

Ulrich Freyer

Medientechnik

Basiswissen Nachrichtentechnik,
Begriffe, Funktionen, Anwendungen





Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Ulrich Freyer

Medientechnik

Basiswissen Nachrichtentechnik, Begriffe,
Funktionen, Anwendungen

Mit 375 Bildern und 16 Tabellen



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-42915-4
E-Book-ISBN: 978-3-446-43613-8

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2013 Carl Hanser Verlag München
Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Herstellung: Dipl.-Ing. Franziska Kaufmann
Satz: Kösel, Krugzell
Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Coverrealisierung: Stephan Rönigk
Druck und Bindung: Friedrich Pustet KG, Regensburg
Printed in Germany

Vorwort

Medien dienen im Alltag in vielfältiger Weise der elektronischen Kommunikation. Dabei kann es sich um optische Informationen (Bilder, Grafiken, Texte), akustische Informationen (Sprache, Musik, Geräusche) oder Daten handeln. Die Medientechnik ermöglicht die Realisierung dieser Kommunikation und umfasst die Übertragung, Speicherung und gegebenenfalls Verarbeitung digitaler oder analoger Signale, also spezifische Anwendungen der Nachrichtentechnik.

In diesem Buch werden Kenntnisse über die unterschiedlichen Aspekte der Medientechnik für typische Nutzungen anschaulich in einer bewährten Struktur vermittelt. Am Anfang stehen die nachrichtentechnischen Grundlagen und die für das Verständnis der Medientechnik relevanten Begriffe. Danach erfolgt die Darstellung der Konzepte für die Übertragung und Speicherung von Signalen und die Beschreibung der damit verbundenen Leistungsmerkmale. Es werden dann die für eine Umsetzung der Konzepte erforderlichen schaltungstechnischen Funktionseinheiten behandelt.

Die nächsten Schwerpunkte des Buches bilden die für jede Übertragung erforderlichen Netze, die große Zahl der verschiedenen Verfahren für die hinsichtlich Frequenzökonomie, Störbeeinflussung und technischem Aufwand angestrebte effiziente Übertragung von Signalen sowie die in der Praxis wichtigsten Anwendungen. Zu Letzteren gehören unter anderem Radio, Fernsehen, Internet, lokale Datennetze und Telefonie.

Neben den vorstehend aufgezeigten Komplexen werden auch die Themen Schnittstellen Protokolle, Standardisierung, elektromagnetische Verträglichkeit und Messtechnik in vergleichbarer Weise behandelt, sodass ein abgerundetes Bild der Medientechnik entsteht.

Für die Arbeit mit diesem Buch reichen Grundkenntnisse der Physik, Mathematik, Elektrotechnik und Elektronik aus.

Das Buch umfasst den derzeitigen Stand der Medientechnik. Der Leser kann deshalb die Funktion von Anwendungen mit ihren Problemstellungen sowie den Vor- und Nachteilen verstehen und fachlich qualifiziert beurteilen. Das Werk ist deshalb zum Lesen, Lernen und Nachschlagen bestens geeignet.

November 2012

Ulrich Freyer

Inhalt

■ Vorwort	5
1 Zielsetzung	11
2 Begriffe	14
3 Signale und Pegel	20
3.1 Zeitabhängige Signale	20
3.2 Frequenzabhängige Signale	26
3.3 Pegel und ihre Anwendungen	28
4 Referenzmodell für offenes Kommunikationssystem	39
4.1 Anforderungen	39
4.2 Schichten und Protokolle	40
4.3 Verbindungsstrukturen	45
5 Konzept der Übertragung	47
5.1 Grundlagen	47
5.2 Übertragungskanal und Störabstand	49
5.3 Tore und ihre Parameter	53
6 Konzept der Speicherung	57
6.1 Einführung	57
6.2 Magnetische Speicherung	59
6.3 Optische Speicherung	63
6.4 Elektrische Speicherung	69

7	Qualitätsparameter	72
7.1	Bandbreite und Grenzfrequenz	72
7.2	Verzerrungen	74
7.3	Störabstand	77
7.4	Abtastung	81
7.5	Anpassung	85
8	Übertragungsmerkmale	89
8.1	Übertragungswege	89
8.1.1	Einführung	89
8.1.2	Leitungsgebundene Übertragung mit elektrischen Leitungen	90
8.1.3	Leitungsgebundene Übertragung mit optischen Leitungen	100
8.1.4	Funkübertragung	108
8.1.5	Portable Signalspeicher	146
8.2	Betriebsarten	148
8.3	Nutzungsverfahren	151
9	Schaltungstechnische Funktionseinheiten	153
9.1	Einführung	153
9.2	Verstärker	154
9.3	Sender	155
9.4	Empfänger	155
9.5	Filter und Weichen	156
9.6	Umsetzer	158
9.6.1	Einführung	158
9.6.2	Analog-Digital-Umsetzer	158
9.6.3	Digital-Analog-Umsetzer	162
9.6.4	Elektrooptische und optoelektrische Umsetzer	164
9.7	Netzwerkkomponenten	166
10	Schnittstellen und Protokolle	169
10.1	Grundlagen	169
10.2	Hardwareschnittstellen	171
10.3	Softwareschnittstellen und Protokolle	176
11	Standardisierung	179
11.1	Einführung	179
11.2	Offizielle Standardisierungsgremien	180
11.3	Fachverbände	184
11.4	Einzelfirmen, Konsortien, Foren	184

12	Netze	186
12.1	Netzarten	186
12.2	Netzstrukturen	189
12.3	HFC-Netze	191
12.4	Passive optische Netze (PON)	193
12.5	Netzbezeichnungen	195
13	Verfahren	196
13.1	Übertragung	196
13.2	Codierung/Decodierung	197
13.2.1	Grundlagen	197
13.2.2	Leitungscodierung	201
13.2.3	Quellencodierung	203
13.2.4	Kanalcodierung	213
13.3	Modulation	220
13.3.1	Grundlagen	220
13.3.2	Analoges Modulationssignal/Sinusförmiges Trägersignal	222
13.3.3	Analoges Modulationssignal/Pulsförmiges Trägersignal	240
13.3.4	Digitales Modulationssignal/Sinusförmiges Trägersignal	244
13.3.5	Digitale Modulation im Basisband	252
13.3.6	Mehr-Träger-Verfahren	256
13.3.7	Mehrfachmodulation	260
13.4	Multiplexierung/Demultiplexierung	261
13.5	Vielfachzugriff	269
13.6	Einzelzugriff	272
13.7	Mehr-Antennen-Systeme	274
13.8	Zugangsberechtigung	277
14	Anwendungen	283
14.1	Hörfunk (Radio)	283
14.1.1	Einführung	283
14.1.2	Analoger Hörfunk	284
14.1.3	Digitaler Hörfunk	300
14.2	Fernsehen (TV)	309
14.2.1	Einführung	309
14.2.2	Analoges Fernsehen	310
14.2.3	Digitales Fernsehen	328
14.2.4	Hybrides Fernsehen	345
14.2.5	Dreidimensionales Fernsehen	351
14.3	Lokale Datennetze	355
14.4	Internet und Intranet	362
14.5	Telefonie	372
14.5.1	Festnetz-Telefonie	372
14.5.2	DSL	379

14.5.3	Schnurloses Telefon	381
14.5.4	Telefax	382
14.5.5	Mobilfunk	383
14.6	Triple Play	391
14.6.1	Einführung	391
14.6.2	Triple Play über das Breitbandkabelnetz	391
14.6.3	Triple Play über das Telefon-Festnetz	393
14.6.4	Triple Play über Satellit	396
14.6.5	Auswahlkriterien	398
14.7	Perspektiven	399
15	Elektromagnetische Verträglichkeit	402
15.1	Grundlagen	402
15.2	Elektromagnetische Aussendungen (EMA)	404
15.3	Elektromagnetische Beeinflussbarkeit (EMB)	405
16	Messtechnik	408
16.1	Einführung	408
16.2	Elektrische Messtechnik	409
16.3	Optische Messtechnik	414
16.4	Perspektive	415
Literatur	.....	416
Index	.....	418

1

Zielsetzung

Bei der Nachrichtentechnik handelt es sich um die Anwendung der Elektrotechnik für Informationszwecke. Das ist der Gegensatz zur Energietechnik, bei der die mit der Elektrotechnik erreichbare Leistung genutzt wird.

Allgemein wird unter einer Nachricht eine beliebige Mitteilung verstanden, die eine oder mehrere Informationen beinhaltet. Die Information beschreibt somit den Inhalt der Nachricht. Sie wird durch physikalische Größen repräsentiert, für deren zeitliche Verläufe die Bezeichnung Signale gilt (**Bild 1.1**). So handelt es sich bei einer gesprochenen Nachricht um das durch die Sprache bewirkte Schalldrucksignal.

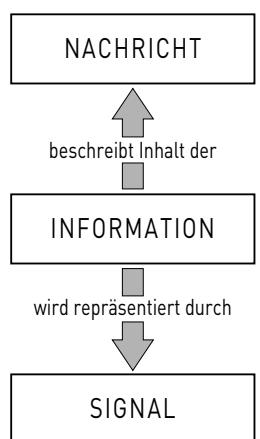


Bild 1.1 Beziehung zwischen Nachricht, Signal und Information



Informationen beschreiben den Inhalt einer Nachricht und werden durch den als Signale bezeichneten zeitlichen Verlauf physikalischer Größen repräsentiert.

Für die Übertragung, Speicherung und Verarbeitung der Nachricht kommen elektrische, magnetische und optische Größen zum Einsatz.

Der Austausch von Informationen zwischen zwei oder mehr Seiten wird als Kommunikation bezeichnet. Dabei muss für jedes Signal der Informationsgehalt bekannt sein, damit die Kommunikation eindeutig ist. Bei einer gesprochenen Nachricht ist es deshalb beispielsweise erforderlich, dass die zuhörende Person die verwendete Sprache beherrscht.



Kommunikation ist der Austausch von Informationen.

In den meisten Fällen sollen Informationen als Nachrichten über größere bis sehr große Entfernungen übertragen werden. Daraus erklärt sich auf der Begriff Telekommunikation mit seiner üblichen Kurzform TK (oder auch Tk). Die Vorsilbe „tele“ stammt aus der griechischen Sprache und steht für das Wort „fern“. Telekommunikation bedeutet deshalb Kommunikation über beliebig große Entfernungen.



Telekommunikation ist die Kommunikation über beliebige Entfernungen.

Bei den Informationen sind verschiedene Formen unterscheidbar. Bezogen auf die Betrachtung der Wahrnehmbarkeit handelt es sich um die Gruppen Audio, Video und Daten.

Die Gruppe Audio [audio], oft auch nur als Ton [sound] bezeichnet, umfasst alle mit dem menschlichen Gehör wahrnehmbaren Informationen, also akustische Signale. Dazu gehören Sprache, Musik, Geräusche und alle sonstigen akustischen Eindrücke.

Die Gruppe Video [video], oft nur als Bild [vision] bezeichnet, umfasst alle mit dem menschlichen Auge wahrnehmbaren Informationen, also optische Signale. Dazu gehören Bilder, Grafiken, Text und alle sonstigen optischen Eindrücke. Die Bilder können feststehend oder bewegt sein, wobei schwarzweiße oder farbige Darstellung möglich ist.

Die Gruppe Daten [data] umfasst alle Informationen, die unmittelbar weder mit dem menschlichen Gehör noch mit dem menschlichen Auge wahrnehmbar sind (**Bild 1.2**).

Bei allen weiteren Betrachtungen ist stets zu beachten, ob es sich um Audiosignale, Videosignale oder Daten(signale) handelt.

Bei jeder nachrichtentechnischen Kommunikation sind Menschen und/oder technische Einrichtungen beteiligt. Letztere werden üblicherweise als Maschinen bezeichnet, wobei es sich sowohl um einzelne Geräte als auch um komplexe Systeme handeln kann. Es lassen sich dabei drei Fälle unterscheiden:

- **Mensch–Mensch–Kommunikation**

Informationsübertragung von Mensch zu Mensch mit Hilfe einer technischen Einrichtung.

Beispiel: Telefon

- **Mensch–Maschine–Kommunikation**

Eingabe von Informationen in eine technische Einrichtung durch einen Menschen und/oder Ausgabe von Informationen an einen Menschen durch eine technische Einrichtung.

Beispiel: Recherche im Internet

- **Maschine–Maschine–Kommunikation**

Informationsübertragung zwischen technischen Einrichtungen ohne Beteiligung von Menschen.

Beispiel: Rechenzentrum

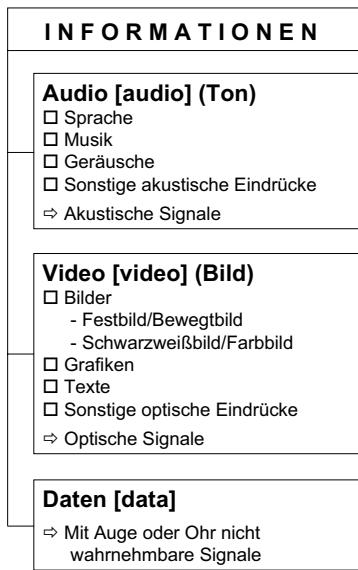


Bild 1.2 Arten der Information

Die vorstehend aufgezeigte Kommunikation erfolgt entweder **unidirektional** (also nur von der einen Stelle zur anderen Stelle) oder **bidirektional** (also in beiden Richtungen zwischen den Stellen).

Nachrichtentechnik bedeutet in der Praxis die Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von Signalen. Dabei spielten bisher **elektrische Signale** die wichtigste Rolle. Inzwischen sind aber auch **optische Signale** von großer Bedeutung. Dies gilt besonders bei der Übertragung von Informationen.

Es gibt eine Vielzahl nachrichtentechnischer Anwendungen, also Nutzungen dieser Technik für spezifische Aufgabenstellungen. Da die Vorgaben für die bestimmungsgemäße Funktion einer Anwendung in der Regel unterschiedlich sind und auch die Randbedingungen verschieden sein können, gilt dies vergleichbar auch für die einsetzbaren Verfahren. In den nachfolgenden Kapiteln werden deshalb Kenntnisse über alle relevanten Aspekte der Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von Signalen vermittelt. Dabei geht es zuerst um Begriffserklärungen, dann um Verfahren und ihre Funktionsweise und abschließend um reale Anwendungen. Es wird sich dabei herausstellen, dass eigentlich alle Verfahren und Anwendungen stets aus mehreren Basisfunktionen bestehen, also systematisch aus verschiedenen Bausteinen aufgebaut sind. Die Wahl der Struktur des Aufbaus erfolgt so, dass alle gewünschten Leistungsmerkmale mit geringstmöglichen Aufwand optimal erfüllt werden.

2

Begriffe

Es gibt in der Nachrichtentechnik einige grundlegende Begriffe, deren Bedeutung in diesem Kapitel behandelt werden soll. Ausgangspunkt ist die Übertragung, Speicherung und Verarbeitung von Signalen.

Die **Übertragung** [transmission] bedeutet einen Transportvorgang für die Signale von einer beliebigen Stelle a zu einer beliebigen Stelle b, was als Punkt-zu-Punkt-Verbindung [point to point connection] bezeichnet wird. Dieser Vorgang kann gleichzeitig aber auch zu weiteren Stellen erfolgen. Es liegt dann Verteilung [distribution] vor. Für das Konzept der Übertragung spielt die Entfernung zwischen den betroffenen Stellen, also die Länge des Übertragungsweges, keine Rolle.



Signalübertragung bedeutet den Transport von Signalen zwischen beliebig voneinander entfernten Stellen.

Die **Speicherung** [storage] von Signalen bedeutet deren Zwischenlagerung mit dem Ziel einer späteren Übertragung oder Verarbeitung. Es wird deshalb auch von Zwischen speicherung gesprochen. Für die Realisierung dieser zeitversetzten Nutzung werden als Speicher bezeichnete technische Funktionseinheiten benötigt, die mit unterschiedlichen Technologien realisierbar sind. Die bei Signalübertragung gegebene unmittelbare Verkopplung beider Stellen a und b besteht bei Speicherung nicht mehr. Diese zeitliche Entkopplung kennzeichnet den Übergang vom Online-Betrieb zum Offline-Betrieb.

Das Konzept jeder Signalspeicherung besteht darin, Signale so auf ein geeignetes Speichermedium zu bringen, dass sie jederzeit verfügbar sind. Bei der Speicherung sind stets zwei Schritte zu unterscheiden.

- Signaleingabe (auch als Einlesen bezeichnet)
- Signalausgabe (auch als Auslesen bezeichnet)

Sind bei einer Speichereinheit lange Zeitspannen zwischen der Signaleingabe und Signal ausgabe möglich (d. h. Monate oder Jahre), dann gilt die Bezeichnung Langzeitspeicher. Handelt es sich dagegen nur um kurze Zeitspannen (d. h. Minuten, Stunden oder Tage), dann liegt ein Kurzzeitspeicher vor. Unabhängig von der verwendeten Technologie gilt bei jeder Speicherung, dass dadurch keine Veränderung der gespeicherten Signale erfolgt.



Signalspeicherung bedeutet die Zwischenlagerung von Signalen und ermöglicht deren zeitversetzte Übertragung und Verarbeitung.



Signalspeicherung ermöglicht den Übergang von online zu offline.

In vielen Fällen sind vorhandene Signale für die unmittelbare Nutzung und/oder die Übertragung nicht oder nur mit Einschränkungen geeignet. Durch entsprechende **Verarbeitung** [processing] lässt sich dieses Problem lösen. Dabei ist unter diesem Vorgang jede gezielte Beeinflussung vorliegender Signale zu verstehen. Es handelt sich dabei im Prinzip um eine Anpassung an die optimalen Voraussetzungen für weitere Übertragung oder Speicherung.



Durch Signalverarbeitung wird das zugeführte Signal nach definierten Vorgaben verändert.

Bekanntlich repräsentieren Signale die gewünschten Informationen, was zu der Bezeichnung **Nutzsignale** führt. In der Praxis gibt es diesen Idealzustand allerdings nicht. Es treten nämlich zusätzlich stets auch Signale auf, die das Nutzsignal beeinflussen und deshalb als **Störsignale** bezeichnet werden (**Bild 2.1**). Sie dürfen allerdings bestimmte Größenordnungen nicht überschreiten, damit die vorgesehene Übertragung, Speicherung oder Verarbeitung bestimmungsgemäß funktioniert.



Bild 2.1 Arten der Signale



Das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Störsignal darf vorgegebene Werte nicht überschreiten.

Einen wesentlichen Anteil hat in der Nachrichtentechnik die durch Signalübertragung bewirkte Kommunikation. Die dabei beteiligten Personen werden üblicherweise als **Nutzer** [user] oder Teilnehmer [Tln] bezeichnet.

Kommunikation kann bekanntlich zwischen Menschen und/oder Maschinen erfolgen. Die bei Mensch-Mensch-Kommunikation erforderlichen technischen Einrichtungen werden als **Endgeräte** [terminals] bezeichnet, während Maschinen selber die Funktion als Endgeräte wahrnehmen.



Beispiel:

Das Fernsehgerät ist ein Endgerät im Rahmen der Mensch-Maschine-Kommunikation.



Endgeräte ermöglichen die Durchführung der Kommunikation.

Kommunikationssysteme sind fast immer für mehrere Nutzer bzw. Maschinen ausgelegt. Dabei kann es sich auch um sehr große Zahlen handeln. Das weltweite Telefonnetz sei als Beispiel angeführt.

Damit ein Kommunikationssystem mehreren Nutzern bzw. Maschinen gleichzeitig zur Verfügung steht, bedarf es entsprechender technischer Einrichtungen. Dafür gilt die Bezeichnung **Netz** [network]. Es handelt sich um alle technischen Komponenten, welche die gewünschte Kommunikation zwischen den Nutzern und/oder Maschinen ermöglichen.



Netz [network] = Gesamtheit aller technischen Ressourcen, welche die Kommunikation zwischen Nutzern (Teilnehmern) und/oder Maschinen ermöglicht.

In den Netzen sind folgende Funktionsgruppen unterscheidbar:

- Übertragungswege
- Übertragungseinrichtungen
- Verteileinrichtungen/Vermittlungseinrichtungen
- Endgeräte

Bei den **Übertragungswegen** handelt es sich entweder um Leitungen oder Funkverbindungen. Für Leitungsnetze kommen elektrische Leitungen (z. B. Koaxialkabel) und/oder optische Leitungen (z. B. Glasfasern) zum Einsatz, während bei Funknetzen die Verbindungen drahtlos [wireless] mit Hilfe elektromagnetischer Wellen aufgebaut werden.



Leitungsnetz = Elektrische und/oder optische Leitungen als Übertragungswege

Funknetz = Funkverbindungen als Übertragungswege

Werden bei einem Kommunikationssystem unterschiedliche Übertragungswege verwendet, dann gilt für diese Mischform auch die Bezeichnung **Hybridnetz**.

Die **Übertragungseinrichtungen** haben die Aufgabe, die bestimmungsgemäße Funktion einer Übertragung sicherzustellen. Dazu zählen hauptsächlich alle Maßnahmen, um störende Beeinflussungen des Nutzsignals bei der Übertragung zu kompensieren. Typische Effekte sind dabei die Dämpfung des Signals und das Auftreten von Verzerrungen.



Beispiel:

Durch Verstärker kann die Dämpfung eines Nutzsignals wieder aufgehoben werden.

Verteil- und Vermittlungseinrichtungen sind zur Steuerung der Verbindung zwischen den Endgeräten erforderlich. **Verteileinrichtungen** sorgen dafür, dass ein Eingangssignal gleichzeitig alle angeschlossenen Endgeräte erreicht. Die Stelle für die Einspeisung dieses Signals wird üblicherweise als Kopfstelle [headend] oder Sender bezeichnet. Verteileinrichtungen sind typisch für Massenkommunikation.



Beispiel:

Radio und Fernsehen arbeiten mit Verteileinrichtungen, um gleichzeitig viele Zuhörer bzw. Zuschauer erreichen zu können.



Verteileinrichtungen ermöglichen die gleichzeitige Verbindung zu mehreren Endgeräten im Rahmen der Massenkommunikation.

Das Gegenstück zur Massenkommunikation stellt die Individualkommunikation dar. Bei dieser ist die gezielte Verbindung zwischen zwei angeschlossenen Endgeräten vorgesehen. Dafür werden im Netz **Vermittlungseinrichtungen** benötigt, die als Netzknoten [network nod] den gezielten Aufbau der gewünschten Verbindung sicherstellen (**Bild 2.2**). Bei großen Netzen sind in der Regel mehrere Netzknoten vorhanden, so dass eine Verbindung ggf. über mehrere dieser Vermittlungseinrichtungen aufgebaut wird.

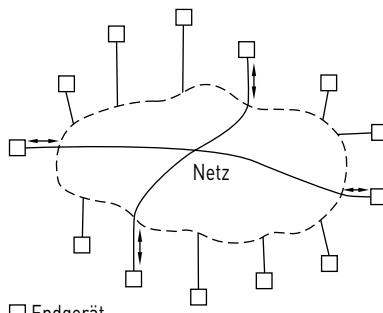


Bild 2.2 Vermittlung



Beispiel:

Das Telefon ist das klassische Beispiel für Individualkommunikation durch den Einsatz von Vermittlungseinrichtungen.



Vermittlungseinrichtungen ermöglichen die gezielte Verbindung zwischen zwei Endgeräten im Rahmen der Individualkommunikation.

Der Sinn und Zweck von Netzen ist deren Nutzung für die Kommunikation, also den Austausch von Informationen. Dafür gibt es vielfältige Arten, jeweils gekennzeichnet durch

bestimmte Eigenschaften. Es gilt als Oberbegriff die Bezeichnung **Dienste** [service] mit folgender Definition:

Ein Dienst [service] ist die Fähigkeit eines Netzes, Informationen einer bestimmten Art mit spezifischen Vorgaben (wie zeitliche Aspekte, Qualitätsindikatoren, ...) möglichst störungsfrei zwischen den beteiligten Endgeräten zu übertragen.

Typische Beispiele für Dienste sind Telefonie, Mobilfunk, Satellitenfunk, aber auch Radio und Fernsehen.

Bei den Diensten sind zwei Gruppen Beteiligter zu unterscheiden und zwar die Erbringer von Diensten und die Anwender von Diensten. Als übliche Bezeichnungen werden Diensteanbieter [service provider] und Dienstenutzer [service user], meist nur in der Kurzform Nutzer [user], verwendet (**Bild 2.3**).

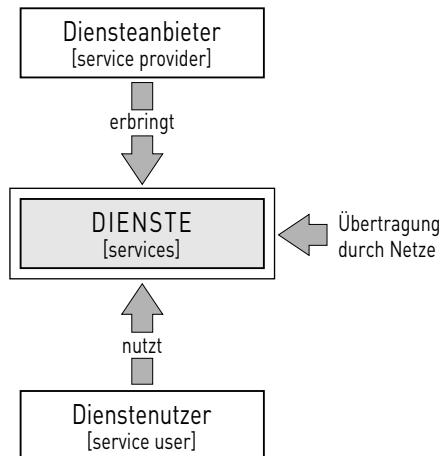


Bild 2.3 Diensteanbieter und Dienstenutzer

Eine für den Nutzer wichtige Eigenschaft von Diensten stellt die Zugriffsmöglichkeit dar. Der Zugang zu Diensten kann kostenlos oder entgeltpflichtig, also kostenrelevant, sein. Im ersten Fall handelt es sich um freie Dienste [free services]. Werden dagegen Entgelte gefordert, dann sind es Bezahltdienste [pay services]. Für diese bedarf es stets vertraglicher Regelungen zwischen Diensteanbieter und Nutzer.



- Freie Dienste [free services] → entgeltfrei
- Bezahltdienste [pay services] → entgeltpflichtig

Wird ein Dienst den Endgeräten der Nutzer automatisch zur Verfügung gestellt, dann handelt es sich um einen Verteildienst [push service], der auch als „Bring-Dienst“ bezeichnet werden kann. Muss dagegen der Nutzer einen Dienst vom Netz durch festgelegte Prozeduren anfordern, dann liegt ein Abrufdienst [pull service] vor, für den auch die Bezeichnung „Hol-Dienst“ gilt. Es ist ebenso der Begriff „on demand service“ üblich.



Verteidienst („Bring-Dienst“) [push service] = Dienst wird dem Endgerät ohne Anforderung des Nutzers zur Verfügung gestellt.

Abrufdienst („Hol-Dienst“) [pull service] = Dienst wird dem Endgerät nur nach Anforderung [on demand] durch den Nutzer zur Verfügung gestellt.

Für den Ablauf von Kommunikationsvorgängen sind immer Festlegungen erforderlich, um einen geordneten und effizienten Betrieb zu ermöglichen. Es gibt deshalb stets einen Satz von Regeln über die Abwicklung der einzelnen Schritte eines Kommunikationsvorgangs. Solche Regelwerke werden als Protokoll [protocol] bezeichnet. Sie sind in der Regel in nationalen Normen bzw. europäischen oder internationalen Standards festgelegt und können dienstespezifische Anforderungen enthalten, aber auch unabhängig von einzelnen Diensten sein.



Protokoll [protocol] = Verbindliche Festlegungen über die Abwicklung der einzelnen Schritte von Kommunikationsvorgängen

Für die Abwicklung eines Protokolls gilt die Bezeichnung Prozedur. Sie stellt also die Realisierung des Protokolls dar.

Jedes Kommunikationssystem besteht immer aus verschiedenen Komponenten. Für die bestimmungsgemäße Funktion des gesamten Systems müssen für deren Zusammenwirken spezifische Bedingungen erfüllt sein. Dabei kann es sich um mechanische und/oder elektrische Werte handeln, aber auch um Vorgaben bezüglich der Software. Für solche Übergänge gilt die Bezeichnung Schnittstelle [interface].



Schnittstelle [interface] = Beschreibt den definierten Übergang bezüglich Hardware und/oder Software zwischen Komponenten eines Kommunikationssystems.

Die an Schnittstellen einzuhaltenden technischen Vorgaben werden auch als Schnittstellendefinition bezeichnet.

3

Signale und Pegel

Signale sind Verläufe physikalischer Größen. Bei leitungsgebundenen und funkgestützten Systemen ist dabei die Spannung U von besonderem Interesse, weil diese relativ einfach gemessen werden kann. Deshalb beziehen sich die Ausführungen im Buch in der Regel auf die Spannung. Im Falle optischer Leitungen und Komponenten erfolgt allerdings der Übergang auf die optische Leistung P_{opt} , weil es keine optische Spannung gibt.

■ 3.1 Zeitabhängige Signale

Signalverläufe sind mathematisch betrachtet Funktionen zwischen unabhängigen und abhängigen Variablen. Dabei stellt die Spannung als Signalwert stets die abhängige Variable. Erfolgt ein Bezug auf die Zeit t als unabhängige Variable, dann handelt es sich um eine Zeitfunktion $f(t)$.



Zeitfunktion $f(t)$ = Zuordnung zwischen dem Signalwert (z. B. Spannung U) als abhängige Variable und der Zeit t als unabhängige Variable

Derartige Zeitabhängigkeiten lassen sich als Graph (d. h. Kurvenverlauf) in einem rechtwinkligen Koordinatensystem darstellen, dessen waagerechte Achse als x-Achse oder Abszisse bezeichnet wird und die senkrechte Achse als y-Achse oder Ordinate. Ein solches Koordinatensystem weist vier als Quadranten bezeichnete Felder auf. Der Kreuzungspunkt der beiden Achsen bildet den Nullpunkt, so dass positive und negative Werte darstellbar sind (**Bild 3.1**).

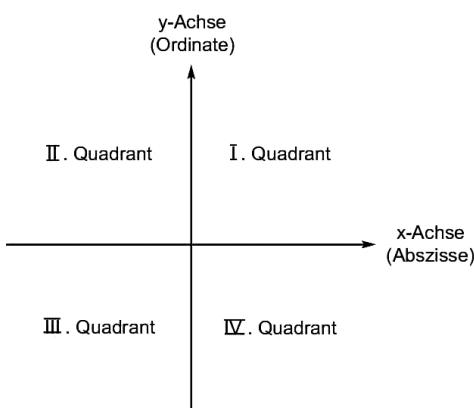


Bild 3.1 Rechtwinkliges Koordinatensystem

Bei einer Zeitfunktion gilt stets folgende Form der Darstellung:

- x-Achse (Abszisse): Zeit t
- y-Achse (Ordinate): Signalwert (Spannung U)

Für den Graphen $u = f(t)$ sind nur der I. und IV. Quadrant von Interesse, da zwar positive und negative Spannungswerte möglich sind, jedoch keine negativen Zeiten.

Bei jeder Zeitfunktion ist stets ein bestimmter Wertebereich vorgegeben, es gibt deshalb immer einen größten (maximalen) und einen kleinsten (minimalen) Signalwert. Innerhalb dieser Grenzen kann jeder beliebige Signalwert auftreten (**Bild 3.2**). Es lassen sich bei den Zeitfunktionen vier grundsätzliche Varianten unterscheiden:

- Wertekontinuierliche/zeitkontinuierliche Zeitfunktion
- Wertekontinuierliche/zeitdiskrete Zeitfunktion
- Wertediskrete/zeitkontinuierliche Zeitfunktion
- Wertediskrete/zeitdiskrete Zeitfunktion

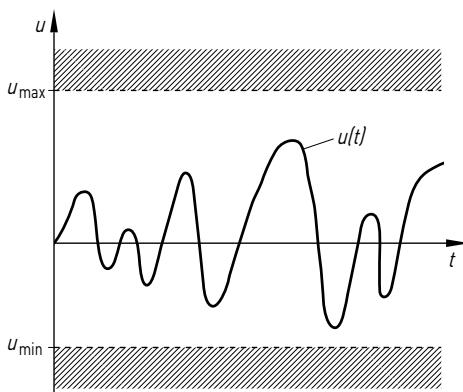


Bild 3.2 Zeitfunktion mit Wertebereich

Bei wertekontinuierlichen/zeitkontinuierlichen Zeitfunktionen handelt es sich um analoge Signale. Diese können im gesamten Betrachtungszeitraum jeden Wert innerhalb des vorgegebenen Wertebereichs annehmen. Sie werden deshalb auch als vielwertige Signale bezeichnet.

Sind bei Zeitfunktionen Signalwerte nur in festgelegten Intervallen (also Zeitschritten) vorhanden und können diese wie beim analogen Signal alle Werte innerhalb des vorgegebenen Wertebereichs annehmen, dann liegen zeitdiskrete Signale vor.

Sind bei Signalen neben Zeitintervallen auch noch Wertintervalle festgelegt, dann gilt für diese wertediskreten/zeitdiskreten Zeitfunktionen die Bezeichnung digitale Signale. Beim vorgegebenen Wertebereich sind im Prinzip beliebig viele Wertintervalle n möglich, was zu $n + 1$ Signalwerten führt. Für die Nachrichtentechnik hat der Fall $n = 1$ in der Regel die größte Bedeutung. Es ergeben sich in den Zeitintervallen zweiwertige Signale, deren beide Zustände üblicherweise mit 0 und 1 bezeichnet werden. Für die weiteren Ausführungen sollten deshalb als digitale Signale nur zweiwertige Signale gelten. Dabei spielt es keine

Rolle, ob die beiden Zustände durch positive oder negative Signalwerte repräsentiert werden (**Bild 3.3**).

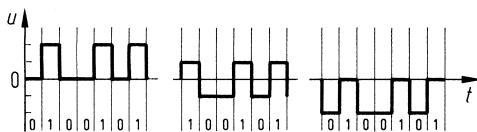


Bild 3.3 Digitale Signale



Analoge Signale sind vielwertige Signale und weisen kontinuierliche Verläufe auf.

Digitale Signale sind zweiwertige Signale und weisen diskrete Verläufe auf.

In der Nachrichtentechnik sind analoge Signale, die **sinusförmige Verläufe** aufweisen, von besonderer Bedeutung. Diese Funktion ist nicht nur technisch einfach realisierbar, sondern lässt sich auch durch verschiedene Kenngrößen mathematisch einfach beschreiben. Dazu gehören der als Amplitude bezeichnete Maximalwert (Größtwert) der Spannung \hat{u} , die Frequenz f , die Periodendauer T und der gegenüber einem Bezugszeitpunkt (z.B. Nullpunkt des Koordinatensystems) bestehende Phasenwinkel ϕ , der auch als Phasenverschiebungswinkel bezeichnet wird (**Bild 3.4**). Es gilt:

$$u(t) = \hat{u} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t \pm \varphi) \quad (3.1)$$

Periodendauer

$$T = \frac{1}{f} \quad (3.2)$$

Ein positiver Phasenwinkel bedeutet, dass die Zeitfunktion um die Gradzahl des Phasenwinkels gegenüber dem Bezugspunkt früher auftritt. Bei einem negativen Phasenwinkel liegen die umgekehrten Verhältnisse vor.

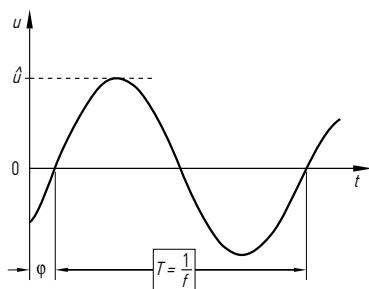


Bild 3.4 Sinusförmige Zeitfunktion

Das Produkt $2 \cdot \pi \cdot f$ wird als Kreisfrequenz ω bezeichnet. Damit lassen sich Gleichungen einfacher und damit auch überschaubarer darstellen.

Kreisfrequenz

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3.3)$$

Für eine sinusförmige Zeitfunktion, die keine Phasenverschiebung aufweist (also im Nullpunkt des Koordinatensystems beginnt), ergibt sich damit:

$$u(t) = \hat{a} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (3.4)$$

Neben sinusförmigen Verläufen sind in der Nachrichtentechnik auch **rechteckförmige Verläufe** von Bedeutung. Bei diesen treten periodisch sprunghafte Wechsel zwischen zwei definierten Spannungswerten auf. Es liegt deshalb Zweiwertigkeit vor, wobei auch diese Zeitfunktion durch Amplitude, Frequenz, Periodendauer und Phasenwinkel beschreibbar ist (**Bild 3.5**).

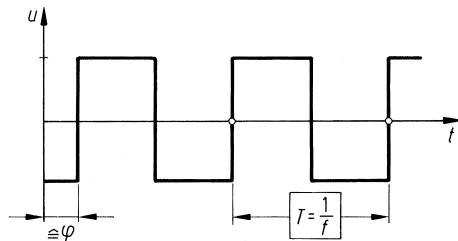


Bild 3.5 Rechteckförmige Zeitfunktion

Eine rechteckförmige Zeitfunktion muss weder symmetrisch zur Zeitachse verlaufen noch während der Periodendauer gleiche Anteile für die beiden Signalwerte aufweisen. Eine typische Variante liegt vor, wenn der Minimalwert der Funktion 0 V beträgt (also auf der auch als Zeitachse bezeichneten x-Achse verläuft) und der Maximalwert weniger als die Hälfte der Periodendauer T vorliegt. Es handelt sich dann um eine periodische Folge von Impulsen, die als Puls oder Impulsfolge bezeichnet wird (**Bild 3.6**).

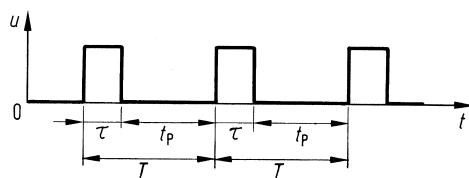


Bild 3.6 Puls (Impulsfolge)

Die Periodendauer eines Pulses unterteilt sich in die Impulsdauer T und die Impulspause t_p , während sich die Pulsfrequenz f_p aus dem Kehrwert der Periodendauer ergibt.

Als Information über den zeitlichen Abstand zwischen den Impulsen und damit auch über die Impulspause wurden der Tastgrad g und als dessen Kehrwert das Tastverhältnis v definiert. Es gilt:

$$g = \frac{\tau}{T} \Leftrightarrow v = \frac{T}{\tau} \quad (3.5)$$

Ist der Tastgrad vorgegeben, dann berechnet sich die Impulspause t_p wie folgt:

$$t_p = T - \tau = T \cdot (1 - g) \quad (3.6)$$

**Beispiel:**

Für eine Impulsfolge mit der Pulsfrequenz $f_p = 1 \text{ kHz}$ und dem Tastgrad $g = 0,5$ soll die Impulsdauer T und die Impulspause t_p ermittelt werden:

1. Schritt: Berechnung der Periodendauer

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1 \text{ kHz}} = 1 \text{ ms}$$

2. Schritt: Berechnung der Impulsdauer gemäß Gleichung (3.5)

$$\tau = g \cdot T = 0,5 \cdot 1 \text{ ms} = 0,5 \text{ ms}$$

3. Schritt: Berechnung der Impulspause gemäß Gleichung (3.6)

$$t_p = T - \tau = 1 \text{ ms} - 0,5 \text{ ms} = 0,5 \text{ ms}$$

Im Beispiel weisen Impulsdauer und Impulspause gleiche Werte auf, die Impulsfolge ist also zeitlich symmetrisch aufgebaut. Der Tastgrad hängt unmittelbar von der Impulsdauer ab:

Kurze Impulsdauer → Kleiner Tastgrad

Lange Impulsdauer → Großer Tastgrad



Der Tastgrad kann Werte zwischen 0 und 1 aufweisen.

Bei digitalen Signalen handelt es sich im Prinzip um rechteckförmige Zeitfunktionen mit dem in vorstehendem Beispiel vorgegebenen Tastgrad $g = 0,5$. Sie weisen somit einen für Impulsdauer und Impulspause gleiches Zeitraster auf. Bei jedem Schritt wird eine Elementarentscheidung getroffen, da der Signalwert entweder den Zustand 0 oder den Zustand 1 aufweist. Diese kleinstmögliche Informationseinheit wird als **Bit** bezeichnet, abgeleitet von dem englischen Begriff „binary digit“.



Kennzeichnendes Merkmal digitaler Signale: Bit [binary digit]

Bei der digitalen Kommunikation handelt es sich deshalb um die kontinuierliche Übertragung von Bits, also beliebigen Folgen von Nullen und Einsen. Als Einheit für die Elementarentscheidung wurde „bit“ festgelegt.



1 bit = 1 Elementarentscheidung (0 oder 1)

Große Bitmengen lassen sich mit den üblichen Vorzeichen wie folgt angeben:

Kilobit:	1 kbit	=	10^3 bit	=	1000 bit
Megabit:	1 Mbit	=	10^6 bit	=	1 000 000 bit
Gigabit:	1 Gbit	=	10^9 bit	=	1 000 000 000 bit

Die Übertragung vorgegebener Bitmengen ist gekennzeichnet durch die Übertragungsgeschwindigkeit, wobei stets der Bezug auf die Zeiteinheit Sekunde (s) erfolgt. Die als Bitrate bezeichnete Übertragungsgeschwindigkeit v_{bit} weist konsequenterweise die Einheit „bit/s“, also Bit pro Sekunde, auf.

 **Bitrate** = Übertragungsgeschwindigkeit digitaler Signale v_{bit}
Einheit: bit/s

Für die Angabe großer Bitraten lassen sich auch hier die Vorzeichen verwenden:

Kilobit pro Sekunde:	1 kbit/s	=	1000 bit/s
Megabit pro Sekunde:	1 Mbit/s	=	1 000 000 bit/s
Gigabit pro Sekunde:	1 Gbit/s	=	1 000 000 000 bit/s

Bei der Angabe von Bitraten tauchen oftmals auch die Bezeichnungen kbps und Mbps auf. Hierbei handelt es sich um die im englischen Sprachraum übliche Einheitenkennzeichnung für die Übertragungsgeschwindigkeit digitaler Signale:

kbps [kilobit per second] = kbit/s

Mbps [Megabit per second] = Mbit/s

Aus der Bitrate lässt sich durch Kehrwertbildung die maximal zulässige Bitdauer ermitteln.

 **Beispiel:**
Bezogen auf eine Bitrate von 10 Mbit/s soll die maximale Bitdauer berechnet werden.

$$t_{\text{bit}} = \frac{1}{10 \text{ Mbit/s}} = \frac{1}{10^7 \text{ bit/s}} = 10^{-7} \text{ s/bit} = 0,1 \mu\text{s/bit}$$

Das einzelne Bit darf also nur 0,1 µs (= 100 ns) dauern.

Je größer die Bitrate, desto kleiner wird die zulässige Bitdauer. Damit auf der Empfangsseite die einzelnen Bits noch unterschieden werden können, darf die Bitdauer allerdings bestimmte Werte nicht unterschreiten. Diese hängen vom Übertragungsverfahren und der eingesetzten Technologie ab (**Bild 3.7**).

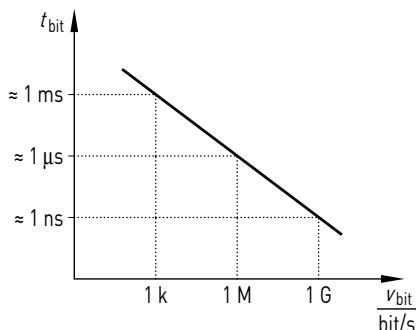


Bild 3.7 Zusammenhang zwischen Bitrate und Bitdauer

In der Nachrichtentechnik treten bei digitalen Signalen häufig auch Gruppen von 8 bit auf. Für eine solche zusammenhängende Folge von Bits gilt die Bezeichnung **Byte**. Als Einheit wurde „B“ gewählt, es ist aber auch „Byte“ üblich.

