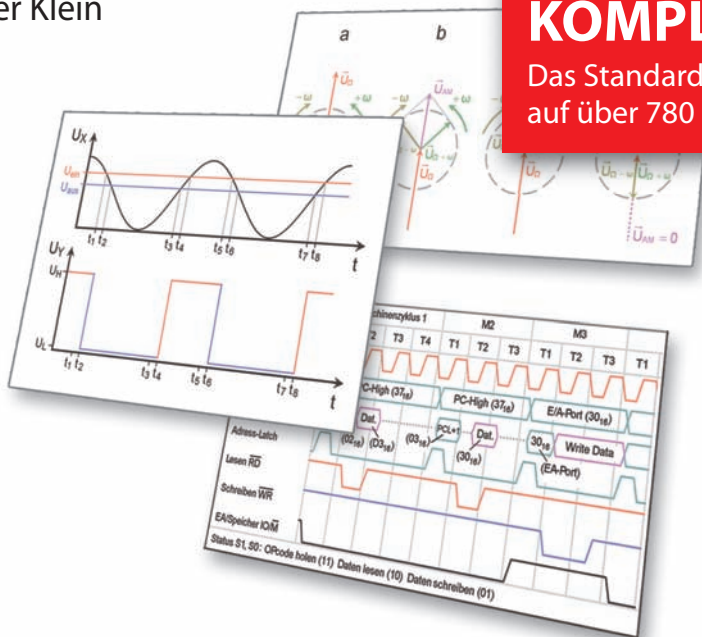


Rüdiger Klein

KOMPLETT NEU!

Das Standardwerk der Elektronik
auf über 780 Seiten



Das neue Werkbuch Elektronik

Das komplette Know-how der Elektronik aktuell erklärt

Mit über 1.350 Stichworten, über
500 Abbildungen & 200 Tabellen

Rüdiger Klein

Das neue Werkbuch Elektronik

Rüdiger Klein

Das neue Werkbuch Elektronik

Das komplette Know-how der Elektronik aktuell erklärt

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch vorgestellten Schaltungen und Programme wurden mit der größtmöglichen Sorgfalt entwickelt, geprüft und getestet. Trotzdem können Fehler im Buch und in der Software nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag und Autor haften in Fällen des Vorsatzes oder der groben Fahrlässigkeit nach den gesetzlichen Bestimmungen. Im Übrigen haften Verlag und Autor nur nach dem Produkthaftungsgesetz wegen der Verletzung des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit oder wegen der schuldhaften Verletzung wesentlicher Vertragspflichten. Der Schadensersatzanspruch für die Verletzung wesentlicher Vertragspflichten ist auf den vertragstypischen, vorhersehbaren Schaden begrenzt, soweit nicht ein Fall der zwingenden Haftung nach dem Produkthaftungsgesetz gegeben ist. Für die Mitteilung etwaiger Fehler sind Verlag und Autor jederzeit dankbar. Internetadressen oder Versionsnummern stellen den bei Redaktionsschluss verfügbaren Informationsstand dar. Verlag und Autor übernehmen keinerlei Verantwortung oder Haftung für Veränderungen, die sich aus nicht von ihnen zu vertretenden Umständen ergeben. Evtl. beigefügte oder zum Download angebotene Dateien und Informationen dienen ausschließlich der nicht gewerblichen Nutzung. Eine gewerbliche Nutzung ist nur mit Zustimmung des Lizenzinhabers möglich.

© 2011 Franzis Verlag GmbH, 85540 Haar bei München, www.franzis.de

Alle Rechte vorbehalten, auch die der fotomechanischen Wiedergabe und der Speicherung in elektronischen Medien. Das Erstellen und Verbreiten von Kopien auf Papier, auf Datenträgern oder im Internet, insbesondere als PDF, ist nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Verlags gestattet und wird widrigenfalls strafrechtlich verfolgt.

Die meisten Produktbezeichnungen von Hard- und Software sowie Firmennamen und Firmenlogos, die in diesem Werk genannt werden, sind in der Regel gleichzeitig auch eingetragene Warenzeichen und sollten als solche betrachtet werden. Der Verlag folgt bei den Produktbezeichnungen im Wesentlichen den Schreibweisen der Hersteller.

Satz: DTP-Satz A. Kugge, München

art & design: www.ideehoch2.de

Druck: Bercker, 47623 Kevelaer

Printed in Germany

ISBN 978-3-645-65094-6

Inhaltsverzeichnis

1	Elektrotechnik Grundlagen.....	15
1.1	Grundbegriffe in der Elektrotechnik	15
1.1.1	Woher kommt der Name Elektrizität?	15
1.1.2	Positiv und negativ	15
1.1.3	Atome, Moleküle, Elektronen, Ionen	15
1.1.4	Aggregatzustände	16
1.1.5	Beispiele des Atomaufbaus	16
1.1.6	Leiter, Nichtleiter (Isolator) und Halbleiter	16
1.2	Erscheinungsformen der Elektrizität	17
1.2.1	Elektroskop	17
1.2.2	Das elektrische Pendel	18
1.2.3	Spannungsquellen	19
1.3	Die elektrischen Wirkungen	22
1.3.1	Wärmewirkung	22
1.3.2	Chemische Wirkung des elektrischen Stromes.....	22
1.3.3	Magnetische Wirkung des elektrischen Stromes.....	23
1.3.4	Wirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper	24
1.4	Aufgabenkatalog	26
1.4.1	Ungebundene Aufgaben	26
1.4.2	Multiple-Choice-Aufgaben	26
2	Elektrotechnik Grundgesetze	29
2.1	Der elektrische Strom	29
2.1.1	Stromdichte	30
2.2	Die elektrische Spannung.....	30
2.3	Der elektrische Widerstand.....	31
2.3.1	Leiterwiderstand	32
2.3.2	Der Temperaturkoeffizient	32
2.4	Das ohmsche Gesetz	34
2.5	Arbeit und Leistung in der Mechanik.....	36
2.5.1	Die Arbeit W	36
2.5.2	Die Leistung P	36
2.6	Arbeit und Leistung in der Elektrotechnik	37
2.7	Der Wirkungsgrad	40
2.8	Aufgabenkatalog	40
2.8.1	Ungebundene Aufgaben	40
2.8.2	Multiple-Choice-Aufgaben	41
3	Der Gleichstromkreis	51
3.1	Reihenschaltung ohmscher Widerstände.....	51
3.1.1	Allgemeines	51
3.1.2	Reihenschaltung von 3 ohmschen Widerständen	51
3.1.3	Reihenschaltung eines Innen- und Außenwiderstandes.....	53

3.2	Parallelschaltung ohmscher Widerstände.....	54
3.3	Der ohmsche Spannungsteiler.....	56
3.3.1	Der unbelastete Spannungsteiler	57
3.3.2	Der belastete Spannungsteiler	57
3.4	Anpassung – Belastungsfälle bei Spannungserzeugern.....	58
3.4.1	Leerlauf.....	59
3.4.2	Kurzschluss.....	59
3.4.3	Leistungsanpassung	59
3.4.4	Spannungs- und Stromanpassung.....	59
3.5	Das elektrische Feld	61
3.5.1	Der Kondensator.....	61
3.6	Laden und Entladen des Kondensators – Die Zeitkonstante	69
3.6.1	Laden und Entladen des Kondensators über einen ohmschen Widerstand.....	70
3.7	Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren	77
3.7.1	Reihenschaltung zweier Kondensatoren	77
3.7.2	Parallelschaltung von Kondensatoren.....	79
3.8	Der Magnetismus	80
3.8.1	Erscheinungen des magnetischen Feldes	80
3.8.2	Dauermagnet (Permanentmagnet).....	83
3.8.3	Der magnetische Kreis.....	83
3.8.4	Bauformen der Spule.....	89
3.8.5	Magnetische Kraftwirkung – Magnetische Induktion.....	96
3.8.6	Selbstinduktionskoeffizient – Induktivität	101
3.9	Die Spule im Gleichstromkreis.....	102
3.10	Aufgabenkatalog	107
3.10.1	Ungebundene Aufgaben.....	107
3.10.2	Multiple-Choice-Aufgaben	108
4	Der Wechselstromkreis	121
4.1	Allgemeines	121
4.1.1	Wichtige Basisgrößen der Wechselstromtechnik	123
4.2	Der kapazitive Blindwiderstand	130
4.3	Die kapazitive Blindleistung	135
4.4	Der verlustbehaftete Kondensator	137
4.4.1	Reihenschaltung von Kapazität C und Widerstand R	137
4.4.2	Parallelschaltung von Kapazität C und Widerstand R	140
4.5	Der induktive Blindwiderstand	144
4.6	Die induktive Blindleistung.....	148
4.7	Die induktive Kopplung	149
4.7.1	Reihen- und Parallelschaltung von Induktivitäten ohne gegenseitige magnetische Beeinflussung (ohne Kopplung)	149
4.7.2	Spulen mit gegenseitiger magnetischer Beeinflussung.....	151
4.8	Der Transformator.....	155
4.9	Elektromagnetische Verträglichkeit	159
4.9.1	Allgemeines	159
4.9.2	Ziel der EMV	159
4.10	Die verlustbehaftete Spule	160
4.10.1	Reihenschaltung von Induktivität L und Widerstand R	160
4.10.2	Parallelschaltung von Induktivität L und Widerstand R	164

4.11	Frequenzabhängige Schaltungen.....	166
4.11.1	Allgemeines	166
4.11.2	LC-Schwingkreise	166
4.11.3	Siebschaltungen	178
4.11.4	LC-Bandfilter-Schaltungen.....	187
4.11.5	Mechanische Filter-Schaltungen.....	194
4.12	Aufgabenkatalog	197
4.12.1	Ungebundene Aufgaben.....	197
4.12.2	Multiple-Choice-Aufgaben	199
5	Grundlagen der Messtechnik	205
5.1	Messtechnik-Grundlagen.....	205
5.1.1	Allgemeines	205
5.1.2	Was ist Messen?.....	205
5.1.3	Direkt anzeigende Messgeräte.....	206
5.2	Erweiterung des Messbereiches bei Spannungs- und Strommessern	210
5.2.1	Erweiterung des Spannungsmessbereiches.....	212
5.2.2	Erweiterung des Strommessbereiches	214
5.3	Messfehler bei der Spannungs- und Strommessung	216
5.3.1	Messfehler bei der Spannungsmessung	216
5.3.2	Messfehler bei der Strommessung	218
5.3.3	Spannungsfehler-/Stromfehlerschaltung.....	218
5.4	Brückenschaltung	220
5.5	Arbeiten mit dem Oszilloskop.....	222
5.5.1	Allgemeines	222
5.5.2	Darstellung elektrischer Signale auf dem Bildschirm des Oszilloskops	223
5.5.3	Das Oszilloskop PM 3200.....	229
5.5.4	Übungen mit einem einfachen Oszilloskop.....	230
5.5.5	Das zweikanalige triggerbare Oszilloskop.....	231
5.5.6	Messen mit dem Tastkopf.....	233
5.6	Aufgabenkatalog	236
5.6.1	Ungebundene Aufgaben.....	236
5.6.2	Multiple-Choice-Aufgaben	236
6	Grundlagen der Halbleitertechnik	241
6.1	Begriffe der Halbleitertechnik	241
6.2	Anwendungen der Störstellenleitung bei Halbleiterwiderständen	244
6.2.1	NTC-Widerstände.....	244
6.2.2	PTC-Widerstände	246
6.2.3	VDR-Widerstände	247
6.2.4	Fotowiderstände.....	247
6.3	Halbleiterdioden	249
6.3.1	Der pn-Übergang	249
6.3.2	Ausführungsformen von Halbleiterdioden	250
6.4	Der Bipolar-Transistor.....	257
6.4.1	Funktionsprinzip	258
6.4.2	Die Kennlinien des Bipolar-Transistors	261

6.4.3	Der Ausgangswiderstand – der Ausgangsleitwert	265
6.4.4	Das Vierquadrantenfeld.....	265
6.4.5	Spannungen und Ströme des Bipolar-Transistors	266
6.5	Weitere Transistor-Bauformen und -Typen	267
6.5.1	Der Feldeffekttransistor	268
6.5.2	Der Doppelbasistransistor (Doppelbasisdiode, Unijunction- Transistor UJT)	270
6.6	Mehrschichtelemente der Halbleitertechnik	270
6.6.1	Die Vierschichtdiode	270
6.6.2	Die Zweirichtungs-Thyristordiode (DIAC).....	274
6.6.3	Die Triggerdiode	274
6.6.4	Der Thyristor.....	275
6.6.5	Der Triac	280
6.7	Aufgabenkatalog	281
6.7.1	Ungebundene Aufgaben.....	281
6.7.2	Multiple-Choice-Aufgaben	282
7	Standardschaltungen mit Halbleiterdioden und Bipolar-Transistoren	287
7.1	Gleichrichterschaltungen mit Halbleiterdioden.....	287
7.1.1	Einweggleichrichtung	287
7.1.2	Zweiweggleichrichtung.....	291
7.1.3	Spannungs-Verdopplung, Spannungs-Vervielfachung	293
7.2	Bipolar-Transistor-Schaltungen	297
7.2.1	Stabilisierung des Arbeitspunktes.....	297
7.2.2	Grundschaltungen des Bipolar-Transistors	299
7.2.3	Dimensionierungs-Einflüsse beim Bipolar-Transistor.....	309
7.2.4	Ermittlung von Spannungsverstärkung A_u und Phasenwinkel φ im Vierquadrantenfeld	314
7.2.5	Signal-Spannungs- und -Strom-Steuerung beim Bipolar- Transistor.....	316
7.2.6	Gegenkopplung in 1-stufigen Bipolar-Transistor-Verstärkern	319
7.2.7	Gegenkopplung in zweistufigen Bipolar-Transistor- Verstärkern.....	324
7.2.8	Leistungsverstärker mit Bipolar-Transistoren	330
7.2.9	Grundlagen der Stereophonie.....	334
7.2.10	Abführen entstehender Wärme in elektronischen Schaltungen	336
7.2.11	Der Bipolar-Transistor als Schalter.....	341
7.3	Aufgabenkatalog	349
7.3.1	Ungebundene Aufgaben	349
7.3.2	Multiple-Choice-Aufgaben	351
8	Grundlagen der Oszillator-Schaltungen mit Bipolar-Transistoren.....	361
8.1	Allgemeines	361
8.1.1	Gegenkopplung.....	361
8.1.2	Mitkopplung.....	363
8.2	Oszillatoren für sinusförmige Schwingungen	366
8.2.1	LC-Oszillatoren.....	366
8.2.2	RC-Oszillatoren.....	370
8.3	Oszillatoren für nichtsinusförmige Schwingungen	379

8.3.1	Sperrschwinger (blocking oscillator)	379
8.3.2	Gleichspannungswandler	380
8.3.3	Schaltnetzteil	382
8.3.4	Die astabile Kippschaltung mit Bipolar-Transistoren	384
8.4	Aufgabenkatalog	388
8.4.1	Ungebundene Aufgaben	388
8.4.2	Multiple-Choice-Aufgaben	389
9	Operationsverstärker	393
9.1	Allgemeines	393
9.2	Differenzverstärker	393
9.3	Idealer und realer Operationsverstärker	397
9.4	Der Operationsverstärker in seiner Eigenschaft als Verstärker	399
9.4.1	Der invertierende Verstärker	399
9.4.2	Der nicht invertierende Verstärker	403
9.5	Kompensations-Schaltungen beim Operationsverstärker	405
9.5.1	Offset-Spannungs-Kompensation	406
9.5.2	Frequenzkompensation	407
9.6	Addierender Operationsverstärker (Summierer)	408
9.7	Subtrahierender Operationsverstärker (Subtrahierer, Differenzverstärker)	410
9.8	Integrierender Operationsverstärker (<i>Integrator</i>)	412
9.9	Differenzierender Operationsverstärker (Differenzierer)	417
9.10	Der Operationsverstärker als Komparator und Schmitt-Trigger	421
9.10.1	Komparator	421
9.10.2	Schmitt-Trigger	423
9.11	Aufgabenkatalog	425
9.11.1	Ungebundene Aufgaben	425
9.11.2	Multiple-Choice-Aufgaben	426
10	Hochfrequenz auf Leitungen	429
10.1	Leitungseigenschaften	429
10.1.1	Einfluss der Hochfrequenz auf die Leitungseigenschaften	429
10.1.2	Der Wellenwiderstand der Hochfrequenzleitung	430
10.2	Schwingkreiseigenschaft der HF-Leitung	431
10.3	Leitungskreise	433
10.3.1	Verkürzung von Leitungskreisen	435
10.4	Hochfrequenzleitungen	437
10.4.1	Allgemeines	437
10.4.2	Leistungsverluste	438
10.4.3	Das Pegelmaß und weitere Anwendungen des Maßes dB	445
10.5	Aufgabenkatalog	447
10.5.1	Ungebundene Aufgaben	447
10.5.2	Multiple-Choice-Aufgaben	447
11	Sende- und Empfangstechnik	451
11.1	Hochfrequenz-Abstrahlung	451
11.1.1	Allgemeines	451
11.1.2	Die Abstrahlung elektromagnetischer Energie	451
11.2	Wellenausbreitung	456

11.2.1	Ausbreitungseigenschaften des Fernfeldes	456
11.3	Polarisation, Richt-Strahlung, Antennenhöhe und Strahlungswiderstand von Antennen	458
11.3.1	Allgemeines	458
11.3.2	Polarisation und Richtstrahlung.....	459
11.3.3	Effektive Antennenhöhe und Strahlungswiderstand	460
11.4	Antennenarten	461
11.4.1	Ferritantennen.....	461
11.4.2	Stabantennen	462
11.4.3	Dipolantennen	462
11.4.4	Richtantennen.....	463
11.5	Aufgabenkatalog	467
11.5.1	Ungebundene Aufgaben.....	467
11.5.2	Multiple-Choice-Aufgaben	468
12	Modulationsarten	473
12.1	Allgemeines	473
12.2	Amplitudenmodulation (AM)	473
12.2.1	Zusammensetzung des AM-Signals	474
12.2.2	Der Modulationsvorgang am einfachen AM-Modulator	477
12.2.3	Amplitudenmodulation mit unterdrücktem Träger.....	479
12.2.4	Demodulation des AM-Signals mit ausgestrahltem Träger	483
12.2.5	Demodulation eines AM-Signals mit unterdrücktem Träger.....	484
12.3	Frequenzmodulation (FM)	486
12.3.1	FM-Prinzip	486
12.3.2	Demodulation frequenzmodulierter Signale	488
12.4	Tastung der Trägerfrequenz	493
12.4.1	Allgemeines	493
12.4.2	Amplitudenumtastung.....	493
12.4.3	Frequenzumtastung.....	493
12.5	Pulsmodulation	494
12.5.1	Allgemeines	494
12.5.2	Pulsamplitudenmodulation	494
12.5.3	Pulscodemodulation	496
12.6	Aufgabenkatalog	497
12.6.1	Ungebundene Aufgaben.....	497
12.6.2	Multiple-Choice-Aufgaben	498
13	Rundfunk-Empfänger-Technik	505
13.1	Allgemeines zur Rundfunktechnik	505
13.1.1	AM-Sender	505
13.1.2	FM-Sender.....	506
13.2	Empfänger-Technik.....	506
13.2.1	Geradeausempfänger-Prinzip	506
13.2.2	Der Überlagerungsempfänger.....	507
13.2.3	Ausführungsbeispiel eines Radio-Empfangs-Moduls	510
13.3	Aufgabenkatalog	524
13.3.1	Ungebundene Aufgaben.....	524
13.3.2	Multiple-Choice-Aufgaben	525

14	Digitaltechnik	527
14.1	Die logischen Grundfunktionen	527
14.1.1	Prinzip der logischen Grundfunktionen	527
14.1.2	Realisierung der logischen Grundfunktionen	530
14.2	Wichtige logische Verknüpfungen	536
14.2.1	Allgemeines	536
14.2.2	NAND- und NOR-Funktion	536
14.2.3	Antivalenz-Verknüpfung	537
14.2.4	Äquivalenz-Verknüpfung	538
14.3	Gesetze der Schaltalgebra	539
14.3.1	Kommutativ-Gesetze	539
14.3.2	Assoziativ-Gesetze	540
14.3.3	Distributiv-Gesetze	541
14.3.4	Die De Morgan'schen Gesetze	542
14.4	Disjunktive und Konjunktive Normalform	543
14.4.1	Disjunktive Normalform	543
14.4.2	Konjunktive Normalform	544
14.5	Kodierung	547
14.5.1	Allgemeines	547
14.5.2	Code-Eigenschaften	547
14.6	Die Grundrechenarten im Dualsystem	553
14.6.1	Allgemeines	553
14.6.2	Addition	553
14.6.3	Subtraktion	553
14.6.4	Multiplikation	555
14.6.5	Division	556
14.6.6	Halbaddierer	556
14.6.7	Volladdierer	557
14.7	Logikfamilien	558
14.7.1	Allgemeines	558
14.7.2	DTL-Schaltungen	559
14.7.3	TTL-Schaltungen	559
14.7.4	ECL-Schaltungen	561
14.7.5	P-MOS-, N-MOS- und CMOS-Schaltungen	561
14.8	Besondere Eigenschaften und Leitungsmerkmale	564
14.8.1	Allgemeines	564
14.8.2	Wired-AND- und Wired-OR-Schaltungen	564
14.8.3	Schaltungen mit offenem Kollektor (OC) bzw. mit offenem Drain (OD)	565
14.8.4	Tri-State-Ausgänge	566
14.8.5	Sperreingänge	566
14.8.6	Erweiterungseingänge	567
14.8.7	Dynamische Eingänge	567
14.9	Kippschaltungen	569
14.9.1	Allgemeines	569
14.9.2	Bistabile Kippschaltungen	569
14.9.3	Monostabile Kippschaltungen	575
14.9.4	Astabile Kippschaltungen	579
14.10	Der Schmitt-Trigger	584
14.10.1	Allgemeines	584

14.10.2	Schmitt-Trigger als Schwellenwertschalter.....	585
14.10.3	Schmitt-Trigger als Rechteckformer	585
14.11	Schaltwerke	586
14.11.1	Allgemeines	586
14.11.2	Zähler.....	586
14.11.3	Register.....	592
14.11.4	Symbole für Schaltwerke	593
14.12	Wandlung zwischen analogen und digitalen Signalen	594
14.12.1	Allgemeines	594
14.12.2	Digital/Analog-Wandler	594
14.12.3	Analog/Digital-Wandler	596
14.13	Aufgabenkatalog	602
14.13.1	Ungebundene Aufgaben.....	602
14.13.2	Multiple-Choice-Aufgaben	602
15	Grundlagen der Mikrocomputertechnik	609
15.1	Einführung	609
15.1.1	Allgemeines	609
15.1.2	Begriffe	610
15.1.3	Anwendungsbeispiele für Mikroprozessoren	612
15.1.4	Ausführung des Programms.....	613
15.1.5	Darstellung von Informationen	614
15.1.6	Übersicht Mikrocomputer-System.....	619
15.2	Grundlagen zur Programmierung des Mikroprozessors 8085	622
15.2.1	Die verschiedenen Zyklen im Prozessor 8085.....	623
15.2.2	Adressierungsarten beim Prozessor 8085.....	623
15.2.3	Zustandsbits (Bedingungsbits, flags) im Prozessor 8085.....	625
15.2.4	Die Befehle des Mikroprozessors 8085	626
15.2.5	Unterprogramm(UP)-Technik	641
15.2.6	Ein-/Ausgabe(E/A, I/O)-Befehle.....	644
15.2.7	Interrupt-Technik.....	646
15.2.8	Programmierbeispiele zum Befehlssatz des Mikroprozessors 8085	646
15.2.9	Darstellung der Abläufe auf Busleitungen.....	702
15.2.10	Wirkungsweise einer Speichereinheit	704
15.2.11	Der Mikroprozessor 8085	705
15.3	Praktische Ausführung eines 8085-Einplatinencomputers.....	710
15.3.1	Betrieb als CPU-Karte.....	710
15.3.2	Betrieb als Einplatinencomputer	711
15.3.3	Schaltungsbeschreibung des Einplatinencomputers	712
15.4	Aufgabenkatalog	713
15.4.1	Ungebundene Aufgaben, zu denen Sie mit Ihren eigenen Worten zutreffende Antworten formulieren können	713
15.4.2	Lösungsvorschläge zu den ungebundenen Aufgaben	715
15.4.3	Multiple-Choice-Aufgaben	743
16	Elektroakustische Wandler.....	747
16.1	Allgemeines	747
16.2	Mikrofone.....	749
16.2.1	Kohlemikrofon.....	749

16.2.2	Kristallmikrofon	751
16.2.3	Dynamisches Mikrofon	751
16.2.4	Kondensatormikrofon	752
16.3	Richteffekt von Mikrofonen	753
16.4	Übertragungsfaktor von Mikrofonen	755
16.5	Schallaufzeichnung	755
16.5.1	Das Magnetton-Verfahren	755
16.5.2	Optisches Verfahren [C(ompact) D(isc)]	758
16.6	Der Lautsprecher	760
16.6.1	Der elektrodynamische Lautsprecher	760
16.6.2	Elektrostatischer Lautsprecher	765
16.6.3	Kopfhörer	765
16.7	Aufgabenkatalog	765
16.7.1	Ungebundene Aufgaben	765
16.7.2	Multiple-Choice-Aufgaben	766
17	Grundlagen der Regeltechnik	771
17.1	Allgemeines	771
17.2	Prinzip der Steuerung	771
17.3	Die Regelung	771
17.3.1	Größen und Begriffe der Regeltechnik	771
17.3.2	Darstellungsmöglichkeiten des Regelkreises	772
17.3.3	Das Verhalten des Regelkreises	772
17.4	Aufgabenkatalog	776
17.4.1	Ungebundene Aufgaben	776
17.4.2	Multiple-Choice-Aufgaben	777
	Stichwortverzeichnis	779

1 Elektrotechnik Grundlagen

1.1 Grundbegriffe in der Elektrotechnik

Die *Elektronik* ist ein Teilgebiet der Elektrik. Diese bildet eine Untergruppe der *Physik*. Wir wollen hier nun einige wichtige Grundvoraussetzungen schaffen, indem die Grundbegriffe der *Elektrik* dargestellt werden.

1.1.1 Woher kommt der Name Elektrizität?

Schon im Altertum wurde eine elektrische Erscheinungsform, die *elektrostatische Aufladung* beobachtet. Bernstein kann, mit Wolle gerieben, leichte Körper (Papierschnitzel, Haare usw.) anziehen. Griechisch heißt *Bernstein*: *ἤλεκτρον* (*Elektron*). Das abgeleitete Wort *Elektrizität* ist demnach ein Begriff für eine Naturerscheinung, eine Energieform, die mit unseren Sinnesorganen nicht erfassbar ist. Die Elektrizität ist nur an ihren Wirkungen zu erkennen.

1.1.2 Positiv und negativ

Durch Experimente wurden zweierlei elektrische Erscheinungsformen entdeckt: Ein Glasstab, mit Seide oder Papier gerieben, stößt einen ebenso behandelten Glasstab ab, zieht dagegen einen mit Wolle geriebenen Hartgummistab an. Es wurden daher zwei Ladungszustände unterschieden: *positiv* (+) und *negativ* (–). Aus den genannten Versuchen ergibt sich auch das Gesetz:

Gleichnamige Ladungen (– und – oder + und +) stoßen sich ab, ungleichnamige Ladungen (– und +) ziehen sich an.

Die Festlegung der Namen und Zeichen war völlig willkürlich. Die Elektrizität auf Glas wurde mit *plus* (+) und die auf Gummi mit *minus* (–) bezeichnet. Durch die Entdeckungen in der Neuzeit können die elektrischen Erscheinungsformen besser erklärt werden. Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Materie und der Elektrizität als Naturerscheinung.

1.1.3 Atome, Moleküle, Elektronen, Ionen

Chemische Stoffe sind aus Molekülen aufgebaut. Das Molekül ist das kleinste Teilchen einer chemischen Verbindung. Zwei oder mehr Atome bilden diesen größeren Verband der Materie. Die Atome, die kleinsten mechanisch oder chemisch nicht mehr teilbaren Teile der Materie, der *Elemente*, bestehen aus dem schweren *positiven Kern*, um den herum sich *Elektronen* auf kreisförmigen und elliptischen Bahnen bewegen. Die Elektronen sind kleiner und leichter als der Kern und haben eine negative Ladung. Kernmasse, Elektronenzahl und ihr Abstand stehen in einem bestimmten Verhältnis zueinander. Positive und negative Ladungen halten sich im Atom die Waage. Verliert das Atom durch äußere Einwirkung ein oder mehrere Elektronen, so wird die positive Ladung des Kerns nicht mehr vollständig neutralisiert, der Atomrest erscheint nach außen positiv geladen und wird *positives Ion* genannt. Ein Elektronenüberschuss lässt die negative Ladung überwiegen, es entstehen *negative Ionen*.

1.1.4 Aggregatzustände

Stoffe kommen in der Natur in 4 sogenannten *Aggregatzuständen* vor: fest, flüssig, gasförmig und als *Plasma*. Plasma ist ein gasförmiger Stoff, dem durch Energiezufuhr alle Elektronen entzogen sind. Er ist deshalb elektrisch sehr gut leitend. Die Sonne beispielsweise besteht überwiegend aus Plasma.

1.1.5 Beispiele des Atomaufbaus

Lithium hat drei Elektronen, die sich auf verschiedenen Bahnen um den Kern bewegen. Die beiden Innenbahnen sind kreisförmig. Die Außenbahn hat Ellipsenform, wie in *Abb. 1.1* zu erkennen ist. Der Durchmesser des Atoms beträgt 10^{-10} m.

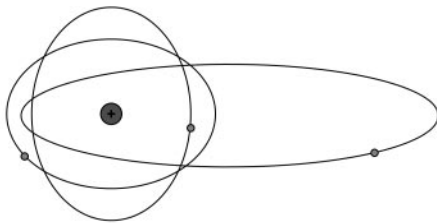


Abb. 1.1: Lithiumatom

Im Kupferatom kreisen um den schweren positiven Kern 29 Elektronen (*Abb. 1.2*). Sie verteilen sich auf 4 *Schalen*. Auf der äußeren Bahn ist ein Elektron, das nur leicht an das Atom gebunden ist.

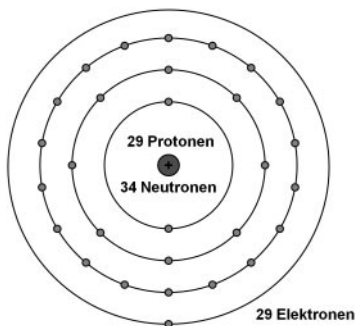


Abb. 1.2: Kupferatom

1.1.6 Leiter, Nichtleiter (Isolator) und Halbleiter

Alle Metalle (z. B. Kupfer) haben ihre Atome regelmäßig im Raum angeordnet. Die *chemischen Kräfte* halten die Atome in einer *kristallinen Struktur* im Raum fest. Die äußeren Hüllelektronen der Metallatome sind nicht an ein bestimmtes Atom, sondern nur an die Gesamtheit der Atome im Kristall gebunden, wie *Abb. 1.3* zeigt. Sie werden im Gegensatz zu den Elektronen, die ständig im Verband desselben Atoms verbleiben, *quasifreie* (gewissermaßen freie) *Elektronen* genannt.

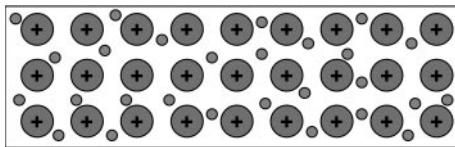


Abb. 1.3: Kristallgitter

Die *Atomrümpfe* sind in der Darstellung mit einem Pluszeichen versehen und die quasifreien Elektronen als kleine Kügelchen gezeichnet. Die quasifreien Elektronen bewegen sich im Kristall in allen Richtungen und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten völlig willkürlich durcheinander. Diese quasifreien Elektronen verhalten sich also wie ein Gas und werden deshalb auch *Elektronengas* genannt. Eine einwirkende elektrische oder magnetische Energie kann diese Elektronen leicht beeinflussen bzw. bewegen und einen *elektrischen Strom* auslösen. Alle *Metalle* sind daher verhältnismäßig *gute Leiter*.

Beispiele für Leiter: Silber, Kupfer, Gold, Eisen, verschiedene Flüssigkeiten (Elektrolyte), verschiedene Gase.

Sind in einem Stoff jedoch fast alle Elektronen an das Atom fest gebunden, können die äußeren Elektronen auch nicht oder sehr schwer von einer einwirkenden Energie bewegt werden. Diese Stoffe eignen sich nicht zum Stromtransport, sie werden *Nichtleiter* oder *Isolator* genannt.

Beispiele für Nichtleiter: Keramik, verschiedene Kunststoffe, Glimmer, Seide, Glas, Papier, Öl, Luft.

Eine dritte Gruppe stellt in ihrem elektrischen Verhalten ein Zwischending der beiden Hauptgruppen dar. Daher rührt der Name *Halbleiter*. Bei den Halbleitern handelt es sich eigentlich um Nichtleiter. Sie wirken beim *absoluten Nullpunkt* [$-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ oder $0\text{ K}(\text{elvin})$], wie diese, vollständig isolierend. In Halbleiterwerkstoffen können durch zusätzliche Energie, z. B. Wärmezufuhr, feste Atombindungen aufbrechen und so auch Elektronen als Ladungsträger für den Stromtransport freigesetzt werden. Dies ist bereits bei Raumtemperatur der Fall.

1.2 Erscheinungsformen der Elektrizität

Die Erscheinungsformen der Elektrizität sind vielfältig. Die bekannteste Naturerscheinung äußert sich im Gewitter, wo *Spannungen* von einigen Millionen *Volt* und *Ströme* von 20000 *Ampere* (André-Marie Ampère 1775-1836, französischer Physiker und Mathematiker) und mehr auftreten können. Wir wollen an dieser Stelle einige Versuche gedanklich durchspielen, bei denen Elektrizität erzeugt wird und nachgewiesen werden kann.

1.2.1 Elektroskop

Ein selbst gebautes *Elektroskop* zeigt elektrische Ladungen an. Die Anzeige erfolgt nach dem Gesetz:

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab.

Dazu wird ein Blechwinkel auf eine sehr gut isolierende Unterlage gestellt. Verschiedene Kunststoffe haben diese Eigenschaft. An einen Schenkel des Blechwinkels wird, elektrisch leitend mit dem Blechwinkel verbunden, ein Alu-Folie-Streifen gehängt.

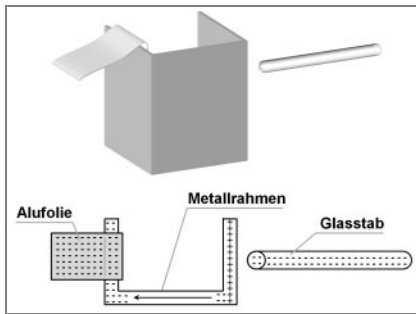


Abb. 1.4: Elektroskop – Elektronen werden verdrängt und stoßen sich gegenseitig ab

Nähern wir dem Elektroskop einen gut (fest) mit einem Baumwolltuch oder Papier geriebenen Kunststoff- oder Glasstab, so wird das Aluminiumblättchen von der festen Blechwand abgestoßen.

Erläuterung:

Der geriebene Stab wird durch die innige Verbindung der beiden Körper (Baumwolltuch und Stab) beim Reiben elektrisch geladen. Da der Stab gut isoliert, bleibt die Ladung auf ihm sitzen.

