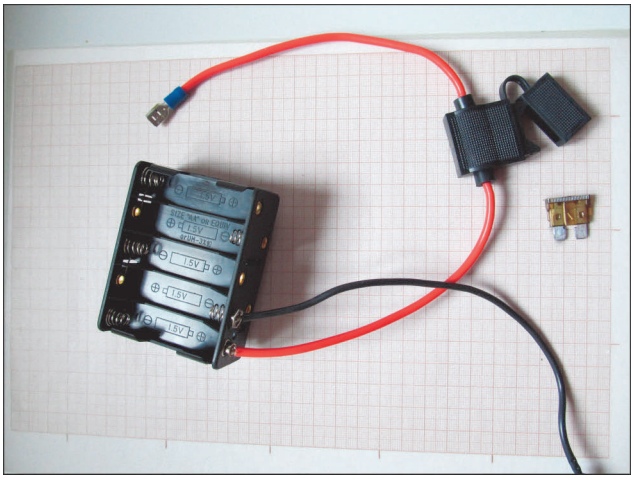


Abbildung 32.9 Das Innenleben des »Flachmanns«

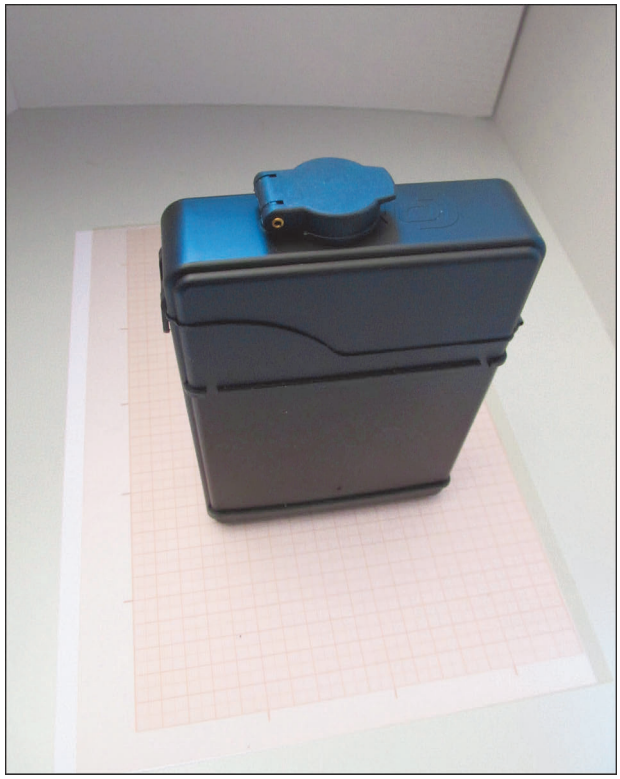


Abbildung 32.10 Der »Flachmann«

Das Sicherungskabel durchtrennen Sie so, dass die Sicherung in der Mitte liegt. Setzen Sie die Sicherung gleich ein. Längen Sie das schwarze Kabel passend ab. Isolieren Sie alle Kabelenden ab. Bringen Sie jeweils einen der KFZ-Flachstecker an jedes Kabel an. Hierfür benötigen Sie eine Crimp- oder Kombizange. Zusätzlich können Sie von der Steckerseite her etwas Lötzinn in den Stecker laufen lassen.

Das freie Ende des roten Kabels schieben Sie durch das Loch des Pluspols der Batteriehalterung und löten es von der Batterieseite her an. Da der Kunststoff bei hohen Temperaturen leicht verformbar ist, müssen Sie auf eine zügige Arbeitsweise achten. Das Gleiche erledigen Sie mit dem freien Ende des schwarzen Kabels. Den Minuspol erkennen Sie am »Krönchen« der Clip-Verbindung. Verbinden Sie die Kabelenden mit den Flachsteckern mit den Anschlüssen der Einbausteckdose. Der äußere Metallkörper wird mit dem schwarzen Kabel (Minuspol), das rote Kabel mit dem Punkt in der Mitte der Dose (Pluspol) verbunden.

Nun müssen Sie die AA-Zellen in die Halterung eindrücken. Achten Sie stets auf die Polung: Feder = Minuspol! Es ist normal, dass man hier durchaus Kraft anwenden muss!

Akkupack

Miteinander punktverschweißte Zellen wären besser geeignet als eine Batteriehalterung und Einzelzellen. Manche Händler von elektronischem Material bieten den hierfür notwendigen Service an und stellen Ihnen ein Akkupack zusammen.

Messen Sie mit einem Vielfachmessgerät nach, ob an den Flachsteckanschlüssen der Einbaudose rund 12 Volt anliegen und die Polarität stimmt. Wenn alles stimmt, nehmen Sie den Kabelbinder oder das Verpackungsband. Drücken Sie es so in den Behälter, dass die Enden an den schmalen Seiten bis zum Rand ragen. Schieben Sie die Batteriehalterung und die Kabel vorsichtig hinein. Wenn Sie irgendwann die Zellen austauschen wollen, können Sie mit dem Kabelbinder/Verpackungsband die Halterung herausziehen.

32.1.4 Spannungs- und Strommessgerät im Eigenbau

In diesem Abschnitt lernen Sie ein kleines, aber durchaus nützliches Selbstbauprojekt kennen. Es muss kaum gelötet werden; saubere Arbeit ist trotzdem notwendig. Hier lernen Einsteiger vor allem etwas über das Zurichten von Gehäusen, weshalb die Anleitung sehr detailliert ausfällt.

Planen Sie hierfür, wenn Teile und Werkzeug bereitstehen, ruhig zwei Stunden ein.

Als Messeinheit wurde hier das *COM-VAM10010* verwendet. Es ermöglicht gleichzeitig die Spannungs- und Strommessung und kann von der Messspannung aus versorgt werden. Die Daten entnehmen Sie Tabelle 32.3. Das Messgerät verfügt über einen integrierten Shuntwiderstand, den Sie in Abbildung 32.11 als dicken silberfarbenen Draht erkennen können.

Eigenschaft	Wert
Betriebsspannung	3,5 V bis 30 V
Messbereich Spannung	0,9 V bis 99,9 V
Messbereich Strom	0 A bis 9,99 A
Anzeigegröße	0,28 Zoll
Anzeigen	Rot: Spannung; Grün: Strom

Tabelle 32.3 Daten des VAM10010

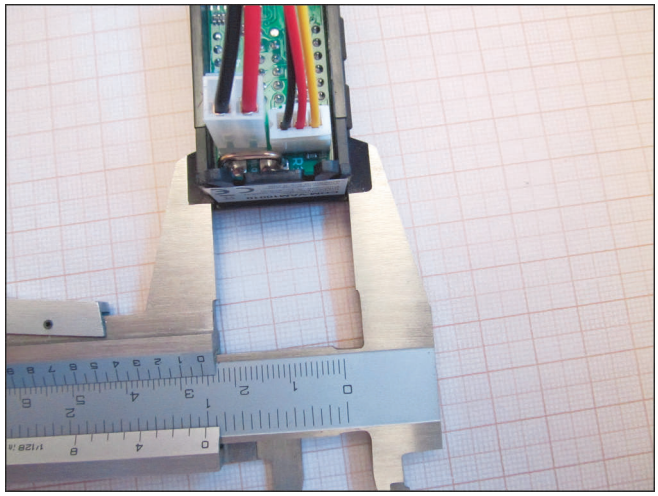


Abbildung 32.11 Die Rückseite des Messgeräts

Das »Messgerät« soll zwischen der Stromversorgung und dem Funkgerät eingeschleift werden. Die Ausführung hier besteht aus einem Gehäuse mit dem Messwerk, einem Kabel mit Normstecker und einer Normeinbaudose. Die Teileliste finden Sie in Tabelle 32.4.

Anzahl	Teil
1	Gehäuse, Kunststoff oder Metall
1	Normstecker (KFZ)
1	Einbaudose (KFZ)
2	Flachstecker 6,3 mm
1	Lüsterklemme 2,5 mm²

Tabelle 32.4 Materialliste

Bei der Wahl des Gehäuses und der Platzierung der Einbaudose müssen Sie die Einbautiefe der Einbaudose berücksichtigen. Im Anschluss beginnen Sie mit dem Anzeichnen der Bohrungen für die Gehäuseöffnungen.

Achten Sie auf Ihre Sicherheit!

- Arbeiten Sie mit einem Bohrständer oder einer Ständerbohrmaschine!
- Fixieren Sie die Werkstücke gegebenenfalls mit einem Maschinenschraubstock!
- Benutzen Sie bei den Bohrarbeiten Schutzbrille und Schutzhandschuhe!

Schützen Sie die Gehäuseteile vor Beschädigungen während der Bearbeitung. Dies kann mit Filzgewebe oder einer leicht abziehbaren Schutzfolie geschehen.

Messen Sie zunächst die Innenmaße des Messwerks mit einem Messschieber (siehe Abbildung 32.11). Mit diesen Maßen fertigen Sie ein Papier- oder Kartonstück an und platzieren es nach Ihren Wünschen am Gehäusedeckel. Mit einem Winkel stellen Sie sicher, dass der Übertrag rechtwinklig gelingt. Setzen Sie mit einem Permanentschreiber die vier Eckpunkte (siehe Abbildung 32.12).

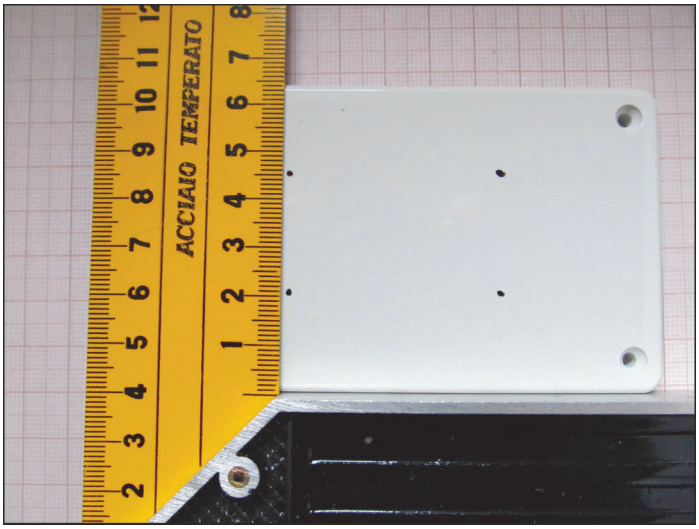


Abbildung 32.12 Anbringen der Eckpunkte

Verbinden Sie die Eckpunkte, sodass der Ausschnitt für das Messwerk dargestellt wird (siehe Abbildung 32.13).

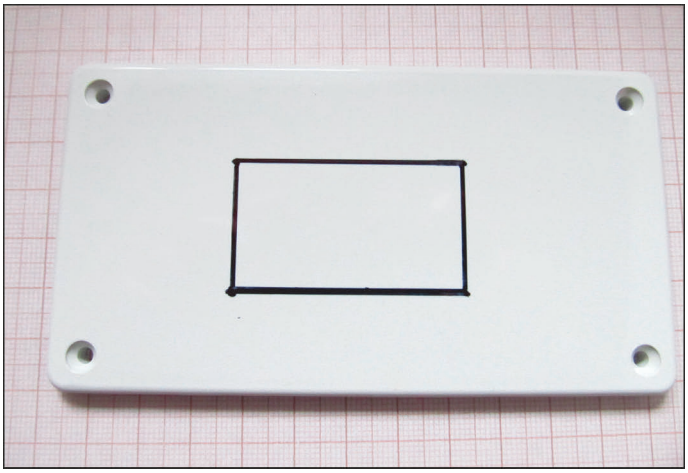


Abbildung 32.13 Aufgezeichneter Ausschnitt

Fertigen Sie die »Einstiegsbohrungen« für die Laubsäge mit einem 4-mm-Bohrer (siehe Abbildung 32.14).

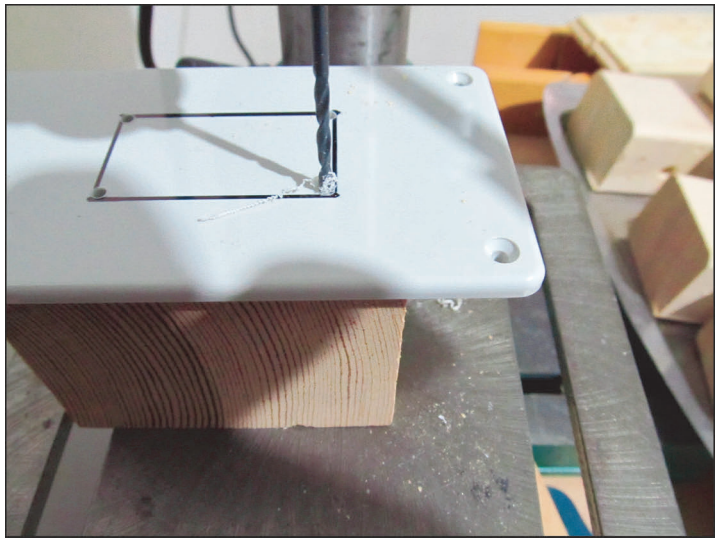


Abbildung 32.14 Fertigen der Bohrungen

Mit der Laubsäge arbeiten Sie sich den Linien entlang und schaffen so den Ausschnitt (siehe Abbildung 32.15).

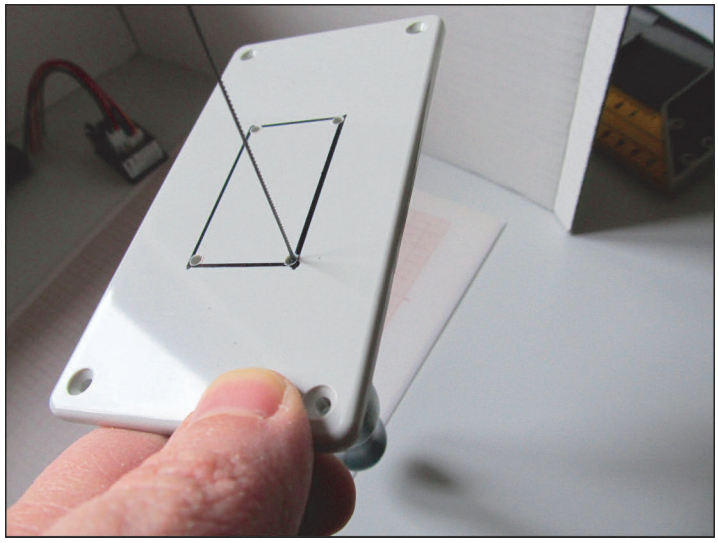


Abbildung 32.15 Anfertigen des Ausschnitts

Versuchen Sie, das Messwerk in die Öffnung einzustecken. Merken Sie sich, wo die Öffnung zu eng ist, und arbeiten Sie mit einer Feile nach. Führen Sie dies in kurzen

Arbeitsschritten durch, und kontrollieren Sie immer wieder, ob das Messwerk durch den Ausschnitt passt. Gefeilt und entgratet, sieht der Gehäusedeckel so wie in Abbildung 32.16 aus.

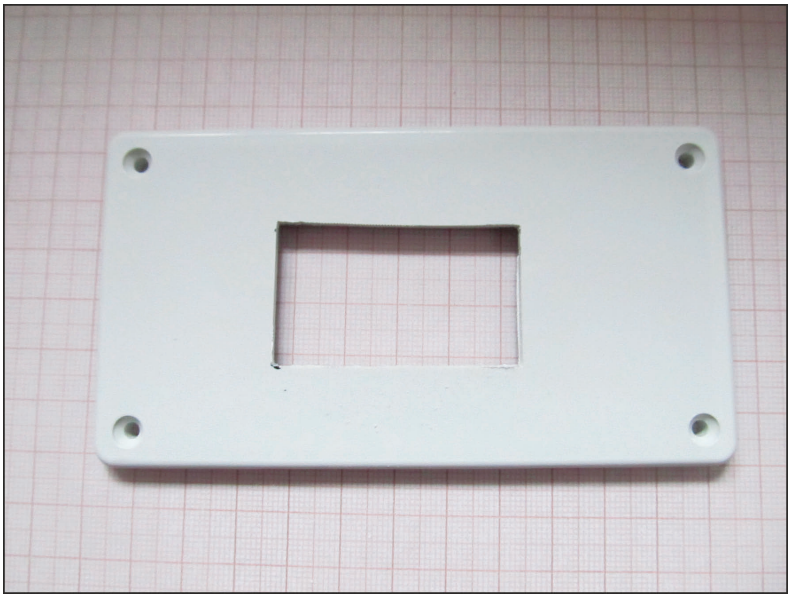


Abbildung 32.16 Gefeilte und entgratete Öffnung

Nun können Sie das Messwerk einrasten lassen. Dabei können Sie vorsichtig die Rastnocken mit einer Zange zusammendrücken. Damit ist der Deckel fertig montiert (siehe Abbildung 32.17).

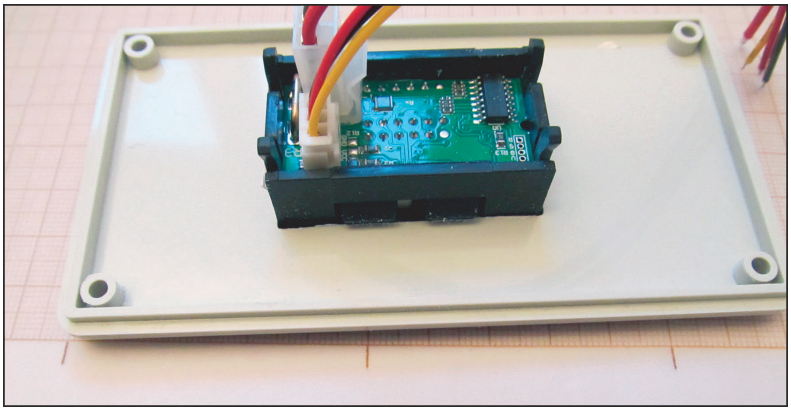


Abbildung 32.17 Eingerastetes Messwerk

Für den Einbau der Öffnungen für Kabel und Normsteckdose benötigen Sie einen Bohrer (4 mm) und einen Schälbohrer (siehe Abbildung 32.18).

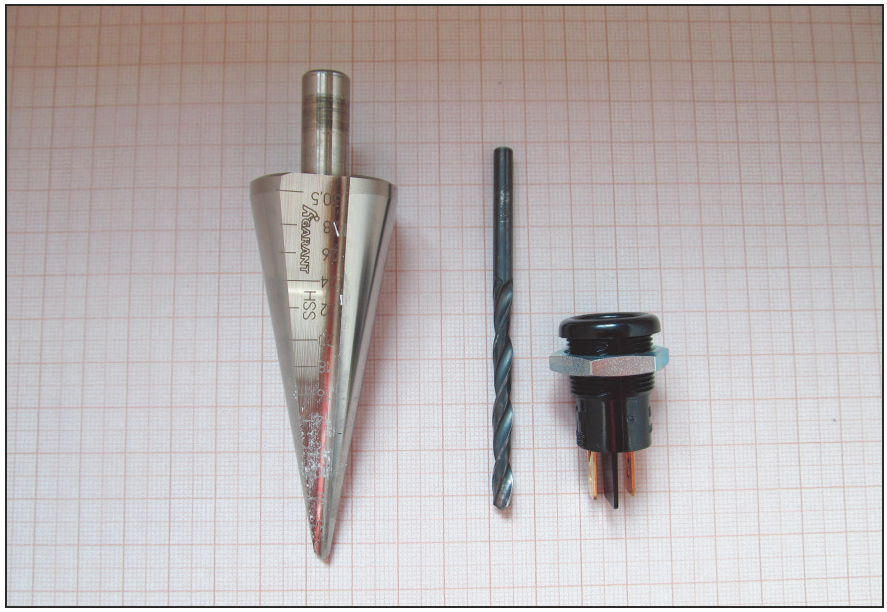


Abbildung 32.18 Bohrer

Zeichnen Sie nun an der Gehäuseschale den Mittelpunkt für die kreisförmige Öffnung für die Normsteckdose an. Darüber hinaus zeichnen Sie auch die Position für die Kabeleinführung an.

Mit dem 4-mm-Bohrer erstellen Sie die Führungslöcher. Spannen Sie die Gehäuseschale gut in einen Maschinenschraubstock ein. Mit dem Schälbohrer fertigen Sie die Öffnung für die Normsteckdose. Lassen Sie den Bohrer nur in kleinen Schritten eintauchen, und kontrollieren Sie immer, ob der Steckdosenkörper »gerade so« durch die Öffnung passt. Die Kabeldurchführung benötigt weniger Durchmesser. Arbeiten Sie auch hier langsam, damit die Öffnung nicht zu weit wird!

Entgraten und versäubern Sie die beiden Öffnungen mit einer Feile und gegebenenfalls einem Messer. Anschließend bringen Sie die Normsteckdose ein und ziehen die Mutter fest. Prüfen Sie den Sitz der Steckdose.

Führen Sie die Kabel durch die dafür angefertigte Öffnung. Mit einem Knoten bilden Sie eine Zugentlastung. Alle Kabelenden isolieren Sie ab.

Stellen Sie die Verdrahtung von Dose und Messwerk her. Der Anschlussplan für das Messwerk zeigt Ihnen die Besonderheiten bezüglich der Speisung durch die Messspannung. Die Normsteckdose wird über die Flachstecker angeschlossen. Beachten Sie die Polarität (außen = Minuspol, innen = Pluspol). Wenn Sie das vorgeschlagene Messwerk verwenden, bleibt das dünne Massekabel ungenutzt.

Abbildung 32.19 zeigt das fertige Innenleben.