Bei Speichern erfolgt die Angabe der Kapazität in der Regel in Byte. Dabei werden folgende Potenzen zur Basis 2 verwendet:

1 KB	=	2^{10} B	=	1024 Byte
1 MB	=	2^{20} B	=	1 048 576 Byte
1 GB	=	2^{30} B	=	1 073 741 824 Byte

Grundsätzlich kann die Bitrate auch bezogen auf Bytes angegeben werden.

■ 3.2 Frequenzabhängige Signale

Während bei der Zeitfunktion Signalwert und Zeit einander zugeordnet sind, ist es bei der **Frequenzfunktion** der Signalwert und die Frequenz. Dabei gilt als vereinbart, dass sich Angaben stets auf sinusförmige Verläufe beziehen, die bekanntlich durch Amplitude, Frequenz und Phasenwinkel gekennzeichnet sind.

Der Bezug auf sinusförmige Verläufe ermöglicht den einfachen Übergang zwischen Zeit- und Frequenzfunktionen. Die Frequenzabhängigkeit ist für die Amplitude und den Phasenwinkel darstellbar (**Bild 3.8**). Da bei sinusförmiger Spannung zwischen dem Scheitelpunkt (Amplitude) und dem Effektivwert eine feste Verkopplung besteht, unterscheiden sich die Ergebnisse nur durch einen konstanten Faktor.

Bei der Frequenzabhängigkeit des Phasenwinkels ist stets ein Referenzwert erforderlich. Dabei stellt die Größe des Phasenwinkels ein Maß für die Signallaufzeit dar.

Bei den üblicherweise als Frequenzgang bezeichneten Frequenzfunktionen sind folgende Formen unterscheidbar:

- **Amplituden-Frequenzgang** [amplitude frequency response]
(auch als Amplitudengang bezeichnet):
Darstellung der Amplitude (oder des Effektivwertes) in Abhängigkeit von der Frequenz (**Bild 3.9**)

- **Phasen-Frequenzgang** [phase frequency response]
(auch als Phasengang bezeichnet):
Darstellung des Phasenwinkels in Abhängigkeit von der Frequenz (**Bild 3.10**)

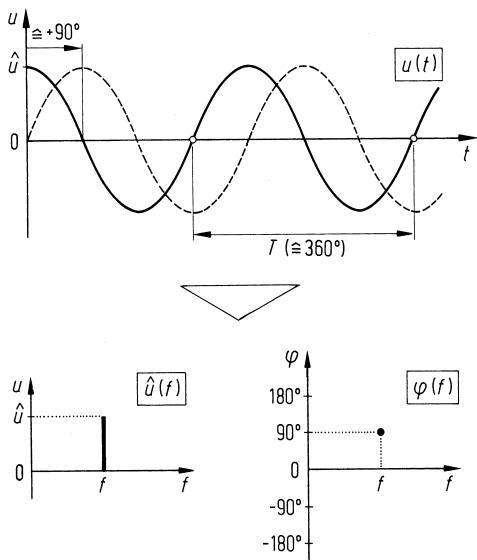


Bild 3.8 Übergang zwischen Zeit- und Frequenzfunktion

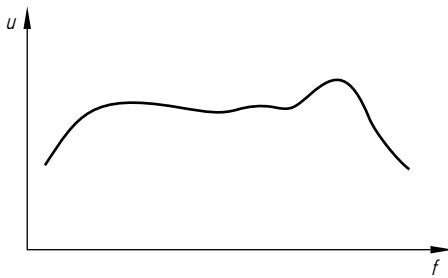


Bild 3.9 Amplituden-Frequenzgang

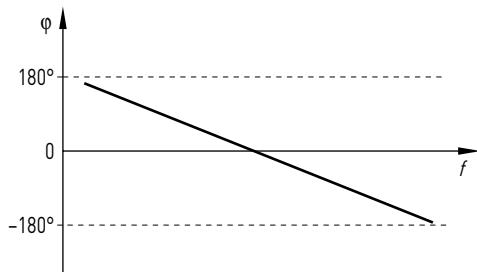


Bild 3.10 Phasen-Frequenzgang

Ein Spezialfall des Amplituden-Frequenzgangs liegt vor, wenn nur für einzelne Frequenzen Amplituden auftreten. Diese werden dann als Spektrallinien bezeichnet. Ihre Abstände zueinander können gleich aber auch unregelmäßig sein.

In der Nachrichtentechnik kommen Signale mit unterschiedlichen Frequenzen zum Einsatz. Sie reichen vom Hz-Bereich bis zum GHz-Bereich. Für Funkanwendungen werden zum Beispiel die Frequenzen von 9 kHz bis 345 GHz verwendet (**Tabelle 3.1**).

Tabelle 3.1 Frequenzbereiche der Funktechnik

Bezeichnung [deutsch]	Bezeichnung [englisch]	Frequenz f	Wellenlänge λ
Megameterwellen	extremely low frequencies (ELF)	kleiner 3 kHz	größer 100 km
Myriameterwellen	very low frequencies (VLF)	3 ... 30 kHz	100 ... 10 km
Kilometerwellen	low frequencies (LF)	30 ... 300 kHz	10 ... 1 km
Hektometerwellen	medium frequencies (MF)	0,3 ... 3 MHz	1000 ... 100 m
Dekameterwellen	high frequencies (HF)	3 ... 30 MHz	100 ... 10 m
Meterwellen	very high frequencies (VHF)	30 ... 300 MHz	10 ... 1 m
Dezimeterwellen	ultra high frequencies (UHF)	0,3 ... 3 GHz	100 ... 10 cm
Zentimeterwellen	super high frequencies (SHF)	3 ... 30 GHz	10 ... 1 cm
Millimeterwellen	extremely high frequencies (EHF)	30 ... 300 GHz	10 ... 1 mm

Für die Nutzung der Frequenzen gibt es eine klassische Einteilung, nämlich Niederfrequenz (NF), Hochfrequenz (HF) und Höchstfrequenz. Es gibt dafür zwar keine festgelegten Grenzen, jedoch gilt NF bis etwa 50 kHz, während der GHz-Bereich zur Höchstfrequenz zählt. Die Frequenzen dazwischen bilden somit den Hochfrequenzbereich.

Während bei leitungsgebundener Übertragung von Signalen elektrische Leitungen oder Lichtwellenleiter als Übertragungsmedium verwendet werden, ist es bei jeder Funkübertragung stets die Luft. Es kommen deshalb für dieses Medium elektromagnetische Wellen zum Einsatz. Als Schnittstellen für diesen Übertragungsweg ist auf der sendenden Seite wie auf der empfangenden Seite jeweils eine Antenne erforderlich.

■ 3.3 Pegel und ihre Anwendungen

Bei allen in der Nachrichtentechnik verwendeten Signalen handelt es sich bekanntlich um Verläufe physikalischer Größen. Sie werden durch Messung und/oder Berechnung ermittelt und stellen für die Anwendungen wichtige Informationen dar. In der elektrischen Nachrichtentechnik spielen dabei folgende Größen eine wichtige Rolle:

- Elektrische Spannung [voltage]
Formelzeichen: U
Einheit: V (Volt)
- Elektrische Wirkleistung [power]
Formelzeichen: P
Einheit: W (Watt)

Bezogen auf die optische Nachrichtentechnik ist es die optische Leistung P_{opt} , bei der die Maßeinheit ebenfalls das Watt (W) ist. Um Verwechslungen zwischen optischer und elektrischer Leistung zu vermeiden, wird im Bedarfsfall als Formelzeichen für die elektrische Wirkleistung P_{el} verwendet.



In der optischen Nachrichtentechnik ist optische Leistung P_{opt} die bestimmende Größe.

Die Angabe eines Spannungswertes erfolgt als Vielfaches der Einheit Volt (V), während es sich beim Leistungswert um das Vielfache der Einheit Watt (W) handelt. Das Vielfache kann dabei auch eine beliebig gebrochene Zahl sein. Bei der Spannung ist zur Angabe der Polarität zusätzlich auch das Minuszeichen möglich.

In der Nachrichtentechnik treten neben der elektrischen Spannung U (üblicherweise nur als Spannung bezeichnet) und der elektrischen Wirkleistung P (üblicherweise nur als Leistung bezeichnet) auch noch andere physikalische Größen auf. Dabei ist gemäß nachfolgenden Angaben zwischen Leistungsgrößen und Feldgrößen zu unterscheiden:

Leistungsgrößen weisen Proportionalität zur elektrischen Wirkleistung P auf:

- Energie, Arbeit W (Einheit: J)
- Leistungs(fluss)dichte P/A (Einheit: W/m²)
- Energiedichte W/A (Einheit: J/m²)

Feldgrößen weisen Proportionalität zur Quadratwurzel der elektrischen Wirkleistung P auf:

- Elektrische Spannung U (Einheit: V)
- Elektrischer Strom I (Einheit: A)
- Elektrische Feldstärke E (Einheit: V/m)
- Magnetische Feldstärke H (Einheit: A/m)
- Kraft F (Einheit: N)
- Schalldruck p (Einheit: Pa)

Häufig ist nicht der absolute Wert einer Größe von Interesse, sondern das Verhältnis von zwei gleichartigen Größen, also zum Beispiel Eingangs- und Ausgangsspannung eines Verstärkers. Es ergibt sich dadurch ein Bruch, dessen Zähler und Nenner gleiche Dimensionen aufweisen. Das führt zu einem dimensionslosen Ausdruck x . Bezogen auf beliebige Stellen a und b ergibt sich für die Leistung:

$$x_p = \frac{P_a}{P_b} \quad (3.7)$$

Vergleichbar gilt für die Spannung:

$$x_U = \frac{U_a}{U_b} \quad (3.8)$$

Die Beschreibung dieser Größenverhältnisse durch den dekadischen Logarithmus führt zu folgender Form y und wird im Gegensatz zur linearen Variante als Pegel [level] bezeichnet:

$$y_p = \lg \frac{P_a}{P_b} \quad (3.9)$$

$$y_u = \lg \frac{U_a}{U_b} \quad (3.10)$$

Als Formelzeichen für den Pegel wurde L festgelegt.



Pegel [level] L = Logarithmiertes Verhältnis von Leistungsgrößen und Feldgrößen

Durch einen Index beim Formelzeichen L lässt sich die Art des Pegels eindeutig kennzeichnen, wie L_p für den Leistungspegel und L_u für den Spannungspegel.

Da Pegelangaben systembedingt dimensionslos sind, sie jedoch als Pegelangabe erkennbar sein sollen, wurde als Pseudoeinheit „Bel“ (B) festgelegt. Es hat sich allerdings in der Praxis das Dezibel (dB) durchgesetzt, also das Zehntelbel, weil dies zu überschaubaren Pegelwerten führt. Es gilt:

$$1 \text{ dB} = \frac{1}{10} \text{ B} \quad \Rightarrow \quad 1 \text{ B} = 10 \text{ dB} \quad (3.11)$$

Damit ergibt sich für den Leistungspegel:



$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P_a}{P_b} \text{ dB} \quad (3.12)$$

Mit Hilfe der Leistungsformel ist der Übergang vom Leistungspegel zum Spannungspegel möglich. Es gilt:

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P_a}{P_b} \text{ dB} = 10 \cdot \lg \frac{\frac{U_a^2}{R_a}}{\frac{U_b^2}{R_b}} \text{ dB} \quad (3.13)$$

Als Bedingung gilt nun, dass sich beide Leistungen auf den gleichen Widerstand beziehen müssen. Das bedeutet:

$$R_a = R_b = R \quad (3.14)$$

Daraus folgt für den Spannungspegel:

$$L_u = 10 \cdot \lg \frac{U_a^2}{U_b^2} \text{ dB} = 10 \cdot \lg \left(\frac{U_a}{U_b} \right)^2 \text{ dB} = 10 \cdot 2 \cdot \lg \frac{U_a}{U_b} \text{ dB}$$



$$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U_a}{U_b} \text{ dB} \quad (3.15)$$

Ist ein Pegelwert vorgegeben, dann kann durch Entlogarithmieren das Verhältnis der Leistungen und Spannungen einfach ermittelt werden. Es gilt allgemein:

$$y = \lg x \Leftrightarrow x = 10^y \quad (3.16)$$

Daraus folgt auf die Leistungen bezogen:



$$\frac{P_a}{P_b} = 10^{\frac{L_p}{10 \text{ dB}}} \quad (3.17)$$

Bezogen auf die Spannungen ergibt sich:



$$\frac{U_a}{U_b} = 10^{\frac{L_U}{20 \text{ dB}}} \quad (3.18)$$

Die bisherigen Betrachtungen der Leistungen und Spannung bezogen sich auf zwei beliebige Stellen a und b im Kommunikationssystem. In der Praxis ist jedoch sehr häufig das Verhältnis zwischen der Eingangsgröße und der Ausgangsgröße einer Baugruppe, eines Gerätes oder eines Systems von Bedeutung. Es gelten dafür folgende Indizes:

- Größen am Eingang: Index 1
- Größen am Ausgang: Index 2

Diese Festlegung führt zum **relativen Pegel**. Für die Beziehung (= Relation) zwischen Eingang und Ausgang gibt es zwei Möglichkeiten für die Pegelangabe:

Bezug auf den Ausgang (Index 2)

$$L_{P(1/2)} = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ dB} \quad (3.19)$$

Bezug auf den Eingang (Index 1)

$$L_{P(2/1)} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB} \quad (3.20)$$

Beide Pegel basieren auf den Kehrwerten der Leistungsverhältnisse. Sie weisen deshalb gleiche Zahlenwerte, jedoch unterschiedliche Vorzeichen auf.

Die Wirkungsrichtung verläuft bei Baugruppen, Geräten und Systemen stets vom Eingang zum Ausgang. Sind die Werte von Leistung oder Spannung am Ausgang größer als die am Eingang, dann liegt Verstärkung [gain] vor und es ergibt sich ein positiver Wert für den Pegel.



Ausgangsgröße > Eingangsgröße = Verstärkung [gain] → Positiver Pegelwert

Bei kleineren Werten am Ausgang gegenüber dem Eingang handelt es sich um Dämpfung [attenuation]. Das führt zu negativen Werten für den Pegel. Es gelten folgende Zusammenhänge:

$$\text{Verstärkung: } P_2 > P_1 \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} > 1 \Rightarrow \lg \frac{P_2}{P_1} > 0 \Rightarrow L_p = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB} > 0 \quad (3.21)$$

$$\text{Dämpfung: } P_2 < P_1 \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} < 1 \Rightarrow \lg \frac{P_2}{P_1} < 0 \Rightarrow L_p = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB} < 0 \quad (3.22)$$

Vorstehende Aussagen gelten vergleichbar auch für die Spannung.

Durch das Vorzeichen ist also bei jedem Pegelwert eindeutig erkennbar, ob es sich um Verstärkung oder Dämpfung handelt, wenn sich die Angabe auf dieselbe Wirkungsrichtung bezieht. Im Sprachgebrauch und in der Fachliteratur wird dies nicht immer konsequent beachtet. So muss bei der Aussage, dass die Dämpfung 12 dB beträgt, in Berechnungen dies als -12 dB berücksichtigt werden.

Das lineare Verhältnis der Leistungswerte bzw. Spannungswerte wird als Verstärkungsfaktor oder Dämpfungsfaktor bezeichnet.



Faktor = Lineares Verhältnis der Werte für P bzw. U

Beim logarithmierten Verhältnis der Leistungswerte bzw. Spannungswerte handelt es sich dagegen um Verstärkungspegel oder Dämpfungspegel (**Bild 3.11**).

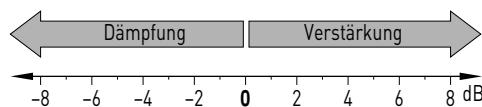


Bild 3.11 Verstärkungs- und Dämpfungspegel



Pegel = Logarithmiertes Verhältnis der Werte für P bzw. U

In der **Tabelle 3.2** sind die möglichen Varianten der Faktoren und Pegel zusammengestellt.

Tabelle 3.2 Faktoren und Pegel für Leistung und Spannung

$P_2 > P_1$	Leistungs-Verstärkungsfaktor $V_p = \frac{P_2}{P_1}$	Leistungs-Verstärkungspegel $L_{p(V)} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB}$
$U_2 > U_1$	Spannungs-Verstärkungsfaktor $V_u = \frac{U_2}{U_1}$	Spannungs-Verstärkungspegel $L_{u(V)} = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ dB}$

$P_2 < P_1$	Leistungs-Dämpfungsfaktor $D_p = \frac{P_2}{P_1}$	Leistungs-Dämpfungspegel $L_{P(A)} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB}$
$U_2 > U_1$	Spannungs-Dämpfungsfaktor $D_u = \frac{U_2}{U_1}$	Spannungs-Dämpfungspegel $L_{U(A)} = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ dB}$

In der Fachliteratur wird für die Verstärkungspegel auch die Bezeichnung *g* (von „gain“) verwendet und für die Dämpfungspegel *a* (von „attenuation“).

Durch Pegelangaben in Dezibel (dB) können auch große Werteverhältnisse mit überschaubaren Zahlen angegeben werden (**Bild 3.12**).

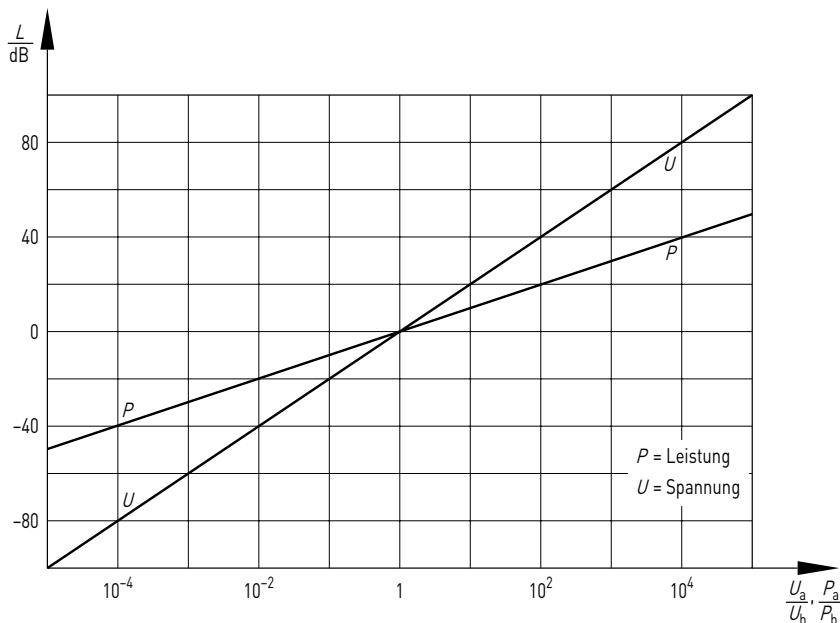


Bild 3.12 Relative Pegel für Leistung und Spannung

Die bisherigen Pegelbetrachtungen bezogen sich stets auf gleiche Widerstandswerte am Eingang und Ausgang. Diese Situation ist in der Praxis nicht immer gegeben. Bezogen auf den Widerstand R_1 am Eingang und den Widerstand R_2 am Ausgang lässt sich folgende Abhängigkeit ermitteln:

$$L_p = L_u + 10 \cdot \lg \frac{R_2}{R_1} \text{ dB} \quad (3.23)$$

Weisen R_1 und R_2 gleiche Werte auf, dann gilt das auch für den Leistungspegel und den Spannungspegel.

Erfolgt bei Pegelangaben der Bezug auf definierte Referenzwerte, dann handelt es sich um **absolute Pegel**. Wird für den allgemeinen Fall für den Referenzwert der Index „ref“ gewählt, dann gilt für den absoluten Leistungspegel:



$$(L_p)_{\text{abs}} = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (3.24)$$

Der absolute Spannungspegel weist folgende Form auf:



$$(L_U)_{\text{abs}} = 20 \cdot \lg \frac{U}{U_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (3.25)$$

Der Index „abs“ kann entfallen, wenn hinter dem dB-Zeichen die Einheit der Referenzgröße in Klammern angegeben ist. Von dieser genormten Form wird in der Praxis häufig abgewichen und ein direktes Anhängsel an das dB-Zeichen verwendet.

Grundsätzlich ist jeder Wert als Referenz möglich. In der Praxis sind jedoch nur bestimmte Größen üblich. Dazu gehören:

- Absoluter Leistungspegel, bezogen auf 1 mW
Genormte Angabe: dB(mW)
Häufig verwendete Angabe: dBm
- Absoluter Leistungspegel, bezogen auf 1 W
Genormte Angabe: dB(W)
Häufig verwendete Angabe: dBW
- Absoluter Spannungspegel, bezogen auf 1 μ V
Genormte Angabe: dB(μ V)
Häufig verwendete Angabe: dB μ V
- Absoluter Spannungspegel, bezogen auf 1 V
Genormte Angabe: dB(V)
Häufig verwendete Angabe: dBV

In **Tabelle 3.3** ist eine Auswahl für die Nachrichtentechnik wichtiger absoluter Pegel und ihre Entlogarithmierung zusammengestellt.

Tabelle 3.3 Berechnung absoluter Pegel

Art des Pegels	Berechnung des Pegels	Berechnung des Wertes
absoluter Leistungspegel Bezugswert: 1 mW	$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{mW}} \text{ dBm}$	$P = 10^{L_p/10} \text{ dBm} \text{ mW}$
absoluter Leistungspegel Bezugswert: 1 W	$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{W}} \text{ dBW}$	$P = 10^{L_p/10} \text{ dBW} \text{ W}$

Art des Pegels	Berechnung des Pegels	Berechnung des Wertes
absoluter Spannungspegel Bezugswert: 1 µV	$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U}{1\mu V} \text{ dB}\mu V$	$U = 10^{L_U/20 \text{ dB}\mu V} \mu V$
absoluter Spannungspegel Bezugswert: 1 V	$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U}{1V} \text{ dBV}$	$U = 10^{L_U/20 \text{ dBV}} V$
absoluter Feldstärkepegel Bezugswert: 1 µV/m	$L_E = 20 \cdot \lg \frac{E}{1\mu V/m} \text{ dB}(\mu V/m)$	$E = 10^{L_E/20 \text{ dB}(\mu V/m)} \mu V/m$

Mit Hilfe der Tabelle lassen sich Pegelwerte und Größen problemlos ineinander umrechnen.

Da an der Ergänzung des dB-Zeichens erkennbar ist, dass es sich bei der Angabe um einen absoluten Pegel handelt, wird in der Fachliteratur üblicherweise das Adjektiv „absolut“ meistens nicht verwendet. Es hat sich auch eingebürgert, trotz der Angabe absoluter Pegel in Dezibel (dB), lediglich von Leistung, Spannung und Feldstärke zu sprechen.



Häufig wird bei Angaben in Dezibel (dB) nicht der Begriff Pegel verwendet.

Neben reinen Pegelangaben sind häufig auch die Unterschiede zwischen zwei Pegelwerten von Interesse. Beziehen sich diese Differenzen auf dieselbe Stelle, dann gilt die Bezeichnung **Abstand** [ratio] (**Bild 3.13**). Durch Zusätze wird der Bezug für die Angabe genauer beschrieben.

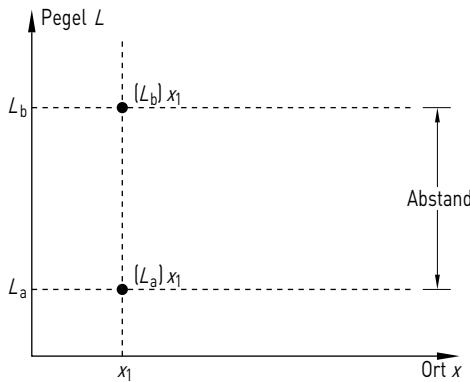


Bild 3.13 Pegeldifferenz „Abstand“



Beispiel:

Ein vorgegebener Störabstand [signal-to-noise ratio (SNR)] von 30 dB bedeutet, dass der Pegel des Nutzsignals um 30 dB größer ist, als der des Störsignals.

Mathematisch betrachtet, handelt es sich bei dem Abstand um den Betrag der Differenz von zwei auf denselben Ort bezogenen Pegelwerten.

$$\text{Abstand} = \left| (L_a)_{x1} - (L_b)_{x1} \right| \quad (3.26)$$



Beim Abstand erfolgt der Bezug auf denselben Ort!

Wird dagegen der Betrag der Differenz von zwei Pegelwerten an unterschiedlichen Orten betrachtet, dann gilt die Bezeichnung **Maß** [figure] (**Bild 3.14**). Auch hier wird durch Zusätze der Bezug für die Angabe genauer beschrieben.

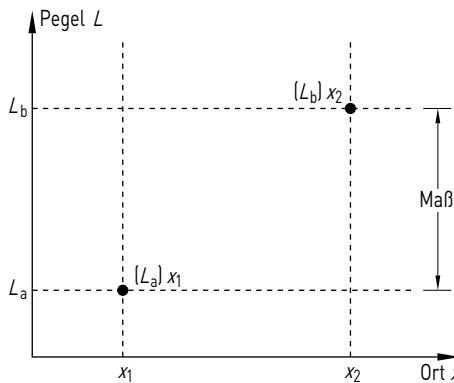


Bild 3.14 Pegeldifferenz „Maß“



Beispiel:

Ein Rauschmaß [noise figure] von 10 dB bedeutet, dass der Pegelwert für das Rauschsignal am Ausgang (2) einer elektronischen Funktionseinheit (z.B. Verstärker) um 10 dB größer ist, als der Pegelwert für das Rauschsignal am Eingang (1).

Aus mathematischer Sicht stellt sich das Maß wie folgt dar:

$$\text{Maß} = \left| (L_a)_{x1} - (L_b)_{x2} \right| \quad (3.27)$$



Beim Maß erfolgt der Bezug auf unterschiedliche Orte.

Analog zu den bereits behandelten Verstärkungs- und Dämpfungspegeln sind auch Verstärkungs- und Dämpfungsmaße definierbar. Es ergeben sich folgende Varianten:

- Leistungs-Verstärkungsmaß $g_p = L_{p(2)} - L_{p(1)}$ (3.28)

- Spannungs-Verstärkungsmaß $g_u = L_{u(2)} - L_{u(1)}$ (3.29)

- Leistungs-Dämpfungsmaß $a_p = L_{p(1)} - L_{p(2)}$ (3.30)

- Spannungs-Dämpfungsmaß $a_U = L_{U(1)} - L_{U(2)}$ (3.31)

In der Fachsprache werden für Verstärkungs- und Dämpfungsmaß überwiegend nur die nicht präzisen Bezeichnungen Verstärkung und Dämpfung verwendet.

Kommunikationssysteme bestehen stets aus einer Kettenbildung verschiedener Funktionseinheiten, jede gekennzeichnet durch Verstärkung oder Dämpfung. Die Änderung der Pegelsituation innerhalb des Systems lässt sich überschaubar als Graph in einem rechtwinkligen Koordinatensystem darstellen. Es handelt sich um den Verlauf des Pegels L in Abhängigkeit vom Ort. Diese Funktion $L = f(x)$ wird als Pegelplan oder Pegeldiagramm bezeichnet. Auf der x -Achse (Abszisse) ist dabei der Ort x abgetragen, während es sich auf der y -Achse (Ordinate) um den Pegel handelt. Der Graph beginnt mit dem Eingangspiegel und endet mit dem Ausgangspiegel des Systems.



Beispiel:

Es soll der Pegelplan für ein aus fünf Stufen bestehendes Kommunikationssystem dargestellt werden, bei dem in Reihenfolge der Stufen folgende Werte für die Verstärkung bzw. Dämpfung vorliegen: 24 dB, -10 dB, 3 dB, 18 dB, -12 dB.

Im Koordinatensystem beginnt der Graph bei 0 dB. Er steigt dann bei der ersten Stufe um 24 dB, reduziert sich bei der zweiten Stufe um 10 dB, um danach wieder um 3 dB größer zu werden. Durch die vorletzte Stufe ergibt sich ein weiterer Anstieg um 18 dB, während die Dämpfung der letzten Stufe wieder einen Rückgang um 12 dB bewirkt. Als Ausgangspiegel tritt damit ein Wert von 23 dB auf (**Bild 3.15**).

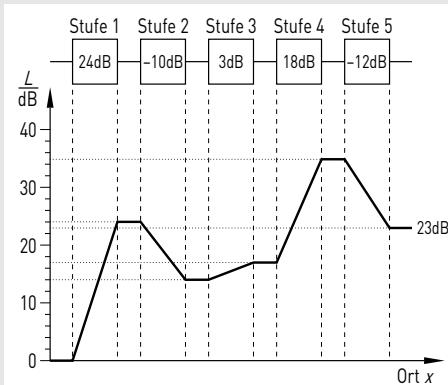


Bild 3.15 Beispiel für Pegelplan

Hätte der Eingangspiegel 15 dB betragen, dann wäre der Verlauf des Graphen zwar unverändert geblieben, jedoch insgesamt um 15 dB nach oben verschoben. Als Ausgangspiegel würde sich dann der Wert $23 \text{ dB} + 15 \text{ dB} = 38 \text{ dB}$ ergeben.

Vorstehendes Beispiel verdeutlicht folgende Abhängigkeiten:

- Positive Pegelwerte \triangleq Verstärkung
→ Anstieg des Graphen $L = f(x)$
- Negative Pegelwerte \triangleq Dämpfung
→ Abfall des Graphen $L = f(x)$



Pegelplan (Pegeldiagramm) = Darstellung des Pegels in Abhängigkeit vom Ort bei Kommunikationssystemen.



Im Pegelplan können relative Pegel, aber auch absolute Pegel für Leistungen und Spannungen verwendet werden. Die Wahl kann nach Zweckmigkeit für den Einzelfall erfolgen. Liegt am Eingang ein absoluter Pegel vor, dann ergibt sich auch am Ausgang ein absoluter Pegel. Aus dem Graphen ist beim absoluten Pegel auch erkennbar, welcher größte (maximale) und kleinste (minimale) Pegel im Kommunikationssystem auftritt.

4

Referenzmodell für offenes Kommunikationssystem

■ 4.1 Anforderungen

Jeder Kommunikationsvorgang basiert auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten. Das Ziel ist stets eine spezifische Anwendung [application], also der gewünschte Dienst.



Beispiel:

Der Wirkungsmechanismus bei direkter Kommunikation zwischen zwei Personen ist die Gesetzmäßigkeit der Akustik für das Sprechen. Diese wird jedoch von den Kommunikationspartnern seit ihrer Kindheit beherrscht.

Im Falle der Telekommunikation können sich die im vorstehenden Beispiel Beteiligten nicht mehr unmittelbar erreichen. Es bedarf deshalb eines Übertragungsmediums, um die vorhandenen Entfernung zu überbrücken. Dies lässt sich bekanntlich durch Leitungsverbindungen oder Funkstrecken realisieren, wobei das Sprachsignal dabei als elektrisches und/oder optisches Signal übertragen wird. Dadurch ergibt sich allerdings keine grundsätzliche Änderung der Anwendung „Sprachkommunikation“.

Bei der Kommunikation stellt die Sprache nur einen Fall dar. Es ist vielmehr die Betrachtung aller Arten von Audiosignalen, Videosignalen und Daten erforderlich. Dabei sind die bisher aufgezeigten Ebenen, oben die Anwendung und unten die Physik, nicht ausreichend. Es müssen deshalb folgende Funktionen berücksichtigt werden:

- **Syntax**
Es handelt sich um die bei jedem Informationsaustausch erforderliche verbindliche Festlegung der Darstellungsform.
- **Protokolle**
Diese sind für die Abwicklung der Kommunikation unbedingt erforderlich.
- **Transportsteuerung**
Damit die Kommunikation zuverlässig und kostengünstig erfolgen kann, ist die Steuerung des Signaltransports von Ende zu Ende erforderlich.
- **Vermittlung**
Dabei handelt es sich um die gezielte Steuerung des Aufbaus und Abbaus der Verbindungswege zwischen den beteiligten Endgeräten einer Kommunikation.

- **Sicherung**

Für optimale Ergebnisse der Kommunikation ist die Sicherung der Informationen gegen störende Beeinflussungen oder Verlust von großer Bedeutung.

Bei analogen Diensten sind vorstehende Anforderungen relativ einfach erfüllbar, weil hier stets eigenständige Netze zum Einsatz kommen, also dienstespezifische Konzepte vorliegen. Dafür gilt auch die Bezeichnung Closed Systems Interconnection (CSI), was Kommunikation im geschlossenen System bedeutet.

Digitale Dienste ermöglichen dagegen die Unabhängigkeit von spezifischen Netzen. Sie können über unterschiedliche Netze betrieben werden, was die Effizienz der Übertragung steigert und deren Kosten reduziert.

Das lässt sich allerdings nur durch **offene Kommunikationssysteme** erreichen. Von der Internationalen Standardisierungsorganisation [International Standardisation Organisation (ISO)] wurde ein Referenzmodell für derartige Netze bzw. Systeme entwickelt. Als Bezeichnung dafür gilt OSI [open systems interconnection], also Kommunikation in offenen Systemen. Dieses **OSI-Referenzmodell** macht keine Vorgaben für die Implementation von Netzen, sondern bietet den strukturierten Mechanismus von Kommunikationsvorgängen. Es reduziert die Komplexität des Systems durch Aufteilung in definierte Einzelschritte, was die Bildung von Subsystemen bedeutet. Damit wird die einheitliche Syntax sichergestellt.

■ 4.2 Schichten und Protokolle

Das OSI-Referenzmodell besteht aus sieben Schichten [layer], die hierarchisch angeordnet zwischen dem physikalischen Medium und der Anwendung liegen. Jede Schicht beschreibt bestimmte Funktionen und weist zur darüber und darunter liegenden Schicht eindeutige Schnittstellen auf. Dadurch lassen sich Kommunikationssysteme mit Hardware (also Geräten, Baugruppen, Funktionseinheiten, ...) und Software (also Programmen, Protokollen, ...) verschiedener Hersteller aufbauen. Es müssen lediglich die Schnittstellenbedingungen erfüllt sein. Auf diese Weise werden Wettbewerb ermöglicht und Fortschritte in der Technologie sowie bei der Softwareentwicklung nicht behindert.



Die Verwendung von Hardware und Software beliebiger Hersteller ist möglich, wenn die Schnittstellenbedingungen erfüllt sind.

Die niedrigste Schicht (Schicht 1) des OSI-Referenzmodells setzt unmittelbar auf dem physikalischen Medium auf, das selbst nicht als Schicht betrachtet wird. Diese Schicht weist eine bestimmte Funktionalität auf und erbringt gegenüber der nächsthöheren Schicht (Schicht 2) eine Dienstleistung (häufig auch nur als Dienst bezeichnet), definiert durch die Schnittstelle zwischen beiden Schichten. Die Schicht 2 benötigt die Dienstleistung der Schicht 1, um in Verbindung mit ihrer eigenen Funktionalität nun für die Schicht 3 eine Dienstleistung bereitzustellen zu können. Dieses Konzept setzt sich bis zur höchsten Schicht (Schicht 7) fort (**Bild 4.1**). Die darüber liegende Anwendung trifft somit auf ein verschachteltes System von Schichten (**Bild 4.2**). Ein vollständiges offenes Kommunikationssystems umfasst dabei alle sieben Schichten.

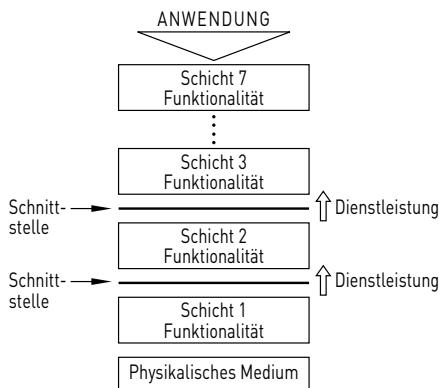


Bild 4.1 Gegenseitige Abhängigkeiten der Schichten

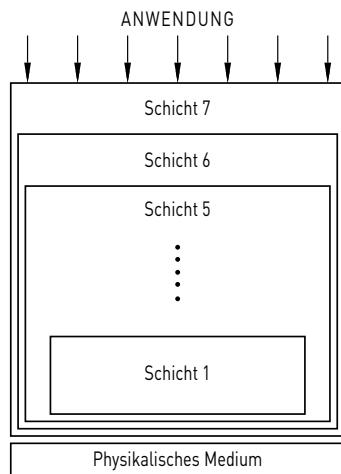


Bild 4.2 Schichten aus Sicht der Anwendung

Bei den Schichten lassen sich zwei Gruppen unterscheiden. Die Schichten 1 bis 4 behandeln die Transportfunktionen für die Daten zwischen Quelle und Senke, sind also netzorientiert. Die Schichten 5 bis 7 regeln dagegen die Anwendung der Kommunikation und setzen einen reibungslosen Datentransport voraus. Die Schichten dieser Gruppe sind somit anwendungsorientiert.

Die Schicht 1 wird als Übertragungsschicht [physical layer] bezeichnet. Sie stellt alle Funktionen für die Steuerung der Übertragung der digitalen Signale zur Verfügung, bewerkstelligt die eigentliche Übertragung und wird deshalb auch als Bitübertragungsschicht bezeichnet. Das führt im Ergebnis zu einer ungesicherten Verbindung zwischen den Stellen A und B. Die Schicht 1 bewirkt auch die Anpassung der ankommenden oder abgehenden Bitströme an das physikalische Medium (z.B. Koaxialkabel, Lichtwellenleiter, ...), weshalb Bitraten, Modulationsarten, Trägerfrequenzen und andere für eine Übertragung relevanten Parameter zu berücksichtigen sind.



Schicht 1

Übertragungsschicht [physical layer]

(auch als Bitübertragungsschicht bezeichnet)

Bewirkt ungesicherte Übertragung von A nach B auf Basis der übertragungs-technischen Parameter.

Die Schicht 2 wird als Sicherungsschicht [data link layer] bezeichnet. Sie hat primär die Aufgabe, die von der Übertragungsschicht (Schicht 1) bewirkte ungesicherte Übertragung in eine gesicherte Übertragung zu wandeln. Dazu gehört auch, dass eine schnelle Quelle eine langsamere Senke nicht überfüllen darf. Sie stellt den Fehlerschutz und den Zugriff auf die Daten über entsprechende Verfahren sicher. Dabei umfasst der Fehlerschutz stets die Fehlererkennung und die Fehlerkorrektur.



Schicht 2

Sicherungsschicht [data link layer]

Bewirkt Fehlererkennung, Fehlerkorrektur und gesicherten Zugriff auf die Bitströme

Die Schicht 3 wird als Vermittlungsschicht [network layer] bezeichnet. Sie transformiert die durch Schicht 1 und Schicht 2 bewirkte gesicherte Verbindung von A nach B in eine gesicherte Punkt-zu-Punkt-Verbindung durch ein Netz. Dies umfasst den Aufbau und Abbau der Verbindung, ebenso die als Wegesuche zu verstehende Lenkung der Bitströme im Netz und die erforderliche Adressierung.



Schicht 3

Vermittlungsschicht [network layer]

Bewirkt Aufbau, Lenkung und Abbau von Verbindungen im Netz

Die Schicht 4 wird als Transportschicht [transport layer] bezeichnet. Sie ist für die Übertragung der digitalen Signale zwischen den an der Kommunikation beteiligten Endgeräten zuständig, stellt also den eigentlichen Nutzern die Transportmöglichkeit zur Verfügung. Dies gilt unabhängig von den Eigenschaften der verwendeten Netze. Die Transportschicht kann eine vorgesehene Netzverbindung zwischen den Endgeräten auch auf mehrere physikalische Verbindungen aufteilen.



Schicht 4

Transportschicht [transport layer]

Bewirkt unabhängig von den Eigenschaften der Netze die Übertragung zwischen den Endgeräten

Die Schicht 5 wird als Kommunikationsschicht [session layer] bezeichnet. Sie ist für Eröffnung, Verwaltung der Durchführung und Beendigung der Kommunikationsverbindung zuständig. Für eine solche Verbindung gilt auch die Bezeichnung Sitzung. Die Schicht stellt auch die Synchronisation zwischen den beteiligten Endgeräten und den Schutz der Bitströme gegen den Zugriff durch Unbefugte sicher.



Schicht 5

Kommunikationsschicht [session layer]

Bewirkt Eröffnung, Synchronisation, Durchführung, Zugriffsschutz und Beendigung einer Kommunikationsverbindung (Sitzung)

Die Schicht 6 wird als Darstellungsschicht [presentation layer] bezeichnet. Sie ist für die Darstellung (Präsentation) der Informationen hinsichtlich Syntax und Semantik zuständig. Dazu gehören auch Vereinbarungen über entsprechende Darstellungsformen und im Bedarfsfall erforderliche Anpassungen der Übertragungsformate. Das führt zum Beispiel bei der Bearbeitung von Dokumenten dazu, dass gleichwertige Text- und Grafikdarstellungen angeboten werden, auch wenn bei den Endgeräten der Nutzer Hardware und Software verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Grafikauflösungen zum Einsatz kommen.



Schicht 6

Darstellungsschicht [presentation layer]

Bewirkt unabhängig von der in den Endgeräten eingesetzten Hardware und Software Darstellung der Informationen im einheitlichen Format

Die Schicht 7 ist die oberste Schicht des OSI-Referenzmodells und wird als Verarbeitungsschicht [application layer] bezeichnet. Sie regelt im Detail, wie die Endgeräte bei einer Kommunikation zusammenwirken. Dazu gehören unter anderem die Identifizierung der Kommunikationspartner, die Wahl der als Dienstgüte bezeichneten Kommunikationsparameter und das Angebot grundlegender Dienste (z. B. E-Mail). Die Schicht 7 bildet eine unmittelbare Verknüpfung zur eigentlichen Anwendung.



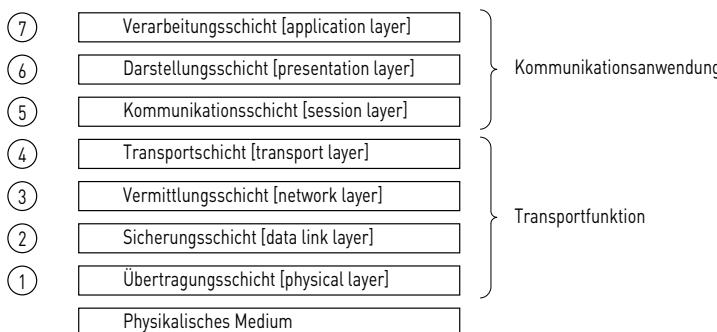
Schicht 7

Verarbeitungsschicht [application layer]

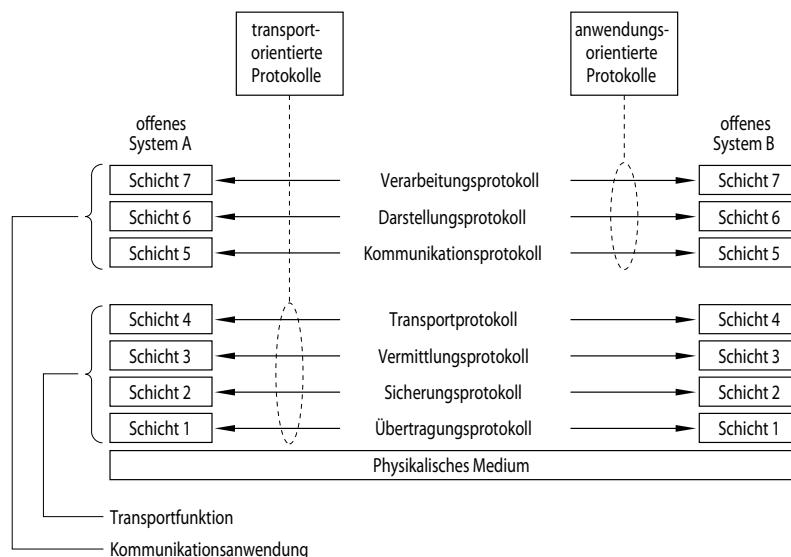
Bewirkt das optimale Zusammenwirken der Endgeräte im Detail und bietet die Verknüpfung zur Anwendung

Die sieben Schichten des OSI-Referenzmodells weisen eine geschlossene Struktur auf und stellen eine Art Aufgabenverteilung mit gegenseitiger Abhängigkeit dar (**Bild 4.3**). Bei realen Kommunikationssystemen ist für jede Funktionalität der Bezug auf eine der Schichten des OSI-Referenzmodells möglich.