Wir nehmen in unserem Versuch an, dass die aufgebrachte Ladung negativ ist. Dass eine elektrische Kraft vom Stab ausgeht, kann durch das Anziehen von leichten Körpern (z. B. Papierschnitzeln) bewiesen werden. Die Ablenkung des Aluminiumstreifens erfolgt bei der Annäherung des geladenen Kunststoffstabes. Es genügt also schon die Annäherung einer elektrischen Ladung, um eine *Ladungsverschiebung* in Metallen zu erreichen. Diese Erscheinung wird *Influenz* (Einwirkung) genannt. Es entsteht auch eine Ladungsverschiebung im Blechmantel durch die Einwirkung der *Influenzelektrizität*. In Abb. 1.4 haben wir die Draufsicht auf das erregte Elektroskop dargestellt. Die Ladung verschiebt sich in Richtung Alustreifen, wo sich sowohl auf dem Schenkel des Blechwinkels als auch auf der Alufolie ein *Elektronenüberschuss* einstellt. Diese *gleichnamigen Ladungen* des Schenkels und des Alustreifens *stoßen sich ab*, weshalb der Alustreifen sich vom Blechwinkel fortbewegt.

Berühren wir in diesem Zustand mit dem Finger den linken Schenkel des Bleches, so geht der Ausschlag des Alustreifens schlagartig zurück, um sofort wieder anzusteigen, wenn wir Stab und Finger entfernen. Das Elektroskop muss sich nun aufgeladen haben, denn der Alustreifen bleibt in der abgespreizten Stellung, wenn die Kunststoffunterlage eine sehr gute Isolation gewährleistet.

1.2.2 Das elektrische Pendel

Zwei isoliert aufgestellte Metallplatten werden durch einen Gleichspannungsgenerator (5000 V Gleichspannung) elektrisch geladen. Ein Pendel, bestehend aus Pendelgalgen, isolierendem Faden und elektrisch leitend gemachtem Tischtennisball (Graphitüberzug oder Leitsilber), ist zwischen den geladenen Platten angeordnet. Wird der Ball von Hand in Pendelbewegung versetzt, so kann er beide Platten nacheinander berühren.

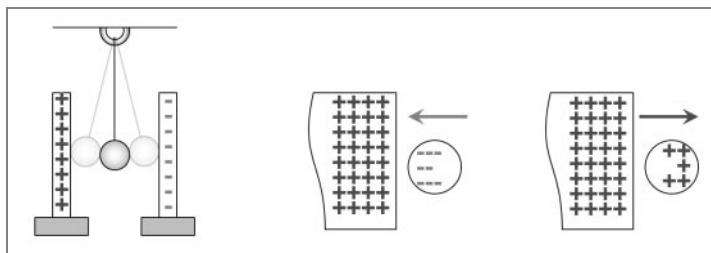


Abb. 1.5:
Elektrisches Pendel –
ungleichnamige
Ladungen ziehen sich
an, gleichnamige
stoßen sich ab

Erläuterung:

Wird das Pendel so angestoßen, dass eine Berührung mit einer der beiden Platten (Elektroden) stattfindet, so setzt sich die Pendelbewegung so lange fort, wie Spannung zwischen den Elektroden besteht. Eine Verkleinerung des Abstandes zwischen den Platten und eine Erhöhung der Spannung erhöhen die Geschwindigkeit der Pendelbewegung.

Berührt der Ball eine Elektrode, so wird er von ihr gleichnamig aufgeladen. Er wird mit einer bestimmten Kraft abgestoßen. Der Schwung des Balles reicht aus, um in den Anziehungsbereich der ungleichnamig geladenen Elektrode zu gelangen. Es folgt eine Berührung mit dieser Elektrode und somit eine Umladung des Balles. Der Ball wird nun wieder abgestoßen und das Spiel setzt sich fort.

Der Versuch bestätigt folgende Gesetzmäßigkeiten:

Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab. Ungleichenamige Ladungen ziehen sich an. In Leitern erfolgt bei ungleichenamigen Ladungen ein Ladungsausgleich (Metallelektrode und Silberschicht des Balles). Elektrische Ladungen üben Kräfte aus. Diese sind ladungs- und spannungsabhängig.

1.2.3 Spannungsquellen

Die durch Reibung erzeugten Aufladungen stellen nur geringe Energiemengen dar. *Spannungsquellen* werden in der Elektrotechnik allgemein *Spannungserzeuger* genannt. In ihrer Wirkungsweise sind sie eigentlich *Energiewandler*. Sie setzen durch *chemische*, *magnetische*, *Licht-* oder *Wärmeeinflüsse* Elektronen in Bewegung, *trennen* auf diese Weise *Ladungen*, wandeln die genannten Energieformen in elektrische Energie um. Die Energiewandlung soll an einigen Beispielen gezeigt werden.

Spannungserzeugung durch chemische Einflüsse

Taucht man in ein mit Ammoniumchlorid-Lösung gefülltes Glasgefäß zwei Elektroden aus Kupfer und Zink, so entsteht eine elektrische Spannung von ca. 0,8 V, die man mit einem Voltmeter nachweisen kann. Die *chemische Reaktion* zwischen den Elektroden und der schwach sauren Lösung muss eine *Ladungstrennung*, eine *Spannung* hervorrufen. Die *Zinkelektrode* ist *negativ*, die *Kupferelektrode* *positiv*.

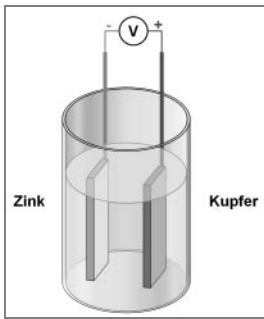


Abb. 1.6: Galvanisches Element

Spannungserzeugung durch Licht

Wird ein Silizium-Fotoelement beleuchtet, so stellt sich eine elektrische Spannung ein, die von der Beleuchtungsstärke abhängig ist. Die Schnittdarstellung in Abb. 1.6 zeigt den Aufbau. In der Sperrschicht bewirkt das *Licht* eine *Ladungstrennung*. Die Elektronen wandern zu dem Kontakt-ring (Minuspol), und an der Grundplatte verbleiben die Atomrümpfe (Pluspol). Der Vorgang wird mit *Sperrschicht-Fotoeffekt* bezeichnet.

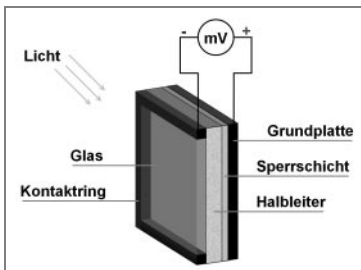


Abb. 1.7: Fotoelement

Spannungserzeugung durch Wärme

Zwei Drähte aus Eisen und Konstantan (Handelsname für Widerstandsdraht, bestehend aus 60% Kupfer und 40% Nickel) werden nach Abb. 1.8 zusammengeschweißt oder hart gelötet. Wenn die Schweißstelle erhitzt wird, entsteht an den Enden der Drähte eine geringe elektrische Spannung. Konstantan bildet den Minuspol und Eisen den Pluspol.

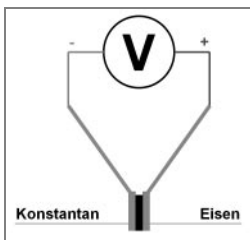


Abb. 1.8: Thermoelement

Durch Wärmeenergie wandern Elektronen durch die erhitzte Verbindungsstelle vom Eisen- in den Konstantandraht. Dadurch erscheint der Eisendraht positiv geladen. Jede erwärmte Kontaktstelle aus unterschiedlichen Leiterwerkstoffen erzeugt eine solche Thermospannung. Gebräuchliche Thermolemente verwenden Leiterwerkstoffe, die zu verhältnismäßig großer Thermospannung

führen. Das abgebildete Thermoelement liefert je Grad Temperaturunterschied $52\ \mu\text{V}$. Diese doch recht geringe Spannung lässt außer der Verwendung als Thermofühler keinen anderen Einsatz zu.

Piezo-Kristall als Spannungserzeuger

Kristalle sind von ihrer elektrischen Eigenschaft her in der Regel Nichtleiter. Sie besitzen jedoch eine Eigenschaft, bei mechanischer Beanspruchung, etwa Verbiegen, Zusammendrücken oder Auseinanderziehen, elektrische Spannungen abzugeben. Diese Erscheinung wird *Piezoeffekt* genannt.

Ausgenutzt wird dieser Einfluss bei Kristall-Mikrofonen, Schwingquarzen und in Zündmechanismen, so beispielsweise zum Entzünden von Gas-Feuerzeugen. Hierbei wird ein Piezokeramik-Block an zwei gegenüberliegenden Flächen durch aufgedampftes Metall kontaktiert. Über ein Hebelsystem wird ein Hammer betätigt, der mit einer gewissen Kraft auf den Keramikblock schlägt. Dadurch entsteht eine hohe elektrische Spannung, die das ausströmende Gas über einer Funkenstrecke entzündet.

Spannungserzeugung durch einwirkendes Magnetfeld

Eine Spule wird auf einen Hufeisenmagneten gesteckt und auf dem Schenkel hin- und herbewegt (Abb. 1.9). Die Anschlüsse der Spule sind dabei mit einem Zeiger-Voltmeter verbunden. Während der Bewegung der Spule und während ihrer Ruhe wird das Voltmeter beobachtet.

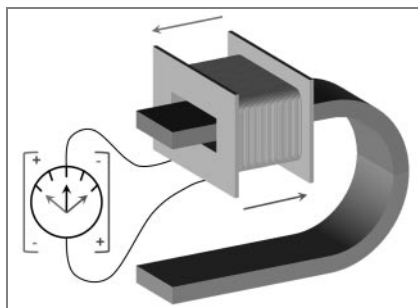


Abb. 1.9: Magnetische Induktion

Erläuterung:

Das Voltmeter zeigt im Gleichspannungsbereich einen mehr oder weniger großen Ausschlag. Die Höhe der angezeigten Spannung (Weite des Zeigerausschlages) hängt von der Bewegungsgeschwindigkeit und natürlich von der Trägheit des Zeigers ab. Die Richtung der Spannung (positiver oder negativer Spannungsanstieg) ist von der Bewegungsrichtung abhängig. Wird das Voltmeter im Wechselspannungsbereich betrieben und die Spule ständig rasch hin- und herbewegt, so zeigt das Instrument einen mittleren Wechselspannungswert an. Wird die Spule nicht bewegt, kommt der Zeiger des Voltmeters zur Ruhe.

Da in der Spule nur eine Spannung entsteht, solange sie bewegt wird, muss die Ladungstrennung durch die Änderung des Magnetfeldes entstehen. Wie wir später noch erfahren werden, erzeugt die Bewegung entlang des Magnetfeldes eine Verschiebung der Elektronen im metallischen Leiter der Spule. Erst die Entdeckung der Induktion durch Michael Faraday (1791-1867, englischer Naturforscher) hat die Entstehung der modernen Generatoren und damit die Anwendung der Elektrizität im großen Rahmen ermöglicht.

1.3 Die elektrischen Wirkungen

Wie bereits erwähnt, kann der elektrische Strom mit unseren Sinnen nicht erfasst werden. Die elektrische Energie ist nur an ihren Auswirkungen erkennbar. Alle Möglichkeiten der elektrischen Spannungserzeugung, die wir kennen gelernt haben, sind auch umkehrbar, d. h. mit elektrischer Energie lassen sich auch entsprechende Wirkungen erzeugen. Nachstehend sollen diese Wirkungen des elektrischen Stromes aufgezeigt werden.

1.3.1 Wärmewirkung

Die wohl bekannteste Wirkung des elektrischen Stromes ist die Wärme- und die der Strahlungsnach in dieselbe Kategorie gehörende Lichtstrahlung.

Versuch: Wärme- und Lichtwirkung des elektrischen Stromes

Es wird eine Glühlampe in einen Stromkreis geschaltet (Abb. 1.10). Sobald der Strom fließt, leuchtet die Lampe und gibt zudem noch Wärme ab.

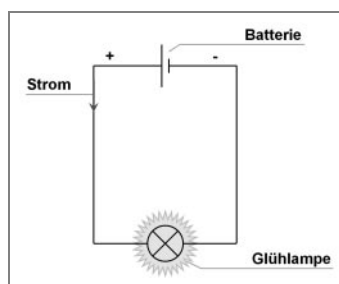


Abb. 1.10: Licht- und Wärmewirkung

Erläuterung:

Der elektrische Strom muss sich gewissermaßen durch die Wendel der Glühlampe hindurch zwingen, erfährt also eine Behinderung durch die auf seinem Wege befindlichen Atome. Durch diese im Einzelnen sehr komplizierten Vorgänge werden die Atome in Schwingungen versetzt, was sich als Wärme- und Lichtstrahlung äußert. Wie wir in einem späteren Kapitel sehen werden, ist oft, wie auch hierbei, die Wärme nicht erwünscht. Eine weitere Strahlung, die durch den elektrischen Strom hervorgerufen werden kann, ist die für unsere Berufsgruppe so wichtige Radiowelle, über deren Eigenschaft und Anwendung wir auch in einem späteren Kapitel erfahren werden.

Anwendung: Elektroherd, Bügeleisen, Föhn usw.

1.3.2 Chemische Wirkung des elektrischen Stromes

Versuch: Chemische Wirkung des elektrischen Stromes

In das Glasgefäß werden die beiden Elektroden Zink und Kupfer an eine Gleichspannung in der gezeichneten Polarität angeschlossen, wie Abb. 1.11 zeigt. Der Strom wird so lange gesteigert, bis eine chemische Reaktion in der Ammoniumchlorid-Lösung erkennbar wird. Nach kurzer Zeit ist die chemische Reaktion an einer Gasblasenbildung an der Kupferelektrode zu sehen. Gleichzeitig wird die Elektrode blank und die Lösung färbt sich leicht blau.

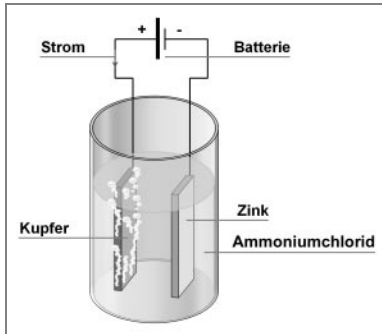


Abb. 1.11: Chemische Wirkung

Erläuterung:

Der chemische Vorgang soll nicht näher untersucht werden. Die chemische Wirkung des elektrischen Stromes wird durch die aufsteigenden Gasblasen und die Blaufärbung des *Elektrolyten* (die elektrisch leitende Flüssigkeit) hinreichend deutlich. Höherer Strom hat eine stärkere chemische Reaktion zur Folge (mehr Blasen, schnellere Färbung).

Anwendung: Die chemische Wirkung des elektrischen Stromes wird z. B. in der Galvanik verwendet. Metallüberzüge werden auf elektrischem Wege hergestellt, z. B. Versilbern, Verkupfern, Vernickeln.

1.3.3 Magnetische Wirkung des elektrischen Stromes

Versuch: Magnetische Wirkung des elektrischen Stromes

In eine Spule taucht ein Weicheisenkern ein. Der Kern ist über ein Gummiband an einem Bügel über der Spule befestigt. Eine Gleichspannungsquelle (Batterie) ist an die Klemmen der Spule über einen Schalter angeschlossen. Der Stromkreis lässt sich ein- und ausschalten (Abb. 1.12).

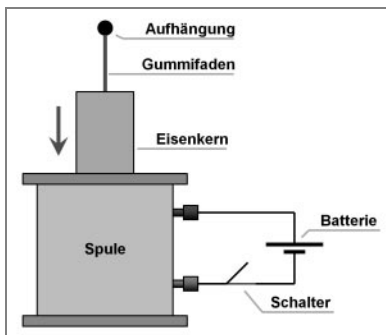


Abb. 1.12: Magnetische Wirkung

Erläuterung:

Wird der Strom in der Spule eingeschaltet, so wird der Eisenkern in die Spule gezogen. Verwenden wir eine Batterie größerer Spannung, wodurch ein größerer Strom fließt, so taucht der Kern bei eingeschaltetem Schalter tiefer in die Spule ein. Der elektrische Strom löst eine *magnetische Wirkung* in der Spule und auch um die Spule herum aus. Die magnetische Kraft ist stromabhängig, wie man an der Eintauchtiefe des Kerns erkennen kann.

Anwendung: Die magnetische Wirkung ist in vielen Anwendungen der Elektrotechnik und Elektronik zu finden, z. B. Motor, Generator, Relais, Lautsprecher, dynamische Mikrofone, Drehspulmesswerke, Fernsehbildröhre usw.

1.3.4 Wirkungen des elektrischen Stromes auf den menschlichen Körper

In diesem Abschnitt werden wir verschiedene Begriffe und Größen der Elektrotechnik ansprechen, die hier noch nicht ausreichend erklärt werden können. Wir kommen jedoch später darauf zurück.

Achtung

Der Umgang mit Elektrizität birgt eine Reihe von Gefahren in sich. Die erste wesentliche Voraussetzung, den Gefahren zu begegnen, ist, mit wachem Geist und Verantwortungsbewusstsein an elektrischen Anlagen zu arbeiten. Die andere Voraussetzung ist die Kenntnis über die möglichen Gefahren. Sind diese beiden Faktoren gegeben, so ist ein entscheidender Schritt zu Arbeitsschutz und Unfallverhütung getan!

Physiologische Wirkungen

Fließt ein zu großer elektrischer Strom durch den menschlichen (oder tierischen) Körper, so ruft er über die Nervenbahnen Schreckreaktionen und Muskelverkrampfungen hervor. Handelt es sich um Wechselstrom, so treten Unregelmäßigkeiten im Herzrhythmus auf. Die Atmung wird zunächst erheblich erschwert, wenn nicht ganz unmöglich. Sowohl bei Wechselstrom als auch bei Gleichstrom entstehen Verbrennungen. Schreckreaktionen führen häufig indirekt zu Unfällen, da die ausgelösten Bewegungen unkontrolliert sind (z. B. Sturzunfälle, Schürf-, Schnitt- und Stichverletzungen). Verbrennungen können direkt durch den Strom oder indirekt durch Lichtbögen auftreten. Art und Umfang der Schädigungen hängt von der Stromstärke, der Stromart, der Einwirkungsdauer und dem Weg ab, den der Strom durch den Körper nimmt. Erfahrungsgemäß können 50 mA bereits tödlich sein. Im Allgemeinen tritt schon bei 10 mA Verkrampfung der Atemmuskulatur und Unregelmäßigkeit des Herzrhythmus auf. Fließt der Strom länger als 30 Sekunden durch den Körper, so tritt Bewusstlosigkeit und Tod durch Atemlähmung ein.

Die lebensbedrohliche Stromstärke wird im menschlichen Körper bereits dann erreicht, wenn bei geringem *Berührungswiderstand* an den Berührungsstellen des Körpers eine Spannung von nur 65 V anliegt! In nassen Räumen mit leitenden Fußböden, im Freien und in der unmittelbaren Umgebung von Zentralheizungen, Gas- und Wasserrohren kann es zu einem guten Erdkontakt kommen. Die Übergangswiderstände sind dann oft erheblich reduziert, wodurch die *Berührungsspannungen* schnell unzulässige Werte erreichen können. In diesen Fällen ist besondere Vorsicht geboten!

Arbeiten an elektrischen Anlagen

Damit das Arbeiten an elektrischen Anlagen unfallsicher ist, müssen folgende Punkte beachtet werden:

- Anlage spannungslos machen. Auszubildende dürfen niemals an elektrischen oder elektronischen Geräten unter Spannung arbeiten, wenn die möglichen Berührungsspannungen 42 V übersteigen können!
- Spannungsfreiheit feststellen.
- Gegen Wiedereinschalten seitens anderer Personen sichern.

Schutzmaßnahmen gegen zu hohe Berührungsspannungen

Begriffe aus VDE 0100

Die VDE-Bestimmungen gliedern sich in Vorschriften, Regeln und Leitsätze. Vorschriften sind unbedingt einzuhalten, von Regeln darf bei besonderen Gründen abgewichen werden und Leitsätze werden zur Beachtung empfohlen. Die VDE 0100 enthält die Bestimmungen über das Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen unter 1000 V.

Unter diesen Starkstromanlagen versteht man Anlagen zum Erzeugen, Umwandeln, Speichern, Fortleiten oder Verbrauchen von elektrischer Energie mit Betriebsmitteln wie Transformatoren, Leitungen, Schalter, Motoren, Lampen, Heizgeräte, Messgeräte usw. Leitungen, die Spannungserzeuger mit Verbrauchern verbinden, aber nicht vom Mittel- oder Sternpunkt ausgehen, nennt man *Außenleiter*. Der *Mittelleiter* geht vom Mittelpunkt eines Gleichstrom- oder eines Einphasen-Wechselstromnetzes oder vom *Sternpunkt* eines Drehstrom-Systems aus. *Schutzleiter* verbinden leitfähige Anlagenteile, die nicht zum Betriebsstromkreis gehören, untereinander und mit der Schutzeinrichtung. Auf diese Weise wird das Entstehen zu hoher Berührungsspannungen verhindert. Die *Farbkennzeichnung des Schutzleiters ist grün/gelb*. Tritt nun bei einem Verbraucher *Körperschluss* auf, dies ist ein *Kurzschluss* zwischen Betriebsstromkreis und Gehäuse, so wird die *Sicherung* ausgelöst. Unter bestimmten Voraussetzungen, die bei fehlerhaften Anlagen vorliegen, treten zu hohe Berührungsspannungen auf.

Hinweise

Unter Berührungsspannung versteht man die Spannung, die zwischen leitenden, nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden, der Berührung zugänglichen Teilen untereinander oder zur Erde auftritt und vom menschlichen Körper bei der Berührung überbrückt wird.

Es gibt verschiedene Schutzmaßnahmen, die das Auftreten unzulässig hoher Berührungsspannungen verhindern: *Schutzisolierung*, *Schutzkleinspannung*, *Schutztrennung*, *Schutzerdung*, *Fehlerspannungs-*, *Fehlerstrom-Schutzschaltung* usw.

Schutzisolierung

Schutzisolierte Geräte sind durch zwei ineinander verschachtelte Quadrate gekennzeichnet. Die Anschlussleitung darf keinen Schutzleiter enthalten. Bei Steckeranschluss wird ein Konturenstecker ohne Schutzkontakt verwendet (Eurostecker). Die Schutzisolierung wird durch isolierende Gehäuse und Abdeckungen, durch isolierende Umpressungen von Kleinmaschinen oder durch Einbau von Isolierzwischenstücken in Getrieben, Wellen und Gehäusen erreicht.

Müssen von außen zugängliche Teile elektrisch leitend mit dem Betriebsstromkreis verbunden sein, beispielsweise zur Abschirmung eines Störfeldes oder zur Einspeisung von Signalgrößen, so darf dies nur über *Berührungsschutz-Kondensatoren*, gekennzeichnet durch ein »b« im Kreis, oder *hochohmige Widerstände* geschehen.

Schutzkleinspannung

Schutzkleinspannungen sind *Spannungen bis 42 V*. Diese müssen von Betriebsstromkreisen höherer elektrischer Spannungen elektrisch getrennt sein.

Schutztrennung

Bei der Schutztrennung wird der *Verbraucherstromkreis* über einen *Trenntransformator* elektrisch vom Netzstromkreis getrennt. Der Verbraucherstromkreis (sekundärseitig) darf in keinem Punkt mit der Erde leitend verbunden sein, da im Fehlerfall der Verbraucher Spannung gegen Erde

annehmen würde und bei Messungen am eingeschalteten Verbraucher durch Erdverbindung der messenden Person eine unzulässig hohe Berührungsspannung auftreten könnte.

An einen Transformator zum Zwecke der *Schutztrennung* darf *nur 1 Verbraucher* angeschlossen werden. Die Steckdose am Ausgang dieses Transformators darf keinen Schutzkontakt besitzen. Höchstzulässige Primärspannung für Trenntransformatoren ist 500 V, sekundärseitig 230 V (2-polig) und 380 V (3-polig) bei einem maximalen Nennstrom von 16 A sekundär.

Anwendung: z. B. Messen an elektrischen und elektronischen Geräten unter Spannung, erdfreier Anschluss von Messgeräten, die nicht schutzisoliert sind, zur Verhinderung von Brummschleifen.

Erdung

Bis zur Anschlussstelle wird über steckbare Kabel vom Verbrauchergehäuse eine Schutzleitung geführt, die über den Schutzkontakt der Steckdose und des Steckers Erdverbindung erhält. Bei Schutzterdung wird diese separate Leitung jenseits der Steckdose weitergeführt bis zu einem zentralen Erder, der gesamten Anlage.

Fehlerstrom-Schutzschaltung (FI-Schutzschaltung)

Alle stromführenden Leiter des Netzes sind durch einen Wandler im FI-Schalter geführt. Bei fehlerhafter Anlage ist die Summe aller Ströme durch den Wandler (ab- und zufließende Ströme) nicht mehr 0. In der Ausgangswicklung des Wandlers wird eine Spannung induziert, die direkt bzw. mittels Relais eine Auslösespule speist, welche den Schalter innerhalb von 0,2 Sekunden abschaltet. Der Auslöse-Fehlerstrom kann z. B. 30 mA betragen.

1.4 Aufgabenkatalog

1.4.1 Ungebundene Aufgaben

1. Wie stellt man sich ein Atom vor? Erläutern Sie den vereinfachten Aufbau anhand des Kupferatoms!
2. Welche Kräfte werden zwischen den elektrischen Ladungsträgern wirksam? Erläutern Sie, wie die Kraftwirkungen gerichtet sind!
3. Welche wesentlichen Unterschiede hinsichtlich ihrer Kristallstruktur bestehen zwischen Leiter, Halbleiter und Isolator?
4. Was ist ein Molekül? Nennen Sie den Unterschied zum Atom!
5. Welche Erzeugungsarten für die elektrische Spannung gibt es? Erläutern Sie die Grundprinzipien der Spannungserzeugung!
6. Welche Wirkungen ruft der elektrische Strom hervor? Erläutern Sie die Vorgänge anhand von Beispielen!

1.4.2 Multiple-Choice-Aufgaben

1. Die VDE 0100 enthält die Bestimmungen über das Errichten von Starkstromanlagen mit Nennspannungen unter 1000 V. Welche Aussage hierzu ist falsch?
 1. Leitungen, die Spannungserzeuger mit Verbrauchern verbinden, aber nicht vom Mittel- oder Sternpunkt ausgehen, nennt man Außenleiter.
 2. Schutzleiter verbinden leitfähige Anlagenteile mit dem Betriebsstromkreis.

3. Unter diesen Starkstromanlagen versteht man Anlagen zum Erzeugen, Umwandeln, Speichern, Fortleiten oder Verbrauchen von elektrischer Energie mit Betriebsmitteln wie Transformatoren, Leitungen, Schalter, Motoren, Lampen, Heizgeräten, Messgeräten usw.
 4. Die Farbkennzeichnung des Schutzleiters ist grün/gelb.
 5. Unter Berührungsspannung versteht man die Spannung, die zwischen leitenden, nicht zum Betriebsstromkreis gehörenden, der Berührung zugänglichen Teilen untereinander oder zur Erde auftritt und vom menschlichen Körper bei der Berührung überbrückt wird.
2. Welche Aussage kann über Ionen gemacht werden?
 1. Ionen sind frei bewegliche Elektronen, da sie negativ geladen sind.
 2. Ein Molekül ist in seinem stabilen Zustand immer ein Ion.
 3. Wenn Moleküle sich miteinander verbinden, wird die Verbindung Ion genannt.
 4. Ionen sind Atome, bzw. Molekülteile, die nach außen elektrisch nicht neutral sind.
 5. Ionen entstehen nur in Flüssigkeiten.
 3. Welche Aussage kann über Moleküle nicht gemacht werden?
 1. Ein Molekül ist das kleinste Teilchen einer chemischen Verbindung.
 2. Die Ansammlung der Materie in den Aggregatzuständen »fest, flüssig bzw. gasförmig« ist meist durch Moleküle gebildet.
 3. Moleküle können 4 Aggregatzustände »fest, flüssig, gasförmig und Plasma« annehmen.
 4. Ein Molekül besteht aus einer Anzahl von Atomen, die elektrochemisch aneinander gebunden sind.
 5. Wenn ein Atom von einem Molekül abgetrennt wird, verliert das Molekül seinen stofflichen Charakter.

Lösungen zu den Multiple-Choice-Aufgaben:

Aufgabe	1	2	3
Lösung	2	4	3

11 Sende- und Empfangstechnik

11.1 Hochfrequenz-Abstrahlung

11.1.1 Allgemeines

Im täglichen Leben haben wir es mit einer Vielzahl unterschiedlicher Schwingungen und deren Erscheinungsformen zu tun. Teils breiten sich die Frequenzen als Schall oder Ultraschall aus, wo sie die Luft oder ein anderes Medium zur Fortpflanzung benötigen. Schall benötigt immer ein Medium, denn er verändert dessen Dichteverhältnisse längs seiner Ausbreitungsrichtung. Man spricht von *Längswellen* (*Longitudinal-Wellen*). So ist auch zu erklären, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von der Dichte des Mediums abhängig, also völlig unterschiedlich ist. Bei Luft normalen Luftdrucks beträgt sie 333 m/s.

Zu einer anderen Art gehören die elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Schwingungen, die sich, wie wir bereits gesehen haben, auf Leitungen, aber auch ohne Medium im leeren Raum ausbreiten können. Zu den elektromagnetischen Schwingungen, die sich im leeren Raum ausbreiten können, gehören alle Strahlungen des elektromagnetischen Spektrums, von den Längstwellen über die Radiowellen, Infrarotstrahlung, das sichtbare Licht, die Ultraviolettstrahlung, die Röntgenstrahlung, die Gammastrahlung bis hin zur kosmischen Strahlung (Abb. 11.1).

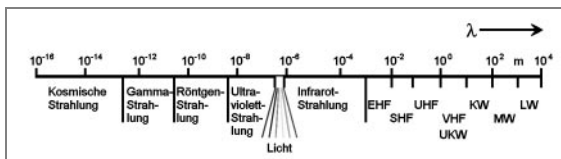


Abb. 11.1: Wellenlängenskala

Im leeren Raum beträgt die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser elektromagnetischen Strahlungen ca. 300.000 km/s. Hier noch einmal zur Erinnerung die Gleichung zur Berechnung der Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (10.2).$$

11.1.2 Die Abstrahlung elektromagnetischer Energie

Die Abstrahlung der Hochfrequenz erfolgt über eine *Sendeanenne*. Die Wirkungsweise einer solchen Antenne soll am Beispiel des offenen $\lambda/2$ -Dipols untersucht werden.

Der $\lambda/2$ -Dipol

Betrachten wir einen $\lambda/2$ -langen offenen Leitungsdraht, der ja an seinen Enden Spannungsmaximum und in der Mitte Strommaximum hat, wenn er in seiner Eigenfrequenz f_0 erregt wird. Die

Einspeisung der HF-Energie kann durch Stromspeisung geschehen, dann wird in der Mitte, im Bereich des Strombauches, ein HF-Strom eingekoppelt, wie Abb. 11.2 zeigt.

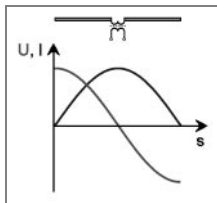


Abb. 11.2: Der $\lambda/2$ -Dipol mit Diagramm $U, I = f(s)$

Das Nah- und Fernfeld eines Dipols

Wenn ein Strom durch einen Leitungsdraht fließt, so baut sich ein Magnetfeld um den Leiter auf. Der Feldaufbau erfolgt, indem sich die einzelnen Feldlinien in den umgebenden Raum ausbreiten. Diese Ausbreitung geschieht nicht zeitlos, sondern mit Lichtgeschwindigkeit. Ebenso trifft dies für das elektrische Feld zu. Die Ausbreitungszeit spielt in niederfrequenten Feldern keine Rolle. Sie sind so gut wie stationär, denn der Feldstärke- und Richtungswechsel vollzieht sich praktisch an allen Punkten der näheren Umgebung ihrer Entstehung gleichzeitig, bezogen auf die bei NF doch sehr große Periodendauer T .

Die elektrische Feldstärke E nimmt mit der 3. Potenz der Entfernung vom Ort der Entstehung ab:

$$E_N \sim \frac{1}{r^3} \quad (11.1).$$

Die magnetische Feldstärke H nimmt mit der 2. Potenz der Entfernung vom Ort der Entstehung ab:

$$H_N \sim \frac{1}{r^2} \quad (11.2).$$

Man kann deshalb davon ausgehen, dass beide Felder mit zunehmendem Abstand vom Leiter rasch vernachlässigbar klein werden. Diese beiden Felder sind ebenso wie Spannung und Strom zeitlich um 90° phasenverschoben. Das Gesamtfeld enthält also keine Wirkenergie. Wird ein Sendedipol nach Abb. 11.2 mit HF-Energie seiner Eigenfrequenz f_0 erregt, so besteht das hochfrequente Feld nicht nur aus diesem Nahfeld, sondern auch aus einem *Fernfeld*. Die beiden Komponenten des Fernfeldes H_F und E_F nehmen in ihrer Energie im Gegensatz zum Nahfeld nur noch linear mit dem Abstand ab:

$$E_F \sim \frac{1}{r} \quad (11.3)$$

$$H_F \sim \frac{1}{r} \quad (11.4).$$

Diese beiden Felder entweichen, miteinander verkettet und losgelöst vom Ort ihrer Entstehung, mit Lichtgeschwindigkeit in den Raum.

Während die Nahfeldenergie reine Blindenergie ist, weil sie wieder in die Antenne zurückfließt, muss die Fernfeldenergie reine Wirkenergie sein. Sie kehrt ja nicht mehr zur Antenne zurück, wird also endgültig von der Antenne abgegeben. Man nennt sie *Strahlungsenergie*.

Das elektrische Feld eines niederfrequent erregten HF-Dipols verschwindet praktisch im gleichen Augenblick, in dem die Spannung zwischen den Drahtenden (Elektroden der Kapazität) NULL wird. Bei HF-Erregung (f_0) erfolgt jedoch mit zunehmendem Abstand von einer solchen Antenne entlang der Feldlinien eine Phasenverschiebung. Das Feld baut sich proportional dem zeitlichen

Verlauf der Spannung auf. Dabei geschieht dieser Feldaufbau mit einer endlichen Geschwindigkeit. Wegen der hohen Frequenz, mit der die Antenne erregt wird, und der Laufzeit, die während des Feldaufbaues vergeht, ist für einen ganz bestimmten Abstand von der Antenne, anders gesagt, bei einer ganz bestimmten Feldlinienlänge, zwischen dem Zeitpunkt des Austrittes einer Feldlinie am positiven Dipolende und des Wiedereintrittes am negativen, die Zeitdauer einer viertel Periode verstrichen. Nun erst ist der so betrachtete Spannungsimpuls auf dieser Feldlinie geschlossen. Die Spannung an der Antenne ist in dieser Zeit also um eine viertel Periode, das ist $\varphi = 90^\circ$ weiter geeilt. Damit trifft der Verschiebestromimpuls, der sich in der Feldlinie fortpflanzt, 90° nacheilend seiner Austrittsphase ein.

Wie wir wissen, eilt im Kondensator die Spannung dem Strom um 90° nach. Hier ist sozusagen der Stromimpuls erst vollendet (Stromkreis über die Feldlinie geschlossen), wenn die Spannung an der Antenne bereits 90° weitergeeilt ist. Damit treffen Strom und Spannung phasengleich zusammen. Wenn Strom und Spannung in Phase sind, muss die kapazitive Komponente der Antenne Wirkenergie abgeben. Diese wird in der Tat von der Antenne abgestrahlt. (Was über die Entstehung des elektrischen Fernfeldes gesagt wird, gilt analog auch für die magnetische Komponente. Wir wollen jedoch aus Gründen des leichteren Verstehens die Abstrahlungsvorgänge vom elektrischen Feld ausgehend betrachten.)