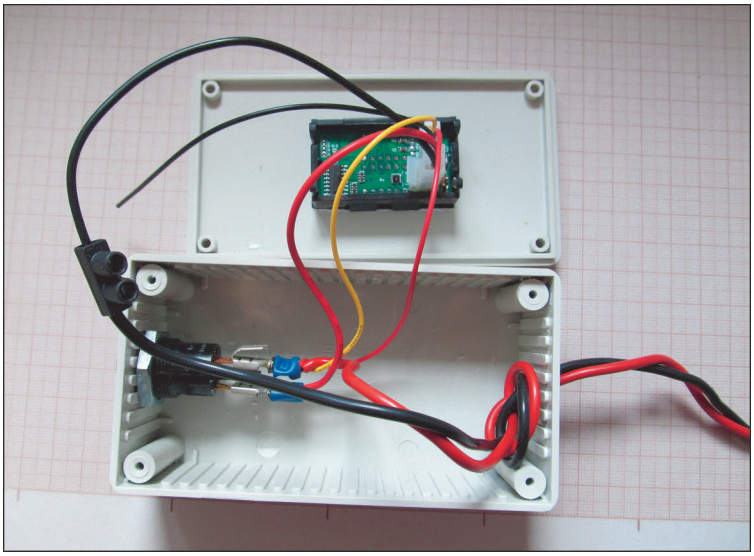


Abbildung 32.19 Innenansicht

Öffnen Sie nun den Normstecker. Die Steckerspitze verbinden Sie mit dem Pluskabel (hier: rot). Die Klammern werden an das schwarze Kabel angeschlossen. Setzen Sie die Zugentlastung wieder auf, und prüfen Sie deren Sitz. Den fertigen Stecker sehen Sie in Abbildung 32.20.

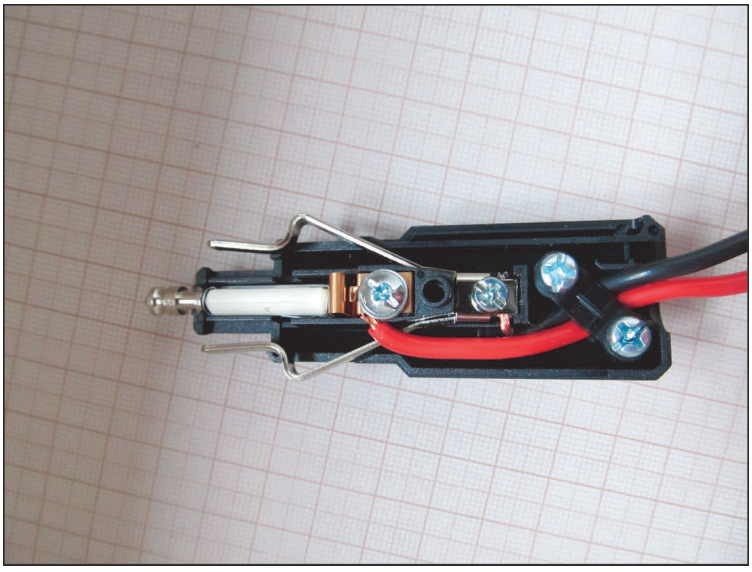


Abbildung 32.20 Innenansicht des Steckers

Kontrollieren Sie die Verkabelung nochmals.

Setzen Sie den Deckel auf die Gehäuseschale, und verschrauben Sie ihn. Das fertige Gerät sehen Sie in Abbildung 32.21.

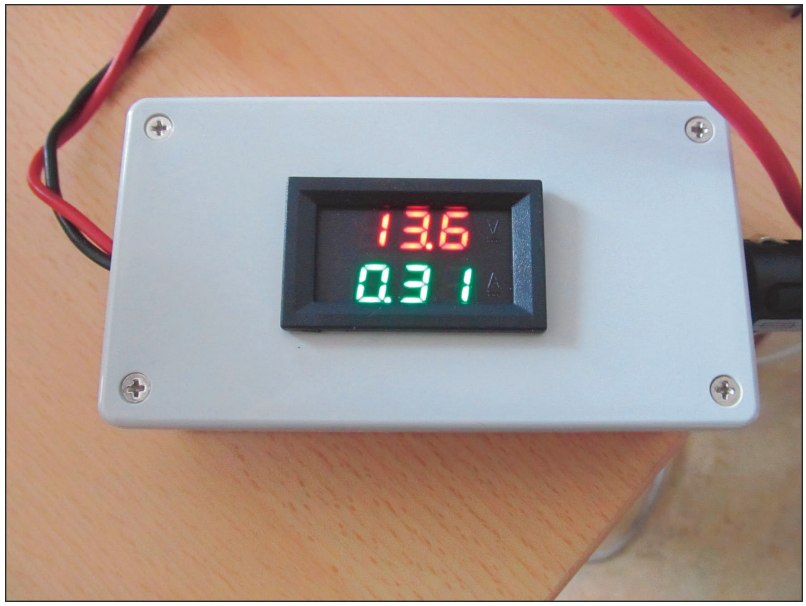


Abbildung 32.21 Das fertige Gerät im Einsatz

32.1.5 Laderegler

Für eine lange Lebensdauer und eine hohe Betriebssicherheit von Akkumulatoren sind vor allem geeignete Laderegler wichtig.

Es gibt besonders aus dem Modellbaubereich universelle Laderegler. Diese können auf den Akkutyp (Blei-Vlies [AGM], NiMH, Lithium-Ionen, LiFePO ...) und die Zellenzahl eingestellt werden. Manche verfügen auch über Akkupflegeprogramme und entsprechende Lade-/Entladevorgänge.

Das in Abbildung 32.22 gezeigte Modell verfügt über ein eingebautes Netzteil, kann aber ebenso mit 12 Volt versorgt werden. Jede stabilisierte 12-Volt-Versorgung (KFZ, Boot, Kleinsolarversorgung ...) kann zum Akkuladen benutzt werden.

Die linke Seite des Geräts (siehe Abbildung 32.23) enthält die Anschlüsse für die Energieversorgung. Sie können das Gerät entweder an 230 Volt oder einer Gleichspannung zwischen 11 und 19 Volt betreiben. Die Gleichspannungsversorgung muss aber einigermaßen stabil bleiben, wenn höhere Ladeströme fließen sollen.



Abbildung 32.22 Akkulader

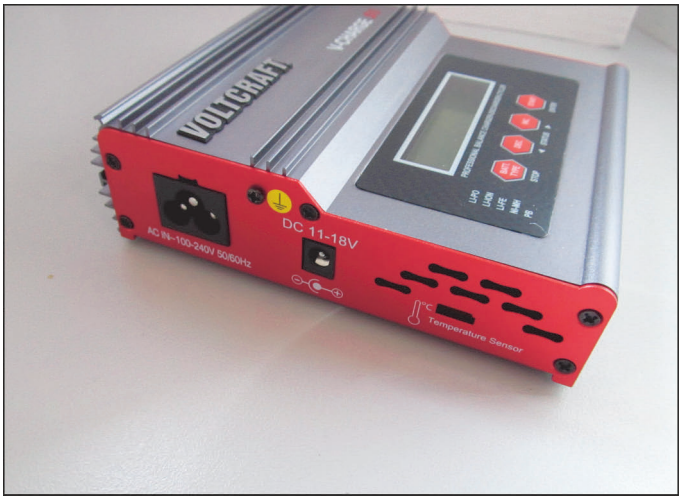


Abbildung 32.23 Versorgung des Akkuladers

An der rechten Geräteseite (siehe Abbildung 32.24) wird der zu ladende Akku angeschlossen. Die 4-mm-Buchsen sind für alle Akkuspannungen nutzbar, die anderen Anschlussmöglichkeiten sind vor allem für konfektionierte Modellbauakkus gedacht.

Weniger aufwendig ist ein Solarlader. Er kommt mit einem weiteren Eingangsspannungsbereich zurecht. Die Eingangsspannung muss aber rund 3 Volt über der Akkuspannung liegen. Dieser Ladereglertyp ist für alle Blei-Vlies-, Blei-Gel- und Blei-Säure-

Akkus geeignet. Außerdem gibt es »kompatible« $LiFePO_4$-Akkumulatoren, die aufgrund interner Schutzschaltungen wie die unterschiedlichen Blei-Akkus geladen werden können. Diese Laderegler werden als Fertigmodule (siehe Abbildung 32.25) oder auch als Bausätze angeboten.



Abbildung 32.24 Die Anschlussseite für den Akku

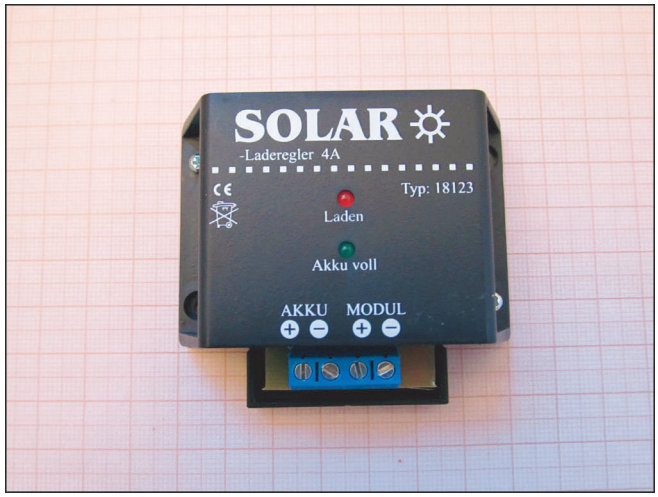


Abbildung 32.25 Solarladeregler

32.1.6 Quellen für den Ladestrom

Abseits vom öffentlichen Stromnetz haben Sie verschiedene Möglichkeiten, die notwendige elektrische Energie für das Laden von Akkumulatoren bereitzustellen. Auch ein Pufferbetrieb kann bei mancher Lösung durchaus infrage kommen. Wenn Sie Ihr

Funkgerät direkt versorgen möchten, benötigen Sie eine Spannungsstabilisation, wie sie auch in Netzteilen zur Anwendung kommt. Zudem ist ein Puffer mit Speicherkondensatoren sinnvoll. Kurzfristige Spannungsschwankungen gleichen Sie damit aus.

Kurbelgeneratoren sind sowohl als ausgesondertes Militärmaterial (»Surplus«) als auch als Neugeräte im Handel zu beziehen. Suchen Sie sich ein Gerät aus, mit dem Sie auch mal ein oder zwei Stunden durchhalten. Ein Handfunksprechgerät kann damit wieder für eine bestimmte Zeit aktiviert werden. (Natürlich können Sie das Gerät mit einem 5-Volt-USB-Anschluss auch für das Smartphone verwenden.) Abbildung 32.26 zeigt Ihnen ein Modell der ehemaligen Sowjetarmee, das auf Flohmärkten angeboten wird. Es ist sehr massiv und verfügt über eine umschaltbare Spannungs- und Stromanzeige. Den auf diesem Messgerät angezeigten Spannungswert müssen Sie verdoppeln.



Abbildung 32.26 Kurbelgenerator

Während mit dem »militärischen Gerät« rund 12 Volt bereitstehen, geben »moderne« Kurbelgeneratoren eine Spannung von 5 Volt ab, meist über einen USB-Anschluss.

Bei dieser Art der Stromerzeugung spüren Sie im wahrsten Sinne des Wortes, dass hier Arbeit verrichtet wird, die normalerweise von Maschinen geleistet wird.

Thermoelektrische Generatoren wandeln Wärme ohne Umwege direkt in elektrische Energie um. Überwiegend werden sie in der Raumfahrt und im Militärbereich eingesetzt. Der Wirkungsgrad dieser Systeme ist nicht besonders hoch. Dafür sind diese Stromerzeuger in der Regel geräuschlos, es sei denn, der Kühlerlüfter läuft. Die

Wärmequelle kann ein Gas- oder Spirituskocher, aber auch ein mit Holz befeuerter Küchenherd sein. Direkt über offenem Feuer kann man so ein Gerät auch betreiben, es verschmutzt dann aber stark. Setzen Sie es dann lieber auf eine glatte Metallplatte auf, die wiederum vom Feuer berührt wird.

Der Thermogenerator gibt bei zu hoher Temperatur einen Warnton ab. In diesem Fall sollten Sie ihn von der Wärmequelle entfernen oder die Wärmeabgabe reduzieren. Andernfalls wird der Stromerzeuger zerstört.

Abbildung 32.27 zeigt ein 15-Watt-Modell, das Sie im Internet bestellen können. Es ist auch als 45-Watt-Ausführung erhältlich.

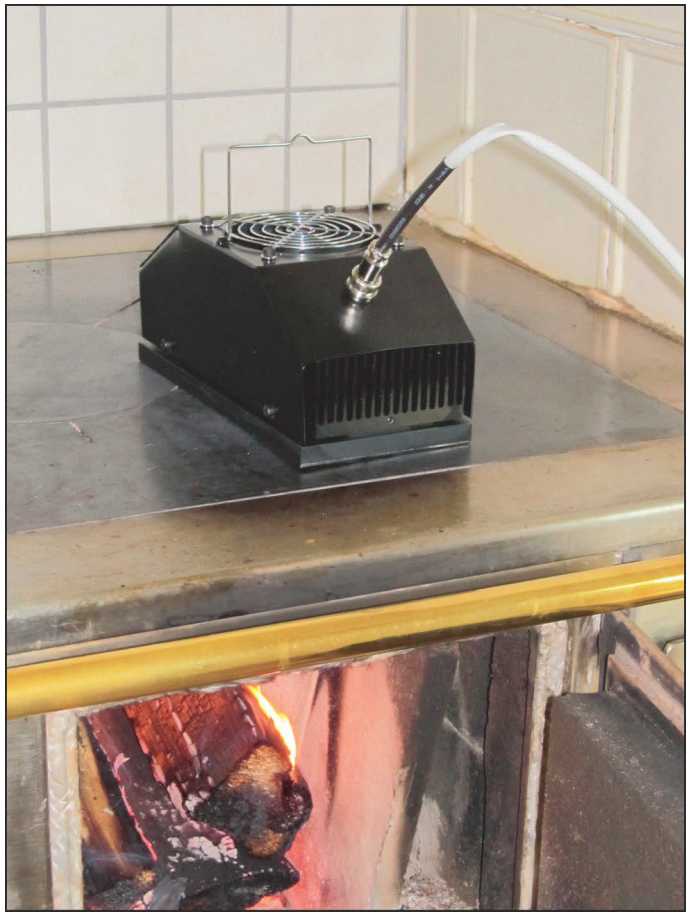


Abbildung 32.27 Thermogenerator im Einsatz

Sie haben zwei Anschlussgarnituren bei diesen Geräten: Eine gibt die erzeugte Spannung ungeregelt ab. Damit können Sie dann über einen Laderegler einen Akku laden.

Die andere gibt 12 und 5 Volt stabilisiert ab. Die Kabel (siehe Abbildung 32.28) sind mit hitzebeständigem Material isoliert.

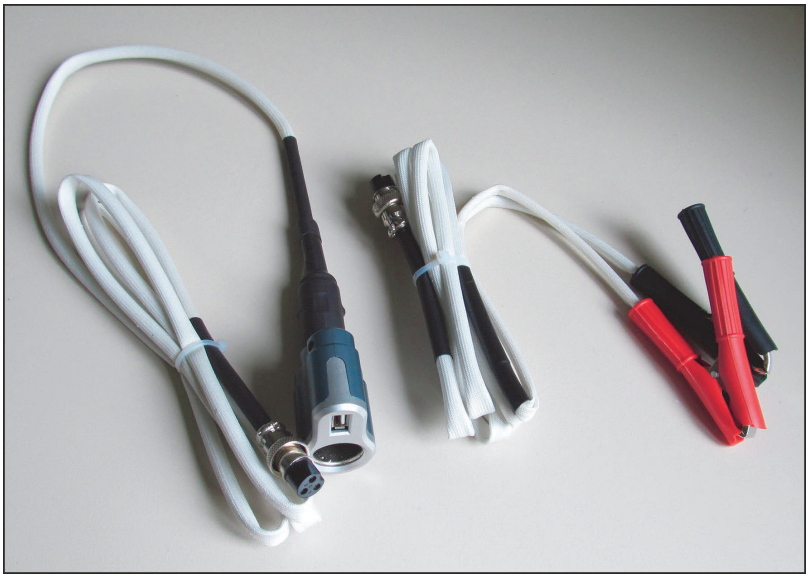


Abbildung 32.28 Anschlusskabel des Thermogenerators

Natürlich sind für Berghütten, Wohnmobile und Schrebergartenhäuschen Solarzellen und Kleinwindanlagen ideal für die Stromversorgung. Auf Booten, aber auch an fließenden Gewässern bieten sich kleine Schleppturbinen an.

32.2 Funkkoffer

In einem Funkkoffer oder -rucksack transportieren Sie Ihr Funkgerät, den Akku und unbedingt notwendiges Zubehör. Wichtig ist, dass alle Gegenstände gut befestigt sind, damit beim Transport kein Schaden auftritt. In einen einfachen Aktenkoffer passen ein FT-818 und ein zusätzlicher Akku samt Drahtantenne. Eine Nummer größer sind Sie mit einem Handkreissägenkoffer aus Stahlblech unterwegs. In ihn passt ein größeres Funkgerät samt Stromversorgung und Antennenanpassgerät, falls notwendig. Natürlich können Sie auch aus Mehrschichtplatten, Sperrholz und entsprechenden Kofferbeschlägen einen Koffer nach eigenen Vorstellungen anfertigen. Gute Anregungen hierfür kommen auch aus dem Notfunkbereich.

Für den »Bergfunker« genügen ein kleines, leichtes Funkgerät, ein Zusatzakku und die Antenne. Das alles zusammen wiegt nicht viel und nimmt im Rucksack wenig Platz ein.

Im Internet zeigen Funkamateure eine Vielzahl von Lösungen rund um dieses Thema: Suchen Sie nach den Begriffen »Funkkoffer« oder »Notfunkkoffer«. Vergessen Sie bei Ihren Eigenbauten nicht, dass im Sendebetrieb Abwärme entsteht, die auch abgeführt werden muss. Bauen Sie das Funkgerät also »luftig« ein. Meist befinden sich auf der Oberseite oder der Rückseite die Kühlkörper der Sendeendstufen. Hier muss kühlende Luft durchziehen können!

32.3 Antennen für den Portabeleinsatz

Antennen für den Portabeleinsatz müssen drei Eigenschaften aufweisen: wenig Gewicht, kleines Packmaß und Robustheit (auch bei häufigem Zusammen- und Abbau).

Für Kurzwellenfunker eignen sich leichte Drahtantennen, die z. B. mit zerlegbaren Glasfibermasten gespannt werden können. Hier können Sie Dipole, FD3/FD4 oder endgespeiste Ausführungen (*HyEndFed*) verwenden.

Abbildung 32.29 zeigt eine ältere Ausführung der HyEndFed-Antenne für die Bänder 10 m, 20 m und 40 m. Sie ist ca. 12 m lang. Weitere Angaben und die aktuellen Ausführungen dieser Antennen finden Sie auf der Website des Herstellers unter *https://www.hyendcompany.nl*.



Abbildung 32.29 HyEndFed für den Portabeleinsatz

Mit dem Endisolator kann die Antenne einfach am Ende eines Glasfibermastes befestigt werden (Abbildung 32.30).



Abbildung 32.30 Endisolator der HyEndFed auf der Spitze eines GFK-Mastes

Wenn Sie am Standort Ihrer Funkaktivitäten auf eine andere Spannmöglichkeit für eine Drahtantenne zurückgreifen können, müssen Sie keinen auch noch so leichten GFK-Mast mitführen. Meist besteht das Problem darin, dass man entweder an dem Baum oder dem Gipfelkreuz hochklettern müsste und ein Seil, mit dem man die Antenne hochzieht und spannt, irgendwie »herumbekommen« muss.

Hier hilft entweder eine spezielle Vorrichtung, die aus einer Angelrolle und einer Zwille besteht, oder Sie nähen sich aus einem robusten Stück Stoff (Jeans, dickes Leinen) eine Wurftasche. Diese befüllen Sie am Aufbauort mit kleinen Steinen, binden das Führungsseil daran und werfen diese über das Gipfelkreuz oder den Baum. Am freien Seilende hängen Sie Ihre Drahtantenne ein – und schon sind Sie QRV. Die Wurftasche finden Sie in Abbildung 32.31. In der Mitte der Taschenöffnung befinden sich zwei gegenüberliegende Nieten. Durch deren Bohrungen wird das Seil gezogen und verknotet.



Abbildung 32.31 Wurftasche mit dünnem Seil

Wenn Sie unabhängig von Spannmöglichkeiten agieren wollen, brauchen Sie eine Antenne, die sich selbst trägt. Für den Portabelfunk bieten sich entsprechend lange Teleskopantennen (es gibt sie bis 5 m Länge) an, die Sie mit einem Anpassgerät abstimmen. Auch lange Mobilstrahler für Kurzwelle sind hier gute Alternativen. Für dem Mehrbandbetrieb bieten einige Hersteller Portabelantennen an wie *Buddipole*, *Buddistick*, *I-Pro Traveller*, *MP-1* oder *HF-P1*. Diese Antennen benötigen alle Radiale für eine brauchbare Abstrahlung. Sie arbeiten überwiegend mit Verkürzungsspulen. Damit werden die Antennen schmalbandig, und von der kostbaren Sendeenergie wird, je tiefer die Frequenz ist, weniger abgestrahlt.

Da sind dann auch die magnetischen Antennen durchaus Alternativen. Die *Chameleon P-Loop* deckt die Bänder 40 m bis 10 m ab und ist zerlegbar. Eine leichte magnetische Antenne können Sie einfach selbst bauen. Der Abstimmkondensator kann über eine lange, isolierte Kunststoffachse betätigt werden. Etwas Sicherheitsabstand schadet aber auch hier nicht, selbst bei geringen Sendeleistungen.

Handfunksprechgeräte und Portabelfunkgeräte für die Funkbänder ab 144 MHz haben angeschraubte Antennen. Mit diesen ist FM- oder Digitalbetrieb möglich, da hier mit vertikal polarisierten Antennen gearbeitet wird. Für Verbindungen in SSB und CW benötigen Sie aber eine horizontal strahlende Antenne.

Für den Betrieb auf den VHF- und UHF-Bändern gibt es einige kompakte, aber leistungsfähige Antennenformen. Die *HB9VC*-Antennen (Monoband) gibt es zerlegbar und rucksackgerecht für die »Bergfunker« (siehe Abbildung 32.32).