Schicht

**Bild 4.3** Schichten des OSI-Referenzmodells

Bezogen auf die Verbindung offener Systeme gemäß dem OSI-Referenzmodell kommuniziert jede Schicht auf der einen Seite nur mit der gleich hohen Schicht auf der anderen Seite. Dies erfolgt über Protokolle, also festgelegte Regeln, deren Umsetzung über das physikalische Medium erfolgt. Deshalb gibt es das Übertragungsprotokoll, das Sicherungsprotokoll, das Vermittlungsprotokoll und das Transportprotokoll als transportorientierte Protokolle sowie das Kommunikationsprotokoll, das Darstellungsprotokoll und das Verarbeitungsprotokoll als anwendungsorientierte Protokolle (**Bild 4.4**).

**Bild 4.4** Protokolle beim OSI-Referenzmodell

Die Kommunikation der Schichten des OSI-Referenzmodells erfolgt bei Verbindungen nur zwischen gleich hohen Schichten mit Hilfe von Protokollen.

Die Gesamtheit aller vorstehend aufgezeigten Protokolle wird üblicherweise als Protocol Stack bezeichnet, was als Protokollstapel zu verstehen ist.



Beispiel:

Das Zusammenspiel der verschiedenen Schichten sei am Beispiel einer Telefonverbindung verdeutlicht. Wird bei einem Telefon (\triangleq physical layer) der Hörer abgenommen, dann ertönt das Freizeichen (\triangleq data link layer). Nach Wahl der Teilnehmernummer (\triangleq network layer) meldet sich die Zentrale der angerufenen Firma (\triangleq transport layer). Als nächster Schritt wird eine bestimmte Person verlangt und sich mit dieser im Bedarfsfall auf eine Sprache geeinigt (\triangleq presentation layer). Danach erfolgt dann der angestrebte Informationsaustausch (\triangleq application layer).

■ 4.3 Verbindungsstrukturen

Die Verbindungsstruktur bei offenen Kommunikationssystemen verläuft stets von der Schicht 7 des Systems A schrittweise über die weiteren Schichten dieses Systems bis zur Schicht 1. Dann erfolgt die Verknüpfung zum System B über das physikalische Medium. Hier gilt nun die Schrittfolge von Schicht 1 bis Schicht 7 (**Bild 4.5**). Auf diese Weise wird allen aufgezeigten Aspekten der offenen Kommunikation Rechnung getragen.

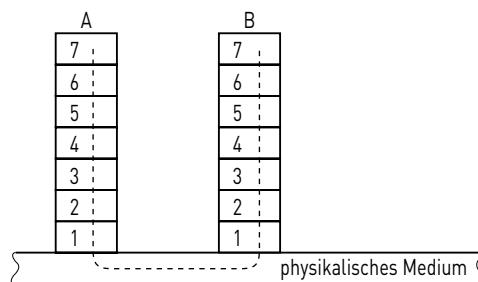
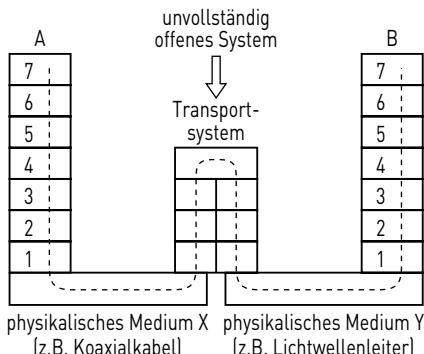


Bild 4.5 Verbindungsstruktur bei offenen Systemen

Bei der Verbindung von zwei vollständig offenen Systemen, bei denen also alle sieben Schichten auftreten, kann im Bedarfsfall als Transitsystem auch ein unvollständig offenes System zum Einsatz kommen. Dieses stellt allerdings nur Transportfunktionen zur Verfügung, wird deshalb als Transportsystem bezeichnet und weist höchstens die Schichten 1 bis 4 auf (**Bild 4.6**). Ein typischer Anwendungsfall für ein Transportsystem liegt zum Beispiel vor, wenn beim Übertragungskanal eines Kommunikationssystems von einem physikalischen Medium (z. B. Koaxialkabel) auf ein anderes (z. B. Glasfaserleitung) gewechselt werden soll. Hier übernimmt das Transportsystem die erforderliche Anpassung zwischen den beiden Medien (z. B. durch elektrooptische Umsetzer), weshalb die dafür eingesetzten technischen Einrichtungen auch als Medienkonverter bezeichnet werden.

**Bild 4.6** Einsatz von Transportsystemen

Ein Transportsystem muss nicht alle Transportfunktionen der Schichten 1 bis 4 aufweisen. Ist nur die Übertragungsschicht (Schicht 1) vorhanden, dann handelt es sich um einen Repeater. Steht zusätzlich auch noch die Sicherungsschicht (Schicht 2) zur Verfügung, dann gilt die Bezeichnung Bridge. Die Ergänzung der Vermittlungsschicht (Schicht 3) führt zum Router. Kann dieser auch noch Protokolle konvertieren, dann gilt üblicherweise die Bezeichnung Gateway.

5

Konzept der Übertragung

■ 5.1 Grundlagen

Übertragung ist die Art der technischen Kommunikation, bei der von einer Quelle erzeugte Signale ohne zeitliche Verzögerung einer räumlich entfernten Senke zugeführt werden. Die Senke nutzt dabei das übertragene Signal für den gewünschten Dienst.



Beispiel:

Durch ein Mikrofon wird als Quelle das zu übertragende Signal erzeugt. Nach der Übertragung kommt ein Lautsprecher als Senke für die Tonwiedergabe zum Einsatz.



Übertragung = Technische Kommunikation zwischen räumlich entfernten Quellen und Senken ohne Zeitverzug

Zwischen Quelle und Senke liegt das eigentliche Übertragungssystem [transmission system]. Dieses weist stets folgende grundlegende Funktionalitäten auf:

- Sender [sender oder transmitter]
- Übertragungskanal [transmission channel]
(häufig auch nur als Kanal [channel] bezeichnet)
- Empfänger [receiver]

Das von der Quelle stammende Signal setzt der Sender in eine für den Transport im Übertragungskanal geeignete Form um. Dies ist erforderlich, weil jeder Übertragungskanal – vergleichbar einem Kanal für die Schifffahrt – ganz bestimmte technische Dimensionen aufweist. Die dadurch bedingten Einschränkungen von Leistungsmerkmalen müssen berücksichtigt werden, damit die Übertragung der analogen oder digitalen Signale keine Beeinträchtigung erfährt. Den Abschluss des Übertragungssystems bildet der Empfänger. Er passt das übertragene Signal den Erfordernissen der jeweiligen Senke an (**Bild 5.1**).

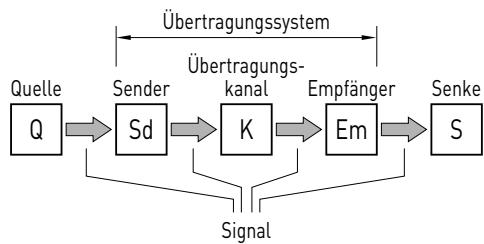


Bild 5.1 Technisches Konzept der Übertragung



Beispiel:

Am Beispiel des Fernsehens sollen vorstehende Ausführungen verdeutlicht werden.

Bei einer Direktübertragung (auch als Live-Übertragung bezeichnet) stellt die Fernsehkamera die Quelle für die Bildinformation dar. Sie erzeugt aus den aufgenommenen Bildern die zu übertragenden Signale. Diese werden dann in einem Sender dem spezifischen Übertragungskanal (Satellit, Kabel, Terrestrik oder Internet) angepasst. Bei Nutzung bereitet ein Empfänger die übertragenen Signale für die Wiedergabe auf. Als Senke dient der Bildschirm des Fernsehgerätes, auf dem die übertragenen Bildinhalte für den Betrachter dargestellt werden.

Für die grundsätzliche Funktion des Fernsehens spielt es keine Rolle, ob die Übertragung analog oder digital erfolgt und ob für die Bildwiedergabe eine analog arbeitende Bildröhre oder ein digital arbeitender LCD- oder Plasma-Flachbildschirm verwendet wird.

Bei der bisherigen Betrachtung der Übertragung wurde ausschließlich von Nutzsignalen ausgegangen. In der Praxis können jedoch beim Sender, Übertragungskanal und Empfänger zusätzlich auch Störsignale einwirken. Am Ausgang des Übertragungssystems, also vor der Senke, tritt dann ein aus Nutz- und Störsignal resultierendes Signal auf (**Bild 5.2**).

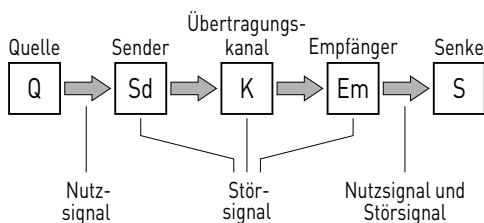


Bild 5.2 Störsignale bei der Übertragung

Die Qualität der Übertragung hängt vom Verhältnis zwischen Nutzsignal und Störsignal ab. Zwischen den Werten beider Signale muss stets ein Mindestabstand gewährleistet sein, der als Störabstand bezeichnet wird.

Jedes Kommunikationssystem soll bekanntlich mit Hilfe analoger oder digitaler Signale Informationen übertragen. Dabei handelt es sich stets um definierte Nachrichtenmengen. Für diese müssen die Komponenten des Übertragungssystems ausgelegt sein, um Beeinflussungen des Nutzsignals zu vermeiden. Das vom Sender erzeugte Signal muss deshalb einerseits in den Übertragungskanal „passen“, andererseits muss aber auch der Empfänger für das übertragene Signal geeignet sein.

Die zu übertragende Nachrichtenmenge lässt sich für die Betrachtungen des Übertragungssystems als Block darstellen, der üblicherweise als Nachrichtenquader bezeichnet wird. Dieser weist folgende drei Dimensionen auf:

- **Übertragungszeit** (Angabe in s)

Es handelt sich um die Zeitdauer, welche benötigt wird, um eine als Nachricht definierte Informationsmenge zu übertragen.

- **Bandbreite** (Angabe in Hz)

Es handelt sich um den für die Übertragung erforderlichen Frequenzbedarf, gekennzeichnet durch die Differenz zwischen einer größten (oberen) und einer kleinsten (unteren) Frequenz.

- **Störabstand** (Angabe in dB)

Es handelt sich um den erforderlichen Abstand zwischen dem Nutzsignal und dem Störsignal.

■ 5.2 Übertragungskanal und Störabstand

Jeder Übertragungskanal weist ebenfalls vorstehende Kenngrößen auf. Im Idealfall passen der zu übertragende Nachrichtenquader und die Kapazität des Übertragungskanals genau zueinander. Dies stellt allerdings eine Ausnahme dar. Üblicherweise muss der Nachrichtenquader dem vorgegebenen Übertragungskanal angepasst werden (**Bild 5.3**).

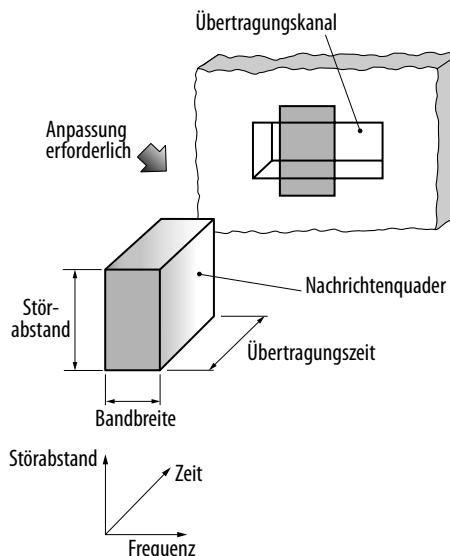


Bild 5.3 Nachrichtenquader und Übertragungskanal



Der durch Übertragungszeit, Bandbreite und Störabstand gekennzeichnete Nachrichtenquader muss an die entsprechenden Kenngrößen des Übertragungskanals angepasst werden.

Das Volumen des Nachrichtenquaders darf allerdings bei der Anpassung keine Änderung erfahren, da es die zu übertragende Nachrichtenmenge repräsentiert. Wird also eine Kenngröße variiert, dann hat dies auch unmittelbare Auswirkungen auf die beiden anderen Kenngrößen.

Ein Übertragungskanal kann durchaus aber auch bessere Werte als der Nachrichtenquader aufweisen. Dieser füllt dann den Übertragungskanal nicht vollständig aus. In diesem Fall ist es möglich, den Übertragungskanal für mehrere Nachrichtenquader zu nutzen.

Bei Übertragungen in Echtzeit lassen sich an der Kenngröße Zeit keine Änderungen realisieren, die Bandbreite und der Störabstand ermöglichen jedoch stets Varianten. Die Veränderung der Bandbreite lässt sich durch entsprechende Filter erreichen.



Die Bandbreite ist durch Filterung beeinflussbar.

Für den Störabstand ist bei analogen Signalen die Zahl der betrachteten Amplitudenstufen maßgebend. Digitale Signale benötigen einen geringeren Störabstand als analoge Signale, was sich aus ihrer Zweiwertigkeit erklären lässt.



Digitale Signale ermöglichen einen kleineren Störabstand als analoge Signale.

Die verschiedenen technischen Verfahren zur Anpassung des Nachrichtenquaders an die kennzeichnenden Merkmale des Übertragungskanals werden in späteren Kapiteln noch genauer behandelt. Dazu gehören Modulation/Demodulation, Codierung/Decodierung sowie Multiplexierung/Demultiplexierung.

Das Ziel jeder Übertragung ist es, die Informationen mit möglichst wenig Aufwand und ausreichender Qualität von der Quelle zur Senke zu bringen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass für den Nutzer eines Kommunikationssystems nur diejenigen Anteile einer Nachricht aufgenommen werden, die sich innerhalb seines Gehörfeldes bzw. seines Gesichtssinns befinden. Es ist also nur die Übertragung der dafür relevanten Anteile erforderlich. Gleichermaßen gilt für die redundanten Anteile. Damit sind im Prinzip Informationen gemeint, die entweder mehrfach auftreten oder sich aus anderen ergeben. Vorstehend beschriebene Situation ermöglicht die Reduktion der Daten des Quellsignals und damit auch eine geringere Übertragungskapazität. Dieser Ansatz gilt nicht nur für Audio- und Videosignale, sondern grundsätzlich auch für Datensignale.



Der Nutzer kann nur solche Nachrichten aufnehmen, die in seinem Gehörfeld bzw. Gesichtssinn auftreten. Es brauchen deshalb nur die relevanten und nicht redundanten Anteile einer Nachricht übertragen werden. Dies ermöglicht Datenreduktion [data reduction] des Quellsignals.

Datenreduktion wird in der Praxis meist durch den Fehlerschutz [error protection] wieder teilweise kompensiert. Dabei handelt es sich um eine definierte Zahl von Bits, die dem

datenreduzierten Signal hinzugefügt werden, damit bei der Übertragung auftretende Fehler erkannt und korrigiert werden können.



Durch **Fehlerschutz** [error protection] erhöht sich die erforderliche Übertragungskapazität des datenreduzierten Signals.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass durch Signalisierungen, Steuerungsdaten und sonstige zusätzliche Informationen die Übertragungskapazität ebenfalls vergrößert werden kann.

Übertragungskanäle sind in der Regel mit ihren Kennwerten (Spezifikationen) vorgegeben. Dabei kann es sich bekanntlich um elektrische Leitungen, optische Leitungen oder Funkstrecken handeln. Für jeden Fall dieser leitungsgebundenen oder funkgestützten Übertragungen ergibt sich eine spezifische Kanalkapazität [channel capacity]. Darunter wird die in einem bestimmten Zeitraum über einen Kanal übertragbare Informationsmenge verstanden.



Kanalkapazität [channel capacity] = Informationsmenge, die in einer bestimmten Zeit über einen vorhandenen Kanal übertragen werden kann.

Wegen vorstehender Situation kann bei Kommunikationssystemen der Übertragungskanal durchaus den „Flaschenhals“ darstellen.

Generell gilt für die Übertragungskapazität eines ungestörten Kanals:

$$C = 2 \cdot B \cdot \text{Id } n \quad (5.1)$$

Dabei ist C die Kanalkapazität in bit/s, B die Bandbreite in Hz, auf die das zu übertragende Signal bei der Abtastung begrenzt wurde, und n die Zahl der im Kanal zu übertragenden unterschiedlichen Werte, wenn diese gleiche Wahrscheinlichkeit aufweisen. Die Bezeichnung Id steht für den Logarithmus zur Basis 2.

Treten im Übertragungskanal Störungen auf, dann reduziert sich der Wert für die Kanalkapazität C und zwar abhängig von der Stärke der Störeinwirkung.



Die Kanalkapazität C eines Übertragungskanals ist unmittelbar von seiner Bandbreite und den auf die zu übertragenden Signale einwirkenden Störeinflüssen abhängig.

Es gibt bei jedem Übertragungskanal stets einen Wert für die maximale Bandbreite B_{\max} analoger Signale und/oder für die maximal mögliche Bitrate $(v_{\text{bit}})_{\max}$ digitaler Signale. Diese Werte gelten allerdings nur bezogen auf einen bestimmten Störabstand. Es kann auch die Abhängigkeit der Bandbreite bzw. Bitrate vom Störabstand als Funktion angegeben sein:

- Analog Signale: $B_{\max} = f(\text{Störabstand})$
- Digitale Signale: $(v_{\text{bit}})_{\max} = f(\text{Störabstand})$

Der Störabstand beschreibt bekanntlich die Differenz zwischen Nutzsignalpegel und Störsignalpegel. Er wird deshalb in Dezibel (dB) angegeben. In der Regel sind mit zunehmenden Werten für den Störabstand auch größere Bandbreiten und höhere Bitraten möglich, weil die Störeinflüsse kleiner werden.

Jeder Übertragungskanal weist stets eine vorgegebene Länge auf. Dadurch wird das vom Sender eingespeiste Signal als physikalischer Effekt gedämpft. Diese ist abhängig vom Übertragungsmedium (elektrische Leitung, optische Leitung, Funkstrecke), von der Länge des jeweiligen Übertragungskanals und vom verwendeten Übertragungsverfahren. Das eingespeiste Signal wird deshalb längenabhängig kontinuierlich kleiner. Die Angabe dieser längenabhängigen Dämpfung erfolgt in Dezibel (dB) pro Längeneinheit. Typisch ist dabei der Bezug auf 1 m, 100 m oder 1 km. Es handelt sich um eine lineare Abhängigkeit.



Jeder Übertragungskanal weist eine längenabhängige Dämpfung auf.

Die Angabe erfolgt dabei in dB/m, dB/100 m oder dB/km.

Die Werte der längenabhängigen Dämpfung müssen berücksichtigt werden, damit das Signal am Ende des Übertragungskanals noch so groß ist, dass der nachfolgende Empfänger damit bestimmungsgemäß arbeiten kann. Aus der Dämpfung und den für den jeweiligen Empfänger mindestens erforderlichen Eingangsspeigel lässt sich einfach ermitteln, mit welchem Ausgangsspeigel der Sender in den Übertragungskanal einspeisen muss. Es gilt:

$$(L_{\text{Sd}})_{\min} = (L_{\text{Em}})_{\min} + a_{\text{Kanal}} \quad (5.2)$$



Die Dämpfung des Übertragungskanals und der Mindesteingangsspeigel des Empfängers bestimmen den kleinsten Wert des einzuspeisenden Signals.

Die Kanalkapazität C stellt für jeden Übertragungskanal ein wichtiges kennzeichnendes Merkmal dar. Aus wirtschaftlichen Gründen wird stets die vollständige Nutzung angestrebt, was mit einer Anwendung nicht immer gegeben ist. Es gibt deshalb verschiedene Verfahren, wie die Kanalkapazität gleichzeitig für mehrere Anwendungen ohne gegenseitige Beeinflussung genutzt werden kann. Für diese Mehrfachnutzung gilt auch die Bezeichnung Vielfachzugriff [multiple access].



Vielfachzugriff [multiple access] = Gleichzeitige Nutzung der Kanalkapazität für mehrere Anwendungen

■ 5.3 Tore und ihre Parameter

Übertragungssysteme bestehen stets aus verschiedenen Geräten, Baugruppen und sonstigen Komponenten, die zusammengeschaltet sind. Diese Funktionseinheiten lassen sich auch durch einzelne Blöcke darstellen. Sie stehen über eine bestimmte Anzahl von Anschlüssen mit der Umwelt in Verbindung. Die Zusammenschaltung der Funktionseinheiten führt zum Übersichtsschaltplan, für den häufig auch noch die Bezeichnung Blockschaltbild verwendet wird (**Bild 5.4**). Aus ihm ist ersichtlich, wie die Eingänge und Ausgänge der eingesetzten Funktionseinheiten zusammenwirken.

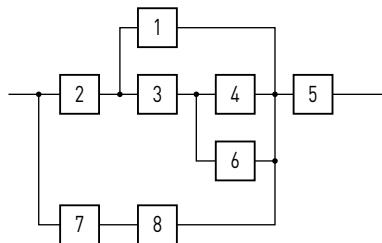


Bild 5.4 Übersichtsschaltplan

Beim Übersichtsschaltplan gilt als vereinbart, dass nur die eigentlichen Nutzsignale betrachtet werden, die Betriebsspannungen oder sonstige Hilfsspannungen bleiben unberücksichtigt.



Im Übersichtsschaltplan werden nur die Nutzsignale betrachtet.

Bei Übersichtsschaltplänen lassen sich in Abhängigkeit von der Zahl der zweipoligen Eingänge/Ausgänge folgende Varianten für die Blöcke unterscheiden:

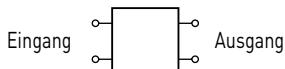
- Eintor (auch als Zweipol bezeichnet)
- Zweitör (auch als Vierpol bezeichnet)
- Dreitor (auch als Sechspol bezeichnet)

Das **Eintor** (= Zweipol) stellt die einfachste Form eines Blocks dar. Bei dem nur einen Anschluss kann es sich entweder um einen Ausgang oder um einen Eingang handeln (**Bild 5.5**). Lautsprecher sind ein typisches Beispiel für Eintore, da sie nur einen Eingang aufweisen.

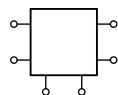


Bild 5.5 Eintor (Zweipol)

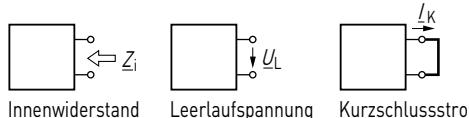
Beim **Zweitör** (= Vierpol) liegt ein Anschluss als Signaleingang und ein Anschluss als Signalausgang vor (**Bild 5.6**). Es weist damit eine definierte Wirkungsrichtung auf. Ein typisches Beispiel für Zweitore stellen Verstärker dar.

**Bild 5.6** Zweitor (Vierpol)

Dreitore (= Sechspole) weisen drei Anschlüsse auf (**Bild 5.7**). Dabei kann es sich um einen Eingang und zwei Ausgänge handeln oder um zwei Eingänge und einen Ausgang. Mischstufen sind ein typisches Beispiel für Dreitore. Sie gewinnen aus zwei zugeführten Signalen mit verschiedenen Frequenzen ein Ausgangssignal, dessen Frequenz die Summe oder Differenz der beiden Eingangs frequenzen aufweist.

**Bild 5.7** Dreitor (Sechspol)

Für Eintore sind drei Kenngrößen definiert. Es handelt sich um den Innenwiderstand Z_i , die Leerlaufspannung U_L und den Kurzschlussstrom I_K (**Bild 5.8**).

**Bild 5.8** Kenngrößen des Eintors

Treten bei einem Eintor weder Leerlaufspannung noch Kurzschlussstrom auf, dann handelt es sich um ein passives Eintor, das nur durch den Innenwiderstand gekennzeichnet ist. Ein solches Eintor nimmt nur Energie auf. Der Lautsprecher ist ein Beispiel dafür.



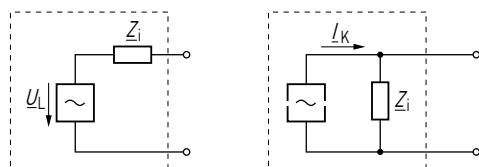
Passive Eintore nehmen elektrische Signalenergie auf.

Treten dagegen auch Leerlaufspannung und Kurzschlussstrom auf, dann handelt es sich um ein aktives Eintor. Im Gegensatz zum passiven Eintor gibt es Energie ab. Als Beispiel sei der Oszillator angeführt.



Aktive Eintore geben elektrische Signalenergie ab.

Unabhängig von der tatsächlichen Struktur ist für jedes Eintor ein Ersatzschaltplan möglich, der sich auf die bereits bekannten Kenngrößen bezieht. Es handelt sich um die Zusammenschaltung einer idealen Konstantspannungsquelle bzw. Konstantstromquelle mit dem Innenwiderstand (**Bild 5.9**).

**Bild 5.9** Ersatzschaltpläne für Eintore

Bei Zweitoren liegen den Eintoren vergleichbare komplexe Größen an den Eingängen und Ausgängen mit folgenden Bezeichnungen vor:

- Eingangswiderstand \underline{Z}_1
- Eingangsspannung \underline{U}_1
- Eingangsstrom \underline{I}_1
- Ausgangswiderstand \underline{Z}_2
- Ausgangsspannung \underline{U}_2
- Ausgangsstrom \underline{I}_2

Üblicherweise werden beide Ströme in das Zweititor hineinfließend gezählt (**Bild 5.10**).



Bild 5.10 Eingangs- und Ausgangsgrößen bei Zweitoren

An den Eingängen und Ausgängen von Zweitoren können folgende Situationen wechselweise betrachtet werden:

- Leerlauf $\rightarrow \underline{Z} = 0$
- Kurzschluss $\rightarrow \underline{Z} \rightarrow \infty$
- Definierter Abschluss $\rightarrow \underline{Z} = \underline{Z}_x$

Es ergeben sich dabei unterschiedliche Werte für die Spannungen und Ströme auf beiden Seiten. Die Verhältnisse dieser Werte zueinander werden als Parameter bezeichnet. Damit lässt sich jedes Zweititor durch zwei Gleichungen mit gesamt vier Parametern beschreiben, ohne dessen „Innenleben“ kennen zu müssen.



Zweititorparameter (Vierpolparameter) = Verhältnisse der Spannungen und/oder Ströme am Eingang und Ausgang eines Zweititors bei Leerlauf, Kurzschluss oder definiertem Abschluss



Für die Zweititorparameter sind verschiedene Varianten festgelegt. Sie werden unabhängig von der Zusammenschaltung der Zweitore verwendet. Es sind dafür folgende Möglichkeiten gegeben:

- Eingänge: Parallelschaltung/Ausgänge: Reihenschaltung
- Eingänge: Reihenschaltung/Ausgänge: Reihenschaltung
- Eingänge: Parallelschaltung/Ausgänge: Parallelschaltung
- Eingänge: Reihenschaltung/Ausgänge: Parallelschaltung
- Kettenschaltung (d.h. Eingang des einen Zweitors ist mit dem Ausgang des anderen Zweitors verbunden)

Die Zweitorparameter decken somit alle Zusammenschaltungen ab und können untereinander umgerechnet werden.

Auch bei den Zweitoren lassen sich passive und aktive Formen unterscheiden und zwar durch das Verhältnis der Signalenergie zwischen Eingang und Ausgang:

- **Passives Zweitor:**

Signalenergie am Ausgang \leq Signalenergie am Eingang

- **Aktives Zweitor:**

Signalenergie am Ausgang $>$ Signalenergie am Eingang

Mit Hilfe der Zweitorparameter lässt sich jedes Übertragungssystem auf ein Zweitor reduzieren, das nur noch durch seine Parameter gekennzeichnet ist. Dieses Zweitor wird durch ein aktives Eintor gespeist, während am Ausgang ein passives Eintor angeschaltet ist. Es liegt damit ein belastetes Zweitor vor. Mit Hilfe der Spannungswerte am Eingang und Ausgang lassen sich Verstärkung und Dämpfung als Faktor oder Maß formulieren. Wegen der Beschaltung auf beiden Seiten des Zweitors wird zur Kennzeichnung die Vorsilbe „Betriebs“ verwendet. Es gilt:

- Betriebs-Verstärkungsfaktor $(U_2 > U_1)$

$$V_B = \frac{U_2}{U_1} \quad (5.3)$$

- Betriebs-Verstärkungsmaß $(U_2 > U_1)$

$$g_B = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ dB} \quad (5.4)$$

- Betriebs-Dämpfungsfaktor $(U_2 < U_1)$

$$D_B = \frac{U_2}{U_1} \quad (5.5)$$

- Betriebs-Dämpfungsmaß $(U_2 < U_1)$

$$a_B = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1} \text{ dB} \quad (5.6)$$

Für die Begriffe Verstärkungsfaktor bzw. Verstärkungsmaß werden auch die Bezeichnungen Übertragungsfaktor bzw. Übertragungsmaß verwendet, üblicherweise mit dem Buchstaben T als Formelzeichen.

6

Konzept der Speicherung

■ 6.1 Einführung

Speicherung bedeutet allgemein Zwischenlagerung mit dem Ziel einer späteren Nutzung. Bei der Speicherung von Signalen kommt stets ein Speichermedium für deren Zwischenablage zum Einsatz. Dadurch kann einerseits die Übertragung zu beliebigen Zeiten durchgeführt werden und andererseits die Wiedergabe oder weitere Verarbeitung zeitlich unabhängig von der Übertragung erfolgen. Als einfaches Beispiel sei der Anrufbeantworter erwähnt. Speicherung lässt sich deshalb als zeitversetzte Übertragung verstehen.



Signalspeicherung erfordert stets ein Speichermedium.

Während bei einem üblichen Übertragungssystem wegen der zeitlich unmittelbaren Verknüpfung zwischen Quelle und Senke Online-Betrieb gegeben ist, handelt es sich im Falle der Signalspeicherung um Offline-Betrieb.



Signalspeicherung ermöglicht Offline-Betrieb.

Bei den **Speichermedien** sind zwei grundsätzliche Arten zu unterscheiden, nämlich die für materielle Übertragung und solche, die an definierten Stellen fest installiert sind und auf die über Leitungs- und Funkverbindungen zugegriffen werden kann. Im ersten Fall ist stets der Transport von Informationsträgern erforderlich (**Bild 6.1**). Sind dagegen die Speichermedien fest installiert (z.B. in einem Netz), dann kann gezielt darauf zugegriffen werden (**Bild 6.2**). Dabei spielt die Entfernung zum Speichermedium und die Art des Zugriffs grundsätzlich keine Rolle.

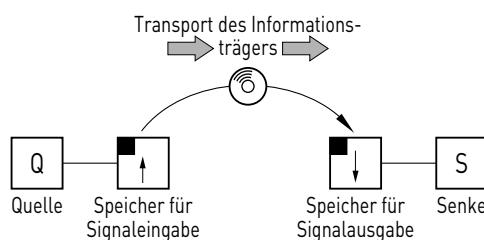


Bild 6.1 Speichermedien für materielle Übertragung

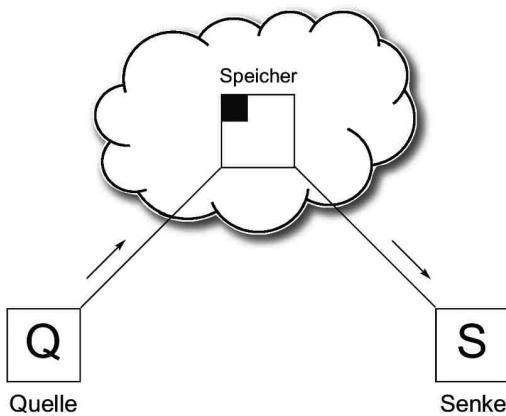


Bild 6.2 Speichermedium für gezielten Zugriff

Für die Signalspeicherung gibt es unterschiedliche Verfahren. Früher kamen mechanische Verfahren zu Einsatz. Dazu gehören zum Beispiel die Schallplatte, die Lochkarte und der Lochstreifen. Diese können jedoch die heutigen Anforderungen hinsichtlich Speicherkapazität und Handhabung nicht erfüllen. Es werden deshalb inzwischen folgende Verfahren für die Signalspeicherung verwendet:

- Magnetische Verfahren
- Optische Verfahren
- Elektrische Verfahren

Bei jeder Signalspeicherung ist einerseits die Eingabe der Signale in den Speicher erforderlich, andererseits muss aber auch die Ausgabe der Signale aus dem Speicher möglich sein. Grundsätzlich kann es sich dabei um analoge oder digitale Signale handeln. In der Praxis sind es inzwischen fast ausschließlich digitale Signale. Liegen analoge Signale für die Speicherung vor oder werden diese für die Wiedergabe oder Verarbeitung benötigt, dann kommen Analog-Digital-Umsetzer (ADU) [analog-to-digital converter (ADC)] bzw. Digital-Analog-Umsetzer (DAU) [digital-to-analog converter (DAC)] zum Einsatz.

Bei digitalen Signalen handelt es sich um Datenspeicherung. Die Eingabe in den Speicher wird meist als Einlesen bezeichnet, die Ausgabe als Auslesen. Ein Bewertungskriterium dafür ist die jeweils mögliche Bitrate, also die Einlesegeschwindigkeit v_{in} und die Auslesegeschwindigkeit v_{out} . Beide Werte können durchaus unterschiedlich sein.



Grundfunktionen für Speicherung

- Signaleingabe → Einlesen
- Signalausgabe → Auslesen

Jede Signalspeicherung ist durch folgende Kriterien gekennzeichnet:

- Speicherkapazität
- Zugriffsverfahren
- Einlesegeschwindigkeit

- Auslesegeschwindigkeit
- Störfestigkeit
- Handhabung
- Portabilität
- Preis-Leistungs-Verhältnis

Diese sind bei jeder Bewertung und Beschaffung von Speichereinrichtungen zu berücksichtigen.

■ 6.2 Magnetische Speicherung

Bei den **magnetischen Speicherverfahren** wird die Kraftwirkung magnetischer Felder auf kleinste magnetische Partikel, die sogenannten Elementarmagnete, genutzt. In der Praxis kommen dabei dünne, flexible Kunststoffbänder verschiedener Breite oder scheibenförmige Kunststoffplatten verschiedener Dicke und festgelegten Durchmessern zum Einsatz, die auf einer Seite eine magnetisierbare Schicht aufweisen. Diese besteht aus pulverisiertem Material mit magnetischen Eigenschaften. Dabei handelt es sich primär um Eisen, Chrom oder Oxiden dieser Metalle.



Magnetische Speicherverfahren nutzen die Kraftwirkung magnetischer Felder auf Elementarmagnete.

Das zu speichernde Signal bewirkt über eine Spule mit einem magnetisch leitfähigen Kern ein magnetisches Feld, das die Elementarmagnete der magnetisierbaren Schicht aus der regellosen Lage in eine geordnete Position bringt, die dem analogen oder digitalen Signalverlauf entspricht. Dieser Vorgang wird als Aufzeichnung oder Aufnahme bezeichnet.

Für die Wiedergabe des gespeicherten Signals nutzt man das Induktionsprinzip. Dafür wird die magnetische Schicht gezielt in einen aus Spule und Kern bestehenden magnetischen Kreis bewegt. Die dadurch bewirkte Änderung des magnetischen Flusses ergibt eine dem aufgezeichneten Signal proportionale Spannung (**Bild 6.3**).

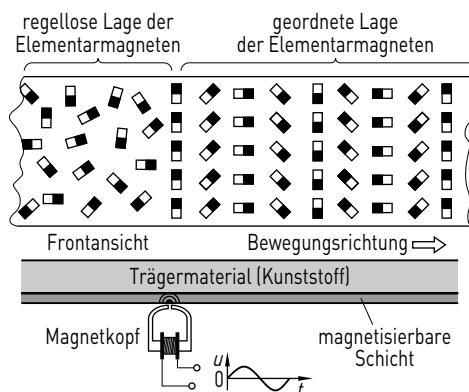


Bild 6.3 Magnetisches Speicherverfahren

Die Aufzeichnung (Aufnahme) und Wiedergabe wird durch Magnetköpfe realisiert. Sie bestehen aus ringförmigen Kernen magnetisch leitfähigen Materials mit einem definierten Luftspalt und mindestens einer auf dem Kern aufgebrachten Spule.



Magnetköpfe ermöglichen Aufzeichnung und Wiedergabe von Signalen.

Wird ein gespeichertes Signal nicht mehr benötigt, dann kann es gelöscht werden. Ein als Löschkopf bezeichneter spezieller Magnetkopf stellt dabei durch Verwendung einer Wechselspannung mit geeigneter Frequenz wieder die regellose Lage der Elementarmagnete her.



Ein Löschkopf bringt die Elementarmagnete wieder in die regellose Lage und löscht damit das gespeicherte Signal.

Die magnetische Signalspeicherung erfolgt stets in definierten Spuren. Deren Breite hängt vom Material der magnetisierbaren Schicht und den mechanischen Gegebenheiten der Magnetköpfe ab.

Bei Bandmaterial ist die Aufzeichnung längs oder schräg zur Bewegungsrichtung des Bandes möglich. Bei der Längsspuraufzeichnung lassen sich folgende Verfahren unterscheiden:

- Ein-Spur-Verfahren (Vollspuraufzeichnung)
- Zwei-Spur-Verfahren (Halbspuraufzeichnung)
- Vier-Spur-Verfahren (Viertelspuraufzeichnung)

Im Falle der Schrägspräraufzeichnung wird das Band in einem definierten Winkel schräg am Magnetkopf vorbeigeführt. Die Folge sind gestaffelt angeordnete Spuren bestimmter Länge, die schräg zur Bewegungsrichtung des Bandes verlaufen.

Bei Platten sind die Spuren entweder ringförmig angeordnet oder sie weisen einen spiralförmigen Verlauf auf. Im Falle ringförmiger Spuren nimmt deren Länge von außen nach innen ab. Liegt spiralförmiger Verlauf vor, dann gibt es, wie bei der klassischen Schallplatte nur eine Spur (**Bild 6.4**).

Ein wichtiges Kriterium für jede magnetische Aufzeichnung stellt die größte verarbeitbare Frequenz dar. Es besteht dabei eine Abhängigkeit von der Luftspaltbreite des Magnetkopfes und der Geschwindigkeit des Bandes bzw. Drehzahl der Platte. Je kleiner nämlich diese Spaltenbreite ist, desto besser kann die magnetisierbare Schicht beeinflusst werden. Die kleinste realisierbare Spaltbreite liegt aus technologischen Gründen bei etwa 1 µm.

Band	Längsspur-aufzeichnung	
	Schrägspur-aufzeichnung	
Platte	ring-förmige Spuren	
	spiral-förmige Spur	

Bild 6.4 Spuren bei magnetischer Speicherung

Je größer die Geschwindigkeit des Bandes bzw. die Drehzahl der Platte, desto größere Frequenzen können aufgezeichnet werden. Es gilt folgende Proportionalität:

$$f_{\max} \approx \frac{v}{s} \quad (6.1)$$

mit

f_{\max} = Größte verarbeitbare Frequenz

v = Geschwindigkeit (Band oder Platte)

s = Luftspaltbreite des Magnetkopfes

Um Signale mit möglichst großen Frequenzen aufzeichnen zu können, sollte deshalb die Geschwindigkeit des Bandes bzw. die Drehzahl der Platte möglichst groß sein, während es für die Luftspaltbreite des Magnetkopfes möglichst kleine Werte sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Speicherkapazität unmittelbar von der größten verarbeitbaren Frequenz abhängt.

Die ersten Anwendungen der magnetischen Aufzeichnung arbeiteten mit aufgespulten Bändern. Wegen der besseren Handhabbarkeit wurden die Bänder danach in Kassetten untergebracht. Für die Aufzeichnung der analogen Signale kamen deshalb diese Magnetband-Kassetten als Audiokassetten und Videokassetten mit standardisierten Aufzeichnungsverfahren und Abmessungen zum Einsatz. Die Audiokassetten arbeiteten mit Längsspuraufzeichnung und wiesen einen für die niederfrequenten Signale ausreichenden Frequenzbereich bis etwa 20 kHz auf. Bei den Videokassetten wurde Schrägspuraufzeichnung eingesetzt, weil bei den Videosignalen Frequenzen bis 5 MHz zu berücksichtigen waren und dies bei Längsspuraufzeichnung eine nicht vertretbare Bandgeschwindigkeit von 6,25 m/s bedeutet hätte. Diese für die Videorekorder gewählte Lösung führte zu einer für den Heimgebrauch gerade noch vertretbaren Bildqualität.



Analoge Audiokassetten (Längsspuraufzeichnung) $\rightarrow f_{\max} = 20 \text{ kHz}$

Analoge Videokassetten (Schrägspuraufzeichnung) $\rightarrow f_{\max} = 5 \text{ MHz}$



Ansätze für digitale Audiokassetten für die Unterhaltungselektronik konnten sich am Markt nicht etablieren, weil der Einsatz anderer Technologien für alle Beteiligten mehr Vorteile brachte. Einen Ersatz der analogen Videokassetten durch eine digitale Version gab es nicht, sondern es erfolgte unmittelbar der Übergang auf Plattspeicher.

Obwohl bei Bandspeicherung der Zugriff auf vorgegebene Stellen der gespeicherten Informationen systembedingt nicht schnell erfolgen kann, werden digitale Bandspeicherkerassten für die Archivierung im semiprofessionellen und professionellen Bereich verwendet. Es wird dabei mit relativ breiten Magnetbändern und Längsspuraufzeichnung gearbeitet, was eine hohe Qualität der Aufzeichnung ermöglicht. So nutzen zahlreiche Fernsehsender dieses Konzept für ihre Filmarchive.

Plattspeicher sind nur für digitale Signale ausgelegt und arbeiten üblicherweise mit ringförmigen Spuren. Dadurch ist es möglich, schnell auf jeden gespeicherten Inhalt zugreifen zu können. Es muss lediglich der Magnetkopf an die entsprechende Stelle bewegt werden. Diese wegen ihrer Bauform üblicherweise als Festplatte bezeichneten Speicher stellen in der Praxis den Löwenanteil dar. Typische Beispiele sind die Festplatten in Computern (PC, Laptop, ...), in digitalen Fernsehgeräten, in Set-Top-Boxen oder als separate Geräte. Bei den Fernsehanwendungen gilt dabei üblicherweise die Bezeichnung Festplattenrekorder. In allen Fällen können bei Geräten mit magnetischen Plattspeichern die Speicherung und die Wiedergabe wahlfrei erfolgen. Für den Nutzer sind dabei die unterschiedlichen Bedienkonzepte von Interesse.

Der Vergleich von Band und Platte, die magnetische Verfahren verwenden, zeigt viele Gemeinsamkeiten, aber auch einige wichtige Unterschiede. So ist bei Band und Platte eine große Speicherkapazität realisierbar. Dabei besteht unmittelbare Abhängigkeit von der Spurbreite, der Eigenschaften der magnetisierbaren Schicht und der Bandlänge bzw. dem Plattendurchmesser. Es lassen sich durchaus magnetische Band- und Plattspeicher bis 1 TB (= 1000 GB = 1 000 000 MB) und mehr realisieren.