Dieser Abstrahlungsvorgang wird durch das Abschnüren der elektrischen Feldlinien veranschaulicht (Abb. 11.3).

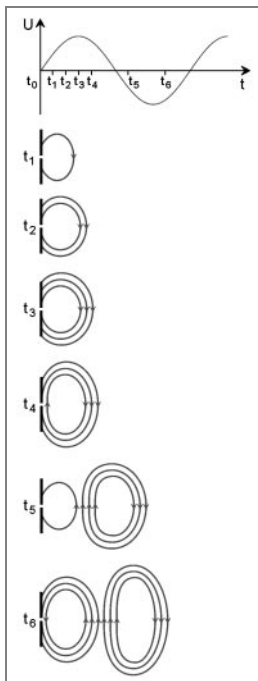


Abb. 11.3: Darstellung der Ablösung
des elektrischen Feldes vom Sendedipol

Im Liniendiagramm ist der zeitliche Verlauf der Antennenspannung dargestellt. Für die Zeitpunkte $t_{0..6}$ ist die jeweilige Feldverteilung schematisiert. Der Ausbreitungsvorgang ist nur einseitig und in der Fläche dargestellt. Tatsächlich vollzieht er sich aber räumlich. Zum Zeitpunkt t_0 ist die Spannung am Dipol noch 0, ebenso ist noch kein Feld vorhanden. Bis zum Zeitpunkt t_3 hat die Spannung ihr Maximum erreicht. Der Feldaufbau ist jedoch erst zur Hälfte abgeschlossen.

Zum Zeitpunkt t_4 ist der Verschiebestromimpuls von Zeitpunkt t_1 eingetroffen (das sind 90° Verzögerung). Man erkennt, dass diese Feldlinie deshalb abgeschnürt wird und die Antenne verlässt. Sie ist in sich geschlossen. So geschieht es mit jeder Feldlinie, wie hier beispielhaft für die zum Zeitpunkt t_5 entstehende, die bei t_6 (90° verzögert) ebenfalls abgeschnürt wird.

Diese Feldlinien der negativen Spannungshalbwelle fügen sich an die der positiven Amplitude gleichsinnig an, wie die Pfeilrichtung des Feldes zeigt.

Wir wollen uns nun die Vorgänge bei der HF-Abstrahlung noch etwas genauer ansehen und erklären, wie es zu der Verkettung von elektrischem und magnetischem Feld kommt, der Entstehung des elektromagnetischen Feldes. Unsere Betrachtung bezieht sich auch hierbei wieder der Einfachheit halber nur auf das elektrische Feld als Ausgangspunkt.

In den Dipolstäben fließt ein HF-Strom, der seine Fortsetzung im Verschiebestrom des elektrischen Feldes hat. Von James Clerk Maxwell (1831-1879, schottischer Physiker) stammt die Idee, dass sich auch dieser Verschiebestrom entlang der Feldlinie mit einem Magnetfeld umgibt, wie ja auch der Leitungsstrom ein Magnetfeld besitzt (Abb. 11.4).

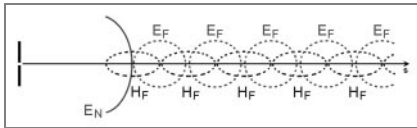


Abb. 11.4: Elektrisches und magnetisches Feld verbinden sich zur elektromagnetischen Strahlung

Wie wir wissen, ist der Verschiebestrom im elektrischen Feld mit der Dipolspannung in Phase. Nun erzeugt das entstehende magnetische Feld seinerseits im Raum eine elektrische Spannung. Von dieser Spannung geht erneut ein elektrisches Feld aus, welches sich weiter in den Raum hinaus erstreckt und zur Bildung eines Verschiebestromes führt. Auch dieser bewirkt wieder ein Magnetfeld und so fort. Die beiden Komponenten E_F und H_F sind am Ort ihrer Verkettung immer gleichphasig. Da die Verkettung im Raum fortschreitet, wie wir gesehen haben, ist an allen Stellen des Fernfeldes dieses elektromagnetische Feld mit seinen gleichphasigen Komponenten vorhanden. Es enthält reine Wirkenergie.

Im Abstand von $3 \dots 4\lambda$ ist nur noch das elektromagnetische Fernfeld nachweisbar. Aus den beiden Komponenten des elektromagnetischen Fernfeldes lässt sich die Strahlungsleistung pro durchstrahlte Fläche für jeden beliebigen Ort berechnen. Wir gehen von Gleichung

$$P = U \cdot I \quad (2.18)$$

aus. Nach Gleichung

$$E = \frac{U}{s} \quad (3.50)$$

schreiben wir für die elektrische Feldstärke des Fernfeldes:

$$E_F = \frac{U}{s} \quad (11.5).$$

Gleichung 3.84 in 3.85 eingesetzt ergibt:

$$\Theta = I \cdot N \quad (3.84)$$

$$H = \frac{\Theta}{l} \quad (3.85)$$

$$H = \frac{I \cdot N}{s} \quad (11.6).$$

Hieraus formulieren wir die magnetische Feldstärke des Fernfeldes:

$$H_F = \frac{I \cdot N}{s} \quad (11.7).$$

Gleichung 11.5 auf U umgestellt, erhalten wir:

$$U = E_F \cdot s \quad (11.8).$$

Gleichung 11.7 auf I umgestellt ergibt:

$$I = \frac{H_F \cdot s}{N} \quad (11.9).$$

Im Raum gilt immer die Windungszahl $N = 1$, weil eine geschlossene Feldlinie des elektrischen Feldes einer Windung entspricht. So wird aus Gleichung 11.9:

$$I = H_F \cdot s \quad (11.10).$$

Gleichungen 11.8 und 11.10 in 2.18 eingesetzt:

$$P = E_F \cdot s \cdot H_F \cdot s \quad (11.11)$$

$$\frac{P}{s^2} = E_F \cdot H_F \quad (11.12).$$

Gleichung 11.12 zeigt, dass sich die Leistung pro Flächeneinheit aus dem Produkt der Feldkomponenten E_F und H_F errechnet. Wie wir wissen, stehen ja die beiden Felder E_F und H_F räumlich 90° zueinander. Demnach wird durch den Ausdruck » s^2 « tatsächlich eine Fläche beschrieben.

Weiter zeigt uns Gleichung 11.12, dass die Strahlungsleistung P mit dem Quadrat der Entfernung von der Antenne abnimmt. Untersuchen wir nämlich das elektromagnetische Feld in doppelter Entfernung eines Betrachtungsortes A mit den Feldkomponenten H_F' und E_F' von der Antenne, nach Abb. 11.5 am Ort B, so wird ja die Leistung die 4-fache Fläche passieren. 1/4 der durchstrahlten Fläche am Ort B ist gleich der durchstrahlten Fläche am Ort A. Deshalb wird auch diese Fläche von 1/4 der Strahlungsleistung der Fläche A durchdrungen.

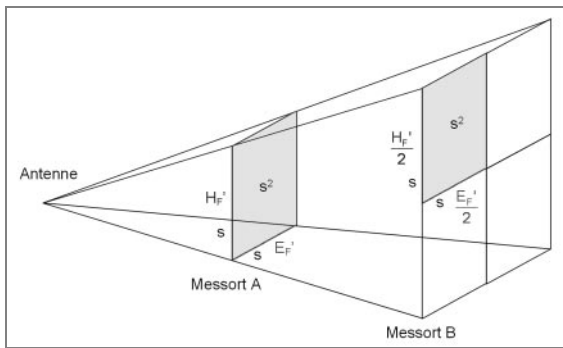


Abb. 11.5: Vereinfachte Darstellung der Strahlungsleistung pro Fläche in Abhängigkeit vom Antennenabstand

Mathematisch können wir die Zusammenhänge ebenfalls darstellen. Am Ort A durchstrahlt die Leistung P die Fläche s^2 :

$$\frac{P}{s^2} = E_F' \cdot H_F' \quad (11.13).$$

In der doppelten Entfernung gilt:

$$\frac{P}{4 \cdot s^2} = \frac{E_F' \cdot H_F'}{4} \quad (11.14)$$

$$\frac{P}{4 \cdot s^2} = \frac{E_F'}{2} \cdot \frac{H_F'}{2} \quad (11.15).$$

Abb. 11.5 und Gleichungen 11.13 und 11.15 zeigen, dass E_F und H_F mit dem Abstand linear abnehmen müssen, denn zur Bildung der Fläche s^2 wird im doppelten Abstand (Ort B) $E_F'/2$ und $H_F'/2$ benötigt. Die Leistung jedoch nimmt mit dem Quadrat des Abstandes ab.

Erläuterung der verwendeten Formelzeichen

λ = Wellenlänge in m

Θ = magnetische Durchflutung in A

c = Lichtgeschwindigkeit $300.000 \cdot 10^3$ m/s

E = elektrische Feldstärke in V/m

E_F = elektrische Feldstärke des Fernfeldes in V/m

E_N = elektrische Feldstärke des Nahfeldes in V/m

f = Frequenz in Hz

H = magnetische Feldstärke in A/m

H_F = magnetische Feldstärke des Fernfeldes in A/m

H_N = magnetische Feldstärke des Nahfeldes in A/m

I = Strom in A

l = Länge in m

N = Windungszahl

P = Leistung in W

r = Abstand von der Antenne in m

s = Strecke in m

U = Spannung in V

11.2 Wellenausbreitung

11.2.1 Ausbreitungseigenschaften des Fernfeldes

Das Fernfeld einer Sendeantenne lässt sich hinsichtlich seines Ausbreitungscharakters in 2 Komponenten einteilen, in die *Bodenwellen* und die *Raumwellen*. Die Bodenwellen pflanzen sich entlang der Erdoberfläche fort, folgen also der Erdkrümmung, während sich die Raumwellen geradlinig in den Raum hinaus bewegen (Abb. 11.6).

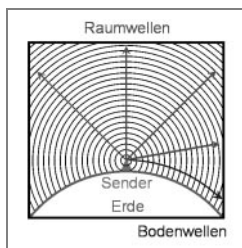


Abb. 11.6: Modell der Wellenausbreitung von einem stationären Sender aus

Diesen beiden Komponenten kommt für die einzelnen Wellenbereiche unterschiedliche Bedeutung zu. Im Langwellenbereich liegt die Reichweite der Bodenwelle bei ca. 1000 km, im Mittelwellenbereich reduziert sie sich auf ca. 300 km. Für Kurzwelle kommt noch in 100 km Abstand vom Sender eine wirksame Bodenwelle an. Kürzere Wellen haben wegen der zunehmenden Dämpfung der Bodenwellen schließlich keine wirksame Reichweite dieser Komponente mehr. Durch diese Tatsache wäre die drahtlose Übertragung ab dem Kurzwellenbereich im Wesentlichen auf die Sichtweite begrenzt, wenn man davon ausgeht, dass die Raumwelle sich geradlinig in den Raum hinaus fortpflanzt und in der Unendlichkeit des Weltraumes verschwindet.

Für Mittel- und Kurzwelle besteht jedoch in einem bestimmten Bereich unserer Atmosphäre eine gute Reflexionseigenschaft bei geringer Dämpfung. In der Ionosphäre bewirkt die Sonnenstrahlung eine Ionisation der Luftmoleküle. Es bildet sich so eine elektrisch leitfähige Luftschicht, die nach dem englischen Physiker Oliver Heaviside (1850-1925) *Heaviside-Schicht* (auch E-Schicht) genannt wird. Die Heaviside-Schicht kann die Raumwellen von Lang-, Mittel- und Kurzwellsendern reflektieren. Der Empfang eines Kurzwellsenders ist sogar um den kompletten Erdball herum möglich.

Die Reflexionseigenschaft ändert sich tageszeitlich und wirkt sich für die einzelnen Frequenzen der genannten Bereiche unterschiedlich aus. So beginnt in den Abendstunden bereits der Weitempfang im MW-Bereich und verbessert sich noch in den Nachtstunden, während für die einzelnen Bereiche der Kurzwelle bestimmte Tageszeiten die günstigsten Ausbreitungsbedingungen schaffen.

Kürzere Wellen (UKW = Ultra-Kurz-Welle, VHF = Very High Frequency, UHF = Ultra High Frequency, SHF = Super High Frequency usw.) durchdringen die Heavisideschicht und werden nicht reflektiert. Abb. 11.7 zeigt im Prinzip die Ausbreitung der Sendewellen in den einzelnen Bereichen.

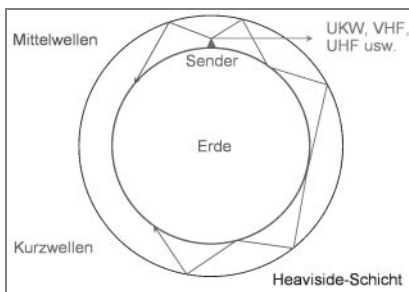


Abb. 11.7: Prinzipielle Darstellung der Wellenausbreitung hinsichtlich der verschiedenen Wellenbereiche

Durch die Reflexion der Raumwellen an der Heaviside-Schicht kommt es am Empfangsort zur Überlagerung verschiedener Wellen, die durch unterschiedliche Laufzeiten nicht mehr phasengleich eintreffen. Die Folge ist ein Schwanken der Empfangsfeldstärke, der sogenannte Schwund (englisch: Fading).

Die Ausbreitungseigenschaften der Funkwellen sind im Folgenden etwas genauer beschrieben:

Längstwellen ... 30 kHz

Bodenwellen dringen in den Erdboden ein und breiten sich unter Wasser aus. Raumwellen sind nicht vorhanden.

Langwellen (LW) 30 kHz ... 300 kHz

Bodenwellen haben geringe Dämpfung. Die Ausbreitung erfolgt bis ca. 1000 km. Raumwellen werden stark gedämpft bei vollständiger Reflexion an der Heaviside-Schicht.

Mittelwellen (MW) 300 kHz ... 1650 kHz – Grenzwellen 1,65 MHz ... 3 MHz

Bodenwellen haben eine mittelstarke Dämpfung. Die Ausbreitung erfolgt bis ca. 300 km. Die Raumwellen werden stark gedämpft bei fast vollständiger Reflexion an der Heaviside-Schicht. Durch Abnahme der Sonnenstrahlung in den Abendstunden und die Verlagerung der Heaviside-Schicht in größere Höhen und der dabei auftretenden Verdünnung der d-Schicht (dämpfende Schicht), gewinnt die Raumwelle an Bedeutung. Die Dämpfung der Raumwelle geht dabei zurück und es tritt Weitempfangslage auf.

Kurzwellen (KW) 3 MHz ... 30 MHz

Bodenwellen erfahren eine sehr starke Dämpfung, Ausbreitung bis ca. 100 km. Raumwellen werden gering gedämpft und sehr gut an der Heaviside-Schicht und auch wieder an der Erdoberfläche reflektiert, sodass der Empfang auch auf der anderen Seite der Erdkugel bei geringen Sendeleistungen möglich wird. Bis zu einem Abstand von 30 km von der Sendeantenne liegt die sogenannte *Tote Zone*. Durch gegenseitige Auslöschung der Raum- und Bodenwellen ist kein Empfang möglich.

Ultrakurzwellen (UKW) 30 MHz ... 300 MHz (auch mit VHF bezeichnet)

Dezimeterwellen (UHF) 300 MHz...3 GHz

Zentimeterwellen (SHF) 3 GHz...30 GHz

Millimeterwellen (EHF) 30 GHz...300 GHz (EHF = Extremely High Frequency)

Die Bodenwelle ist nicht mehr vorhanden, die Raumwelle sehr gering gedämpft. Im UKW-Bereich erfolgt noch eine sehr schwache Reflexion an der Heaviside-Schicht, die in besonderen Wetterlagen (Frühjahr und Herbst) zu Weitempfang am Tage führen kann. Es treten dann Störungen durch weit entfernte Sender im Fernseh- und Rundfunkbereich auf. Bei normalen Wetterlagen ist die Heaviside-Schicht für alle Wellen durchlässig. Der Empfang erfolgt auf Sichtweite bis weit in den Weltraum hinaus.

11.3 Polarisation, Richt-Strahlung, Antennenhöhe und Strahlungswiderstand von Antennen

11.3.1 Allgemeines

Kenntnisse über das Verhalten der HF-Energie auf Leitungen und die Abstrahlung von HF-Energie in den Raum sind für diesen Abschnitt Voraussetzung.

Das Wort »Antenne« stammt ursprünglich aus der Insektenkunde und bedeutet »Fühler«. Die Antenne ist in ihrer Beschaffenheit und Ausführung entscheidend für die Höhe der Empfangsspannung, die dem Empfänger zugeführt werden kann. Um die Wirkungsweise der Empfangsantenne besser verstehen zu können, wollen wir zunächst nochmals an die Vorgänge bei der Abstrahlung von HF-Energie anknüpfen.

11.3.2 Polarisation und Richtstrahlung

Die kleinste Antenne ist der $\lambda/4$ -Stab, der einseitig geerdet ist und von dem italienischen Physiker Guglielmo Marconi (1874-1937) erstmals als Antenne verwendet wurde. Er wird nach ihm Marconi-Antenne genannt. Der $\lambda/4$ -Stab ist praktisch ein asymmetrischer Dipol. Er spielt auch als Empfangsantenne eine wichtige Rolle, wie wir noch sehen werden. Die elektrische Feldkomponente des Fernfeldes bildet sich parallel zu diesem Antennenstab aus. Die Sendeantennen der MW- und KW-Sender sind senkrecht aufgerichtet, sodass sich auch ein senkrecht gerichtetes Strahlungsfeld der elektrischen Fernfeldkomponente ergibt, wie in Abb. 11.8 dargestellt ist. Dies gilt auch für den symmetrischen Dipol der Länge $\lambda/2$.

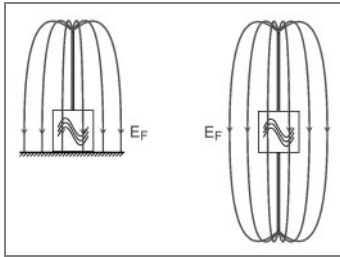


Abb. 11.8: Prinzipdarstellung vertikal polarisierter Sendeantennen – Marconi-Antenne und $\lambda/2$ -Dipol

Abb. 11.9 zeigt eine $\lambda/2$ -Dipol-Empfangs-Antenne in zwei *Polarisationsebenen*. Als Indikator für die Empfangsenergie ist in die Mitte des Stabes ein Glühlämpchen geschaltet. Ein solcher Versuch ist jedoch nur sinnvoll, wenn die Feldstärke des HF-Signals hoch genug ist. Das ist nur in Sendernähe der Fall. In Abb. 11.9a ist ein solch präparierter $\lambda/2$ -Dipol 90° zur Polarisationsebene gegenüber der Sendeantenne (Abb. 11.8) ausgerichtet, also auch zur Feldrichtung E_F um 90° gekippt. Das Lämpchen leuchtet nicht.

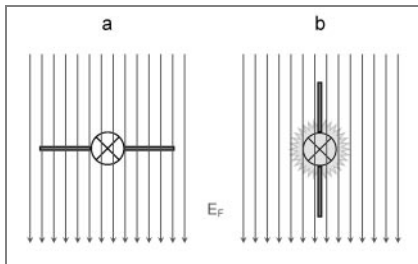


Abb. 11.9: $\lambda/2$ -Dipol im vertikal gerichteten Empfangsfeld E_F

Abb. 11.9b hingegen zeigt den richtig in der Polarisationsebene ausgerichteten Empfangsdipol. Da im Kurzwellenbereich zwar die vertikale Polarisationsrichtung gegeben ist, jedoch die Reflexion der Wellen an der Heaviside-Schicht erst zum eigentlichen Empfang führt, kommen die Feldlinien nicht mehr genau in der Polarisationsebene am Empfangsort an. Die Empfangsantenne muss deshalb meist schräg ausgerichtet werden, um einen optimalen Empfang zu gewährleisten.

Einfache Dipole, wie sie in Abb. 11.8 ausgerichtet sind, senden gleichmäßig in einer Ebene, d. h., von oben auf die Antenne geblickt, breitet sich die Funkwelle kreisförmig aus. Will man jedoch nicht ein ganzes Gebiet in kreisförmiger Fläche abdecken, sondern möchte mit geringster Sendeleistung so weit wie möglich kommen, so ist es erforderlich, den Wellen eine Vorzugsrichtung zu geben. Wenn man zwei $\lambda/2$ -Dipole gemeinsam mit einem Hochfrequenzsignal speist und sie auch im Abstand von $\lambda/2$ parallel aufstellt, erreicht man eine verstärkte Abstrahlung in der Verbindungsrichtung, wie Abb. 11.10 zeigt.

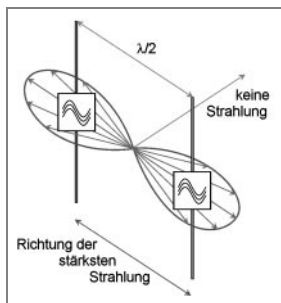


Abb. 11.10: Richtwirkung durch zwei gemeinsam gespeiste $\lambda/2$ -Dipolantennen

Das Feld hat während seiner Laufzeit von Antenne 1 zu Antenne 2 seine Phase um 180° gedreht, sodass das Feld der 2. Antenne unterstützt wird. Umgekehrt trifft dies auch von Antenne 2 nach 1 zu. In der dazu senkrechten Strahlungsrichtung heben sich die Felder gegenseitig auf. Die Länge der Pfeile ist der Strahlungsstärke proportional. Die Pfeilspitzen berühren eine Kurve, entlang derer gleiche Feldstärke herrscht. Durch geeignete Anordnung mehrerer Antennen dieser Art lässt sich die Bündelung der Strahlung noch weiter steigern.

11.3.3 Effektive Antennenhöhe und Strahlungswiderstand

Unter *Antennenhöhe* versteht man die in das elektromagnetische Feld hineinragende wirksame Strecke der Antenne (auch *Antennenlänge* genannt). Um einfacher rechnen zu können, denkt man sich die ungleiche Stromverteilung eines z. B. $\lambda/4$ -langen Antennenstabes über die ganze Leiterlänge hinweg linearisiert. Der Strom I , der im Einspeisungspunkt der tatsächlichen Antenne sein Maximum hat (Strombauch), wird dann über eine Strecke des Antennenstabes als konstant angenommen. Diese gedachte Länge ist nun gegenüber der wirklichen Antenne verkürzt und wird *effektive Höhe* h_{eff} genannt. Für eine $\lambda/4$ -Antenne (Marconi-Antenne) gilt:

$$h_{\text{eff}} = \frac{2h}{\pi} \quad (11.16).$$

Für andere Antennenformen wird h_{eff} durch Messung oder Berechnung ermittelt. Die Strahlungsleistung P_S ist durch die Gebrauchsformel

$$P_S \approx 1600 \, \Omega \cdot I^2 \cdot \left(\frac{h_{\text{eff}}}{\lambda}\right)^2 \quad (11.17)$$

definiert. Die Strahlungsleistung ist Wirkleistung, die sich an einem virtuellen (virtuell = scheinbar) Wirkwiderstand umsetzt. Dieser Widerstand wird Strahlungswiderstand R_S genannt. Bekanntlich ist $P = I^2 \cdot R$. Hier ergibt sich daraus:

$$P_S = I^2 \cdot R_S \quad (11.18).$$

Gleichung 11.18 in 11.17 eingesetzt und auf R_S umgestellt, ergibt:

$$R_S \approx 1600 \, \Omega \cdot \left(\frac{h_{\text{eff}}}{\lambda}\right)^2 \quad (11.19).$$

Beispiel 1: Wir wollen den Strahlungswiderstand R_S für eine $\lambda/4$ -Antenne berechnen. Hierzu setzen wir die tatsächliche Antennenhöhe h :

$$h = \frac{\lambda}{4} \quad (11.20)$$

in Gleichung 11.16 ein und erhalten:

$$h_{\text{eff}} = \frac{2\lambda}{4\pi} \quad (11.21)$$

$$h_{\text{eff}} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (11.22).$$

Nun wird in Gleichung 11.22 auf λ umgestellt in 11.19 eingesetzt, und wir erhalten:

$$R_s \approx 1600 \, \Omega \cdot \left(\frac{1}{2\pi}\right)^2 \quad (11.23)$$

$$R_s \approx 40 \, \Omega.$$

Aus Gleichung 11.23 entnehmen wir, dass der Strahlungswiderstand R_s der $\lambda/4$ -Antenne unabhängig von der Wellenlänge λ ist.

Beispiel 2: Zu berechnen ist die Strahlungsleistung P_s einer $\lambda/4$ -Antenne, wenn der Strom im Antennenfußpunkt 5 A beträgt. Wir wählen hierzu Gleichung 11.18 aus:

$$P_s = I^2 \cdot R_s \quad (11.18)$$

$$P_s = (5 \, \text{A})^2 \cdot 40 \, \Omega$$

$$P_s = 1 \, \text{kW}.$$

Erläuterung der verwendeten Formelzeichen

λ = Wellenlänge in m

h = tatsächliche Antennenhöhe in m

h_{eff} = effektive Höhe der Sendeantenne in m

I = Antennenstrom im A

P_s = Strahlungsleistung in W

R_s = Strahlungswiderstand in Ω

11.4 Antennenarten

11.4.1 Ferritantennen

Die Ferritantennen nehmen eine Sonderstellung ein, da sie nur die magnetische Komponente des elektromagnetischen Empfangsfeldes ausnutzen. Die Vorzugsrichtung ist demnach die Ausrichtung des Ferritstabes in Richtung der magnetischen Feldlinien. Bei LW- und MW-Sendern verlaufen die Feldlinien H_F in konzentrischen Kreisen um die Sendeantenne. Deshalb gewinnt man die größte Empfangsspannung in der Ferritantenne, wenn diese quer zur Sendeantenne angeordnet wird (Abb. 11.11).

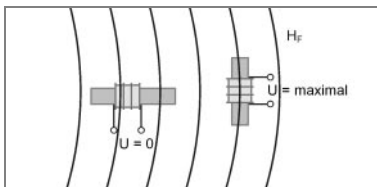


Abb. 11.11: Ausrichtung der Ferritantenne im magnetischen Feld H_F

Ferritantennen werden bis zu einer Frequenz von ca. 2 MHz in Heimempfängern oder Reiseempfängern eingesetzt. Der Eisenkern besteht aus pulverisierten, gesinterten Eisenoxiden, die eine große Permeabilität gewährleisten, wodurch die magnetischen Feldlinien des elektromagnetischen Fernfeldes gut ausgenutzt werden können.

11.4.2 Stabantennen

Für den UKW-Bereich ist die Stabantenne ein Schwingkreis mit $\lambda/4$ -Länge (Viertelwellenstab, 80 cm lang). Da sie sich in Resonanz befindet, wirkt sie rein ohmsch. Der Fußpunktwiderstand beträgt dann, wie wir bereits gesehen haben, $Z_A = R_s \approx 40 \text{ Ohm}$. Für den LW- MW- und KW-Bereich wirkt die Stabantenne kapazitiv, da sie sehr viel kürzer als $\lambda/4$ ist ($l \ll \lambda/4$, siehe auch Abb. 10.6). Als Kompromiss zwischen LMKW und UKW verwendet man eine Stablänge von ca. 90...100 cm. Dadurch ändert sich der Fußpunktwiderstand Z_A zu höheren Werten hin. Auch Autoantennen verhalten sich im UKW-Bereich ohmsch, während sie bei LMKW kapazitiv sind. Für UKW kann Leistungsanpassung vorgenommen werden, während in den LMKW-Bereichen die kapazitiv wirkende Antenne in den Eingangskreis des Empfängers einbezogen wird.

Da die Wellen der Sendebereiche LMK vertikal und diejenigen des UKW-Bereiches horizontal polarisiert sind, liegt auch in der Stabantenne des Autos ein weiterer Kompromiss: Weil der Antennenstab meist senkrecht montiert ist, ergibt sich eigentlich eine falsche Polarisierungsebene. Hier wirkt sich jedoch die Form der Karosserie vorteilhaft aus. Am Bug oder Heck, wo gewöhnlich der Montageplatz der Antenne liegt, werden die UK-Wellen gespiegelt und passen daher ihre Polarisierungsebene an die der Autoantenne an. Die LMK-Wellen bleiben davon unberührt, da ihre Wellenlängen zu groß sind.

11.4.3 Dipolantennen

Abb. 11.12 zeigt zwei verschiedene Dipolantennen. Sie können aus zwei symmetrisch angeordneten $\lambda/4$ -langen offenen Leitungen bestehen, die sich aneinanderfügen, wie in Abb. 11.12a. Dies ist die einfachste Form, der *gestreckte Dipol* als Halbwellendipol oder $\lambda/2$ -Dipol, der als Reihenschwingkreis wirkt und daher einen niedrigen Fußpunktwiderstand von $75 \text{ } \Omega$ hat.

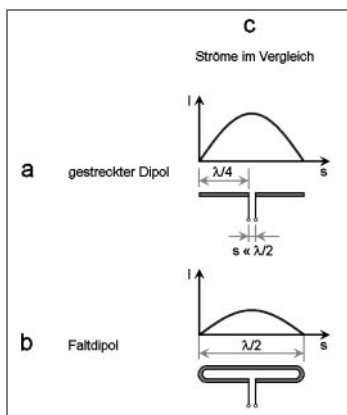


Abb. 11.12: Vergleichende Darstellung von $\lambda/2$ -Dipol-Antennen

Eine zweite Möglichkeit des $\lambda/2$ -Dipols ist der Faltdipol, dessen Gesamtlänge gleich der Wellenlänge λ ist und ebenfalls als Reihenschwingkreis wirkt (Abb. 11.12b). Er wird von derselben Strahlungsleistung des elektromagnetischen Feldes erfasst wie der gestreckte Dipol. Da pro durchstrahlte Fläche nicht mehr Leistung zur Verfügung steht, teilt sich der Antennenstrom I auf

die beiden $\lambda/2$ -Stäbe des Faltdipols auf. Der Strom wird deshalb halbiert auf $I/2$, wie Abb. 11.12c zeigt. Bei gleich bleibender Leistung und halbem Strom vervierfacht sich aber dann der Widerstand, wie wir aus Gleichung 2.21 entnehmen können:

$$P = I^2 \cdot R \quad (2.21).$$

Der Fußpunktwiderstand des Faltdipols beträgt dann $300 \, \Omega$.

Im VHF-Bereich wird meist der $\lambda/2$ -Faltdipol (Halbwellenstrahler) verwendet, während im UHF-Bereich der Ganzwellenstrahler als Spreiz- oder Fächerdipol mit einem Verkürzungsfaktor von $0,7 \dots 0,8$ angewendet wird (Abb. 11.13).

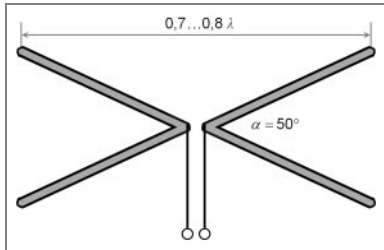


Abb. 11.13: Fächer-Dipol

Dipole haben eine Richtwirkung. Quer zum Dipol ergibt sich eine Achter-Charakteristik, während in Längsrichtung ein zur Längsachse des Dipols konzentrischer Kreis vorliegt (Abb. 11.14).

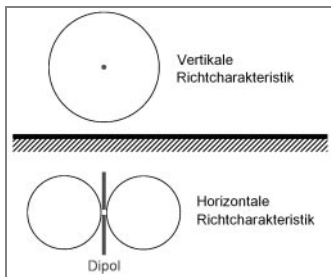


Abb. 11.14: Richtcharakteristik des einfachen Dipols

Die Energie, welche der einfache $\lambda/2$ -Dipol aus dem Empfangsfeld gewinnt, ist die Bezugsgröße, die bei der Betrachtung aller Antennenformen der Dipolantennen zugrunde gelegt wird. Man beschreibt dann dieses Empfangsverhalten der betrachteten Dipolantenne, bezogen auf das Empfangsverhalten des $\lambda/2$ -Dipols und drückt es als *Antennen-Gewinnmaß* $-a_A$ in dB aus. So ergibt sich für den $\lambda/2$ -Dipol $-a_A = 0$ dB.

Da der einfache Dipol horizontal eine achterförmige Richtwirkung hat, ist aus axialer Richtung kein Empfang möglich. Um diesem Problem zu begegnen, wurde der Kreuzdipol entwickelt, der aus zwei gestreckten Dipolen besteht, die elektrisch miteinander verbunden sind. Dadurch wird die horizontale Richtwirkung fast kreisförmig. Man hat aber den Nachteil, dass sich sein Gewinnmaß $-a_A$ auf -3 dB verringert.

11.4.4 Richtantennen

Um einerseits die Richtwirkung und andererseits den Antennen-Gewinn der Dipolantenne zu erhöhen, wurden verschiedene Antennenformen entwickelt, die jeweils auf die vielfältigen Ein-

satzbedingungen abgestimmt sind. Alle diese Antennenformen nutzen das Empfangsfeld besser aus, indem weitere Dipole zu dem eigentlichen Empfangsdipol zugeschaltet werden. Diese Dipole können direkt (die zusätzlichen Dipole sind untereinander und mit der Ableitung durch HF-Leitungen verbunden) oder indirekt (hier handelt es sich um kurzgeschlossene $\lambda/2$ - oder λ -Dipole, als Stäbe oder Gitter) wirken. So ist der Reflektor ein indirekt wirkender Dipol, der dort kurzgeschlossen ist, wo sich am Empfangsdipol die Ableitung befindet. Es ist also ein Metallstab der Länge des Empfangsdipols. Er ist auf der senderabgewandten Seite der Antenne parallel zum Empfangsdipol und im Abstand von dessen Länge montiert. Befindet sich der Sender auf der Seite des Empfangsdipols, so unterstützen sich Sender- und Reflektorstrahlung am Empfangsdipol, denn die Strahlung, die auf den Reflektor auftrifft, wird zum Empfangsdipol gespiegelt (Abb. 11.15).

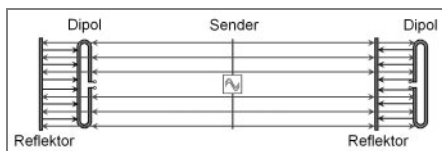


Abb. 11.15: Darstellung der prinzipiellen Wirkungsweise eines Dipols mit Reflektor im Empfangsfeld

Umgekehrt ausgerichtet, sind beide Strahlungen am Empfangsdipol entgegengerichtet und reduzieren sich entsprechend. Eine solche Antenne wird Zweielementantenne genannt, da sie 2 Strahler besitzt. Diese sind miteinander *strahlungsgekoppelt*. Bereits in den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts fand der Japaner Yagi Hidetsugu (1886-1976, japanischer Physiker) dieses Verhalten der Strahlungskopplung heraus. Man nennt deshalb die Antennen, welche nach diesem Prinzip funktionieren, heute *Yagi-Antennen*.

Genau betrachtet, geben die indirekten Strahler ihre Strahlung wie eine Sendeantenne an den sie umgebenden Raum ab, strahlen also nur einen Teil auch in die Richtung des Empfangsdipols. Aus diesem Grunde wird die Empfangsenergie nicht etwa verdoppelt, sondern erhöht sich nur geringfügig. Immerhin kann man mit einer Mehrzahl von indirekten Strahlern, die in Reflektoren (hinter dem Empfangsdipol angeordnet) und Direktoren (vor dem Empfangsdipol angeordnet) eingeteilt werden, Mehrelementantennen herstellen, die ein Antennen-Gewinnmaß $-a_A$ von weit über 10 dB erreichen.