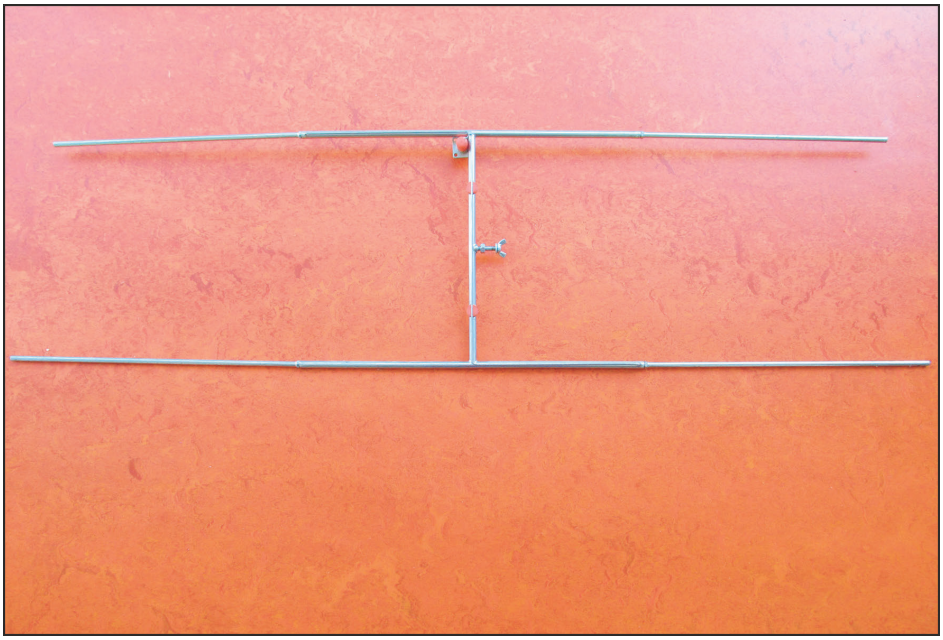


Abbildung 32.32 HB9CV-Antenne

Anjo stellt eine kleine LPDA-Antenne her, die zerlegt problemlos mitgenommen werden kann. Ein kleiner GFK-Mast mit zwei oder drei Metern Höhe reicht aus, um damit Betrieb zu machen. (Abbildung 30.13 zeigt diese Antenne.)

Sehr wenig Gewicht und Platzbedarf hat der Zweiband-Dipol (WIMO) für das 2-m- und das 70-cm-Band in Abbildung 32.33. Er ist zerlegbar und besteht aus stabilen Teilen.

Die Dipoläste werden einfach angesteckt, und das Mittelteil wird mit dem Speisekabel verbunden. Zur Befestigung des Mittelteils dient ein Gewindebolzen (M4). Für die Befestigung an Ästen oder dünnen Latten kann man eine Leimklemme benutzen, die auch in Abbildung 32.33 zu sehen ist. Diese Klemme hat im Griffstück eine Bohrung. Mit der Flügelmutter wird die Antenne ausreichend gesichert. Abbildung 32.34 zeigt die Einzelteile der Antenne und die Klemme.



Abbildung 32.33 VHF/UHF-Dipol

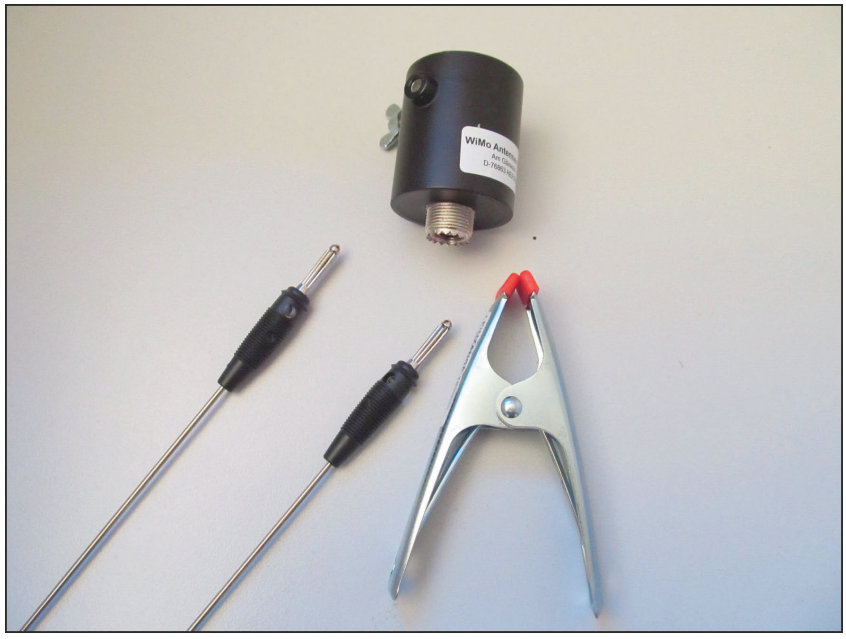


Abbildung 32.34 VHF/UHF-Dipol und Leimklemme

Zudem kann das Mittelteil an ein U-Profil geschraubt werden (siehe Abbildung 32.35). Daraus ergeben sich weitere Befestigungsmöglichkeiten, z. B. an GFK-Masten, Sonnenschirmständern oder Balkongeländern.



Abbildung 32.35 Mittelteil, an einem U-Profil befestigt

Kapitel 33
Amateurfunk digital

Amateurfunk besteht nicht nur aus piepsenden Morsezeichen, quäkenden SSB-Stimmen und FM-Funk. Funkamateure bedienen sich zunehmend der digitalen Übertragung von Schrift, Daten, Sprache, Bildern und Video (*Digimodes*). Dafür übernehmen sie digitale Übertragungssysteme aus anderen Bereichen wie:

- DMR (*Digital Mobile Radio*), das ursprünglich für Betriebs- und Behördenfunk entwickelt wurde, oder
- DVB (*Digital Video Broadcasting*), das aus der Fernsehübertragungstechnik stammt, und
- Techniken aus dem WLAN-Bereich.

Weitere Systeme stellen die Hersteller von Amateurfunkgeräten bereit, z. B. D-Star und C4FM. Schließlich entwickeln Funkamateure auch eigene Übertragungsprotokolle für besondere Anwendungen, z. B. für den Empfang schwacher Signale (z. B. die im WSJT-Softwarepaket enthaltenen Verfahren wie FT8, MSK144 usw.) und für andere amateurfunkspezifische Anwendungen wie Conteste und Rundsprüche (z. B. die im Softwarepaket *fldigi* enthaltenen Anwendungen wie PSK, MFSK, Olivia usw.).

Mit diesen Verfahren sind teilweise lokale, teilweise weltweite Verbindungen möglich, vor allem, wenn die Systeme für Kurzwelle tauglich sind oder wenn »Backbone«-Verbindungen über das HAMNET oder Internet zur Verfügung stehen, sodass die Funkschnittstelle nur die »letzte Meile« überbrückt oder sogar nur den »letzten Meter«, wie bei vielen Funkamateuren, die DMR-Hotspots nutzen.

Um einen Überblick über die dynamische und sich schnell verändernde Welt der digitalen Verfahren zu bekommen, ist es am besten, sich mithilfe eines SDR-Empfängers und entsprechender Software auf die Suche nach den unterschiedlichen Signalen zu machen und zu sehen, welche Möglichkeiten sie bieten. Die Verbindung von Funkgeräten und Computern ist deshalb ein zunehmend wichtiges Thema. Man spricht dann von *Machine Generated Modes* (MGM). Die Rolle des Funkers ist dann häufig die, die gewünschte Gegenstation auszuwählen und zuzusehen, wie der Computer die Funkverbindung abwickelt.

Die digitalen Verfahren sollen hier nach der Hauptanwendung in Hinblick auf die zu übertragenden Informationen sortiert werden.

33.1 Textbasierte Verfahren

Ein erstes textbasiertes Verfahren der Funkübertragung ist die historische *Morsetelegrafie* über Funk, wobei die Zeichen von Menschen generiert wurden und Gehör und Gehirn zur Decodierfähigkeit trainiert werden mussten. Abgesehen von möglicherweise im Verborgenen noch aktiven Anwendern ist der Amateurfunk der einzige Bereich, in dem dieses digitale Verfahren noch lebendig ist – ein schönes Beispiel für die Bedeutung des Amateurfunks als weltweites lebendes Technikmuseum.

33.1.1 Funkfernschreiben

Schon früh entstand der Wunsch, Fernschreibverbindungen auch über Funk abzuwickeln. Für dieses *RTTY* (Radio TeleTYpe) musste die Signalisierung, die zwischen Fernschreibern auf Fernmeldekabeln übertragen wurde, für die Funkübertragung »übersetzt« werden. Die wichtigsten Eigenschaften von RTTY sind:

- Die Quellenkodierung erfolgt durch den Fernschreibcode nach Baudot (*CCITT Nr. 2*). Die Zeichen bestehen aus 5 Signalelementen, die jeweils zwei Werte annehmen können. Auf der Leitung sind es der Ruhezustand mit »Strom ein« (*Mark*), und der Arbeitszustand »Strom aus« (*Space*).
- Für die Funkübertragung werden die beiden Zustände auf zwei benachbarte Frequenzen abgebildet, d. h., es erfolgt eine Frequenzumtastung (FSK). Der Frequenzabstand (*Shift*) beträgt im Kurzwellenbereich üblicherweise 170 Hz, im UKW-Bereich (wo aber RTTY kaum mehr verwendet wird) 850 Hz . Vereinbarungsgemäß ist immer das höherfrequente Signal als *Mark* zu betrachten.
- Jedes Zeichen ist mit zwei Bedeutungen belegt: einer aus dem Buchstabenbereich (keine Groß-/Kleinschreibung!) und einer aus dem Ziffern- bzw. Sonderzeichen-Bereich. Zwischen den Bedeutungsebenen wird mit Steuerzeichen umgeschaltet.
- Die Übertragungsgeschwindigkeit (*Symbolrate*) muss zwischen beiden Fernschreibern gleich sein. Mechanische Fernschreiber arbeiten mit 50 Baud oder – in den USA und deshalb auch im Amateurfunk üblich – mit 45,45 Baud. Dazu muss bei mechanischen 50-Baud-Maschinen aus Europa die Motordrehzahl abgesenkt werden.
- Die Übertragung erfolgt asynchron, d. h., jedes Zeichen enthält einen Startschritt (das Signal geht für eine Symboldauer von Mark auf Space über), dann folgen die 5 Signalelemente, dann für 1,5 Symboldauern Mark als Stoppschritt. Dadurch kann jedes Zeichen sofort gesendet werden, wenn die entsprechende Taste gedrückt wird. Schneller geht es (bis zu 364 Zeichen/min), wenn man aus Textspeichern (historisch Lochstreifen) sendet, z. B. bei einem CQ-Ruf.
- Das Testsignal bei RTTY ist »RYRY...«, da beide Zeichen die Signalfolgen »01010« und »10101« haben und man damit die schnellsten Übergänge zwischen den Zu-

ständen realisiert, sodass man testen kann, ob die korrekte Symbolrate eingestellt ist. Um zu überprüfen, ob alle Buchstaben korrekt gedruckt werden, sendet man den Standardsatz »the quick brown fox jumps over the lazy dog«, der alle Buchstaben enthält.

- Bei der Übertragung gibt es keine Möglichkeit, Fehler zu erkennen oder zu korrigieren – deshalb schreibt der Decoder »Buchstabensalat«, wenn das Signal zwischendurch z. B. durch Fading schwächer wird.

Heute wird RTTY kaum noch mit mechanischen Fernschreibern gesendet und empfangen, denn schon in den 1980er-Jahren setzten sich mit den ersten Heimcomputern, z. B. dem Commodore 64, elektronische Verfahren durch. Damit ist man dann hinsichtlich der Symboldauer und der verwendeten Frequenzabstände flexibler, außerdem lassen sich mehrere Signale parallel dekodieren. Häufig verwendete Programme, mit denen RTTY gesendet und empfangen wird, sind *MMTTY* und *fldigi*.

Die Signale werden zunächst im Tonfrequenzbereich erzeugt (die vorgeschlagenen Standardfrequenzen sind 1275 Hz und 1445 Hz), über die Soundkarte ausgegeben und in den Mikrofoneingang eines SSB-Senders eingespeist (*Audio Frequency Shift Keying*, AFSK). Umgekehrt wird das Empfangssignal des Empfängers mit dem Mikrofoneingang der Soundkarte verbunden. Die richtige Einstellung der Frequenz am Funkgerät kann man z. B. anhand des Signalspektrums oder eines Wasserfalldiagramms vornehmen. Es gibt auch eine oszilloskopische Anzeige, bei der die angezeigten Ellipsen bei korrekter Frequenz- und FSK-Shift-Einstellung senkrecht zueinander stehen.

Abbildung 33.1 zeigt beispielhaft den RTTY-Empfang mit MMTTY. Auf den Webseiten der entsprechenden Softwareanbieter finden Sie auch viele Hinweise zur Bedienung und zur Einstellung.

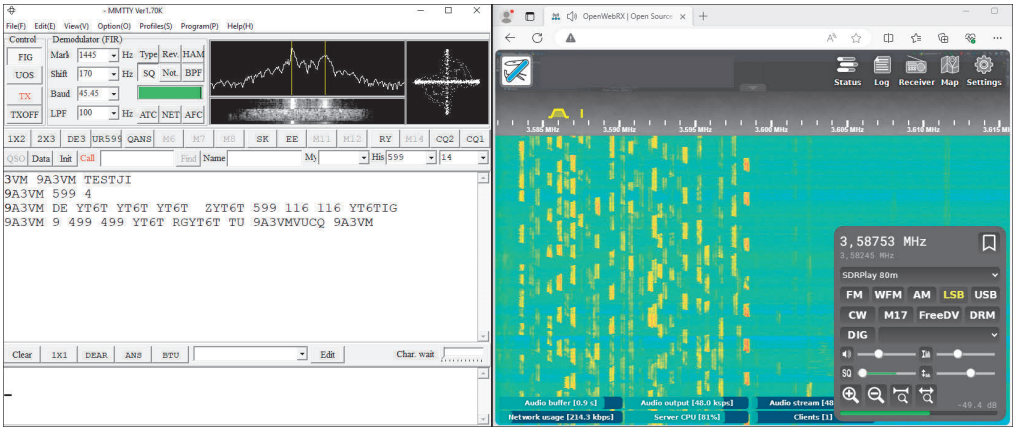


Abbildung 33.1 RTTY-Empfang mit einem Web-SDR und der Software MMTTY während eines Contests auf 80 m. Die korrekte Abstimmung erfolgt über Spektrum, Wasserfalldiagramm und »xy-Scope« (in der Mitte oben).

Neben RTTY gibt es zahlreiche amateurfunkspezifische Verfahren zur Textübertragung. Eine Zeit lang war *BPSK31* populär, das eine Zeichenkodierung mit variabler Länge entsprechend der Häufigkeit des Vorkommens verwendet, Groß- und Kleinschreibung und Sonderzeichen usw. erlaubt. Die Codetafel und weitere Informationen sind auf *bpsk31.com* zu finden. Die Übertragung erfolgt durch eine binäre Phasenumtastung (2-PSK oder BPSK) mit 31 Baud (daher die Bezeichnung). Es gibt auch schnellere Varianten, z. B. BPSK63. Der Vorteil von BPSK31 ist, dass es gegenüber RTTY eine geringere Bandbreite benötigt. Die Betriebsabwicklung in Klartext bzw. mit den amateurspezifischen Abkürzungen wie »QTH« und »73« ist bei PSK31 und RTTY ähnlich (siehe auch Abbildung 33.10).

33.1.2 »Weak-Signal«-Modes

Im Unterschied zum Funkfernschreiben zielen die im Programmpaket *WSJT* (*Weak Signal Communications*, von K1JT) enthaltenen Verfahren auf die Abwicklung minimalistischen Funkverkehrs unter schwierigen Bedingungen. Die Verfahren gehen auf die Initiative des Radioastronomen und Physik-Nobelpreisträgers Joe Taylor, K1JT zurück, der sie seit 2001 zusammen mit anderen kontinuierlich weiterentwickelt und erweitert hat. Manche Modes sind für schwache Signale von QRP-Stationen oder bei Erde-Mond-Erde-Verbindungen optimiert oder für die schnelle Übertragung bei nur kurzfristiger Verfügbarkeit der Übertragungsstrecken wie bei Meteorscatter.

Das Programmpaket ist Open Source und unterliegt einer schnellen Entwicklung; die jeweils aktuelle Version ist auf *https://wsjt.sourceforge.io/wsjtx.html* zu finden. Dort finden Sie unter REFERENCES auch detaillierte Beschreibungen der Codierung und der Übertragung bei den einzelnen Modes. (Fortgeschrittene Nachrichtentechnik- und Englischkenntnisse sind erforderlich.)

Wie schon bei den traditionellen Verfahren (CW) beschränkt man sich in schwierigen Übertragungssituationen auf das Notwendigste: auf die Übertragung der Rufzeichen, auf den Austausch von Signal-Rapporten und auf ein »Roger 73« zur Bestätigung, dass alles angekommen ist, und zur Verabschiedung. Bei den WSJT-Modes ist dies weitgehend formalisiert, die zu sendenden Texte werden automatisch generiert, denn nur diese können effizient quellencodiert werden. Die beteiligten Computer-Uhren müssen synchronisiert sein (über Internet-Zeitserver oder Funkuhren, möglichst auf unter 1 Sekunde genau), da die beteiligten Stationen je nach Mode in festen Zeitfenstern von 7 s bis zu 2 Minuten senden. Folgende Anwendungen werden häufig genutzt:

- *FT8* bzw. *FT4*: wird in nahezu allen KW-, VHF- und UHF-Frequenzbereichen genutzt, meist auf standardisierten Frequenzen, z. B. 14074 kHz im 20-m-Band. Die beteiligten Stationen senden in FT8 jeweils 15 s lang und empfangen dann wieder 15 s lang; FT4 benötigt nur die halbe Zeit. Eine Funkverbindung kann in unter 2 Mi-

nuten abgewickelt werden. Den mit WSJT empfangenen Ablauf eines typischen FT8-QSOs zeigt Tabelle 33.1.

Zeit UTC	dB	dT/s	Freq./ Hz	Text
180145	-9	-0.9	2224	CQ DL1DEU JN59
180215	-7	-0.9	2224	CQ DL1DEU JN59
180245	-8	-0.9	2224	CQ DL1DEU JN59
180300	-19	-0.9	957	<DL1DEU> PH24HNY
180315	-8	-0.9	2224	<PH24HNY> DL1DEU -08
180330	-19	-1.0	957	DL1DEU <PH24HNY> R-08
180345	-7	-0.9	2224	PH24HNY <DL1DEU> RR73

Tabelle 33.1 Mitschrift eines FT8-QSO am 7.1.24 auf 80 m

- Die Anzeige von WSJT liefert das jeweilige 15-s-Intervall, das SNR in dB, bezogen auf einen 2500 Hz breiten Empfangskanal, die Zeitabweichung zwischen den beteiligten Rechnern (dT), die Audio-Frequenz und den decodierten Text.
- Der Empfang erfolgte auf 80 m mit einem abgesetzten SDRPlay RSP1 mit einem Raspberry Pi mit der OpenWebRX-Software, wobei aber das WSJT-Programm auf dem Rechner zu Hause lief. Dadurch entstand die Zeitdifferenz von knapp 1 s.
- Die angezeigten Frequenzen beziehen sich auf die NF-Frequenz nach der SSB-Demodulation. Bei der USB-Einstellung 3573 kHz entspricht 2224 Hz einer Sendefrequenz von 3575,224 kHz.
- Zunächst ist zu sehen, wie DL1DEU dreimal auf dieser Frequenz CQ ruft und dabei sein Locator-Feld JN59 (Nordbayern) durchgibt. Dann wird er um 18:03:00 auf 3573,957 kHz entsprechend Audio-Frequenz 957 Hz von PH24HNY angerufen. Es ist bei FT8 häufig der Fall, dass jede Station ihre Sendefrequenz beibehält. Der Anruf wird trotzdem richtig zugeordnet, sodass das QSO automatisch abgewickelt werden kann. Das Rufzeichen in Klammern < > signalisiert, dass wegen des speziellen Sonder-Rufzeichens der anrufenden Station eine besondere Form der Quellcodierung erforderlich war. (Es handelte sich um eine Sonderstation einer holländischen Pfadfindergruppe zum Jahreswechsel.) Deshalb wurde auch das Locator-Feld nicht wie sonst üblich beim Anruf mit übermittelt.
- In der Antwort bestätigt DL1DEU um 18:03:15, dass er PH24HNY mit SNR –8 dB empfangen hat. Im nächsten Durchgang bestätigt PH24HNY mit R–08, dass der

Rapport empfangen wurde und dass er DL1DEU ebenfalls mit –8 dB SNR empfängt. Daraufhin bestätigt DL1DEU, dass er den Rapport empfangen hat (RR), und verabschiedet sich mit 73 – denn nun sind alle erforderlichen Informationen ausgetauscht und das QSO ist nach 2 Minuten beendet. PH24HNY könnte nun ebenfalls noch 73 senden.

- Abgesehen davon, dass FT8-QSOs mit geringen Sendeleistungen und kleinen Antennen möglich sind, ermöglicht diese Betriebsart es durch die zügige Abwicklung und die Konzentration vieler Stationen auf einer Frequenz den leistungsorientierten Punkte-, Länder- und Diplomjägern, viele der notwendigen Verbindung für das nächste Ziel in kurzer Zeit zu erreichen. Die Software ermöglicht es aber auch, Empfangsberichte automatisch in die Datenbank PSKReporter hochzuladen. Dort kann man dann für jedes Band auf einer Karte darstellen lassen, welche Stationen man empfangen hat bzw. von welchen Stationen man gehört wurde, wenn man auch selbst gesendet hat. Dadurch lassen sich interessante Einblicke in die Ausbreitungsverhältnisse bekommen.

  Abbildung 33.2 zeigt beispielhaft die PSK-Reporterkarte mit den Funkverbindungen eines der Autoren während Überreichweiten im 2-m-Band im September 2023.



Abbildung 33.2 Empfangsberichte für das von DL1NAW gesendete FT8-Signal während Überreichweiten durch Tropo-Scatter auf 2 m am 7. September 2023. Screenshot von PSKreporter.info.