Beim Zugriff auf definierte Stellen der gespeicherten Inhalte weist das Band gegenüber der Platte Nachteile auf, weil stets zeitaufwendiges Umspulen erforderlich ist, während bei der Platte lediglich eine kurze Bewegung des Magnetkopfes benötigt wird. Die Handhabung von Band und Platte kann als einfach und gleichwertig gesehen werden. Aufzeichnung und Wiedergabe sind stets mit demselben Gerät möglich.

Bezogen auf die Portabilität hat verständlicherweise die Bandkassette große Vorteile. Vergleichbares gilt auch noch für Festplattenrekorder als Einzelgeräte. In Geräte eingebaute Festplatten sind dagegen in der Regel rein stationär. Für spezielle Anwendungen gibt es allerdings auch auswechselbare Festplatten, die dann konsequenterweise als Wechselfestplatten bezeichnet werden.

Bezüglich der magnetischen Verfahren muss allerdings auch berücksichtigt werden, dass durch von außen einwirkende Magnetfelder Aufzeichnungen auf Band oder Platte beeinflusst oder völlig gelöscht werden können, wenn die magnetische Feldstärke bestimmte

Werte überschreitet. Durch entsprechende Schutzmaßnahmen lässt sich dieses allerdings verhindern.

Tabelle 6.1 Vergleich magnetischer Speicherverfahren

	Band	Platte
Speicherkapazität	abhängig von Spurbreite, Eigenschaften der magnetischen Schicht und Bandlänge realisierbarer Wert: bis 1 TB und mehr	abhängig von Spurbreite, Eigenschaften der magnetisierbaren Schicht und Plattendurchmesser realisierbarer Wert: bis 1 TB und mehr
Zugriff	langsam	schnell
Handhabung	einfach	einfach
Portabilität	gegeben	nicht gegeben (Ausnahme: Festplattenrekorder als Einzelgeräte und Wechselseitplatten)
Störfestigkeit	Beeinflussung durch äußere Magnetfelder ist möglich. Es können allerdings Schutzmaßnahmen ergriffen werden.	Beeinflussung durch äußere Magnetfelder ist möglich. Es können allerdings Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

■ 6.3 Optische Speicherung

Während mit den magnetischen Verfahren auch analoge Signale gespeichert werden können, ist dies bei der typischen Nutzung von Plattspeichern mit optischen Verfahren nur für digitale Signale möglich. Das Konzept dieses Verfahrens besteht darin, die Bitfolge des zu speichernden Signals auf einer Platte mit verspiegelter Oberfläche mechanisch nachzubilden. Die Wiedergabe erfolgt durch Abtastung der Bitfolge mit einem Lichtstrahl bei konstanter Geschwindigkeit der optischen Platte.



Mit optischen Verfahren lassen sich auf Plattspeichern nur digitale Signale speichern.

Die bei Kinofilmen auf der Tonspur des Filmmaterials realisierbare Speicherung analoger Signale stellt einen Spezialfall der optischen Speicherung dar und wird hier nicht betrachtet.

Da auf der **optischen Platte** nur zwei Zustände unterscheidbar sein müssen, wird mit als Pits bezeichneten Vertiefungen in der verspiegelten Oberfläche gearbeitet. Als Abtastquelle dient das einwellige (d.h. monochromatische) Licht eines Lasers. Es wird mit Hilfe einer geeigneten Optik so fokussiert, dass sich entweder bei den Pits oder bei den unveränderten Stellen auf der optischen Platte maximale Reflexion ergibt. Bei dem jeweils anderen Zustand liegt dann geringere Reflexion vor. Die Intensität des reflektierten Lichts lässt sich mit einer Photodiode feststellen und in eine elektrische Spannung als digitales Signal umsetzen (**Bild 6.5**).

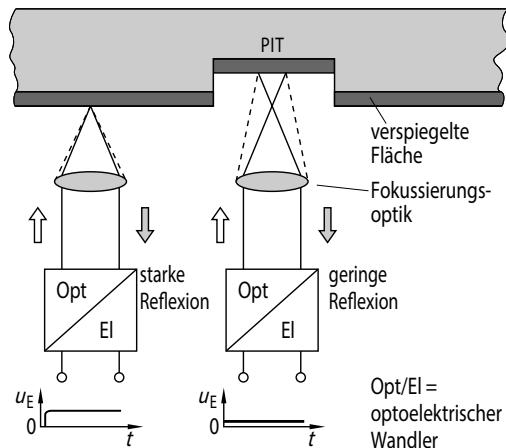


Bild 6.5 Optische Signalspeicherung

Vorstehende Ausführungen zeigen folgende Besonderheit der optischen Verfahren:



Optische Speicherung arbeitet mit berührungsloser Abtastung.

Es kann deshalb die Wiedergabe beliebig häufig erfolgen und zwar ohne Beeinträchtigung der Signalqualität.

Für die Speicherung der Bitfolge werden bekanntlich Pits verwendet, also Vertiefungen der verspiegelten Oberfläche. Diese weisen zwar konstante Breite auf, jedoch unterschiedliche Länge. Die Pits sind in einer spiralförmigen Spur angeordnet, vom Plattenrand zur Plattenmitte verlaufend. Um einen konstanten Bitstrom zu erhalten, wird mit konstanter Geschwindigkeit abgetastet, weshalb sich die Drehzahl von kleinen Werten außen auf große Werte innen kontinuierlich ändert (**Bild 6.6**).

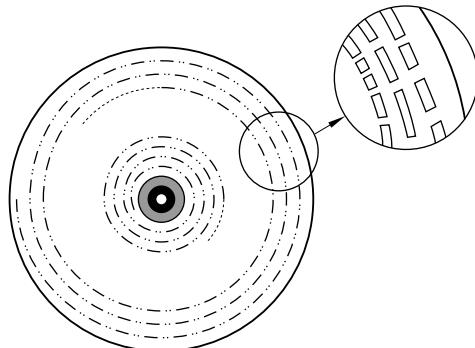


Bild 6.6 Pitstruktur

Die Pitstruktur kann unmittelbar aus der Folge der Nullen und Einsen des digitalen Signals, der sogenannten 0-1-Folge, abgeleitet werden. Jede Eins (1) ergibt eine Pitflanke, während bei aufeinanderfolgenden Nullen der Zustand unverändert bleibt (**Bild 6.7**). Es gibt jedoch eine Maximalzahl aufeinanderfolgender Nullen (0), die vom System akzeptiert

werden. Dadurch ist die größte zulässige Pitlänge festgelegt. Dabei handelt es sich um einen Teil des bei optischen Speichern typischen Fehlerschutzes, mit dem die ausreichend genaue Übertragung der Taktfrequenz für die Auslesung sichergestellt wird.

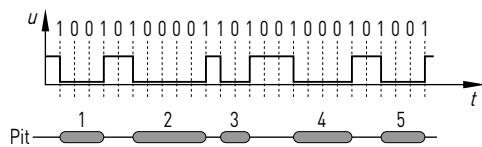


Bild 6.7 Bitstrom und Pitlänge

Es gibt aber auch eine Mindestlänge für die Pits, nämlich der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgender Einsen (1). Die Unterschreitung dieses Wertes würde die eindeutige Unterscheidbarkeit der Zustände im Bitstrom verhindern.



Für die Pits gibt es eine kleinste Länge (Minimallänge) und eine größte Länge (Maximallänge).

Um auch bei leichter Verschmutzung oder Beschädigung der Plattenoberfläche noch eine möglichst störungsfreie Wiedergabe zu ermöglichen, werden bei der Aufzeichnung durchaus bis zu fünfzig Prozent der gesamten Speicherkapazität der optischen Platte für den Fehlerschutz verwendet und entsprechende Codierungen eingesetzt.



Ein großer Anteil der Speicherkapazität wird für den Fehlerschutz verwendet.

Für die einwandfreie Wiedergabe muss die Abtasteinrichtung der optischen Platte exakt auf der Pitspur geführt werden. Diese Spurführung erfolgt durch eine Servosystem, angesteuert durch eine bei der Abtastung wie folgt gewonnene Regelspannung. Das fokussierte Licht des verwendeten Lasers gelangt mit Hilfe eines halbdurchlässigen Spiegels auf die Oberfläche der optischen Platte. Das von dort reflektierte Licht lässt nun diesen Spiegel auf eine Anordnung von drei Fotosensoren einwirken. Bei richtiger Spurlage ergibt sich bei dem mittleren Fotosensor das größte Signal. Abweichungen der Abtasteinrichtung von der Spur rufen dagegen bei einem der seitlichen Fotosensoren einen Anstieg des Signals hervor, während sich beim mittleren Fotosensor der bisherige Wert reduziert. Aus dieser Veränderung wird nun eine Regelspannung gewonnen, die über das Servosystem die Abtasteinrichtung solange verschiebt, bis wieder beim mittleren Fotosensor das größte Signal auftritt (**Bild 6.8**). Mit Hilfe des beschriebenen Regelkreises wird die optimale Abtastung einer optischen Platte sichergestellt.

Optische Speicherplatten sind seit längerer Zeit bereits verfügbar und haben sich in der Praxis bestens bewährt. Die Urform ist die Compact Disc (CD), was mit „kompakte, flache Scheibe“ übersetzt werden kann, mit einem Durchmesser der Platte von 120 mm (= 12 cm) und 0,6 µm breiten Pits. Die Drehzahl liegt zwischen 200 min^{-1} (innen) und 500 min^{-1} (außen). Daraus ergibt sich eine im MB-Bereich (Megabytebereich) liegende Speicherkapazität.

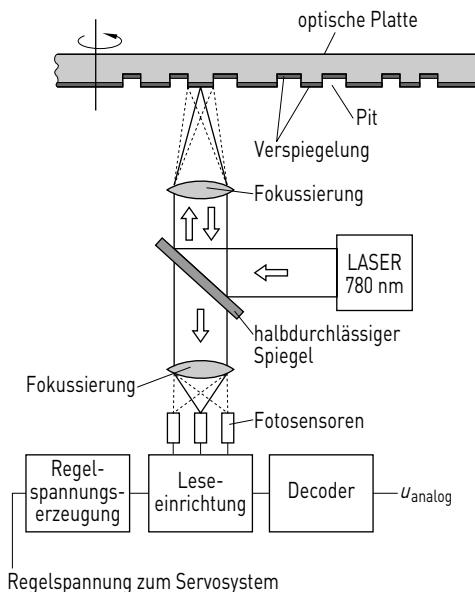


Bild 6.8 Abtastung und Speicherung bei optischer Platte

Die Markteinführung der CD erfolgte als digitale Schallplatte, also mit gespeicherten Audiosignalen. Sie sollte die altbewährte analoge Schallplatte ablösen und bildete den Einstieg in die Digitalisierung im Medienbereich. Inzwischen hat sich jedoch die CD als transparenter Speicher für beliebige digitale Signale etabliert, wird also für Audio, Video und Daten genutzt. Der Einsatzbereich ist durch ihre Speicherkapazität begrenzt.



Die **Compact Disc (CD)** ist ein transparenter Datenspeicher im MB-Bereich.

Die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten der CD haben zu verschiedenen Bezeichnungen für diese optischen Plattenspeicher geführt. Es haben sich folgende Benennungen von Funktionsarten der CD eingebürgert:

- CD-ROM [compact disc – read-only memory]
- CD-R [compact disc – recordable]
- CD-RW [compact disc – read & write]

Bei der CD-ROM sind die Informationen auf der optischen Platte unveränderlich eingespeichert. Es ist deshalb nur Wiedergabe möglich.



CD-ROM ist ein Nur-Lese-Speicher.

Es besteht aber auch die Möglichkeit, dass der Nutzer selber Informationen auf einer CD speichert.

Wegen des technischen Funktionskonzeptes der Speicherung wird ein solcher Speichervorgang als „brennen“ bezeichnet, es ist aber auch der Begriff „beschreiben“ üblich. Kann eine CD nur einmal für einen Speichervorgang genutzt werden, dann handelt es sich um eine CD-R.



Eine CD-R ist nur einmal beschreibbar.

Die Unveränderbarkeit der gespeicherten Informationen ist dagegen bei der CD-RW aufgehoben. Diese Variante der CD kann gelöscht und wiederholt beschrieben werden. Damit ist eine Vergleichbarkeit zum magnetischen Speicherverfahren gegeben. Die Zahl der Beschreibvorgänge ist allerdings bei der CD-RW in der Regel nicht beliebig, sondern herstellerseitig begrenzt.



Eine CD-RW ist wiederholt beschreibbar und deshalb ein Schreib-Lese-Speicher.

Die konsequente Weiterentwicklung der CD führte zur Digital Versatile Disc (DVD), was mit „digitale, vielfältig einsetzbare flache Scheibe“ übersetzt werden kann. Das primäre Ziel war dabei eine Vergrößerung der Speicherkapazität. Bei unveränderten Abmessungen, bezogen auf die CD, wurden deshalb folgende dafür relevanten Parameter wie folgt geändert:

- Geringere Lichtwellenlänge des Lasers
- Schmalere Pitspur
- Kürzere Pitlängen

Als Ergebnis führten diese Maßnahmen zu einer Speicherkapazität von einigen Gigabytes (GB). Deshalb wurde die DVD bei ihrer Markteinführung erst einmal für die gegenüber Audiosignalen wesentlich größeren Speicherbedarf erforderlichen Videosignale genutzt. Das leitete die schnelle Ablösung der analogen Videokassette ein. Inzwischen wird die DVD, vergleichbar zur CD, als Speicher für beliebige digitale Signale genutzt, verbunden mit dem Vorteil der größeren Speicherkapazität.



Die **DVD [digital versatile disc]** ist ein transparenter Datenspeicher für einige Gigabyte (GB).

Auch bei der DVD gibt es unterschiedliche Varianten. Es lassen sich folgende Funktionsarten unterscheiden:

- DVD-V [DVD – video]
→ DVD für Video- und Audioaufzeichnung
- DVD-A [DVD – audio]
→ DVD ausschließlich für Audioaufzeichnung

- DVD-R/DVD+R [DVD – recordable]
→ Nur einmal beschreibbare DVD
- DVD-RW/DWD+RW [DVD – read & write]
→ Wiederholt beschreibbare DVD
- DVD-ROM [DVD – read-only memory]
→ DVD als Nur-Lese-Speicher
- DVD-RAM [DVD – random access memory]
→ DVD als Schreib-Lese-Speicher

Die Entwicklung hin zu höheren Auflösungen [high definition (HD)] bei Video hat nicht nur zum hochauflösenden Fernsehen [high definition television (HDTV)], sondern auch zu einem neuen DVD-Format geführt, da bei HD gegenüber der bisher üblichen normalen Auflösung mehr Speicherkapazität erforderlich ist. Es handelt sich um die Blu-Ray-Disc (BD), die ebenfalls das bereits behandelte Konzept der optischen Plattspeicher nutzt, jedoch ist hier nun gegenüber der DVD die Lichtwellenlänge des Lasers noch geringer. Während bei der CD und DVD die Laser im Rotbereich arbeiten, ist es bei der BD wegen der noch kürzeren Wellenlängen der Blaubereich. Daraus erklärt sich auch die Bezeichnung „Blu-Ray“, was mit „blauer Strahl“ übersetzbare ist.

Das bei der BD verwendete Laserlicht ermöglicht eine höhere Packungsdichte der Pits und führt zu Speicherkapazitäten bis 50 GB. Damit lassen sich komplette Filme mit hoher Auflösung problemlos auf einer BD unterbringen. Grundsätzlich ist aber die BD für alle anderen Anwendungen einsetzbar, sie stellt ebenfalls einen transparenten Datenspeicher dar.



Die **Blu-Ray-Disc (BD)** ist ein transparenter Datenspeicher bis zu 50 GB.

Bezogen auf die verschiedenen Bewertungskriterien schneiden die optischen Plattspeicher gut ab. Die in Abhängigkeit von der Wellenlänge des Lasers erreichbare Speicherkapazität von bis zu 50 GB ist für viele Anwendungen optimal. Der Zugriff auf die gespeicherten Informationen ist nur davon abhängig, wie schnell das Servosystem die Abtasteinheit bewegen kann. Hier handelt es sich in der Praxis typisch um gute Werte. Wegen der Plattenform der betrachteten optischen Speicher ist deren Handhabung sehr einfach. Außerdem ist eine problemlose Portabilität gegeben, weil der Transport der Platten wenig Aufwand bedeutet und damit deren Einsatz an beliebigen Stellen möglich ist.

Es muss allerdings bei allen Varianten der optischen Plattspeicher die Plattenoberfläche vor Verunreinigungen und Beschädigungen geschützt werden, weil sonst die bestimmungsgemäße Funktion nicht mehr gewährleistet ist.

■ 6.4 Elektrische Speicherung

Die Speicherung digitaler Signale, also beliebiger Folgen von Nullen und Einsen, kann nicht nur mit magnetischen und optischen Verfahren erfolgen, sondern auch auf Basis elektrischer Vorgänge. Im Prinzip ist dabei für jedes Bit eine Kippstufe erforderlich. Die fortgeschrittene Halbleitertechnologie für integrierte Schaltungen [integrated circuit (IC)] ermöglicht es seit einiger Zeit, sehr viele solcher Stufen auf einem Chip mit kleinen Abmessungen unterzubringen. Von der Funktion her handelt es sich um eine matrixartige Anordnung, bestehend aus Zeilen und Spalten. Die Organisation der Aktivierung der einzelnen Kippstufen wird von einer Steuerschaltung übernommen. Dabei ist jede Kippstufe durch den Kreuzungspunkt einer bestimmten Zeile und Spalte eindeutig bestimmt (**Bild 6.9**). Da die erforderliche Ansteuerung wenig aufwendig ist, sind bei dem elektrischen Speicherverfahren große Zugriffsgeschwindigkeiten realisierbar. Das gilt in gleicher Weise für die Eingabe und die Ausgabe der digitalen Signale.

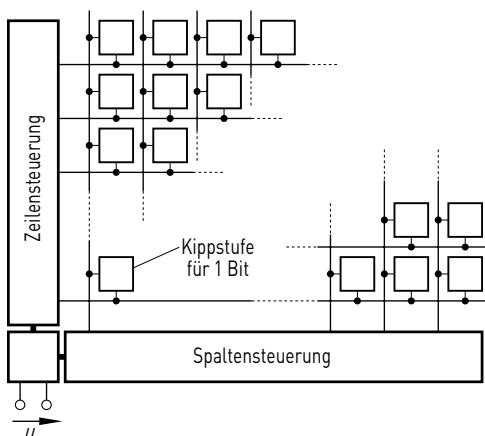


Bild 6.9 Elektrisches Speicherverfahren

Der wesentliche Vorteil elektrischer Speicher ist es, dass sie gegenüber den magnetischen und optischen Speichern keine bewegten Teile aufweisen. Es wird deshalb in der Regel die Bezeichnung Halbleiterspeicher [semiconductor memory] oder Festkörperspeicher [solid state memory] verwendet.



Halbleiterspeicher sind elektrische Speicher. Sie weisen keine bewegten Teile auf.

Halbleiterspeicher weisen kompakte Bauformen auf, sind vielfältig eingesetzt und weisen Speicherkapazitäten im Gigabytebereich (GB-Bereich) auf und zwar mit zunehmender Tendenz.

Die erste typische Anwendung von Halbleiterspeichern war ihr Einsatz als Arbeitsspeicher [random access memory (RAM)] in Computern. Inzwischen ist dies durch den Einsatz als steckbare Speicherkarten für unterschiedlichste Anwendungen ergänzt. Dabei kann es sich um Digitalkameras, MP3-Speicher, Spielekonsolen oder andere Geräte handeln. Auch

die SIM-Karte zur Authentifizierung als berechtigter Nutzer beim Mobilfunk oder Bezahlfernsehen (Pay-TV) gehört in diese Kategorie. Eine Art „Allround“-Variante stellt der Speicherstift [memory stick] mit USB-Anschluss dar, der üblicherweise als USB-Stick vermarktet wird. Er ist gekennzeichnet durch handliche Bauform, einfache Handhabung wegen der weit verbreiteten Schnittstelle USB, fast universelle Einsatzmöglichkeit und Speicherkapazität bis in den zweistelligen GB-Bereich.

Als aktuelle Entwicklungstendenz für Halbleiterspeicher wird ihr Ersatz für die bisherigen Festplattenspeicher in Computern gesehen. Die ersten Laptops mit dieser Ausstattungsvariante sind bereits im Markt.



Typische Anwendungen für Halbleiterspeicher: Arbeitsspeicher in Computern, Speicherkarten und Speicherstifte (USB-Sticks)

Halbleiterspeicher benötigen für ihre Funktion eine Betriebsspannung. Wird diese abgeschaltet, dann stellt sich die Frage, ob der Speicherinhalt erhalten bleibt oder nicht. Es sind deshalb zwei Typen von Halbleiterspeichern unterscheidbar:

- Nicht flüchtige Halbleiterspeicher [non-volatile semiconductor memory] = Speicherinhalt bleibt auch nach Abschaltung der Betriebsspannung erhalten.
- Flüchtige Halbleiterspeicher [volatile semiconductor memory] = Speicherinhalt geht nach Abschaltung der Betriebsspannung verloren.

Bei nicht flüchtigen Halbleiterspeichern wird mit integrierten Kapazitäten gearbeitet, die ihren Ladungszustand über sehr lange Zeit halten und damit auch die gespeicherten Informationen.

Bei flüchtigen Halbleiterspeichern kann durch Verwendung einer Pufferbatterie sicher gestellt werden, dass auch bei dieser Speichervariante kein Informationsverlust auftritt.



Bei allen Anwendungen ist der Unterschied zwischen nicht flüchtigen und flüchtigen Halbleiterspeichern zu berücksichtigen.

Ein wichtiges Kriterium stellt bei Halbleiterspeichern auch die maximal mögliche Geschwindigkeit für die Eingabe und Ausgabe der Daten dar. Diese Einlesegeschwindigkeit für die Aufzeichnung und Auslesegeschwindigkeit für die Wiedergabe wird üblicherweise in kbit/s oder Mbit/s angegeben, wobei beide Werte unterschiedlich sein können. Die spezifischen Angaben sind aus den Datenblättern für die Speicher ersichtlich.



Halbleiterspeicher können unterschiedliche Einlese- und Auslesegeschwindigkeiten aufweisen.

Bei den Halbleiterspeichern lassen sich folgende Varianten unterscheiden:

- RAM [random access memory]
- ROM [read-only memory]
- Flash-Speicher

Der **RAM** ist ein Schreib/Lese-Speicher mit wahlfreiem Zugriff auf jede Speicherzelle. Die einfachste Form stellt der als SRAM bezeichnete statische RAM dar. Er speichert die Inhalte in bistabilen Kippstufen, was eine entsprechende Zahl von Bauelementen auf dem Chip erforderlich macht. Er benötigt keine Auffrischungszyklen [refreshing cycle] und bietet sehr kurze Zugriffszeiten. Eine wesentlich weniger aufwendige Version ist der dynamische RAM (DRAM). Die Informationen werden hier in Form des Ladezustands eines Kondensators gespeichert. Das führt zu kleinen und einfach aufgebauten Speicherzellen, allerdings geht die dort gespeicherte Information wegen der Leckströme des Kondensators schnell verloren. Es ist deshalb eine regelmäßige Auffrischung der Zellinhalte erforderlich. Der Vorteil des SRAM gegenüber dem DRAM sind die geringen Kosten pro Bit. Können bei DRAM Werteänderungen in den Registern nur im Rahmen einer Taktung an den Taktflanken durchgeführt werden, dann liegt ein SDRAM [synchronous dynamic random access memory] vor. Durch die Verwendung eines Taktes zur Synchronisierung entfällt die beim asynchronen Verfahren des DRAM notwendige Kommunikation. Aus diesem Grund sind SDRAM erheblich schneller als dynamische RAM.

Beim **ROM** handelt es sich um Nur-Lese-Speicher, deren Inhalt auch bei abgeschalteter Betriebsspannung nicht flüchtig ist. Sie werden auch als Festwertspeicher bezeichnet. Es können im normalen Betrieb die Daten deshalb nur ausgegeben werden, der Zugriff ist dabei wahlfrei möglich. Die Programmierung eines ROM zur Speicherung von Daten ist entweder nur einmal möglich oder durch Lösch-und-Lesezyklen reversibel. Der erste Fall ist beim PROM [programmable read-only memory] gegeben, weil er nur eine einmalige Programmierung ermöglicht. Die Programmierung des EEPROM [erasable programmable read-only memory] lässt sich dagegen mit UV-Licht löschen, während dies beim EEPROM [electrically erasable programmable read-only memory] durch elektrische Größen erfolgt. Nach der Löschung können diese ROM-Versionen wieder neu programmiert werden.

Flash-Speicher stellen eine spezielle Form des EEPROM dar. Die Speicherzellen sind dabei Feldeffekttransistoren, weshalb große Speicherkapazitäten auf kleinem Raum realisierbar sind. Das Löschen ist bei Flash-Speichern im Gegensatz zum normalen EEPROM nur in größeren Blöcken möglich. Bei Flash-Speichern ist außerdem zu berücksichtigen, dass sie stets eine begrenzte Lebensdauer haben, weil technologisch bedingt nur eine maximale Zahl von Löschzyklen möglich ist.

Beim Einsatz von Halbleiterspeichern kann es zu Fehlfunktionen bis hin zum Totalausfall kommen, wenn elektrische Felder von außen einwirken und dabei vom Typ des Speichers abhängige Grenzwerte überschreiten. Durch Schirmung lässt sich diese Problemstellung in der Regel vermeiden.



Äußere elektrische Felder können die Funktionsfähigkeit von Halbleiterspeichern stören.

7

Qualitätsparameter

Durch Übertragung und/oder Speicherung sollen die Signale der Quelle idealerweise unverändert bleiben. Diese Situation ist allerdings in der Realität nicht gegeben. Es sind nämlich vielfältige Beeinflussungen der Nutzsignale möglich, die sich unmittelbar störend bemerkbar machen können oder aus betrieblichen und/oder ökonomischen Gründen vermieden werden sollen.

Um eine sachgerechte Bewertung solcher Einflüsse durchführen zu können, lassen sich verschiedene Kenngrößen bei Übertragung und/oder Speicherung ermitteln. Es handelt sich um Qualitätsparameter, mit denen die Leistungsfähigkeit jedes Kommunikationssystems unabhängig von der verwendeten Technologie durch kennzeichnende Merkmale neutral beschrieben werden kann. Dies gilt unabhängig davon, ob mit analogen oder digitalen Signalen gearbeitet wird.

■ 7.1 Bandbreite und Grenzfrequenz

Jedes analoge Signal weist stets einen bestimmten Frequenzumfang auf, der durch den Amplituden-Frequenzgang $f = u(f)$ darstellbar ist. Für bestimmte Frequenzen treten dabei große Amplitudenwerte auf, während ansonsten keine nennenswerten Amplituden feststellbar sind. Das Signal lässt sich nun durch zwei **Grenzfrequenzen** markieren. Die kleinere Frequenz wird als untere Grenzfrequenz f_{\min} [lower cut-off frequency] bezeichnet, die größere als obere Grenzfrequenz f_{\max} [upper cut-off frequency].

Um beide Grenzfrequenzen ermitteln zu können, bedarf es immer einer Referenzfrequenz f_{ref} als Bezugswert. Die muss entweder bekannt sein oder angegeben werden. Die Grenzfrequenzen liegen dann vor, wenn der Pegel gegenüber dem der Referenzfrequenz um einen bestimmten Wert kleiner geworden ist. Für diese Abweichung kann grundsätzlich jeder dB-Wert gelten, in der Praxis sind jedoch 3 dB typisch, nur in Ausnahmefällen handelt es sich um 6 dB oder sogar 10 dB. Der Frequenzbereich zwischen der unteren Grenzfrequenz und der oberen Grenzfrequenz wird als **Bandbreite B** [bandwidth (*BW*)] bezeichnet (**Bild 7.1**).

Vorstehende Festlegungen gelten nicht nur für Signale, sondern vergleichbar auch für Geräte, Baugruppen und Komponenten. An der Bandbreite lässt sich hier erkennen, ob vorgegebene Signale verarbeitet werden können.

Die Angabe einer Bandbreite ist grundsätzlich von der Lage in den Bereichen Niederfrequenz, Hochfrequenz und Höchstfrequenz unabhängig und kann im Prinzip beliebige Werte aufweisen. Im fachlichen Sprachgebrauch wird bei kleinen Werten für die Bandbreite die Bezeichnung „Schmalbandigkeit“ verwendet, während große Werte zur Be-

zeichnung „breitbandig“ führen. Diese Begriffe sind allerdings nur dann sinnvoll, wenn ein Bezug für die jeweils betrachtete Bandbreite bekannt ist oder angegeben wird.

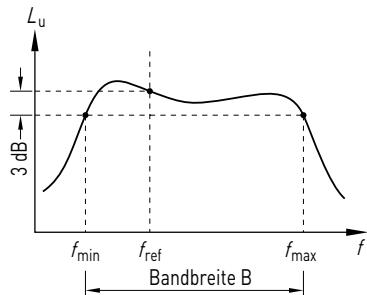


Bild 7.1 Bandbreite und Grenzfrequenzen

Beispiel:

Die Bandbreite eines Signals von 20 kHz kann bezogen auf 50 kHz durchaus als breitbandig bezeichnet werden. Erfolgt dagegen ein Bezug auf 5 MHz, dann handelt es sich um Schmalbandigkeit.

Schmalband [narrow band] und Breitband [wide band] sind also relative Begriffe ohne festgelegte Übergänge. Das kann leicht zu Unklarheiten führen. So werden zum Beispiel Signale für spezielle Funkanwendungen als Ultra-Breitband [ultra wide band (UWB)] bezeichnet, wenn die Bandbreite wenigstens 500 MHz beträgt.

! Bei den Bezeichnungen Schmalband [narrow band] und Breitband [wide band] ist stets die Kenntnis der betrachteten Bandbreite als Bezug erforderlich.

Der **Amplitudengang** im Bereich der Bandbreite eines Signals oder einer technischen Funktionseinheit weist in der Praxis keinen konstanten geradlinigen Verlauf auf, sondern ist gekennzeichnet durch mehr oder weniger ausgeprägte Welligkeit. Im Bereich der Bandbreite treten somit Amplituden zwischen einem größten und einem kleinsten Wert auf. Eine vorhandene oder zulässige Welligkeit w kann entweder als absoluter Abstand zwischen den beiden Grenzwerten angegeben werden (z.B. $w = 2 \text{ dB}$) oder es erfolgt ein Bezug auf den Pegel der Referenzfrequenz f_{ref} (z.B. $w = +3 \text{ dB}/-1 \text{ dB}$).

! Die **Welligkeit** [ripple] im Bereich der Bandbreite lässt sich als absoluter Abstand zwischen dem größten und kleinsten Amplitudenwert angeben oder bezogen auf die Referenzfrequenz.

Bezogen auf die Bandbreite ist festzustellen, dass die untere Grenzfrequenz auch $f = 0 \text{ Hz}$ sein kann. Für die obere Grenzfrequenz gibt es keine Begrenzungen.

Den Grenzfall der Bandbreite stellt die Situation dar, wenn es sich um ein welliges Signal handelt, also nur eine Spektrallinie vorhanden ist. Es gilt dann für die Bandbreite $B = 1 \text{ Hz}$.

■ 7.2 Verzerrungen

Bei idealen Übertragungs- und Speichersystemen stimmen das Eingangs- und Ausgangssignal hinsichtlich Zeitfunktion und Frequenzfunktion bis auf mögliche Verstärkung oder Dämpfung überein. Bedingt durch die nicht idealen Eigenschaften technischer Systeme treten allerdings Abweichungen des Ausgangssignals vom Eingangssignal auf. Diese werden als Verzerrungen [distortion] bezeichnet.



Verzerrungen [distortion] = Abweichungen des Ausgangssignals vom Eingangssignal bedingt durch die nichtlinearen Eigenschaften des Übertragungssystems

Wird ein Signal übertragen, das nur aus einer Sinusschwingung besteht, dann ist der Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang linear. Die Zeitfunktion bleibt also bis auf die Amplitude unverändert.

Im Regelfall besteht allerdings das Eingangssignal aus der Summe verschiedener Schwingungen, setzt sich also aus mehreren Spektralanteilen zusammen. Dann können am Ausgang Abweichungen vom überlagerten Signal auftreten. Es handelt sich dann um lineare Verzerrungen, weil der lineare Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang für die einzelnen Spektralanteile unterschiedliche Werte aufweist. Die Amplituden des Eingangssignals werden dadurch für jede Frequenz unterschiedlich verstärkt oder gedämpft. Die den linearen Zusammenhang zwischen Eingang und Ausgang beschreibende Konstante weist also eine Frequenzabhängigkeit auf. Es gilt:

$$\underline{U}_2 = c(f) \cdot \underline{U}_1 \quad (7.1)$$

Das Ergebnis dieser Situation wird als Amplitudenverzerrungen [amplitude distortion] bezeichnet (**Bild 7.2**). Es ist auch die Bezeichnung Dämpfungsverzerrungen üblich.

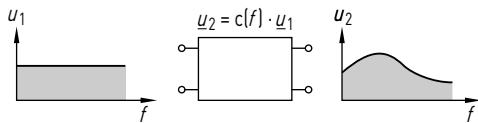


Bild 7.2 Amplitudenverzerrungen

Wenn für ein Übertragungssystem die frequenzabhängige Konstante bekannt ist, dann lassen sich die Amplitudenverzerrungen durch geeignete Maßnahmen kompensieren.



Amplitudenverzerrungen [amplitude distortion] = Bezogen auf ein Eingangssignal mit konstanter Amplitude für alle Frequenzen weisen die Amplituden des Ausgangssignals eine frequenzabhängige Dämpfung oder Verstärkung auf.

Auch bei der Phasenlage der Spektralanteile können störende Einflüsse auftreten. Diese machen sich durch unterschiedliche Laufzeiten vom Eingang zum Ausgang des Übertragungssystems für einzelne Schwingungen oder Schwingungspakete bemerkbar und werden als Phasenverzerrungen [phase distortion] oder auch Laufzeitverzerrungen bezeichnet. Es lassen sich somit folgende Ursachen der Phasenverzerrungen unterscheiden:

Phasenverzerrungen (= Laufzeitverzerrungen)

- Phasenlaufzeit (bei Einzelschwingungen)
- Gruppenlaufzeit (bei Schwingungspaketen)

! **Phasenverzerrungen** [phase distortion] lassen sich durch Laufzeitglieder kompensieren.

Ist bei einem Übertragungssystem die Abhängigkeit zwischen Eingang und Ausgang nicht mehr durch eine Konstante, sondern durch eine nichtlineare Funktion (z.B. $2 \cdot x^2 + 1$) gegeben, dann treten nichtlineare Verzerrungen [non linear distortion] auf. Im Ausgangssignal lassen sich dabei neben dem verstärkten oder gedämpften Eingangssignal zusätzliche Signalanteile feststellen und zwar jeweils Oberschwingungen oder Mischprodukte aus den im Eingangssignal enthaltenen Schwingungen mit den verschiedenen Frequenzen (**Bild 7.3**).

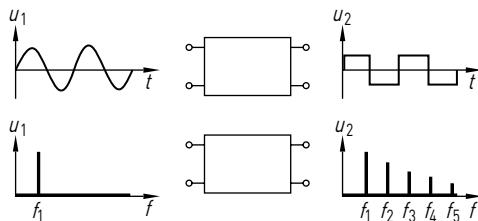


Bild 7.3 Nichtlineare Verzerrungen

Durch nichtlineare Verzerrungen treten bei der Zeit- und Frequenzfunktion des Ausgangssignals Veränderungen auf, die im Regelfall nur bedingt kompensierbar sind. Die Ursache dieser störenden Einflüsse sind meistens nichtlineare Kennlinien aktiver Bauelemente.

! **Nichtlineare Verzerrungen** [non linear distortion] bewirken zusätzlich Signalanteile im Ausgangssignal.

Als Maß für die nichtlinearen Verzerrungen gilt der **Klirrfaktor** d [distortion factor]. Er beschreibt das Verhältnis der zusätzlich entstandenen Oberschwingungen zu dem aus der Grundschwingung (U_1) und den Oberschwingungen U_2, U_3, \dots) bestehenden Gesamt signal. Da die Amplituden der Oberschwingungen in der Praxis schnell abnehmen, ist es für Berechnungen meistens ausreichend, nur die ersten Oberschwingungen zu berücksichtigen. Es gilt:

$$d = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots}}{\sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}} \quad (7.2)$$

Die Angabe des Klirrfaktors in Dezibel (dB) ergibt das **Klirrdämpfungsmaß** a_d [distortion attenuation figure]. Es beschreibt die Relation des Gesamt signals zu den Oberschwingungen und weist folgende Form auf:

$$a_d = 10 \cdot \lg \frac{1}{d} \text{ dB} \quad (7.3)$$

Ein weiterer Effekt kann sich durch galvanische, induktive, kapazitive oder elektromagnetische Kopplung zwischen zwei Übertragungskanälen ergeben. Er liegt vor, wenn ein Teil des Nutzsignals eines Kanals in den anderen Kanal eingekoppelt wird und das dortige Nutzsignal überlagert. Dieser Mechanismus wird als **Übersprechen** [crosstalking], Nebensprechen oder Kanaltrennung bezeichnet (**Bild 7.4**). Die wertmäßige Angabe erfolgt als **Übersprechdämpfungsmaß** a_{ct} [crosstalk attenuation figure] in Dezibel (dB), als dem logarithmierten Verhältnis zwischen dem Nutzsignal und dem eingekoppelten Störsignal. Das gilt wechselweise für beide Kanäle und weist folgende Form auf:

$$a_{ct(1 \rightarrow 2)} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{NUTZ(Kanal2)}}}{U_{\text{STÖR(Kanal1)}}} \text{ dB} \quad (7.4)$$

$$a_{ct(2 \rightarrow 1)} = 20 \cdot \lg \frac{U_{\text{NUTZ(Kanal1)}}}{U_{\text{STÖR(Kanal2)}}} \text{ dB} \quad (7.5)$$

Die beiden Dämpfungsmaße weisen in vielen Fällen gleiche Werte auf, grundsätzlich sind aber ebenso unterschiedliche Werte möglich.

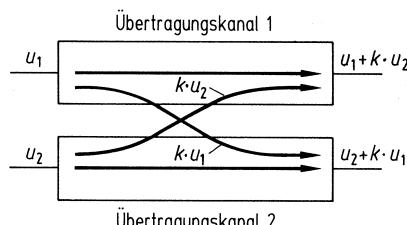


Bild 7.4 Übersprechen

Während bei analogen Signalen die Frequenz bzw. Bandbreite bestimmende Größen sind, ist es bei digitalen Signalen die Bitrate v_{bit} , also die Anzahl der Bits pro Sekunde. Wertangaben für diese Übertragungsgeschwindigkeit sind relativ. Sie müssen immer auf die jeweilige Aufgabenstellungen bezogen werden, um qualitative Aussagen machen zu können.



Beispiel:

Eine Bitrate von 2 Mbit/s ermöglicht zwar die problemlose Übertragung von Audiosignalen, ist für Fernsehen in Standardauflösung jedoch nicht ausreichend.

Obwohl der Begriff Bandbreite eigentlich nur bei Frequenzfunktion zutreffend ist, hat es sich eingebürgert, ihn auch in Bezug auf die Bitrate zu verwenden. So sind Breitbandschlüsse Schnittstellen, die einen großen Wert für die Bitrate (z.B. 25 Mbit/s) zur Verfügung stellen, also eine relativ große Übertragungsgeschwindigkeit bieten.

Die Verwendung des Begriffs Bandbreite bei analogen und digitalen Signalen lässt sich dadurch erklären, dass durch ihn in beiden Fällen eine Übertragungskapazität beschrieben wird, wenn auch in unterschiedlichen Einheiten.



Der Begriff Bandbreite wird inzwischen auch bei digitalen Signalen verwendet.

■ 7.3 Störabstand

Bei jeder Übertragung analoger oder digitaler Signale treten auch mehr oder weniger starke Störsignale auf, die zu einer Verfälschung der zu übertragenden Informationen führen können. Um diese Situation zu vermeiden, ist für jeden Anwendungsfall der Signalübertragung ein festgelegter Mindestabstand zwischen den Pegelwerten von Nutzsignal und Störsignal erforderlich. Dieser Nutzsignal-Störsignal-Abstand wird üblicherweise nur als Störabstand bezeichnet. Die Angaben erfolgen stets in Dezibel (dB).



Großer Störabstand → Große dB-Werte

Geringer Störabstand → Kleine dB-Werte

Bei Störabständen ist stets der Unterschied zwischen vorhandenen Werten und geforderten Werten zu beachten. Im ersten Fall liegt der Störabstand vor, während er im zweiten Fall erst durch geeignete Maßnahmen erreicht werden muss.

In der Praxis stellt das **Rauschen** [noise] das wichtigste Störsignal dar. Rauschquellen treten im gesamten Übertragungssystem auf. Es handelt sich um Widerstände, Halbleiterkomponenten und Elektronenröhren, die in Geräten und Baugruppen des Übertragungssystems eingesetzt sind und dort Rauschsignale hervorrufen. Es wird deshalb von inneren Rauschquellen gesprochen, da ein Bezug auf die Hardware des Übertragungssystems gegeben ist.

Bei Funkübertragungen treten zusätzlich äußere Rauschquellen mit Rauschsignalen in Erscheinung. Diese lassen sich wie folgt einteilen:

- Kosmisches Rauschen
Hauptsächlich verursacht durch Fixsterne des Milchstraßensystems
- Terrestrisches Rauschen
Verursacht durch Ionisierungsvorgänge und Inhomogenitäten innerhalb der Erdatmosphäre

Diese Rauschsignale werden über die Antenne aufgenommen und damit in das Übertragungssystem eingespeist.

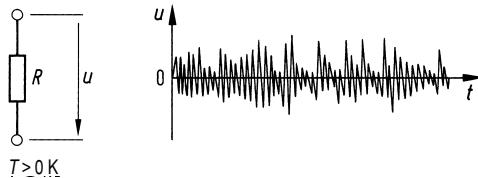


Die Rauschsignale der inneren und äußeren Rauschquellen lassen sich nicht kompensieren.

Die Ursache für die Rauschsignale der inneren Rauschquellen ist primär das thermische Rauschen, auch als Wärmerauschen oder Widerstandsrauschen bezeichnet. Es wird nachfolgend genauer betrachtet, weil diese Art des Rauschens modellhaft ebenfalls für die anderen anwendbar ist.

Das thermische Rauschen bedeutet ein von der Temperatur abhängiges Rauschsignal, hervorgerufen durch die regellose Bewegung der Elektronen in leitfähigem Material und in Halbleitern.

So tritt beispielsweise bei jedem Widerstand an seinen Anschlüssen eine völlig regellose Wechselspannung auf, auch wenn er nicht mit einer äußeren Spannungsquelle oder sonstigen Komponenten verbunden ist (**Bild 7.5**). Es muss allerdings die Umgebungstemperatur über dem absoluten Nullpunkt (0 K) liegen.



$T > 0 \text{ K}$

Bild 7.5 Rauschsignal beim Widerstand

Die an einem Widersand auftretende Rauschleistung P_n [noise power (NP)] ist von der absoluten Temperatur (Angabe in K) und der betrachteten Bandbreite B abhängig.]

Es gilt:

$$P_n = k \cdot T \cdot B \quad (7.6)$$

Bei dem Faktor k handelt es sich um die Boltzmann-Konstante.