Der Abstand zwischen Reflektor und Empfangsdipol und die Länge des Reflektors bestimmen die Richtwirkung der Reflektorantenne. Ebenso wirken sich Länge, Anzahl und Abstand der Direktorstäbe auf die Richtcharakteristik der Yagi-Antenne aus. Der Abstand der Stäbe untereinander und zu dem Empfangsdipol, der auch unterschiedlich sein kann, gibt der Antenne eine gewisse Bandbreite. So unterscheidet man zwischen Kanal- und Bereichsantennen, je nach ihrer Bauform.

Abb. 11.16 zeigt eine Tabelle, in der einige Antennentypen mit ihren Kenngrößen: Richtcharakteristik, Gewinnmaß, Vor-Rückverhältnis und Öffnungswinkel (horizontal und vertikal) dargestellt sind.

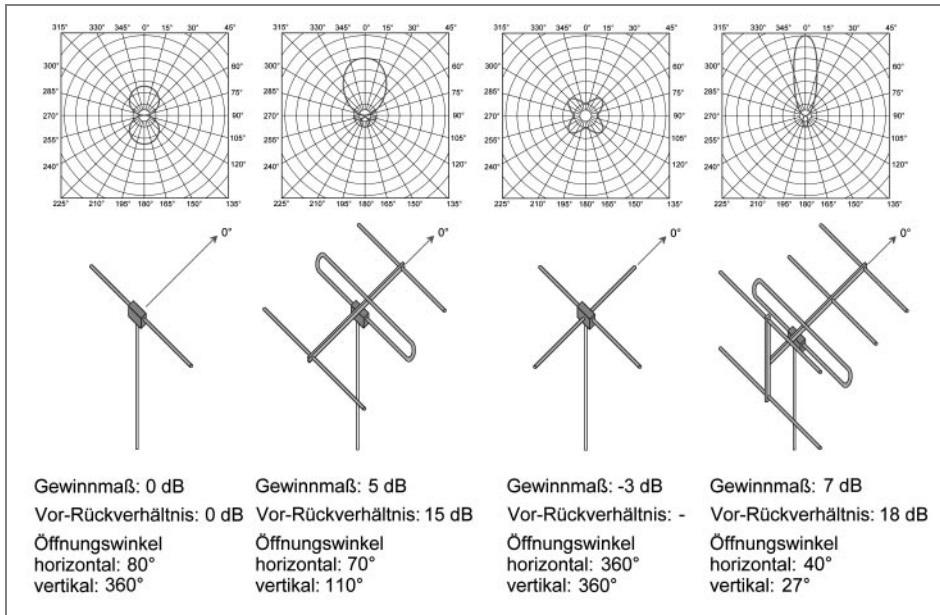


Abb. 11.16: Darstellung der Kenngrößen einiger Antennentypen

Richtcharakteristiken

Die Richtcharakteristik einer Antenne lässt sich in einem Diagramm darstellen. Richt-Antennen haben in Vorzugsrichtung eine größere Empfindlichkeit, was die Keulenform des Diagramms zeigt. Ein Beispiel ist die 5-Elemente-Antenne von Abb. 11.16. Die hier gezeigten Diagramme sind örtlich verlaufende Kurven, die bei horizontal polarisierten Empfangsfeldern entsprechend der Antennenausrichtung von oben zu betrachten sind. Sie sind also von oben auf die Antenne gesehen entstanden.

Diese Kurven werden aufgenommen, indem die Antenne in einem Empfangsfeld konstanter Feldstärke um 360° gedreht wird. Dabei wird die sich ergebende Antennenspannung in Abhängigkeit zur Winkelstellung ermittelt. Die so aufgenommenen Messwerte werden in ein Polarkoordinatensystem eingetragen und die Punkte miteinander zu den dargestellten Kurven verbunden. Die Richtwirkung der Antenne ist von großer Bedeutung, wenn unliebsame Sendesignale aus einer anderen Richtung als 0° ausgeblendet werden müssen, z. B. Reflexionen durch Gebäude und Berge. Eigentlich muss man sich solche Diagramme räumlich vorstellen. Der vertikale Anteil der *Richtkeule* ist im Gegensatz zu dem gezeigten horizontalen meist nicht von besonderer Bedeutung, da Sender und Empfänger nur einen geringen Erhebungswinkel vom Erdboden haben und dadurch auch die topographischen Strukturen für Reflexionen praktisch in einer Linie mit dem Horizont liegen. Die 3-Elemente-Yagi-Antenne hat einen etwas breiteren und kürzeren Anteil der horizontalen Richtkeule. Der Kreuzdipol ist ein Rundstrahler und hat eine fast quadratische Richtcharakteristik, während der einfache gestreckte Dipol praktisch in horizontaler Richtung Achter-Charakteristik aufweist.

Die Richtkeule sagt auch etwas über das Vor-Rück-Verhältnis einer Antenne aus. Wie wir bereits in Abb. 11.15 gesehen haben, empfängt die Richtantenne bevorzugt aus einer Richtung (0°). Die rückwärtige Richtung lässt eine je nach Bauform erheblich geringere Antennenspannung entstehen. Das Vor-Rück-Verhältnis ist definiert als das Verhältnis der Antennenspannung in Vorwärtsrichtung (0°), wenn die Antenne also auf einen Sender definiert ausgerichtet ist, zu der

Antennenspannung in Rückwärtsrichtung (180°), die Antenne also am selben Platz um 180° gedreht ist. Dieses Verhältnis wird ebenfalls in dB angegeben.

Die Richtkeule zeigt auch den sogenannten Öffnungswinkel der Antenne an, wobei meist der horizontale von Bedeutung ist. Der horizontale Öffnungswinkel gibt den Winkelbereich an, in dem die 0° -Achse der Antenne aus der optimalen Richtung zum Sender nach beiden Seiten abweichen kann, ohne die -3 dB-Marke der Antennenspannung zu unterschreiten. Die Antenne sollte also innerhalb dieses Winkels genau auf den Sender ausgerichtet werden.

Die Parabolantenne

Der SHF-Bereich zwischen 10,7 GHz und 11,7 GHz (Low-Band, analoge TV-Übertragung) und 11,7 GHz und 12,75 GHz (High-Band, digitale TV-Übertragung) ist für den Satelliten-Funk vorgesehen. Dem Empfang von superhohen Frequenzen (SHF) liegen schon die Gesetze der Ausbreitung des Lichtes zugrunde, denn bei einer Wellenlänge von ca. 3 cm werfen selbst kleine Hindernisse bereits einen *Schatten*. In diesem Frequenzbereich kann ein Empfang mit der Yagi-Antenne nicht mehr realisiert werden, da ihre Abmessungen zu klein wären. Man verwendet deshalb eine *Parabol-Antenne*, die wie ein Spiegel (Reflektor) für die Funkwellen wirkt und diese auf die eigentliche Antenne reflektiert, die im Brennpunkt des metallenen Parabolspiegels sitzt. Diese Antenne, das sogenannte *Speisehorn* mit dem *Konverter* (LNC = Low Noise Converter) oder LNB (Low Noise Block Converter), empfängt das gebündelte Signal und setzt es in Verbindung mit der Oszillatorfrequenz von 9,75 GHz in den für den Satellitenempfang bereitgehaltenen UHF-Bereich von 950 MHz ... 2050 MHz um.

Heute werden meist sogenannte Offset-Parabolantennen verwendet. Es handelt sich praktisch um eine »halbe« Parabolantenne, die eine asymmetrische Form hat (Abb. 11.17). Der Vorteil liegt darin, dass sie fast senkrecht montiert werden kann und dadurch keine Auflagerungen zulässt, wie Schnee und Schmutz, die den Empfang erheblich beeinträchtigen würden. Der LNB scheint bei diesem Antennentyp aus dem Brennpunkt geschoben zu sein.

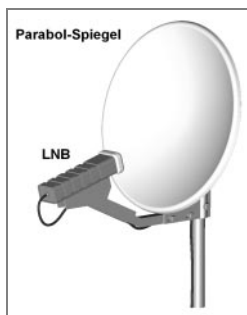


Abb. 11.17: Offset-Parabolantenne

Die Parabolantenne erreicht einen erheblich höheren Antennengewinn gegenüber der Yagi-Antenne bei vertretbaren Abmessungen. Bei einem Durchmesser von 10 Wellenlängen, also 30 cm, kommt das Antennengewinnmaß $-a_A$ bereits auf 30 dB. Bei einer 1,50-m-Schüssel kommt man auf ein Gewinnmaß $-a_A = 43$ dB.

Wegen des Skineffektes lässt sich die hohe Empfangsfrequenz von 10,7 GHz...12,75 GHz nicht mehr über Koaxialleitungen übertragen. Man verwendet sogenannte *Hohlleiter*. Diese Hohlleiter sind rechteckig und haben bei 10 GHz eine Breite von 2,54 cm und eine Höhe von 1,27 cm.

Damit der Aufwand nicht für eine Signalableitung von der Antenne zum Empfangsgerät realisiert werden muss, werden die vom Parabolspiegel reflektierten Wellen nur in die Antenne gespiegelt und unmittelbar räumlich anschließend in dem Konverter weiterverarbeitet. Dieser LNB arbeitet,

wie sein Name bereits sagt, extrem rauscharm, was vor allem durch seinen Vorverstärker erreicht wird. Dieser verstärkt um den Faktor $A_v \approx 6$. Ein anschließendes Filter legt die Bandgrenzen fest und sorgt für die *Spiegelfestigkeit* (siehe Kapitel 13). Durch Mischen mit einem 9,75 GHz-Oszillator-Signal wird das Empfangssignal auf den besagten Frequenzbereich von 950 bis 2050 MHz umgesetzt und steht nach Passieren eines ZF-Filters mit Verstärker für die Ableitung über Koaxialkabel bis zum Satelliten-Empfänger zur Verfügung.

Erläuterung der verwendeten Formelzeichen

λ = Wellenlänge in m

$-a_A$ = Antennen-Gewinnmaß in dB

I = Strom in A

P = Leistung in W

R = Widerstand in Ω

Z_A = Fußpunktwiderstand der Antenne in Ω

11.5 Aufgabenkatalog

11.5.1 Ungebundene Aufgaben

1. Worin unterscheiden sich prinzipiell Schallwellen und elektromagnetische Wellen? Erläutern Sie die Zusammenhänge.
2. Wie berechnet sich die Wellenlänge einer elektromagnetischen Schwingung im Raum?
3. Erläutern Sie den prinzipiellen Unterschied zwischen Nahfeld und Fernfeld einer Sendeantenne.
4. Wie kommt es zu der Abstrahlung von Wirkenergie von der Sendeantenne? Erläutern Sie die Zusammenhänge anhand des elektrischen Feldes.
5. Wie sind die Ausbreitungseigenschaften des Fernfeldes? Beschreiben Sie die Kriterien hinsichtlich der Bildung von Raum- und Bodenwelle bei den unterschiedlichen Wellenbereichen des elektromagnetischen Feldes.
6. Was versteht man unter Polarisation und Richtstrahlung bei Antennen? Erläutern Sie die Zusammenhänge anhand der Abb. 11.8...11.10.
7. Was bedeuten die Begriffe effektive Antennenhöhe, Strahlungsleistung und Strahlungswiderstand? Erläutern sie die Gesetzmäßigkeiten unter Verwendung einer Beispielrechnung für die $\lambda/4$ -Antenne.
8. Welche charakteristischen Merkmale besitzen Ferrit-, Stab- und Dipolantennen?
9. Welche Gesetzmäßigkeiten sind im Hinblick auf die Richtwirkung von Empfangsantennen zu beachten? Erläutern Sie die Funktionsweise der Yagi-Antenne anhand der Abb. 11.15 und 11.16.
10. Wie arbeitet eine Parabol-Empfangsantenne? Erläutern Sie die Zusammenhänge, die beim Empfang der elektromagnetischen Wellen im SHF-Bereich von Bedeutung sind.

11.5.2 Multiple-Choice-Aufgaben

1. Welche der angegebenen Schwingungen gehört nicht zum elektromagnetischen Spektrum?
 1. Licht
 2. Schall
 3. UKW
 4. Röntgenstrahlung
 5. Infrarotstrahlung
2. Welche der folgenden Behauptungen hinsichtlich der Eigenschaften elektromagnetischer Schwingungen ist richtig?
 1. Alle elektromagnetischen Schwingungen breiten sich mit der Geschwindigkeit von 333 m/s im Raum aus.
 2. Die Wellenlänge der elektromagnetischen Schwingungen lässt sich nach der Gleichung $\lambda = c \cdot f$ berechnen.
 3. Zu den elektromagnetischen Schwingungen, die sich im leeren Raum ausbreiten können, gehören alle Strahlungen des elektromagnetischen Spektrums, von den Längstwellen über die Radiowellen, Infrarotstrahlung, das sichtbare Licht, die Ultraviolettstrahlung, die Röntgenstrahlung, die Gammastrahlung bis hin zur kosmischen Strahlung.
 4. Die Frequenz der elektromagnetischen Schwingungen lässt sich nach der Gleichung $f = c \cdot \lambda$ berechnen.
 5. Man spricht bei den elektromagnetischen Wellen von Längswellen (Longitudinal-Wellen).
3. Welche Aussage bezüglich der Abstrahlung von HF-Energie ist falsch?
 1. Die Abstrahlung der Hochfrequenz erfolgt über eine Sendeantenne.
 2. In unmittelbarer Umgebung der Antenne sind magnetisches und elektrisches Feld ebenso wie Spannung und Strom zeitlich um 90° phasenverschoben. Das Gesamtfeld enthält also keine Wirkenergie.
 3. Die elektrische Feldstärke E nimmt mit der 3. Potenz der Entfernung vom Ort der Entstehung ab: $E_N \sim 1/r^3$.
 4. Die magnetische Feldstärke H nimmt mit der 2. Potenz der Entfernung vom Ort der Entstehung ab: $H_N \sim 1/r^2$.
 5. Wird ein Sendedipol mit HF-Energie seiner Eigenfrequenz f_0 erregt, so entsteht nur ein hochfrequentes Fernfeld.
4. Welche Aussage über die Wirkungsweise einer Sendeantenne ist richtig?
 1. Eine gestreckte $\lambda/2$ -Dipolantenne hat an ihren Enden Strommaximum.
 2. Die Einspeisung der HF-Energie in eine Dipolantenne kann durch Stromspeisung geschehen, dann wird in der Mitte, im Bereich des Spannungsbauches ein HF-Strom eingekoppelt.
 3. Das magnetische und das elektrische Feld einer Antenne entweichen unabhängig voneinander mit Lichtgeschwindigkeit in die Unendlichkeit des Raumes.
 4. Die beiden Komponenten des Fernfeldes H_F und E_F nehmen in ihrer Energie im Gegensatz zum Nahfeld nur noch linear mit dem Abstand ab.

5. Die Nahfeldenergie einer Sendeantenne wird Strahlungsenergie genannt.
5. Was kann über das von der Sendeantenne abgestrahlte Fernfeld nicht ausgesagt werden?
 1. Das Fernfeld einer Sendeantenne lässt sich hinsichtlich seines Ausbreitungscharakters in 2 Komponenten einteilen, in die Bodenwellen und die Raumwellen.
 2. Im Langwellenbereich liegt die Reichweite der Bodenwelle bei ca. 1000 km, im Mittelwellenbereich reduziert sie sich auf ca. 300 km. Für Kurzwelle kommt noch in 100 km Abstand vom Sender eine wirksame Bodenwelle an.
 3. Kürzere Wellen als Kurzwelle haben wegen der zunehmenden Dämpfung der Bodenwellen keine wirksame Reichweite dieser Komponente mehr.
 4. Die Heaviside-Schicht kann die Raumwellen von UHF-, SHF- und EHF-Sendern gut reflektieren.
 5. Für Mittel- und Kurzwelle besteht in einem bestimmten Bereich unserer Atmosphäre eine gute Reflexionseigenschaft bei geringer Dämpfung.
6. Was versteht man beim Empfang von Kurzwellensendern unter dem Begriff »Fading«?
 1. Das Schwanken der Empfangsfeldstärke.
 2. Das Unterdrücken von Empfangsstörungen.
 3. Das Pfeifen beim Empfang sich überlagernder Sender.
 4. Das Verzerren der Toninformation bei zu großen Feldstärken.
 5. Das Aussetzen eines Empfängers im NF-Teil (mute).
7. Welche der folgenden Aussagen zum Begriff »Antenne« ist falsch?
 1. Das Wort »Antenne« stammt ursprünglich aus der Insektenkunde und bedeutet »Fühler«.
 2. Bei einer vorgegebenen Empfangsfeldstärke ist die Antenne in ihrer Beschaffenheit und Ausföhrung entscheidend für die Höhe der Empfangsspannung, die dem Empfänger zugeföhrt werden kann.
 3. Unter Antennenhöhe versteht man die Erhebung in m, auf der die Antenne vom Erdboden aus gemessen steht.
 4. Die kleinste Antenne ist der $\lambda/4$ -Stab, der einseitig geerdet ist und von dem italienischen Physiker Marconi erstmals als Antenne verwendet wurde.
 5. Die Sendeantennen der MW- und KW-Sender sind senkrecht aufgerichtet, sodass sich auch ein senkrecht gerichtetes Strahlungsfeld der elektrischen Fernfeldkomponente ergibt.
8. Welche Behauptung lässt sich in Bezug auf die elektrischen Größen einer Antenne nicht aufstellen?
 1. Die Strahlungsleistung der Antenne ist Wirkleistung, die sich an einem virtuellen (virtuell = scheinbar) Wirkwiderstand umsetzt.
 2. Eine $\lambda/2$ -Dipolantenne hat eine kugelförmige Richtwirkung.
 3. Die $\lambda/4$ -Stabantenne ist praktisch ein asymmetrischer Dipol.
 4. Für eine $\lambda/4$ -Antenne (Marconi-Antenne) gilt die effektive Antennenhöhe: $h_{\text{eff}} = 2h/\pi$.
 5. Der Strahlungswiderstand R_s einer $\lambda/4$ -Antenne ist unabhängig von der Wellenlänge λ .

9. Welche Aussage zu Ferritantennen ist richtig?
 1. Die Ferritantennen nehmen eine Sonderstellung ein, da sie nur die elektrische Komponente des elektromagnetischen Empfangsfeldes ausnutzen.
 2. Die Ferritantennen nehmen eine Sonderstellung ein, da sie nur die magnetische Komponente des elektromagnetischen Empfangsfeldes ausnutzen.
 3. Man gewinnt die größte Empfangsspannung in der Ferritantenne, wenn diese parallel zur Sendeantenne angeordnet wird.
 4. Ferritantennen werden bis zu einer Frequenz von ca. 200 MHz in Heimempfängern oder Reiseempfängern eingesetzt.
 5. Der Eisenkern besteht aus pulverisierten, gesinterten Eisenoxiden, die eine große Permeabilität gewährleisten, wodurch die elektrischen Feldlinien des elektromagnetischen Fernfeldes gut ausgenutzt werden können.
10. Welche Aussage zu Stabantennen ist richtig?
 1. Für den UKW-Bereich ist die Autoantenne als Ganzwellenstab (80 cm lang) ein Schwingkreis mit λ -Länge.
 2. Der Fußpunktwiderstand beträgt Z_A ca. 400 Ohm.
 3. Für den LW- MW- und KW-Bereich wirkt die Stabantenne kapazitiv, da sie sehr viel kürzer als $\lambda/4$ ist ($l \ll \lambda/4$).
 4. Autoantennen verhalten sich im UKW-Bereich kapazitiv, während sie bei LMKW induktiv sind.
 5. Für UKW wird die kapazitiv wirkende Autoantenne in den Eingangskreis des Empfängers einbezogen, während in den LMKW-Bereichen Leistungsanpassung herrscht.
11. Welche Aussage zu Dipolantennen ist richtig?
 1. Dipolantennen können aus 2 symmetrisch angeordneten $\lambda/4$ -langen offenen Leitungen bestehen, die sich aneinanderfügen (gestreckter Dipol, Halbwellendipol oder $\lambda/2$ -Dipol bezeichnet), einen Reihenschwingkreis bilden und daher einen niedrigen Fußpunkt-widerstand von 75Ω haben.
 2. Der Faltdipol hat eine Gesamtlänge von λ und wirkt als Parallelschwingkreis.
 3. Der Fußpunkt-widerstand des Faltdipols beträgt 30Ω .
 4. Im UHF-Bereich wird meist der $\lambda/2$ -Faltdipol (Halbwellenstrahler) verwendet, während im VHF-Bereich der Ganzwellenstrahler als Spreiz- oder Fächerdipol mit einem Verkürzungsfaktor von 0,7...0,8 angewendet wird.
 5. Die Energie, welche der einfache λ -Dipol aus dem Empfangsfeld gewinnt, ist die Bezugsgröße, die bei der Betrachtung aller Antennenformen der Dipolantennen zugrunde gelegt wird.
12. Welche Aussage zu Richtantennen ist falsch?
 1. Richtantennen nutzen das Empfangsfeld besser aus, indem weitere Dipole zu dem eigentlichen Empfangsdipol zugeschaltet werden.
 2. Die Dipole von Richtantennen können direkt (die zusätzlichen Dipole sind untereinander und mit der Ableitung durch HF-Leitungen verbunden) oder indirekt (hier handelt es sich um kurzgeschlossene $\lambda/2$ - oder λ -Dipole, als Stäbe oder Gitter) wirken.

3. Der Reflektor einer Yagi-Antenne ist ein indirekt wirkender Dipol, der dort kurzgeschlossen ist, wo sich am Empfangsdipol die Ableitung befindet.
 4. Eine Antenne wird Zweielementantenne genannt, wenn sie 2 Strahler besitzt, die miteinander strahlungsgekoppelt sind.
 5. Man kann mit einer Mehrzahl von indirekten Strahlern, die in Reflektoren (hinter dem Empfangsdipol angeordnet) und Direktoren (vor dem Empfangsdipol angeordnet) eingeteilt werden, Mehrelementantennen herstellen, die ein Antennen-Gewinnmaß $-a$ von weit über 100 dB erreichen.
13. Welche der nachstehenden Aussagen zu Richtantennen ist falsch?
1. Der Abstand zwischen Reflektor und Empfangsdipol und die Länge des Reflektors bestimmen die Richtwirkung der Reflektorantenne.
 2. Man unterscheidet bei den Yagi-Antennen zwischen Kanal- und Bereichsantennen, je nach ihrer Bauform.
 3. Die Richt-Antenne hat in Vorzugsrichtung eine geringere Empfindlichkeit.
 4. Die Richtwirkung der Antenne ist von großer Bedeutung, wenn unliebsame Sendesignale aus einer anderen Richtung als 0° ausgeblendet werden müssen, z. B. Reflexionen durch Gebäude und Berge.
 5. Das Vor-Rück-Verhältnis ist definiert als das Verhältnis der Antennenspannung in Vorwärtsrichtung (0°), wenn die Antenne also auf einen Sender definiert ausgerichtet ist, zu der Antennenspannung in Rückwärtsrichtung (180°), die Antenne also am selben Platz um 180° gedreht ist.
14. Welche Aussage zu Übertragung und Empfang von SHF-Signalen ist falsch?
1. Dem Empfang von superhohen Frequenzen (SHF) liegen schon die Gesetze der Ausbreitung des Lichtes zugrunde, denn bei einer Wellenlänge von ca. 3 cm werfen selbst kleine Hindernisse bereits einen *Schatten*.
 2. Im SHF-Bereich kann ein Empfang vor allem mit der Yagi-Antenne realisiert werden.
 3. Das Speisehorn mit dem Konverter (LNC = Low Noise Converter) oder LNB (Breitband Konverter), empfängt das gebündelte Signal und setzt es in Verbindung mit der Oszillatorfrequenz von 9,75 GHz in den für den Satellitenempfang bereitgehaltenen UHF-Bereich von 950 MHz ...2050 MHz um.
 4. Zum Empfang im SHF-Bereich verwendet man eine Parabol-Antenne, die wie ein Spiegel (Reflektor) für die Funkwellen wirkt und diese auf die eigentliche Antenne reflektiert, die im Brennpunkt des metallenen Parabol-Spiegels sitzt.
 5. Heute werden meist sogenannte Offset-Parabolantennen verwendet, praktisch halbe Parabolantennen, die eine asymmetrische Form haben.
15. Welche Aussage ist bezüglich der Parabolantenne mit dem Speisehorn falsch?
1. Die Parabolantenne erreicht bei vertretbaren Abmessungen einen erheblich höheren Antennengewinn als die Yagi-Antenne.
 2. Der Hohlleiter des Speisehorns ist rechteckig und hat bei 10 GHz eine Breite von 2,54 cm und eine Höhe von 1,27 cm.
 3. Wegen des Skineffektes lässt sich die hohe Empfangsfrequenz von 10,7 bis 12,75 GHz nicht mehr über Koaxialleitungen übertragen.

4. Bei einem Durchmesser von 10 Wellenlängen, also 30 cm, kommt das Antennengewinnmaß $-a_A$ bereits auf 130 dB.
5. Durch Mischen mit einem 9,75 GHz-Oszillator Signal wird das Empfangssignal auf den Frequenzbereich von 950 MHz ... 2050 MHz umgesetzt und steht nach Passieren eines ZF Filters mit Verstärker für die Ableitung über Koaxialkabel bis zum Satelliten-Empfänger zur Verfügung.

Lösungen zu den Multiple-Choice-Aufgaben:

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Lösung	2	3	5	4	4	1	3	2	2	3	1	5	3	2	4

12 Modulationsarten

12.1 Allgemeines

Wenn Nachrichten über weite Strecken geführt werden müssen, ob sie durch Leitungen geschickt oder drahtlos übermittelt werden sollen, kann die Signalübertragung nur mit Hilfe einer Trägerfrequenz erfolgen, der die Information zum Transport aufgebürdet wird. Am Empfangsort hat der Träger ausgedient und die Information wird wieder rückgewonnen. Dieses technische Verfahren wird mit *Modulation* und *Demodulation* bezeichnet. Zwei Gründe, warum diese Technik notwendig ist:

- Es müssen viele unterschiedliche Informationen gleichzeitig übertragen werden können, ohne dass gegenseitige Störungen auftreten.
- Durch geeignete Wahl der Frequenz des Trägers und des Modulationsverfahrens kann der Aufwand bei der Überbrückung großer Strecken gering gehalten werden.

Wir wollen nun die in der Unterhaltungselektronik wesentlichsten Modulationsarten kennen lernen.

12.2 Amplitudenmodulation (AM)

Das AM-Prinzip besteht in der Amplitudenänderung des Trägersignals im Takte der Informationsfrequenz (z. B. Tonsignal). Trägt man das AM-Signal in seinem zeitlichen Verlauf in einem Diagramm auf, so sieht man Einschnürungen und Dehnungen der Trägeramplitude entsprechend dem zeitlichen Verlauf des Tonsignals (*Abb. 12.1*).

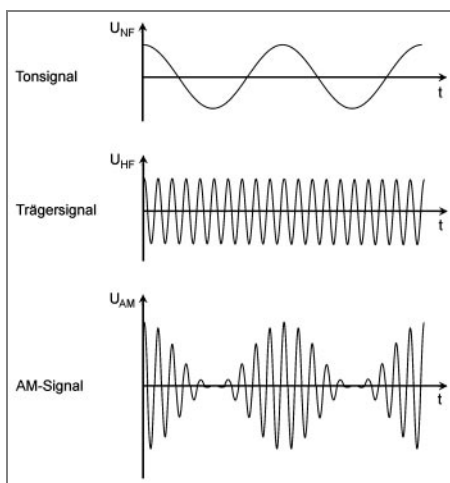


Abb. 12.1: AM-Signal aus Ton- und Trägersignal gebildet

Laute Töne führen zu tiefen Einschnürungen und starken Dehnungen der Trägeramplituden und bei hohen Tönen folgen Einschnürungen und Dehnungen dicht aufeinander. Daraus kann man

erkennen, dass der Betrag der Amplitudenänderung für die Lautstärke (NF-Amplitude) und die Frequenz der Änderung für die Tonhöhe (NF-Frequenz) des zu übertragenden Tonsignals maßgebend sind.

Das Verhältnis $\hat{u}_{\text{NF}}/\hat{u}_{\text{HF}}$ wird *Modulationsgrad* m genannt.

$$m = \frac{\hat{u}_{\text{NF}}}{\hat{u}_{\text{HF}}} \quad (12.1).$$

12.2.1 Zusammensetzung des AM-Signals

Das Summensignal

Um das AM-Signal zu erhalten, sind zwei wesentliche Schritte erforderlich:

1. Addition der beiden Signale U_{NF} und U_{HF}
2. Modulation des Summensignals

Das Summensignal aus Träger- und Tonsignal erhalten wir durch die Schaltung in Abb. 12.2.

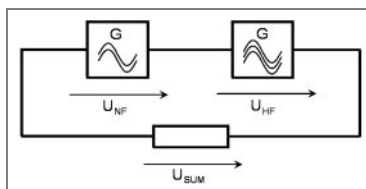


Abb. 12.2: Addition von NF- und HF-Signal

Die Augenblickswerte der beiden Spannungen U_{NF} und U_{HF} addieren sich in ihrer zeitlichen Folge, und es entsteht das Liniendiagramm U_{SUM} . Dieses Summensignal lässt sich über eine Weiche wieder in die beiden Bestandteile U_{NF} und U_{HF} trennen, denn es enthält ja nur die beiden addierten Komponenten U_{NF} und U_{HF} . Das typische Merkmal des Signals U_{SUM} im Liniendiagramm, wenn das Trägersignal mindestens eine um den Faktor 10 höhere Frequenz als das Tonsignal hat, ist in Abb. 12.3 dargestellt.

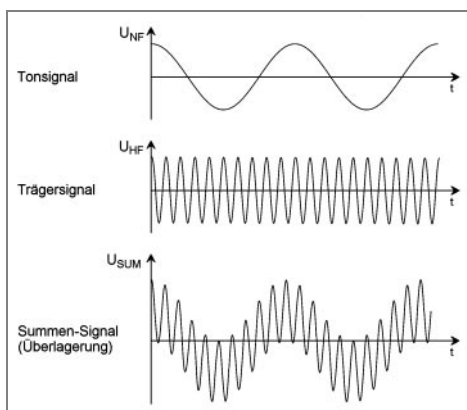


Abb. 12.3: Darstellung von Ton-, Träger- und Summensignal in zeitlicher Übereinstimmung

Man erkennt, dass die positive Hüllkurve des Summensignals mit der negativen in Phase ist. Das Signal U_{SUM} wird auch *Überlagerung* (U_{HF} und U_{NF} überlagern sich) genannt, eine andere Bezeichnung für Addition.

Das AM-Signal

Erst wenn das Summensignal U_{SUM} auf einen Modulator gegeben wird, entstehen zwei weitere Frequenzen, die sogenannten Seitenbandfrequenzen (Abb. 12.4):

- Unteres Seitenbandsignal der Kreisfrequenz $\Omega - \omega$ (Ω ist die Kreisfrequenz des Trägersignals, ω ist die Kreisfrequenz des Tonsignals)
- Oberes Seitenbandsignal der Kreisfrequenz $\Omega + \omega$

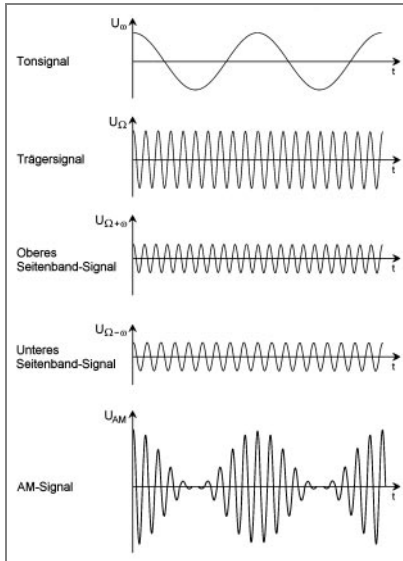


Abb. 12.4: Darstellung von Ton-, Träger-, und AM-Signal mit den beiden Seitenband-Signalen in zeitlicher Übereinstimmung

Das komplette AM-Signal setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Trägersignal der Kreisfrequenz Ω
- Unteres Seitenbandsignal der Kreisfrequenz $\Omega - \omega$
- Oberes Seitenbandsignal der Kreisfrequenz $\Omega + \omega$

Im AM-Signal ist das Tonsignal direkt nicht enthalten. Lediglich der Abstand der beiden Seitenbandfrequenzen von der Frequenz des Trägers deutet darauf hin, dass das Tonsignal noch vorhanden sein muss. Ein Trennen des Tonsignals vom AM-Signal ist nur noch über Demodulation möglich, wie wir noch sehen werden.

Das AM-Signal lässt sich auch als Augenblicksspannung in einem Zeigerdiagramm mit drei Zeigern darstellen (Abb. 12.5).

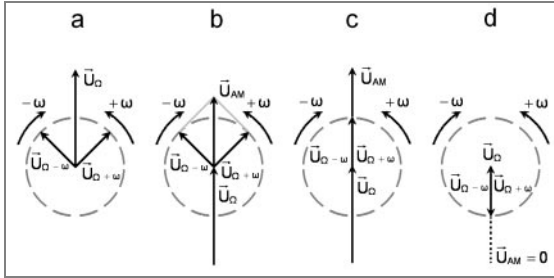


Abb. 12.5: Zeigerdiagramme des AM-Signals

Der erste Zeiger ist der Trägerspannung \vec{U}_Ω zugeordnet, die beiden anderen bezeichnen die Seitenbänder $\vec{U}_{\Omega-\omega}$ und $\vec{U}_{\Omega+\omega}$. Denkt man sich den Zeiger \vec{U}_Ω mit der Kreisfrequenz Ω drehend, und könnte man ihn immer in konstanter Lage, z. B. bei 90° fotografieren, so erschiene er in dieser Position auf den einzelnen Bildern feststehend, während die beiden Zeiger $\vec{U}_{\Omega-\omega}$ und $\vec{U}_{\Omega+\omega}$ sich dann gegeneinander mit der Kreisfrequenz $-\omega$ bzw. $+\omega$ drehen würden. In Abb. 12.5 sind die Zeiger im selben Drehpunkt (Abb. 12.5a) und in Abb. 12.5b in der üblichen Darstellungsweise abgebildet. Bilder Abb. 12.5c und Abb. 12.5d zeigen zwei mögliche extreme Augenblickswerte, einmal dann, wenn die Seitenbandspannungen mit dem Träger in Phase sind und einmal, wenn sie gegenphasig zum Träger liegen. Für den ersten Fall addieren sich alle Teilspannungen zum größtmöglichen Zeigerwert $\vec{U}_{AM\max}$, das ist beim Modulationsgrad $m = 1$ (entspricht 100%), wie in den Liniendiagrammen von Abb. 12.4 zu sehen ist, die doppelte Trägeramplitude. Für den zweiten Fall heben sich alle Augenblickswerte bei $m = 1$ auf. Es resultiert der Zeigerwert $\vec{U}_{AM\min} = 0$.