- Die FT8-Übertragung beruht auf 74 Bit langen Sequenzen. Die formalisierten Texte werden dazu entsprechend quellcodiert (siehe Abschnitt 17.3). Es gibt dafür mehrere Möglichkeiten, und die getroffene Auswahl wird in weiteren 3 Bit vor die Sequenz gestellt. Die damit 77 Bit lange Nachricht wird mit einem 14-Bit-CRC zur Fehlererkennung versehen. Dieses 91 Bit lange Datenwort wird mit einem LDPC-Code zur Vorwärtsfehlerkorrektur versehen. Es werden mit einer (91 × 83)-Matrix insgesamt 83 Paritätsbits erzeugt, sodass die Codewörter 174 Bit lang sind und die Coderate 0,52 beträgt (siehe Abschnitt 17.4.2).
- Die codierten Daten werden mit einer 8-CPFSK (Constant Phase FSK) übertragen. Dabei wird die Phase bei der Frequenzumtastung konstant gehalten, um die Bandbreite zu reduzieren (siehe Abbildung 33.3). Zusätzlich werden die Signale jedes Symbols am Anfang und Ende abgeflacht, sodass der Übergang »sanfter« wird. Pro Symbol können 3 Bit übertragen werden, für ein Codewort werden also 58 Symbole benötigt. Am Anfang, in der Mitte und am Ende der übertragenen Nachricht werden spezielle Tonfolgen zur Synchronisation eingestreut. Die Symbolrate beträgt 6,25 Baud. Die Nachrichten können bei einem SNR von etwa –20 dB in einem 2,5 kHz breiten Kanal dekodiert werden.

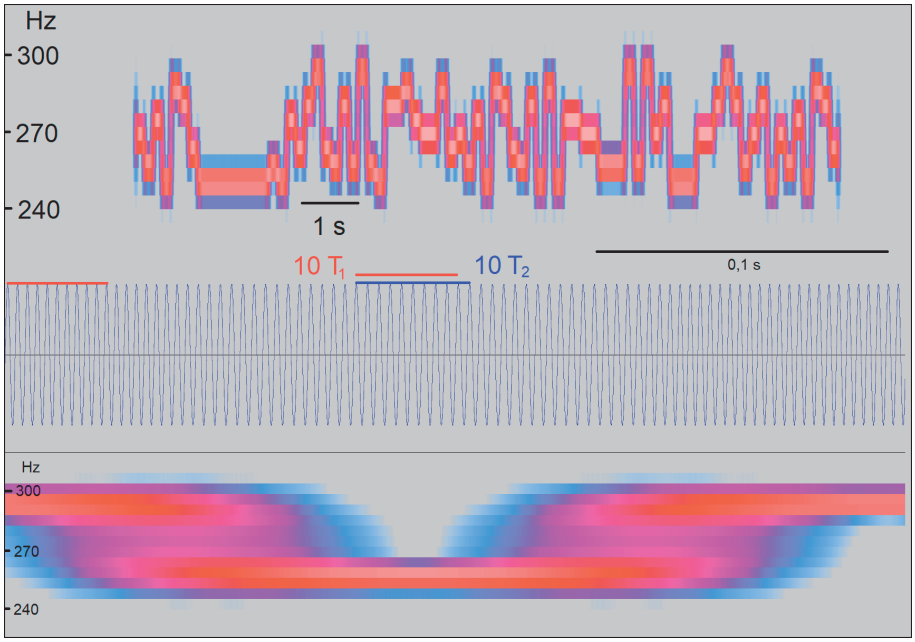


Abbildung 33.3 Wasserfalldiagramm eines FT8-Signals (oben). Das untere Bild zeigt einen Detailausschnitt. Man erkennt den »sanften« Frequenzübergang der Constant Phase FSK an den Symbolgrenzen. Die farbigen Strecken machen aber wie das Wasserfalldiagramm die unterschiedlichen Periodendauern bzw. Frequenzen während der verschiedenen Symbole deutlich sichtbar.

- *MSK144* wird im 6-m-, 4-m- und 2-m-Band für *Meteorscatter*-Verbindungen genutzt. Das Funksignal wird dabei an ionisierten Spuren von Meteoren (Sternschnuppen) reflektiert, meist aber nur für sehr kurze Zeit, z. B. 1 bis 2 Sekunden. Das Übertragungsverfahren arbeitet daher mit hoher Symbol- und Datenrate (2000 Baud), sodass während kurzer Zeit die Rufzeichen und Rapporte übertragen werden können. Meistens muss man aber trotzdem Geduld aufbringen, bis ein Meteor die nächste Übertragung erlaubt, sodass Funkverbindungen mehrere Minuten bis hin zu einer Stunde in Anspruch nehmen können.
- Andere WSJT-Modes wie *JT65* werden für Erde-Mond-Erde-Verbindungen genutzt, bei denen abgesehen von schwachen Signalen auch Doppler-Verschiebungen durch die Relativbewegung von Erde und Mond eine Rolle spielen, sowie für Lang- und Mittelwelle, wo hohe atmosphärische Störpegel vorherrschen.

33.2 Digitale Sprachübertragung

Schon lange werden Telefongespräche digital übertragen, und auch in der Rundfunk- und Fernsehtechnik gibt es digitale Verbreitungswege. In den 1990er-Jahren wurden auch digitale Sprechfunksysteme entwickelt. Allerdings setzten diese sich nur langsam durch. Erst durch die Notwendigkeit, immer mehr Funkanwendungen im begrenzten Spektrum für Behörden- und Betriebsfunk unterzubringen und Abhörmöglichkeiten durch die immer weiter verbreiteten Scanner zu unterbinden, wurde die Digitalisierung vorangetrieben.

Wo diese Notwendigkeit nicht besteht, kann man – wie im Amateurfunk und besonders im Flug- und Seefunk noch weit verbreitet – auch bei FM und AM bleiben, da dadurch viele Probleme (wie die Latenzzeit bei der digitalen Übertragung, der abrupte Abbruch der Verbindung bei schwächer werdendem Signal usw.) erst gar nicht auftreten. Intuitiv kann man z. B. mit einem analogen Handfunkgerät eine Position finden, in der das Signal am wenigsten verrauscht ist, was bei digitaler Übertragung so einfach nicht möglich ist. Zur Ehrenrettung der digitalen Verfahren muss man aber feststellen, dass meist noch eine gute Übertragung möglich ist, wenn es im Analogen schon ziemlich stark rauscht, und dass vielfältige Funktionen über die eigentliche Sprachübertragung hinaus möglich sind.

Da insbesondere kommerzielle Verfahren wie DMR eine Vielzahl von Anwendungsfällen abdecken müssen, die im Amateurfunk gar nicht vorkommen, muss bei der Anwendung im Amateurfunk vieles neu oder anders festgelegt werden. Die gleichen oder ähnlichen Funktionen werden in den verschiedenen Systemen zudem noch verschieden bezeichnet. Zur Einführung finden Sie deshalb bereits hier einige häufig vorkommende Begriffe aus D-Star, DMR und WIRES-X (mit C4FM oder FM). In den nächsten Abschnitten werden dann die wichtigsten Verfahren kurz vorgestellt.

- **AMBE**

  Patentgeschützter Sprachquellen-Codec, der unter anderem bei DMR zum Einsatz kommt

- **Bridge**

  Eine Bridge (WIRES-X) ist ein besonderer Raum, der eine Verbindung zu DMR oder D-Star herstellt.

- **Codec**

  Codecs sind Quellencodieralgorithmen, die zum digitalen Codieren und Decodieren von Signalen notwendig sind. Im Amateurfunk müssen sie innerhalb von Programmen paarweise implementiert sein, damit sie zum Senden und zum Empfangen genutzt werden können. Gebräuchlich sind als Sprach-Codecs AMBE (proprietär, in kommerziellen Geräten eingebaut) und Codec2 (frei, Open Source, zum Experimentieren).

- **Codec2**

  Sprachquellen-Codec zur Übertragung bei sehr niedrigen Bitraten. Nicht notwendige Anteile des Audiosignals (Rauschen, Brummen usw.) werden beim Codieren verworfen, sodass Sprache mit Datenraten von 700 bis 3200 bit/s codiert werden kann. Weiterhin wurde der Codec auf geringe Rechenleistung und Speichernutzung optimiert, sodass er gut geeignet für batteriebetriebene Geräte ist. Codec2 ist Open Source, patentfrei, als C-Bibliothek verfügbar und unterliegt der LGPL-Lizenz (*GNU Lesser General Public License*). Damit kann er mit verschiedenen Übertragungsverfahren genutzt werden und auch für eigene Projekte verwendet und modifiziert werden.

- **Codeplug**

  Konfigurationsdatensatz für ein (DMR)-Digitalfunkgerät

- **Colorcode**

  Netzkennung (bei DMR-Geräten). Im Amateurfunk meist nicht verwendet und auf den Standardwert 1 gesetzt.

- **CPS**

  Ein Anwendungsprogramm (*Customer Programming Software*), mit dem ein Codeplug erstellt wird

- **Digital Call Server (DCS)**

  (D-Star:) Digital Call Server bieten 26 Konferenzräume. Sie sind weltweit nummeriert. Für Deutschland gibt es den Server mit der Kennung DCS001. Die Konferenzräume darauf sind unter anderem nach Bundesland unterteilt.

- **Hotspot**

  Stellt eine Verbindung zwischen einem (Hand-)Funkgerät und z. B. dem BrandMeister-DMR-Netz her. Diese Geräte verfügen über eine sehr geringe Sendeleistung und sind daher für den unmittelbaren Nahbereich vorgesehen. Sinnvoll ist der Betrieb eines Hotspots nur, wenn keine digitale Relaisfunkstelle erreichbar ist oder eine häufig genutzte Talkgroup dort nicht statisch verbunden ist.

- **Private Call (PC)**

  Direktanruf zwischen zwei Funkamateuren per Digitalfunk

- **Reflektor**

  (D-Star:) Konferenzserver im Internet/HAMNET, mit denen sich (vor allem) D-Star-Benutzer verbinden können. Ein Konferenzserver beinhaltet Konferenzräume. Reflektoren werden über mehrere Umsetzer genutzt. Die Konferenzräume entsprechen von der Funktion her den DMR-Talkgroups.

- **Room**

  Rooms entsprechen bei WIRES-X den DMR-Talkgroups bzw. D-Star-Reflektoren

- **Talkgroup (TG)**

  (DMR:) virtueller Gesprächsraum. Diese Räume können Regionen, Themen oder Funktionen (z. B. Gateway zu anderen Netzen) repräsentieren.

- **Zeitschlitz/Timeslot (TS)**

  Unterteilung eines digitalen Funkkanals mit TDMA in verschiedene Sprach- oder Datenkanäle, z. B. bei DMR in TS1 und TS2. Diese Zeitschlitze können unabhängig voneinander zeitgleich genutzt werden.

- **Zone**

  Kanalgruppe bei DMR (Festlegung zur Sortierung vieler Kanäle im Funkgerät)

33.2.1 DMR, BrandMeister-Netz, DMR+

DMR *(Digital Mobile Radio)* bietet digitalen Sprechfunk über vernetzte digitale Relaisstationen und eine Einteilung in Talkgroups (»Gesprächskreise«), die zum einen lokal, zum anderen Repeater-übergreifend genutzt werden können. Die Relaisfunkstellen werden hierbei per Internet oder HAMNET vernetzt.

Es kommen entweder Betriebsfunkgeräte oder auch speziell für den Amateurfunk angepasste Geräte mit erweiterten Bedien- und Einstellmöglichkeiten zum Einsatz. Abbildung 33.4 zeigt ein Amateurfunkgerät. Die Einstellungen dieser Funkgeräte werden am PC programmiert und als Codeplug auf das Gerät übertragen. Zur Programmierung kommt entweder ein Programm des Herstellers oder freie Software wie qdmr (siehe Abbildung 33.5) oder chirp zum Einsatz.



Abbildung 33.4 Anytone AT-D878UV mit Zubehör anderer Hersteller

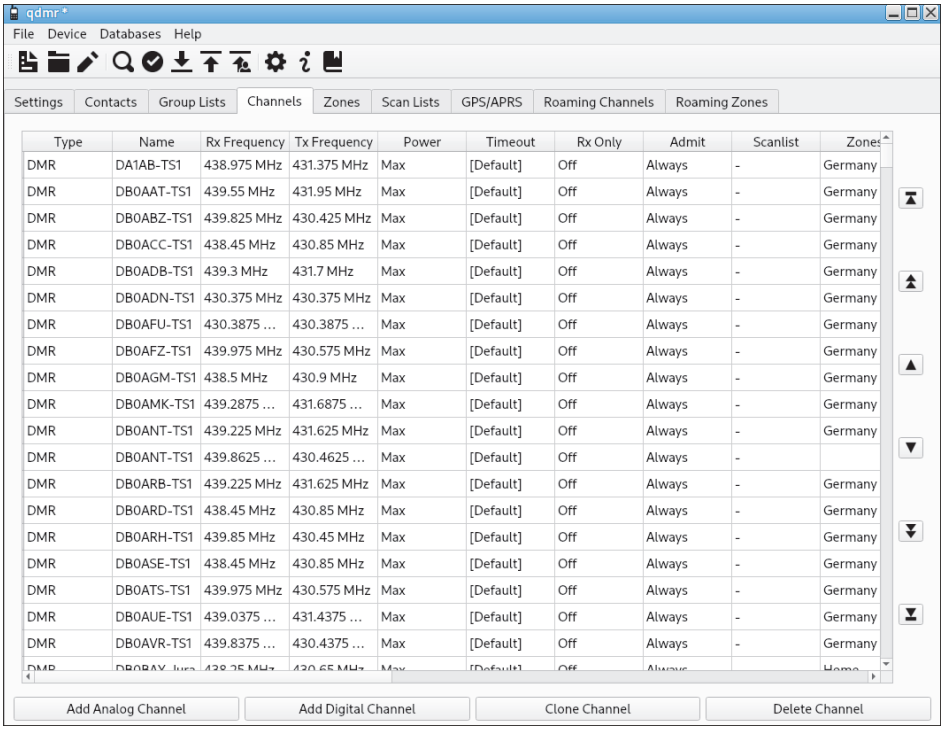


Abbildung 33.5 Programmierung des Codeplugs mit qdmr

Ein Funkkanal für DMR wird auf zwei Zeitschlitze (Time Slot, TS) aufgeteilt. Diese werden abwechselnd genutzt. Damit sind zwei unabhängige Verbindungen auf einer Frequenz möglich.

DMR ermöglicht weltweiten Funkverkehr mit einem Handfunksprechgerät, wenn das Relais oder der Hotspot mit einem leistungsfähigen Netz im Hintergrund verbunden ist. Stark verbreitet ist inzwischen das *»BrandMeister«-Netz*, das nichts mit der Feuerwehr zu tun hat, sondern auf einer Veranstaltung einmal als »brand new master« angekündigt worden war …

Für die Teilnahme benötigen Sie eine siebenstellige DMR-User-ID. Diese ist weltweit gültig und einmalig. Die DMR-IDs sind hierarchisch gegliedert. Das Land belegt die ersten drei Stellen der DMR-ID. So steht die 262 für Deutschland. Wenn Sie über eine Amateurfunkgenehmigung verfügen, können Sie Ihre Kennung unter *https://radioid.net/register#* anfordern. Diese ID müssen Sie dann in den Codeplug Ihres Funkgeräts einpflegen.

Talkgroups werden nach regionalen oder themenbezogenen Kriterien gebildet. Deutschlandweit aktiv ist die 262. Das Funkgerät in Abbildung 33.4 ist auf die TG 26289 eingestellt. Wenn Sie die DMR-ID Ihres Funkpartners kennen, können Sie ihn direkt anfunken. Das Netz versucht ihn dann über den Weg zu erreichen, den er zuletzt benutzt hat (*Private Call*).

In jedem Fall wird ein Zeitschlitz genutzt, der, solange die Verbindung besteht, anderen Teilnehmern nicht zur Verfügung steht. Da auf der TG 262 mehr oder weniger Anrufverkehr herrscht, weicht man nach dem CQ-Ruf auf die TG 26200 oder 26299 für das eigentliche QSO aus. Damit können andere Teilnehmer die TG 262 nutzen.

Auf vielen BrandMeister-DMR-Relaisfunkstellen und -Hotspots wird der erste Zeitschlitz zumindest zeitweise einigen der in Tabelle 33.2 aufgeführten Talkgroups statisch zugeordnet. Das heißt, sie sind permanent verfügbar, und alles, was in der entsprechenden Talkgroup gesprochen wird, wird über das Relais gesendet. Im zweiten Zeitschlitz sind mindestens die Talkgroups in Tabelle 33.3 eingerichtet sowie möglicherweise regionale TGs.

TG	Bereich	Hinweis
91	weltweit	dynamisch
92	europaweit	dynamisch
910	weltweit deutschsprachig	dynamisch
920	Deutschland + Österreich + Schweiz	

Tabelle 33.2 TGs auf Zeitschlitz 1

TG	Bereich	Hinweis
262	Deutschland	
26200	Deutschland TAC 1	dynamisch
26299	Deutschland TAC 2	dynamisch
26233	Deutschland TAC 3	dynamisch
26266	Deutschland TAC 4	dynamisch
263	Deutschland	Verbindung zu D-STAR, DMR+, WIRES-X
9112	EU	Nur für Notfunk!

Tabelle 33.2 TGs auf Zeitschlitz 1 (Forts.)

TG	Bereich	Hinweis
8	regional	statisch, jeweils für die Region definiert
9	lokal	statisch, nur auf dem DMR-Relais vorhanden, wird nicht weitergeroutet (lokale QSOs).

Tabelle 33.3 TGs auf Zeitschlitz 2

Über die Details jeder Relaisfunkstelle kann man sich im Benutzer Dashboard des BrandMeister-Netzes informieren. Zusätzlich zu den statisch verbundenen TGs kann jeder Benutzer eine beliebige TG dynamisch auf einen der Zeitschlitze legen, indem er die entsprechende TG-ID sendet, z. B. 2628 für »Bayern«. Wenn die Verbindung hergestellt ist, kann der Benutzer mit allen Mitgliedern dieser TG kommunizieren. Wenn kein Betrieb mehr stattfindet, wird die Verbindung der Relaisfunkstelle zu der Talkgroup nach einigen Minuten wieder gelöst. Insbesondere dann, wenn man häufig auf »exotische« TGs zugreifen möchte, ist ein eigener Hotspot oder die direkte Computer-Nutzung empfehlenswert, um nicht alle Relais-Nutzer damit zu langweilen.

Auf folgenden Internetseiten können Sie sich genauer informieren:

- Informationen über DMR (BrandMeister): *https://bm262.de/*
- Die aktuelle DMR-Aktivität BrandMeister-Netz, den Status der Repeater usw. finden Sie im BrandMeister-Benutzer Dashboard unter *https://brandmeister.network/*.

- Am weltweiten Funkverkehr im BrandMeister-Netz kann man mit einer User-ID sogar auch ohne Funkgerät teilnehmen, z. B. über spezielle Apps auf Smartphones wie *DroidStar* und *Mumla*. Den Gesprächen in den Talkgroups kann man auch als SWL ohne User-ID mit jedem Webbrowser zuhören, und zwar über die *Hoseline* (*https://hose.brandmeister.network*). Im Player stellt man dazu die Talkgroups ein, die wiedergegeben werden sollen.
- Informationen über DMR+ finden Sie unter *http://dmr-dl.net/dashboards/ipsc2-dmr-dl/*.

33.2.2 D-STAR

D-STAR (*Digital Smart Technologies for Amateur Radio*) bietet digitalen Sprechfunk ähnlich DMR, mit zusätzlich der Möglichkeit zur Datenübertragung. Diese Geräte werden hauptsächlich von den Herstellern Icom und Kenwood gefertigt. D-STAR ist nur im Amateurfunk gebräuchlich.

Informationen zu D-STAR-Geräten finden Sie unter *https://www.icomeurope.com/*. Details finden Sie auch auf vielen Internetseiten von Amateurfunk-Ortsverbänden.

33.2.3 C4FM

Geräte für die Übertragungsart *C4FM* werden nur von Yaesu gebaut. Ihr Hauptvorteil ist der äußerst geringe Konfigurationsbedarf. Alles kann am Funkgerät eingestellt werden. Fast alle aktuellen Yaesu-Geräte für VHF und UHF werden vom Hersteller damit ausgestattet. Im Gegensatz zu DMR und D-STAR muss man sich nirgends registrieren.

Verwechseln Sie C4FM nicht mit WIRES-X. Mittels C4FM kann WIRES-X genutzt werden. Dabei handelt es sich um eine internetbasierte Vernetzung von Relaisfunkstellen durch den Gerätehersteller Yaesu.

Weiterführende Informationen finden Sie hier:

- *http://c4fm.xyz/*
- *https://www.yaesu.com*

33.2.4 FreeDV

Digitaler Sprechfunk, vorwiegend auf Kurzwelle, ermöglicht gegenüber den analogen Übertragungen ein Plus an Qualität, allerdings nur bei ausreichend hohem Signal-Rausch-Abstand und nicht zu problematischen Ausbreitungsbedingungen, da nur die Breite eines SSB-Kanals verfügbar ist.

Sie benötigen zur Nutzung ein gewöhnliches Funkgerät, mit dem SSB-Sprechfunk möglich ist, und einen Rechner, der daran angeschlossen wird. In einigen SDR-Empfängern und -Funkgeräten ist *FreeDV* schon in der Firmware implementiert.

Der Open-Source-Codec *Codec2* wird hier für die Sprachquellcodierung genutzt. Die Sprachübertragung funktioniert auch bei sehr geringen Signal-Rausch-Abständen. Hinzu kommt die geringe belegte Bandbreite. Für ein 8 kHz breites NF-Signal werden nur 1,6 kHz Bandbreite durch den Sender belegt.

FreeDV-Modus	NF-Bandbreite	HF-Bandbreite	Latenz	Min. SNR
1600	4 kHz	1,6 kHz	gering	4
700C	4 kHz	0,7 kHz	gering	2
700D	4 kHz	0,7 kHz	hoch	–2
2020	8 kHz	1,6 kHz	hoch	4

Tabelle 33.4 Gegenüberstellung verschiedener FreeDV-Modi

FreeDV verfügt über eine Vorwärtsfehlerkorrektur. Informationen werden redundant, also mehrfach übertragen. Kommt es beim Empfang zu Störungen, wird hieraus die Sprachinformation wiederhergestellt, soweit dies möglich ist. Das Sendesignal besteht aus einer Anzahl von Einzelträgern, wie Sie aus Abbildung 33.6 erkennen können.