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Ws}}{\text{K}} \quad (7.7)$$

Da die Angabe der Temperatur in Kelvin (K) erfolgt, ist der Zusammenhang mit den üblichen Werten in Grad Celsius ($^{\circ}\text{C}$) zu berücksichtigen.

$$0 \text{ } ^{\circ}\text{C} \triangleq 273,15 \text{ K} \quad (7.8)$$

Wird von $20 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ als Raumtemperatur T_0 ausgegangen, dann ergibt sich für die auf ein Hertz (Hz), also 293,15 K, bezogene Rauschleistung.

! $P_{n(20^{\circ}\text{C})} = k \cdot T = 4 \cdot 10^{-21} \frac{\text{W}}{\text{Hz}} \quad (7.9)$

Die Rauschleistung pro Hz ist auch als absoluter Pegel darstellbar. Bei Bezug auf 1 mW ergibt sich folgender Rauschleistungspegel pro Hz:

! $L_{n(20^{\circ}\text{C})} = 10 \cdot \lg(k \cdot T) = -174 \frac{\text{dBm}}{\text{Hz}} \quad (7.10)$

Die vorstehenden, auf 1 Hz bezogenen Gleichungen für die Rauschleistung und den Rauschleistungspegel zeigen deutlich, dass die Werte mit zunehmender Bandbreite ansteigen.

Wird nun die an einem Widerstand (z.B. Eingangswiderstand eines Verstärkers) auftretende Rauschspannung betrachtet und diese über einen hinreichend langen Zeitraum gemittelt, dann ergibt sich folgender Effektivwert:

$$U_n = 2 \cdot \sqrt{k \cdot T \cdot B \cdot R} \quad (7.11)$$

Das an einem Widerstand auftretende Rauschsignal enthält theoretisch alle Frequenzen, die Rauschleistung pro Hz Bandbreite ist damit für alle Frequenzen konstant. Ein solches Signal wird als weißes Rauschen bezeichnet.



Weißes Rauschen = Konstante Rauschleistung pro Hz Bandbreite für alle Frequenzen

Eine andere Situation liegt bei bandbegrenzten Signalen vor. Diese weisen nur innerhalb eines vorgegebenen Frequenzbereichs konstante Rauschleistung pro Hz Bandbreite auf. Für diese Art der Signale gilt die Bezeichnung farbiges Rauschen.



Farbiges Rauschen = Konstante Rauschleistung pro Hz Bandbreite innerhalb eines definierten Frequenzbereiches

Da für die bestimmungsgemäße Funktion von Kommunikationssystemen das Nutzsignal stets um einen von der spezifischen Anwendung abhängigen Wert größer sein muss als das Rauschsignal, stellt das Verhältnis zwischen Nutzsignal und Rauschsignal einen wichtigen Qualitätsparameter dar. Er wird als Signal-Rausch-Abstand [signal-to-noise ratio] oder Rauschabstand bezeichnet und in Dezibel (dB) angegeben. Als Formelzeichen ist der griechische Kleinbuchstabe Sigma σ festgelegt. Es werden in der Fachliteratur häufig aber auch SNR und S/N verwendet. Der Signal-Rausch-Abstand gilt gleichwertig für die Spannungen und Leistungen der Signale.

$$\sigma = SNR = \frac{S}{N} = 20 \cdot \lg \frac{U_s}{U_n} \text{ dB} = 10 \cdot \lg \frac{P_s}{P_n} \text{ dB}$$

(7.12)

mit

U_s = Spannung des Nutzsignals

U_n = Spannung des Rauschsignals

P_s = Leistung des Nutzsignals

P_n = Leistung des Rauschsignals



Beispiel:

Soll an dem Ausgang eines Verstärkers ein Rauschabstand von 40 dB eingehalten werden, dann ergibt sich aus vorstehender Gleichung:

$$\sigma = 40 \text{ dB} = 20 \cdot \lg \frac{U_s}{U_n} \text{ dB}$$

Umformung und Entlogarithmierung führen zu folgendem Ergebnis:

$$U_s = 100 \cdot U_n$$

Die Spannung des Nutzsignals muss also mindestens um den Faktor 100 größer sein als die Spannung des Rauschsignals, um den vorgegebenen Rauschabstand zu gewährleisten.

Da jedes Gerät und jede Baugruppe in einem Kommunikationssystem Rauschsignale erzeugt, ist ein Maß für die Bewertung dieses störenden Effektes erforderlich. Es wurde deshalb die **Rauschzahl** F [noise figure (NF) definiert und zwar als das Verhältnis des Rauschabstandes am Eingang zu dem am Ausgang dieser Zweitore (Vierpole).

$$F = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\text{Rauschabstand am Eingang}}{\text{Rauschabstand am Ausgang}} \quad (7.13)$$

Im Idealfall würden die Geräte und Baugruppen kein Rauschen bewirken, dann wären die Rauschabstände am Eingang und Ausgang gleich groß und damit $F = 1$. In der Realität tritt jedoch immer Rauschen auf, was den Rauschabstand am Ausgang verringert. Deshalb ist die Rauschzahl stets größer als Eins.

Üblicherweise wird die Rauschzahl nicht als Faktor, sondern als **Rauschmaß** a_F angeben. Es gilt dafür:

$$a_F = 10 \cdot \lg F \text{ dB} \quad (7.14)$$



Beispiel:

Für den LNB einer Satellitenempfangsantenne ist ein Rauschmaß von 1 dB angegeben. Daraus lässt sich wie folgt der Unterschied zwischen den Rauschabständen am Eingang und Ausgang ermitteln.

Durch Entlogarithmierung der vorstehenden Gleichung für das Rauschmaß ergibt sich die Rauschzahl:

$$F = 10^{a_F/10 \text{ dB}} = 10^{1 \text{ dB}/10 \text{ dB}} = 10^{0,1}$$

$$F = 1,26$$

Aus der Definition für die Rauschzahl ergibt sich damit für die Rauschabstände:

$$F = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1,26 \Rightarrow \sigma_1 = 1,26 \cdot \sigma_2$$

Der Rauschabstand am Eingang ist also um den Faktor 1,26 größer als der Rauschabstand am Ausgang.

Bei Anwendungen im Hochfrequenzbereich ist in vielen Fällen das verwendete Trägersignal U_c bzw. P_c für den Einfluss der Rauschsignale von größerer Wichtigkeit als das vom Trägersignal transportierte Nutzsignal. Es erfolgt dann die Angabe des Störabstandes als Träger-Rausch-Abstand [carrier-to-noise ratio] und weist folgende Form auf:

$$SNR = C/N = 20 \cdot \lg \frac{U_c}{U_n} \text{ dB} = 10 \cdot \lg \frac{P_c}{P_n} \text{ dB} \quad (7.15)$$

Auch wenn das Rauschen das am meisten verbreitete Störsignal ist, so sind bei einigen Anwendungen andere Störsignale von größerer Bedeutung. Es handelt sich um **Interferenzen** [interference], was als störende Spektralanteile verstanden werden kann. Aus diesem Grund sind auch dem Träger-Rausch-Abstand vergleichbare Angaben als Träger-Interferenz-Abstand C/I möglich.

Bei Rauschsignalen im Niederfrequenzbereich muss die Frequenzabhängigkeit des menschlichen Gehörs berücksichtigt werden. Dies erfolgt durch geeignete Filter und führt zu einem Spezialfall des farbigen Rauschens. Es gilt dafür die Bezeichnung Geräusch.



Geräusch = Auf die Frequenzabhängigkeit des menschlichen Ohres bezogenes Rauschen

Es ergibt sich damit vergleichbar den bisherigen Betrachtungen der Geräuschabstand als bewerteter Rauschabstand.

■ 7.4 Abtastung

Bei der Übertragung analoger Signale mit Hilfe zeitdiskreter Signale werden durch Abtastung [sampling] in einem konstanten Zeitraster die Werte des zu übertragenden Signals festgestellt. Das Ergebnis ist eine Folge von Impulsen mit unterschiedlichen Amplituden.



Abtastung [sampling] = Ermittlung der Signalwerte einer analogen Zeitfunktion in einem konstanten Zeitraster

Nach deren Übertragung soll daraus das ursprüngliche analoge Signal wiedergewonnen werden. Es kommt deshalb eine Halteschaltung [hold circuit] zum Einsatz, welche die Impulsfolge in einen treppenförmigen Spannungsverlauf wandelt. Eine nachfolgende Filterschaltung führt eine Glättung durch und bewirkt somit die Rekonstruktion des analogen Signals.

Es ist nun von Interesse, mit welcher Frequenz bzw. in welchen zeitlichen Intervallen die Abtastung erfolgen muss, damit der ursprüngliche Signalverlauf nach der Übertragung möglichst genau wiederhergestellt werden kann. Die systemtheoretische Betrachtung dieser Frage zeigt, dass die größte in zu übertragendem analogen Signal enthaltene Frequenz f_{\max} eine wesentliche Rolle spielt. Die Abtastfrequenz f_A muss nämlich mindestens den doppelten Wert von f_{\max} aufweisen, es sind also mindestens zwei Abtastungen während einer Periode der größten Frequenz erforderlich. Diese Erkenntnis wird in seiner mathematischen Form als **Abtasttheorem** bezeichnet. Es gilt:

$$f_A = \frac{1}{T_A} \geq 2 \cdot f_{\max} \quad (7.16)$$

Große Abtastfrequenzen führen somit zu kurzen Abtastintervallen und umgekehrt (**Bild 7.6**). Wird die Abtastfrequenz f_A größer als $2 \cdot f_{\max}$ gewählt, dann liegt Überabtastung vor. Dies ist zwar aus Sicht der Übertragungstheorie nicht zwingend erforderlich und erfordert auch einen größeren technischen Aufwand, ermöglicht jedoch dafür eine bessere Erfassung der Feinheiten des analogen Signalverlaufs. Bei zu kleiner Abtastfrequenz f_A , also zu großen Abtastintervallen, liegt Unterabtastung vor und es ergibt sich eine Verfälschung des Ausgangssignals gegenüber dem Eingangssignal.

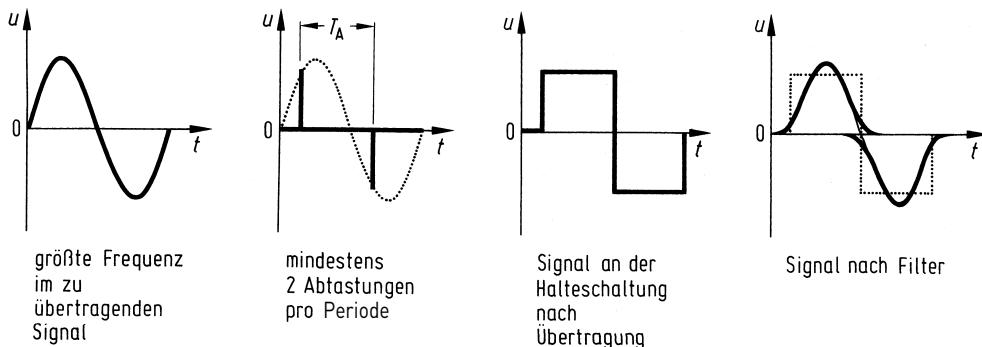


Bild 7.6 Abtastintervall gemäß Abtasttheorem



Überabtastung [oversampling] ($f_A > 2 \cdot f_{\max}$) verbessert die Übertragungsqualität.

Treten bei dem zu übertragenden analogen Signal oberhalb von f_{\max} zusätzliche Spektralanteile auf, dann können diese in Verbindung mit der Abtastfrequenz zu Störeffekten führen. Bei der Rekonstruktion des Signals treten nämlich Signalanteile auf, die im Original nicht enthalten waren. Für diese unerwünschte Störbeeinflussung gilt die Bezeichnung Aliasing.



Aliasing = Störeffekte durch Spektralanteile oberhalb der größten im zu übertragenden Signal enthaltenen Frequenz

Dieser Effekt lässt sich verhindern oder zumindest stark reduzieren, wenn beim analogen Signal die Spektralanteile mit Frequenzen oberhalb der größten im zu übertragenden Signal enthaltenen Frequenz möglichst stark unterdrückt werden. Das lässt sich mit entsprechenden Filtern realisieren. Sie werden als Anti-Aliasing-Filter bezeichnet, weil sie Aliasing verhindern. In der Fachliteratur wird häufig auch der eigentlich unzutreffende Begriff Aliasing-Filter verwendet.

Eine weitere Störproblematik stellt bei Kommunikationssystemen die Einstrahlung elektromagnetischer Signale dar. Diese können sich auf die Übertragung störend auswirken. Ein Schutz ist durch Kapselung mit elektrisch leitfähigem Material möglich. Dies wird als Schirmung bezeichnet, auch die Bezeichnung Abschirmung wird verwendet. Dadurch ergibt sich eine definierbare Reduzierung der einwirkenden Feldstärke. Das logarithmierte Verhältnis der Feldstärke von der Schirmung zur Feldstärke hinter der Schirmung kennzeichnet das Schirmdämpfungsmaß a_E . Meist wird allerdings dafür nur die Bezeichnung Schirmungsmaß verwendet. Es gilt:

$$a_E = 20 \cdot \lg \frac{E_{\text{vor der Schirmung}}}{E_{\text{hinter der Schirmung}}} \text{dB} \quad (7.17)$$

Je größer das Schirmungsmaß, desto besser ist die Wirkung der Schirmung. Es muss allerdings darauf geachtet werden, dass eine Abschirmung im gesamten Kommunikationssystem durchgängig wirksam ist, da jede Leckstelle ein ausgeprägtes Störpotenzial bedeutet.

Bei der Übertragung digitaler Signale wirken sich Störsignale unmittelbar auf den Bitstrom aus. Mit dem Zustand „1“ gesendete Bits werden dadurch als Bits mit dem Zustand „0“ empfangen und umgekehrt.

Bezogen auf dieselbe Zeitspanne $t_2 - t_1$ wird das Verhältnis der fehlerhaft empfangenen Bits zu der Zahl der gesamt empfangenen Bits als Bitfehlerrate (*BFR*) [bit error rate (*BER*)] bezeichnet. Es wird auch der Begriff Bitfehlerhäufigkeit (*BFH*) verwendet. In der Fachliteratur ist hauptsächlich die Abkürzung *BER* zu finden. Es gilt folgende Beziehung:

$$BER = \frac{\text{Zahl der fehlerhaft empfangenen Bits}}{\text{Zahl der gesamt empfangenen Bits}} = \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_1} \quad (7.18)$$

Die Bitfehlerrate ist eine dimensionslose Zahl. Sie wird üblicherweise als Zehnerpotenz angegeben. Weil die Zahl der fehlerhaft empfangenen Bits gegenüber der Zahl der gesamt empfangenen Bits immer erheblich kleiner ist, treten dabei negative Exponenten auf.



Beispiel:

Die Angabe $BER = 10^{-5}$ bedeutet, dass bezogen auf dieselbe Zeitspanne folgendes Verhältnis für die Bits vorliegt:

$$BER = \frac{\text{Bits, fehlerhaft}}{\text{Bits, gesamt}} = 10^{-5} = \frac{1}{10^5} = \frac{1}{100\,000}$$

Von 100 000 empfangenen Bits ist also ein Bit fehlerhaft.

Die Bitfehlerrate ist ein wichtiger Qualitätsparameter digitaler Übertragungssysteme. Verständlicherweise werden stets kleine *BER*-Werte angestrebt. Bei Angaben ist zu berücksichtigen, dass mit zunehmendem Zahlenwert des negativen Exponenten die Zahl der fehlerhaft empfangenen Bits abnimmt.



Die Bitfehlerrate *BER* wird kleiner, wenn der Zahlenwert für den negativen Exponenten der *BER*-Angabe zunimmt.

Bei Angaben von Bitfehlerraten ist darauf zu achten, ob es sich um einen vorhandenen oder einen geforderten Wert handelt. So ist einerseits durch entsprechende Messungen feststellbar, welche Bitfehlerrate beispielsweise ein gegebenes Signal aufweist. Andererseits kann es sich bei der Angabe aber auch um einen geforderten Minimalwert (Mindestwert) oder Maximalwert (Höchstwert) handeln, damit ein Übertragungssystem noch bestimmungsgemäß arbeiten kann. Es sind somit folgende *BER*-Angaben unterscheidbar:

- Vorhandener Wert der *BER*
- Geforderter Minimalwert für die *BER*
- Geforderter Maximalwert für die *BER*

Um Übertragungsfehler zu vermeiden, müssen geforderte und vorhandene Bitfehlerraten immer zueinander „passen“.



$BER_{\text{vorhanden}}$ darf nicht größer sein als $BER_{\text{gefordert}}$.

Ein wichtiges Merkmal für die Übertragung digitaler Signale ist bekanntlich der Zeittakt, durch den sich die jeweilige Bitdauer ergibt. Diese Taktung muss sehr präzise erfolgen, damit die übertragenen Bits auf der Empfangsseite eindeutig erkannt werden können. Ergeben sich nun bei dem Taktsignal Schwankungen in der Phasenlage, dann treten die Flanken der Bits vor oder nach den festgelegten Zeitpunkten auf, was die bestimmungsgemäße Verarbeitung der Signale erschwert oder sogar unmöglich macht. Dieser störende Effekt wird als Jitter bezeichnet.



Jitter = Phasenschwankungen des Taktsignals

Der störende Einfluss von Jitter lässt sich mit Hilfe des **Augendiagramms** [eye pattern] beurteilen. Dabei werden die übertragenen Bits durch Triggerung auf einen Oszilloskop-Bildschirm übereinander geschrieben dargestellt. Das Ergebnis wären im Idealfall senkrechte Verläufe zwischen den beiden Spannungswerten, welche die Zustände 0 und 1 repräsentieren. Bedingt durch Jitter und sonstige Einflüsse auf die Übertragung ergeben sich jedoch Spannungsverläufe, die einer Augenform vergleichbar sind (**Bild 7.7**). Die Augenweite ist dabei ein Maß für den Jitter, die Augenhöhe kennzeichnet dagegen Dämpfungsverzerrungen.

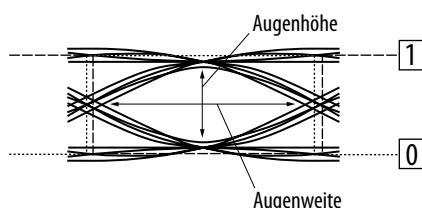


Bild 7.7 Augendiagramm

■ 7.5 Anpassung

Bei jedem Kommunikationssystem soll bekanntlich das Nutzsignal mit geringstmöglichen Verlusten und Störeinflüssen von der Quelle zur Senke übertragen werden. Um dieses zu erreichen, müssen zwischen den Funktionseinheiten des Systems bestimmte technische Vorgaben erfüllt sein. Diese werden als Anpassung [matching] bezeichnet. Sind die Vorgaben nicht erfüllt, dann liegt Fehlanpassung [mismatching] vor.



Anpassung [matching] = Technische Vorgaben im Übertragungssystem, um die Übertragung des Nutzsignals mit geringstmöglichen Verlusten und Störeinflüssen zu ermöglichen.

Die Anpassungsbedingungen lassen sich überschaubar an einer belasteten Quelle erklären. An die Klemmen eines aktiven Eintors mit dem Innenwiderstand Z_i ist dabei der Außenwiderstand Z_a angeschlossen (**Bild 7.8**). Für den allgemeinen Fall muss dabei von komplexen Widerständen (Impedanzen) ausgegangen werden. Beide Impedanzen weisen dann Wirkwiderstände und frequenzabhängige Blindwiderstände auf, wobei es sich um kapazitive oder induktive Blindwiderstände handeln kann.

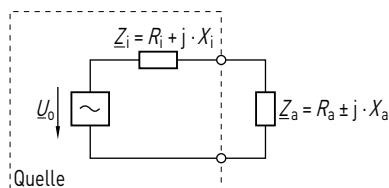


Bild 7.8 Belastete Quelle

Aus den Grundlagen der Elektrotechnik ist bekannt, dass die maximale Leistung von der Quelle an den Außenwiderstand abgegeben wird, wenn $R_a = R_i$ gilt. Diese Aussage berücksichtigt allerdings keine möglichen Blindanteile. Bei Signalen im kHz-Bereich ist das noch vertretbar, bei größeren Frequenzen wird jedoch abhängig vom Verhältnis der Blindanteile von Z_i und Z_a ein Teil des Signals vom Außenwiderstand zum Innenwiderstand wieder reflektiert. Diese Situation lässt sich durch ein vorlaufendes Signal U_v und ein rücklaufendes Signal U_r beschreiben und führt verständlicherweise zur Veränderung des ursprünglichen Signals (**Bild 7.9**).

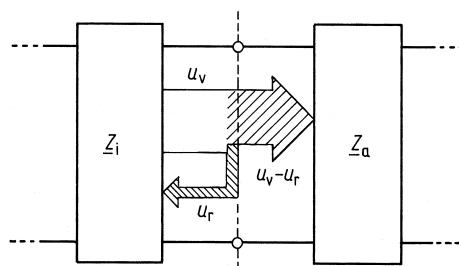


Bild 7.9 Reflexion

Es lassen sich grundsätzlich zwei Arten der Anpassung unterscheiden, nämlich die Widerstandsanpassung und die Leistungsanpassung. Bei der **Widerstandsanpassung** gilt die Beziehung $Z_a = Z_i$. Es liegen dabei gleiche Wirk- und Blindanteile beim Außen- und Innenwiderstand vor (**Bild 7.10**). Außerdem treten keine Reflexionen auf. Im Falle der **Leistungsanpassung** müssen die Wirkanteile von Z_i und Z_a gleich groß sein und sich die Blindanteile kompensieren. Dies lässt sich durch einen kapazitiven Blindwiderstand bei dem einen Widerstand und einem induktiven bei dem anderen Widerstand erreichen, wobei die Blindwiderstände gleiche Werte aufweisen müssen (**Bild 7.11**). Bei Leistungsanpassung wird maximale Wirkleistung übertragen, es treten allerdings Reflexionen auf.

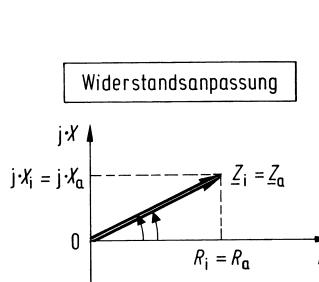


Bild 7.10 Widerstandsanpassung

Ergebnis:
Keine
Reflexionen

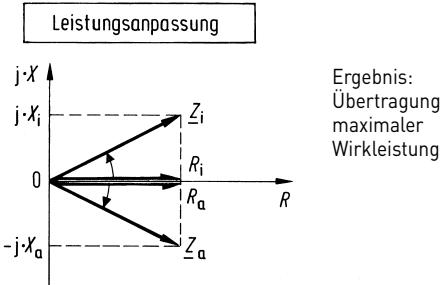


Bild 7.11 Leistungsanpassung

Ergebnis:
Übertragung
maximaler
Wirkleistung

Sobald an der Schnittstelle zwischen zwei Funktionseinheiten in einem Übertragungssystem ein rücklaufendes Signal auftritt, liegt Fehlanpassung vor. Diese lässt sich mathematisch durch folgende Ausdrücke beschreiben:

- Reflexionsfaktor [reflection coefficient] \underline{r}
- Rückflussdämpfung [return loss] a
- Welligkeitsfaktor [standing wave ratio (SWR)] s
- Anpassungsfaktor [inverse standing wave ratio] m

Vorstehende Angaben können alle ineinander umgerechnet werden, so dass sich die Auswahl in der Praxis üblicherweise am einfachsten Messverfahren für die Fehlanpassung orientiert.

Der **Reflexionsfaktor** ist eine dimensionslose komplexe Größe, die das Verhältnis des rücklaufenden Signals \underline{U}_r zum vorlaufenden Signal \underline{U}_v nach Betrag und Phasenlage angibt.



$$\underline{r} = r \cdot e^{i\varphi} = \frac{\underline{U}_r}{\underline{U}_v} = \frac{Z_a - Z_i}{Z_a + Z_i} \quad (7.19)$$

In vielen Fällen wird nur der Betrag des Reflexionsfaktors betrachtet. Dafür gilt:

$$r = |\underline{r}| = \left| \frac{Z_a - Z_i}{Z_a + Z_i} \right| \quad (7.20)$$

Die Reflexion lässt sich auch als Dämpfungsmaß α angeben. Dabei handelt es sich um den logarithmierten Kehrwert des Betrages des Reflexionsfaktors. Dafür gilt die Bezeichnung **Rückflussdämpfung**, weil es sich um eine Angabe handelt, wie stark das rücklaufende Signal gegenüber dem vorlaufenden Signal gedämpft wird.

$$\alpha = 20 \cdot \lg \frac{1}{r} \text{ dB} = 20 \cdot \lg \frac{\underline{U}_v}{\underline{U}_r} \text{ dB} = 20 \cdot \lg \left| \frac{\underline{Z}_a + \underline{Z}_i}{\underline{Z}_a - \underline{Z}_i} \right| \text{ dB} \quad (7.21)$$

Der Welligkeitsfaktor und der Anpassungsfaktor werden aus der Überlagerung vom vorlaufenden und rücklaufenden Signal abgeleitet. Der resultierende Kurvenverlauf ist dabei für gleiche Zeitpunkte jeder Periode konstant, wiederholt sich also nach jeder Periodendauer T . Durch die Überlagerung treten beim resultierenden Signal zwischen $t = 0$ und $t = T$ örtlich konstante Maxima U_{\max} und Minima U_{\min} auf, was als stehende Wellen bezeichnet wird (**Bild 7.12**). Ein Maximum tritt auf, wenn vorlaufendes und rücklaufendes Signal gleichphasig sind, während sich bei Gegenphasigkeit ein Minimum ergibt. Daraus folgt:

$$U_{\max} = U_v + U_r \quad (7.22)$$

$$U_{\min} = U_v - U_r \quad (7.23)$$

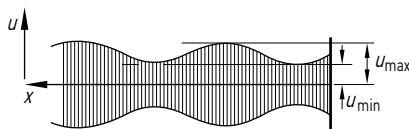


Bild 7.12 Stehende Wellen

Der **Welligkeitsfaktor** s beschreibt das Verhältnis zwischen dem Maximum U_{\max} und dem Minimum U_{\min} . Es gilt:

$$s = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{\underline{U}_v + \underline{U}_r}{\underline{U}_v - \underline{U}_r} = \frac{1+r}{1-r} \quad (7.24)$$

Für den Welligkeitsfaktor wird auch die Bezeichnung **Stehwellenverhältnis**[standing wave ratio (*SWR*)] verwendet.

Der Kehrwert des Welligkeitsfaktors ergibt den **Anpassungsfaktor** m als Verhältnis zwischen dem Minimum U_{\min} und dem Maximum U_{\max} . Daraus folgt:

$$m = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{\underline{U}_v - \underline{U}_r}{\underline{U}_v + \underline{U}_r} = \frac{1-r}{1+r} \quad (7.25)$$

In der Kommunikationstechnik wird für die Nutzsignale stets Widerstandsanpassung angestrebt, weil dann die Übertragung ohne Reflexionen erfolgt. Dies setzt bekanntlich gleich große Innen- und Außenwiderstände voraus, also den Zustand $\underline{Z}_a = \underline{Z}_i$.

Wird diese Bedingung in die Gleichungen für r , α , s und m eingesetzt, dann ergeben sich die Werte für die totale Anpassung. Das Gegenteil, nämlich die totale Fehlanpassung tritt bei Kurzschluss ($\underline{Z}_a = 0$) oder Leerlauf ($\underline{Z}_a \rightarrow \infty$) am Ausgang der belasteten Quelle auf, weil bei diesen Konstellationen das vorlaufende Signal hundertprozentig reflektiert wird. Aus nachfolgender Tabelle sind die bei Fehlanpassung möglichen Wertebereiche ersichtlich.

Tabelle 7.1 Wertebereiche bei Fehlanpassung

	Totale Anpassung ($\underline{Z}_a = Z_i$)	Fehlanpassung	Totale Fehlanpassung ($\underline{Z}_a = 0$ oder $\underline{Z}_a \rightarrow \infty$)
Reflexionsfaktor r	0	.....	1
Rückflussdämpfung a	$\rightarrow \infty$ dB	.....	0 dB
Welligkeitsfaktor s	1	.....	$\rightarrow \infty$
Anpassungsfaktor m	0	.....	1

Zu starke Fehlanpassung zwischen Funktionseinheiten in einem Kommunikationssystem beeinflusst die Übertragungsqualität unmittelbar.

Ein kennzeichnendes Merkmal jedes digitalen Übertragungssystems ist die übertragbare Bitrate. Diese hängt jedoch unmittelbar von der Bandbreite des verfügbaren Übertragungs-kanals ab. Das Verhältnis zwischen beiden Größen wird als Bandbreitenausnutzung ϵ , Bandbreiteneffizienz oder spektrale Effizienz [spectral efficiency] bezeichnet. Die Wer-teangabe erfolgt in bit/s pro Hz. Der Bezug auf 1 Hz Bandbreite ermöglicht den realisti-schen Vergleich unterschiedlicher Übertragungssysteme.



Bandbreitenausnutzung = Angabe der in einem System übertragbaren Bitrate pro Hertz (Hz) Bandbreite

Die in diesem Kapitel aufgezeigten Qualitätsparameter sind bei allen Varianten von Kom-munikationssystemen relevant. Die jeweiligen Werte sind entweder vorgegeben oder sie werden gefordert. Dieser Unterschied ist bei allen Betrachtungen unbedingt zu berücksich-tigen.

Abschließend ist anzumerken, dass für die Ermittlung von Qualitätsparametern die Mess-verfahren bekannt sein müssen. Ansonsten sind keine soliden Vergleichsmöglichen-keiten gegeben.

8

Übertragungsmerkmale

■ 8.1 Übertragungswege

8.1.1 Einführung

Für die Übertragung analoger und digitaler Signale gibt es grundsätzlich folgende Übertragungswege:

- Leitungsübertragung
- Funkübertragung
- Portable Signalspeicher

Bei Leitungsübertragung handelt es sich um geführte Übertragung, weil der Weg des Signals durch eine Leitung fest vorgegeben ist. Der Übertragungskanal besteht dabei aus einer elektrischen Leitung (Kupferleitung) oder einer optischen Leitung (Lichtwellenleiter [LWL]).

Elektrische Leitungen übertragen Spannungsverläufe vom Sender zum Empfänger. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um Verstärker, in der Praxis sind es jedoch meistens Kombinationen mit Codern/Decodern, Modulatoren/Demodulatoren oder Multiplexern/Demultiplexern (**Bild 8.1**).

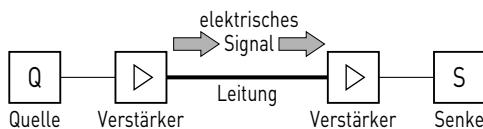


Bild 8.1 Geführte Übertragung mit elektrischen Leitungen

Bei optischen Leitungen werden optische Signale im Wellenlängenbereich von 800 nm bis 1600 nm liegen. Als Sender kommen elektrooptische Wandler zum Einsatz, auf der Empfangsseite handelt es sich um optoelektrische Wandler (**Bild 8.2**). Die optischen Leitungen sind meistens Glasfaserleitungen (GFL), es kann sich aber auch um Kunststofffaserleitungen (KFL) [polymer optical fibre (POF)] handeln.

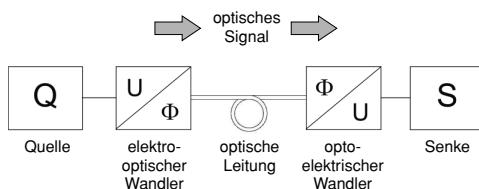


Bild 8.2 Geführte Übertragung mit optischen Leitungen

Funkübertragung verwendet elektromagnetische Wellen und stellt eine ungeführte Übertragung dar, weil der Luftraum als Ausbreitungsmedium grundsätzlich die Ausbreitung in beliebige Richtungen ermöglicht. Es werden dabei die elektromagnetischen Wellen von Funksendern über Antennen abgestrahlt und mit Funkempfängern über Antennen aufgenommen (**Bild 8.3**).

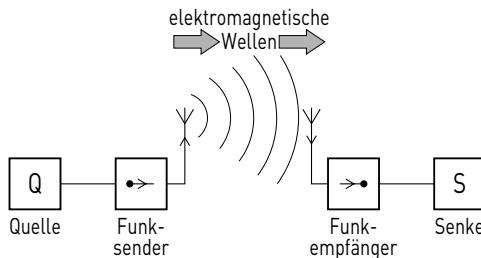


Bild 8.3 Ungeführte Übertragung durch Funkverbindungen

Eine besondere Form der Übertragung liegt vor, Signale auf einem Informationsträger zu speichern und diesen zwischen räumlich entfernten Stellen zu transportieren. Für diese Methode der materiellen Übertragung ist auf der Sendeseite eine Speichereinrichtung für die Signaleingabe und auf der Empfangsseite eine Speichereinrichtung für die Signalausgabe erforderlich. Diese Variante der Übertragung bietet eine hohe Flexibilität auf der Anbieter- und Nutzerseite.

8.1.2 Leitungsgebundene Übertragung mit elektrischen Leitungen

Elektrische Leitungen sollen elektrische Signale über definierte Entfernung geführt übertragen. Sie bestehen aus Leitermaterial (z.B. Kupfer) in gestreckter Form mit meist rundem Querschnitt und bieten deshalb für Spannung und Strom optimale Bedingungen. Weil die elektrische Spannung stets ein elektrisches Feld hervorruft und der elektrische Strom immer ein Magnetfeld bewirkt, dienen Leitungen der geführten Verbreitung elektromagnetischer Energie, was als Wellenleitung bezeichnet wird. Es gilt somit folgender Zusammenhang:

Elektrische Leitung
 ↓
 Leitermaterial in gestreckter Form
 ↓
 Spannung und Strom
 ↓
 elektrisches und magnetisches Feld
 ↓
 Wellenleitung

Für die einwandfreie Funktion der Übertragung ist stets ein geschlossener Stromkreis erforderlich. Dies bedeutet einen Hinleiter vom Sender zum Empfänger und von diesem eine Rückleitung zum Sender. Dies gilt unabhängig von den verschiedenen Bauformen für die Leitungen (**Bild 8.4**).

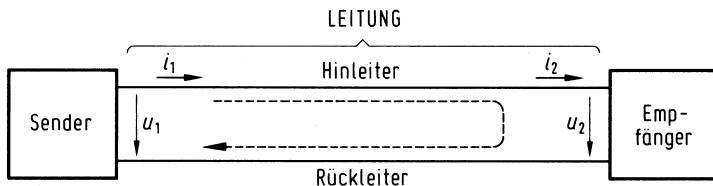


Bild 8.4 Leitung als geschlossener Stromkreis

Wie bekannt, hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen v vom Ausbreitungsmedium ab. Während bei Luft die Lichtgeschwindigkeit c_0 gilt, besteht bei elektrischen Leitungen eine Abhängigkeit von der Permittivitätszahl ε_r und der Permeabilitätszahl μ_r der Materie zwischen Hin- und Rückleiter in folgender Weise:

$$v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}} \quad (8.1)$$

Daraus folgt für die Wellenlänge:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}} \cdot \frac{c_0}{f} \quad (8.2)$$

Die Wellenlänge ist also um den durch ε_r und μ_r der Materie zwischen Hin- und Rückleiter bestimmten Verkürzungsfaktor k kleiner als in Luft.

$\lambda = k \cdot \lambda_{\text{Luft}}$ ■ (8.3)



Beispiel:

Für den Kabeltyp RG 58 C/U ist im Datenblatt $k = 0,66$ als Verkürzungsfaktor angegeben.

Für eine Betriebsfrequenz von 3 MHz ergibt sich für die Wellenlänge in Luft:

$$\lambda = \frac{c_0}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ ms}}{3 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 100 \text{ m}$$

Daraus folgt für die Wellenlänge im Kabel:

$$\lambda_{\text{Kabel}} = k \cdot \lambda_{\text{Luft}} = 0,66 \cdot 100 \text{ m} = 66 \text{ m}$$

Es ist also für eine Wellenlänge von 100 m in Luft nur eine Kabellänge von 66 m erforderlich.

Das vorstehende Beispiel zeigt, dass stets zwischen der elektrischen Länge $l_{\text{elektrisch}}$ und der mechanischen Länge $l_{\text{mechanisch}}$ zu unterscheiden ist. Beide Angaben sind wie die Wellenlängen über den Verkürzungsfaktor verknüpft.



$$l_{\text{mechanisch}} = k \cdot l_{\text{elektrisch}} \quad (8.4)$$

Jede elektrische Leitung ist ein passives Zweitor. Bei einem dem Eingang zugeführten Signal sind am Ausgang Änderungen hinsichtlich Amplitude und Phasenlage feststellbar (**Bild 8.5**). Es handelt sich dabei um Dämpfung und durch Laufzeiten bedingte Phasenverschiebungen. Bei impulsförmigem Eingangssignal sind am Ausgang auch Änderungen der Signalform möglich, jedoch nicht bei sinusförmigen Eingangssignalen.

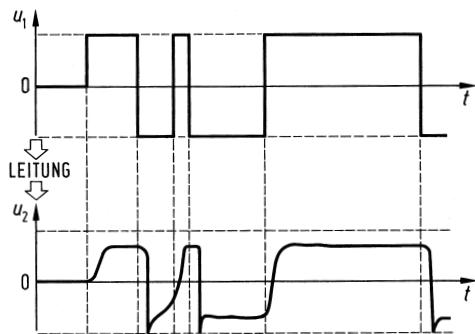


Bild 8.5 Signalbeeinflussung durch Leitung

Die aufgezeigte Situation lässt sich am besten erklären, wenn ein hinreichend kurzer Leitungsabschnitt genauer betrachtet wird. Durch Messung sind dabei in Richtung der Leiter ein Widerstand und eine Induktivität feststellbar, während sich zwischen Hinleiter und Rückleiter ein Leitwert und eine Kapazität bemerkbar machen. Dies lässt sich in einem Ersatzschaltplan zusammenhängend darstellen (**Bild 8.6**).

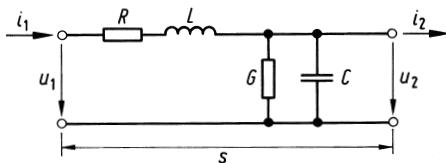


Bild 8.6 Ersatzschaltplan für kurzen Leitungsabschnitt

Der Längswiderstand R ergibt sich durch den Widerstand des Leitermaterials, während die gestreckte Form des Leiters die Induktivität L bedingt. Der Leitwert G ist der Querwiderstand zwischen Hin- und Rückleiter, da die Isolation nicht unendlich gut ist. Die Kopplung über das elektrische Feld zwischen dem Hin- und Rückleiter wird durch die Kapazität C gekennzeichnet.

Bei normalen Leitungen treten vorstehende Werte bei jedem beliebigen Leitungsabschnitt auf und zwar unabhängig von ihrer Abgrenzung. Es gilt deshalb die Bezeichnung homogene Leitung. Diese lässt sich durch Leitungskonstanten eindeutig beschreiben und zwar durch auf eine sehr kurze Leitungslänge s bezogene Werte von R , L , G und C . Für die vier möglichen Leitungskonstanten gilt:

- Widerstandsbelag R'
$$R' = \frac{R}{s} \quad (8.5)$$

- Induktivitätsbelag $L' = \frac{L}{s}$

(8.6)

- Leitwertbelag $G' = \frac{G}{s}$

(8.7)

- Kapazitätsbelag $C' = \frac{C}{s}$

(8.8)

Es besteht also ein Bezug auf die Längeneinheit.



Jede elektrische Leitung ist durch die Leitungskonstanten charakterisiert.

Die Werte für die Leitungskonstanten, also der verschiedenen Beläge, hängen von der jeweiligen Bauform der elektrischen Leitung ab.

Vorstehende Ausführungen zeigen, dass elektrische Leitungen frequenzabhängig sind und ein Tiefpassverhalten mit entsprechender Grenzfrequenz aufweisen. Für ihren Einsatz als Übertragungskanal muss das entsprechend berücksichtigt werden.



Elektrische Leitungen stellen Tiefpässe dar.

Mit Hilfe des Ersatzschaltplans können die Spannungs- und Stromverhältnisse auf der Leitung hinsichtlich Ort und Zeit genau beschrieben werden. Es ergeben sich als Leitungsgleichungen bezeichnete Differentialgleichungen, von denen lediglich eine wesentliche Erkenntnis betrachtet werden soll. An jeder Stelle der Leitung ist nämlich das Verhältnis zwischen Spannung und Strom konstant, solange ungestörter Betrieb vorliegt, also das Signal nur vom Sender zum Empfänger verläuft. Diese Konstante hat die Dimension eines Widerstandes und wird als Wellenwiderstand Z_0 bezeichnet. Es gilt:



$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j \cdot \omega \cdot L'}{G' + j \cdot \omega \cdot C'}}$$
(8.9)

Der Wellenwiderstand tritt als komplexe Größe auf und ist von der Frequenz abhängig. Für viele Anwendungsfälle können jedoch die Wirkanteile gegenüber den Blindanteilen vernachlässigt werden. Bleiben R' und G' unberücksichtigt, dann wird dies als verlustfreie Leitung bezeichnet. Der Wellenwiderstand hängt dann nur noch vom Induktivitätsbelag L' und Kapazitätsbelag C' ab. Es ergibt sich dadurch folgende frequenzunabhängige Größe für den Wellenwiderstand einer verlustfreien Leitung:



$$Z_0 = Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$$
(8.10)

Der Wellenwiderstand ist kein reales Bauelement, sondern eine wichtige Basis für die Anpassungsbedingungen zwischen Sender und Leitung bzw. Leitung und Empfänger oder Abschlusswiderstand.

Die Angaben des Wellenwiderstandes beziehen sich in der Fachliteratur üblicherweise auf die verlustfreie Leitung. Im Bedarfsfall sind deshalb die durch den Widerstandsbelag R' und Leitwertbelag G' bewirkten Verluste gesondert zu betrachten.

Durch elektrische Leitungen erfolgt bekanntlich die geführte Ausbreitung elektromagnetischer Wellen. Die Auswertung der Leitungsgleichungen zeigt, dass bei der Übertragung Beeinflussungen des Signals auftreten und zwar Dämpfung sowie Phasenverschiebung. Die Werte lassen sich je aus dem Übertragungsmaß γ ermitteln. Für diese komplexe Größe gilt:



$$\gamma = \sqrt{(R' + j \cdot \omega \cdot L') \cdot (G' + j \cdot \omega \cdot C')} \quad (8.11)$$

Sie lässt sich nach den Regeln der komplexen Rechnung in den Realteil α und den Imaginärteil β aufteilen:

$$\gamma = \alpha + j \cdot \beta \quad (8.12)$$

Der Realteil α wird als Dämpfungsmaß oder Dämpfungsbelag bezeichnet und gibt die Dämpfung in Dezibel (dB) pro Längeneinheit an. Für den Imaginärteil β gilt die Bezeichnung Phasenmaß oder Phasenbelag. Es handelt sich dabei um die Aussage in Grad pro Längeneinheit über das Nacheilen des Signals gegenüber dem Leitungsanfang.



Dämpfungsmaß (Dämpfungsbelag) α = Dämpfung des Signals pro Längeneinheit



Phasenmaß (Phasenbelag) β = Phasenverschiebung des Signals pro Längeneinheit



Beispiel:

Weist ein Kabel für das Dämpfungsmaß $\alpha = 12 \text{ dB}/100 \text{ m}$ auf, dann ergibt sich für ein 32 m langes Stück dieses Kabeltyps folgende Dämpfung:

$$\alpha_{\text{Kabel}} = \alpha \cdot l = \frac{12 \text{ dB}}{100 \text{ m}} \cdot 32 \text{ m} = 3,84 \text{ dB}$$

Das Signal ist also am Leitungsende um 3,84 dB kleiner als am Leitungsanfang.