Berechnung der Komponenten

Das Tonsignal hat den Scheitelwert \hat{u}_{NF} und den Augenblickswert der Spannung:

$$u_{NF} = \hat{u}_{NF} \cdot \cos(\omega t) \quad (12.2).$$

Der Träger in unmoduliertem Zustand (konstante Amplitude) hat den Scheitelwert der Spannung \hat{u}_{HF} und den Augenblickswert:

$$u_{HF} = \hat{u}_{HF} \cdot \cos(\Omega t) \quad (12.3).$$

Der Scheitelwert des modulierten Trägers in seinem zeitlichen Verlauf (Abb. 12.4) ist die Addition aus dem Scheitelwert der Trägerspannung \hat{u}_{HF} und dem jeweiligen Augenblickswert der Tonsignalspannung u_{NF} :

$$u_{HF}(t) = \hat{u}_{HF} + \hat{u}_{NF} \cdot \cos(\omega t) \quad (12.4).$$

Für den amplitudenmodulierten Träger gilt dann der Augenblickswert:

$$u_{am} = \hat{u}_{HF}(t) \cdot \cos(\Omega t) \quad (12.5).$$

Setzt man Gleichung 12.4 in 12.5 ein, so erhält man:

$$u_{am} = [\hat{u}_{HF} + \hat{u}_{NF} \cdot \cos(\omega t)] \cdot \cos(\Omega t) \quad (12.6).$$

Durch Ausklammern von \hat{u}_{HF} erhalten wir:

$$u_{am} = \hat{u}_{HF} \cdot \cos(\Omega t) \cdot \left[1 + \frac{\hat{u}_{NF}}{\hat{u}_{HF}} \cdot \cos(\omega t)\right] \quad (12.7).$$

Das Verhältnis $\hat{u}_{NF}/\hat{u}_{HF}$ ist der bereits bekannte Modulationsgrad m (Gleichung 12.1). Wenn wir diese Gleichung in Gleichung 12.7 einsetzen, erhalten wir:

$$u_{\text{am}} = \hat{u}_{\text{HF}} \cdot \cos(\Omega t) \cdot [1 + m \cdot \cos(\omega t)] \quad (12.8).$$

Multipliziert man nun wieder aus, so wird aus Gleichung 12.8:

$$u_{\text{am}} = \hat{u}_{\text{HF}} \cdot \cos(\Omega t) + \hat{u}_{\text{HF}} \cdot m \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\Omega t) \quad (12.9).$$

Diese Gleichung lässt sich nach den Additionstheoremen, deren Ableitung den Rahmen unserer Betrachtung sprengen würde, folgendermaßen schreiben:

$$u_{\text{am}} = \hat{u}_{\text{HF}} \cdot \cos(\Omega t) + \hat{u}_{\text{HF}} \cdot \frac{m}{2} \cdot \cos[(\Omega + \omega)t] + \hat{u}_{\text{HF}} \cdot \frac{m}{2} \cdot \cos[(\Omega - \omega)t] \quad (12.10).$$

Gleichung 12.10, die mit Gleichung 12.9 mathematisch identisch ist, zeigt, dass die Spannung u_{am} in 3 Teile zerlegt werden kann:

$$1. \hat{u}_{\text{HF}} \cdot \cos(\Omega t) \quad (\text{Trägerspannung})$$

$$2. \hat{u}_{\text{HF}} \cdot \frac{m}{2} \cdot \cos[(\Omega + \omega)t] \quad (\text{obere Seitenbandspannung})$$

$$3. \hat{u}_{\text{HF}} \cdot \frac{m}{2} \cdot \cos[(\Omega - \omega)t] \quad (\text{untere Seitenbandspannung})$$

Es stellen sich also 3 Frequenzen ein:

1. Ω (Trägerkreisfrequenz)
2. $\Omega + \omega$ (obere Seitenbandkreisfrequenz)
3. $\Omega - \omega$ (untere Seitenbandkreisfrequenz)

Diese Frequenzen kann man nun im Spannungs-Frequenz-Diagramm darstellen. Da in den Diagrammen von Abb. 12.4 und 12.5 der Modulationsgrad $m = 1$ beträgt, haben die Seitenbandspannungen die halbe Amplitude bzw. Zeigerlänge der Trägerspannung.

Für unser Beispiel ergibt sich deshalb ein einfaches Frequenzspektrum der vier Frequenzen, die durch Modulation der NF (Kreisfrequenz ω) mit der HF (Kreisfrequenz Ω) nach dem Modulationsvorgang vorliegen, wie in Abb. 12.6 dargestellt.

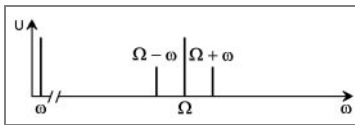


Abb. 12.6: Frequenzspektrum des AM-Signals mit dem NF-Signal

In der Regel liegt der HF-Anteil des Modulationsproduktes (Träger und Seitenbänder) im Spektrum weit von der NF entfernt, sodass er durch einfache Schaltungsmaßnahmen von der NF getrennt werden kann.

12.2.2 Der Modulationsvorgang am einfachen AM-Modulator

Nachdem wir den Aufbau des AM-Signals kennen gelernt haben, wollen wir uns nun mit dem eigentlichen Modulationsvorgang anhand von Beispielen befassen. Schauen wir uns nochmals den Spannungsverlauf von U_{SUM} (Abb. 12.3) an. Dieser Spannungsverlauf ist noch keine Modulation. Führen wir dieses Summensignal der beiden Frequenzen f_{HF} und f_{NF} aber einem Schaltelement mit *nichtlinearer Strom-Spannungs-Kennlinie* zu, so erfolgt dann erst die eigentliche

Modulation. Ein solches Schaltelement kann eine Halbleiterdiode sein. Im folgenden Versuch wollen wir die Zusammenhänge erkennen und beschreiben.

Versuch: Amplitudenmodulation an einer Diodenkennlinie

Von Abb. 12.2 ausgehend, erweitern wir diese Schaltung zur kompletten Modulationsschaltung (Abb. 12.7).

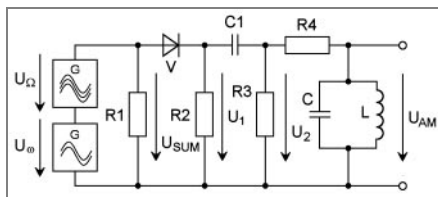


Abb. 12.7: Amplitudenmodulationsschaltung mit einer Diode

Dabei wollen wir den HF-Generator auf die Frequenz einstellen, die durch die Eigenfrequenz eines verfügbaren Resonanzkreises L und C vorgegeben ist. Der NF-Generator soll eine Frequenz liefern, die höchstens $1/10$ der HF beträgt.

Erläuterungen:

Die Spannungen U_{SUM} , U_1 , U_2 und U_{AM} sind in zeitlicher Übereinstimmung im Diagramm (Abb. 12.8) dargestellt.

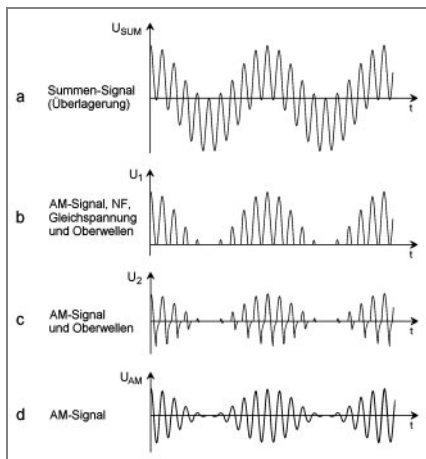


Abb. 12.8: Diagramme der Spannungen U_{SUM} , U_1 , U_2 und U_{AM} zur Modulatorschaltung von Abb. 12.7

Am Widerstand $R1$ tritt die Summe der beiden Spannungen U_{HF} und U_{NF} auf (Abb. 12.8a, siehe auch Abb. 12.3). Am Widerstand $R2$ tritt die pulsierende Gleichspannung U_1 auf, da V die negative Halbwellen des Summensignals U_{SUM} sperrt (Abb. 12.8b). Dieses Signal U_1 weist neben den noch vorhandenen Frequenzen f_{HF} und f_{NF} folgende neu hinzugekommenen Komponenten auf:

- eine Gleichspannung U_{gl} ,
- die obere Seitenbandspannung $\hat{u}_{\text{HF}} \cdot m/2 \cdot \cos[(\Omega + \omega)t]$,
- die untere Seitenbandspannung $\hat{u}_{\text{HF}} \cdot m/2 \cdot \cos[(\Omega - \omega)t]$ und
- einen Oberwellenanteil.

Den Gleichspannungsanteil und die NF-Spannung werden über das RC -Glied $C1/R3$ (Hochpass) abgetrennt, sodass an $R3$ nur noch der HF-Anteil (Träger + Seitenbänder + Oberwellen) anliegt (Abb. 12.8c). Aus diesem HF-Spektrum werden durch den LC -Schwingkreis, der über $R4$ entkoppelt ist, die Komponenten

- $\dot{u}_{\text{HF}} \cdot \cos(\Omega t)$,
- $\dot{u}_{\text{HF}} \cdot m/2 \cdot \cos[(\Omega + \omega)t]$ und
- $\dot{u}_{\text{HF}} \cdot m/2 \cdot \cos[(\Omega - \omega)t]$

herausgefiltert (Abb. 12.8d) und das AM-Signal steht zur Weiterverarbeitung zur Verfügung.

12.2.3 Amplitudenmodulation mit unterdrücktem Träger

Bei einem Modulationsgrad $m = 1$ ist die Trägeramplitude doppelt so groß wie die jedes einzelnen Seitenbandes. Daraus kann man ersehen, dass für den Träger die vierfache Leistung aufzubringen ist. Es ist deshalb bei verschiedenen Übertragungsverfahren wünschenswert, den Träger auf Werte nahe NULL zu unterdrücken, zumal ja der Träger selbst kein Tonsignal enthält. Nimmt man bei einer Amplitudenmodulation die Trägerspannung heraus, so erhält man als Modulationsprodukt die Spannung der beiden Seitenbänder. Man nennt diese Technik *Zwei-Seitenband-Modulation* (ZM). Das hierzu erforderliche Modulationsverfahren kann sowohl mit einem Gegentakmodulator als auch mit seiner Erweiterung, dem Ringmodulator, durchgeführt werden.

Der Gegentakmodulator

Der Gegentakmodulator besteht aus zwei Übertragern und zwei Dioden nach Abb. 12.9. Die Tonsignalspannung U_{NF} wird dem Übertrager Tr1 zugeführt. An die symmetrischen Anzapfungen der Wicklungen N2 und N3 wird die Trägersignalspannung U_{HF} angelegt.

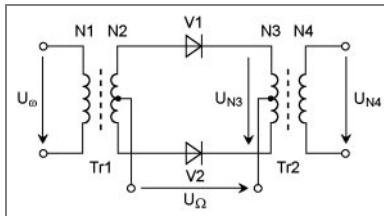


Abb. 12.9: Prinzipschaltung des Gegentakmodulators

Wenn nur die Tonsignalspannung eingespeist wird, bleiben die beiden Dioden gesperrt, da sie für die NF antiseriell in Reihe liegen. Es gelangt kein Tonsignal an den Übertrager Tr2, also steht auch kein Tonsignal am Ausgang ($N4$) zur Verfügung.

Legen wir nur die Trägersignalspannung an die Schaltung, so kann zwar die positive Amplitude beide Dioden in den Leitzustand überführen, es fließt dann ein HF-Strom durch beide Wicklungen N2 und N3; weil aber die Wicklungen exakt symmetrisch angezapft sind, heben sich die in den Wicklungen entstehenden Induktionsspannungen auf. Es steht also auch kein Trägersignal am Ausgang.

Liegen aber beide Signale (Trägersignal und Tonsignal) an der Schaltung an, so kann der Träger die beiden Dioden während seiner positiven Halbwelle (+ an N2 und – an N3) leitend schalten. Die Dioden wirken dann wie Schalter, die für den Augenblick der positiven Trägerhalbwelle geschlossen sind, und die Augenblicksspannung des Tonsignals zum Übertrager Tr2 leiten.

In Abb. 12.10 sind die Vorgänge durch Diagramme veranschaulicht.

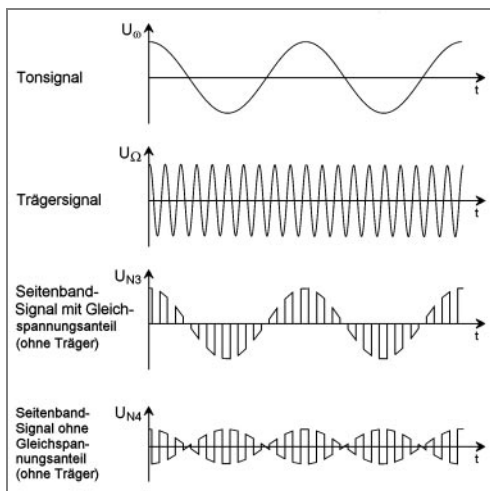


Abb. 12.10: Diagramme der Spannungen U_ω , U_Ω , U_{N3} und U_{N4} zur Gegentakmodulatorschaltung

Wir sehen am Seitenbandsignal U_{N3} , dass zunächst die positive Halbwelle der Tonsignalspannung U_ω abgetastet wird. Während dieses Zeitraumes kann jeweils zur positiven Trägerhalbwellen die Diode V1 den Summenstrom $i_{FV1}(t) = i_\Omega + i_\omega(t)$ führen, während V2 den Summenstrom $i_{FV2}(t) = i_\Omega - i_\omega(t)$ übernehmen muss, weil sie vom NF-Strom in Rückwärtsrichtung durchflossen wird. Die darauf folgende negative Halbwelle der Tonsignalspannung U_ω kehrt die Verhältnisse um. Damit die Dioden für alle Augenblickswerte von U_ω sicher leiten, muss die Trägeramplitude groß genug sein, um den Strom $i_{FV1}(t) = i_\Omega - i_\omega(t)$ der entsprechenden Diode im Durchlassbereich immer groß genug zu halten.

Abb. 12.10 zeigt auch in den beiden Diagrammen U_{N3} und U_{N4} , dass bei der Modulation ein erheblicher Oberwellenanteil entsteht. Wir erkennen dies an der im Liniendiagramm fast rechteckig ausgeformten Seitenbandspannung. U_{N3} enthält noch zusätzlich den Gleichspannungsanteil, der bei der Modulation entsteht. Bei U_{N4} ist dieser durch die galvanisch getrennte Transformatorwicklung N4 herausgefiltert. Den noch verbleibenden Oberwellenanteil kann man durch einen nachgeschalteten Schwingkreis beseitigen, sodass das Ausgangssignal eines solchen Modulators dann nur noch die Seitenbandsignale enthält.

Das AM-Signal mit unterdrücktem Träger kann an einem typischen Merkmal seines Liniendiagramms erkannt werden: Während der Nulldurchgänge des Tonsignals U_{NF} erfolgt ein Phasensprung. Die positiven und negativen Hüllkurven zeigen im Gegensatz zum klassischen AM-Signal die doppelte Frequenz.

Der Ringmodulator

Der Gegentakmodulator hat einen erheblichen Nachteil: Es kann nur eine Halbwelle des Trägersignals ausgenutzt werden. Diesen Nachteil können wir beseitigen, wenn zwei weitere Dioden in die Schaltung eingefügt werden (Abb. 12.11). So erhalten wir den Ringmodulator, der heute Standard ist.

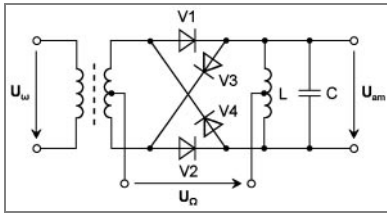
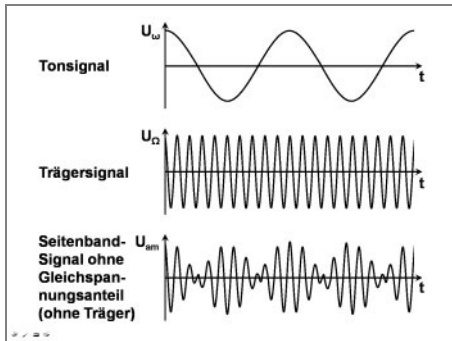


Abb. 12.11: Prinzipschaltung des Ringmodulators

Beim Ringmodulator gilt ebenso die Forderung $U_{HF} \gg U_{NF}$. Die beiden Dioden V3 und V4 übernehmen die negative Halbwelle des Trägersignals (– an N2, + an L). Dadurch liefert auch der Zeitraum dieser Halbwelle die Seitenbandinformation, was zur Verdoppelung der Seitenbandspannung führt. Der Ringmodulator hat also einen besseren Wirkungsgrad und erzeugt außerdem keinen Gleichspannungsanteil, wie wir aus dem Diagramm der Seitenbandspannung U_a in Abb. 12.12 erkennen können, wodurch der zweite Übertrager entfallen kann. Die ausgangsseitige Spule bildet jetzt die Induktivität L eines LC-Parallelschwingkreises, wodurch das reine Seitenbandsignal ohne Träger verfügbar ist.

Abb. 12.12: Diagramme der Spannungen U_w , U_a und U_{am} zur Ringmodulatorschaltung

Anwendungen der Zwei-Seitenband-Modulation (ZM) – HF-Stereofonie

Allgemeines

Um die zur HF- Stereofonie festgelegten Parameter einordnen zu können, ist es notwendig, das Frequenzmodulations-Prinzip verstanden zu haben. Deshalb wird an dieser Stelle vorgeschlagen, zum besseren Verständnis zuvor den Abschnitt 12.3 »Frequenzmodulation« zu erarbeiten.

In der HF-Stereotechnik benötigt man 2 getrennte Aufnahmekanäle: je einen für die Rechts-Information (R-Signal) und die Links-Information (L-Signal). Diese beiden Mikrofonspannungen können jedoch nicht wie beim *monauralen* (einkanaligen) Signal dem HF-Träger direkt aufmoduliert werden, da dies zu einer Addition der beiden getrennten Mikrofonspannungen führen würde und damit der Stereoeffekt aufgehoben wäre. Vielmehr muss gewährleistet sein, dass die beiden Kanalinformationen getrennt bleiben und auch im Empfänger als getrennte Komponenten des NF-Signals rückgewonnen werden können, damit sie am Empfangsort als *stereophones* Signal zur Verfügung stehen. Hier ist also ein Verfahren anzuwenden, welches die herkömmliche FM (Frequenzmodulation, siehe auch Abschnitt 12.3.1) zulässt und gleichzeitig auch kompatibel (verträglich) mit dem Mono-Übertragungsverfahren ist; d. h. ein FM-Mono-Empfänger muss auch Stereo-Sendungen (zwar monaural) und ein FM-Stereo-Empfänger muss ebenso Mono-Sendungen empfangen können. Da der Mono-Empfänger ja das Summensignal $L + R$ benötigt, muss dieses auch senderseitig gebildet werden und deshalb auch Bestandteil des senderseitigen Stereosignals sein.

Das Multiplex-Signal

Der Stereo-Empfänger muss die in L und R getrennten Komponenten zur Verfügung stellen, um sie im NF-Verstärker weiterverarbeiten zu können. Damit dies möglich wird, muss der Stereo-Sender neben dem Summensignal $L + R$ ein zweites Signal zur Übertragung erhalten: das Differenzsignal $L - R$. Die Trennung in die beiden NF-Kanäle erfolgt dann im Empfänger durch Addition bzw. Subtraktion der beiden Signale:

$$(L + R) + (L - R) = 2L \quad (12.11)$$

$$(L + R) - (L - R) = 2R \quad (12.12).$$

Neben dem Summensignal muss nun noch das Differenzsignal zum Empfänger übertragen werden. Beim UKW-Rundfunk bietet sich wegen der hohen Übertragungsbandbreite von ± 100 kHz im Gegensatz zum NF-Übertragungsbereich des Summensignals, der zwischen ca. 30 Hz und 15 kHz liegt, ein Verfahren an, welches keine zweite Sendefrequenz für das Differenzsignal benötigt. Hierzu wird einem Stereo-Hilfsträger ($f_{\text{Hilfstr}} = 38$ kHz) das Differenzsignal $L - R$ im ZM-Verfahren aufmoduliert. Dieses ZM-Signal gelangt zusammen mit dem Summensignal $L + R$ auf den Modulator des FM-Senders.

Wie bereits erwähnt, muss bei der Demodulation des ZM-Signals im Empfänger der Träger in der richtigen Phasenlage eingefügt werden. Deshalb wird mit dem Summensignal ($L + R$) und dem ZM-Signal ($L - R$) auch noch ein sogenannter Pilotton ($f_{\text{Pilot}} = 19$ kHz) übertragen, von welchem der Hilfsträger abgeleitet ist (Abb. 12.13).

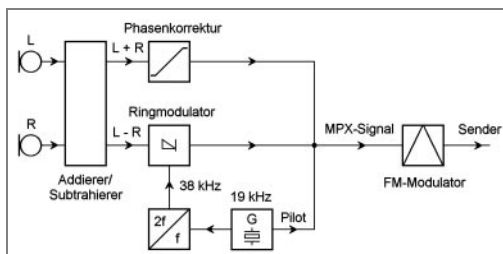


Abb. 12.13: Blockschaltbild der Stereo-Multiplexsignal-Gewinnung

Dieses komplette zum Modulator des Senders gehende Signal wird *Stereo-Multiplex-Signal* genannt.

Forderungen an das Multiplexsignal

In Abb. 12.14 ist das Multiplexsignal dargestellt, wie es aus der Schaltung zur Stereo-Multiplexsignal-Gewinnung an den FM-Modulator geliefert wird.

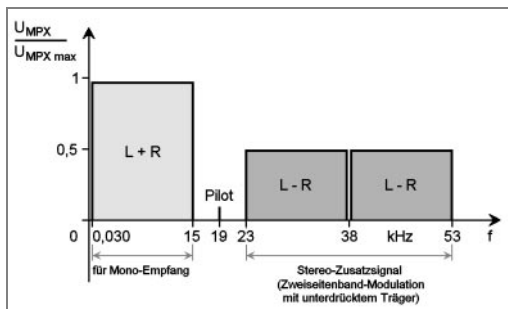


Abb. 12.14: Stereo-Multiplexsignal in normierter Darstellung $U_{\text{MPX}} / U_{\text{MPX max}} = f(f)$

Es gelten folgende Forderungen hinsichtlich des Multiplexsignals:

1. Weitgehende Gleichheit der Vorverzerrungen (*Preemphasis*, siehe Abschnitt 12.3.1) hinsichtlich Amplitude und Phase der beiden Kanäle (L und R). Die Zeitkonstante der Preemphasis beträgt $\tau = 50 \mu\text{s}$.
2. Der Pilotton hat eine Frequenz von $19 \text{ kHz} \pm 2 \text{ Hz}$. Seine Amplitude soll zwischen 8 und 10% der maximalen Hubamplitude liegen.
3. Der Hilfsträger soll die zweite Harmonische der Pilotfrequenz haben. Seine Spannungskurve soll die Zeitachse bei jedem Nulldurchgang der Pilotspannung in positiver Richtung durchlaufen.
4. Der Hilfsträgerkanal enthält das L-R-Signal im Frequenzbereich 30 ... 15 000 Hz.
5. Der Hilfsträger wird unter 1 % unterdrückt.
6. Ist nur ein R- oder L-Signal vorhanden, so beträgt der maximale Hub (siehe hierzu auch Abschnitt 12.3.1) 44 % (Hauptkanal L+R) des erzeugten Gesamthubes.
7. Bei der Bedingung 6 (nur ein Kanal) beträgt der maximale vom Hilfsträgerkanal erzeugte Frequenzhub 44 % des Gesamthubes.
8. Somit ist die Summe aus Punkt 6 und 7 und dem 8...10%-Anteil des Pilottones 96...98%.

12.2.4 Demodulation des AM-Signals mit ausgestrahltem Träger

Nach erfolgter Übertragung der Toninformation durch die Seitenbandsignale und gegebenenfalls das Trägersignal haben die Hilfsfrequenzen ihre Aufgabe erfüllt, und die Toninformation muss rückgewonnen werden. Diesen Vorgang bezeichnen wir mit *Demodulation*. Physikalisch gesehen ist Demodulation eine Form der Modulation. Wie ist das zu verstehen?

Betrachten wir dazu einmal unseren Versuch in Abschnitt 12.2.2 »Amplitudenmodulation an einer Diodenkennlinie« und die zugehörigen Diagramme (Abb. 12.8). In diesem Versuch haben wir die klassische Amplitudenmodulation beschrieben (also diejenige mit Aufrechterhaltung der Trägerfrequenz). Wir haben festgestellt, dass das AM-Signal im Versuch: Abb. 12.8d kein NF-Signal enthält, es also aus der Trägerfrequenz und den beiden Seitenbandfrequenzen besteht. Im Diagramm Abb. 12.8b jedoch war, neben einem Gleichspannungs- und Oberwellenanteil, die NF noch vorhanden. Wenn es nun gelingt, aus dem AM-Signal wieder den Signalverlauf des Diagramms von Abb. 12.8b zu erzeugen, so wäre das NF-Signal wieder vorhanden. Bewerkstelligen wir dies mit einer Modulatorschaltung wie der von Abb. 12.7, so lassen wir nur eine Halbwelle passieren. Es entstehen erneut Summen und Differenzfrequenzen, wodurch sich dann ein Signal einstellt, welches 12.8b entspricht, in dem wieder alle 6 Signalkomponenten enthalten sind, wie wir sie bereits besprochen haben.

Von diesen 6 Komponenten benötigen wir nur das Tonsignal. Alle anderen werden durch eine Filterschaltung zurückgehalten. Das Tonsignal wird sozusagen als Differenzsignal aus Träger- und Seitenbandsignalen rekonstruiert ($f_{\text{NF}} = f_{\text{Träger}} - f_{\text{unteres Seitenband}}$ und $f_{\text{NF}} = f_{\text{oberes Seitenband}} - f_{\text{Träger}}$).

Im Abb. 12.15 ist eine einfache Demodulatorschaltung, der sogenannte *Hüllkurvendetektor*, abgebildet.

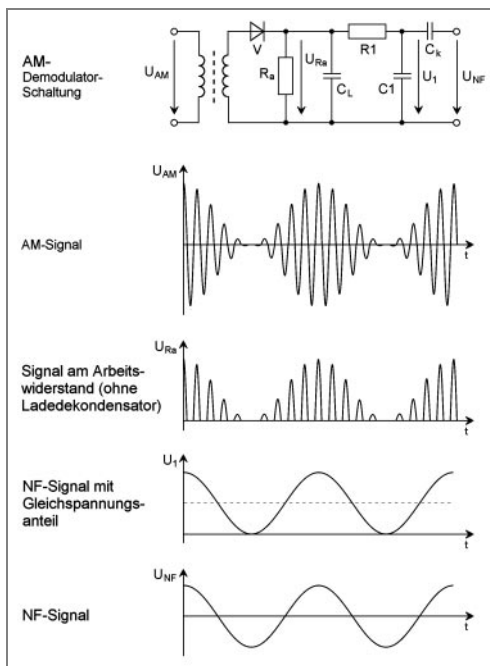


Abb. 12.15: Hüllkurvendetektor als AM-Demodulatorschaltung

Das AM-Signal gelangt über den Übertrager auf die Demodulator-Diode mit ihrem Arbeitswiderstand R_a . Parallel zu R_a ist ein Ladekondensator C_L geschaltet, der sich auf den zeitlichen Scheitelwert der Spannung $\hat{u}_{Ra}(t)$ auflädt (Dieser Schaltungsteil ist von seiner Wirkungsweise her mit der bekannten Spitzengleichrichtung zu vergleichen.). Ein nachgeschaltetes Siebglied R_1/C_1 sorgt dafür, dass die HF-Anteile des AM-Signals abgeleitet werden. Schließlich wird noch der entstandene Gleichspannungsanteil über den Kondensator C_k abgetrennt, und das reine Tonsignal steht zur Weiterverarbeitung bereit.

12.2.5 Demodulation eines AM-Signals mit unterdrücktem Träger

Wie wir schon erwähnt haben, kann die Demodulation eines Seitenbandsignals nicht ohne weiteres erfolgen, da bei einer Demodulation ja die Differenzfrequenz zum Träger maßgebend für die Toninformation ist. Wenn der Träger aber nicht mit ausgesendet wird, ergibt sich als Differenzfrequenz: $f_D = f_{\text{oberes Seitenband}} - f_{\text{unteres Seitenband}}$. Dies wird auch deutlich, wenn man das Diagramm des Seitenbandsignals in *Abb. 12.16* betrachtet.

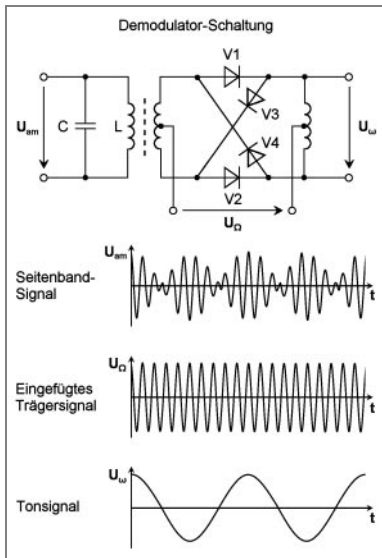


Abb. 12.16: Ringmodulator zur Demodulation des Seitenbandsignals

Diese Frequenz ist doppelt so groß wie die ursprüngliche NF und daher unbrauchbar. Um das originale Tonsignal zurückzugewinnen zu können, muss deshalb das komplette AM-Signal zur Demodulation bereitstehen. Dazu muss der Träger wieder in seiner exakten Phasenlage zu den Seitenbandsignalen addiert werden. Wir können auch hierfür den bekannten Ringmodulator verwenden, der dann als Demodulator fungiert.

Erläuterung der verwendeten Formelzeichen

Ω = Kreisfrequenz des Trägersignals in Hz

ω = Kreisfrequenz des Tonsignals in Hz

C_k = Koppelkapazität in F

C_L = Ladekapazität in F

f_{Pilot} = Pilotfrequenz in Hz

$i_{\text{EV1}}(t)$ = zeitlicher Verlauf des Scheitelwertstromes von V1 in Vorwärtsrichtung in A

m = Modulationsgrad · 100 in %

$N1$ = Primärwicklung von Übertrager Tr1

$N2$ = Sekundärwicklung von Übertrager Tr1

$N3$ = Primärwicklung von Übertrager Tr2 (Gegentaktmodulator)

$N4$ = Sekundärwicklung von Übertrager Tr1 (Gegentaktmodulator)

R_a = Arbeitswiderstand der Diode V

$\hat{u}_{\text{Ra}}(t)$ = zeitlicher Verlauf des Scheitelwertes der HF-Spannung am Arbeitswiderstand R_a (NF-Signal) in V

\hat{U}_{Ω} = Zeigerwert der Trägerspannung in V

$\hat{U}_{\Omega + \omega}$ = Zeigerwert der oberen Seitenbandspannung in V

$\hat{U}_{\Omega - \omega}$ = Zeigerwert der unteren Seitenbandspannung in V

$\hat{U}_{\text{AM max}}$ = Zeigerwert der maximalen Spannung des AM-Signals in V

$\hat{U}_{\text{AM min}}$ = Zeigerwert der minimalen Spannung des AM-Signals in V

U_{gl} = Gleichspannungsanteil bei der Modulation in V

U_{HF} = Trägersignal in V

\dot{u}_{HF} = Scheitelwert des Trägersignals in V

U_{MP} = Multiplex-Signal-Spannung in V

$U_{\text{MP max}}$ = maximal auftretende Multiplex-Signal-Spannung in V

U_{N3} = Spannung an der Primärwicklung von Übertrager Tr2 (Gegentaktmodulator) in V

U_{N4} = Spannung an der Sekundärwicklung von Übertrager Tr1 (Gegentaktmodulator) in V

U_{NF} = Tonsignal in V

\dot{u}_{NF} = Scheitelwert des Tonsignals in V

U_{SUM} = Summensignal, gebildet aus Tonsignal und Trägersignal in V

12.3 Frequenzmodulation (FM)

12.3.1 FM-Prinzip

Die Frequenzmodulation wird zur Übertragung der Toninformation in UKW-Rundfunk- und Fernsichttechnik angewendet. FM erhält man, wenn die Trägersignalfrequenz f_{HF} im Takte der Tonsignalfrequenz f_{NF} geändert wird. Die Amplitude der Trägersignalfrequenz bleibt dabei konstant. Die Amplitude der Tonsignalspannung (Lautstärke) bestimmt den Betrag der Frequenzänderung Δf_{HF} . Die Frequenzänderung Δf_{HF} wird auch Frequenzhub oder einfach Hub genannt. Je größer die Tonsignalamplitude ist (je lauter der Ton), umso größer ist auch Δf_{HF} :

$$\Delta f_{\text{HF}} \sim \dot{u}_{\text{NFmax}} \quad (12.13).$$

Die Frequenz weicht also um $\pm \Delta f_{\text{HF}}$ von der Mittenfrequenz f_{M} des Trägers ab. Dadurch ergeben sich ein unterer und ein oberer Seitenbandbereich, um den die Mittenfrequenz im Takte der Tonfrequenz pendelt, wie in Abb. 12.17 dargestellt. Die Frequenz des Hubs (Hubfrequenz, das ist die Häufigkeit der Frequenzänderung der Mittenfrequenz in der Zeiteinheit) hängt direkt proportional von der Tonhöhe ab, wird also von der Tonsignalfrequenz f_{NF} bestimmt.

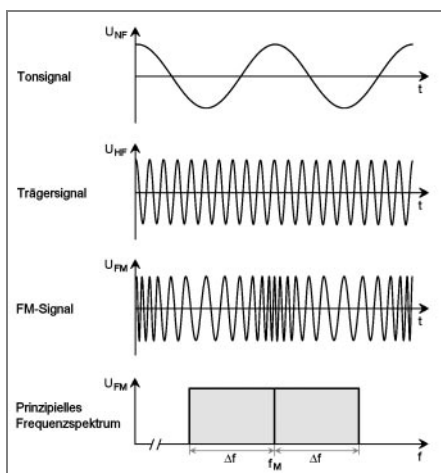


Abb. 12.17: Ton-, Träger- und FM-Signal in zeitlicher Zuordnung und prinzipielles Frequenzspektrum eines FM-Kanales

Für UKW-Rundfunksender ist der Frequenzhub bei maximaler Lautstärke mit $\Delta f_{\text{HF}} = \pm 75$ kHz und für Fernseh-Sender mit $\Delta f_{\text{HF}} = \pm 50$ kHz festgelegt.

Die Komponenten der FM lassen sich mathematisch nur mit hohem Aufwand erläutern. Wir wollen deshalb hier durch Diagramme zeigen, wie eine frequenzmodulierte Schwingung zusammengesetzt sein kann. In Abb. 12.18 sind drei verschiedene Frequenzspektren einer frequenzmodulierten HF-Spannung zu sehen.

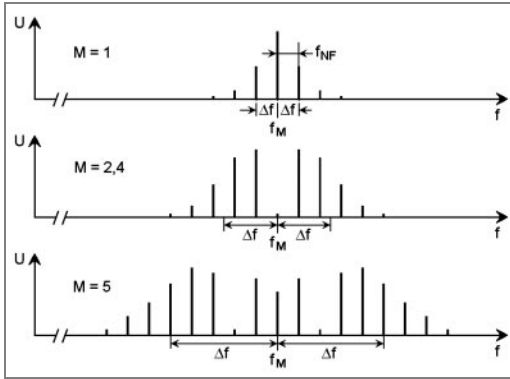


Abb. 12.18: Verschiedene Frequenzspektren einer frequenzmodulierten HF-Spannung

Es bilden sich fortlaufend mehrere Seitenbandfrequenzen in untereinander gleich bleibendem Abstand von f_{NF} zur Mittenfrequenz f_M aus. Man erkennt, dass zwischen Hub und Tonfrequenz f_{NF} hinsichtlich der Anzahl und der Amplitude der Seitenbandschwingungen eine Abhängigkeit bestehen muss. Das Verhältnis $\Delta f_{HF} / f_{NFmax}$ bestimmt das Frequenzspektrum einer FM-Spannung. Man nennt dies den Modulationsindex:

$$M = \frac{\Delta f_{HF}}{f_{NFmax}} \quad (12.14).$$

Für UKW-Rundfunk und Fernsehon ist $M = 5$ festgelegt.