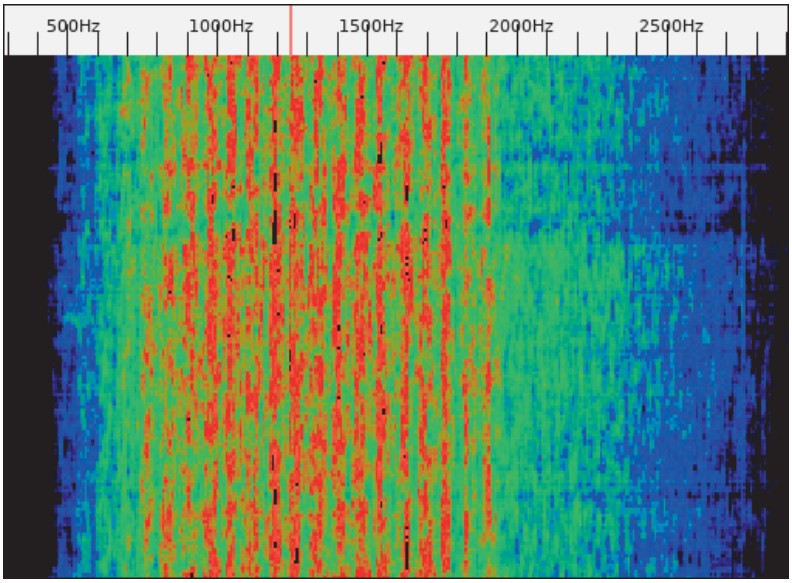


Abbildung 33.6 Ein FreeDV-Sendesignal mit sichtbaren Einzelträgern

Auf der Projektseite *https://freedv.org/* finden Sie weitere Details und zusätzliche Anleitungen, wie Sie QRV werden können. Hier wird auch für alle, die hierfür keinen eigenen Rechner nutzen wollen, ein Zusatzgerät angeboten, das einfach an das Funkgerät, einen Lautsprecher und ein Mikrofon angeschlossen wird und quasi als Modem arbeitet.

Außerdem wurde Ende 2021 eine DARC-HAMgroup gegründet, die sich praktisch mit dem FreeDV-Betrieb befasst. Dazu gehören Hilfestellungen bei Problemen, aber auch natürlich der Funkbetrieb mit und das Austesten von FreeDV. Informationen finden Sie unter *https://hamgroup.dynv6.net/freedv/*.

Dort gibt es auch eine Quellen- und Literaturliste mit guten Darstellungen der technischen Grundlagen von FreeDV. Schauen Sie sich besonders die Veröffentlichungen von Prof. Michael Hartje, DK 5 HH, an.

Für Empfangsversuche installieren Sie die Software und suchen die für FreeDV empfohlenen Frequenzen ab:

1,997 MHz, 3,625 MHz, 3,730 MHz, 7,177 MHz, 7,190 MHz, 14,236 MHz, 14,240 MHz, 18,119 MHz, 21,313 MHz, 24,933 MHz, 28,720 MHz. Für das 60-m-Band ist der Bereich von 5,354 bis 5,366 MHz nach IARU-Bandplan festgelegt.

33.2.5 M17

Während FreeDV die digitale Sprachübertragung in schmalen Kurzwellenkanälen zum Ziel hat, versucht *M17*, einen nichtpropriäteren Ersatz für DMR, D-Star usw. zu realisieren. Es beruht ebenfalls auf Codec2 für die Sprachcodierung. Für die Übertragung wird eine Kanalcodierung unter anderem mit Faltungs- und zyklischen Blockcodes sowie mit Interleaving verwendet. Die Modulation ist 4-FSK mit einer Bandbreite von 9 kHz, die damit in das 12,5 kHz-Kanalraster auf 2 m und 70 cm passt. Zusätzlich zur Identität des Senders (Rufzeichen, hier ohne das Erfordernis eines Datenbankeintrags) können Textnachrichten und Positionsdaten übertragen werden. Verschiedene Soft- und Hardwarelösungen sowie ein rudimentäres »Backbone-Netz« sind inzwischen realisiert worden.

Das nächste Projekt des M17-Teams ist ein SDR-basiertes Handfunkgerät *OpenHT*, das neben M17 auch FreeDV und andere Betriebsarten unterstützen wird.

Weitere Informationen finden Sie auf der Website *https://m17project.org/*.

33.3 Datenfunk

33.3.1 Packet Radio

Packet Radio erlebte einen Boom in den späten 1980er- und frühen 1990er-Jahren. Das Funkgerät wurde mit dem Computer über einen TNC (*Terminal Node Controller*)

verbunden, der die AFSK-Töne für die Datenübertragung mit 1200 Baud erzeugte bzw. demodulierte. Meist wurden diese Töne über FM-Funkgeräte auf 2 m und 70 cm übertragen.

Die Textübertragung erfolgt paketbasiert auf Basis des AX.25-Protokolls, das das Paketübertragungsprotokoll X.25 der ITU-T für den Amateurfunk modifiziert. Es enthält neben Absender- und Empfängerrufzeichen auch eine Liste von bis zu acht Zwischenstationen, die die Pakete weitervermitteln. Damit können Verbindungen zwischen zwei Stationen auch ohne direkte Funkverbindung über sogenannte *Digipeater* (digitale Repeater) hergestellt werden. Diese modifzieren gegebenenfalls die Adressdaten; das eigentliche Datenfeld wird unverändert weitergeleitet. Ist die Verbindung aufgebaut, werden die Datenpakete (mit bis zu 256 Byte Länge) automatisch bis zum Empfänger weitergeleitet. Die Attraktivität des Packet-Radio-Betriebs besteht neben dem direkten Austausch von Textnachrichten auch darin, dass man über Mailboxen Nachrichten an gerade nicht erreichbare Teilnehmer schicken kann, ähnlich wie bei E-Mails. Aus den Mailboxen können auch Rundsprüche und andere Informationen abgerufen werden.

Eine Weiterentwicklung stellte die Übertragung mit 9600 Baud dar, die aber die direkte Einspeisung der Signale unmittelbar vor dem FM-Modulator bzw. die Ausgabe direkt nach dem FM-Demodulator erforderlich macht, da die NF-Stufen von FM-Funkgeräten nicht für die entsprechende Bandbreite ausgelegt sind. Bei vielen FM-Funkgeräten gibt es deshalb dafür einen speziellen Anschluss, der als *9k6-Port* oder *Data* bezeichnet ist. Die 9k6-Übertragung ist aber vor allem bei Mehrwegeausbreitung nicht besonders zuverlässig.

33.3.2 Das HAMNET

Das *HAMNET* funktioniert wie das Internet, ist aber eine eigene Infrastruktur des Amateurfunkdienstes. Aus diesem Grunde dürfen hier keine Verschlüsselungstechniken für den darüber laufenden Amateurfunkverkehr (»offene Sprache«) verwendet werden. Es ist auch nicht mit dem Internet verbunden, sondern arbeitet autark. Es nutzt aber als Paketprotokoll TCP/IP.

Das HAMNET verknüpft in erster Linie analoge wie digitale Relaisfunkstellen, Packet-Radio-Mailboxen und -Digipeater. Funkamateure können auf Dienste wie Webserver, Mail usw. zugreifen. Der Endnutzerzugang erfolgt über das 13-cm-Band zwischen 2,3 und 2,4 GHz; die Richtfunkstrecken der Backbones arbeiten überwiegend auf dem 6-cm-Band. Hierfür kommt modifizierte WLAN-Hardware zum Einsatz, und auch eine weitere Zugangsmöglichkeit im 70-cm-Band wurde geschaffen. Damit können auch weiter vom Einstiegspunkt entfernte Stationen eine Verbindung bekommen.

Manche Zugangspunkte bieten den VPN-Zugriff über das Internet für lizenzierte Funkamateure an.

33.4 Digitale Bild- und Fernsehübertragung

33.4.1 Digitale Bildübertragung

Bilder werden im Amateurfunk traditionell ähnlich wie Fax als *Slow Scan Television* (SSTV) mit Tonsignalen zeilenweise über einen SSB-Kanal übertragen. Inzwischen ist auch die digitale Übertragung von Bilddateien in einem Audio-Kanal möglich. Nach einigen frühen Versuchen wird derzeit neben *EasyPal* überwiegend das Programm *KG-STV* verwendet, das die digitalisierten Bilder blockweise (16 × 16 Pixel) überträgt. Beim Empfänger werden die Blöcke wieder zusammensetzt.

Fehlerhafte oder fehlende Blöcke können ergänzt werden, entweder durch gezielte Rückfrage beim Sender oder durch mehrfache Übertragung. Die Bilder können mit unterschiedlichen Parametern übertragen werden, sowohl auf Kurzwelle als auch auf UKW. Auch der FM-Umsetzer auf der ISS und der Transponder des geostationären Satelliten QO-100 wurden bereits erfolgreich für Übertragungsversuche genutzt. Zu KG-STV sind auch einige Informationen im Internet zu finden (lassen Sie sich diese im Browser aus dem Japanischen übersetzen):

http://www2.plala.or.jp/hikokibiyori/soft/kgstv/

33.4.2 Digitales Amateurfunk-Fernsehen

Für digitales *Amateurfunk-Fernsehen* werden die auch für den Fernsehrundfunk verwendeten Standards DVB-T und DVB-S bzw. deren Weiterentwicklungen DVB-T2 und DVB-S2 verwendet. Für die Quellenkodierung kommt neben dem MPEG-2-Standard vor allem H.264 infrage, das die Video-Quellcodierung mit geringeren Datenraten ermöglicht. DVB-S2 erlaubt auch die Verwendung von geringen Bandbreiten und Datenraten bei der Übertragung, z. B. 1 MS/s. Es wird deshalb im Amateurfunk auch für die terrestrische Übertragung z. B. im 70-cm-Band mit Bandbreiten von 1 bis 2 MHz eingesetzt.

DVB-T ist zwar wegen der OFDM-Modulation robuster gegenüber Mehrwegeausbreitung und erlaubt den Gleichwellenbetrieb mehrerer Sender, dies ist aber im Amateurfunk meist nicht relevant, da bei Verbindungen über größere Entfernungen stark bündelnde Richtantennen verwendet werden. Der Hardware-Aufwand und die Anforderungen an Sender-Endstufen sind hingegen für DVB-S deutlich reduziert. Auch über QO-100 ist digitales Amateurfunk-Fernsehen auf dem Wideband-Transponder möglich. Allerdings sind nur wenige der im Handel erhältlichen DVB-Komponenten für die reduzierten Datenraten und Bandbreiten im Amateurfunk geeignet. Für weitere Informationen, insbesondere zu den verwendeten Parametern und verfügbarer Hardware, sei deshalb auf das Referat AGAF (Arbeitsgemeinschaft Amateurfunkfernsehen) des DARC verwiesen, wo auch aktuelle Informationen zu finden sind:

https://www.darc.de/der-club/referate/agaf/

33.5 Funkgerät und PC verbinden

Aus drei Gründen werden Funkgeräte und EDV-Technik miteinander verbunden:

- Steuerung und Programmierung des Funkgeräts
- Abwicklung von Funkverkehr in digitalen Betriebsarten mithilfe des Rechners
- abgesetzter Betrieb eines Funkgeräts über das Internet (Remote-Betrieb), siehe Kapitel 34.

33.5.1 Programmierung des Funkgeräts

Bei vielen Funkgeräten können Sie über Menüs zahlreiche Voreinstellungen vornehmen und Speicherkanäle programmieren. Dies kann mit PC-Programmen und entsprechender Software meist einfacher erfolgen als direkt am Funkgerät mit unübersichtlicher Menüführung und feinmotorischen Herausforderungen durch miniaturisierte Tasten. Die Verbindung zwischen PC und Funkgerät erfolgt über die *CAT-Schnittstelle* (Computer Aided Tuning), eine serielle Schnittstelle.

Moderne digitale Funkgeräte, z. B. für DMR, müssen erst entsprechend den Benutzervorgaben konfiguriert werden. Dazu wird mit einer entsprechenden Software ein *Codeplug* erstellt, in dem neben der User-ID auch die Kanäle (z. B. von DMR-Relais) spezifiziert werden, insbesondere die Frequenzen und die Zuordnung von Talkgroups zu den Zeitschlitzen usw. (siehe Abbildung 33.5).

Wenn die Programmierung abgeschlossen ist, müssen diese Daten auf das Funkgerät übertragen werden. Dabei kann gegebenenfalls auch die Firmware auf den aktuellen Stand gebracht werden. Die Verbindung von PC und Funkgerät wird über ein spezielles USB-Kabel zu einer meist herstellerspezifischen Schnittstelle am Funkgerät hergestellt, die oft über die Buchsen für externes Mikrofon und Lautsprecher realisiert ist. Ist die Verbindung hergestellt, kann der Codeplug übertragen werden. Wichtig ist dabei, dass die Firmware-Version auf dem Funkgerät mit der Version übereinstimmt, für die der Codeplug erstellt wurde.

33.5.2 Steuerung des Funkgeräts

Für verschiedene Anwendungen ist es nützlich, ein Funkgerät von einem PC aus zu steuern oder auch den Status (eingestellte Frequenz, Betriebsart) von einem PC aus abrufen zu können. Auch dazu dient die *CAT-Schnittstelle*.

Im Zusammenwirken z. B. mit Logbuchprogrammen kann die Frequenz und Sendeart direkt übernommen werden – eine große Hilfe im Contest, wo man sonst leicht vergisst, einen Bandwechsel auch im Logbuchprogramm einzugeben.

33.5.3 Digitaler Funkverkehr mit PC und Funkgerät

Das Prinzip der Digimodes für schmalbandige Übertragung wurde im Zusammenhang mit RTTY schon angedeutet: Die Interaktion mit dem Nutzer (Texteingabe) sowie die Modulation/Demodulation erfolgt mit spezieller Software auf dem PC. Im Licht der Ausführungen über digitale Sende- und Empfangstechnik (siehe Abschnitt 17.5) kann man es so formulieren: Alle Schritte von der Quellcodierung über die Kanalcodierung und das Symbol-Mapping bis zum I-Q-Modulator laufen auf dem PC.

Die I-Q-Modulation erfolgt bei einer Zwischenfrequenz im Audio-Bereich und erzeugt ein Signal im Bereich von 0 bis etwa 2,7 kHz (der Breite eines SSB-Kanals). Das Signal wird über die Soundkarte des PC als D/A-Wandler ausgegeben und das analoge Signal in den Mikrofoneingang eines SSB-Senders eingespeist. Dieser übernimmt die Umsetzung des Signals auf die Sendefrequenz, die der eingestellten Frequenz am Funkgerät plus der Audio-Frequenz bei der I-Q-Modulation entspricht.

Wird z. B. ein FT-8-Signal mit 1400 Hz erzeugt und auf 14074 kHz mit USB-Einstellung gesendet, entspricht dies einer Sendefrequenz von 14075,4 kHz. Beachten Sie, dass in LSB-Einstellung das Signalspektrum gespiegelt wird. Deshalb wird für die Digimodes auch auf den unteren Kurzwellenbändern die Einstellung »USB« verwendet. Beim Empfang dient der SSB-Empfänger nur dazu, das Signal auf eine Tonfrequenz herunterzusetzen, sodass es über die Soundkarte (A/D-Wandler) digital in den Rechner eingespeist werden kann. Alle weiteren Schritte bis zur Signalausgabe werden auf dem PC durchgeführt.

Je nach der gewünschten Betriebsart verwendet man die entsprechende Software, z. B. MMTTY, WSJT, fldigi oder KG-STV. Für digitale Sprachübertragung mit FreeDV gilt dies im Prinzip auch, nur benötigt man hier eine zweite Soundkarte für Mikrofon und Lautsprecher, da ja die Tonsignale ebenfalls im Rechner digital verarbeitet werden müssen.

Sowohl das Funkgerät als auch der PC sind Geräte, die mit Hochfrequenz arbeiten. Um Störungen aller Art (beim Empfang, verbrummtes Sendesignal usw.) zu vermeiden, müssen dabei beide Geräte elektrisch voneinander entkoppelt werden. Viele moderne Funkgeräte haben integrierte Soundkarten und können direkt über USB an einen PC angeschlossen werden. Hierbei können gleichzeitig die Steuerung des Transceivers über die CAT-Schnittstelle und der Funkbetrieb (Modulation/Demodulation) über ein gemeinsames USB-Kabel mit mehreren virtuellen COM-Ports realisiert werden.

Werden SDR-basierte Geräte verwendet, erübrigt sich der Weg über die Soundkarte, da die Demodulation und gegebenenfalls die Modulation direkt auf dem PC erfolgt. Hier stellt sich dann eher die Frage nach der Verbindung zwischen der Software zur

Steuerung des SDR und der zu Demodulation der digitalen Modes. Manche der SDR-Programme haben *Plugins* für verschiedene Digimodes, so z. B. *SDRSharp* und *OpenWebRX*. Umgekehrt haben manche der Digimode-Programme Schnittstellen für I-Q-Signale, die dann direkt verarbeitet werden können.

Andernfalls muss das Audiosignal des SDR in das entsprechende Digimode-Programm eingespeist werden. Dazu dienen »virtuelle Kabel«, die den Ausgang des SDR nicht auf den Lautsprecher, sondern auf den Eingang des Programms der Funkanwendung umlenken. Entsprechende Programme sind für Windows- und Linux-Rechner verfügbar. Dies wurde in Abbildung 33.1 für den Empfang von RTTY mit MMTTY und einem remote betriebenen OpenWebSDR-Empfänger genutzt: Das Audiosignal aus dem Webbrowser, mit dem der Empfänger bedient wird, wird auf den Eingang des virtuellen Kabels geschaltet. Die MMTTY-Software wird so konfiguriert, dass sie als Eingang den Ausgang des virtuellen Kabels nutzt.

Ältere Funkgeräte haben meist nur eine serielle Schnittstelle, die zur Steuerung dient, und analoge Ein- und Ausgänge für die Tonsignale. Bei Laptops kann man meist die Soundkarte und die Ein- und Ausgänge der Funkgeräte direkt verbinden, da durch den Gleichstrombetrieb über das Netzteil keine Brummschleifen entstehen.

Bei PCs werden zur Entkopplung entweder Übertrager oder Optokoppler verwendet. Hierzu dienen Geräte wie das *Tiger SignaLink USB* (siehe Abbildung 33.7).



Abbildung 33.7 SignaLink USB

Es wird über den USB-Port an den Rechner angeschlossen. Für die unterschiedlichen Anschlüsse der Funkgeräte gibt es passende Kabelsätze. So kann man bei vielen Funkgeräten Anschlüsse mit den Bezeichnungen »DATA« oder »ACC« nutzen. In anderen Fällen schließen Sie das Gerät einfach an den Lautsprecherausgang und die Mikrofonbuchse an. Die Sende-Empfangs-Umschaltung geschieht per VOX (*Voice Operated Transmitter*).

Das SignaLink USB bietet eine interne Soundkarte, sodass die Soundkarte des PCs für andere Zwecke genutzt werden kann.

Dieses Gerät bietet keine Fernsteuerung des Funkgeräts. Zum Steuern eines Funkgeräts wird an Funkgeräten die CAT- bzw. CIV-Buchse verwendet. Hier müssen die Steuersignale im richtigen Format ankommen. In jedem Steuerungsprogramm sind deshalb die verwendete Schnittstelle, die Geschwindigkeit, die Start-/Stopp-Bits usw. festzulegen. Manche Geräte können nur über eine serielle Schnittstelle kommunizieren. Hierfür muss ein passender Schnittstellenwandler eingesetzt werden, falls der PC keine RS-232-Anschlüsse mehr aufweist.

Das *SB-2000 Radio Interface* von CG-Antenna (siehe Abbildung 33.8) ermöglicht die Steuerung des Funkgeräts und hat eine passive Entkopplung der NF-Leitungen. Auch hier gibt es für das jeweilige Funkgerät passende Kabelsätze (siehe Abbildung 33.9).



Abbildung 33.8 SB-2000 – die Steueranzeigen



Abbildung 33.9 SB-2000 – die Verkabelungsseite

Wie das Zusammenspiel in der Praxis aussieht, zeigt Abbildung 33.10. Hier wurde ein *Yaesu FT-817ND* über das SB-2000 mit dem Rechner verbunden. Die PC-interne Soundkarte übernimmt die Signalerzeugung bzw. Dekodierung. Das Programm *fldigi* übernimmt dabei die Gerätesteuerung sowie die Eingaben und Ausgaben der Funkverbindungen.