Bei den Werten für das Dämpfungsmaß α und Phasenmaß β ist deren Frequenzabhängigkeit zu berücksichtigen. Dafür gilt:

Dämpfungsmaß α und Phasenmaß β nehmen mit steigender Frequenz zu.

In den Datenblättern für Kabel sind deshalb meist die Werte für verschiedene Frequenzen angegeben.

Um eine störungsfreie Übertragung zu erreichen, muss die Leitung mit einem Widerstand abgeschlossen sein, dessen Wert dem des Wellenwiderstandes der Leitung entspricht. In diesem Fall der Widerstandsanpassung tritt nur eine vom Leitungsanfang zum Leitungsende verlaufende Welle auf.

Entspricht der Abschlusswiderstand nicht dem Wellenwiderstand, dann liegt Fehlanpassung vor und ein Teil des Signals wird am Leitungsende reflektiert. Neben der vorlaufenden Welle tritt in diesem Fall noch eine rücklaufende Welle auf, so dass sich ein resultierendes Signal ergibt, welches die bereits behandelten stehenden Wellen hervorruft (**Bild 8.7**).

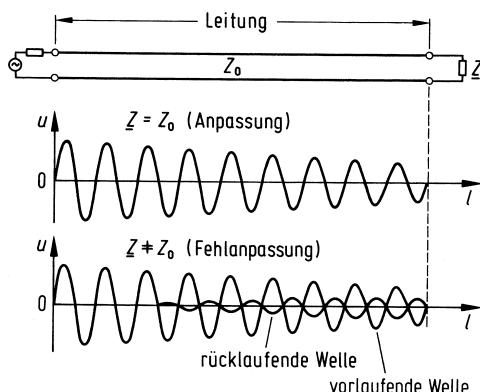


Bild 8.7 Wellen auf der Leitung

Ein Maß für die Fehlanpassung ist bekanntlich der Reflexionsfaktor r , also das Verhältnis der rücklaufenden Welle zur vorlaufenden Welle nach Amplitude (Betrag) und Phasenlage (Phase). Bezogen auf den Wellenwiderstand der Leitung Z_0 und den Abschlusswiderstand Z gilt:

$$\boxed{r = \frac{U_r}{U_v} = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}} \quad (8.13)$$

Wegen der bekannten Abhängigkeiten ist die Umrechnung des Reflexionsfaktors in die Rückflussdämpfung a , den Welligkeitsfaktor s oder den Anpassungsfaktor m problemlos möglich.

Der Grenzfall liegt vor, wenn eine Leitung am Ende kurzgeschlossen ist oder leerläuft.

In der Praxis sind Leitungen in der Regel mit einer Isolierung versehen und in ihrem Verlauf flexibel. Es lassen sich folgende wesentliche Kriterien unterscheiden:

- Einsatzbereich
(wie Außenbereich, Innenbereich, ...)
- Verlegeart
(wie Freileitungen, Erdkabel, Seekabel, ...)

- Leiterzahl
(wie Einleiterkabel, Zweileiterkabel, Mehrleiterkabel, ...)
- Isolation zwischen Hin- und Rückleiter
(wie Luft, Papier, Kunststoff, Öl, Gas, ...)

Besteht eine Leitung nur aus einem Draht, der auch als Ader bezeichnet wird, dann handelt es sich um ein Einleiterkabel. Beim Einsatz als Freileitung dient dabei häufig die Verbindung über die Erde als Rückleiter.



Einleiterkabel = Eindrahtleitung = Einadrige Leitung

Eine für die Kommunikationstechnik besonders wichtige Leitungsart ist das Zweileiterkabel. Dieses weist zwei Adern auf, fasst damit Hin- und Rückleiter in einer Bauform zusammen und wird deshalb als symmetrische zweidrige Leitung bezeichnet. Für die beiden Adern gilt die Bezeichnung Doppelader (DA) oder Paar [pair].



Zweileiterkabel = Symmetrische Zweidrahtleitung = Symmetrische zweidrige Leitung



Doppelader (DA) = Paar = Zwei Adern

Bei **Zweidrahtleitungen** kommt fast immer Verdrillung zum Einsatz, bei der die Adern zueinander kontinuierlich ihre Lage verändern. Das Maß der Verdrillung ist die auch als Dralllänge bezeichnete Schlaglänge. Dabei handelt es sich um den kleinsten Abstand zwischen zwei Stellen der Leitung, bei denen sich die Lage der Adern wiederholt (**Bild 8.8**).



Bild 8.8 Verdrillung

Aus den Leitungsgleichungen lässt sich dabei ableiten, dass durch Verdrillung eine störende Abstrahlung der mit Hilfe der Leitung übertragenen Signale in großem Umfang verhindert wird, weil eine ständig wechselnde gegenläufige Führung der Adern vorliegt.

Ein anderer Effekt der Verdrillung ist die stärkere Unterdrückung einstrahlender elektromagnetischer Felder, was die Störbeeinflussung des Nutzsignals in der Leitung entsprechend reduziert.



Verdrillung der Kabeladern verringert die Abstrahlung vom Kabel und die Wirkung der Einstrahlung auf das Kabel.

Je größer die zu übertragende Frequenz, desto enger muss die Verdrillung der Zweidrahtleitung sein. Dies erfordert höheren Fertigungsaufwand, weshalb verdrillte Zweidraht-

leitungen mit großen Grenzfrequenzen höhere Kosten verursachen: Es gelten folgende Zusammenhänge:

- Verdrillung: eng → Schlaglänge: klein → Grenzfrequenz: groß
- Verdrillung: weit → Schlaglänge: groß → Grenzfrequenz: klein

Mit Verdrillung sind also beide Aspekte der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), die Störabstrahlung und die Störeinstrahlung, günstig beeinflussbar. Dies kann vergleichbar auch durch Abschirmung (Kurzform: Schirmung) [shielding oder screening] erfolgen. Dabei handelt es sich um elektrisch leitfähige Umhüllungen einzelner isolierter Adern oder Aderpaare. Für Abschirmungen ist stets eine Verbindung mit einem zentralen Massepunkt oder der Erde erforderlich.



Abschirmung (Schirmung) [shielding oder screening] reduziert die Störabstrahlung und die Störeinstrahlung.

Durch Verdrillung und/oder Abschirmung von Zweidrahtleitungen kann Störsituationen wirkungsvoll begegnet werden. Es lassen sich folgende beide Varianten unterscheiden (**Bild 8.9**):

- UTP [unshielded twisted pair]-Leitung: Ungeschirmte verdrillte Zweidrahtleitung
- STP [shielded twisted pair]-Leitung: Geschirmte verdrillte Zweidrahtleitung



Die Auswahl einer Zweidrahtleitung hinsichtlich Verdrillung und Abschirmung hängt von der erforderlichen Bandbreite bzw. der zu übertragenden Bitrate ab. Während bei Leitungen für klassische Telekommunikationsaufgaben (z. B. Telefon) geringere Anforderungen gestellt werden, ist bei Leitungen für die Übertragung größerer Bitraten erheblich mehr Aufwand erforderlich, was sich auch bei den Kosten bemerkbar macht. Aus vorstehenden Gründen wird deshalb häufig zwischen Telekommunikationskabeln (TK-Kabeln) und Datenkabeln unterschieden. Letztere erfüllen besonders hinsichtlich der exakten engen Verdrillung hohe Anforderungen. Durch die Einteilung in folgende Kategorien wird die Auswahl erleichtert, weil dadurch die nutzbare Bandbreite erkennbar ist:

- Kategorie 5 (Cat. 5) → Bandbreite: 100 MHz
- Kategorie 6 (Cat. 6) → Bandbreite: 250 MHz
- Kategorie 6 A (Cat. 6 A) → Bandbreite: 500 MHz
- Kategorie 7 (Cat. 7) → Bandbreite: 600 MHz
- Kategorie 7 A (Cat. 7 A) → Bandbreite: 1000 MHz

Die Unterscheidung zwischen ungeschirmten und geschirmten Versionen ist grundsätzlich auch für unverdrillte Zweidrahtleitungen [untwisted pair (UP)] möglich, weil sich auch bei diesen durch Abschirmung die elektromagnetische Verträglichkeit verbessert.

In der Praxis sind meistens mehrere Zweidrahtleitungen (UTP oder STP) in Mehrleiterkabeln zusammengefasst. Dabei würden sich meistens allerdings ohne besondere Vorkehren die kapazitiven und induktiven Kopplungen zwischen den Leiterpaaren störend bemerkbar machen (**Bild 8.10**). Um diese Effekte zu reduzieren, kommt Verseilung zum Einsatz, was systematische Verdrillung der ungeschirmten und/oder geschirmten Doppeladern (DA) bedeutet. Auf diese Weise können auch viele Doppeladern ohne gegenseitige Funktionsprobleme in einem Kabel untergebracht werden.

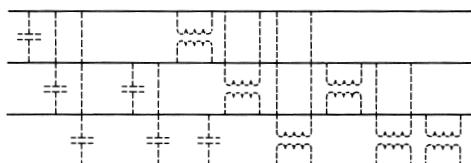


Bild 8.10 Kopplungen bei Mehrleiterkabeln



Verseilung = Systematische Verdrillung von ungeschirmten und/oder geschirmten Doppeladern (DA)

In der Datentechnik kommen häufig Bussysteme zum Einsatz, bei denen wegen Parallelübertragung mehrere Adern benötigt werden. Dafür haben sich als Flachkabel aufgebaute Mehrleiterkabel bestens bewährt. Bei diesen verlaufen alle Leiter parallel zueinander, so dass solche Kabel eine bandförmige Struktur aufweisen. Für die Anschlüsse stehen entsprechende Steckerleisten zur Verfügung (**Bild 8.11**).

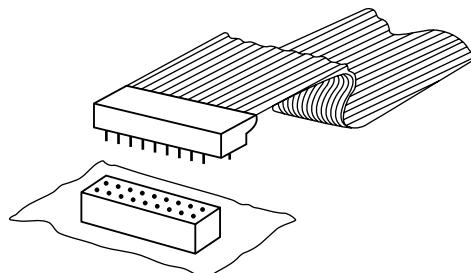


Bild 8.11 Flachkabel und Steckerleiste

Die Übertragung hochfrequenter Signale mit Zweidrahtleitungen erfordert bekanntlich einen von der Frequenz abhängigen Aufwand bei Verdrillung und Abschirmung. Deshalb bietet sich der Übergang von den bisher betrachteten symmetrischen Zweidrahtleitungen zu unsymmetrisch aufgebauten Leitungen an.

Es handelt sich um das Koaxialkabel, häufig auch nur als Koaxkabel bezeichnet. Bei diesem verläuft der als Innenleiter bezeichnete Hinleiter genau in der Mitte einer metallischen Hülle, die als Außenleiter die Funktion des Rückleiters hat. Der Innenleiter mit dem Durchmesser d ist somit ständig vom Außenleiter mit dem Durchmesser D umgeben, wobei

sich beide Leiter stets in einem definierten Abstand zueinander befinden (**Bild 8.12**). Deshalb werden Koaxialkabel auch als selbstabschirmende Kabel bezeichnet.

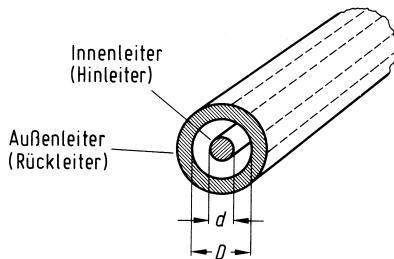


Bild 8.12 Koaxialkabel



Beim **Koaxialkabel** (Koaxkabel) verläuft der Innenleiter (Hinleiter) konzentrisch in einer als Außenleiter (Rückleiter) wirkenden metallischen Hülle.

Das Schirmdämpfungsmaß von Koaxialkabeln hängt vom Aufbau ihrer Außenleiter ab. Dabei kann es sich um Kupferfolie und/oder Geflecht aus Kupferdrähten handeln und zwar in einer oder mehreren Schichten. Mit zunehmender Zahl und Dichte der Schichten beim Außenleiter steigt auch das Schirmdämpfungsmaß des Koaxialkabels an. Es lassen sich auf diese Weise durchaus über 100 dB erreichen. Die genauen Werte sind aus den Datenblättern der Koaxialkabel ersichtlich.

Um die zentrische Lage des Innenleiters zum Außenleiter sicherzustellen, wird der Raum zwischen beiden Leitern mit Kunststoffen vollständig ausgefüllt, wobei diese Materialien jeweils durch ihre Permittivitätszahlen ϵ_r gekennzeichnet sind.



Die Art der Materie zwischen Innenleiter und Außenleiter des Koaxialkabels bestimmt die Permittivitätszahl ϵ_r .

Die Auswertung der Leitungsgleichungen ergibt, dass der Wellenwiderstand des Koaxialkabels vom Durchmesser des Innenleiters und Außenleiters sowie von der Permittivitätszahl ϵ_r abhängt. Es gilt als zugeschnittene Größengleichung:

$$\boxed{Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln \frac{D}{d} \Omega} \quad (8.14)$$

Typische Werte für den Wellenwiderstand von Koaxialkabeln sind 50Ω und 75Ω .

Koaxialkabel sind wegen ihrer frequenzabhängigen Dämpfung bis etwa 3 GHz einsetzbar. Für die Übertragung hochfrequenter Signale bietet sich die Verwendung von Hohlleitern an. Es handelt sich dabei um gestreckte metallische Hohlkörper mit rundem, rechteckigem oder elliptischem Querschnitt, in denen durch eine Sonde elektromagnetische Felder angeregt werden (**Bild 8.13**). Abhängig von den Abmessungen des Hohlleiters und der Leitfähigkeit der Innenwände bilden sich unterschiedliche Feldkombinationen aus. Sie werden

als Moden bezeichnet und ermöglichen bei richtiger Dimensionierung eine spezielle Form der geführten Wellenausbreitung im Höchstfrequenzbereich mit sehr geringen Verlusten (**Bild 8.14**).

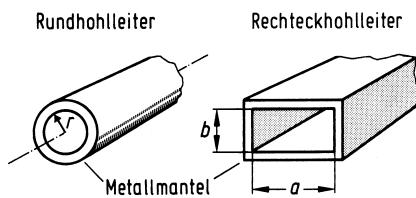


Bild 8.13 Formen von Hohlleitern

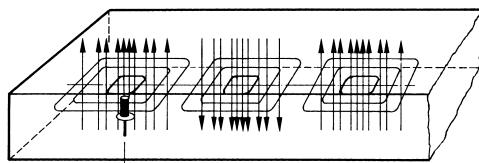


Bild 8.14 Wellenausbreitung in Hohlleitern

Im Gegensatz zu den bisher behandelten Leitungen sind Hohlleiter erst oberhalb einer kritischen Frequenz f_c , also unterhalb der Grenzwellenlänge λ_c funktionsfähig. Sie verhalten sich also wie Hochpässe.



Hohlleiter sind erst oberhalb der kritischen Frequenz f_c funktionsfähig.

8.1.3 Leitungsgebundene Übertragung mit optischen Leitungen

Bei optischen Leitungen werden keine elektrischen Signale, sondern optische Signale geführt übertragen. Es handelt sich um Wellenlängen zwischen 450 nm und 1600 nm, was Frequenzen im THz-Bereich bedeutet. Der Infrarotbereich ab 1260 nm ist in verschiedene Bänder unterteilt (**Tabelle 8.1**).

Tabelle 8.1 Wellenlängenbereiche für optische Übertragung

Band	Bedeutung	Wellenlänge (in nm)
O	original	1260...1355
E	extended	1355...1460
S	short	1460...1525
C	conventional	1525...1565
L	long	1565...1625
U	ultralong	1625...1675

Optische Leitungen werden als Lichtwellenleiter [fibre optic] bezeichnet. Kommt dabei Glas als optisch leitfähiges Medium zum Einsatz, dann handelt es sich um Glasfaserleitungen (GFL). Bei Verwendung optisch leitfähiger Kunststoffe liegen Kunststofffaserleitungen [polymer optical fibre (POF)] vor.



Lichtwellenleiter (LWL) [fibre optic]

- Glasfaserleitung (GFL)
- Kunststofffaserleitung [polymer optical fibre (POF)]

Die grundsätzliche Funktion von Lichtwellenleitern basiert auf der Totalreflexion von Licht an der Grenzfläche zwischen einem optisch dichten und einem optisch dünnen Medium. Jedes LWL-Kabel besteht deshalb aus einem optisch dichten Kern, der mit einem optisch dünnen Mantel umgeben ist, und einer äußeren mechanischen Schutzhülle (**Bild 8.15**).

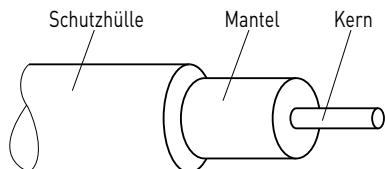


Bild 8.15 Aufbau eines Lichtwellenleiters

Eine wesentliche Kenngröße für jedes optische Medium ist ihre **Brechzahl** n . Sie wird auch als Brechungsindex bezeichnet und gibt an, um welchen Faktor sich das Licht im Medium gegenüber Luft bzw. Vakuum langsamer ausbreitet. Die Brechzahl ist somit ein Maß für die „optische Leitfähigkeit“. Für Luft bzw. Vakuum gilt $n = 1$, während die Brechzahl bei Medien für LWL stets größer als eins ist. Es gilt:

$$\text{Brechzahl } n = \frac{\text{Lichtgeschwindigkeit in Luft/Vakuum}}{\text{Lichtgeschwindigkeit im Medium}}$$



$$n = \frac{c_0}{v_{\text{Medium}}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{v_{\text{Medium}}} \quad (8.15)$$

Bei kleineren Brechzahlen wird von dünnerem optischem Medium gesprochen, bei großer Brechzahl handelt es sich um dichtes optisches Medium.

Geht man von zwei nebeneinander angeordneten optischen Medien mit unterschiedlichen Brechzahlen aus, dann wird an der Grenzfläche unter dem Winkel α einfallendes Licht reflektiert und gebrochen. Die Reflexion des Lichtes erfolgt unter dem Winkel α , während sich für die Brechung des Lichtes der Winkel β ergibt. Dabei gilt die Beziehung $\beta > \alpha$. Die Voraussetzungen für diesen Effekt sind $n_1 > n_2$ und Einspeisung des Lichtes in das dichtere optische Medium (**Bild 8.16**). Wird nun der Einfallswinkel α so verändert, dass sich für den Winkel β genau 90 Grad ergeben, dann verläuft das gebrochene Licht in der Grenz-

fläche und es tritt nur noch das reflektierte Signal auf. Dann gilt die Bezeichnung Totalreflexion. Diese ist allerdings nur möglich, wenn der Winkel α_{TR} eingehalten wird (**Bild 8.17**).

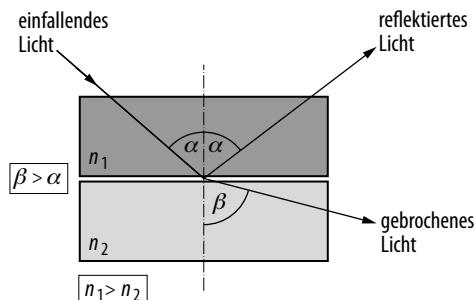


Bild 8.16 Reflexion und Brechung

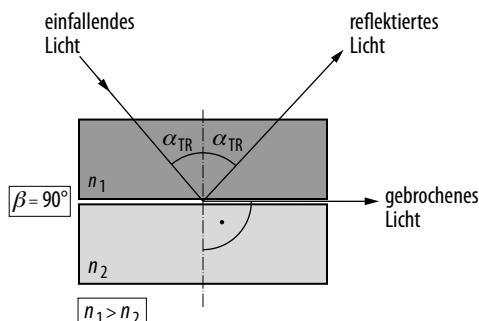


Bild 8.17 Totalreflexion

Eingekoppeltes Licht wird in einem LWL durch Reflexion an der Kern-Mantel-Grenzfläche nur dann transportiert, wenn es in einem bestimmten Winkelbereich erfolgt. Der größte zulässige Winkel (bezogen auf die Mittelachse des LWL) dafür wird als Akzeptanzwinkel θ bezeichnet. Bei dreidimensionaler Betrachtung ist auch der Begriff Akzeptanzkegel üblich (**Bild 8.18**). Für den Sinus des Akzeptanzwinkels gilt die Bezeichnung **numerische Apertur NA**, wobei der Wert unmittelbar von den Brechzahlen des Kernmaterials und des Mantelmaterials abhängt. Es gilt:

!
$$NA = \sin \Theta = \sqrt{n_{\text{Kern}}^2 - n_{\text{Material}}^2} \quad (8.16)$$

Daraus folgt, dass es für jeden Lichtwellenleiter einen maximal zulässigen Akzeptanzwinkel gibt.

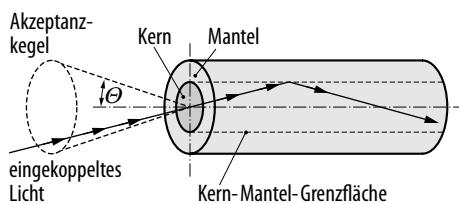


Bild 8.18 Akzeptanzwinkel

Das optische Signal wird üblicherweise über eine kleine Linse dem LWL zugeführt, weil diese eine für den Akzeptanzwinkel erforderliche Fokussierung ermöglicht. Als Strahlungsquelle kommen hauptsächlich Laserdioden als optische Sender zum Einsatz, deren Aussendung vom elektrischen Signal gesteuert wird. Der Empfang der optischen Signale erfolgt im Regelfall durch geeignete Fotodioden (**Bild 8.19**).

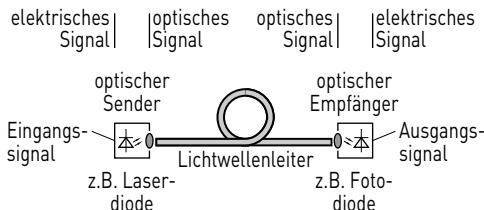


Bild 8.19 Übertragungssystem mit LWL

Bei Übertragungssystemen mit Lichtwellenleitern wird stets **monochromatisches Licht** verwendet, um eine möglichst störungsfreie Übertragung zu erreichen. Dieses Signal weist nur eine Wellenlänge bzw. Frequenz auf und wird deshalb auch als einwelliges Licht bezeichnet.



In Lichtwellenleitern (LWL)-Übertragungssystemen wird monochromatisches Licht (= einwelliges Licht) verwendet.

Die Art der Lichtführung in einem Lichtwellenleiter wird als Mode bezeichnet. Sie ist abhängig von den Brechzahlen, dem Einstrahlungswinkel, den Reflexionen und auch der Wellenlänge des Lichts.



Mode = Ausbreitungsweg eines Lichtstrahls bestimmter Wellenlänge im Lichtwellenleiter (LWL)

In der Praxis treten abhängig vom Material und der Geometrie des LWL stets mehrere Moden auf. Da die Ausbreitungswege im Kern dabei unterschiedliche Längen haben, ergibt sich bei Einstrahlung nur eines Lichtimpulses beim Empfänger ein mehr oder weniger in die Breite verzerrter Impuls. Dieser Effekt wird als **Modendispersion** bezeichnet (**Bild 8.20**).

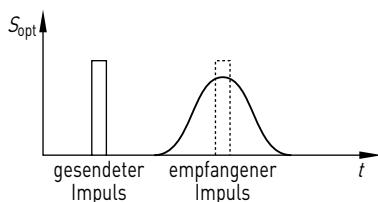


Bild 8.20 Modendispersion

Lichtwellenleiter sind ein hervorragendes, jedoch keineswegs verlustfreies Übertragungsmedium. Eine wesentliche Kenngröße ist deshalb die Dämpfung. Dabei beziehen sich alle Angaben aus messtechnischen Gründen stets auf die optische Leistung P_{opt} .



Beim Lichtwellenleiter beziehen sich die Dämpfungswerte stets auf die optische Leistung.

Die vom Material des Lichtwellenleiters abhängige Dämpfung wird durch Absorption und Streuung des eingekoppelten Lichts hervorgerufen. Sie bewirkt eine von der Leitungslänge abhängige Reduzierung der Leistung und begrenzt damit die Übertragungsdistanz. Angaben der Dämpfung erfolgen in dB/km. Die jeweiligen Werte für einen Lichtwellenleiter (LWL) sind aus den Datenblättern ersichtlich.

Die in einem LWL-Übertragungssystem auftretenden Dämpfungen sind auch von der Güte der Verbindungsstellen abhängig. Es gibt zahlreiche Möglichkeiten für Abweichungen vom Idealfall. Dazu gehören Stirnflächenabstand, Achsenversatz, Unterschiede im Kerndurchmesser, Kippwinkel, Stirnflächenfehler (führt zu mangelhafter optischer Leitfähigkeit) und Unterschiede der numerischen Apertur (**Bild 8.21**). Durch derartige Mängel sind Dämpfungen im Bereich 0,1...0,6 dB möglich.

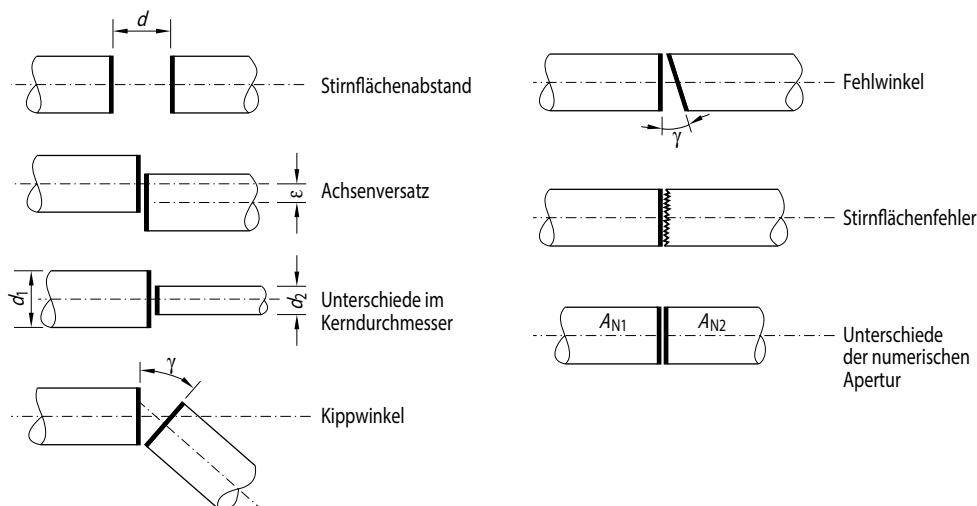


Bild 8.21 Mängel bei LWL-Verbindungsstellen



Mängel bei LWL-Verbindungsstellen können Dämpfungen von 0,1 dB bis 0,6 dB bewirken.

Eine weitere Kenngröße von Lichtwellenleitern ist die bereits erläuterte Dispersion. Die durch sie bewirkte Verbreiterung des gesendeten Pulses auf der Empfangsseite hat verschiedene materialbedingte Ursachen. Je geringer der Abstand zweier aufeinanderfolgender Pulse ist, desto gravierender wirkt sich die Dispersion aus. Da viele Pulse pro Zeiteinheit eine große Bandbreite bedeuten und die Dispersion mit der Leitungslänge zunimmt, können Bandbreite und Leitungslänge nicht gleichzeitig beliebig vergrößert werden. Als kennzeichnendes Merkmal gilt deshalb ein Bandbreiten-Längen-Produkt (auch als Bandbreiten-

Entfernungs-Produkt bezeichnet), üblicherweise in $\text{MHz} \cdot \text{km}$ oder auch in $\text{Mbit/s} \cdot \text{km}$ angegeben. So deutet die Angabe 100 $\text{MHz} \cdot \text{km}$, dass 100 MHz Bandbreite über 1 km ohne unzulässige Beeinflussung übertragen werden können. Bei 50 MHz Bandbreite wären es 2 km und bei 10 MHz Bandbreite sogar 10 km.



Bandbreiten-Längen-Produkt

- Große Bandbreite/Bitrate führt zu kleiner LWL-Länge.
- Kleine Bandbreite/Bitrate führt zu großer LWL-Länge.

Bei einer vorgegebenen zu übertragenden Bandbreite bzw. Bitrate bestimmt sich somit die maximale LWL-Länge, die ohne Regenerator einsetzbar ist, aus dem Bandbreiten-Längen-Produkt.



Beispiel:

Wird bei einem LWL-Übertragungssystem mit vorgegebenem Bandbreiten-Längen-Produkt die zu übertragende Bitrate von 2 Mbit/s auf 6 Mbit/s geändert, dann ist wegen der Verdreifachung der Bitrate nur noch ein Drittel der ursprünglichen LWL-Länge ohne Regenerator überbrückbar.

Als Kenngröße eines LWL spielt auch die bereits erläuterte numerische Apertur eine Rolle, weil ihr Wert ein Maß für die Einkoppelverluste ist. Dabei lassen sich folgende Arten unterscheiden:

- Einkoppelverluste von der Sendediode zum Kern des LWL
- Einkoppelverluste vom Kern des LWL 1 zum Kern des LWL 2
- Einkoppelverluste vom Kern des LWL zur Empfangsdiode

Die numerische Apertur (NA) begrenzt die in den LWL einkoppelbare optische Leistung. Je größer der NA -Wert, desto mehr Leistung kann verfügbar gemacht werden.

Bei Lichtwellenleitern sind unterschiedliche Materialien und Durchmesser für Kern und Mantel möglich. Deshalb sind über den Querschnitt auch verschiedene Verläufe der Brechzahl realisierbar. Dies bewirkt eine jeweils differenzierte Lichtführung. In der Praxis lassen sich folgende LWL-Adern unterscheiden:

- Multimode-Stufenprofil-LWL
- Multimode-Gradientenprofil-LWL
- Monomode-Stufenprofil-LWL

Für Stufen- bzw. Gradientenprofil wird in der Fachliteratur auch die Bezeichnung Stufenindex bzw. Gradientenindex verwendet.

Multimode-Lichtwellenleiter werden auch als Mehrmoden-Lichtwellenleiter bezeichnet. Bei ihnen sind gleichzeitig mehrere Moden möglich. Der auch als Einmoden-Lichtwellenleiter bezeichnete Monomode-Lichtwellenleiter weist dagegen nur einen Mode auf.



Multimode-LWL (Mehrmoden-LWL) weist mehrere Moden auf.

Monomode-LWL (Einmoden-LWL) weist nur einen Mode auf.

Die Unterscheidung der Profile bezieht sich auf den Brechzahlverlauf in Kern und Mantel. LWL mit Stufenprofil weisen beim Kern einen konstanten Verlauf und am Übergang zum Mantel einen Sprung (also eine Stufe) auf. Beim Gradientenprofil nimmt dagegen die Brechzahl von der Mitte des Kerns bis zum Kern-Mantel-Übergang kontinuierlich ab (**Tabelle 8.2**).

Tabelle 8.2 Profile des Brechzahlverlaufs

Profilart	Brechzahlverlauf im Kern	Übergang zum Mantel
Stufenprofil	konstant	sprunghaft
Gradientenprofil	kontinuierlich zum Mantel abnehmend	nahtlos

Beim Multimode-Stufenprofil-LWL ist der Kerndurchmesser groß gegenüber der Lichtwellenlänge. Wegen des Brechzahlverlaufs weist diese LWL-Variante eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit im Kern auf. Bedingt durch damit verbundene unterschiedliche Wege ergeben sich allerdings verschiedene Laufzeiten für das optische Signal und damit eine starke Dispersion, die auch als Modendispersion bezeichnet wird.



Bei der Multimode-Stufenprofil-LWL haben die Moden unterschiedliche Laufzeiten, was eine starke Modendispersion bewirkt.

Die zum Rande des Kerns abnehmende Brechzahl beim Multimode-Gradientenprofil-LWL bewirkt dagegen gegenüber über den Kernquerschnitt gesehen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten. Dadurch wird das optische Signal stets zur Mittelachse gebeugt und es ergeben sich für die Moden fast gleiche Laufzeiten. Deshalb ist der empfangene Impuls weniger breit als beim Multimode-Stufenprofil-LWL, die Dispersion also erheblich geringer.



Bei der Multimode-Gradientenprofil-LWL haben die Moden fast gleiche Laufzeiten, was eine geringe Modendispersion bewirkt.

Wird der Kern der LWL so gewählt, dass er kaum dicker als die Lichtwellenlänge ist, dann kann sich nur ein Mode ausbreiten und es liegt ein Monomode-Stufenprofil-LWL vor. Dies führt zu großen Werten für das Bandbreiten-Längen-Produkt und kleinstmöglicher Signalbeeinflussung.



Beim Monomode-Stufenprofil-LWL ist nur ein Mode möglich.

Die aufgezeigten Arten der Lichtwellenleiter erfordern unterschiedlichen Aufwand bei der Fertigung. Sie weisen aber auch unterschiedliche Spezifikationen auf (**Bild 8.22**).

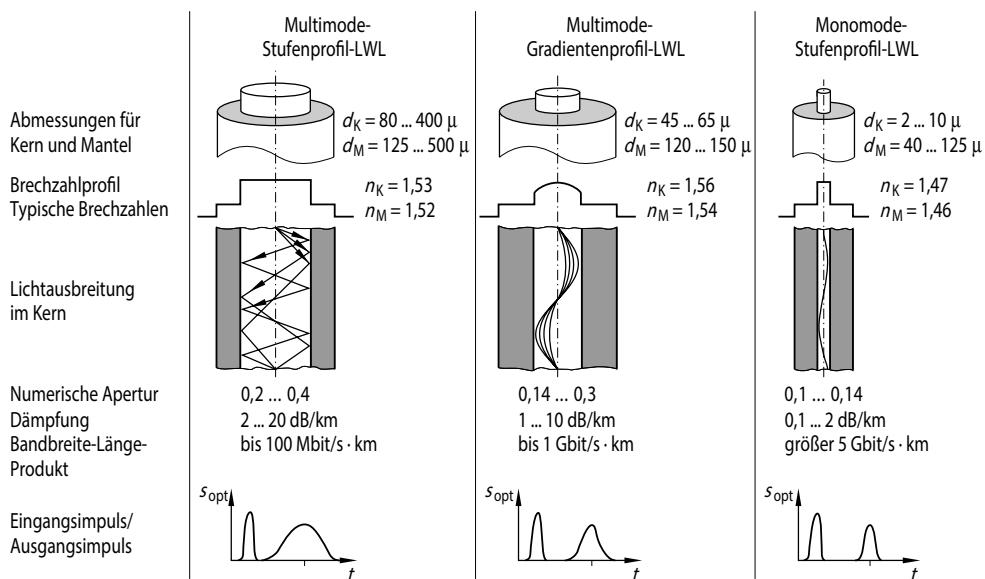


Bild 8.22 Typische Werte für LWL mit GF

Der Aufbau von Kunststofffaserleitungen (POF) ist vergleichbar mit denen von Glasfaserleitungen (GFL). Im Gegensatz zur GFL besteht der lichtführende Kern aus dem transparenten Kunststoff Polymethylacrylat, der besser unter der Bezeichnung Acrylglass bekannt ist. Beim Mantel handelt es sich um fluoriertes Polymer, das gegenüber dem Kern eine kleinere Brechzahl aufweist. Für die Standard-POF gelten folgende Werte:

- Kern
Durchmesser: $0,98 \text{ mm}/n = 1,492$
- Mantel
Dicke: $0,01 \text{ mm} (= 10 \mu\text{m})/n = 1,41$

Die Faser weist somit gesamt einen Durchmesser von 1 mm auf. Sie wird von einem Schutzmantel von 1,5 mm oder 2,2 mm Durchmesser umgeben.

Wegen des Kunststoffmaterials und des größeren Durchmessers lassen sich Polymerfasern einfacher verarbeiten als Glasfasern, außerdem sind die Anforderungen an die Präzision bei der POF-Verbindungstechnik wesentlich geringer. Der materialbedingten größeren Robustheit von Kunststofffaserleitungen stehen allerdings große Dämpfungswerte gegenüber. Sie liegen im Bereich 10...100 dB/km, weshalb Übertragungssysteme mit POF nur für entsprechend geringe Längen geeignet sind.

Wie bei elektrischen Leitungen gibt es auch bei optischen Leitungen Kabel mit einem LWL oder einer größeren Zahl von Lichtwellenleitern. Grundsätzlich haben Lichtwellenleiter neben der größeren Übertragungskapazität auch noch den Vorteil des erheblich geringeren Gewichts gegenüber allen Varianten der Kupferleitungen. Außerdem gibt es bei LWL funktionsbedingt weder Abstrahlung noch Einstrahlung störender Signale. Abschirmungen sind deshalb bei Lichtwellenleitern nicht erforderlich und es brauchen keine Mindestabstände zu Energiekabeln eingehalten werden.



Bei Lichtwellenleitern gibt es weder Abstrahlung noch Einstrahlung elektromagnetischer Felder.

Ein weiterer Vorteil bei LWL-Einsatz als Übertragungsweg ist die galvanische Trennung zwischen der Sende- und Empfangsseite. Dadurch lassen sich bei verschiedenen Anwendungen Störprobleme vermeiden.



Lichtwellenleiter benötigen keine Abschirmung und stellen die galvanische Trennung zwischen Sende- und Empfangsseite sicher.

8.1.4 Funkübertragung

Jede Funkübertragung basiert auf der Verbreitung elektromagnetischer Wellen durch den freien Raum, im Regelfall handelt es sich um das Medium Luft. Zu den Anfangszeiten der Funktechnik war für das Ausbreitungsmedium die Bezeichnung Äther üblich, da der Funktionsmechanismus noch nicht vollständig geklärt war.

Aus physikalischer Sicht ist der Begriff der Welle unmittelbar mit dem Begriff Schwingung verknüpft. Es gelten folgende grundsätzliche Definitionen:

- **Schwingung** = Zeitliche Änderung physikalischer Größen
- **Welle** = Zeitliche und räumliche Änderung physikalischer Größen

Der Begriff Schwingung lässt sich überschaubar vom mechanischen Pendel ableiten. Durch äußere Krafteinwirkung wird das Pendel aus seiner Ruhelage gebracht und wechselt danach ständig zwischen zwei Positionen. Dies bedeutet, dass Lageenergie (potenzielle Energie) und Bewegungsenergie (kinetische Energie) in zeitlicher Abfolge wechselweise auftreten (**Bild 8.23**).

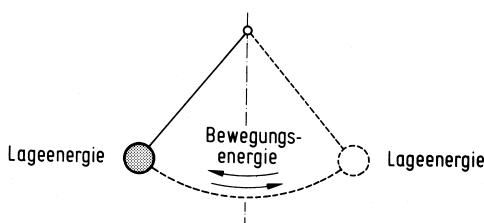


Bild 8.23 Pendel

Dieser regelmäßige Übergang zwischen zwei Energieformen ist auch bei elektrischen Systemen möglich. Das einfachste elektrische Schwingungssystem ist der Parallel-Resonanzkreis, also die Parallelschaltung einer Kapazität C und einer Induktivität L . Für die Erklärung der Schwingungsfunktion ist zu berücksichtigen, dass das elektrische Feld mit der Spannung verknüpft ist (**Bild 8.24**). Beim magnetischen Feld handelt es sich dagegen um den Strom (**Bild 8.25**).

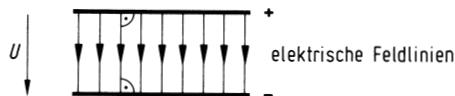


Bild 8.24 Elektrisches Feld und Spannung



Bild 8.25 Magnetisches Feld und Strom

Ausgehend von einem geladenen Kondensator entlädt sich dieser in die parallel geschaltete Spule. Dabei wird durch den Entladestrom das elektrische Feld im Kondensator abgebaut, dafür aber das magnetische Feld in der Spule aufgebaut. Bedingt durch die Selbstinduktion baut sich nun an der Spule eine Gegenspannung auf, welche die erneute Aufladung des Kondensators bewirkt und damit die Ausgangssituation wiederherstellt. Bei idealen, also verlustfreien Bauelementen ergeben sich dann sinusförmige Verläufe von Spannung und Strom (**Bild 8.26**). Da diese auf der Wechselwirkung zwischen elektrischem und magnetischem Feld basieren, werden sie als elektromagnetische Schwingungen bezeichnet.

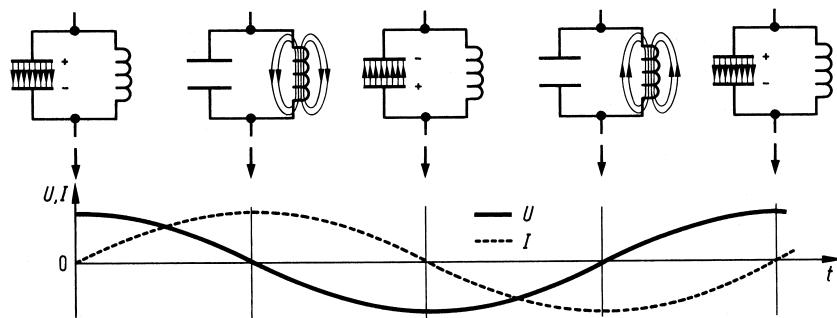


Bild 8.26 Schwingungen in elektrischen Systemen



Schwingungen in elektrischen Systemen werden als elektromagnetische Schwingungen bezeichnet.

Bereitet sich eine Schwingung in einem beliebigen Medium (z.B. Luft) aus, dann tritt zusätzlich noch eine räumliche Änderung der physikalischen Größen auf. Das Ergebnis wird als Welle bezeichnet.

Die Fortpflanzung einer Welle verläuft immer mit einer bestimmten Geschwindigkeit v . Der Weg für eine komplette Schwingung heißt Wellenlänge λ (sprich: lambda). Daraus folgt:

$$\lambda = v \cdot T \quad (8.17)$$

Da sich Frequenz f und Periodendauer T bekanntlich reziprok zueinander verhalten, gilt als gleichwertige Aussage:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (8.18)$$

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit für elektromagnetische Wellen in Luft und Vakuum ist die Lichtgeschwindigkeit c_0 .



$$c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (8.19)$$

Die elektromagnetische Welle weist also eine Geschwindigkeit von etwa 300 000 km pro Sekunde auf.

Es gelten somit folgende Zusammenhänge für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen:



$$\lambda = c_0 \cdot T = \frac{c_0}{f} \quad (8.20)$$



Beispiel:

Arbeitet ein UKW-Sender auf der Frequenz $f = 100 \text{ MHz}$, dann ergeben sich für die Wellenlänge λ und die Periodendauer T folgende Werte:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{100 \text{ MHz}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{100 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 3 \text{ m}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{100 \text{ MHz}} = \frac{1}{100 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 10 \text{ ns}$$

Die vom Sender abgestrahlten elektromagnetischen Wellen benötigen also für eine komplette Schwingung 10 ns und legen in dieser Zeit 3 m zurück.

Weil die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen in der Luft für die meisten Anwendungen eine wesentliche Rolle spielt, soll nun abgeklärt werden, wie dabei die Wechselwirkung zwischen dem elektrischen und magnetischen Feld zustande kommt.

Ausgangspunkt der Betrachtungen soll ein realer Parallel-Resonanzkreis sein. Die Felder sind bei diesem in dem Kondensator und der Spule konzentriert. Schon in geringer Entfer-

nung von diesen Bauelementen sind keine Felder mehr feststellbar. Es gilt deshalb die Bezeichnung geschlossener Schwingkreis (**Bild 8.27**).