In Abb. 12.18 sind die Modulationsindizes $M = 1$, $M = 2,4$ und $M = 5$ bei $f_{NF} = \text{konstant}$ dargestellt. Für den UKW-Rundfunkbereich ist die höchste zu übertragende Frequenz mit $f_{NFmax} = 15$ kHz festgelegt. Gleichung 12.14 auf Δf_{HF} umgestellt, erhalten wir bei dem Modulationsindex $M = 5$:

$$\Delta f_{HF} = f_{NFmax} \cdot M \quad (12.15)$$

$$\Delta f_{HF} = 15 \text{ kHz} \cdot 5$$

$$\Delta f_{HF} = 75 \text{ kHz} .$$

Um das FM-Signal in einem Empfänger verarbeiten zu können, benötigt man einen selektiven Verstärker, der den kompletten Kanal übertragen kann. Dieser Verstärker benötigt eine Bandbreite $b_{0,7}$ von:

$$b_{0,7} = 2 \cdot (\Delta f_{HF} + n \cdot f_{NFmax}) \quad (12.16).$$

Wenn $n = 1$ gewählt wird, ergibt sich die Mindestbandbreite, die mit $2 \cdot (\Delta f_{HF} + f_{NFmax})$ praktisch dem Hub entspricht, da die beiden angrenzenden Seitenbänder nicht vollständig erfasst werden können, obwohl sie noch Toninformation enthalten, werden sie dann nicht mehr vollständig übertragen. Damit diese sich an den Hub anschließenden beiden Seitenbänder der Toninformation f_{NF} noch mit genutzt werden können, wird deshalb $n = 2$ gewählt. Dies führt zu einer Bandbreite für UKW-Rundfunk von $b_{0,7} = 210$ kHz. Diese Bedingung, bei der die Übertragung von mindestens 12 Seitenbändern realisiert werden kann, muss erreicht werden, da sonst der Stör-

abstand unter ein erträgliches Maß absinken würde. Unter Störabstand versteht man das Verhältnis aus Nutzsignal zu Störsignal. Dieses Maß »SNR« (Signal to Noise Ratio → Signal-Rausch-Verhältnis)) wird auch in dB angegeben und ist über das Spannungsverhältnis nach Gleichung 10.30 definiert:

$$a = 20 \cdot \lg \frac{U_1}{U_2} \text{ dB} \quad (10.30)$$

$$\text{SNR} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{Nutzsignal}}}{U_{\text{Störsignal}}} \text{ dB} \quad (12.17).$$

Für UKW Rundfunk kann so ein $\text{SNR} \approx 70 \text{ dB}$ erreicht werden.

Naturgemäß nehmen bei einem NF-Signal die Amplitudenwerte im hohen Frequenzbereich rasch ab. Bei 15 kHz haben wir also nur noch einen Bruchteil der Tonspannung, die bei 1 kHz auftritt. Die Folge davon ist, dass sich bei 15 kHz niemals ein Hub von $\pm 75 \text{ kHz}$ ergeben würde. Die Mindestseitenbandzahl ist also nicht ohne weiteres erreichbar. Hier wendet man deshalb einen Trick an: Senderseitig wird die NF-Signalamplitude zu hohen Frequenzen hin angehoben. Ein RC-Hochpass mit der Zeitkonstanten $\tau = 50 \mu\text{s}$ (festgelegt für UKW-Rundfunk in Afrika, Asien und Europa, für Amerika gilt $\tau = 75 \mu\text{s}$) sorgt dafür, dass bei 3,2 kHz eine Anhebung des NF-Signals um 3 dB erfolgt. Ab dieser Frequenz ergibt sich dadurch eine Anhebung von 6 dB pro Oktave (Frequenzverdopplung), sodass wir bei 15 kHz eine erhebliche Anhebung der Tonspannung gegenüber der ursprünglichen Amplitude erhalten. Diese Anhebung (solche Veränderungen im Amplitudengang, die von der Linearität abweichen, nennt man *lineare Verzerrungen*) wird mit *Pre-Emphasis* (Vor-Verzerrung) bezeichnet. Empfängerseitig muss diese Verzerrung wieder rückgängig gemacht werden. Hierfür wird ein RC-Tiefpass derselben Zeitkonstanten, das *De-Emphasis-Glied* (De-Emphasis = Entzerrung) verwendet.

12.3.2 Demodulation frequenzmodulierter Signale

Allgemeines

Die prinzipielle Demodulationsart, wie wir sie bei AM anwenden, ist bei FM nicht direkt möglich, da die Toninformation nicht in der Amplitudenänderung enthalten ist. Die FM-Signalamplitude muss ja aus Gründen der Störbegrenzung möglichst konstant gehalten werden. Dies kann deshalb erfolgen, da die modulierte Toninformation in der Änderung der Trägerfrequenz liegt.

Eine Möglichkeit, zu einer Demodulation zu kommen, besteht darin, die Frequenzänderung des FM-Signals in eine Amplitudenänderung umzuwandeln. Dieses so gewandelte Signal ist dann ein AM-Signal und kann als solches wie bekannt demoduliert werden.

Die Anfänge der FM-Übertragungstechnik nutzten dann auch die einfachste Möglichkeit der Umwandlung mittels eines LC-Schwingkreises, der so abgestimmt werden musste, dass die Mittenfrequenz des FM-Signals auf die Mitte einer Flanke der Resonanzkurve des Schwingkreises zu liegen kam. Da die Flanke der Durchlasskurve eine Spannungsänderung bewirkt, erhält man so eine Amplitudenänderung des HF-Signals im Takte seiner Frequenzänderung, also AM. Dann konnte mit Hilfe einer Diode die AM-Komponente demoduliert werden. Nachteilig bei dem *Flankendemodulator* sind drei Aspekte:

- Die Flanke eines Schwingkreises oder Bandfilters ist nicht linear.
- Die Flanke überdeckt nur einen geringen Frequenzbereich, sodass der Hub nicht groß genug gemacht werden kann.

- Die Abstimmung eines solchen FM-Empfängers ist nicht eindeutig. Die Durchlasskurve hat zwei Flanken, wodurch der zu empfangende Sender bei der Abstimmung zweimal erscheint.

Diese entscheidenden Nachteile haben den Flankendemodulator nicht aus dem Versuchsstadium heraustreten lassen. Man hat jedoch den Grundgedanken der FM-AM-Wandlung mittels Schwingkreis weiterentwickelt über den anfänglich eingesetzten *Differenz-Diskriminator*, der zu schwer zu handhaben war, über den *Phasen-Diskriminator*, der schon recht gute Demodulator-Eigenschaften besaß, bis schließlich hin zum *Verhältnis-Diskriminator*, der jahrzehntelang der alleinige FM-Demodulator-Typ in FM-Empfängern gewesen ist. Da auch heute noch Rundfunkgeräte mit diesem Demodulator ausgestattet sind, wollen wir seine Wirkungsweise kurz betrachten.

Der Verhältnis-Diskriminator (*Ratio-Detektor*)

In Abb. 12.19 ist die komplette Schaltung eines symmetrischen Verhältnis-Diskriminators dargestellt. Anhand dieser Schaltung wollen wir die Wirkungsweise untersuchen.

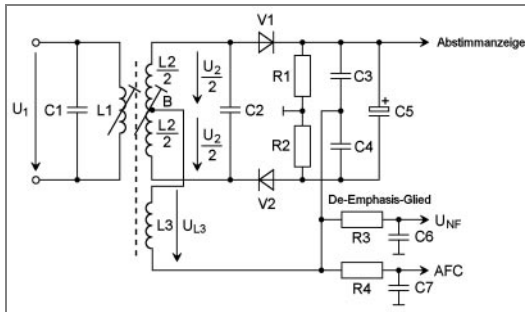


Abb. 12.19: Schaltung eines symmetrischen Ratio-Detektors

Erläuterung:

Die Schwingkreise $L1$, $C1$ und $L2$, $C2$ sind in einer LC -Bandfilterkopplung überkritisch gekoppelt. Zwischen den beiden Spannungen U_1 und U_2 treten die bei Bandfilterschaltungen auftretenden Phasenverschiebungen auf (siehe auch Abschnitt 4.11.4 » LC -2-Kreis-Bandfilter«). Im Resonanzfall f_0 des Bandfilters ist die Phasenverschiebung zwischen diesen beiden Spannungen $\varphi = -90^\circ$. Die Spulen $L1$ und $L2$ hingegen haben eine feste Kopplung ($k \approx 1$), wie wir sie beim Transformator kennen. Dadurch stellt sich eine Spannung U_{L3} ein, die in Phase mit U_1 ist. Diese Spannung U_{L3} liegt fußpunktseitig über $C6$ an Masse und ist mit ihrem anderen Pol (Kopfpunkt von $L3$) an die Mittelanzapfung von $L2$ gelegt. Dadurch addieren sich

- Spannungen U_{L3} und obere Spannung $U_{L2}/2$
- Spannungen U_{L3} und untere Spannung $U_{L2}/2$.

Da die beiden Spannungen U_1 und U_{L2} nicht phasengleich sind, müssen sie geometrisch addiert werden. Die Zusammenhänge sind in Abb. 12.20 veranschaulicht.

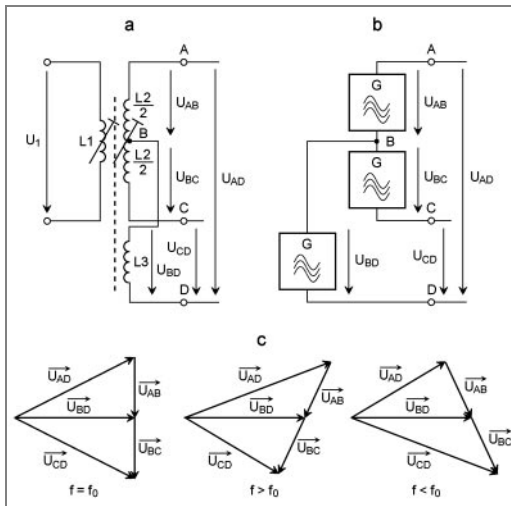


Abb. 12.20: Bandfilter mit Ersatzschaltung und Zeigerdiagrammen der Betriebsfälle $f = f_0$, $f > f_0$ und $f < f_0$

In Abb. 12.20a haben wir nochmals die Induktivitäten herausgezeichnet. Abb. 12.20b sind L_2 und L_3 durch drei Generatoren ersetzt. Da L_3 mit L_1 fest gekoppelt ist, wodurch die Phasenlage $\varphi = 0$ beträgt, gehen wir bei der Betrachtung der Wirkungsweise von $U_{L_3} = U_{BD}$ als der Primärspannung des Bandfilters aus.

Im Resonanzfall erhält die Sekundärinduktivität L_2 (U_{AC}) zu L_3 (U_{BD}) also eine um $\varphi = 90^\circ$ nach-eilende Spannung, die sich in U_{AB} und U_{BC} aufteilt. Da die Spannung U_{BD} an Punkt B angeschlossen ist, ergeben sich zwei Gesamtspannungen U_{AD} und U_{CD} , welche durch geometrische Addition von U_{BD} und U_{AB} , sowie U_{BD} und U_{BC} errechnet werden. Abb. 12.20c zeigt die Zusammenhänge in der Zeigerdarstellung für 3 Betriebsfälle.

- Bei $f = f_0$ wird das Bandfilter mit seiner Eigenfrequenz f_0 betrieben. Es herrscht der Resonanzfall. Demnach stellt sich die Phasenlage zwischen U_{BD} und $(U_{AB} + U_{BC})$ von $\varphi = -90^\circ$ ein. Die Spannungen U_{AD} und U_{CD} sind gleich groß.
- Wird das Filter oberhalb seiner Eigenfrequenz angesteuert ($f > f_0$), wird U_{AD} größer und gleichzeitig U_{CD} kleiner.
- Das Filter wird nun unterhalb seiner Eigenfrequenz angesteuert ($f < f_0$). Hier wird U_{AD} kleiner, während U_{CD} ansteigt.

Gelangt ein FM-Signal an dieses Bandfilter, so schwanken die Zeigerlängen von U_{AD} und U_{CD} im Takte der Modulationsfrequenz der Tonspannung (U_{NF}). Es steht also AM zur Verfügung. Durch AM-Demodulation einer der beiden oder beider Teilspannungen kann nun die NF rückgewonnen werden.

Der Verhältnis-Diskriminator erledigt dies in einer Brückenschaltung (Abb. 12.19), welche gleichzeitig eine gute HF-Amplituden-Begrenzung ermöglicht. V1 und V2 haben die Aufgabe, das in Amplitudenmodulation gewandelte FM-Signal zu demodulieren. Die Spannung U_{AD} (Abb. 12.20) steht dann mit ihrem im zeitlichen Verlauf der $U_{AM}(t)$ auftretenden positiven Scheitelwerten am Kondensator C3 an, der sich auf diese Werte im Zusammenwirken mit dem Arbeitswiderstand R1 auflädt. Analog gilt dies auch für die Spannung U_{CD} , die Diode V2, den Kondensator C4 und den Widerstand R2, wobei jedoch C4 auf die negativen Scheitelwerte aufgeladen wird. Aus den Zeigerdiagrammen (Abb. 12.20c) entnehmen wir die Gegenläufigkeit dieser beiden Spannungen U_{AD} und U_{CD} , wenn eine Frequenzänderung eintritt. Dies gilt nun auch für die beiden Kondensatorspannungen U_{C3} und U_{C4} , die in ihrer Summe $U_{C3} + U_{C4}$ immer gleich sind.

Auf diese Summenspannung $U_{C3} + U_{C4}$ lädt sich der Kondensator $C5$ auf. U_{C5} ist zu gleichen Teilen auf die parallel geschalteten Widerstände $R1$ und $R2$ aufgeteilt, deren Mittelanschluss auf Masse liegt. Dieser Massepunkt ist der erste Punkt der Brücke. Der zweite wird durch die Verbindungsstelle der Kondensatoren $C3$, $C4$ und dem Fußpunkt der Spule $L3$ gebildet.

In dieser Brücke liegt die Ton-Signalspannung U_{NF} . Diese ist 0-symmetrisch gegen Masse und wird noch über das RC -Glied $R3$ und $C6$ (De-Emphasis-Glied) geführt, wenn die Schaltung in einem Monoempfänger verwendet wird. Bei Stereoempfängern wird die De-Emphasis am Ausgang der Stereodekodierung vorgenommen. Der Fußpunkt von $L3$ stellt auch noch ein Signal zur Verfügung, welches die Symmetrie der Spannung in der Brücke bei exakt abgestimmtem Sender ausnutzt. Wenn der HF-Träger unmoduliert ist, stellt sich nämlich keine Spannung in der Brücke ein. Dies ist aber nur dann so, wenn der Sender auch exakt abgestimmt ist. Weicht die Abstimmung nur geringfügig von der Mittenfrequenz ab, so ergibt sich eine negative oder positive Richtspannung, die zur Nachstimmung (Korrektur der Abstimmung) durch Steuerung von Kapazitätsdioden herangezogen werden kann. Dass dies auch funktioniert, wenn der Träger mit dem Tonsignal moduliert ist, besorgt das RC -Glied $R4$, $C7$, welches die NF aussiebt.

Der Koinzidenz-Demodulator (Quadraturdemodulator)

Das heute gebräuchlichste Prinzip der FM-Demodulation stellt der Koinzidenz-Demodulator dar. Dem Trend der Zeit folgend, ist es notwendig, Abgleicharbeiten zu minimieren und Schaltungen zu entwickeln, die eine hohe Integrationsrate zulassen. In dieses Konzept passt die Wirkungsweise des Koinzidenz-Demodulators, der nur noch eine Induktivität benötigt. Der übrige Schaltungsteil kann bis auf wenige Bauelemente integriert werden.

Abb. 12.21 zeigt das Prinzipschaltbild.

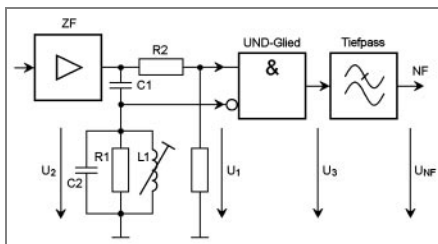


Abb. 12.21: Prinzipschaltbild des Koinzidenz-Demodulators

Das FM-Signal, hier in Form der ZF-Spannung gelangt am Ende des ZF-Verstärkers auf eine Weiche, wo es zu zwei Signalkomponenten aufbereitet wird:

- Die eine Komponente beinhaltet das unveränderte FM-Signal U_1 .
- Aus dem FM-Signal wird eine verzögerte Spannung U_2 gewonnen. Die Verzögerung wird durch Phasenverschiebung an einem Schwingkreis erreicht. Für die Mittenfrequenz beträgt sie $\varphi = 90^\circ$. Die Frequenzänderung $\pm \Delta f$ des Hubs bewirkt eine Phasenänderung von $\pm \Delta \varphi$ bezogen auf die Phasenlage bei Mittenfrequenz f_0 .

Diese beiden Signalkomponenten treffen nun wieder zusammen (Koinzidenz = Zusammenreffen) und steuern ein UND-Glied mit nachfolgendem Tiefpass, der die Tonsignal-Spannung U_{NF} ausgibt.

Der Wirkungsweise des Koinzidenz-Demodulators liegt der Gedanke zugrunde, den wir anhand der Abb. 12.22 in Verbindung mit Abb. 12.21 darstellen wollen.

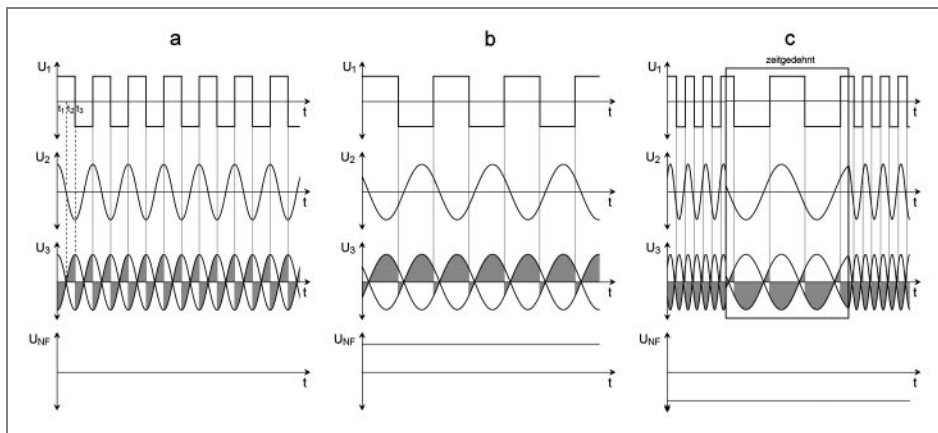


Abb. 12.22: Diagramme des Koinzidenz-Demodulators für die Betriebsfälle $f = f_0$, $f < f_0$ und $f > f_0$

Das direkte Signal U_1 wird begrenzt, sodass es nahezu rechteckförmig ist. Am Schwingkreis steht das veränderte Signal, welches im Falle der Mittenfrequenz um $\varphi = 90^\circ$ voreilt (Abb. 12.22a). Die umgepolte Spannung U_2 und die rechteckförmige Spannung U_1 erzeugen am UND-Glied einen Spannungs-Puls U_3 (graue Flächen), der im Zeitraum $t_1 \dots t_2$ negativ und im Zeitraum $t_2 \dots t_3$ positiv ist usw. Positive und negative Impulse haben gleichen Flächeninhalt, wodurch sich am NF-Ausgang des Tiefpasses (Abb. 12.21) die Ausgangsspannung $U_{NF} = 0$ ergibt.

Weicht die Trägerfrequenz des FM-Signals von der Mittenfrequenz nach unten ab ($f < f_0$), so steigt der Phasenwinkel durch die Wirkung des Schwingkreises $L1, C2$ auf Werte $\varphi > 90^\circ$ an, die NF-Spannung wird positiv (Abb. 12.22b). Umgekehrt ist es, wenn die Trägerfrequenz zu höheren Werten hin abweicht. Dann stellt sich eine negative NF-Spannung ein (Abb. 12.22c). Hier ist zur besseren Veranschaulichung ein Bereich zeitgedehnt dargestellt).

Es gibt noch andere FM-Demodulatoren, PLL-Diskriminator und Zähl-Diskriminator, auf die aber an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll. Wir verweisen auf einschlägige Literatur zum Erarbeiten des Verständnisses von anderen Verfahren.

Erläuterung der verwendeten Formelzeichen

φ = Phasenwinkel in $^\circ$

$b_{0,7}$ = Bandbreite bei -3dB-Absenkung in Hz

f = Frequenz am Eingang des Ratio-Detektor-Bandfilters in Hz

f_0 = Eigenfrequenz des Ratio-Detektor-Bandfilters in Hz

Δf_{HF} = Frequenzhub in Hz

f_M = Mittenfrequenz in Hz

f_{NFmax} = maximale übertragene Tonfrequenz in Hz

M = Modulationsindex

n = Faktor zur Errechnung der erforderlichen Bandbreite

SNR = Störabstand in dB

U_{NF} = Tonsignal-Spannung in V

\hat{u}_{NFmax} = Scheitelwert der größten NF-Amplitude in V

$U_{Nutzsignal}$ = hier die effektive Tonsignal-Spannung in V

$U_{Störsignal}$ = effektive Rauschspannung in V

12.4 Tastung der Trägerfrequenz

12.4.1 Allgemeines

Die einfachste Modulationsart, die man sich vorstellen kann, ist die *Tastung* des Trägersignals, indem man die Trägeramplitude im Takte der Information ein- und ausschaltet. So wurde bereits durch Erfindung des Morse-Alphabets in den Anfängen der Telegraphie diese einfache Form der Nachrichtenübermittlung durch Tastung einer Trägeramplitude realisiert. Die Nachricht konnte zwar zunächst noch nicht drahtlos übertragen werden, was aber dann später erstmals durch Marconi erfolgte. Diese *geträgerete* Nachrichtenübertragung durch Tastung des Trägers, der im Niederfrequenz- oder Hochfrequenzbereich arbeiten kann, lässt allerdings nur Informationen in digitaler Form, also als binär kodierte Zeichen zur Modulation zu. Es gibt prinzipiell 3 unterschiedliche Verfahren,

- Amplitudenumtastung (ASK = Amplitude Shift Keying)
- Frequenzumtastung (FSK = Frequency Shift Keying)
- Phasenumtastung (PSK = Phase Shift Keying),

von denen wir hier die beiden ersten kurz ansprechen werden.

12.4.2 Amplitudenumtastung

Die Umtastung des Trägers erfolgt, indem die Amplitude des Trägers ein- und ausgeschaltet wird bzw. ihr Maximum und Minimum entsprechend der digitalen Information erhält (Abb. 12.23).

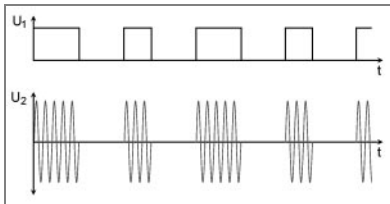


Abb. 12.23: Prinzipielle Linien-Diagramme der Amplitudenumtastung (ASK)

Dabei ist in aller Regel die sogenannte weiche Tastung vorgeschrieben, wenn es sich um eine drahtlose Übertragung von Daten handelt. Man versteht darunter eine langsame Amplitudenänderung vom Maximal- zum Minimalwert und umgekehrt. Dadurch wird verhindert, dass sich bei der Amplitudenänderung unliebsame Oberwellen einstellen, die eine sehr viel höhere Bandbreite des Sendesignals erfordern würden.

Ein Beispiel für die *Amplitudenumtastung* ist der Zeitzeichensender DCF-77, der auf der Frequenz 77,5 kHz sendet. Die Information ist BCD-kodiert (BCD-Code, siehe Kapitel 14 »Digitaltechnik«). Die Trägeramplitude wird sekundlich auf einen Restwert heruntergetastet, und zwar liegt dieser für logisch 0 100 ms lang an, für logisch 1 dauert er 200 ms. In der übrigen Zeit wird die volle Trägeramplitude gesendet. Die Demodulation kann wie bei AM erfolgen.

12.4.3 Frequenzumtastung

Während bei der Amplitudenumtastung zwischenzeitlich keine bzw. nur eine reduzierte Signalamplitude des Trägers vorhanden ist, wird bei der *Frequenzumtastung* eine konstante Trägeramplitude beibehalten, wobei zwischen den unterschiedlichen zu übertragenden Informationen (0 und 1) des digitalen Signals zwischen 2 Frequenzen f_1 und f_2 gewechselt wird (Abb. 12.24).

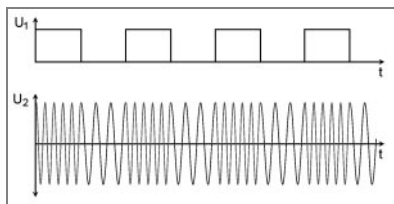


Abb. 12.24: Prinzipielle Liniendiagramme der Frequenzumtastung (FSK)

Da immer eine konstante Amplitude eingehalten wird, kann wie bei FM auf eine Regelung des Verstärkers verzichtet und Begrenzung durchgeführt werden. Die weiche Umtastung sorgt hier dafür, dass ein kontinuierlicher Frequenzübergang zwischen f_1 und f_2 erfolgt. Die Demodulation kann wie bei FM geschehen. Als Anwendungsbeispiel ist hier das Modem als Datenübertragungseinrichtung in Telefonanlagen zu nennen, welches mit den beiden Umtastfrequenzen 1300 Hz und 2100 Hz arbeitet.

12.5 Pulsmodulation

12.5.1 Allgemeines

Bei allen bisher besprochenen Modulationsarten wurde immer ein modulierte Sinus-Trägersignal zur Nachrichtenübertragung verwendet. Bei der *Pulsmodulation* dient im Gegensatz ein Puls als Träger. Im Gegensatz zu den bisherigen Verfahren steht auch die Tatsache, dass eine drahtlose Übertragung per Funk mit dem Puls als Träger nicht möglich ist. Dieser muss vielmehr nochmals einem HF-Träger mit einem der üblichen Modulationsverfahren aufgebürdet werden.

Es handelt sich bei der Pulsmodulation also eigentlich um ein Abtast- und Kodierverfahren für analoge Nachrichten, um eine bessere Übertragungsqualität und eine gute Kanaltrennung bei Mehrkanal-Übertragung per Kabel zu erreichen.

Man unterscheidet verschiedene Verfahren:

- Pulsamplitudenmodulation (PAM)
- Pulsdauermodulation (PDM)
- Pulsfrequenzmodulation (PFM)
- Pulsphasenmodulation (PPM)
- Pulsmodemodulation (PCM).

Für Pulsamplitudenmodulation und Pulsmodemodulation wollen wir nachfolgend das jeweilige Funktions-Prinzip darstellen.

12.5.2 Pulsamplitudenmodulation

Bei der *Pulsamplitudenmodulation* wird auf der Senderseite in einem zeitlichen Raster eine Abtastung des Amplitudenwertes der Nachrichtenfrequenz vorgenommen (Abb. 12.25).

Abb. 12.25b zeigt die Diagramme: Nachrichtensignal, Samplepuls und PAM-Signal in zeitlicher Zuordnung. Dieser so erzeugte, der Nachrichtensignal-Spannung analoge, zeitlich unterschiedliche Amplitudenwert wird dann auf die Übertragungsstrecke gegeben. Empfängerseitig lässt sich aus diesem zeitlichen Verlauf der PAM die Original-Nachricht rückgewinnen. Bedingung ist hierbei, dass die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch ist wie die höchste Nachrichtensignal-Frequenz.

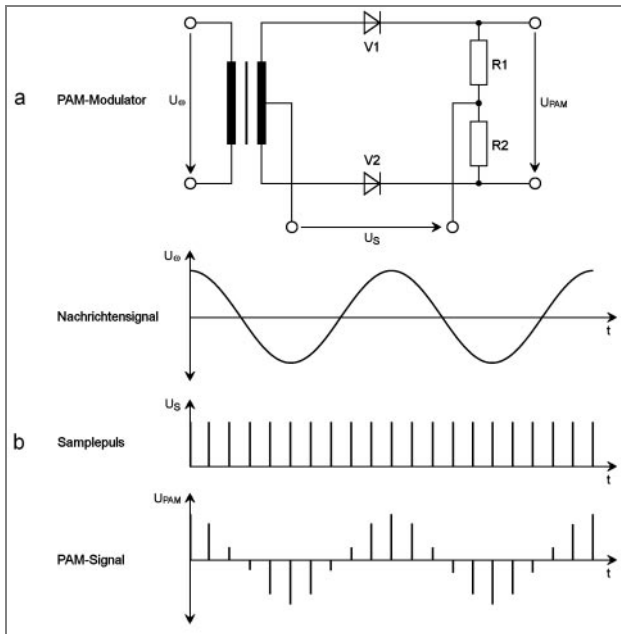


Abb. 12.25: Prinzipschaltung und Diagramme der Pulsamplitudenmodulation

Da die Abtastung mit einem sehr schmalen Impuls erfolgen kann, ist es möglich, auf einer Leitung mehrere Kanäle unterzubringen, die dann in zeitlicher Folge als hintereinander geschachtelte Abtastimpulse auftreten. Dieses Verfahren wird *Zeitmultiplex-Verfahren* genannt. Es muss gewährleistet sein, dass senderseitig ein Startimpuls mitgegeben wird, der die Kanalabtastimpulse empfängerseitig mit den senderseitigen synchronisiert, damit der jeweilige Kanalpuls des Multiplexsignals wieder rückgewonnen, das Multiplexsignal also wieder in die einzelnen Kanäle aufgespalten werden kann.

Das PAM-Signal kann beispielsweise mit einer Schaltung ähnlich dem »Gegentaktmodulator« aus Abschnitt 12.2.3 Abb. 12.9 erzeugt werden (Abb. 12.25a). Die Dioden $V1$ und $V2$ arbeiten dann als elektronische Schalter, welche die Augenblickswerte während des Abtastvorganges zum Ausgang durchschalten. Es entsteht dann ein PAM-Signal wie in Abb. 12.25b dargestellt. Die Abtastwerte bezeichnet man auch als Samples (Proben) des Nachrichtensignals. In diesem Signal sind die ursprüngliche Nachrichtenfrequenz sowie die Sample-Frequenz mit ihrem Oberwellenanteil und den zugehörigen Seitenbandfrequenzen, also ein Oberwellenspektrum, enthalten.

Die Demodulation des PAM-Signals kann deshalb durch ein Tiefpassfilter, welches verschiedentlich auch mit »Sample-and-hold-Schaltung« bezeichnet wird, vorgenommen werden (Abb. 12.26).

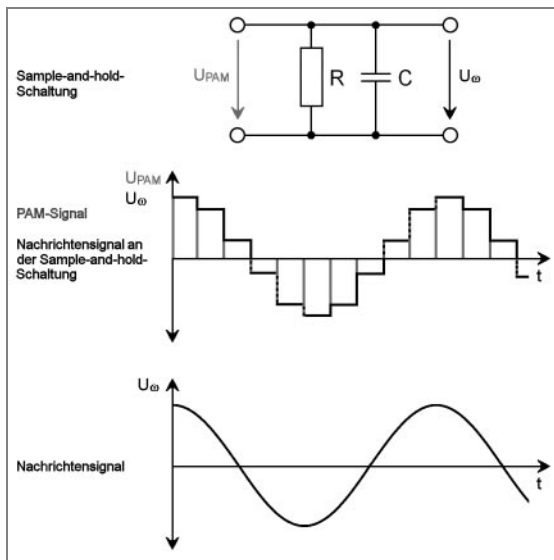


Abb. 12.26: Prinzipschaltung zur PAM-Demodulation

Der PAM-Puls gelangt auf den Kondensator C , wo der Spannungswert des jeweiligen Sample-Impulses für die Zwischenzeit gehalten wird.

12.5.3 Pulscodemodulation

Dieses Modulationsprinzip ist heute in der Nachrichtentechnik die übliche Modulationsart, um Nachrichten mit höchster Qualität, also geringster Fehlerrate zu übertragen und aufzuzeichnen. Vereinfacht dargestellt, funktioniert die Pulscodemodulation nach folgendem Verfahren: Das analoge Nachrichtensignal wird zunächst abgetastet, wie dies auch bei PAM erfolgt. Die so erhaltenen Spannungswerte werden anschließend quantisiert und in einen binären Zahlenwert umgesetzt (kodiert). Dieses binäre Signal gelangt auf den Übertragungsweg und wird am Empfangsort wieder dekodiert, in die ursprünglichen analogen Spannungswerte zurückgewandelt und in der bei PAM üblichen Schaltung, z. B. Sample-and-Hold-Schaltung mit Tiefpass, demoduliert.

Bei der analogen Signalverarbeitung sorgen die elektronischen Verstärker mit ihren typischen Übertragungs-Kennlinien für eine Begrenzung der Signalspannungsamplituden. Bei der digitalen Weiterverarbeitung muss im Rahmen der Quantisierung ein Bereich definiert werden, der hier die Begrenzung des Signals auf diesen größtmöglichen Wert festlegt. Würde die Signalamplitude über diesen Wert hinausgehen, so träte eine abrupte Begrenzung auf, die sich sehr störend, weil sehr stark verfälschend, auf das Signal auswirken würde, da der Quantisierungsbereich dann überschritten wäre.

Dieser Quantisierungsbereich ist in Quantisierungsstufen (Quantisierungs-Intervalle) eingeteilt. Die Stufenhöhe wird im Wesentlichen vom A/D-Wandler bestimmt, der den Spannungswert des abgetasteten Nachrichtensignals (PAM) quantisiert und in ein mehrstelliges Binärwort umsetzt. Dieses kann dann anschließend für die Übertragung und Aufzeichnung der Nachrichten kodiert werden.

In Abb. 12.27 ist das Prinzip der Abtastung und Quantisierung jeweils als Diagramm dargestellt.

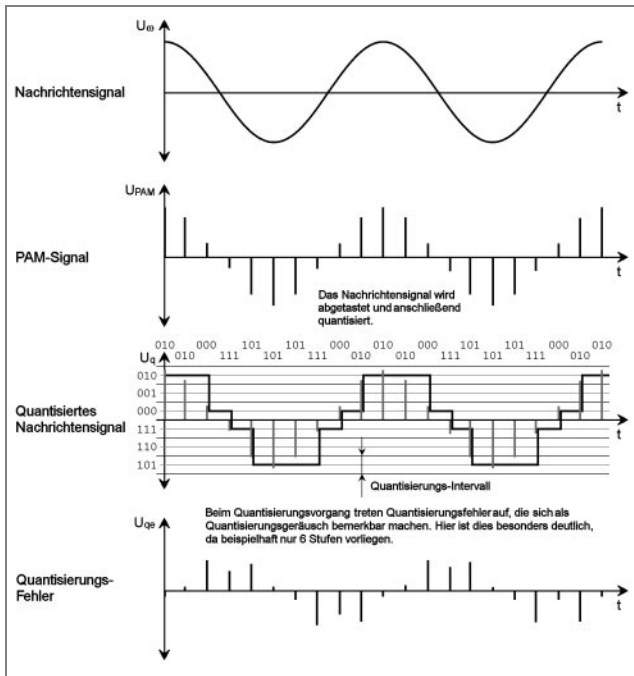


Abb. 12.27: Diagramme zur Pulsmodulation

Das PAM-Signal zeigt die Abtastpunkte entlang der Signalkurve. Die dem A/D-Wandler zugeführten Spannungswerte müssen nun einem Zahlenwert zugeordnet werden. Dabei ergeben sich Stufenhöhen, die von der Stellenzahl des Binärwortes abhängig sind. Diese Stufenhöhen stellen gewissermaßen die »Unschärfe« in der Genauigkeit dar, mit der das Binärwort den Spannungswert des A/D-Wandler-Einganges repräsentiert. Diese Ungenauigkeit in der Quantisierung äußert sich bei der Rückgewinnung des analogen Signals als Störung, das sogenannte *Quantisierungsgeräusch* auch *Quantisierungsrauschen* genannt. Diese Störung kann vernachlässigbar klein gehalten werden, wenn die Stufenhöhe auf ein erforderliches Minimum reduziert wird, d. h. das Binärwort die erforderliche Stellenzahl erhält.