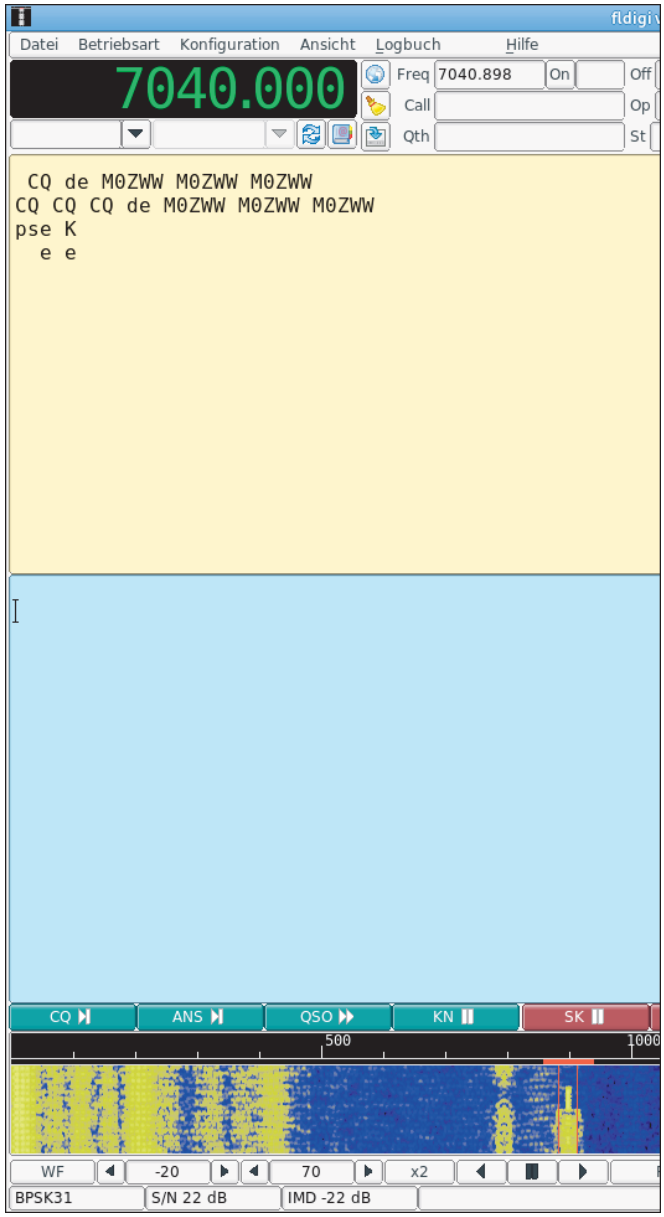


Abbildung 33.10 Empfang eines allgemeinen Anrufs auf 40 m in der Betriebsart BPSK31 mit der Software fldigi

Über die USB-Verbindung herumvagabundierende hochfrequente Energie kann beim Senden den Rechner stören. Abstürze, aber auch Störgeräusche aus den Lautsprechern treten durch sie auf.

Als ersten Reparaturversuch setzen Sie entsprechende Klappferrite auf alle Kabelverbindungen, die mit der Verbindung zwischen Funkgerät und PC zu tun haben. Führt dies zu keiner deutlichen Besserung, können Sie noch versuchen, die Geräte gemeinsam zu erden. Dazu versehen Sie das Verbindungskabel an beiden Enden mit Kabelschuhen. Funkgeräte haben meist auf der Rückseite hierfür schon eine Schraube, mit der eine Erdung angeschlossen werden kann. An der PC-Rückseite finden sich auch meist Bohrungen, durch die Sie eine Schraube (*M4*, *M6*) stecken und befestigen können. Zur Not verbinden Sie das Erdkabel mit der Gehäuseverschraubung.

Kommen dann beim Senden immer noch schräge Töne aus dem Lautsprecher, kann auch eine Direkteinstrahlung in die Aktivboxen vorliegen. Dann braucht es andere, einstrahlfeste Ausführungen, oder Sie setzen eine geerdete Stahlblechhülle auf, die nur auf einer Seite eine Schallöffnung aufweist.

Damit bei PSK31, FreeDV usw. die Gegenseite die Signale auch dekodieren kann, darf der Sender nicht übersteuert werden. Setzen Sie die Eingangslautstärke des NF-Signales vom PC nur so hoch, dass die *ALC* gerade nicht eingreift. Dann geht das Signal unverfälscht »in die Luft«. Natürlich ist die gemittelte Senderausgangsleistung damit geringer – einzelne Signalspitzen erreichen trotzdem den höchstmöglichen Wert!

Kapitel 34
Remote-Funkbetrieb

Unter dem Begriff *Remote-Betrieb* versteht man, dass zwischen dem Arbeitsplatz des Funkers und der eigentlichen Funktechnik eine räumliche Trennung besteht. Was früher wegen des enormen technischen Aufwands nur den kommerziellen Funkdiensten vorbehalten war, steht im Grunde inzwischen allen Funkamateuren zur Verfügung. Heute wird zur Verbindung des Bedienplatzes mit der Funkanlage Netzwerktechnik benutzt.

Ab dem 24. Juni 2024 ist es Funkamateuren der Klasse A in Deutschland erlaubt, Remote-Funkbetrieb durchzuführen.

Bereits in Abschnitt 1.5.1, »SDR-Empfang per Internet«, haben Sie den Remotebetrieb für den Empfang ganz praktisch kennengelernt. Für den sicheren Einsatz und den Betrieb einer solchen Außenstelle sollten Sie jedoch noch einige weitere Überlegungen anstellen.

34.1 Verbindung der Funkanlage mit dem Netzwerk

Einige Funkgeräte, wie beispielsweise das FlexRadio 6400 ATU, haben bereits einen Netzwerkanschluss. Hier brauchen Sie keine zusätzliche Technik verbauen, denn das Gerät kann direkt mit dem Netzwerk verbunden werden. Es gibt auch reine Empfänger mit dieser Eigenschaft. Auch das Zubehör, wie beispielsweise Antennenrotoren, ist mittlerweile optional per Netzwerkzugriff fernsteuerbar. Auch für einige SDR-Funkgeräte gibt es eine externe Bedienkonsole, die per Netzwerk verbunden wird. Diese ersetzt dann den PC als Bedienplatz und ist in der Handhabung meist übersichtlicher.

Die (noch) größere Anzahl von Funkgeräten benötigt für die Fernsteuerung jedoch einen Rechner vor Ort. Gerät und Rechner werden meistens mittels USB-Verbindung, aber auch noch über spezielle Adapter gekoppelt. An diesem Rechner muss dann die Bedienungssoftware laufen. Diese Bedienungssoftware ist vom Gerätehersteller selbst oder von Drittanbietern erhältlich. Auch Open-Source-Programme wie `flrig` gibt es für viele, zum Teil auch ältere Funkgeräte. Speziell für die Geräte des Herstellers ICOM können Sie auch `wfview` (*https://wfview.org*) nutzen.

Die Fernsteuerung des Rechners selbst erfolgt mit gängigen Programmen wie beispielsweise *X2GO* oder über das *Remote Desktop Protocol* (RDP). Achten Sie darauf, dass auch der Sound in beide Richtungen übertragen werden kann!

Dafür muss eine IP-Adresse im lokalen Netzwerk vergeben werden, egal ob das Funkgerät selbst eine Netzwerkschnittstelle aufweist oder ein Rechner die direkten Steuerungsaufgaben übernimmt. In privaten Haushalten überlässt man das alles dem Internetrouter. Im lokalen Netz wird für die Adressierung das Internetprotokoll Version 4 (IPv4) genutzt. Lokale Adressen des IPv4 werden nicht ins Internet durchgeroutet! Bei IPv4 hat ein Gerät im Normalfall nur eine Adresse. Anders verhält es sich beim Nachfolger IPv6. Hier hat ein Gerät sowohl eine nur lokal genutzte Adresse als auch eine oder mehrere weitere Adressen für nicht lokale Belange.

Beim IPv4 nutzt man gewöhnlicherweise genau eine Adresse je Gerät, beispielsweise 192.168.1.10. Diese Angabe alleine reicht jedoch noch nicht aus. Zusätzlich wird die Netzmaske bzw. Subnetzmaske angegeben.

Lautet der Eintrag 255.255.255.0, so ist der gesamte lokale Adressraum erreichbar und man spricht korrekterweise von der Netzmaske. Liegt ein anderer Eintrag vor, z. B. 255.255.255.224, so umfasst der erreichbare Adressbereich 30 Adressen und man spricht von der Subnetzmaske. Eine Unterteilung in Subnetze ist sinnvoll, wenn Sie beispielsweise Amateurfunk und andere Anwendungsfälle oder Gäste im Netzwerk auseinanderhalten möchten.

Es gibt eine alternative Schreibweise, nämlich die CIDR-Schreibweise. Die beiden Beispiele sehen dann so aus: 192.168.1.10/24 (kompletter Adressbereich mit 254 durch Geräte nutzbare Adressen) und 192.168.1.10/27 für die 30 Adressen.

Zwei Adressen können nicht durch Geräte genutzt werden: die NNN.NNN.NNN.0 (Netzwerkadresse) und die NNN.NNN.NNN.255 (Broadcastadresse). Der Router hat im Normalfall NNN.NNN.NNN.1.

Die verwendete IP-Adresse und die Subnetzmaske zusammen ergeben den über die Schnittstelle erreichbaren Adressbereich.

34.2 Remote-Funkbetrieb innerhalb der eigenen Grundstücksgrenze

Remote-Funkbetrieb kann sich auch auf das eigene Grundstück erstrecken (siehe Abbildung 34.1). Wenn sich die Funktechnik dabei antennennah unterbringen lässt, so haben Sie insbesondere bei den Bändern ab 144 MHz die Kabeldämpfung weitgehend eliminiert. Wenn Sie die Funktechnik zudem mittels LWL-Verkabelung mit Ihrem Hausnetz verbinden, minimieren Sie sowohl Empfangsstörungen als auch eventuelle Netzwerkprobleme durch Einstreuungen. Eine Verbindung per WLAN kann ich

allerdings nur eingeschränkt empfehlen, denn dabei können die auftretenden Verzögerungen (Latenzen) störend wirken.

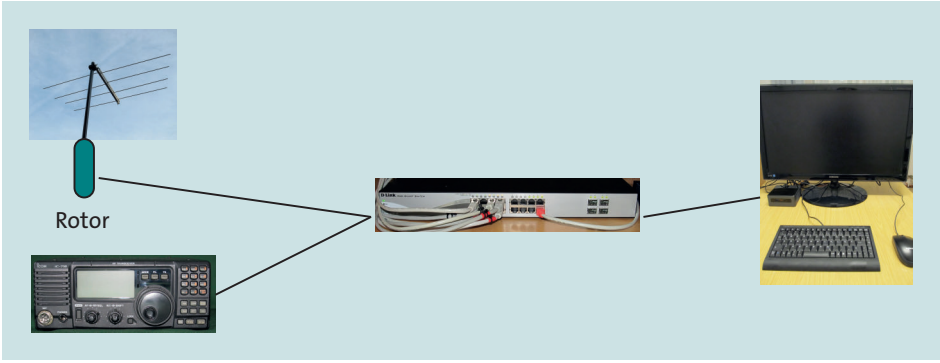


Abbildung 34.1 Abgesetzter Funkbetrieb innerhalb des eigenen Grundstücks

Der Funkgerätehersteller ICOM geht mit seinem Modell IC-905 einen alternativen Weg. Hier ist die eigentliche Sende-/Empfangseinheit für die Bänder 144, 430, 1200, 2400 und 5600 MHz, optional auch 10 GHz, direkt im Außenbereich angebracht. Das Bediengerät im Funkraum ist über ein bis zu 50 m langes Steuerkabel verbunden, das auch die Stromversorgung übernimmt. Damit umgehen Sie die üblichen Kabelverluste, denn die Strecke zwischen Sendempfänger und Antenne ist damit sehr gering. Das Gerät arbeitet in den Sendearten AM, FM, SSB, CW, RTTY, D-STAR DV/DD und FM-TV (Amateur-TV).

34.3 Remote-Funkbetrieb weltweit

Der »Traumstandort« Ihrer Funkanlage wird nur durch Ihre finanziellen Mittel und die notwendigen Beziehungen bestimmt. Mietplätze auf ehemaligen Radartürmen, Berghütten oder auch in abgelegenen ländlichen (und damit störungsärmeren) Regionen ermöglichen Funkverkehr, wie er in den Ballungsräumen oder engen, tiefen Tälern nicht immer gelingt. Vielfach betreiben Funkfreunde gemeinsam so einen Standort, was nicht nur die Kosten mindern kann.

Abbildung 34.2 zeigt Ihnen auch die grobe Unterteilung in die Aufgabenbereiche der einzelnen Komponenten.

Im Block 1, dem *Bedienplatz*, verwenden Sie einen Computer oder ein gerätespezifisches Bedienteil. Hier werden die Audio- und Steuersignale des Benutzers in Datenpakete für die Netzwerkübertragung umgewandelt. Umgekehrt werden hier auch die empfangenen Daten- und Audiosignale wiedergegeben.

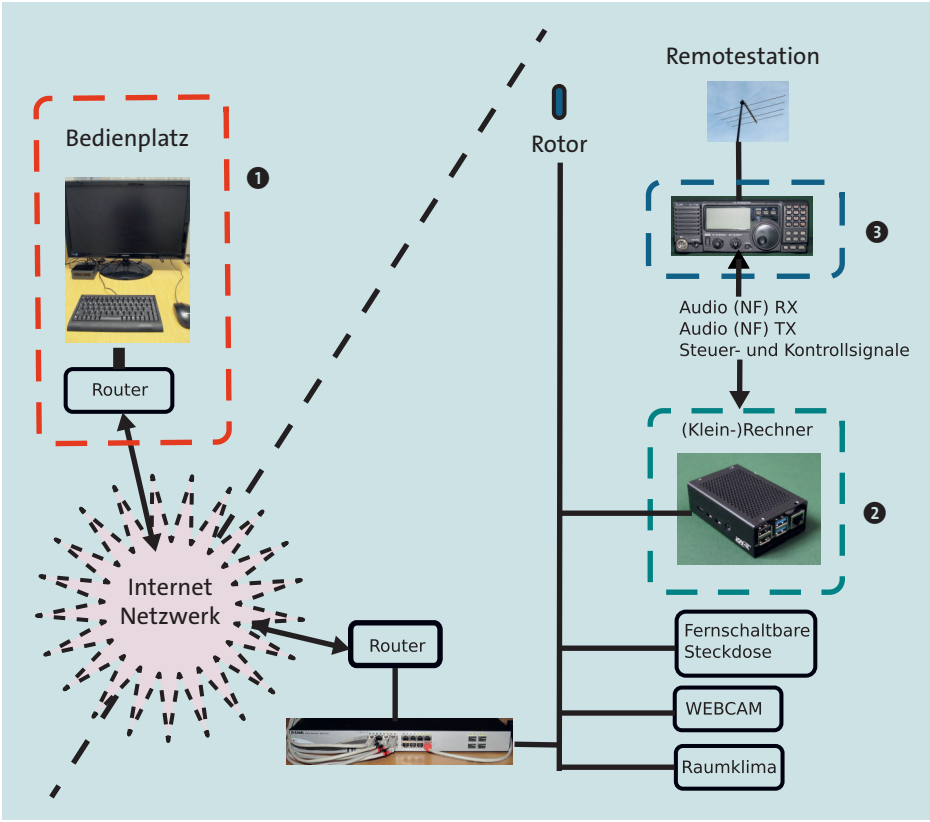


Abbildung 34.2 Abgesetzter Funkbetrieb (weltweite Standortwahl)

Der Block 2 besteht aus einem Computer oder einem Remote-Interface. Die aus dem Netzwerk/Internet ankommenden Datenpakete werden in Audio-, Daten- und Steuersignale für die Aussendung umgewandelt.

Beim Block 3 handelt es schließlich um das ferngesteuerte Funkgerät selbst.

Allerdings hat ein fernab der eigenen Funkbude gelegener Remote-Standort auch spezielle Anforderungen und Nachteile, die Sie bedenken sollten:

- Denken Sie an die oft langen Anfahrtswege, besonders im Winter!
- Eine Fernüberwachung von Raumtemperatur und gegebenenfalls Luftfeuchtigkeit kann notwendig sein, damit sichergestellt ist, dass alles wie gewünscht funktioniert.
- Auch die Fernüberwachung des Geräteraums mittels Webcam ist empfehlenswert.
- Kalkulieren Sie mit höheren Stromkosten als bei einer Anlage, die Sie direkt bedienen, da einige Zusatzgeräte notwendig sind.

- Nützlich ist ein »Hausmeister« in der Nähe – am besten mit Funkkenntnissen – um bei Störungen eingreifen zu können.
- Kalkulieren Sie die Mietkosten, Versicherungen, Unterhalt usw. lieber etwas großzügiger.
- Für die Internetanbindung ist eine feste IP-Adresse bzw. eine DynDNS-Konfiguration für den Remotestandort sehr empfehlenswert.
- Und sorgen Sie für die Sicherheit: Das Funkgerät bzw. der Steuerrechner und das Zubehör dürfen nicht offen vom Internet aus sichtbar sein. Ein Zugriffschutz für das Remote-LAN und die Gerätebedienung verhindert eine missbräuchliche Nutzung der Funkstelle. Richten Sie am besten ein VPN ein.
- Machen Sie die Verbindungen zwischen dem Remote-Funkgerät und dessen Steuerungseinrichtungen einstrahl- und einströmsicher, damit es zu keinerlei Beeinträchtigungen dieser zentralen Komponenten kommt.
- Sehen Sie (für jedes) Funkgerät einen fernabschaltbaren Stromanschluss vor. Sollte die Fernsteuerung während des Sendebetriebs ausfallen, können Sie eine Notabschaltung durchführen.
- Ein weiter Schutz vor einer unerwünschten Dauersendung im Falle eines Kontrollverlustes besteht in der Aktivierung eines Watchdogs (»Quasselsperre«).
- Ihre Remotestation ist nicht kaputt, wenn Sie Latenzen bemerken. Diese Verzögerungen sind der (mehrfachen) digitalen Wandlung der Informationen und deren Übertragung über das Internet geschuldet (Sichworte: FM-Radio vs. DAB+-Radio, Beginn einer Nachrichtensendung, ein Fußballtor ...).

Außerdem müssen Sie beim Remotebetrieb die Ausschreibungen von Diplomen und Wettbewerben für diese Betriebsform beachten. Und gesetzliche Bestimmungen für den Amateurfunk gelten in der Regel für den Standort der Funktechnik, nicht für den des Bedieners.

Funkamateure der Klasse A, die gleichzeitig Mitglieder des Deutschen Amateurradioclubs (DARC) sind, können vereinsseitige Remotestationen nutzen. Dazu müssen Sie auf mydarc angemeldet sein und über einen Windows-Rechner mit USB-Headset oder vergleichbaren Audiogeräten verfügen. Zusatzgeräte wie ein VFO-Rad oder PTT-Schalter erhöhen den Bedienkomfort.

Kapitel 35
Morsen

Sie dürfen hierzulande ohne amtliche Prüfung Morsetelegrafie im Amateurfunk verwenden. Eine freiwillige Prüfung ist dann notwendig, wenn Sie vorhaben, vom Ausland aus den Betrieb aufzunehmen und das Gastland noch auf einer amtlichen Morseprüfung für den Zugang zur Kurzwelle besteht. Morsetelegrafie hat einige Vorteile gegenüber dem Sprechfunk:

- Der Betrieb ist mit einfachsten Geräten möglich.
- Eine Verständigung ist ohne tiefgehende Fremdsprachenkenntnisse möglich, da Amateurfunkabkürzungen international verwendet werden und überall die gleiche Bedeutung haben.
- Die geringen Sendeleistungen reichen für weltumspannenden Verkehr aus, daher ist Morsetelegrafie besonders bei Akkubetrieb ohne Zugang zum öffentlichen Stromnetz interessant.
- Im Störnebel oder bei dichter Bandbelegung hört man immer noch »seine« Station heraus. Dabei wird das Morsen nur von wenigen digitalen Verfahren, wie beispielsweise FT8, übertroffen.
- Wie die meisten digitalen Verfahren auch ist Morsetelegrafie eine »leise« Kommunikation: Kopfhörerbetrieb und das leise Klicken der Morsetaste stören keine Mitbewohner, wenn Sie in der Nacht Ihre Verbindungen haben.

Irgendwann fühlen Sie sich sicher genug, in Morsetelegrafie auf Sendung zu gehen. Die Aufregung wird sich mit der Zeit und der Routine legen. Damit der Start klappt, beherzigen Sie bitte die Ratschläge im Kasten.



Morsen – einige Spielregeln

- Betrachten Sie die Morsezeichen weder als »Punkt« und »Strich« noch als »Kurz« oder »Lang« sondern als »DIT« und »DAH«. So arbeiten Sie stets mit dem Klangbild und prägen sich keine optischen Muster ein, die Sie besonders bei der Gehöraufnahme stören werden.
- Geben Sie nur so schnell, dass Sie dabei auch saubere Zeichen hervorbringen!
- Verwenden Sie die Morsetaste, deren Handhabung Ihnen liegt!

- Stellen Sie Ihre Gebegeschwindigkeit auf Ihr Gegenüber ein. Damit vermeiden Sie Rückfragen, und Ihr QSO-Partner wird Sie als höflich und rücksichtsvoll empfinden.
- Überlassen Sie das Hören nicht dem Computer oder der App. Das geht nur so lange gut, wie die empfangene Station eine elektronische Morsetaste benutzt und keinerlei Störungen vorliegen. Die Morsetelegrafie ist kein Ersatz für die digitalen Sendearten oder das Fernschreiben!
- Nehmen Sie eine bequeme Haltung ein, damit Sie nicht schnell ermüden. Bei der Verwendung einer Handtaste sollte der Unterarm nicht aufliegen; stellen Sie die Taste dabei fast an den vorderen Tischrand. Der Tastenteller/-knopf wird mit mehreren Fingern gehalten, auch der Daumen ist einbezogen. Wenn Sie eine automatische Taste (*Bug*, *Squeeze*) nehmen, sollte der Unterarm aufliegen. Sie vollführen hierbei mehr Finger- als Handbewegungen.

35.1 Morsezeichen

Der Morsecode ist ein nach seinem Erfinder Samuel Morse benannter Code zur telegrafischen Übermittlung von Buchstaben, Ziffern und weiteren Zeichen. Das Morsealphabet beinhaltet die Buchstaben des Alphabets, es gibt aber noch weitere Zeichen, wie beispielsweise spezielle Betriebszeichen, die für eine vollständige Kommunikation zwischen zwei oder mehreren Kommunikationspartnern notwendig sind. Tabelle 35.1 bis Tabelle 35.4 zeigen die gängigsten Zeichen.

Zeichen	Aufbau	Klangbild	Zeichen	Aufbau	Klangbild
A	. -	di dah	Ä	. - . -	di da di dah
B	- . . .	da di di dit	C	- . - .	da di da dit
CH	- - - -	da da da dah	D	- . .	da di dit
E	.	dit	F	. . - .	di di da dit
G	- - .	da da dit	H	. . . .	di di di dit
I	. .	di dit	J	. - - -	di da da dah
K	- . -	da di dah	L	. - . .	di da di dit
M	- -	da dah	N	- .	da dit
O	- - -	da da dah	Ö	- - - .	da da da dit

Tabelle 35.1 Buchstaben

Zeichen	Aufbau	Klangbild	Zeichen	Aufbau	Klangbild
P	. - - .	di da da dit	Q	- - . -	da da di dah
R	. - .	di da dit	S	. . .	di di dit
T	-	dah	U	. . -	di di dah
Ü	. . - -	di di da dah	V	. . . -	di di di dah
W	. - -	di da dah	X	- . . -	da di di dah
Y	- . - -	da di da dah	Z	- - . .	da da di dit

Tabelle 35.1 Buchstaben (Forts.)