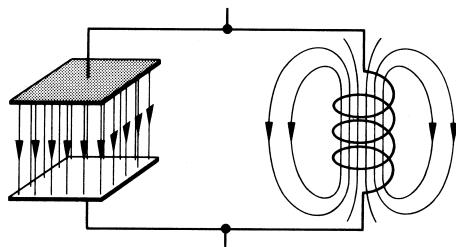


Bild 8.27 Geschlossener Schwingkreis

Für die weiteren Betrachtungen soll die Spule lediglich aus einem geraden Leiterstück bestehen. Denkt man nun die Beläge des Kondensators immer weiter voneinander entfernt, dann ist das Ergebnis eine gestreckte Form. Bei dieser findet der Wechsel zwischen den beiden Feldern natürlich auch noch statt. Wegen der durch das „Aufklappen“ bewirkten Struktur gilt die Bezeichnung „offener Schwingkreis“ (**Bild 8.28**). Seine Besonderheit besteht darin, dass sich abwechselnd Energieanteile aus dem elektrischen und magnetischen Feld lösen und damit Abstrahlung in den umgebenden Raum erfolgt.

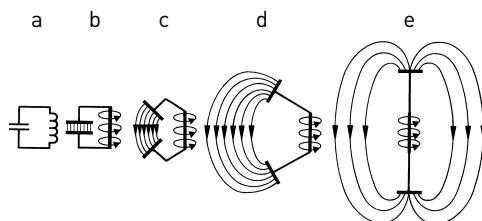


Bild 8.28 Offener Schwingkreis



Mit Hilfe des offenen Schwingkreises können elektromagnetische Wellen in den Raum abgestrahlt werden.

Die dem offenen Schwingkreis durch Abstrahlung elektromagnetischer Wellen entzogene Energie muss wieder ersetzt werden, wenn die Wellen in ihrer Amplitude konstant bleiben sollen. Dies ist durch einen Signalgenerator möglich.

Der offene Schwingkreis stellt die Grundform der Antenne dar, die den Übergang elektromagnetischer Wellen zwischen elektrisch leitfähigem Material und dem umgebenden Luftraum ermöglicht. Das vollständige System zur Abstrahlung elektromagnetischer Wellen kann als Generator verstanden werden, an den zwei gleich lange, in entgegengesetzter Richtung zeigende Leiterstücke angeschlossen sind. Diese bilden den offenen Schwingkreis, wobei sie einerseits als Spule arbeiten, andererseits aber auch als Beläge des Kondensators wirken. Der Generator ersetzt dabei die abgestrahlte Energie (**Bild 8.29**).

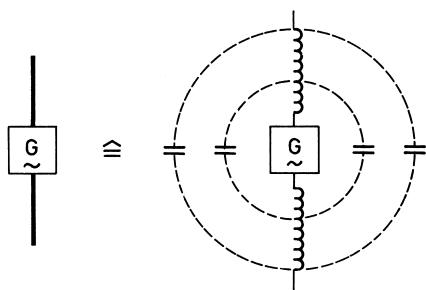


Bild 8.29 Anordnung zur Abstrahlung elektromagnetischer Energie

Wegen der konstruktiven Lösung mit den beiden Leiterstücken wird beim offenen Schwingkreis auch von einem **Dipol** gesprochen.



Ein offener Schwingkreis wirkt als Dipol.

Die Abstrahlung der Feldenergien lässt sich durch den Verlauf der elektrischen und magnetischen Feldlinien verdeutlichen. Im **Bild 8.30** ist dies für eine vollständige Schwingung erfolgt. Im Mittelpunkt befindet sich jeweils der mit dem Dipol abgeschlossene Generator. Funktionsbedingt ergeben sich die elektrischen Feldlinien in Zeichnungsebene, während die magnetischen Feldlinien in Querrichtung, also um 90 Grad versetzt, dazu verlaufen. Der Vorgang ist räumlich zu sehen, weil die Abstrahlung in allen drei Dimensionen erfolgt. Die elektrischen Feldlinien bilden eine Verschachtelung mehrerer Kugelschalen, während die magnetischen Feldlinien kreisförmig um die Anordnung verlaufen.

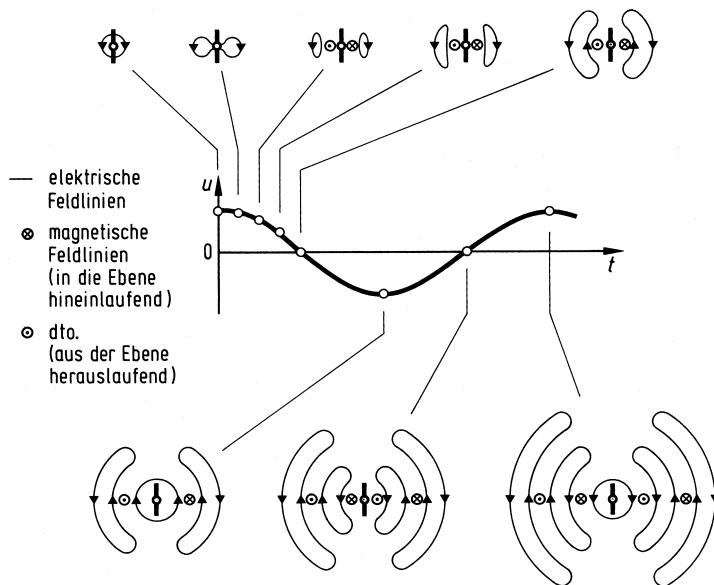


Bild 8.30 Wellenabstrahlung

Die vom Dipol abgelösten Feldlinien haben stets einen geschlossenen Verlauf. Sie breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit c_0 in den umgebenden Raum aus. Beide Felder sind dabei voneinander abhängig, da die eine Energieform erst durch die andere hervorgerufen wird. Es liegt somit eine Verkettung zwischen elektrischem und magnetischem Feld vor. Daraus erklärt sich die Bezeichnung elektromagnetisches Feld.



Merkmale elektromagnetischer Felder:

- Geschlossene elektrische und magnetische Feldlinien
- Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit c_0
- Verkettung zwischen dem elektrischen und magnetischen Feld

Das von einem Dipol bewirkte elektromagnetische Feld kann durch die Angabe der elektrischen und magnetischen Feldstärke beschrieben werden. Es ist allerdings zu beachten, dass beide Größen Vektoren sind, also im Raum ausgerichtete Größen, die auch noch von der Zeit abhängen.

Die mathematische Formulierung der orts- und zeitabhängigen Feldstärkeverteilung im Raum führt zu Differentialgleichungen. Sie werden nach ihrem Entwickler, dem englischen Physiker James Clerk Maxwell (1831–1879), als Maxwellsche Gleichungen bezeichnet. In den meisten Fällen ist es ausreichend, nur die Ergebnisse dieser Gleichungen darzustellen und zu interpretieren.



Die Maxwellschen Gleichungen beschreiben die orts- und zeitabhängige Feldstärkeverteilung im Raum.

Wegen der kugelförmigen Ausbreitung der Wellen ist es vorteilhaft für die Beschreibung der Feldstärke im Raum, keine rechtwinkligen Koordinaten, sondern Kugelkoordinaten zu verwenden. Dabei befindet sich die Strahlungsquelle im Mittelpunkt einer Kugel, deren Radius r der Entfernung zum betrachteten Punkt entspricht, dessen Lage durch zwei Winkel charakterisiert ist. Der Winkel φ (phi) zählt dabei in der horizontalen Ebene, beginnend von einer festzulegenden Bezugsrichtung. Durch den Winkel ϑ (theta) wird in gleicher Weise die Lage in der vertikalen Ebene beschrieben. Jeder beliebige Punkt im Raum kann durch die drei senkrecht zueinander angeordneten Komponenten r , φ und ϑ eindeutig beschrieben werden (**Bild 8.31**).

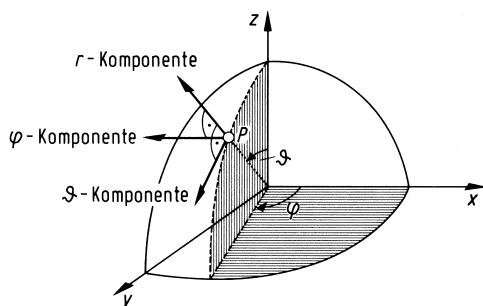


Bild 8.31 Kugelkoordinaten

Als grundsätzliche Erkenntnisse aus den Maxwellschen Gleichungen sind die Abhängigkeiten der Feldstärke von der Entfernung r zur Quelle von Wichtigkeit. Es ergibt sich, dass bei der elektrischen Feldstärke in Richtung des Winkels φ überhaupt keine Anteile auftreten, was bei der magnetischen Feldstärke für die Komponenten in Richtung r und ϑ gilt.

Die Maxwellschen Gleichungen zeigen folgende Ergebnisse:

Elektrische Feldstärke

$$E_r \approx \frac{1}{r} \cdot \left[\frac{\lambda}{r} + \left(\frac{\lambda}{r} \right)^2 \right] \quad (8.21)$$

$$E_\varphi = 0 \quad (8.22)$$

$$E_\vartheta \sim \frac{1}{r} \cdot \left[1 + \frac{\lambda}{r} + \left(\frac{\lambda}{r} \right)^2 \right] \quad (8.23)$$

Magnetische Feldstärke

$$H_r = 0 \quad (8.24)$$

$$H_\varphi \sim \frac{1}{r} \cdot \left[1 + \frac{\lambda}{r} \right] \quad (8.25)$$

$$H_\vartheta = 0 \quad (8.26)$$

Wird das Feld um die Strahlungsquelle in einer Entfernung r betrachtet, die gegenüber der Wellenlänge λ klein ist, dann sind die in vorstehenden Abhängigkeiten auftretenden Glieder mit λ/r vernachlässigbar, da die Glieder mit $(\lambda/r)^2$ überwiegend zur Feldstärke beitragen.

Bei Entfernungen, die groß gegenüber der Wellenlänge sind, interessieren dagegen nur Glieder mit λ/r , weil sonst solche mit Potenzen von r vernachlässigbar klein werden.

 $r < \lambda \Rightarrow$ Glieder mit $\frac{\lambda}{r}$ sind vernachlässigbar.

$r > \lambda \Rightarrow$ Glieder mit $\left(\frac{\lambda}{r}\right)^2$ sind vernachlässigbar.

Die beiden vorstehenden Erkenntnisse führen uns zu den Begriffen Nahfeld und Fernfeld. Als Übergang zwischen den Feldern wird für die Praxis der Bereich $4 \cdot \lambda \dots 10 \cdot \lambda$ verwendet. Es gilt somit:

- Nahfeld: $r < 4 \cdot \lambda \dots 10 \cdot \lambda$
- Fernfeld: $r > 4 \cdot \lambda \dots 10 \cdot \lambda$

Im Übergangsbereich $4 \cdot \lambda \dots 10 \cdot \lambda$ muss für den Einzelfall entschieden werden, ob Bedingungen des Nahfeldes oder Fernfeldes gelten sollen. Bezogen auf vorstehende Festlegungen sind damit folgende Aussagen für die Feldstärken möglich:

Feldstärke im Nahfeld

$E_r \sim \frac{1}{r^3}$	$E_\varphi = 0$	$E_\vartheta \sim \frac{1}{r^3}$	(8.27)
--------------------------	-----------------	----------------------------------	--------

Feldstärke im Fernfeld

$E_r = 0$	$E_\varphi = 0$	$E_\vartheta \sim \frac{1}{r}$	(8.28)
-----------	-----------------	--------------------------------	--------

$H_r = 0$	$H_\varphi \sim \frac{1}{r}$	$H_\vartheta = 0$	(8.29)
-----------	------------------------------	-------------------	--------

Im Nahfeld nehmen also die beiden Komponenten der elektrischen Feldstärke mit $1/r^3$ ab, wobei die magnetische Feldstärke vernachlässigbar ist. Beim Fernfeld tritt dagegen jeweils eine Komponente der elektrischen und magnetischen Feldstärke auf, wobei diese mit $1/r$ abnimmt. Wegen der verwendeten Kugelkoordinaten lässt sich feststellen, dass beide Komponenten nicht nur senkrecht zueinander stehen, sondern auch senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Außerdem sind sie gleichphasig (**Bild 8.32**).

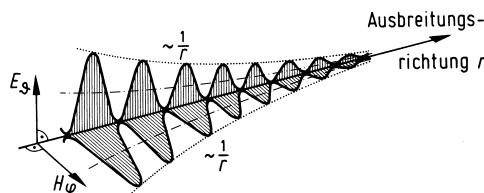


Bild 8.32 Ausbreitung im Fernfeld

Im Fernfeld besteht bei ungestörter Ausbreitung in Luft oder Vakuum zwischen den Beträgen beider Feldstärkevektoren folgende Verknüpfung:

	$E = Z_0 \cdot H$	(8.30)
--	-------------------	--------

Den Ausdruck Z_0 wird als **Feldwellenwiderstand** (exakt: Freiraum-Feldwellenwiderstand) bezeichnet. Sein Wert errechnet sich aus der magnetischen Feldkonstante μ_0 und der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 . Er ist daher konstant und unabhängig von der Frequenz. Es gilt:



$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 376,68 \Omega \quad (8.31)$$

mit

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}$$

$$\varepsilon_0 = 8,859 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}$$

■

Die bisherigen Ausführungen zeigen, dass im Fernfeld übersichtliche Verhältnisse vorliegen. Beim Nahfeld sind diese nicht so günstig, da hier noch Rückwirkungen zum Strahler auftreten. Das wird auch durch die beiden Komponenten der elektrischen Feldstärke verdeutlicht.

Die weiteren Betrachtungen werden sich aus vorstehenden Gründen nur auf das Fernfeld beziehen. Dabei spielt es keine Rolle, auf welche Weise das elektromagnetische Feld erzeugt worden ist.



Die weiteren Betrachtungen beziehen sich immer nur auf das Fernfeld.

■

Die von einer Strahlungsquelle in den Raum abgegebene Wirkleistung wird als Strahlungsleistung P_s [radiated power] bezeichnet. Es soll die Abstrahlung der Energie in alle Richtungen mit gleicher Stärke, also kugelförmig, erfolgen. Ein Strahler mit solcher Strahlungscharakteristik heißt Kugelstrahler oder isotroper Strahler. Die Strahlungsleistung P_s verteilt sich dabei über die Kugeloberfläche $4 \cdot \pi \cdot r^2$. Es kann deshalb die Leistung pro Flächeneinheit angegeben werden. Dafür gilt der Begriff Strahlungsdichte S oder Leistungsflussdichte LFD [power flux density (PFD)]. Der jeweilige Wert ergibt sich aus dem Verhältnis der Strahlungsleistung zur Kugeloberfläche, wobei deren Radius dem Betrachtungsabstand zur Quelle entspricht.

$$S = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad (8.32)$$



Kugelstrahler = Isotroper Strahler = Strahler mit kugelförmiger Strahlungscharakteristik

■



Strahlungsdichte S = Leistungsflussdichte (LFD) [power flux density (PFD)] = Strahlungsleistung pro Flächeneinheit

■



Strahlungsleistung P_s [radiated power] = Von einer Strahlungsquelle in den Raum abgegebene Wirkleistung

■

**Beispiel:**

Weist ein Kugelstrahler eine Strahlungsleistung von 10 kW auf, dann ergibt sich für einen Empfänger in 5 km Entfernung folgende Strahlungsdichte:

$$S = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot r^2} = \frac{10 \cdot 10^3 \text{ W}}{4 \cdot \pi \cdot (5 \cdot 10^3 \text{ m})^2} = 31,8 \frac{\mu\text{W}}{\text{m}^2}$$

Am Empfangsort stehen also 31,8 μW pro m^2 zur Verfügung. Bezogen auf 1 m^2 Empfangsfläche darf der Empfänger deshalb nur 31,8 μW benötigen (**Bild 8.33**). Bei größerem Bedarf ist kein Empfang möglich. Abhilfe könnte dann allerdings eine größere Empfangsfläche schaffen, weil damit die verfügbare Leistung entsprechend größer würde.

■

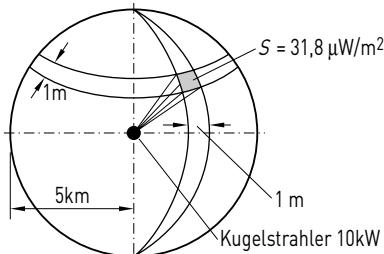


Bild 8.33 Strahlungsdichte (Beispiel)

Da aber auch die Komponenten der elektrischen und magnetischen Feldstärke die Intensität des Feldes in Ausbreitungsrichtung beschreiben, gilt folgende Beziehung:

$$S = E \cdot H \quad (8.33)$$

Wegen der Verknüpfung der elektrischen und magnetischen Feldstärke über den Feldwellenwiderstand Z_0 kann die Strahlungsdichte auch aus nur einer Feldstärke berechnet werden. Es gilt bezogen auf die elektrische Feldstärke:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} \quad (8.34)$$

**Beispiel:**

Im vorstehenden Beispiel wurde für einen Kugelstrahler mit $P_s = 10 \text{ kW}$ in 5 km Entfernung als Strahlungsdichte $S = 31,8 \mu\text{W}/\text{m}^2$ ermittelt. Daraus folgt für die elektrische Feldstärke:

$$S = \frac{E^2}{Z_0} \Rightarrow E = \sqrt{S \cdot Z_0} = \sqrt{31,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 376,68 \Omega} = 109,5 \frac{\text{mV}}{\text{m}}$$

Am Empfangsort ist also eine elektrische Feldstärke von 109,5 mV/m vorhanden. Für diesen Wert muss der Empfänger ausgelegt sein.

■

In vielen Fällen ist es zweckmäßig, die Feldstärke am Empfangsort unmittelbar aus der Strahlungsleistung berechnen zu können. Durch Verwendung der beiden Gleichungen für die Strahlungsdichte und entsprechende Umformungen ergibt sich:

$$\left. \begin{array}{l} S = \frac{P_s}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \\ S = \frac{E^2}{Z_0} \end{array} \right\} E = \frac{1}{2 \cdot r} \cdot \sqrt{\frac{P_s \cdot Z_0}{\pi}} \quad (8.35)$$

Werden die Werte für Z_0 und π eingesetzt, dann ergibt sich folgende zugeschnittene Größengleichung:

$$E = 5,475 \cdot \frac{\sqrt{P_s}}{r} \quad (8.36)$$

mit E in V/m, r in m und P_s in W

Bei den bisherigen Ausführungen wurden mit Ausnahme der Abgrenzung zwischen Nahfeld und Fernfeld keine Unterscheidungen bezüglich der Frequenzen gemacht, da die Aussagen für alle Frequenzen Gültigkeit haben.

Mit dem Konzept des offenen Schwingkreises lässt sich bekanntlich der verlustarme Übergang elektromagnetischer Wellen von einem Leiter in den umgebenden Raum bewirken. In der Praxis kommen dafür als Antennen bezeichnete technische Funktionseinheiten zum Einsatz. Deren Abstrahlung elektromagnetischer Wellen ruft ein konstantes elektromagnetisches Feld hervor, wenn der Antenne von einem Sender ständig Energie zugeführt wird. Bedingt durch die Wirkungsweise als offener Schwingkreis tritt die Abstrahlung von einer Antenne nur bei der Resonanzfrequenz und einem mehr oder weniger schmalen umliegenden Frequenzband auf.

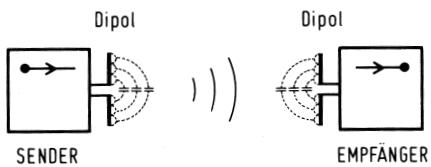
Die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen ist auch umkehrbar. Wird nämlich die Antenne (= offener Schwingkreis) in ein elektromagnetisches Feld gebracht, dann bewirken Induktion und Influenz eine Wechselspannung mit Resonanzfrequenz am Antennenanschluss. Anteile der Energie des elektromagnetischen Feldes werden somit ausgekoppelt, was durch den Begriff Empfang [reception] charakterisiert ist.



Elektromagnetische Energie kann abgestrahlt (= gesendet), aber auch aus einem elektromagnetischen Feld ausgekoppelt (= empfangen) werden.

Die einfachste Realisierung des offenen Schwingkreises stellt der Dipol dar. Er besteht aus zwei gleich langen und in entgegengesetzte Richtung zeigenden Leiterstäben und wird entweder an den Ausgang eines Senders oder an den Eingang eines Empfängers angeschlossen (**Bild 8.34**). Die Länge der Stäbe ist unmittelbar von der Wellenlänge und damit auch von der Frequenz abhängig.

Auch wenn es in der Praxis verschiedene Bauformen für Antennen gibt, lässt sich die Funktionsweise jeder Antenne auf den Dipol zurückführen.

**Bild 8.34** Dipol als offener Schwingkreis

Die Funktionsweise jeder Antenne lässt sich auf den Dipol zurückführen.

Antennen, die zur Abstrahlung elektromagnetischer Energie eingesetzt werden, bezeichnen wir als Sendeantennen. Ist dagegen die Aufnahme elektromagnetischer Energie vorgesehen, dann handelt es sich um Empfangsantennen.



Sendeantenne [transmitting antenna] = Antenne strahlt elektromagnetische Energie ab

Empfangsantenne [receiving antenna] = Antenne nimmt elektromagnetische Energie auf

Für Antennen gilt das **Reziprozitätsgesetz**. Dies bedeutet, dass jede Antenne als Sende- oder Empfangsantenne einsetzbar ist (**Bild 8.35**). Bei den Kenngrößen sind deshalb keine Unterscheidungen zwischen diesen Einsatzformen erforderlich.



Sendeantenne

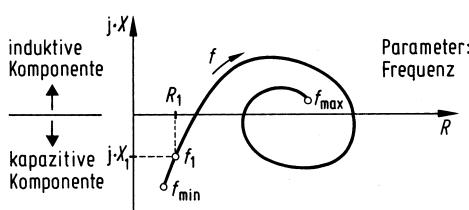


Empfangsantenne

Bild 8.35 Schaltzeichen für Antennen

Aus den bisherigen Ausführungen ist ersichtlich, dass jede Antenne einen frequenzabhängigen Widerstand darstellt. Werden Istwerte für verschiedene Frequenzen gemessen und in die komplexe Widerstandsebene eingetragen, dann ergibt die Verbindung der aus Wirk- und Blindanteil bestehenden Impedanzwerte die **Ortskurve** der Antenne, also die frequenzabhängige Darstellung der an den Anschlussklemmen der Antenne wirkenden Impedanz.

Aus der Ortskurve ist ersichtlich, welche Antennen-Eingangsimpedanz Z_{Ant} (auch als Fußpunktwiderstand bezeichnet) bei einer vorgegebenen Betriebsfrequenz vorliegt (**Bild 8.36**).

**Bild 8.36** Ortskurve einer Antenne



Die Ortskurve stellt die Antennen-Eingangsimpedanz Z_{Ant} (Fußpunktwiderstand) in Abhängigkeit von der Frequenz dar.

Beim Dipol hängt die Länge der beiden Leiterstücke unmittelbar von der Frequenz ab. Geht man von der Gesamtlänge der Leiterstücke aus, dann entspricht diese genau der halben Wellenlänge der kleinsten Resonanzfrequenz des Dipols. Dabei ergibt sich für eine Halbwelle des hochfrequenten Stromes bzw. der hochfrequenten Spannung eine sinusförmige Verteilung über die Länge des Dipols. Diese Form der Antenne wird als $\lambda/2$ -Dipol oder Halbwellendipol bezeichnet (Bild 8.37).

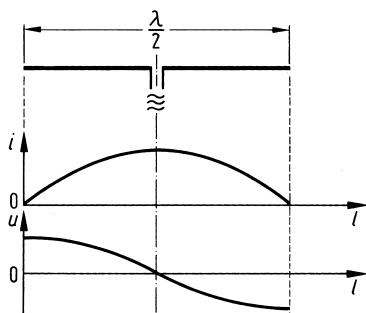


Bild 8.37 Halbwellendipol

Bei der nächsten Resonanzfrequenz des Dipols ist die Frequenz größer, die Wellenlänge also kleiner. Über die Länge des Dipols tritt deshalb eine volle Schwingung von Strom und Spannung auf. Es gilt nun die Bezeichnung λ -Dipol, Ganzwellendipol oder Vollwellendipol (Bild 8.38).

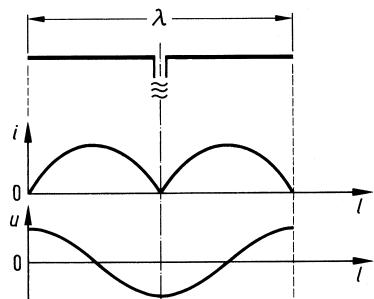


Bild 8.38 Vollwellendipol

Die weiteren Resonanzfrequenzen der Antenne führen zu jeweils um $\lambda/2$ größeren Dipolen (z. B. $3/2 \cdot \lambda$, $2 \cdot \lambda$, ...). Der Verlauf von Strom und Spannung ist dafür leicht zu ermitteln, da im Resonanzfall der Strom an den Dipolenden stets null sein muss, während die Spannung den maximalen Wert annimmt.

Bei Betrachtung der Antenne als Resonanzkreis muss auch dessen Bandbreite berücksichtigt werden. Dieser Wert ist durch die mechanische Konstruktion der Antenne wesentlich beeinflussbar. Antennen mit sehr flachen Resonanzkurven heißen Breitbandantennen, da sie über einen großen Frequenzbereich unter resonanzähnlichen Bedingungen betrieben werden können.



Breitbandantenne = Antenne mit resonanzähnlichen Betriebsbedingungen über einen großen Frequenzbereich

Für die rechnerische Betrachtung des elektromagnetischen Feldes wird bekanntlich als Modell des Kugelstrahlers (isotropen Strahlers) verwendet. Diese kugelförmige Ausbreitung der Feldstärke gibt es bei realen Antennen nicht, es liegen vielmehr in den verschiedenen Raumrichtungen unterschiedliche Werte vor. Für die Bewertung einer Antenne ist es deshalb von Interesse, in welchem Umfang sie auf die Richtung bezogen vom Kugelstrahler abweicht. Wegen der Reziprozität zwischen Sendeantenne und Empfangsantenne kann der Vergleich zwischen der realen Antenne und dem Kugelstrahler wahlweise mit der Strahlungsleistung oder der Feldstärke erfolgen.

Wird dieselbe Strahlungsleistung von einem Kugelstrahler und einer realen Antenne abgegeben, dann ergibt sich für dieselbe Entfernung von diesen Strahlungsquellen bezogen auf den Kugelstrahler die Feldstärke E_i , während die reale Antenne die Feldstärke E_{Ant} bewirkt. Für das logarithmierte Verhältnis der Feldstärke der realen Antenne zur Feldstärke des Kugelstrahlers gilt die Bezeichnung **Antennengewinn** G_i , wobei der Index i den Bezug auf den isotropen Strahler (Kugelstrahler) kennzeichnet.



$$G_i = 20 \cdot \lg \frac{E_{\text{Ant}}}{E_i} \text{ dB} \quad (8.37)$$

Bei dem Antennengewinn G_i handelt es sich also um ein Maß, weil beide Feldstärkewerte auf denselben Ort bezogen sind.

An Stelle des theoretischen Kugelstrahlers ist auch der reale Halbwellendipol als Bezugsantenne verwendbar. Beim Antennengewinn ändert sich dann der Index von „i“ auf „d“, um die nun andere Bezugsantenne zu kennzeichnen. Es gilt:



$$G_d = 20 \cdot \lg \frac{E_{\text{Ant}}}{E_d} \text{ dB} \quad (8.38)$$

Für den Antennengewinn G_d ergibt sich verständlicherweise ein anderer Wert als für den Antennengewinn G_i , weil der Halbwellendipol bezogen auf den Kugelstrahler selbst bereits einen Antennengewinn aufweist. Durch Berechnung lässt sich ermitteln, dass der Antennengewinn des Halbwellendipols gegenüber dem Kugelstrahler 2,15 dB beträgt. Der Wert für G_i ist also stets um 2,15 dB größer als der für G_d und umgekehrt (**Bild 8.39**).

In der Fachliteratur hat sich eingebürgert, für die Kennzeichnung der Bezugsantenne die Pseudoeinheit Dezibel durch einen Buchstaben zu ergänzen. Konsequenterweise wird der Buchstabe „i“ für den Kugelstrahler und der Buchstabe „d“ für den Halbwellendipol verwendet.

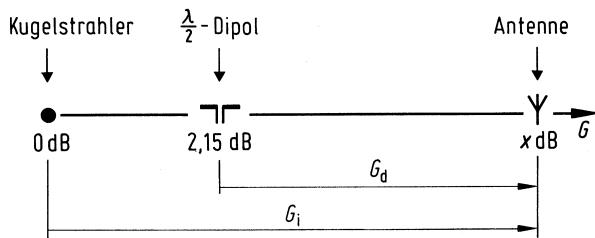


Bild 8.39 Antennengewinn



$$G_i = \dots \text{dB} \leftrightarrow G = \dots \text{dBi}$$

(8.39)



$$G_d = \dots \text{dB} \leftrightarrow G = \dots \text{dBd}$$

(8.40)

Beim Vergleich von Angaben für den Antennengewinn ist deshalb stets zu prüfen, ob dieselbe Bezugsantenne verwendet wurde, also ob der Kugelstrahler oder Halbwellendipol als Referenz diente. Im Bedarfsfall ist die oben angeführte Differenz zwischen beiden Formeln zu berücksichtigen.



Bei Vergleichen des Antennengewinns ist die Bezugsantenne zu berücksichtigen.

Werden die Punkte gleicher Feldstärke um eine reale Antenne ermittelt und miteinander verbunden, dann ergeben sich Strahlungsdiagramme. Aus denen lässt sich erkennen, in welche Richtung die Antenne hauptsächlich Energie abstrahlt bzw. aus welcher Richtung sie vorrangig Energie aufnimmt. Ergeben sich dabei kreisförmige Verläufe, dann handelt es sich um Rundstrahlcharakteristik. Treten dagegen keulenförmige Verläufe auf, dann liegt Richtstrahlcharakteristik vor.



Strahlungsdiagramm = Verbindungsline der Punkte gleicher Feldstärke um eine reale Antenne

- Rundstrahlcharakteristik: Kreisförmiger Verlauf
- Richtstrahlcharakteristik: Keulenförmiger Verlauf

Die Keule in Hauptrichtung für Senden bzw. Empfangen wird als Hauptkeule bezeichnet. Die anderen Keulen heißen Nebenkeulen, es ist aber auch die Bezeichnung Nebenzipfel gebräuchlich.

Da die Feldstärke räumlich verteilt um die Antenne auftritt, lassen sich die Strahlungscharakteristik in horizontaler und vertikaler Richtung unterscheiden. Dafür gelten die Bezeichnungen Horizontal-Richtcharakteristik bzw. Vertikal-Richtcharakteristik, wobei die Position der Antenne stets den Nullpunkt des Koordinatensystems darstellt.

**Beispiel:**

Beim Halbwellendipol hat die Horizontal-Richtcharakteristik die Form einer Acht, während die Vertikal-Richtcharakteristik Kreisform aufweist.

Die Abweichung der Hauptkeule in der horizontalen Ebene von einer festgelegten Null-Grad-Richtung (z.B. Nordrichtung) wird als Richtungswinkel oder Azimutwinkel bezeichnet und bei Betrachtung der vertikalen Ebene für die Null-Grad-Richtung von der Hauptrichtung parallel zur Erdoberfläche ausgegangen. Weicht die Hauptkeule davon ab, dann ergibt sich der Erhebungswinkel oder Elevationswinkel. Er kann positive, aber auch negative Werte aufweisen (**Bild 8.40** und **Bild 8.41**).

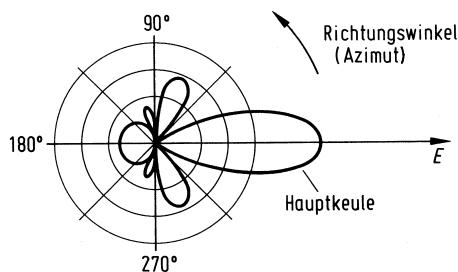


Bild 8.40 Horizontal-Richtcharakteristik

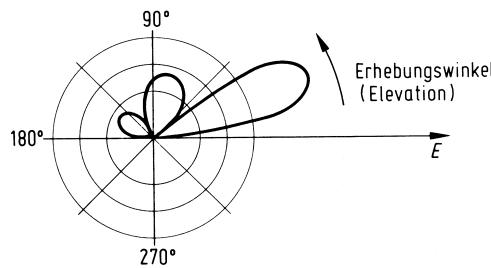


Bild 8.41 Vertikal-Richtcharakteristik

Bei jedem auch als Richtdiagramm bezeichneten Strahlungsdiagramm mit Richtstrahlcharakteristik ist das Verhältnis zwischen der Hauptkeule und der Nebenkeule in Gegenrichtung von Interesse, da auch in der Gegenrichtung Senden bzw. Empfangen möglich wäre. Das logarithmierte Verhältnis der maximalen Feldstärkewerte der angeführten Keulen wird als **Vor-Rück-Verhältnis** (VRV) bezeichnet. Um Störeffekte zu vermeiden, werden besonders für Empfangsantennen große Werte für das Vor-Rück-Verhältnis angestrebt.



$$VRV = 20 \cdot \lg \frac{E_{\text{Hauptrichtung}}}{E_{\text{Gegenrichtung}}} \text{ dB} \quad (8.41)$$

Da die Hauptkeulen von Antennen unterschiedliche Formen aufweisen können, ist ihre Bewertung durch den Öffnungswinkel möglich. Dieser ist vergleichbar der Bandbreite fest-

gelegt und zwar als Winkel zwischen den beiden Punkten, bei denen die maximale Feldstärke in Hauptrichtung um 3 dB abgesunken ist (**Bild 8.42**). Entsprechend den beiden Richtcharakteristika ist stets zwischen dem horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel zu unterscheiden. Angaben über die Öffnungswinkel ermöglichen eine plastische Vorstellung über die Richtwirkung der Antenne.

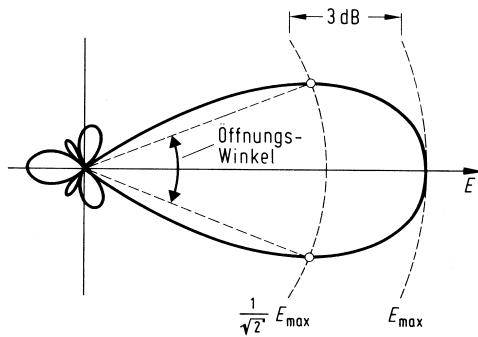


Bild 8.42 Öffnungswinkel



Es sind der horizontale Öffnungswinkel und der vertikale Öffnungswinkel zu unterscheiden.

Antennen wandeln bekanntlich Spannung in Feldstärke oder umgekehrt. Es spielt deshalb eine wichtige Rolle, wie sich die elektrische Feldstärke in Bezug zur Ausbreitungsrichtung verhält. Die Information über den Verlauf der Feldlinien wird als **Polarisation** bezeichnet, wobei drei grundsätzliche Arten zu unterscheiden sind.



Die Angabe der Polarisation bezieht sich stets auf die Ausbreitungsrichtung.

Bei horizontaler Polarisation handelt es sich um waagerechten Verlauf, während bei vertikaler Polarisation senkrechter Verlauf gegeben ist, was einer Drehung um 90 Grad entspricht. Die Lage der Feldstärkekomponenten in Ausbreitungsrichtung bleibt in beiden Fällen stets konstant und damit zeitunabhängig.

Ändert dagegen der Vektor der elektrischen Feldstärke seine Lage kreisförmig um die Mittelachse der Ausbreitungsrichtung, dann zeigt der Feldlinienverlauf eine zeitliche Abhängigkeit. Es handelt sich dann um zirkulare Polarisation, bei der zwischen rechtsdrehender und linksdrehender zirkularer Polarisation unterschieden wird (**Bild 8.43**).

Arbeitet ein Sender mit einer bestimmten Polarisation, dann müssen die Empfangsantennen für dieselbe Polarisation vorgesehen werden. Mit Antennen für eine der anderen Polarisationsarten ist zwar auch Empfang möglich, jedoch ist das Empfangssignal dann stets um einen bestimmten Wert kleiner. Dieser wird als Polarisationsentkopplung bezeichnet und in Dezibel (dB) angegeben. Bei ausreichend großer Polarisationsentkopplung ist es möglich, eine Sendefrequenz gleichzeitig für zwei unabhängige Übertragungen zu nutzen.

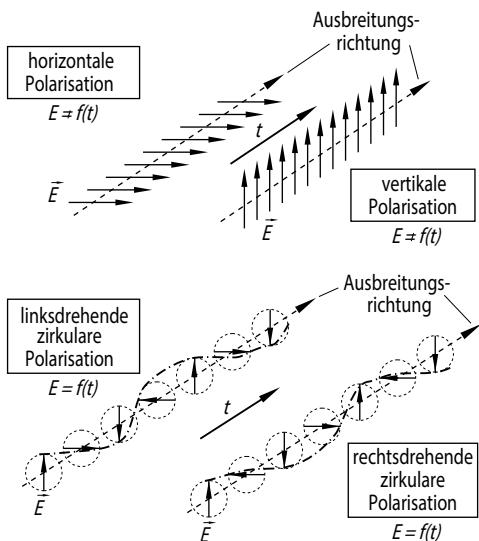


Bild 8.43 Polarisationsarten



Die **Polarisationsentkopplung** gibt an, wie stark sich das Empfangssignal einer Antenne für die gesendete Polarisation von dem Empfangssignal für eine andere Polarisation unterscheidet.

Die für bestimmte Anwendungen eingesetzten Antennen sind durch entsprechende Werte für die behandelten technischen Spezifikationen gekennzeichnet. Dazu gehören vorrangig der Antennengewinn, das horizontale und vertikale Richtdiagramm, das Vor-Rück-Verhältnis, der horizontale und vertikale Öffnungswinkel und die Polarisation.

Die einfachste Bauform einer Antenne ist der bereits behandelte Dipol. Die beiden geraden Leiterstücke heißen Dipolstäbe und sind entsprechend der Wellenlänge der Betriebsfrequenz bemessen. Diese als offener Dipol bezeichnete Antenne weist nur gegenüber dem Kugelstrahler einen Antennengewinn auf (**Bild 8.44**). Die Eingangsimpedanz dieser Antenne liegt im Bereich 50...100 Ω .

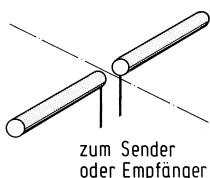
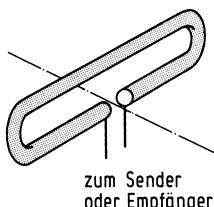


Bild 8.44 Offener Dipol

Größere Werte (ca. 300 Ω) sind erreichbar, wenn die beiden Enden des Dipols mit einem zusätzlichen Leiter verbunden werden, der in einem geringen Abstand parallel zu den Dipolstäben verläuft. Dies kann als Zusammenwirken von zwei Dipolen verstanden werden, wobei der obere Dipol kurzgeschlossen ist und seine Enden mit denen des unteren Dipols verbunden sind. Es liegt nun ein geschlossener Dipol vor, für den auch die Bezeichnung Faltdipol gilt (**Bild 8.45**).

**Bild 8.45** Geschlossener Dipol

Die Resonanzfrequenz für Dipole bestimmt sich bekanntlich aus den Abmessungen der Dipolstäbe. Beziiglich der Bandbreite besteht eine unmittelbare Abhängigkeit von ihrem Durchmesser. Die Bandbreite nimmt nämlich mit ansteigendem Wert für den Durchmesser zu.

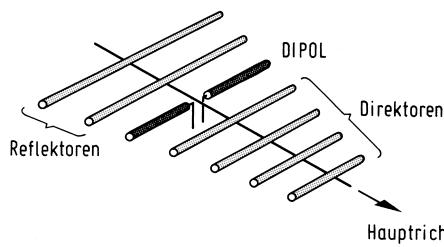


Je dicker die Dipolstäbe, desto breitbandiger der Dipol.

Die Horizontal-Richtcharakteristik eines Dipols weist bekanntlich die Form einer Acht auf. Werden nun zwei Dipole um 90 Grad gegeneinander versetzt angeordnet und phasenrichtig zusammengeschaltet, dann überlagern sich beide Diagramme und es ergibt sich ein angenähert kreisförmiger Verlauf. Diese Dipolkombination wird als Kreuzdipol bezeichnet.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass alle angeführten Dipolvarianten durch entsprechende Montage für horizontale und vertikale Polarisation verwendbar sind. Die Version des Kreuzdipols lässt sich auch für zirkulare Polarisation nutzen.

Um die wenig ausgeprägte Richtwirkung eines Dipols und damit auch das ungünstige Vorf-Rück-Verhältnis zu verbessern, können vor und hinter dem offenen oder geschlossenen Dipol in entsprechenden Abständen Leiterstücke angebracht werden. Befinden sich diese bezogen auf die Hauptrichtung vor dem Dipol, dann handelt es sich um Direktoren, hinter dem Dipol angebrachte Leiterstücke werden dagegen als Reflektoren bezeichnet. Die Bauform heißt Richtantenne oder nach ihrem japanischen Entwickler Yagi-Antenne (**Bild 8.46**).

**Bild 8.46** Richtantenne

Direktoren sind immer etwas kürzer als der Dipol, während Reflektoren stets etwas länger sind. Von der Funktion her können Direktoren und Reflektoren als Dipole verstanden werden, deren Anschlussklemmen kurzgeschlossen sind. Deshalb kann dort keine Energie zu- oder abgeführt werden. Sie wird zum eigentlichen Dipol hin reflektiert und bewirkt damit die angeführten Änderungen der Spezifikationen.



Direktoren und Reflektoren verbessern die Richtwirkung, den Antennengewinn und das Vor-Rück-Verhältnis.

Ist für eine bestimmte Anwendung der Öffnungswinkel einer Richtantenne zu groß, dann lassen sich durch geeignete Zusammenschaltung von zwei oder mehr Antennen kleinere Werte erreichen, weil sich die Richtdiagramme der Einzelantennen überlagern. Der Antennengewinn dieser Kombination ist dabei stets größer als der für die einzelnen Richtantennen.

Werden die Antennen in definierten Abständen übereinander angeordnet, dann gilt die Bezeichnung gestockte Antenne oder Mehr-Ebenen-Antenne. Bei zwei Antennen liegt also eine Zwei-Ebenen-Antenne vor. Durch diese Aufbauform wird der vertikale Öffnungswinkel gegenüber dem der einzelnen Richtantenne kleiner.

Erfolgt dagegen der Aufbau von zwei Antennen in definierten Abständen nebeneinander, dann gilt die Bezeichnung Zwillingsantenne (**Bild 8.47**). Konsequenterweise handelt es sich bei drei Antennen um eine Drillingsantenne und bei vier Antennen um eine Vierlingsantenne. Mit zunehmender Antenzahl reduziert sich der horizontale Öffnungswinkel gegenüber der Einzelantenne entsprechend.

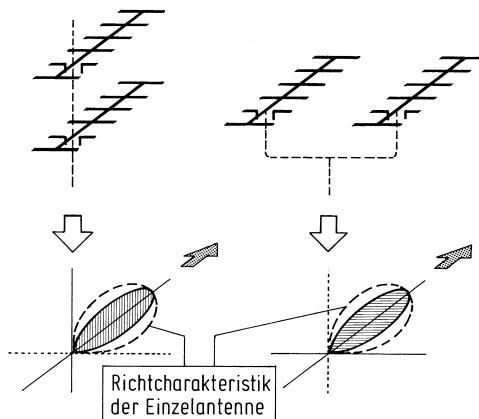


Bild 8.47 Zwei-Ebenen-Antenne und Zwillingsantenne



Die Zusammenschaltung übereinander oder nebeneinander angeordneter Antennen verbessert die Richtwirkung und den Antennengewinn gegenüber den einzelnen Antennen.