Es gibt Verfahren, bei denen die Stufenhöhe gleichmäßig über die gesamte Signalamplitude ausgelegt ist. Andere weit bessere Verfahren passen die Stufenhöhe an die Hörkurve des menschlichen Ohres, die logarithmisch ist, an. Kleine Spannungswerte werden dann feiner abgestuft, da sie eine geringere Lautstärke repräsentieren als große, weil unser Ohr bei kleinen Schalldrücken empfindlicher reagiert. Auf diese doch recht komplizierten Verfahren, die im Rahmen der Kodierung und Dekodierung angewendet werden, soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Wir verweisen vielmehr auf einschlägige Literatur.

12.6 Aufgabenkatalog

12.6.1 Ungebundene Aufgaben

1. Was versteht man unter Modulation und Demodulation?
2. Aus welchen Komponenten besteht ein einfaches AM-Signal? Beschreiben Sie die Zusammensetzung anhand der Diagramme der Abb. 12.4...12.6.

3. Wie arbeitet die AM-Schaltung in Abb. 12.7? Erklären Sie die Wirkungsweise mit Hilfe der Diagramme von Abb. 12.8.
4. Warum werden bei der Nachrichtenübertragung die Signale üblicherweise einem Träger aufmoduliert? Nennen Sie zwei Gründe.
5. Was versteht man unter Amplitudenmodulation? Beschreiben Sie das AM-Prinzip.
6. Wie ist das Summensignal aus HF und NF als Voraussetzung der Amplitudenmodulation zusammengesetzt? Stellen Sie die Komponenten im Liniendiagramm dar.
7. Wie arbeitet die Schaltung zur Erzeugung eines AM-Signals mit unterdrücktem Träger? Erläutern Sie die Wirkungsweise am Beispiel des Gegentakmodulators.
8. Wie arbeitet die Schaltung zur Erzeugung eines AM-Signals mit unterdrücktem Träger? Erläutern Sie die Wirkungsweise am Beispiel des Ringmodulators.
9. Wie arbeitet die AM-Demodulatorschaltung von Abb. 12.15?
10. Wie ist das Prinzip der Frequenzmodulation (FM) eingerichtet?
11. Was versteht man unter Amplitudenumtastung und was unter Frequenzumtastung? Erläutern Sie das Prinzip.
12. Was versteht man unter Pulsamplitudenmodulation und was unter Pulsmodulation? Beschreiben Sie das jeweilige Prinzip.
13. Welche Bedingungen hinsichtlich des zu übertragenden NF-Stereo-Signals muss ein HF-Stereo-Verfahren erfüllen, welches den herkömmlichen FM-Übertragungskanal (z. B. UKW-Rundfunk) nutzt?
14. Wie erfolgt die Demodulation frequenzmodulierter Signale mit dem Ratio-Detektor? Erläutern Sie das Prinzip.
15. Wie erfolgt die Demodulation frequenzmodulierter Signale mit dem Koinzidenz-Demodulator (Quadraturdemodulator)? Erläutern Sie das Prinzip.
16. Wie ist das Stereo-Multiplex-Signal zusammengesetzt? Erläutern Sie die einzelnen Komponenten dieses Signals.
17. Welche Forderungen sind an das Stereo-Multiplex-Signal zu stellen, damit die Übertragung über den UKW-Rundfunk-Sender-Kanal erfolgen kann?

12.6.2 Multiple-Choice-Aufgaben

1. Was kann man zu dem Verfahren der Amplitudenmodulation nicht aussagen?
 1. Das AM-Prinzip besteht in der Amplitudenänderung des Trägersignals im Takte der Informationsfrequenz (z. B. Tonsignal).
 2. Laute Töne führen zu tiefen Einschnürungen und starken Dehnungen der Trägeramplituden und bei hohen Tönen folgen Einschnürungen und Dehnungen dicht aufeinander.
 3. Der Betrag der Amplitudenänderung ist für die Lautstärke (NF-Amplitude) und die Frequenz der Änderung für die Tonhöhe (NF-Frequenz) des zu übertragenden Tonsignals maßgebend.
 4. Das Verhältnis $\hat{u}_{\text{NF}}/\hat{u}_{\text{HF}}$ wird Modulationsgrad m genannt: $m = \hat{u}_{\text{NF}} / \hat{u}_{\text{HF}}$.
 5. Das Verhältnis $\hat{u}_{\text{NF}}/\hat{u}_{\text{HF}}$ wird Modulationsindex M genannt.

2. Welche Aussage zum Summensignal (Abb. 12.1 und 12.2) ist falsch?
 1. Die Augenblickswerte der beiden Spannungen U_{NF} und U_{HF} addieren sich in ihrer zeitlichen Folge, und es entsteht das Liniendiagramm U_{SUM} .
 2. Das Summensignal lässt sich über eine Weiche wieder in die beiden Bestandteile U_{NF} und U_{HF} trennen, denn es enthält ja nur die beiden addierten Komponenten U_{NF} und U_{HF} .
 3. Das Summensignal U_{SUM} enthält einen Gleichspannungsanteil
 4. Das typische Merkmal des Signals U_{SUM} im Liniendiagramm, wenn das Trägersignal mindestens eine um den Faktor 10 höhere Frequenz als das Tonsignal hat, ist im Diagramm dargestellt. Man erkennt, dass die positive Hüllkurve mit der negativen in Phase ist.
 5. Das Signal U_{SUM} wird auch Überlagerung (U_{HF} und U_{NF} überlagern sich) genannt, eine andere Bezeichnung für Addition.
3. Welche Aussage im Hinblick auf das AM-Signal mit Träger ist falsch?
 1. Das komplette AM-Signal setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen: Trägersignal Ω , unteres Seitenbandsignal $\Omega - \omega$ und Oberes Seitenbandsignal $\Omega + \omega$
 2. Im AM-Signal ist das Tonsignal direkt nicht enthalten.
 3. In der Regel liegt der HF-Anteil des Modulationsproduktes (Träger und Seitenbänder) im Spektrum sehr dicht an der NF, sodass er durch einfache Schaltungsmaßnahmen von der NF nicht getrennt werden kann.
 4. Ein Rückgewinnen des Tonsignals aus dem AM Signal ist nur noch über Demodulation möglich.
 5. Liegt der Modulationsgrad $m = 1$ vor, haben die Seitenbandspannungen die halbe Länge der Trägerspannung.
4. In den Abb. 12.7 und 12.8 ist eine einfache AM-Modulatorschaltung mit Diagrammen dargestellt. In welcher Aussage sind die Diagramme vollständig und richtig bezeichnet?
 1. U_{SUM} = Summensignal, U_1 = AM-Signal ohne Oberwellen, aber mit Gleichspannungsanteil, U_2 = Oberwellenanteil und Gleichspannungsanteil, U_{AM} = AM-Signal (Träger + Seitenbänder)
 2. U_{SUM} = Summensignal, U_1 = AM-Signal (Träger + Seitenbänder), U_2 = Oberwellenanteil und Gleichspannungsanteil, U_{AM} = Oberwellenanteil und Gleichspannungsanteil
 3. U_{SUM} = AM-Signal (Träger + Seitenbänder), U_1 = AM-Signal ohne Oberwellen, aber mit Gleichspannungsanteil, U_2 = Oberwellenanteil und Gleichspannungsanteil, U_{AM} = Summensignal
 4. U_{SUM} = Summensignal, U_1 = AM-Signal ohne Oberwellen, aber mit Gleichspannungsanteil, U_2 = AM-Signal (Träger + Seitenbänder), U_{AM} = Oberwellenanteil und Gleichspannungsanteil
 5. U_{SUM} = Summensignal, U_1 = AM-Signal mit NF-Signal, Oberwellen- und Gleichspannungsanteil, U_2 = AM-Signal mit Oberwellenanteil, U_{AM} = AM-Signal (Träger + Seitenbänder)
5. Welche Aussage zu der Modulationsschaltung mit Diagrammen (Abb. 12.7 und 12.8) ist richtig?
 1. Es ist eine AM-Modulationsschaltung, bei welcher der Träger unterdrückt wird.
 2. Der Schwingkreis filtert schmalbandig den Träger aus dem AM-Signal heraus.

3. Über den Kondensator $C1$ wird der Gleichspannungsanteil vom Schwingkreis ferngehalten.
4. Am Widerstand $R1$ tritt bereits das AM-Signal auf.
5. Die Schaltung kann nicht funktionieren, da die Diode V ein spannungsabhängiger Widerstand ist.
6. Welche Aussage kann zu Abb. 12.9 und 12.10 gemacht werden?
 1. Bei der Schaltung handelt es sich um einen Ringmodulator.
 2. Das Signal U ist das HF-Signal und U ist die NF-Komponente.
 3. An der Wicklung $N3$ entsteht kein Signal, weil die beiden Dioden gegensinnig geschaltet sind.
 4. Wenn Träger- und NF-Signal vorhanden sind, stellen sich an $N4$ nur unteres und oberes Seitenbandsignal ein.
 5. Wenn Träger- und NF-Signal vorhanden sind, stellen sich an $N4$ unteres und oberes Seitenbandsignal und ein Oberwellenanteil ein.
7. Welche Aussage zu der Schaltung und zu den abgebildeten Signalen ist richtig (Abb. 12.9 und 12.10)?
 1. Das Signal U am Eingang der Schaltung hat einen Phasensprung.
 2. Das Signal U ist immer um 180° gedreht, da es beide Dioden gleichzeitig durchschalten muss.
 3. Die Signale U_{N3} und U_{N4} weisen im Nulldurchgang der NF-Spannung einen Phasensprung auf.
 4. Wenn das NF-Signal nicht vorhanden ist, steht am Ausgang des Modulators nur noch die HF-Spannung.
 5. Wenn das HF-Signal nicht vorhanden ist, steht am Ausgang der Schaltung nur noch das NF-Signal.
8. Welche Aussage zu der in Abb. 12.11 und 12.12 dargestellten Schaltung mit Diagrammen ist richtig?
 1. Es handelt sich um einen Gegentaktmodulator.
 2. Die Spannung U_{am} enthält nur die beiden Seitenbandspannungen.
 3. Die Ausgangsspannung U_{am} zeigt das AM-Signal, bestehend aus der Seitenband- und der Trägerspannung.
 4. Wenn kein NF-Signal zugeführt wird, liegt die Trägerspannung am Ausgang der Schaltung.
 5. Wenn kein HF-Träger-Signal zugeführt wird, liegt die NF-Spannung am Ausgang der Schaltung.
9. In Abb. 12.15 ist eine Schaltung dargestellt. Um welche Schaltung handelt es sich hierbei?
 1. FM-Demodulator-Schaltung
 2. Ringmodulator
 3. Gegentaktmodulator
 4. AM-Demodulatorschaltung
 5. Stromversorgungsschaltung

10. Welche Aussage zu der Schaltung von Abb. 12.15 ist falsch?
1. Im Bild ist eine einfache Demodulatorschaltung, der sogenannte Hüllkurvendetektor, abgebildet.
 2. Das AM-Signal gelangt über den Übertrager auf die Demodulator-Diode mit ihrem Arbeitswiderstand R_a .
 3. Parallel zu R_a ist ein Ladekondensator C_L geschaltet, der sich auf den zeitlichen Scheitelwert der Spannung $\hat{u}_{Ra}(t)$ auflädt (Dieser Schaltungsteil ist von seiner Wirkungsweise her mit der bekannten Spitzengleichrichtung zu vergleichen.).
 4. Ein nachgeschaltetes Siebglied R_i/C_i sorgt dafür, dass die HF-Anteile des AM-Signals abgeleitet werden.
 5. Schließlich wird noch der entstandene Gleichspannungsanteil über den Kondensator C_k kurzgeschlossen, und das HF-Signal steht zur Weiterverarbeitung bereit.
11. Welche Änderung muss prinzipiell bei der Schaltung von Abb. 12.11 getroffen werden, wenn diese als Demodulatorschaltung für ein AM-Signal mit unterdrücktem Träger verwendet werden soll?
1. Die Dioden V3, V4 müssen umgepolt werden.
 2. Die Signale U_{am} und U_{ω} müssen getauscht werden.
 3. Die Dioden V1, V2 müssen umgepolt werden.
 4. Alle 4 Dioden müssen umgepolt werden.
 5. Die Signale U_{am} und U_{ω} müssen getauscht werden.
12. Welche Aussage zur Frequenzmodulation ist falsch?
1. Je größer die Tonsignalamplitude ist (je lauter der Ton), umso kleiner ist Δf_{HF} .
 2. FM erhält man, wenn die Trägersignalfrequenz f_{HF} im Takte der Tonsignalfrequenz f_{NF} geändert wird. Die Amplitude der Trägersignalfrequenz bleibt dabei konstant.
 3. Die Amplitude der Tonsignalspannung (Lautstärke) bestimmt den Betrag der Frequenzänderung Δf_{HF} .
 4. Die Frequenzänderung Δf_{HF} wird auch Frequenzhub oder einfach Hub genannt.
 5. Die Frequenzmodulation wird zur Übertragung der Toninformation in UKW-Rundfunk- und Fernsehtechnik angewendet.
13. Welche Aussage zur Schaltung in Abb. 12.19 ist falsch?
1. Es handelt sich um einen Differenz-Diskriminator.
 2. Die Schaltung stellt einen symmetrischen Ratio-Detektor dar.
 3. Die Innenwiderstände der Dioden V1 und V2 bewirken in Verbindung mit C_5 eine Begrenzung der HF-Amplitude.
 4. Das De-Emphasis-Glied senkt die NF-Amplitude bei 3,2 kHz um 3 dB ab.
 5. Das RC-Glied R_4, C_7 siebt die NF-Spannung ab.
14. Welche Aussage zu Abb. 12.20 ist nicht zutreffend?
1. Das Demodulator-Bandfilter der Schaltung von Abb. 12.19 ist dargestellt.
 2. Die Spannungen U_{AD} und U_{CD} sind immer gleich groß.

3. Im Nulldurchgang der NF-Spannung ist dieses Diagramm zutreffend.
 4. Wenn die eingespeiste Frequenz größer als die Resonanzfrequenz des Bandfilters ist, kann dieses Diagramm aufgenommen werden.
 5. Wenn die eingespeiste Frequenz kleiner als die Resonanzfrequenz des Bandfilters ist, kann dieses Diagramm aufgenommen werden.
15. Welche Aussage über die Wirkungsweise des in Abb. 12.21 dargestellten Koinzidenz-Demodulators ist falsch?
1. Das FM-Signal, hier in Form der ZF-Spannung gelangt am Ende des ZF-Verstärkers auf eine Weiche, wo es zu zwei Signalkomponenten aufbereitet wird.
 2. Die eine Komponente beinhaltet das unveränderte FM-Signal U_1 .
 3. Aus dem FM-Signal wird eine verzögerte Spannung U_2 gewonnen. Die Verzögerung wird durch Phasenverschiebung an einem Schwingkreis erreicht. Für die Mittenfrequenz beträgt sie $\varphi = 90^\circ$.
 4. Die Frequenzänderung $\pm \Delta f$ des Hubs bewirkt eine Phasenänderung von $\pm \Delta \varphi$, bezogen auf die Phasenlage bei Mittenfrequenz f_0 .
 5. Die beiden Signalkomponenten treffen nun wieder zusammen (Koinzidenz = Zusammentreffen) und steuern ein ODER-Glied mit nachfolgendem Hochpass, der die Tonsignal-Spannung U_{NF} ausgibt.
16. Welche Aussage zum Begriff der Tastung ist falsch?
1. Die einfachste Modulationsart, die man sich vorstellen kann, ist die Tastung des Trägersignals, indem man die Trägeramplitude im Takte der Information ein- und ausschaltet.
 2. Es gibt 3 unterschiedliche Verfahren der Tastung: Spannungsumtastung, Wellenumtastung und Trägerumtastung.
 3. Bereits durch Erfindung des Morse-Alphabets in den Anfängen der Telegraphie wurde die einfache Form der Nachrichtenübermittlung durch Tastung einer Trägeramplitude realisiert.
 4. Die Nachricht konnte zunächst noch nicht drahtlos übertragen werden, was aber dann später erstmals durch Marconi erfolgte.
 5. Die getragerte Nachrichtenübertragung durch Tastung des Trägers, der im Niederfrequenz- oder Hochfrequenzbereich arbeiten kann, lässt allerdings nur Informationen in digitaler Form, also als binärkodierte Zeichen zur Modulation zu.
17. Welche der nachfolgenden Puls-Modulationsarten ist falsch bezeichnet?
1. Pulsamplitudenmodulation (PAM)
 2. Pulsdauermodulation (PDM)
 3. Pulsträgermodulation (PTM)
 4. Pulsphasenmodulation (PPM)
 5. Pulsmodemodulation (PCM)
18. Welche Aussage zu Pulsamplituden- bzw. Pulsmodemodulation ist falsch?
1. Die Demodulation des PAM-Signals kann durch ein Hochpassfilter, welches verschiedentlich auch mit »Sample-and-hold-Schaltung« bezeichnet wird, erfolgen.

2. Bei der Pulsamplitudenmodulation wird auf der Senderseite in einem zeitlichen Raster eine Abtastung des Amplitudenwertes der Nachrichtenfrequenz vorgenommen.
 3. Bedingung bei der Pulsamplitudenmodulation ist, dass die Abtastfrequenz mindestens doppelt so hoch sein muss wie die höchste Nachrichtensignal-Frequenz.
 4. Bei PCM wird das analoge Nachrichtensignal zunächst abgetastet (PAM). Die so erhaltenen Spannungswerte werden anschließend quantisiert und in einen binären Zahlenwert umgesetzt (kodiert).
 5. Das binäre PCM-Signal gelangt auf den Übertragungsweg und wird am Empfangsort wieder dekodiert, in die ursprünglichen analogen Spannungswerte rückgewandelt und in der bei PAM üblichen Schaltung z. B. Sample and Hold-Schaltung mit Tiefpass demoduliert.
19. Was versteht man unter dem Begriff Stereophonie?
1. Das räumliche Sehen mit beiden Augen
 2. Das Hören zeitlich unterschiedlich auftretender Geräusche
 3. Die Aufspaltung der optischen Signale in zwei Kanäle L und R
 4. Die möglichst naturgetreue Aufnahme und Wiedergabe des räumlichen Höreindrucks.
 5. Das Unterdrücken von unerwünschten Geräuschen bei der Schallverarbeitung
20. Einer der folgenden Begriffserläuterungen aus dem Gebiet der Stereophonie ist falsch.
1. Laufzeitortung: Da die Ohren einen gewissen Abstand zueinander haben, ergeben sich Laufzeitunterschiede der Schallwellen, wenn diese nicht exakt von vorne oder hinten eintreffen. Entstammen die Wellen einer Schallquelle des linken Bereiches, so treffen diese am linken Ohr eher ein als am rechten. Die Differenz Δt als Laufzeitunterschied wird vom Gehirn in Schallrichtung umgesetzt. Trifft der Schall von rechts ein, so gilt die Funktion analog.
 2. Intensitätsortung: Das menschliche Gehör ist in der Lage, aufgrund unterschiedlicher Intensität der eintreffenden Schallwellen die Richtung der Schallquelle zu bestimmen. Hierbei wird im Gehirn aus Lautstärkeunterschieden die Richtung errechnet.
 3. Vorne-/Hinten-Ortung: Die Richtwirkung (Richtcharakteristik) unserer Ohren, die durch die Formgebung der Ohrmuscheln hervorgerufen wird, bewirkt einen Intensitätsunterschied der Schallwellen ganz bestimmter Frequenzbereiche, wenn diese von vorne oder von hinten her eintreffen. Aus diesen Unterschieden errechnet das Gehirn in Verbindung mit der Rechts-/Links- die Vorne-/Hinten-Richtung der Schallquelle.
 4. X-Y-Stereophonie: In der X-Y-Stereophonie wird die Rechts-/Links-Intensitätsortungsmöglichkeit unserer Ohren ausgenutzt. Hierzu sind 2 Kanäle (L, R) erforderlich. Da die X-Y-Stereophonie ausschließlich auf der Intensitätsortung basiert, muss die Laufzeitkomponente bei der Erzeugung der beiden Kanäle L und R ausgeschaltet werden.
 5. Kunstkopf-Stereophonie: Hierbei wird ein naturgetreues Abbild jedes Zuhörerkopfes angefertigt, um die optimale Übertragung über 4 Lautsprechergruppen zu gewährleisten.
21. Welche Aussage über die Surround-Technik ist falsch?
1. Diesem Signalformat liegt die Idee zugrunde, zusätzlich zu der Stereo-Basis, die bereits im X-Y-Stereophonie-Verfahren erreicht wird, die Umgebungs- und Hintergrundakustik einzubeziehen.

2. Aufnahmeseitig (mikrofonseitig) werden vier Kanäle zur Verfügung gestellt:
 - a) L-Kanal
 - b) R-Kanal
 - c) Mitten-Kanal (C-Kanal, Center)
 - d) Surround-Kanal.
3. Die Kanäle L und R müssen dem jeweiligen Ohr des Zuhörers wieder getrennt zugeführt werden, was die Verwendung von Lautsprechergruppen ausschließt.
4. Auf der Wiedergabeseite müssen aus den beiden L_i - und R_i -Kanälen wieder die 4 Einzelkanäle der Surround-Konfiguration gewonnen werden. Das Surroundsignal wird aus der Differenz der beiden Signale L_i und R_i gewonnen. Das Anti-Alias-Filter ist zur Unterdrückung der Störungen vorgesehen, die bei der digitalen Verarbeitung entstehen. Danach erfolgt eine Begrenzung des S-Signals auf 7 kHz und die Dolby-B-Dekodierung. Für alle 4 Signale wird eine Pegel-Regelung vorgenommen.
5. Vier NF-Kanäle werden zu den beiden L_i - und R_i -Kanälen kodiert. Die Pegel von C- und S-Kanal werden jeweils um 3 dB abgesenkt. C wird zu gleichen Teilen den beiden Signalen L und R aufaddiert. Für S erfolgt nach einer Bandbegrenzung zwischen 100 Hz und 7 kHz eine Rauschunterdrückung mit dem Rauschunterdrückungssystem Dolby-B, da diese Komponente mit nur geringer Amplitude wirksam wird. Dieses so aufbereitete Signal erfährt eine Phasenverschiebung von $+90^\circ$ für den L- und -90° für den R-Kanal. Diese beiden auf diese Weise einer Laufzeitverzerrung unterworfenen S-Komponenten werden schließlich dem jeweiligen Signal L und R aufaddiert, sodass die beiden getrennten Signale L_i und R_i entstehen.

Lösungen zu den Multiple-Choice-Aufgaben:

Aufgabe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Lösung	5	3	3	5	3	5	3	2	4	5

Aufgabe	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Lösung	2	1	1	2	5	2	3	1	4	5	3

Stichwortverzeichnis

8

8085-Einplatinencomputer 710
8-4-2-1-Code 548

A

A/D-Wandler 496
Abfallzeit 344
Ablauf eines Befehls 620
Abläufe auf Busleitungen 702
Ablaufplan 619
Ablenkkoeffizient 223
Ablenkspannung 223
Abschirmung 429
Abschlusswiderstand 438
Abschnüren 453
Abschnürstrecke 268
Abschnürung 268
Abschwächer 223
absoluter Nullpunkt 17
Absoluter Nullpunkt 33
Abstrahlung der Hochfrequenz 451
Abstrahlungsvorgang 453
Abweichung 771
Addition, Grundregeln 553
Adjunktion 529
Adressbus 610
Adresse 614
Adressen, numerische 617
Adressen, symbolische 617
Aggregatzustand 16
Aiken-Code 548
aktive Schaltungen 184
Akustik 747
akustischer Kurzschluss 761
akustischer Widerstand 754
Akzeptor 243
Alphanumerische Codes 552
Aluminium 243
AM-FM-Empfängermodul 511
Ammoniumchlorid-Lösung 19
Amplitudenbedingung 274, 364
Amplitudengang 178
Amplitudenmodulation (AM) 473
Amplitudenumtastung (ASK) 493
AM-Signal 474
Analog/Digital-Wandler 596
Anpassung 59
Anpassungsübertrager 155
Anstiegsflanke 227
Anstiegszeit 223, 342
Antenne 458
Antenne, Richtkeule 465
Antennen, Kenngrößen 464
Antennenfußpunkt 461
Antennen-Gewinnmaß 463
Antennenhöhe 460
Antennenlänge 460
Antimon 243
Antivalenz (XOR) 537
Antivalenzglieder 537
Anweisung 611
Äquivalenz (XNOR) 538
Arbeit 30
Arbeit in der Mechanik 36
Arbeit, elektrische 39
Arbeitsbereich 263
Arbeitsgebiet 263
Arbeitspunkt 297
Arbeitspunktstabilisierung 332
Arbeitstabelle 532
arithmetischer Mittelwert 121, 208
Arsen 243
ASCII-Code 552
Assembler 616
Assembleranweisungen 616
Assemblersprache 616
Assoziativ-Gesetze 540
astabile Kippschaltung 384
Astabile Kippschaltungen 579
Asymptote 365
asymptotisch 365
Asynchronzähler 586
Atom 15
Auffrisch-Schaltung 704
Aufladen eines Kondensators 71
Aufschaukelungsfaktor 177
Augenblickswert 125
Ausbreitungsgeschwindigkeit, Stromimpuls 431
Ausgabe-Operation, Beispiel einer 645
Ausgangskennlinienfeld 263
Ausgangsvariable 528
Ausgangswandler 197

Ausgangswiderstand 309
 Ausraumstrom 343
 Ausraumwiderstand 343
 Ausschaltzeit 342
 Außenleiter 25
 Außenwiderstand 52
 Avalanche-Effekt 255

B

Bahnwiderstand 268
 Bandbreite 167
 Bandbreite (UKW-Rundfunk) 510
 Bandfilter, mechanische 196
 Basis 257
 Basisbahnwiderstände 270
 Basiseinheit 29
 Basis-Flipflops 569
 Basisschaltung 302
 Basisschaltung, Ausgangswiderstand 304
 Basisschaltung, Eingangswiderstand 304
 Basisschaltung, Leistungsverstärkung 305
 Basisschaltung, Phasenbeziehung 303
 Basisschaltung, Spannungsverstärkung 304
 Basisschaltung, Stromverstärkung 304
 Basisspannungsteiler 297
 Basisvorwiderstand 297
 Batteriespannung 56
 BCD-Codes 551
 BCD-Zähler 590
 Befehl 611
 Befehlsdekoder 621
 Befehlsformat, allgemeines 621
 Befehlsregister 620
 Befehlstabellen 629
 Befehlszähler 620
 Befehlszyklus 623
 Beleuchtungsstärke 126, 248
 Bell 439
 Berührungsschutz-Kondensator 25
 Berührungsspannung 25
 Berührungswiderstand 24
 Betriebsmessgeräte 206
 Bewertbare Codes 547
 bifilare Wicklung 154
 bipolare ICs 558
 Bipolar-Transistor 257
 Bistabile Kippschaltungen 569
 bistabile Multivibratoren 569
 Bit 547
 Bits 615
 Blindenergie 133
 Blindleistung 133

Blindleistung, induktive 148
 Blindleistung, kapazitive 135
 Blindwiderstand, induktiver 147
 Blindwiderstand, kapazitiver 133
 blocking oscillator 379
 Blockschaltbild 226
 Bodenwellen 456
 Bogenmaß 125
 Bogenstück 125
 Bootstrap-Schaltung 331
 Bor 243
 Brücke, abgegliche 221
 Brückenschaltung 220
 Bus 610
 Byte 547

C

CD-Scheibe 758
 Chemische Wirkung 23
 Chip 558
 C-MOS-Technologie 563
 Code 547
 Codewörter 547
 Codezeichen 547
 Colpitts-Oszillator 369
 Compact Disc 758
 CPU 610
 Curie-Temperatur 92

D

D/A-Wandler mit Spannungsausgang 595
 D/A-Wandler mit Stromausgang 594
 Dachschräge 77
 Dämpfung 142
 Dämpfungsmaß 439
 Daten 611
 Datenbus 610
 Datenspeicher 610
 Daten-Speicher 704
 dB 180
 De Morgan'sche Gesetze 542
 De-Emphasis 488
 De-Emphasis-Glied 488
 Defektelektronen 242
 Delon-Schaltung 293
 Demodulation 473, 483
 Dezimalsystem 548
 Dezimeterwellen 458
 DIAC 274
 Dielektrikum 65
 Dielektrizitätskonstante, absolute 64
 Dielektrizitätszahl, relative 65

- Differenz-Eingangsspannung 395
 - Differenzierglied 77, 105
 - Differenzverstärker 393
 - Diffusion 249, 251
 - Diffusionskraft 249
 - Digital/Analog-Wandler 594
 - Digitaltechnik 527
 - Dimmer-Schaltung 280
 - Dipol, gestreckter 462
 - Dipolantennen 462
 - direkte A/D-Wandler 596
 - Disjunktion 529
 - disjunktive Normalform 532, 543
 - diskrete Bauelemente 61
 - Distributiv-Gesetze 541
 - Division, Grundregeln 556
 - D-Kippglied 574
 - Dolby-Surround-Pro-Logik-Dekodierung 336
 - Dolby-Surround-Pro-Logik-Kodierung 336
 - Donator 243
 - Doppelsuperprinzip 509
 - Doppel-T-Filter 185, 377
 - Doppel-T-Glied 185, 377
 - Doppel-T-Oszillator 377
 - Dotieren 243
 - Dotierungsgrad 251
 - Drahtsorten für Spulen 95
 - Drain 268
 - Drainstrom 268
 - D-Regelung 775
 - Dreheisenmesswerk 209
 - Drehmagnetmesswerk 208
 - Drehspule 207
 - Drehpulsmesswerk 97, 207
 - Druckamplitude 747
 - Druckkammerlautsprecher 764
 - d-Schicht 458
 - DTL-Schaltungen 559
 - Dual-Slope-Verfahren 600
 - Dunkelstrom 254
 - Durchbruch 254
 - Durchbruchspannung 255
 - Durchlassbereich 251
 - Durchlasskennlinien 251
 - Durchlasskurve 177
 - Durchlassrichtung 250
 - Durchlassspannung 251
 - Durchlassstrom 250
 - Durchschlag 68
 - Durchschlagfestigkeit 68
 - Dynamische Eingänge 567
 - dynamische Speicher 704
 - Dynamisches Mikrofon 751
- E**
- ECL-Schaltungen 561
 - EEPROM 610
 - effektive Höhe, Antenne 460
 - Effektivwert 126
 - Eigenfrequenz 80, 167
 - Eigeninduktivität 80
 - Eigenleitung 242
 - Einerkomplement 555
 - Eingangsimpedanz 233
 - Eingangskennlinienfeld 261
 - Eingangsvariablen 528
 - Eingangswandler 197
 - Eingangswiderstand 308
 - Eingangswiderstand, dynamischer, differentieller 261
 - Einheitskreis 123
 - Einpuls-Mittelpunkt-Schaltung 287
 - Einschaltimpuls 344
 - Einschaltzeit 342
 - einschrittige Codes 549
 - Einweggleichrichter-Schaltung 287
 - Einweggleichrichtung, Ladekondensator 288
 - Elektrik 15
 - Elektrische Felder 160
 - elektrische Feldkonstante 64
 - elektrischer Strom 17
 - Elektrisches Feld 33, 61
 - Elektrisches Pendel 19
 - Elektrizität 15
 - Elektrizitätserzeugung 122
 - elektroakustische Wandler 747
 - Elektroden 19
 - elektrodynamischer Lautsprecher 760
 - elektrodynamisches Messwerk 209
 - Elektrolyt 23
 - Elektrolytkondensatoren, Reihenschaltung 79
 - Elektromagnet 81
 - Elektromagnetische Felder 160
 - elektromagnetische Schwingungen 451
 - Elektromagnetische Verträglichkeit 159
 - Elektromotorische Kraft 53
 - Elektronen, quasifreie 242
 - Elektronengas 17
 - Elektronenschalen 16
 - Elektronenstrahl 223
 - Elektronenüberschuss 18
 - Elektronik 15
 - Elektronische Halbleiterelemente 241
 - Elektroschall 747

Elektroskop 18
Elektrostatische Aufladung 159
elektrostatische Lautsprecher 765
elektrostatisches Messwerk 210
Elektrostriktion 65, 140, 197, 429
Emitter 257
Emitter-Grenzschicht 261
Emitterschaltung 299, 535
Emitterschaltung, Ausgangswiderstand 301
Emitterschaltung, Eingangswiderstand 301
Emitterschaltung, Leistungsverstärkung 302
Emitterschaltung, Phasenlage 300
Emitterschaltung, Spannungsverstärkung 300
Emitterschaltung, Stromverstärkung 302
Emitterwiderstand, Einfluss auf
 Eingangswiderstand 310
Empfangsfrequenz 507
Empfindlichkeit 206
Endausschlagswert 207
End-Transistoren 332
Energie, kinetische 255
Energiewandler 19
Entladung eines Kondensators 74
Entmagnetisierung 756
epitaktische Schicht 251
Epitaxial-Planar-Diffusions-Technologie 251
Epitaxie 251
EPROM 610
Erder 26
Erdung 26
Erregerspule 86
Ersatzschaltung 53
Erweiterungseingänge 567
E-Schicht 457
ESD-Armband 269
ESD-Fußböden 269
ESD-Maßnahme 160
ESD-Matten 269
ESD-Schutzmaßnahmen 269
Eulersche Zahl 73
Exponentialtrichter 764
Exzess-3-Code 548

F

Fächerdipol 463
Fading 457
Faltdipol 462
Faltrichter 764
Farad 66
Farbkennzeichnung des Schutzleiters 25
Fehlererkennungs_codes 550
Feinabschwächer 223

Feinmessgeräte 206
Feld, elektrisches 242
Feld, magnetisches 81
Feldeffekt-Transistor 268
Feldkraft 249
Feldstärke, elektrische 67
Feldstärkedurchbruch 255
Fernfeld 452
Fernsehton 487
Ferritantennen 461
Ferrite 93
Ferritstab 461
ferromagnetische Stoffe 83
Filter 1. Ordnung 180
Filter 2. Ordnung 180
Filterschaltungen, mechanische 194
Flächendioden 251
Flags 625
Flankendemodulator 488
Flankensteilheit 177
Flankensteuerung 567
Flash-Umsetzer 597
Flipflops 569
Flusswandler 380
FM-Sender 506
Formanten 749
Fortpflanzungsgeschwindigkeit, Stromimpuls 435
Fotodioden 252
Fotoeffekt, innerer 248
Fotoelement 20, 253
Fotoemission 248
Fotowiderstand 249
Fotowiderstände 247
Freilaufdiode 107, 347
Freiwerdezeit 387
Frequenz 124
frequenzabhängige Schaltungen 166
Frequenzhub 483, 486
Frequenzmodulation 486
Frequenzteiler 591
Frequenzteilung 574
Frequenzumtastung (FSK) 493
Führungsgröße 771
Fußpunktswiderstand 462

G

Gallium 243
Galvanisches Element 31
Ganzwellenstrahler 463
Gasentladungsröhre 106
Gate 268, 275
Gauß, Carl Friedrich 88