Zeichen	Aufbau	Klangbild
1	. - - - -	di da da da dah
2	. . - - -	di di da da dah
3	. . . - -	di di di da dah
4	. . . . -	di di di di dah
5	. . . . .	di di di di dit
6	-	da di di di dit
7	- - . . .	da da di di dit
8	- - - . .	da da da di dit
9	- - - - .	da da da da dit
0	- - - - -	da da da da dah

Tabelle 35.2 Zahlen

Zeichen	Aufbau	Klangbild	Bedeutung
(k)	- . -	da di dah	Kommen
(r)	. - .	di da dit	Richtig

Tabelle 35.3 Betriebszeichen

Zeichen	Aufbau	Klangbild	Bedeutung
(ka)	- . - . -	da di da di dah	Spruchanfang
(ar)	. - . - .	di da di da dit	Spruchende [+]
(sk)	. . . - . -	di di di da di dah	Verkehrsende
(eb)	. - . . .	di da di di dit	Warten
(ve)	. . . - .	di di di da dit	Verstanden
8 dit	. . . .	di di di di di di di dit	Irrung
(ii)	. . . .	di dit di dit	Gruppenwiederholung

Tabelle 35.3 Betriebszeichen (Forts.)

Weitere spezielle Morsezeichen sind noch für Rechenzeichen oder neuere Buchstaben, wie das @ für die Übermittlung einer E-Mail-Adresse, definiert. Sie sehen also: Morsezeichen leben und entwickeln sich ständig weiter.

Zeichen	Aufbau	Klangbild
@	. - - . - .	di da da di da dit
/	- . . - .	da di di da dit
:	- - - . . .	da da da di di dit
.	. - . - . -	di da di da di dah

Tabelle 35.4 Spezielle Zeichen für Internet- und E-Mail-Adressen

35.2 Ablauf einer Morseverbindung

Die Kürzel »QSO« und »Sked« werden für Kommunikationsverbindungen beim Morsen verwendet:

- »Sked« bedeutet »Verabredung/Schedule« und bezeichnet einen vorher vereinbarten Kommunikationsaustausch zwischen zwei Amateurfunkern.
- Ein QSO ist nicht verabredet, also eine zufällige Begegnung auf dem Band.

Wenn Sie diesem Ablauf zum ersten Mal zuhören, wird Ihnen diese Kommunikation ziemlich undurchsichtig erscheinen. Sie folgt aber mehr oder weniger festen Regeln; es gibt Informationen, die erwartet werden, und Informationen, die optional sind.

Mit der Zeit bekommt man Erfahrung, und mit zunehmender Betriebspraxis wird solch ein Austausch zur Routine und zum Vergnügen.

Nachfolgend finden Sie Kochrezept für den Einstieg, wie ein Anruf und auch eine Antwort auf einen Anruf aussehen kann.

Nehmen wir an, die beiden Funkamateure Harald DL6RAL und Jörg DJ4WD treffen sich auf dem Band. Harald befindet sich mit seiner Amateurfunkstation in der Nähe von Berlin, Jörg befindet sich in der Nähe von Frankfurt. (Die ganz genauen Wohnorte sind bei der ersten Funkverbindung nicht notwendig. Es geht weniger um den genauen Wohnort, sondern eher um eine Einschätzung der Wellenausbreitung. Meist wird dafür auch noch der Locator übermittelt. Nehmen Sie also die nächste größere Stadt, die auch auf einer Landkarte zu finden ist.)

Schauen wir uns dazu ein Beispiel an: Jörg DJ4WD hört auf dem Band einen allgemeinen Anruf von DL6RAL:

```
cq cq cq de dl6ral dl6ral ar k
```

Jörg kann den Anruf klar und gut verstehen und beschließt zu antworten:

```
dl6ral de dj4wd ar k
```

Harald hört wiederum die Antwort auf seinen Anruf von DJ4WD klar und deutlich und beschließt mit ihm ein QSO zu haben:

```
dj4wd de dl6ral

ge dr om

tks fer call

rst 599 5nn

name harald harald

qth berlin berlin

wx is cloudy temp 15 c

rig ts590 pwr 50 watts

ant dipole

loc jo62nh

hw? dj4wd de dl6ral kn
```

Jörg hat dies alles gehört und die wichtigsten Angaben, wie Name, Rufzeichen, Wohnort, Locator und vielleicht auch die Stationsausstattung notiert. Einige Angaben davon wird er später in sein Logbuch übernehmen.

Er sendet nun seine Antwort und orientiert sich an der Menge der Informationen und der Reihenfolge in etwa an seinem Funkpartner. Manche Amateurfunker senden mehr, manche weniger; dies ist oft abhängig von der Routine und Übung, die man

hat. Auch mit der CW-Geschwindigkeit passt sich der Antwortende immer dem Anrufenden an!

dl6ral de dj4wd

ge lbr om harald

tks fer fb rprt

rst 599 5nn

name joerg joerg

qth nr frankfurt

wx is cloudy temp 12 c

rig orion pwr 100 watts

ant vertical

loc jn49mr

hw? dl6ral de dj4wd kn

Damit ist der erste Durchgang abgeschlossen, und alle notwendigen Informationen für eine erfolgreiche Verbindung sind übertragen. Ab diesem Punkt darf die Funkverbindung in das Logbuch eingetragen werden.

Nun folgt der zweite Durchgang, der ein Dankeschön und die Verabschiedung beinhaltet. Harald ist wieder an der Reihe:

dj4wd de dl6ral

all ok dr om joerg

tnx fr fb rprt

pse ur qsl my qsl sure via buro

tnx fer nice qso

hpe cuagn 73 es gl tu

dj4wd de dl6ral sk

Harald hat am Ende seines zweiten Durchgangs ein »sk« gegeben, was »Verkehrsende« bedeutet. Jörg weiß nun, dass nach seiner Übermittlung keine weitere Antwort von Harald kommen wird. Seine Antwort wird also alles beinhalten müssen, was nun noch wichtig sein könnte. Falls er im ersten Durchgang etwas vergessen hat, wird er es hier noch unterbringen müssen:

dl6ral de dj4wd

all gd lbr harald

tnx fr ur rprt

```
qsl sure

tnx fer nice qso

hpe cuagn 73 es gl tu

dl6ral de dj4wd sk
```

Wie Sie sehen, wird ein CW-QSO nicht in Klartext geführt. Es würde zu lang werden und Ewigkeiten dauern – länger, als manchmal die Ausbreitungsbedingungen eine stabile Kommunikation zulassen. Aus diesem Grund hält man sich kurz und übermittelt so zügig wie möglich alle notwendigen Informationen, damit die Verbindung erfolgreich ins Logbuch übernommen werden kann.

In dem Beispiel konnten Sie nun einige der gängigsten Amateurfunkkürzel sehen. Deren Bedeutung muss den Funkpartnern bekannt sein und sie müssen Ihnen flüssig »von der Hand gehen«, damit die Funkverbindung Spaß macht und effizient ist. Auch beinhaltet dieses Beispiel-QSO einige Dinge, die die gebräuchliche Praxis darstellen, beispielsweise die Übermittlung des Rufzeichens des Funkpartners und des eigenen Rufzeichens am Anfang und am Ende der jeweiligen Übermittlung. Auch haben Funkverbindungen in einem Contest andere Regeln als ein normales CW-QSO am Abend.

Warum dies alles so gemacht wird und welche weiteren wichtigen Regeln für die Betriebspraxis und erfolgreiche QSOs nötig sind, bringt Ihnen ein Morsefreund bei. Besorgen Sie sich eine Morsezeichen-Kurzreferenz, wenn Sie mit dieser Betriebsart beginnen möchten, um alle nötigen Abkürzungen übersetzen und lernen zu können.

35.3 Welche Taste?

Zum Lernen, aber auch zur Teilnahme am Funkbetrieb eignet sich natürlich die klassische Handtaste, wie in Abbildung 35.1 gezeigt. Dieses Modell stammt, wie unschwer zu erkennen ist, aus einer militärischen Vornutzung und ist auch für Einsätze im Gelände robust genug. Im Inneren derartiger Tasten finden Sie Einstellmöglichkeiten für den Tastenhub und manchmal auch für die Gängigkeit. Handtasten werden auch heute noch produziert, zum Teil als hochpräzise Einzelstücke.

Einen Vorteil der Handtasten möchte ich noch erwähnen: Sie können während der Verbindung ohne einen weiteren Handgriff Ihre Geschwindigkeit erhöhen oder senken, ganz wie Ihr Funkpartner es benötigt.

Sehr verbreitet sind die automatischen Morsetasten mit Squeeze-Technik. Hierbei drücken Sie mit Daumen und Zeigefinger auf die *Paddles*. Jeweils eines steht für Punkt, das andere für Strich. Drücken Sie beide gleichzeitig, so werden so lange abwechselnd ein Punkt und ein Strich gegeben, bis Sie die Tasten loslassen.



Abbildung 35.1 Handtaste

Damit dies auch so funktioniert, muss die Taste selbst oder das Funkgerät mit einem *Keyer* ausgestattet sein. Damit stellen Sie auch Ihre Geschwindigkeit ein. In der Praxis kommt es darauf an, wie schnell Sie auf Geschwindigkeitsänderungen reagieren können: Bei manchen Funkgeräten müssen Sie sich durch einen Menübaum hangeln, bis Sie an die Einstellungsmöglichkeit gelangen. Hier ist ein externes Gerät besser zu handhaben. Ist auf der Frontplatte ein »CW-Speed«-Regler zu finden, passt das auch. Abbildung 35.2 zeigt eine Squeeze-Taste der Firma Bencher.

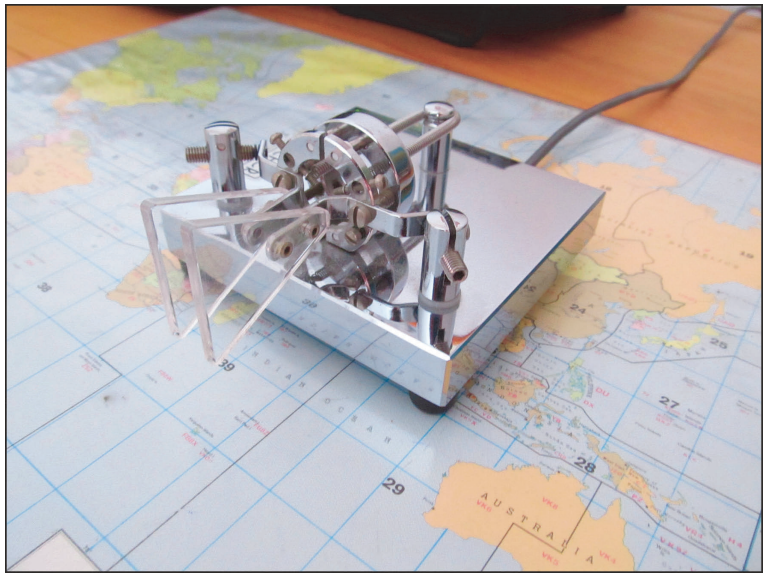


Abbildung 35.2 Squeeze-Taste

Im oberen Geschwindigkeitsbereich haben solche Tasten natürlich den Vorteil, immer saubere und exakte Morsezeichen abzuliefern. Zudem ermüden Sie nicht so leicht und halten auch im dicksten Contest-Trubel mit.

Bevor Sie sich eine Morsetaste zulegen, probieren Sie verschiedene Modelle aus. Nehmen Sie einen erfahrenen Telegrafisten mit, der Ihnen den einen oder anderen Ratschlag geben kann. Eine Morsetaste auszusuchen kann genauso schwierig sein, wie ein Paar passende Schuhe zu kaufen. Manchmal merkt man erst später, wenn es nicht ganz passt ...

35.4 Morsen lernen

Sie können Morsen auf verschiedene Art und Weise erlernen:

- **Kurse**: Oftmals werden Morsekurse von manchen Ortsverbänden des DARC oder VFDB veranstaltet. Diese haben den Vorteil, dass auch Ihre Gebeweise von einem Lehrer geschult wird.
- **Software**: Sie finden diverse Apps und Programme für das Selbstlernen im Internet.
- **Online**: Direkt per Webbrowser lernen Sie auf der Seite *https://lcwo.net/*. Hierbei benötigen Sie nur eine halbwegs gute Internetverbindung, brauchen aber nichts zu installieren.
- **Audiokurse**: Vollständige Audiokurse, zum Teil mit Begleitmaterial, werden oft von den Amateurfunkverbänden angeboten und können teilweise kostenfrei heruntergeladen werden.
- **Infos von den Profis**: Besuchen Sie für weitere Informationen zum Erwerb von Telegrafiekenntnissen auch die Seite der Arbeitsgemeinschaft Telegraphie e. V. (AGCW-DL) unter *https://www.agcw.de*.

Ein einfaches Programm zum Üben und Vertiefen ist *xcwp* (*unixcw*), erhältlich unter *http://unixcw.sourceforge.net*. Ähnliche Programme finden Sie auch für Apple-Rechner und das Microsoft-Windows-System.

xcwp ist intuitiv bedienbar. Sie können den Zeichenumfang, die Geschwindigkeit, die Tonhöhe und die Pausenlänge zwischen den Gruppen während des Ablaufs direkt einstellen. Sie starten eine Übung durch Klick auf das pfeilartige Startsymbol. Läuft die Übung, können Sie diese mit einem Klick auf das Stopp-Symbol wieder abbrechen. Mit Program • Clear Text löschen Sie den Übungsbildschirm.

Eine Übungssitzung finden Sie in Abbildung 35.3 dargestellt.

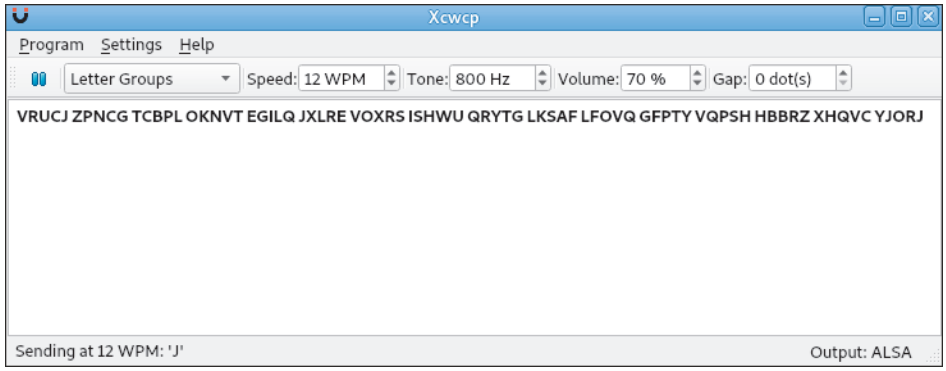


Abbildung 35.3 Morsen üben mit xcwp

Trotz all den modernen Möglichkeiten, das Morsen lernen zu können, ist der Sprung von den ersten erlernten Zeichen hin zu einem vollständigen und fehlerfreien Austausch mit einem Funkpartner über die Wellen groß: Für ein sauberes QSO ist das fehlerfreie Beherrschen der Betriebstechnik wichtig. Sie müssen die gängigsten Amateurfunkabkürzungen kennen, die in CW genutzt werden, und Sie müssen die Verbindung einschätzen können und mithilfe des RST-Systems an den Funkpartner zurückmelden. Später müssen Sie lernen, wie man in einer CW-Runde mit mehreren Teilnehmern oder in einem Contest kommuniziert. Aber all dies läuft geordnet nach Regeln ab und erfordert viel Übung. Aus diesem Grund benötigen Sie nach dem Absolvieren der Grundlagen einen CW-Lehrer, der Sie an die Hand nimmt und in die Betriebspraxis einführt. Solche CW-Lehrer werden auch *Morsefreund* genannt. Sie finden solch einen Morsefreund entweder auf einem OV-Abend in Ihrer Nähe, über die AGCW-Website oder auf Nachfrage in den verschiedenen Amateurfunk-Foren.

Index

(Voll-)Duplexverbindung ... 370
2-PSK ... 478
4-PSK ... 478
8-PSK ... 478

A

Absorptionsfrequenzmesser ... 614
Abstimmbox ... 702
Abtastrate ... 451, 486
Abtasttheorem ... 452, 484, 486
Abtastung ... 451
Abwärme ... 151
Adapter ... 52
Adernkennfarben ... 644
AFSK ... 366
AGDX ... 55
Aircraft-Scatter ... 580
ALC ... 766
Alias-Effekt ... 452
Alias-Signal ... 457
Amateurfunkbänder ... 43
Amateurfunk-Fernsehen ... 379, 466
Amateurfunkprüfung ... 661
Ablauf ... 661
Anmeldung ... 661
Amateurfunktagung München ... 55
Amperemeter ... 102, 592
Amperesekunde ... 104
Amperestunde ... 104
Amplitude Shift Keying ... 367
Amplitudenmodulation ... 40, 380
Amplitudenumtastung ... 367
Analog-Digital-Wandlung ... 454
ANT ... 38
Antenne
aperiodische ... 522
Delta-Loop ... 491, 504
Dipol ... 490, 493
Dreiecksschleife ... 504
EFHW ... 499
Eigenbau-Beispiele ... 708
Empfang ... 51
Faltdipol ... 504
Formen ... 489
Fuchsantenne ... 491, 498
G5RV ... 491, 503
Groundplane ... 490
Korrekturfaktor ... 492
Kraftfahrzeug ... 648
Kreuz-Yagi ... 525
künstliche ... 444, 610
Langdraht ... 490
LPDA ... 491, 526
Magnetic Loop ... 701
magnetische ... 675, 701
magnetische Ringantenne ... 518
mit Inch-Maßen ... 711
NVIS ... 494
Parabolspiegel ... 491
Polarisation ... 524, 563
Portabeleinsatz ... 736
Quadantenne ... 505
Richtantenne ... 506
Ringantenne ... 491
Rundstrahlantenne ... 513
selbst bauen ... 693
Sicherheit ... 645
Sperrkreis ... 501
Trapantenne ... 501, 502
Verkürzungsfaktor ... 492
Vertikalantenne ... 513
W3DZZ ... 491, 501
Windom ... 491, 499
Wurfantenne ... 51
Yagi ... 490, 507
Zeppelinantenne ... 498
Zuleitungen ... 678
Antennenanpassgeräte ... 559
Antennenisolatoren ... 694
Antennenlitze ... 694, 696
verarbeiten ... 696
Anti-Aliasing-Filter ... 452, 455
Arbeit (physikalische Größe) ... 61
Arbeitsgemeinschaft DX e. V. ... 55
Arbeitspunkt ... 291
ASCII ... 466
ATT ... 38
ATV ... 379
Audio Frequency Shift Keying ... 366, 367
Aurora ... 579
Ausbildungsrufzeichen ... 56
Automatic Gain Control ... 409

Autotransformator ... 226
AWGN-Kanal ... 468

B

Backscatter ... 574
Balancemischer ... 425
Balun ... 226, 557
Bandbreite ... 250, 467, 468, 476
Bandfilter ... 257
Bandpassfilter ... 257, 457
Basisbandsignal ... 484
Basiseinheiten ... 59
Baud ... 61, 377
Bauelement
bedrahtetes ... 85
oberflächenmontierbares ... 85
Bauvorschrift ... 645
BCH-Codes ... 474
Beat Frequency Oscillator ... 387
Belastbarkeit ... 151
BEMV-Erklärung ... 678
Bergfunker ... 713
Bestückungsseite ... 85
Betriebsart ... 41
BIAS-T ... 339
Bild ... 466
Binärzahlen ... 78
Bit ... 61
Bitfehler ... 483
Bitrate ... 61
Blindwiderstand ... 231
Blitzschutz ... 645
Blockcode ... 470
Blockgleichrichter ... 326
Blockschaltbild ... 394
BNC-Stecker ... 538
Bodenwelle ... 568
Breitbandausführung ... 435
Brummspannung ... 323, 332
Buchstabieralphabet ... 33
Buchstabieren ... 32
Bug ... 774

C

CAT-Schnittstelle ... 761, 762
CB-Funk ... 30
Chirps ... 426
Code Division Multiple Access, CDMA ... 485
Codec ... 464, 486
Codemultiplex-Verfahren ... 485
Codeplug ... 761
Coderate ... 470
Codewort ... 470, 486
COFDM ... 481
Contest ... 39
Conteststation ... 548
Continuous Tone Coded Subaudio Squelch ... 373
Coulomb ... 104
CTCSS ... 373
CW ... 369, 460
CW → Morsetelegrafie
Cyclic Redundancy Check ... 474

D

Dämpfung ... 66, 624
Dämpfungsfaktor ... 69, 586
Dämpfungsglied ... 409
Dämpfungsmaß ... 586
DARC ... 54
Datenübertragungsrate ... 61
De-Mapping ... 483
Demodulator ... 380
Deutscher Amateur-Radioclub e. V. ... 54
Dezibel
allgemein ... 66
Berechnungen ... 70
Dezimierung ... 457
Diamond X-30 ... 675
Dielektrikum ... 180
Digimode ... 762
Digital Mobile Radio ... 464
Digital-Analog-Wandler ... 415
Digital-Analog-Wandlung ... 456, 457
Digitale Filterung ... 460
Digitale Signalverarbeitung ... 415, 462
Digitalisierung ... 451
Dioden
Schaltungen ... 274
Spannungsabfall ... 272
Dipmeter ... 615
Dipol ... 493
Direct Conversion ... 484
Direkte digitale Synthese ... 351
Direktmischempfänger ... 398
Direktüberlagerungsempfänger ... 398
Distrikts-Ortsverbands-Kenner ... 54
DMR ... 485
DOK ... 54