Gegeninduktionsspannung 153
 Gegeninduktivität 153
 Gegenkopplung 299, 361
 Gegentakt-Endstufe 331
 Gegentaktmodulator 479
 Gegentaktprinzip 294
 Gegentakt-Verstärker 330
 Gehäusetemperatur 340
 Generation 242
 Geradeausempfänger 506
 Germanium 241
 Gesamtverlustleistung 337
 gesättigte Logik 561
 Getaktete Kippglieder 571
 getaktetes JK-Kippglied 573
 getaktetes RS-Kippglied 571
 Gleichrichterschaltungen 287
 Gleichspannung, pulsierende 121
 Gleichspannungswandler 380
 Gleichstromkreis 29
 Gleichstromleistung 129
 Gleichstrom-Verstärkungsgruppen 310
 Gleichtaktsteuerung 394
 Glimmlampe 106
 Glixoncode 550
 Graetz-Schaltung 292
 Gray-Code 548
 Greinacher-Schaltung 296
 Grenzfrequenz 167, 179, 333
 Grenzfrequenz, obere 167, 179
 Grenzfrequenz, untere 167, 179
 Grenzwellen 458
 Grobabschwächer 223
 Großsignalverstärkung 297
 Grunddämpfung 197
 Grundrechenarten im Dualsystem 553
 Grundschiwingung 364
 Gyrotoren 267

H

Halbaddierer 556
 Halbleiter 17
 Halbleiter, elektronische 241
 Halbwellenstrahler 463
 Hamming-Distanz 550
 Hardware 609
 Harmonielehre 364
 harmonische Schwingung 364
 Hartley-Oszillator 368
 Heaviside-Schicht 457
 Heißleiter 244
 Heißleiter, fremderwärmte, eigenerwärmte 244

Hellstrom 254
 Hexadezimal-System 548
 HF-Eisen 93
 HF-Stereotechnik 481
 Hilfsträger 482
 Hilfsträgerkanal 483
 Hitzdrahtmesswerk 210
 Hochfrequenz, Leitungseigenschaften 429
 Hochfrequenzleitung 430
 Hochfrequenzleitung, Dämpfungsverhalten 439
 Hochfrequenzträgerwelle (HF) 505
 Hochpass 179
 Hohlleiter 466
 Hörempfindlichkeit 747
 Hörschwellen 748
 Hörkurven 748
 Hörschwelle 748
 Hub 483, 486
 Hubfrequenz 486
 Hüllkurvendetektor 483
 Huth-Kühn-Effekt 370, 507
 Hypotenuse 124
 Hysteresis 756
 Hysteresis-Schleife 92

I

IG-FET 268
 Impedanz 138, 139
 Impedanzwandler 405
 Indium 243
 Induktion 86, 88
 Induktionsspannung 99
 Induktiver-3-Punkt-Oszillator 368
 Induktivität 80, 101
 Induktivität im Gleichstromkreis 102
 Induktivitäten, Reihenschaltung von 150
 Influenzelektrizität 18
 initialisieren 642
 Innenwiderstand 52
 Integrierglied 77, 105
 integrierte monostabile Kippglieder 578
 Integrierte Schaltungen 558
 Intensitätsortung 334, 755
 Interrupt-Technik 646
 Intrinsic-Leitung 242
 Inverter 529
 Ion 15
 Ionisation 457
 ionisiert 68
 Ionosphäre 457
 I-Regler 774
 Isolationswiderstand 438

Isolator 17
Istwert 771

J

J-FET 268
J-FET, n-Kanal 268
J-FET, p-Kanal 268
JUG-FET 268
jungfräuliche Kurve 92

K

kalibrierte Stellung 223
Kanal 268
Kanalbreite (UKW-Rundfunk) 510
Kapazität 61
Kapazitätsdiode 251
Kapazitätsdiode, Abstimmuschaltung 252
Kapazitiver-3-Punkt-Oszillator 369
Kaskade 212, 296
Katheten 127
Kathodenstrahlröhre 222
Kelvin 33
Kennwiderstand 207, 213
Kernformen von Spulen 94
Kernmagnetmesswerk 208
Kippgenerator 273
Kippschaltungen 569
Kippvorgang 569
Kirchhoffsches Gesetz, 1. 55
Kirchhoffsches Gesetz, 2. 52
Kleinsignalbetrieb 316
Klemmenspannung 52, 53
Kniespannung 251
Knotenregel 55
Koaxialkabel 467
Koaxialleitung 430
Koaxialleitungskreis 436
Kode 547
Kodierung 547
Koerzitiv-Feldstärke 92
Kohlemikrofon 750
Koinzidenz-Demodulator 491
Kollektor 258
Kollektorschaltung 305
Kollektorschaltung, Ausgangswiderstand 306
Kollektorschaltung, Eingangswiderstand 306
Kollektorschaltung, Leistungsverstärkung 307
Kollektorschaltung, Phasenbeziehung 305
Kollektorschaltung, Spannungsverstärkung 306
Kollektorschaltung, Stromverstärkung 307
Kommentar-Feld 616
Kommutativ-Gesetze 539

Komplementär-Transistoren 330
Komplementbildung 554
Kondensator 61
Kondensator im Wechselstromkreis 130
Kondensator mit Parallelwiderstand 140
Kondensator und Widerstand in Reihenschaltung 137
Kondensator, Phasenlage zwischen Strom und Spannung 132
Kondensator, vereinfachtes Ersatzschaltbild 137
Kondensatoren, Parallelschaltung 79
Kondensatoren, Reihenschaltung 77
Kondensatormikrofon 752
Kondensatorverluste 140
Konjunktion 527
konjunktive Normalform 534, 544
Konstantstromquelle 395
Konvektions-Prinzip 338
Konverter 466
Kopfhörer 747, 765
Kopplung, induktive 192
Kopplung, kapazitive Fußpunkt- 193
Kopplung, kapazitive Kopfpunkt- 192
Kopplung, kritische 189
Kopplung, lose 152
Kopplung, Phasenwinkel 193
Kopplung, überkritische 189
Kopplung, unterkritische 189
Kopplungsfaktor 151
Körperschluss 25
Kraft 31
Kraftwirkung, magnetische 96
Kreisfrequenz 145
Kreuzdipol 465
kristalline Struktur 16
Kristallmikrofon 751
Kühlkörper 338
Kunstkopf-Stereophonie 335
Kupfer 16
Kurzschluss 25, 59
Kurzschlussstrom 59
Kurzweille 457
Kurzwellen 458
KW-Sender 505

L

Label-Feld 616
Ladekondensator 289, 292
Ladungseinheit 29
Ladungsmenge 29
Ladungsträgermobilität 256
Ladungstrennung 19

Ladungsunterschied 30
 Ladungsverschiebung 18
 Längstwellen 457
 Längswellen 451
 Langwellen 458
 Lastwiderstand 52
 Laufzeit 432
 Laufzeitortung 334
 Lautsprecher 747
 Lautsprecher, elektrodynamischer 97
 Lautsprecher, Montagerichtlinien 761
 Lautsprecher-Weiche 763
 Lawinen-Effekt 255
 LC-2-Kreis-Bandfilter 188
 LC-3-Kreis-Bandpass 187
 LC-Bandfilter-Schaltungen 187
 LC-Kreise, versetzt abgeglichen 188
 LC-Oszillatoren 366
 LC-Parallelschwingkreis 172
 LC-Parallelschwingkreis Aufschaukelung 173
 LC-Parallelschwingkreis, äquivalenter
 Parallelwiderstand 174
 LC-Parallelschwingkreis, Spannungsüberhöhung
 172
 LC-Schwingkreis 166, 479
 LC-Schwingkreise 507
 LC-Siebschaltung 166
 LC-Tiefpass 182
 LDR 247
 Lecherleitung 434
 Lecherleitung, kurzgeschlossene 435
 Lecherleitung, offene 434
 Leckströme 79
 Leerlauf 53, 59
 Leerlaufspannung 59
 Leistung in der Mechanik 36
 Leistung, elektrische 39
 Leistungsanpassung 59, 438
 Leistungsdämpfung 439
 Leistungs-Endstufe 330
 Leistungsverstärker 330
 Leiter 17
 Leitfähigkeit, (spezifische) 32
 Leitkreis 166
 Leitungskreise 433
 Leitungsmechanismus, bipolarer 242
 Leitungsverluste 438
 Leitwerk 610
 Leitwert 32
 Lenzsches Gesetz 99, 103, 146, 207
 Leuchtdioden 254
 Leuchtfleck 223

Lichtgeschwindigkeit 431
 Lichtmenge 248
 Lichtstrom 248
 Lichtwirkung 22
 LIFO-Struktur 692
 lineare Verzerrungen 488
 Liniendiagramm 121
 Links-Information 481
 Lithium 16
 LNB 466
 Löcher 242
 logarithmische Schreibweise 386
 Logarithmus naturalis 387
 Logikfamilien 558
 Logiksymbol 528
 logische Gleichung 528
 logische Grundfunktionen 527
 logischer Zustand 528
 Longitudinal-Wellen 451
 Löschkopf 756
 Loudness 749
 Low-Power-Schottky-TTL 560
 LSB 626
 L-Signal 481

M

magnetisch hart 83
 magnetisch weich 83
 magnetische Abschirmung 208
 magnetische Durchflutung 84
 Magnetische Felder 160
 magnetische Feldkonstante 87
 magnetische Feldstärke 85
 magnetische Flussdichte 86
 magnetische Induktion 98
 Magnetische Induktion 21
 magnetische Kopplung, Induktivitäten ohne 150
 magnetische Kraftwirkung 96
 magnetische Leitfähigkeit 87
 magnetische Verkopplung 149
 Magnetische Wirkung 23
 magnetischer Fluss 86
 magnetischer Kopplung, Induktivitäten mit 151
 magnetischer Kreis 84
 magnetischer Kurzschluss 208
 Magnetisierungskurve von Dynamoblech 90
 Magnetnadel 81
 Magnettonverfahren 755
 Majoritätsträger 244, 249, 258
 Marconi-Antenne 459
 Maschenregel 52
 Maschinencode 616

- Maschinensprache 616
 Masse 36
 Maßeinheit 205
 Master-Slave-Kippschaltungen 575
 Maxterme 544
 Mehrschichtelemente 270
 Meißner-Oszillator 367
 Meißner-Oszillator, Parallelspeisung 367
 Meißner-Oszillator, Serienspeisung 367
 Mess-Anordnung 206
 Messbereichsspannung 212
 Messen 205
 Messfehler 213
 Messfehler, Spannungs- 217
 Messfehler, Strom- 218
 Messgerät 206
 Messgeräte, direkt anzeigende 206
 Messgleichrichter 208
 Messgröße 205
 Messinstrument 206
 Messleitungen 235
 Messprinzip 205
 Messtechnik 205
 Messverfahren 205
 Messverfahren, analoges 206
 Messverfahren, digitales 206
 Messverfahren, direktes 205
 Messverfahren, indirektes 206
 Messwerk 206
 Messwert 205
 Metalle 16
 metastabile Arbeitslage 575
 microcontroller 610
 Mikrocomputer 610
 Mikrocomputertechnik 609
 Mikrofon 747
 Mikrofone 749
 Mikrofone, Richtcharakteristik 753
 Mikroprozessor 610
 Mikroprozessor 8085 609
 Mikroprozessor 8085, Anschlüsse 705
 Mikroprozessor 8085, Grundlagen zur Programmierung 622
 Mikroprozessor 8085, Interruptsteuerung 708
 Mikroprozessor 8085, serielle Ein-/Ausgabe 708
 Mikroprozessor 8085, Taktsteuerung 708
 Mikroprozessors 8085, alphabetische Befehlsliste 698
 Mikroprozessors 8085, Befehle 626
 Mikroprozessors 8085, Programmierbeispiele 646
 Millimeterwellen 458
 Minimalcodes 548
 Minoritätsträger 244, 258
 Minterme 543
 Mischen 467
 Mischprodukt 509
 Mischspannung 121
 Mischvorgang 508
 Mitkopplung 363
 Mittelleiter 25
 Mittelwellen 458
 Mittelwellenbereich 457
 Mittenfrequenz 486
 Mittenspannung 332
 Mnemonics 616
 Modem 494
 Modulation 473
 Modulationsarten 473
 Modulationsgrad 474
 Modulationsindex 487
 Modulationsprodukt 477
 Modulationsschaltung (AM) 478
 Modulator 475
 Molekül 15
 Molekularmagnet 83
 Monoflop 575
 Monoflop, nicht nachtriggerbar 577
 monolithisch integrierte Schaltungen 558
 monostabile Kippschaltung 575
 monostabile Kippschaltung, IC 74123 578
 MOS-FET 268
 MOS-FET, Anreicherungstyp 269
 MOS-FET, Verarmungstyp 269
 MOS-FETs, Grundtypen, prinzipielle Kennlinien 268
 MOS-Inverter 562
 MSB 626
 Mumetall 93
 MW-Sender 505
- N**
- Nachrichtentechnik 121
 Nachtriggern 578
 Nahfeld 452
 Nahfeldenergie 452
 NAND-Basis-Flipflop 571
 NAND-Verknüpfung 536
 Nebenwiderstand 214
 Negation 529
 negativ 15
 Negator 529
 Neukurve 92
 Newton, Sir Isaac 36
 NICHT-Funktion 529

NICHT-Funktion (Kontakttechnik) 534
 NICHT-Funktion (Transistortechnik) 535
 Nichtleiter 17
 NICHT-Verknüpfung 529
 Niederfrequenz (NF) 505
 n-leitend 243
 NOR-Basis-Flipflop 570
 Nordpol 81
 normierte Darstellung 167
 NOR-Verknüpfung 537
 NTC-Widerstände 244

O

Oberschwingung 364
 Oberwelle 364
 ODER-Funktion 528
 ODER-Funktion (Diodentechnik) 533
 ODER-Funktion (Kontakttechnik) 532
 ODER-Verknüpfung 528
 Offsetabgleich 406
 Offset-Parabolantennen 466
 Ohmscher Widerstand 31
 Ohm'sches Gesetz 34
 Ohmsches Gesetz für die Wechselstromtechnik 128
 Open-Collector-Schaltungen 565
 Open-Drain-Schaltungen 565
 Operanden-Feld 616
 Operations-Feld 616
 Operationsschritt 623
 Operationsverstärker 393
 Operationsverstärker mit Gegenkopplung 397
 Operationsverstärker ohne Gegenkopplung 397
 Operationsverstärker, addierender 408
 Operationsverstärker, Differenzierender 417
 Operationsverstärker, Differenzierer 417
 Operationsverstärker, Differenzverstärker 410
 Operationsverstärker, Frequenzkompensation 408
 Operationsverstärker, Integrator 412
 Operationsverstärker, integrierender 412
 Operationsverstärker, invertierender Verstärker 399
 Operationsverstärker, Komparator 421
 Operationsverstärker, Kompensationsschaltungen 405
 Operationsverstärker, nicht invertierender Verstärker 403
 Operationsverstärker, Offset-Spannungs-Kompensation 406
 Operationsverstärker, Schmitt-Trigger 423
 Operationsverstärker, Spannungs-Offset 402
 Operationsverstärker, Subtrahierer 410
 Operationsverstärker, Summierer 408
 Operationsverstärker, Übertragungskennlinie 398
 Ordnungszahl 243
 Oszillatoren, nichtsinusförmige Schwingungen 364
 Oszillatorfrequenz 508
 Oszillator-Signal 467
 Oszilloskop 222
 Oszilloskop, Einkanal-, Zweikanal- 231

P

Paarbildung 242
 Parabol-Antenne 466
 Paralleldrahtleitung 437
 parallele A/D-Wandler 596
 Parallelschaltung von Induktivität und ohmschem Widerstand 164
 Parallelspeisung 296
 Parameter 32
 Paritätsbit 550
 PD-Regelung 775
 Pegel, relativer, absoluter 445
 Pegelmaß 445
 Periode 124
 Periodensystem, (Auszug) 243
 Permanentmagnet 81
 Permeabilität 86
 Permeabilität, relative 87
 Permeabilitätszahl 87
 Phasenanschnittsteuerung 277
 Phasengang 179
 Phasenschieberglied 279
 Phasenschieberkette 372
 Phasenschieber-Oszillator 370
 Phasenwinkel 141
 Phosphor 243
 Photonen 248
 Photovoltaik 254
 Physik 15
 PID-Regelung 775
 Piezoeffekt 21, 197
 piezoelektrischer Effekt 194
 Piezokeramik 21
 Pilotfrequenz 483
 Pilotton 483
 Pinch-Effekt 95
 pin-Diode 256
 PI-Regelung 774
 Planar-Epitaxial-Diffusions-Verfahren 267
 Planartechnik 558
 Plasma 16, 106
 p-leitend 243

- Polarisationsebenen, Antennen 459
- Pole, magnetische 81
- Ports 610
- positiv 15
- Potentialdifferenz 30
- Potentiometer 57
- Preemphasis 483
- Pre-Emphasis 488
- P-Regler 773
- Programm 609
- Programmiersprachen 618
- Programmspeicher 610, 704
- PROM 610
- Prozessor 610
- Prozessor 8085, Adressierungsarten 623
- Prozessor-Zyklus 623
- Prüfbit 550
- Prüfen 206
- Pseudobefehle 616
- Pseudotetraden 549
- PTC-Widerstände 246
- Pull-up-Widerstand 565
- Pulsamplitudenmodulation 494
- Pulscodemodulation 496
- Pulsmodulation 494
- Punktkontakt-Dioden 250
- Pythagoras 138, 162
- Pythagoras, Lehrsatz des 127
- Q**
- Quadraturdemodulator 491
- Quantisierung 206
- Quantisierungsgeräusch 497
- Quantisierungsrauschen 497
- Quantisierungsstufen 496
- quasifreie Elektronen 16
- Quasifreie Elektronen 33
- Quellenstrom 59
- Querstrom 58
- R**
- Radio-Empfangs-Modul 510
- RAM 611
- Ratio-Detektor 489
- Raumladegebiet 249
- Raumwellen 456
- Rauschen 364
- Rauschen, weißes 364
- RC-Bandpässe 183
- RC-Bandsperre 185
- RC-Hochpass 184
- RC-Oszillatoren 370
- RC-Tiefpass 184
- Rechenwerk 610
- Rechteckformer 585
- Rechteckkurve, Zusammensetzung der 365
- Rechts-/Linksortung 335
- Rechts-Information 481
- redundante Codes 549
- Redundanz 549
- Reflektor 464
- refresh circuit 704
- Regelgröße 771
- Regelkreis, Blockschaltbild 772
- Regelkreis, Signalflussplan 772
- Regelschwingungen 774
- Regelung 771
- Register 592, 610
- Register des 8085, Verwendung der 623
- Reihenschaltung ohmscher Widerstände 51
- Reihenschaltung von Induktivität und ohmschem Widerstand 162
- Reihenschwingkreis 166
- Rekombination 242
- Remanenz 91
- Resonanz, mechanische 195
- Resonanzbedingung, LC-Schwingkreis 169
- Resonanzerscheinung 183
- Resonanzkurven 167
- Resonanzüberhöhung 183
- Resonator 197
- Restmagnetismus 90
- retardierte Ausgänge 575
- Richtantennen 463
- Richtcharakteristik 335
- Richtcharakteristik Dipol 463
- Richtungshören 334
- Ringmodulator 480, 485
- Ringzähler 593
- ROM 611
- RS-Flipflop 569
- R-Signal 481
- Rückkopplung 361
- Rückkopplungsfaktor 361
- Rückwärtszähler 588
- S**
- Sägezahngenerator 226
- Sägezahnoszillator 274
- Sägezahnspannung 365
- Sägezahnwandler 598
- Sample and hold Schaltung 495
- Sample-Frequenz 495
- Samples 495

- Satellitenempfang 466
- Sättigungsbereich 263
- Sättigungskennlinie 263
- Sättigungsspannung 263, 273, 341
- Saugkreis 166
- Schall 451
- Schalldruckmesser 747
- Schallschnelle 747
- Schallwellen 123
- Schaltalgebra 527
- Schaltelement 53
- Schaltelement, passives 61
- Schalthysteresis 423, 772
- Schaltkennlinien 345
- Schaltnetzteil 382
- Schaltungsfamilien 558
- Schaltvariablen 528
- Schaltwerke 586
- Schaltzeiten 342
- Scheinwiderstand 138, 139
- Scheitelwert 125
- Schieberegister 556, 592
- Schleifenverstärkung 362
- Schmerzgrenze 748
- Schmitt-Trigger 584
- Schmitt-Trigger als astabile Kipperschaltung 580
- Schottky-Dioden 559
- Schutzisolierung 25
- Schutzkleinspannung 25
- Schutzleiter 25
- Schutztrennung 25
- Schwellenwertschalter 423, 585
- Schwingkreisgüte 164
- Schwingquarze 194
- Schwingquarze ziehen 195
- Schwingungen, mechanische 123
- Schwingungen, ungedämpfte 123
- Schwund (Fading) 457
- Sedezimal-System 548
- Seele 429
- Seitenbandfrequenzen 475
- Seitenbandsignal 475
- Seitenbandspannung 477, 480
- Selbsterregung 363
- Selbstinduktionskoeffizient 101
- Selbstinduktionsspannung 106, 146
- Selektivität 178, 507
- Sendeantenne 438, 451
- Sendedipol 452
- Serienspeisung 296
- SHF 457
- Shunt 214
- Sicherung 25
- Siebschaltungen 178
- SI-Einheiten 29
- Signal, stereophones 481
- Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) 488
- Signal-Spannungssteuerung 316
- Signal-Spannungs-Steuerung 297
- Signal-Stromsteuerung 317
- Signal-Strom-Steuerung 297
- Silizium 241
- Silizium, Raummodell, Gittermodell 241
- Silizium-Fotoelement 20
- Silizium-Solarzellen 254
- Sinus 124
- Sinus-Funktion 123
- Sinuskurve, Konstruktion einer 124
- Sinus-Oszillatoren 363
- Sinusschwingungen 123
- Skineffekt 429
- Skin-Effekt 95, 140
- Software 609
- Solarbatterien 254
- Sollwert 771
- Source 268
- Spannung, elektrische 30
- Spannungsabfall 52
- Spannungsanpassung 318
- Spannungsbauch 433
- Spannungserzeuger 19
- Spannungsfehler-Schaltung 219
- Spannungsgegenkopplung 299
- Spannungsknoten 433
- Spannungsmessbereichserweiterung 212
- Spannungs-Parallel-Gegenkopplung 323
- Spannungsquelle 19
- Spannungsresonanzkreis 166
- Spannungs-Seriell-Gegenkopplung 324
- Spannungsteiler, belasteter 57
- Spannungsteiler, ohmscher 56
- Spannungsteiler, unbelasteter 57
- Spannungsverdopplung 293
- Spannungsverstärkung 309
- Spannungsverstärkung, Abhängigkeit vom Arbeitswiderstand 312
- Spannungsverstärkung, Abhängigkeit vom Widerstandsverhältnis R_a/R_E 312
- Spannungsvervielfachung 296
- Spannungswandler 155
- Speicher mit Diodenmatrix 704
- Speicheraufbau 613
- Speicherzeit 343
- Speicherzellen 613

Speisehorn 466
Speisespannung 56
Sperrbereich 251, 263
Sperrgänge 566
Sperrkennlinie 263
Sperrkreis 171
Sperrrichtung 250
Sperr-Sättigungs-Kennlinien 251
Sperrschicht 249
Sperrschicht-FET 268
Sperrschicht-Fotoeffekt 20
Sperrschichttemperatur 251, 338
Sperrschwinger 379
Sperrstrom 250, 341
Sperrwandler 381
Spezifischer Widerstand 32
Spiegelfestigkeit 467
Spiegelsender 509
Spitzen-Dioden 250
Spitzen-Spitzen-Wert 126
Sprachverständlichkeit 748
Sprechkopf 755
Sprung 773
Sprungantwort 773
Sprung-Befehle 682
Spule 21
Spule, Dämpfung 163
Spule, vereinfachtes Ersatzschaltbild 161
Spule, Verlustfaktor 163
Spulen, Konstruktionsmerkmale 94
Spulengüte 164
Spulenkonstante 101
Stabantenne 462
Stack 642
Stackpointer 642
statische Speicher 704
Stellgröße 771
Stereofonie 334
Stereohören 334
Stereo-Multiplex-Signal 482
Sternpunkt 25
stetige Regelung 773
Steuerbus 610
Steuerung 771
Steuerwerk 621
Störabstand 488
Störatom 249
Störgröße 771
Strahlhinlauf 225
Strahlungsenergie 452
strahlungsgekoppelt 464
Strahlungsleistung 455

Strahlungswiderstand 438, 460
Strom, elektrischer 29
Stromanpassung 299, 318
Strombauch 433
Stromdichte 30
Stromfehler-Schaltung 220
Stromgegenkopplung 299
Stromknoten 433
Strommessbereichserweiterung 214
Strommessung, indirekte 51
Strom-Parallel-Gegenkopplung 328
Stromquelle 61
Stromresonanzkreis 171
Stromrichtung, technische, physikalische 29
Strom-Seriell-Gegenkopplung 319
Strom-Steuerkennlinienfeld 262
Stromsteuerung 260
Stromverstärkungsgruppen 309
Stromverteilungsrauschen 364
Stromwandler 155
Stufenwandler 597
Subtraktion, Grundregeln 553
Südpol 81
Summsignal $L + R$ 481
Superhet 507
Surround-Sound 335
Symbole für Schaltwerke 593
Symbolische Werte 617
Synchronzähler 591
Syntax 616
Systemzeit 223

T

Taktperiode 623
Tastgrad 365
Tastkopf 233
Tastkopfabgleich 235
Tastung 493
Tauchspulenmikrofon 751
Temperaturkoeffizient 32
Temperaturkompensation 297
Temperaturmessung 245
Tesla, Nikola 87
Thermistoren 244
Thermodynamik 337
thermodynamische Größen 338
Thermoelement 20
Thomsonsche Schwingungsformel 169
Thyristor 275
Thyristor, löschen 276
Thyristor, Überkopffzünden 276
Thyristor, Zünden 275

Tiefpass 179
 Tiefpass, aktiver 414
 Tiefpass, LC-Glied 181
 Tiefpassfilter 336
 Timer NE555 582
 T-Kipglied 574
 Tongenerator 166
 Topfkreis 436
 Tote Zone 458
 Trägerfrequenz 473
 Trägersignal 475
 Trägerspannung 477
 Transformator 152, 155
 Transformator, Eisenkern 155
 Transformator, Eisenquerschnitt 157
 Transformator, Kernwahl 157
 Transformator, Klein-, Faustformeln 157
 Transformator, Primärleistung 156
 Transformator, Primärspule 155
 Transformator, Sekundärleistung 156
 Transformator, Sekundärspule 155
 Transformatorengleichung 156
 Transformatoren-Kernmaterial 93
 Transformatorkopplung 368
 transformieren 155
 Transistor, Bipolar-, Ausgangsleitwert 265
 Transistor, Bipolar-, Ausgangswiderstand 265
 Transistor, Bipolar-, Kennlinienverlauf 264
 Transistor, Bipolar-, Prinzip 259
 Transistor, Bipolar-, Schalten induktiver Last 347
 Transistor, Bipolar-, Schalten kapazitiver Last 345
 Transistor, Bipolar-, Schalten ohmscher Last 345
 Transistor, Bipolar-, Schalterbetrieb 341, 345
 Transistor, Bipolar-, Sperrspannung 266
 Transistor, Bipolar-, übersteuern 341
 Transistor, Bipolar-, Zonenfolge 258
 Transistor, npn- 266
 Transistor, pnp- 267
 Treiberstufe 331
 Trennschärfe 178, 507
 Treppenspannung 122
 Triac 280
 trigger 227
 Trigger, -Flanke, -Polarität 228
 Trigger, -Niveau, -Pegel 228
 Triggerdiode 274
 Triggerschaltung 227
 Triggierung 227
 Tri-State-Ausgänge 566
 TTL-Schaltungen 559

U

Übergangswiderstände 24
 Überlagerung 474
 Überlagerungsempfänger 507
 Übersteuerungsfaktor 343
 Übertrager 155
 Übertragungsfaktor 755
 Übertragungs-Kennlinie 330
 Übertragungsmaß 444
 UHF 457
 UJT, Talpunkt 270
 UKW 457
 UKW-Rundfunksender 486
 Ultrakurzwellen 458
 Ummagnetisierung 90
 Umschaltverlust 345
 Umspanner 155
 UND-Funktion 527
 UND-Funktion (Diodentechnik) 531
 UND-Funktion (Kontakttechnik) 530
 UND-Verknüpfung 527
 ungesättigte Logik 561
 Unijunction-Transistor UJT 270
 unipolare ICs 558
 Unipolar-Transistor 268
 Unstetige Regelung 772
 Unterprogramm-Technik 641
 Ursprung 53

V

Valenzelektronen 68, 242
 VDE 0100 25
 VDR 247
 VDR-Widerstand 107
 Verformungsarbeit 65
 Verhältnis-Diskriminator 489
 Verkürzungsfaktor 431
 Verkürzungskondensator 435
 Verluste, Streufeld- 161
 Verluste, Ummagnetisierungs- 161
 Verluste, Wirbelstrom- 161
 Verlustfaktor 142
 Verlustleistung 339
 Verlustwinkel 141
 Verschiebestrom 256
 Verstärker in RC-Kopplung 325
 Verstärker, x-, y- 223
 Verstärkerschaltungen 297
 Verunreinigung (Halbleiterkristall) 242
 Verzerrung 316

Verzögerungszeit 342
 Verzweigungs-Befehle 682
 VHF 457
 Vierquadrantenfeld 261, 265, 314
 Vierschichtdiode 270
 Vierschichtdiode, Haltestrom 273
 Vierschichtdiode, Rückwärtsrichtung 271
 Vierschichtdiode, Vorwärtsrichtung 271
 Vierschichtdiode, Vorwärtsstrom 273
 Villard-Schaltung 295
 Volladdierer 557
 Vorbereitungsnetzwerk 591
 Vormagnetisierung 94, 756
 Vorne-/Hinten-Ortung 335
 Vor-Rück-Verhältnis 465
 Vorselektion 510
 Vorwärts-/ Rückwärtszähler 589
 Vorwärtszähler 586
 Vorwiderstand 213

W

Wahrheitstabelle 528
 Wärmeentwicklung 336
 Wärmefluss 337
 Wärmeleitpaste 338
 Wärmeleitung 337
 Wärmestrahlung 337
 Wärmewiderstand 338
 Wärmewirkung 22
 Wechselspannung, sägezahnförmige 122
 Wechselspannung, sinusförmige 122
 Wechselspannungserzeugung 122
 Wechselstrom 121
 Wechselstromleistung 129
 Wechselstromnetz 122
 Wechselstromtechnik 121
 Wellen, elektromagnetische 123
 Wellenausbreitung 456
 Wellenlänge 432
 Wellenlängenskala 451
 Wellenwiderstand 430
 Wertetabelle 528
 Wheatstonesche Messbrücke 222
 Wickelformen von Spulen 95
 Widerstand, elektrischer, ohmscher 31
 Widerstand, negativer 274
 Widerstand, spezifischer 32
 Widerstand, thermischer 337
 Widerstände, nichtlineare 244
 Widerstandsgerade 297
 Wien-Robinson-Brücke 374

Wien-Robinson-Brücken-Oszillator 374
 Windungssinn 151
 Winkelfunktionen 139, 163
 Winkelgeschwindigkeit 124, 145
 Wirbelstrom 429
 Wirbelströme 94
 Wired-AND 564
 Wired-OR-Schaltungen 564
 Wirkungen des elektrischen Stromes 22
 Wirkungsgrad 40
 Wort 547
 Wortlänge 615

X

X-Y-Stereofonie 335

Y

Yagi-Antennen 464

Z

Z-Diode 254
 Z-Dioden, Durchbruchverhalten 255
 Zeigerdarstellung 132
 Zeigermessgeräte 206
 Zeigermesswerke, Güteklassen,
 Genauigkeitsklassen 206
 Zeitbasis 226
 Zeitkonstante 72, 104
 Zeitmultiplex-Verfahren 495
 Zener-Diode 254
 Zener-Effekt 255
 Zentimeterwellen 458
 Zentraleinheit 610
 ZF-Filter 467
 ZF-Sperre 510
 Zündspannung 106
 Zustandsbits 625
 Zustandsdiagramm 528
 Zustandsflags 625
 Zweielementantenne 464
 Zweierkomplement-Addition 555
 Zweipuls-Brückenschaltung 292
 Zweipuls-Mittelpunktschaltung 791
 Zweipunkt-Regelung 772
 Zweirampenwandler 600
 Zwei-Seitenband-Modulation (ZM) 479
 Zweiweggleichrichter-Schaltung 291
 Zweiweggleichrichtung, Brückenschaltung 292
 Zweiweggleichrichtung, Ladekondensator 291
 Zwischenfrequenz (ZF) 507
 Zwischenspeicher 592

Rüdiger Klein

Das neue Werkbuch Elektronik

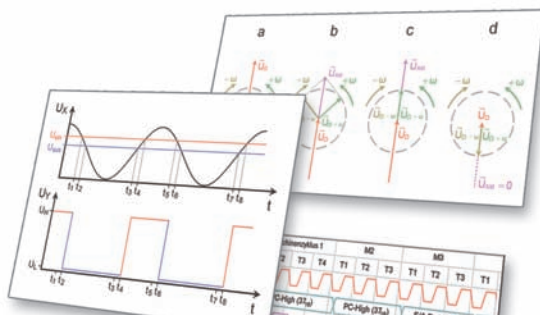
Elektronik Schritt für Schritt – von den Grundlagen bis zum Expertenwissen.

Sie interessieren sich für die Geheimnisse der Elektronik? Sie haben technisches Verständnis und möchten tiefer in die Materie einsteigen? Sie möchten professionelles Wissen erwerben, sei es für den beruflichen Einsatz oder für private Zwecke?

Wenn Sie eine oder mehrere dieser Fragen mit „ja“ beantworten können, ist dieses Werkbuch genau richtig für Sie. Hier bleiben keine Fragen offen: In 17 aufeinander aufbauenden Kapiteln werden Sie systematisch und umfassend an die technischen Zusammenhänge herangeführt. Das Lernspektrum reicht von den physikalischen Grundlagen der Elektrizität bis zu anspruchsvollen Praxisanwendungen in Elektronik und Digitaltechnik. Ausführliche Erläuterungen sowie Schemadarstellungen von Schaltplänen machen es Ihnen leicht, den Inhalt nachzuvollziehen und umzusetzen.

Damit ist das Buch ein idealer Begleiter für Studium, Ausbildung und Beruf, aber auch für das persönliche Bastelhobby. Die Lerninhalte haben sich in langjähriger Praxis bestens bewährt: Sie sind bewusst leicht verständlich gehalten. Die Erläuterungen sind praxisorientiert und fast immer von anschaulichen Versuchen begleitet. Darstellungen mathematischer Zusammenhänge erfolgen nur mit einfachen Formeln; auf die Berechnung mit komplexen Größen wird verzichtet.

Damit Sie Ihren Erfolg überprüfen können, schließt sich an jedes Kapitel eine Reihe von Übungsaufgaben an. So erarbeiten Sie sich zielsicher einen Wissensschatz, der Sie Schritt für Schritt zum Experten macht.



Aus dem Inhalt:

- Grundgesetze der Elektrotechnik
- Der Gleichstromkreis
- Der Wechselstromkreis
- Grundlagen der Messtechnik
- Grundlagen der Halbleitertechnik
- Standardschaltungen mit Halbleiterdioden und Bipolar-Transistoren
- Operationsverstärker
- Sende- und Empfangstechnik
- Digitaltechnik
- Grundlagen der Mikrocomputertechnik
- Elektroakustische Wandler
- Grundlagen der Regeltechnik

ISBN 978-3-645-65094-6



Euro 29,95 [D]