Doppelsuper ... 404
Double Sideband ... 384
Drahtantennen ... 700
Dreheisenmesswerke ... 594
Drehkondensator ... 701, 702
Drehspulmesswerke ... 593
Dreifachsuper ... 404
DSB ... 384
DSP ... 415
Dualzahlen ... 78
Dummy Load ... 118, 444
Duplex ... 485
Durchlassrichtung ... 108
Durchlassspannung ... 270
Dynamikbereich ... 453
Dynamobleche ... 217

E

E-Bleche ... 219
Effective Radiated Power ... 71, 581
Effektivwert ... 166
EFHW ... 499
Einbaulage ... 595
Eingangsleistung messen ... 607
Einseitenband ... 384
Einseitenbandmodulation ... 360, 361
Einstrahlung ... 633
Einströmungen ... 631
EIRP ... 581
Elektrische Arbeit ... 153
Elektrische Feldstärke ... 60
Elektrische Leistung ... 151
Elektrisches Feld ... 177
Elektrolytkondensatoren ... 183
Elektromagnetisches Feld ... 563
Elektronen ... 105
Elektronenröhre ... 319
Elkos ... 183
Emitterfolger ... 291
Empfang, Störungen ... 629
Empfänger
Bausätze ... 51
klassische Empfangsgeräte ... 50
SDR-Empfänger am PC ... 49
Technik ... 396
Empfängerfeinverstimmung ... 422
Empfangskonverter ... 402
Entladekabel ... 643
Entzerrung ... 481
Equivalent Isotropically Radiated Power ... 581
ERP ... 71, 581

F

Fading ... 468
Faltdipol ... 504
Faltungscode ... 475, 486
Fast Fourier Transformation ... 459
Fehlerstromsicherung ... 97
Fehlerwort ... 472
Feldeffekttransistoren ... 300
Feldstärke ... 586
Feldstärkeanzeiger ... 615
Feldstärkeberechnung ... 584
Fensterung ... 459
Fernabstimmung ... 704
Fernschreibalphabet ... 465
Fernspeisung ... 339
Ferritringe ... 549
Ferromagnetische Stoffe ... 197
Festspannungsregler ... 335
FET ... 300
FFT ... 480
Fieldday ... 55, 713
Filterkoeffizient ... 462
Finite Impulse Response ... 460
Firmware ... 761
Flankendiskriminator ... 390
Flash-Konverter ... 455
Flatterfading ... 574
fldigi ... 765
FlexRadio 6400 ATU ... 767
Flowgraph ... 462
Flussdichte ... 60
FM ... 362
Forward Error Correction ... 471
FOT ... 572
Fourier-Transformation ... 458
Freenet ... 30
Frequency Division Multiple Access, FDMA ... 485
Frequency Hopping ... 481
Frequency of Optimum Transmission ... 572
Frequency Shift Keying ... 366, 367
Frequenz ... 31, 60
niedrigstmögliche ... 574
Frequenzaufbereitung ... 425, 427
Frequenzbelegung berechnen ... 361
Frequenzmodulation ... 40, 362
Frequenzmultiplex-Verfahren ... 485

Frequenzselektivität ... 468
Frequenzvervielfacher ... 428
Frequenzzähler ... 626
FSK ... 366
FT8 ... 41, 460, 466, 469, 474
FUNK.TAG Kassel ... 55
Funken ... 30
Funkfernschreiben ... 378, 465
Funkgeräte
Aufbewahrung ... 673
Handfunksprechgeräte ... 663
Mobilfunkgeräte ... 668
Netzteil ... 671
Portabelfunkgeräte ... 666
stationärer Einsatz ... 669
Typenkunde ... 663
Funkkanal ... 467
Funkmöbel ... 673
Funkrucksäcke ... 666
Funkscanner ... 50

G

Gatter ... 313
Gegentakt-Flanken-Diskriminator ... 391
Gegentaktverstärker ... 435
Genauigkeit ... 63
Geradeausempfänger ... 396
Germaniumdiode ... 271
Gleichrichtung ... 324
Gleichspannungsrückgewinnung ... 329
GND ... 38
GNU Radio ... 462, 484
gnuradio-companion ... 660
GPS-disziplinierter Oszillator ... 347
GPSDO ... 347
Grenzschicht ... 108
Greyline DX ... 575
Großsignalfestigkeit ... 366, 413

H

Halbleiter ... 106
Halbleiterdiode ... 267
HAM RADIO ... 55
Handfunksprechgeräte ... 663
Harmonische ... 169, 446
Hertz ... 155
Hexadezimalzahlen ... 81
HF-Tastkopf ... 611
Hochfrequenzverbrennungen ... 639
Hochpassfilter ... 237
Hochspannungsgleichrichter ... 338
Hüllkurvendemodulator ... 381
Hüllkurvenspitze ... 446

I

IC ... 306
Icom IC-718 ... 670
Impedanz ... 60
Impuls ... 173
Induktivität ... 60, 197, 199
Bauelemente ... 201
Schaltzeichen ... 200
Infinite Impulse Response ... 460
Innenwiderstand ... 131, 608
Inphase-Komponente ... 481
Inselfunker ... 713
Integrierter Schaltkreis ... 306
Intercept Point ... 366, 413
Interleaving ... 475, 487
Intermodulation ... 366
Intersymbolinterferenz ... 479, 487
Inverted Vee ... 493
Ionisierung ... 568
Ionosphäre ... 467, 568, 570
I-Q-Demodulation ... 482
I-Q-Modulator ... 481, 762
Islands on the Air ... 713
Isolator ... 109

J

JFET ... 302
Jitter ... 455

K

Kabeldämpfung ... 545
Kanalcodierung ... 467, 470, 487, 762
Kanalkapazität ... 468
Kanalzugriffsverfahren ... 485
Kapazität ... 60
Kapazitätsdiode ... 271, 277
Kapazitiver Widerstand ... 231
Keule ... 494
Keyer ... 780
Klappferrite ... 549
Klemmschaltung ... 329
Koaxialkabel ... 530
Aufbau ... 530

Koaxialkabel (Forts.)
Kabeldämpfung ... 533
Stecker ... 537
Verkürzungsfaktor ... 532
Kollektorschaltung ... 291
Kondensator ... 180
Kapazität ... 190
Ladungsmenge ... 190
Messung ... 190
Parallelschaltung ... 192
Selbstbau ... 186
Serienschaltung ... 191
Kondensatorplatten ... 181
Konstantandraht ... 124
Konstellationsdiagramm ... 478
Koppelschleife ... 707
Korrekturfaktor ... 492
Korrosion ... 634
Kreuzmodulation ... 366, 367
Kurzschluss ... 94
Kurzschlussspannung ... 131
Kurzwellenempfangsgeräte ... 51

L

Ladung ... 60
Ladungsballung ... 108
Ladungsmenge ... 104
Ladungsträger ... 104, 105
Ladungstrennung ... 108
Landeskenner ... 39
Langer Weg – kurzer Weg ... 575
Längsgeregeltes Netzteil ... 219
Längsregelung ... 323
Latenz ... 475
Lecherleitung ... 553
Leerlaufspannung ... 131
Leistung ... 60
Leistungsanpassung ... 132
Leistungsfaktor ... 69
Leistungsmesskopf ... 612
Leistungspegel ... 73
Leistungsrückfluss ... 541
Leiter ... 105
Leitwert ... 60
Leuchtdiode ... 271
Lineartransponder ... 485
Linearverstärker ... 435
Logikschaltungen ... 315
Lötseite ... 85
Low Density Parity Check ... 474
Lower Sideband ... 360
Low-Noise Amplifier ... 375
Low-Noise Block Converter ... 375
LUF ... 574

M

Machine Generated Mode ... 43
Magnetic-Loop-Antenne ... 701
Magnetische Feldstärke ... 60
Magnetische Flussdichte ... 213
Magnetisches Feld ... 197
Mantelwellen ... 547
Mantelwellensperre ... 549
Mast ... 712
Maximum Usable Frequency ... 572
Mehrwegeausbreitung ... 467, 486
Mehrwegekanal ... 479
Messbereichserweiterung ... 597, 605
Messinstrumente ... 591
analoge ... 592
digitale ... 596
Genauigkeit ... 605
Innenwiderstand ... 604
Messung
Gleich- und Wechselstrom ... 591
Gleichspannung ... 591
Gleichstrom ... 591
Signalspannungen ... 591
Stehwellenverhältnis ... 591
Metallionen ... 106
Meteorscatter ... 580
MGM ... 43
Mischbestückung ... 87
Mobilfunkgerät ... 668
Mode ... 40
Modulation ... 30, 353
Modulationsart ... 41, 354
Modulator ... 380
Mögel-Dellinger-Effekt ... 574
Monolithic Microwave Integrated Circuit ... 312
Morsetelegrafie ... 41, 369, 465
Beispiel ... 777
Morsen lernen ... 781
Taste ... 779
Verbindungsaufnahme ... 776
Vorteile ... 773
Morsezeichen ... 774
MOSFET ... 300, 304

MUF ... 572
Multimeter ... 598

N

Nachsetzer ... 430
Narrow-Band-Frequenzmodulation ... 363
NBFM ... 363
n-Dotierung ... 107
Nennspannung ... 229
Nennstrom ... 229
Netzteil ... 671
Netzwerkanalysator ... 627
Nichtleiter ... 109
Noise Blanker ... 409
Noise Figure ... 412
Noise Reduction ... 409
Notchfilter ... 409
Notfall ... 640
Notfunk ... 713
N-Stecker ... 538
NTC-Widerstände ... 115

O

Oberwellen ... 446
Oberwellenfilter ... 618
OCXO ... 347
Öffnungsfunke ... 94, 208
Offsetspiegel ... 374
Ohmsches Gesetz ... 128
On-Off Keying ... 476
OpenWebRX ... 484
Operationsverstärker ... 308
Optokoppler ... 271
Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) ... 480
Ortsverbände → OV
Oszillator ... 341
Colpitts ... 343
Hartley ... 343
Meißner ... 343
Oszilloskop ... 163, 457, 621
OV ... 54
Oven-Controlled Crystal Oscillator ... 347

P

Packet Radio ... 376
Pactor ... 379
Paddles ... 779
Parabolspiegel ... 374
Paralleldrahtleitung ... 528
Parallelschwingkreis ... 246
Parasitäre Schwingungen ... 442
Parität ... 471
Paritätscode ... 471, 487
Partikelstrom ... 570
p-Dotierung ... 108
Peak Envelope Power, PEP ... 446
Personenschutz ... 585
Phase-Locked Loop ... 348
Phasendifferenzen ... 168
Phasendiskriminator ... 391
Phasenmodulation ... 367
Phasenregelkreise ... 348
Phasenvergleicher ... 349
Phasenverschiebung ... 230
Photodiode ... 271
Physikalische Stromrichtung ... 102
PMR ... 30
Portabelfunkgeräte ... 666
Potentiometer ... 123
Power Amplifier ... 319
Prädiktion ... 465
Preselektor ... 413
PSE ... 38
PSK31 ... 379
PTC-Widerstände ... 115
PWR ... 38

Q

Q-Gruppen ... 34, 465
QRL ... 37
QRP ... 37, 39
QSL ... 37
QSO ... 32
QSY ... 37
QTH ... 32
Quadratur-Amplituden-Modulation ... 478
Quadratur-Komponente ... 481
Quantisierer ... 455
Quantisierung ... 453, 487
Quantisierungsfehler ... 453
Quantisierungsrauschen ... 453
Quarzoszillatoren ... 345
Quasioptische Reichweite ... 577
Qucs-S ... 147
QucsStudio ... 147
Quellcodierung ... 762

Quellencodierung ... 464
Quite Universal Circuit Simulator ... 147

R

Radio Tele Typing ... 378
Radioflussindex ... 569
Rainscatter ... 580
Rapport ... 32
Raspberry Pi ... 658
Ratiodetektor ... 391
Raumladungszone ... 108
Rauschen ... 467, 468
rosa ... 175
thermisches ... 175
weißes ... 175
Rauschzahlen ... 412
Reaktanz ... 231
Rechtecksignal ... 160, 170
Redundante Daten ... 470
Reed-Solomon-Codes ... 474
Reflexion ... 467
Reihenschwingkreis ... 243
Reisert-Balun ... 550
Rekonstruktion ... 456, 457
Relais ... 93
Relaisfunkstelle ... 485
Remote-Betrieb ... 767
auf eigenem Grundstück ... 768
auf fremdem Grundstück ... 769
Sicherheitsmaßnahmen ... 771
Resonanzfrequenz ... 247
Richtantenne ... 506
Rosa Rauschen ... 175
Rotor ... 712
RST-System ... 76
RTTY ... 378, 762
Rückstreuung ... 574
Rufzeichen ... 32, 466
RX ... 38

S

Safety Extra Low Voltage ... 195
Sägezahnsignal ... 172
Sample and hold ... 455
Sampling ... 451
SB-2000 Radio Interface ... 764
Schalter ... 91
Schaltnetzteil ... 323, 337
Scheitelwert ... 166
Schottkydiode ... 270
Schutzabstände ... 585
Schutzkleinspannung ... 195
Schwingkreise ... 240
Schwingungserzeuger ... 341
Schwingungsformen
Flankensteilheit ... 160
Grundwelle ... 160
Rechtecksignal ... 160
Schwund ... 468, 475
SDR ... 44, 455, 483, 653, 762
Programme ... 50
SDR-Empfänger am PC ... 49
SDR-Empfänger ... 457
SDRplay RSP2pro ... 653
Selbstinduktion ... 216
SELV ... 195
Sendeart ... 40, 41, 354
Sendebetrieb, Störungen ... 635
Sendeleistung ... 446
Sender
Leistungsangaben ... 445
Leistungsmessung ... 444
Sendetechnik ... 424
Serienschwingkreis ... 243
Sferics ... 563
Shannon-Hartley-Theorem ... 468
Sicherheit ... 639
Sicherung ... 95
Sicherungen ... 151
Sicherungsautomaten ... 97
SI-Einheiten ... 59, 65
Signalflussgraph ... 462
Signal-Rausch-Abstand ... 412, 467, 470
Signal-to-Noise ... 412
Siliziumdiode ... 271
Simplex-Verbindung ... 370
Single Sideband ... 40, 360, 384
Sinusförmige Signale ... 161
SI-Zahlenpräfixe ... 62
Skin-Effekt ... 198
Slow Scan Television ... 379
SMA-Anschlüsse ... 51
SMA-Stecker ... 538
SMD-Bauteil ... 87
SMD-Widerstand ... 120
S-Meter ... 48, 76
Software Defined Radio ... 44, 351, 455, 483, 653
Sonnenflecken ... 569
Sonnenwind ... 570

Spannung ... 60, 99
Abfall ... 131
Glättung ... 331
Messung ... 592
Pegel ... 75
Regelung ... 333
Teiler ... 132
Vervielfacher ... 329
Spannungsmessung ... 607
Spartransformator ... 226
Spectrum Analyzer ... 458
Spektrum ... 458, 488
Sperrrichtung ... 109
Sperrspannung ... 270
Spiegelfrequenz ... 400
Spindel-Trimmer ... 123
Splatter ... 359
Sporadic-E ... 571, 579
Sporadic-E-Schicht ... 579
Sprechfunk ... 373
Spreizcode ... 485
Sprungentfernung ... 575
Squeeze ... 774
Squelch ... 409
SSB ... 384, 460
SSB-Sender ... 436
S-Stufe ... 76
SSTV ... 379
Standing Wave Ratio ... 542
Steckermontage ... 539
Steckplatine ... 143
Stehwelle ... 541, 542
Stehwellenmessgerät ... 618, 699
Steilstrahlerantennen (NVIS) ... 575
Störsignal ... 467
Störungen ... 629
Einstrahlung ... 633
Einstreuung ins Stromnetz ... 634
Einströmungen ... 631
Empfang ... 629
Korrosion ... 634
Sendebetrieb ... 635
Vorgehen bei ... 636
Strom ... 102
Stromkreis ... 89
Strommesser ... 592
Strommessung ... 607
Stromrichtung (physikalische vs. technische) ... 102
Stromschlag ... 639
Stromversorgung ... 323
Akkumulatoren ... 716
Energiequellen ... 716
Kabelverbindungen ... 714
Summits on the Air ... 713
Superhetempfänger ... 399
Surface Mounted Device ... 87
SWR ... 542
SWR-Meter ... 618, 699
Symboldauer ... 476, 488
Symbolgröße ... 477
Symbol-Mapping ... 479, 762
Symbolrate ... 61, 476
Symmetrierung ... 557
Syndrom ... 473

T

T2FD ... 522
Tankkreis ... 443
Taschenrechner ... 59
Taster ... 91
Tastklicks ... 369
TCXO ... 346
Telefonmodem ... 469
Temperaturkompensation ... 412
Terminal Node Controller ... 377, 378
Thermisches Rauschen ... 175
Through-Hole Technology ... 87
Tiefpassfilter ... 237, 454, 456
Tiger SignaLink USB ... 763
Tilted Terminated Folded Dipole ... 522
Time Division Multiple Access, TDMA ... 485
TNX ... 38
Torzeit ... 626
Tote Zone ... 574
Trägerleistung ... 445
Tragwerke ... 700
Transformator ... 216
Transistor ... 281, 440
Bauelemente ... 282
bipolar ... 284, 291
Schaltzeichen ... 281
unipolarer ... 300
Transverter ... 141, 430
Trapantennen ... 501
Trimmer ... 184
Trimmkondensatoren ... 184
Trimm-Potentiometer ... 123
TRX ... 38
TX ... 38

U

Überabtastung ... 455, 457
Überlagerungsempfänger ... 399
Übertemperatursicherungen ... 98
Übertrager ... 216
Übertragungsfehler ... 470
Übertragungsleitung ... 527
UHF-Stecker ... 537
Umrechnung
  binär/dezimal ... 78
  hexadezimal/dezimal ... 81
Unfallverhütung ... 641
unixcw ... 781
Unterabtastung ... 457, 484
Upper Sideband ... 360

V

Valenzelektronen ... 107
Variable Frequency Oscillator (VFO) ... 425
Variable Frequenzoszillatoren ... 341
Variocapdiode ... 277
VCO ... 347
Vektorieller Netzwerkanalysator ... 699
Verkürzungsfaktor ... 492
Versorgungsschaltung ... 323
Verstärkung ... 66
Verzweigter Stromkreis ... 135
VFO ... 341, 425
VHF-FM-Sender ... 439
Video ... 466
Vielfachmessgerät ... 598
Virtuelles Kabel ... 763
Viterbi-Decoder ... 475
Vocoder ... 464, 485, 488
Voice Operated Transmitter ... 763
Voltage Standing Wave Ratio ... 542
Voltage-Controlled Oscillator ... 347
Vorwärts-Fehlerkorrektur ... 471
Vorwärtsfehlerkorrektur ... 481
VSWR ... 542
VSWR-Messbrücke ... 618
VXO ... 345

W

Wahrheitstabelle ... 315
Wasserfalldiagramm ... 46, 460, 488
Watt32 ... 679
Wattwächter ... 679
Web-SDR ... 45
  Empfänger weltweit ... 48
  Universität Twente ... 44
Wechselstromgenerator ... 167
Weißes Rauschen ... 175
Wellenlänge ... 31, 164
WFM ... 363
Wide-Frequenzmodulation ... 363
Widerstand ... 60, 115
  Bauteile ... 117
  Dekade ... 125
  Dummy Load ... 118
  Farbcode ... 117
  Innenwiderstand ... 131
  Parallelschaltung ... 135
  Potentiometer ... 123
  Schaltzeichen ... 116
  Serienschaltung ... 132
  SMD-Widerstand ... 120
  Spindel-Trimmer ... 123
  Trimm-Potentiometer ... 123
Widerstandsmessung ... 603
Widerstandsreihen ... 125
Wirbelströme ... 198
Wirkungsgrad ... 152, 431
WSJT ... 41
WSPR ... 469

X

X2GO ... 768
xcwp ... 781

Y

Yaesu FT-60 ... 663
Yaesu FTM-7250D ... 669
Yagi-Antenne ... 507
  Antennengewinn ... 508
  Direktoren ... 508
  Halbwertsbreite (Öffnungswinkel) ... 508
  Hauptkeule ... 508
  Impedanz ... 508
  Kreuz-Yagi ... 525
  Nebenkeule ... 508
  Öffnungswinkel ... 508
  parasitäre Elemente ... 508
  Richtdiagramm ... 508
  Rückkeule ... 508
  Vor-Rück-Verhältnis ... 508

Z

Zahlenpräfixe 63
Zahlensysteme
Binärzahlen 78
Hexadezimalzahlen 81
Z-Diode 272
Zehnerpotenzen 63
Zeitmultiplex-Verfahren 485
Zeitschlitz 485
Zeitselektivität 468
Zeitsignal 458
Zweigweggleichrichtung 326
Zwischenfrequenz 400, 405, 483
Zylinderspule 206

Rechtliche Hinweise

Das vorliegende Werk ist in all seinen Teilen urheberrechtlich geschützt. Weitere Hinweise dazu finden Sie in den Allgemeinen Geschäftsbedingungen des Anbieters, bei dem Sie das Werk erworben haben.

Die automatisierte Analyse des Werkes, um daraus Informationen insbesondere über Muster, Trends und Korrelationen gemäß § 44b UrhG (»Text und Data Mining«) zu gewinnen, ist untersagt.

Markenschutz

Die in diesem Werk wiedergegebenen Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. können auch ohne besondere Kennzeichnung Marken sein und als solche den gesetzlichen Bestimmungen unterliegen.

Haftungsausschluss

Ungeachtet der Sorgfalt, die auf die Erstellung von Text, Abbildungen und Programmen verwendet wurde, können weder Verlag noch Autor*innen, Herausgeber*innen, Übersetzer*innen oder Anbieter für mögliche Fehler und deren Folgen eine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung übernehmen.

Über die Autoren



Harald Zisler ist mit dem Rufzeichen DL 6 RAL seit 1980 zu hören. Auch nach so langer Zeit lässt die Faszination an Technik und Funkkontakten in alle Welt bei ihm nicht nach.



Thomas Lauterbach hat die Amateurfunklizenz 1979 erworben und ist mit dem Rufzeichen DL 1 NAW zu hören. Auch er ist bis heute begeisterter Funkamateur.