Die Kombination der vorstehend aufgezeigten Arten der Zusammenschaltung führt zu flächigen Antennenanordnungen in Zeilen und Spalten, die häufig als Array bezeichnet werden. Dadurch ergeben sich gleichzeitig für den horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel kleinere Werte gegenüber denen der Einzelantennen. Das aufgezeigte Konzept ist mit offenen oder geschlossenen Dipolen realisierbar.



Antennen-Array = Flächige Anordnung von Einzelantennen in Zeilen und Spalten

Bedingt durch seine Bauform weist der Dipol einen symmetrischen Feldlinienverlauf auf, wobei die Symmetrieebene in der Mitte senkrecht zwischen den Dipolhälften liegt. Verwendet man dafür eine elektrisch leitfähige Fläche, dann ändert sich der Feldlinienverlauf nicht und eine Dipolhälfte kann entfallen. Die verbleibende Hälfte heißt **Monopol** (Bild 8.48). Seine Länge ist vergleichbar dem Dipol unmittelbar von der Betriebsfrequenz abhängig.

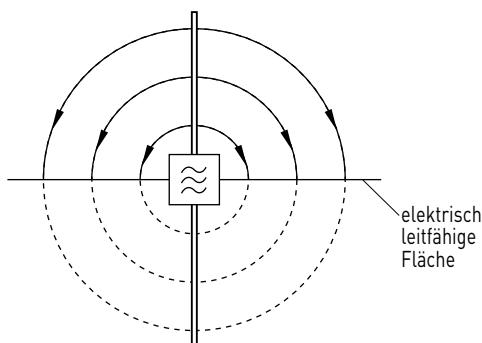


Bild 8.48 Monopol (Konzept)

In der Praxis werden Monopole als Sendeantennen eingesetzt, wenn vertikal polarisierte Abstrahlung vorgesehen ist. Es gilt dann auch die Bezeichnung Vertikalstrahler. Monopole sind natürlich auch als Empfangsantennen einsetzbar. Sie werden dann üblicherweise als Stabantennen bezeichnet.

Die Nachbildung der zweiten Dipolhälfte durch eine elektrisch leitfähige Fläche ist auf unterschiedliche Weise möglich. Wird der Monopol unmittelbar auf dem Erdboden positioniert, dann ist ein Erdnetz die typische Lösung. Es handelt sich dabei um im Erdboden verlegte Drähte mit der Länge der Dipolhälfte, die radial vom Monopol verlaufen. Als „Gegengewicht“ sind aber auch metallische Flächen oder die Anordnung von Leiterstäben verwendbar. Ein Beispiel ist eine am Kraftfahrzeug angebrachte Stabantenne, bei der die Karosserie diese Funktion wahrnimmt (Bild 8.49).

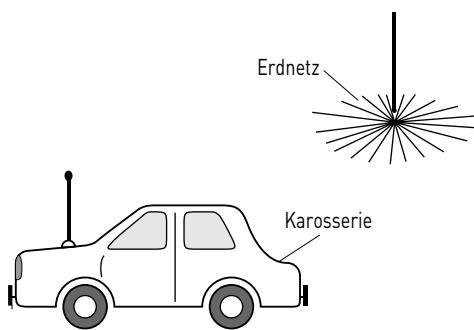


Bild 8.49 Gegengewicht beim Monopol

Bei den Dipolen ist funktionsbedingt die elektrische Feldstärke maßgebend. Bestimmte Antennen nutzen jedoch die magnetische Komponente des elektromagnetischen Feldes. Es handelt sich um die **Rahmenantenne** [loop antenna]. Sie besteht aus einer entsprechend dimensionierten Spule, im einfachsten Fall eine Drahtschleife. Rahmenantennen arbeiten nach dem Induktionsprinzip und werden im Regelfall als Empfangsantennen eingesetzt. Wirkt ein elektromagnetisches Feld auf eine Rahmenantenne ein, dann ergibt sich am Antennenanschluss eine hochfrequente Spannung als Maß für die dem Feld entnommene Energie (**Bild 8.50**).

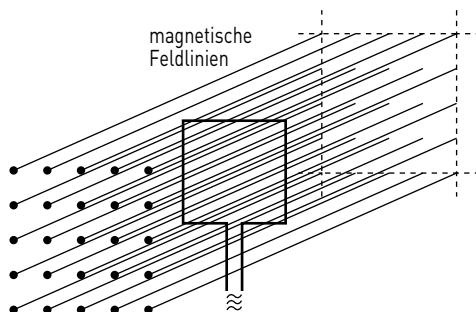


Bild 8.50 Rahmenantenne

Da die Feldstärkekomponenten bekanntlich nur in bestimmten Richtungen auftreten, ist eine feste Verkopplung zwischen der magnetischen Feldstärkekomponente und der Position des Rahmens gegeben. Der größere Spannungswert wird induziert, wenn die Rahmenantenne senkrecht zu den magnetischen Feldlinien steht. Es liegt dabei eine dem Dipol vergleichbare Richtwirkung vor. Ordnet man die Rahmenantenne drehbar an, dann wirkt sie als Peilantenne (**Bild 8.51**). An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Abmessungen bei Rahmenantennen unmittelbar von der Betriebsfrequenz abhängen. Kleinere Frequenzen, also große Wellenlängen, machen große Durchmesser bei ringförmiger Form des Rahmens bzw. große Seitenlängen bei quadratischer Form des Rahmens erforderlich, damit ein ausreichend großes Empfangssignal am Antennenanschluss auftritt. Bei großen Frequenzen, also kleinen Wellenlängen, reichen entsprechend geringere Abmessungen bei der Rahmenantenne aus.

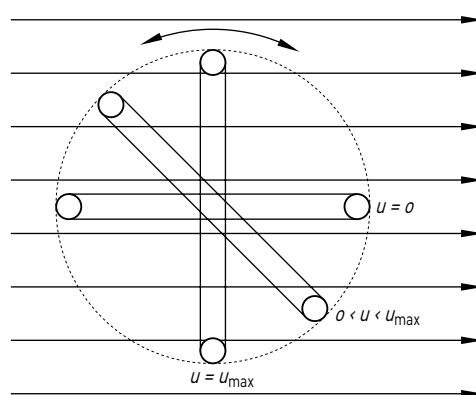


Bild 8.51 Peilantenne



Die Seitenlängen bzw. Durchmesser einer Rahmenantenne hängen unmittelbar von der Betriebswellenlänge ab.

Für große Frequenzen (ab dem GHz-Bereich) sind Richtantennen mit großem Antennengewinn, kleinen Öffnungswinkeln und möglichst kleinen Nebenkeulen schwierig zu realisieren. Als Lösung bieten sich Reflektoren an, die Teil eines Paraboloiden sind und als Parabolspiegel bezeichnet werden. Sie bündeln die Strahlen im Brennpunkt des Paraboloiden, wo sich die eigentliche Antenne – im Regelfall als Speisesystem [feed system] bezeichnet – befindet. Wegen der dargestellten Funktion des Reflektors gilt für solche Antennen die Bezeichnung **Parabolantenne**. Die Fokussierung erfolgt bei diesen in gleicher Weise wie bei einem Scheinwerfer (**Bild 8.52**). Wegen der zentralen Lage des Speisesystems bezeichnet man solche Antennen als zentralgespeiste Parabolantennen. Die mechanischen Halterungen für das Speisesystem liegen bei diesen Antennen konstruktionsbedingt im Strahlengang und führen zu Abschattungen.

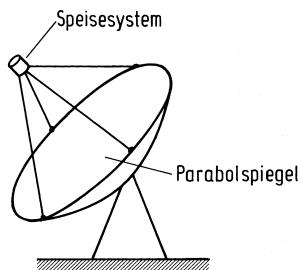


Bild 8.52 Zentralgespeiste Parabolantenne

Dieses Problem ist lösbar, wenn die Speisung nicht mehr zentral erfolgt, was sich durch einen Reflektor erreichen lässt, der nur einen Ausschnitt eines Voll-Parabolspiegels bildet. Das Speisesystem liegt dann zwar noch immer im Brennpunkt des Paraboloiden, jedoch nicht mehr in der Mitte des Reflektors. Es reicht deshalb eine mechanische Halterung am unteren Rand des Reflektors aus, also außerhalb des Strahlengangs. Solche offsetgespeisten Antennen heißen offiziell Offset-Parabolantennen und werden jedoch üblicherweise nur als Offset-Antennen bezeichnet (**Bild 8.53**).

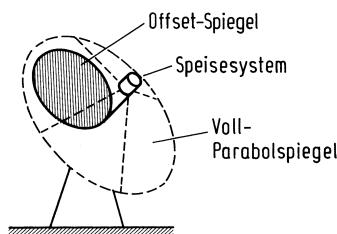


Bild 8.53 Offset-Parabolantenne

Die Fokussierung einer Parabolantenne hängt unmittelbar von den Abmessungen des Reflektors ab und wird durch den Öffnungswinkel charakterisiert. Dafür gelten dieselben Festlegungen wie bei den Richtantennen. Mit zunehmender Größe des als Reflektor wirkenden Parabolspiegels verringert sich der Öffnungswinkel und umgekehrt.



Je größer der als Reflektor wirkende Parabolspiegel, desto kleiner der Öffnungswinkel und umgekehrt.

In der Praxis hat sich für den Empfang die Offset-Antenne durchgesetzt, da sie bei gleichem Strahlengang des ankommenden Feldes senkrechter montiert werden kann und damit Witterungseinflüsse durch Regen, Schnee und Eis verhindert (**Bild 8.54**).

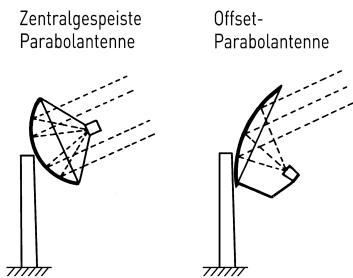


Bild 8.54 Montage von Parabolantennen

Bedingt durch die Entwicklung der Halbleitertechnologie sind für den GHz-Bereich auch Empfangsantennen in der Form von Arrays realisierbar. Da sie nur eine Dicke von einigen Zentimetern aufweisen, gilt die Bezeichnung Planarantennen oder Flachantennen. In einem Bereich von $30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ bis $60\text{ cm} \times 60\text{ cm}$ sind dabei einige tausend Halbwel lendipole angeordnet. Durch unmittelbar dahinter angeordnete integrierte Anpassungs- und Verstärkerschaltungen werden die sehr kleinen Spannungen am Fußpunkt der Dipole zu einem Gesamt-Ausgangssignal zusammengefasst (**Bild 8.55**).

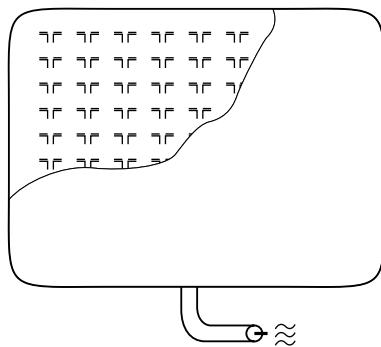
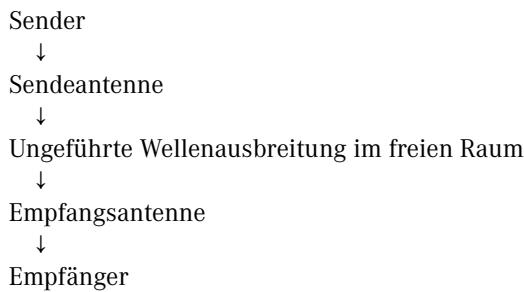


Bild 8.55 Planarantenne

Mit Planarantennen sind gegenüber Offset-Antennen nur geringere Werte für den Antennengewinn und größere Öffnungswinkel realisierbar. Außerdem ergeben sich bei Planarantennen stets mehr Nebenkeulen im Horizontal- und Vertikal-Richtdiagramm.

Bei der Funkübertragung gibt es zwei grundsätzliche Varianten, nämlich die terrestrische Funkübertragung und den Satellitenfunk. Beide nutzen zwar den Effekt der ungeführten Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich der Anforderungen auf der Sende- und Empfangsseite.

Jede Funkübertragung arbeitet nach folgendem Konzept:



Der freie Raum stellt somit den Übertragungskanal dar. Es handelt sich dabei um die Lufthülle der Erde. Sie wird als Atmosphäre bezeichnet und unterteilt sich in Troposphäre, Stratosphäre und Ionosphäre (**Bild 8.56**). Für die Abgrenzung zwischen den drei Bereichen gibt es keine festgelegten Grenzen, sondern lediglich Anhaltswerte.

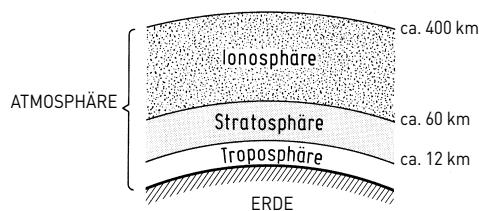


Bild 8.56 Unterteilung der Atmosphäre

In den einzelnen Bereichen der Atmosphäre können Beeinflussungen der elektromagnetischen Wellen auftreten. Dazu zählen Dämpfung, Beugung, Reflexion, Interferenz und Streuung. Alle diese Effekte unterliegen zeitlichen und räumlichen Schwankungen und hängen außerdem von der verwendeten Frequenz bzw. Wellenlänge ab. Ursache sind durch die Einstrahlungen von der Sonne und anderen Quellen im Weltraum bewirkte Ionisationsvorgänge. Sie treten am stärksten in der Ionosphäre auf. Es ergeben sich dabei verschiedene Schichten, deren Höhe, Dicke und Struktur von der Tages- und Jahreszeit abhängen (**Bild 8.57**). Deshalb ist die Ionosphäre kein Bereich mit konstanten Eigenschaften, sondern ein Übertragungskanal, dessen Merkmale starke Zeit- und Frequenzabhängigkeit aufweisen.

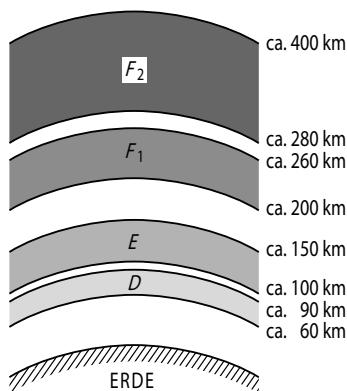


Bild 8.57 Schichten der Ionosphäre



Die Eigenschaften der Atmosphäre für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen sind zeit- und frequenzabhängig.

Den einfachsten Fall für eine Funkverbindung stellt die hindernisfreie Sicht zwischen Sendeantenne und Empfangsantenne dar, deren Entfernung d zueinander beträgt. Wegen des Ausbreitungsmediums wird auf diesem Übertragungsweg das Signal gedämpft und als Freiraumdämpfung bezeichnet. Das Freiraumdämpfungsmaß lässt sich wie folgt berechnen:

$$a_0 = 20 \cdot \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \text{ dB} = 20 \cdot \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c_0} \text{ dB} \quad (8.42)$$

Daraus lässt sich erkennen, dass die Dämpfung mit wachsender Entfernung zwischen Sende- und Empfangsantenne zunimmt. Gleches gilt auch bei abnehmender Wellenlänge, also größer werdender Frequenz. Das Freiraumdämpfungsmaß a_0 liefert die ersten Anhaltspunkte für die erforderlichen technischen Spezifikationen auf der Sende- und Empfangsseite einer Funkverbindung. Hindernisse zwischen den Antennen und/oder Witterungseinflüsse (z. B. Regengebiete) bewirken zusätzliche Dämpfung des hochfrequenten Signals.

Grundsätzlich spielen für eine Funkverbindung folgende Kriterien eine Rolle:

Sender: Maximale Ausgangsleistung



Sendeantenne: Antennengewinn



Übertragungskanal: Freiraumdämpfung



Empfangsantenne: Antennengewinn



Empfänger: Mindestwert der Eingangsspannung

Es ist ersichtlich, dass es verschiedene „Stellschrauben“ gibt, um eine sichere Verbindung zu erreichen.



Beispiel:

Bei einer durch die Entfernung d vorgegebenen Funkverbindung gibt es folgende Möglichkeiten, die Freiraumdämpfung zu kompensieren:

- Kleinere Frequenz verwenden
 - Antennen mit größerem Antennengewinn einsetzen
 - Sender mit höherer Ausgangsleistung vorsehen
 - Empfänger mit kleinerem Mindestwert der Eingangsspannung nutzen
- Diese Möglichkeiten können einzeln oder in Kombination genutzt werden.

Für die Abstrahlung elektromagnetischer Wellen über die Antenne einer Sendeanlage sind zwei Formen möglich. Verlaufen die abgestrahlten Wellen längs der Erdoberfläche, dann

gilt die Bezeichnung **Bodenwelle** (Bild 8.58). Ihre Reichweite ist begrenzt und zwar abhängig von der Geländestruktur (d.h. der Topografie) sowie der Bebauung und dem Bewuchs (d.h. der Morphografie). Als wesentliche Effekte treten dabei Dämpfung, Beugung und Reflexion auf.

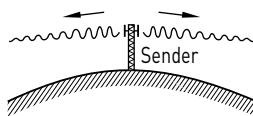


Bild 8.58 Bodenwelle

Verlaufen dagegen die Wellen in Richtung Ionosphäre, dann handelt es sich um die **Raumwelle** (Bild 8.59). Diese ist nicht direkt empfangbar, sondern erst nach Reflexion an Schichten der Ionosphäre. Dabei wird die unter dem Einfallsinkel α ankommende Welle unter dem Winkel β zur Erde umgelenkt. Abhängig vom Einfallsinkel α der Welle, der Frequenz und den momentanen Eigenschaften der Reflexionsschicht, die den Ausfallswinkel β bestimmen, sind durch die Raumwelle erhebliche Entfernung überbrückbar.

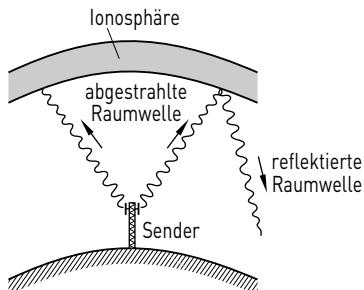


Bild 8.59 Raumwelle

Da eine reflektierte Raumwelle unter bestimmten Voraussetzungen auch von der Erdoberfläche wieder in Richtung Ionosphäre gelenkt werden kann, ist Mehrfachreflexion möglich. Diese vergrößert die Reichweite erheblich.



Bei Mehrfachreflexion wird die Raumwelle am Erdboden wieder reflektiert.

Von Antennen werden im Regelfall gleichzeitig Bodenwelle und Raumwelle abgestrahlt. Abhängig von der dämpfungsbedingten Reichweite der Bodenwelle und der Reflexion der Raumwelle sind verschiedene Empfangszonen unterscheidbar.

Im einfachsten Fall wird die Raumwelle nicht oder noch nicht reflektiert, so dass nur die Bodenwelle empfangbar ist. Es handelt sich dann um die **Nahempfangszone** (Kurzform: Nahzone). Tritt nun zusätzlich die reflektierte Raumwelle auf, dann bezeichnet man den Bereich, in dem nur diese empfangbar ist, als **Fernempfangszone** (Kurzform: Fernzone).

Es ist aber auch ein Bereich möglich, in dem die Bodenwelle schon nicht mehr und die reflektierte Raumwelle noch nicht empfangbar ist. Es handelt sich dann um die **Tote Zone**. Die gegensätzliche Situation liegt vor, wenn gleichzeitig Bodenwelle und reflektierte Raum-

welle empfangen werden können. Es kommt dabei zu einer Überlagerung der Wellen. Für diesen Bereich gilt die Bezeichnung **Interferenzzone** oder Verwirrungszone (**Bild 8.60**).

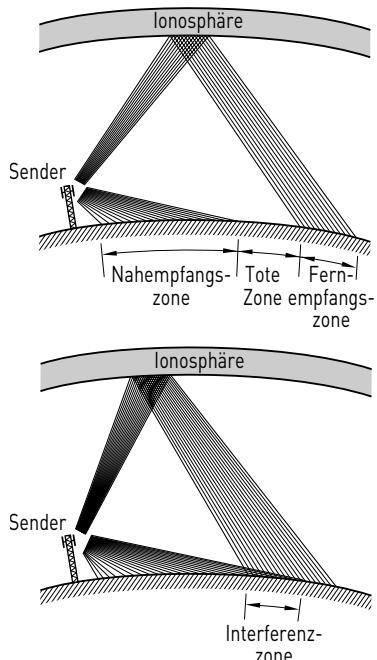


Bild 8.60 Empfangszonen

Da sich Boden- und Raumwelle bekanntlich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, wird die Raumwelle am Empfangsort stets später eintreffen, da sie den längeren Weg hat. Es treten also unterschiedliche Laufzeiten auf, was eine Phasenverschiebung zwischen den Signalen von Bodenwelle und Raumwelle am Empfangsort bewirkt. Da die Reflexionsbedingungen für die Raumwelle nicht konstant sind, können alle Fälle von Gleichphasigkeit bis Gegenphasigkeit auftreten. Das resultierende Empfangssignal liegt damit zwischen Signalverdopplung (bezogen auf den reinen Empfang der Bodenwelle) und Signalauslöschung.



In der Interferenzzone überlagern sich die Bodenwelle und die reflektierte Raumwelle. Wegen der unterschiedlichen Laufzeiten liegt das resultierende Empfangssignal zwischen Signalverdopplung und Signalauslöschung.

Die vorstehend beschriebene Interferenz der beiden Wellen führt hinsichtlich Amplitude und Funktionsverlauf zu einem zeitabhängig variierenden Empfangssignal. Ein solcher Effekt wird als Schwund [fading] bezeichnet. Dieser Störeffekt betrifft meistens nur einzelne Frequenzen oder schmale Frequenzbereiche, wirkt also frequenzselektiv. Wegen der zeitlichen Abhängigkeit treten die Schwunderscheinungen jedoch üblicherweise im gesamten Bereich des Empfangssignals auf.



Schwund [fading] = Zeitabhängige frequenzselektive Änderungen des Empfangssignals hinsichtlich Amplitude und Funktionsverlauf

Vorstehende Ausführungen haben grundsätzlich für jede Funkübertragung Gültigkeit, abhängig von der verwendeten Frequenz sind die Auswirkungen jedoch unterschiedlich.

Bei Längst- und Langwellen erfolgt ausschließlich die Nutzung der Bodenwelle, weil die Raumwelle in der Ionosphäre nicht reflektiert wird. Die Wellen bereiten sich also in einem Kanal zwischen Erdoberfläche und Ionosphäre aus. Die erzielbare Reichweite ist wesentlich von der Strahlungsleistung abhängig, da die Bodenwelle starker Dämpfung unterliegt.

Längst- und Langwellen weisen bei Tag und Nacht, aber auch zu allen Jahreszeiten gleiche Empfangsbedingungen auf, weil die Ausbreitungsbedingungen konstant sind.



Bei Längst- und Langwellen tritt nur die Bodenwelle auf. Es liegen zeitlich konstante Ausbreitungsbedingungen vor.

Bei den Mittelwellen treten Bodenwelle und reflektierte Raumwelle auf, jedoch abhängig von der Tageszeit. Vom frühen Vormittag bis zum späten Nachmittag wird die Raumwelle wegen der Sonneneinstrahlung von der Ionosphäre praktisch nicht reflektiert, so dass sich nur die Nahempfangszone ergibt. Zu den anderen Zeiten des Tages tritt neben der Bodenwelle auch die Raumwelle auf. Dies führt zum Aufbau der Fernempfangszone, allerdings auch verbunden mit der Möglichkeit einer Interferenzzone (**Bild 8.61**).

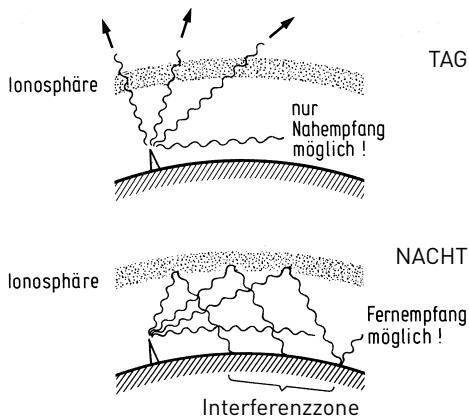


Bild 8.61 Empfangsverhältnisse für Mittelwellen

Die Empfangsverhältnisse sind bei den Mittelwellen neben der Tageszeit zusätzlich auch noch von der Jahreszeit abhängig. Prinzipiell ist der Empfang im Sommerhalbjahr schlechter als in den Wintermonaten.



Bei Mittelwellen treten Bodenwelle und Raumwelle auf. Es liegen von der Tageszeit und Jahreszeit abhängige Ausbreitungsbedingungen vor.

Bei den Kurzwellen spielen die Schichten der Ionosphäre eine wesentliche Rolle. Abhängig vom Abstrahlwinkel der Antenne, der Frequenz und den spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Schicht ergeben sich Reflexionen und ermöglichen damit ausgeprägten Fernempfang. Durch Mehrfachreflexionen ist mit Kurzwellen ein erdumspannender Empfang realisierbar (**Bild 8.62**).

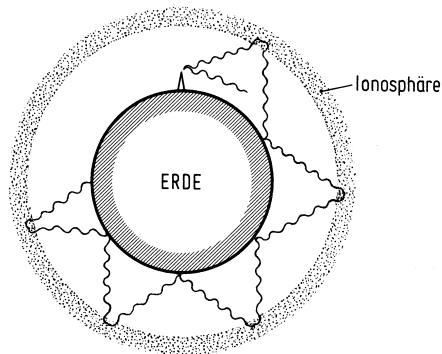


Bild 8.62 Fernempfang bei Kurzwellen durch Mehrfachreflexion

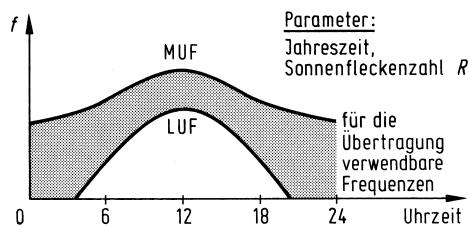
Da die Nahempfangszone meistens recht klein ist und die reflektierte Raumwelle erst in entsprechender Entfernung vom Sender auf die Erdoberfläche auftrifft, ergeben sich bei den Kurzwellen häufig recht große tote Zonen.

Die Eigenschaften der Ionosphäre und ihrer Schichten sind bekanntlich von Einwirkungen aus dem Weltraum abhängig. Für die Kurzwellen ist dabei die Sonnenfleckenzahl R [sun spot number (SSN)] von Bedeutung. Sie beschreibt die Aktivitäten auf der Sonnenoberfläche, wobei eine periodische Schwankung von 11 Jahren feststellbar ist. Bei einer großen Zahl von Sonnenflecken (= Sonnenfleckemaximum) sind die Übertragungsbedingungen günstiger, während bei einer kleinen Zahl von Sonnenflecken (= Sonnenfleckeminimum) die Übertragungsbedingungen schlecht sind. Letzteres gilt besonders für große Frequenzen, also kleine Wellenlängen.



Es besteht bei den Kurzwellen eine Abhängigkeit der Übertragungsbedingungen von der Zahl der Sonnenflecken.

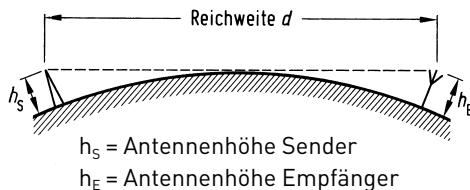
Vorstehende Ausführungen zeigen die Abhängigkeit der Übertragungsqualität bei den Kurzwellen von der Tageszeit, Jahreszeit und Sonnenfleckenzahl. Es lässt sich deshalb eine größte für die Übertragung verwendbare Frequenz [maximum usable frequency (MUF)] definieren. Anderseits gilt dies aber auch für eine kleinste verwendbare Frequenz [lowest usable frequency (LUF)]. Sie ergibt sich wegen des unterschiedlichen Dämpfungsverhaltens in der Atmosphäre. Der Bereich zwischen MUF und LUF kennzeichnet die Frequenzen, die für eine Übertragung unter den gegebenen Randbedingungen überhaupt geeignet sind (**Bild 8.63**). Die Frequenzinformationen werden ähnlich den Wettervorhersagen durch die Auswertung umfangreicher Beobachtungen ermittelt und in sogenannten Funkprognosen zusammengestellt.

**Bild 8.63** MUF und LUF bei Kurzwellen

Bei den Meterwellen ist nur die Bodenwelle von Interesse, da im Regelfall für die Raumwelle keine Reflexion an Ionosphärenschichten auftritt. Meterwellen weisen ein den Lichtstrahlen vergleichbares Verhalten auf, weshalb von einem quasioptischen Verhalten gesprochen wird.

Theoretisch kann deshalb nur eine geradlinige Verbindung zwischen Sender und Empfänger überbrückt werden. Wegen der Erdkrümmung ist die mögliche Reichweite primär von den Antennenhöhen beim Sender und Empfänger abhängig (**Bild 8.64**). Jede Verbindung ist somit durch den sogenannten Radiohorizont [radio horizon] begrenzt. Als Abschätzung für die Reichweite d gilt, wenn zwischen Sender und Empfänger keine Hindernisse vorliegen, folgende zugeschnittene Größengleichung:

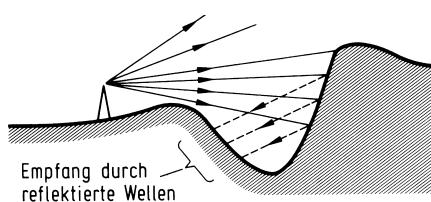
$$\frac{d}{m} \approx 4,6 \cdot 10^3 \cdot \left(\sqrt{\frac{h_s}{m}} + \sqrt{\frac{h_e}{m}} \right) \quad (8.43)$$

**Bild 8.64** Reichweite bei Meterwellen

Bei Meterwellen wird die Reichweite durch die Erdkrümmung begrenzt.

Wegen der physikalischen Effekte Reflexion und Beugung ist unter Umständen auch Empfang an solchen Stellen möglich, die keine Sichtverbindung zum Sender haben.

Bei der Reflexion wird die abgestrahlte Welle ganz oder teilweise von natürlichen oder künstlichen Hindernissen zurückgeworfen (**Bild 8.65**).

**Bild 8.65** Reflexion

Durch Beugung wird ein Abweichen der Wellen vom geradlinigen Verlauf bewirkt. Auf diese Weise sind auch Gebiete erreichbar, die vom Sender aus gesehen hinter Hindernissen liegen (**Bild 8.66**).

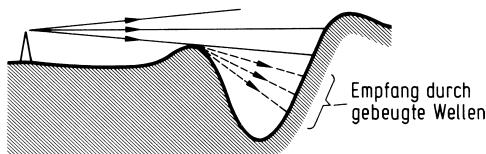


Bild 8.66 Beugung

Bei Meterwellen sind auch Reichweiten möglich, die erheblich über dem theoretischen Wert liegen. Dafür gilt die Bezeichnung Überreichweiten. Sie kommen dann zustande, wenn sich in der Troposphäre unter bestimmten meteorologischen Bedingungen reflexionsfähige Schichten bilden, die als Inversionsschichten bezeichnet werden. Dabei treten zwischen zwei Inversionsschichten Reflexionen auf und es kommt zu einer Führung der Wellen in einem durch diese Schichten begrenzten Kanal [duct] (**Bild 8.67**). Auf diese Weise können durchaus Entfernungen von mehr als 1000 km überbrückt werden, während es sich unter Normalbedingungen nur um ca. 100 km handelt.

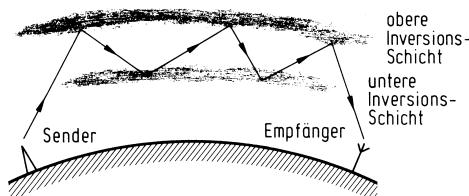


Bild 8.67 Überreichweiten



Durch Inversionsschichten können Überreichweiten auftreten.

Bei Dezimeterwellen entspricht das Verhalten noch stärker dem der Lichtwellen als bei den Meterwellen. Auch hier treten die Effekte der Reflexion und Beugung auf. Andererseits lassen sich diese Wellen mit vertretbarem Aufwand bündeln. Auf diese Weise können durch gerichtete Übertragung mit geringer Leistung große Entfernungen überbrückt werden. Es handelt sich dann um Richtfunk [radio link].

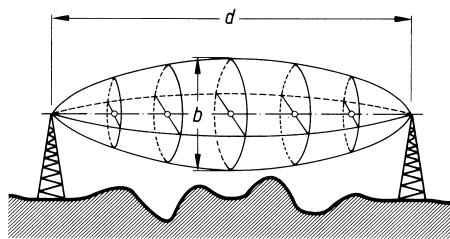


Richtfunk [radio link] = Gerichtete Funkübertragung durch gebündelte elektromagnetische Wellen

Für eine ungestörte Übertragung von Dezimeterwellen muss allerdings eine definierte Zone zwischen Sender und Empfänger frei von Hindernissen sein, da sich sonst Interferenzen der direkten Wellen mit den von der Erdoberfläche reflektierten Wellen ergeben. Dieser Bereich wird nach dem französischen Physiker Augustin Jean Fresnel (1788–1827) als Fresnel-Zone bezeichnet (**Bild 8.68**). Es handelt sich um einen Rotationsellipsoid, dessen Breite b und Länge d von der Wellenlänge λ abhängen. Es gilt:

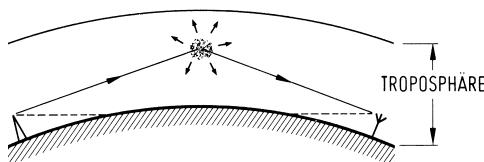
$$b = \sqrt{d \cdot \lambda}$$

(8.44)

**Bild 8.68** Fresnel-Zone**Beispiel:**

Wird bei einem Richtfunksystem durch den Einsatz einer neuen Anlage eine größere Frequenz verwendet, dann reduziert sich die Breite der Fresnel-Zone gemäß vorstehender Gleichung.

Mit Dezimeterwellen sind auch über die Fresnel-Zone hinausgehende Reichweiten möglich. In diesen Fällen werden troposphärische Inhomogenitäten für eine Streustrahlung [scatter] genutzt. Auf diese Weise gelangen Anteile der Welle zur Erde zurück und können empfangen werden. Für dieses Verfahren gilt die Bezeichnung Troposcatter (**Bild 8.69**).

**Bild 8.69** Troposcatter

Zentimeter- und Millimeterwellen lassen sich wegen des ausgeprägt quasioptischen Verhaltens mit wenig Aufwand bündeln und dann gerichtet abstrahlen. Andererseits ergeben sich wegen der Wellenlänge häufig Reflexionen.

Durch in der Atmosphäre enthaltene Gasmoleküle sowie durch Wasser (als Regen, Schnee, Nebel oder Wolken) werden Zentimeter- und Millimeterwellen stark gedämpft. Die Werte sind von der Frequenz abhängig und können entsprechenden Tabellen oder Diagrammen entnommen werden.



Zentimeter- und Millimeterwellen werden durch Gas- und Wassermoleküle stark gedämpft.

Es sei auch darauf hingewiesen, dass bei Zentimeter- und Millimeterwellen die Wellenlängen in Größenordnung der Bauelementeabmessungen liegen, während sonst die Wellenlängen ein Vielfaches davon betragen. Bei Geräten und Anlagen muss dies entsprechend berücksichtigt werden, um Störeffekte zu vermeiden.

Die terrestrische Funkübertragung und der Satellitenfunk unterscheiden sich einerseits durch die Positionierung der Sende- und Empfangsanlagen sowie andererseits durch die verwendeten Wellenlängen.

Bei der terrestrischen Funkübertragung befinden sich die Sende- und Empfangseinrichtungen auf der Erdoberfläche. Eine Ausnahme bildet der Flugfunk, also die Funkübertragung von und zu Flugzeugen, bei dem sich auch Sender, Empfänger und ihre Antennen in Flugzeugen befinden. Die Reichweiten und damit auch die Flächenabdeckung hängen bei der terrestrischen Funkübertragung von den jeweiligen Anwendungen und der genutzten Wellenlänge ab. In der Praxis wird Versorgung durch Einsatz von den Längstwellen bis zu den Dezimeterwellen erreicht. Durch den Bezug auf die Erdoberfläche lassen sich bei terrestrischer Funkübertragung auch leistungsstarke Sendeanlagen und große Antennenhöhen mit vertretbarem Aufwand realisieren.



Bei der **terrestrischen Funkübertragung** befinden sich die Sende- und Empfangseinrichtungen auf der Erdoberfläche oder in unmittelbarer Nähe zu ihr.

Vorstehende Ausführungen haben gezeigt, dass mit terrestrischen Sendern wegen der physikalischen Gesetzmäßigkeiten die Reichweiten für Funkverbindungen stets begrenzt sind. Diese Situation lässt sich durch Satellitenfunk erheblich verbessern. Dabei kommen Satelliten in definierter Höhe über der Erdoberfläche zum Einsatz.

Satelliten stellen autarke Relaisstellen im Weltraum dar, wobei für die **Satellitenfunkübertragung** mindestens zwei Funkstellen auf der Erde erforderlich sind. Eine sendende Bodenstation strahlt auf einer bestimmten Frequenz ihr Signal gerichtet zum Satelliten, dieser setzt es auf eine andere Frequenz um und strahlt es auch wieder gerichtet zur Erde zurück. Es wird dort von der empfangenden Bodenstation aufgenommen (**Bild 8.70**). Die erforderliche Richtwirkung wird durch Antennen mit sehr kleinem Öffnungswinkel (0,5...1,5 Grad) erreicht. Es werden Zentimeterwellen für die Übertragung genutzt, üblicherweise sind es Frequenzen des SHF-Bereichs mit zweistelligen GHz-Angaben.

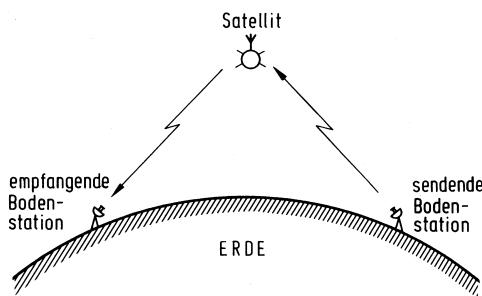


Bild 8.70 Satellitenfunkübertragung



Beispiel:

Für das Satellitenfernsehen wird für die Abstrahlung der Signale vom Satelliten zur Erde der Frequenzbereich 10,7 GHz bis 12,75 GHz verwendet.

Wird ein Satellit an eine beliebige Stelle im erdnahen Weltraum verbracht, dann ergibt sich für ihn eine Umlaufbahn um die Erde in Form einer Ellipse. Für den erdfernsten Punkt dieser Bahn gilt dabei die Bezeichnung Apogäum, während es sich bei dem erdnächsten Punkt um das Perigäum handelt. Der Satellit bewegt sich mit einer von der Ellipsengröße abhängigen Bahngeschwindigkeit und wir als umlaufender Satellit bezeichneten (**Bild 8.71**).

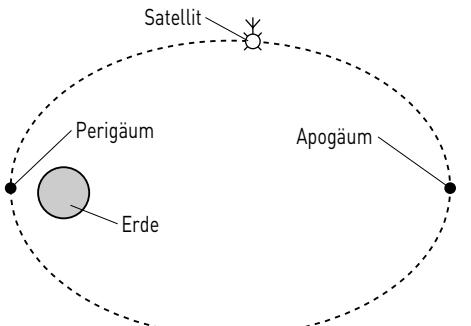


Bild 8.71 Umlaufender Satellit

Die elliptische Umlaufbahn geht in eine Kreisform über, wenn der Satellit in einer solchen Höhe über dem Äquator positioniert wird, dass seine Winkelgeschwindigkeit mit dem Wert für die Erddrehung übereinstimmt. Er bewegt sich dann synchron mit der Erde. Für den Beobachter auf der Erde wirkt er deshalb als im Raum feststehend. Für solche Satelliten gelten die Bezeichnungen geostationärer Satellit oder geosynchroner Satellit (**Bild 8.72**).

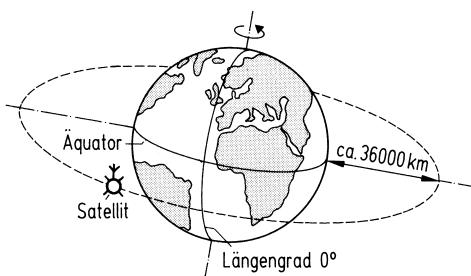


Bild 8.72 Geostationärer Satellit

Die Höhe eines geostationären Satelliten über der Erdoberfläche am Äquator muss etwa 36 000 km betragen. Dieser Wert h_{Sat} lässt sich aus den Gleichungen für die Winkelgeschwindigkeit ω von Satellit und Erde ermitteln. Es gilt:

$$\omega_{\text{Sat}} = \sqrt{\frac{g \cdot T_{\text{Erde}}}{r_{\text{Erde}} + h_{\text{Sat}}}} \quad (8.45)$$

$$\omega_{\text{Erde}} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{\text{Erde}}} \quad (8.46)$$

Die Gleichsetzung und Auflösung nach h_{Sat} führt zum gewünschten Ergebnis.



$$h_{\text{Sat}} = \sqrt[3]{\frac{g \cdot r_{\text{Erde}}^2 \cdot T_{\text{Erde}}^2}{4 \cdot \pi^2}} - r_{\text{Erde}} \quad (8.47)$$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$
 $r_{\text{Erde}} = 6400 \text{ km}$
 $T_{\text{Erde}} = 1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$

Die Position des geostationären Satelliten auf der äquatorialen Umlaufbahn heißt Orbitposition. Sie wird in Grad angegeben, wobei der durch Greenwich (England) verlaufende Längengrad 0° (Nullmeridian) als Bezug dient. Es ist deshalb ergänzend zur Gradzahl stets die Information erforderlich, ob sich die Orbitposition östlich oder westlich vom Nullmeridian befindet.



Orbitposition = Position eines geostationären Satelliten östlich oder westlich des Nullmeridians (Längengrad 0°).

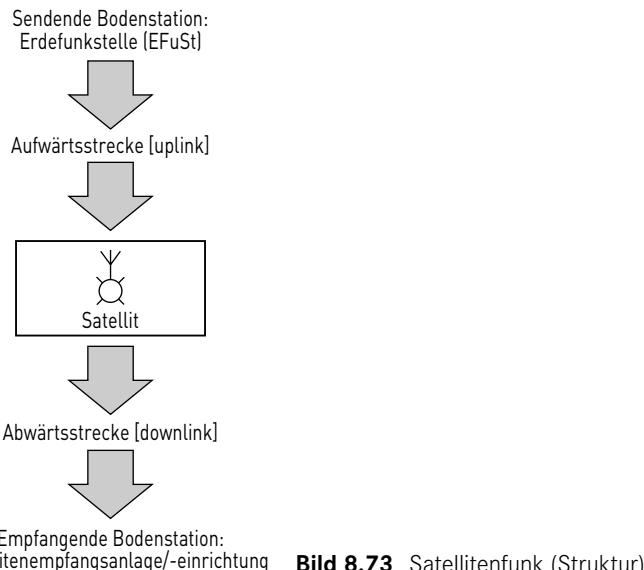


Beispiel:

Die Angabe der Orbitposition „ $19,2^\circ$ Ost“ bedeutet, dass sich der Satellit $19,2^\circ$ östlich des Nullmeridians in etwa 36 000 km Höhe über dem Äquator befindet.

Wie bereits aufgezeigt, sind für eine Satellitenfunkverbindung jeweils eine sendende und eine empfangende Bodenstation erforderlich. Für sendende Bodenstationen gilt die Bezeichnung Erdefunkstelle (EFuSt), bei den empfangenden Bodenstationen ist Satellitenempfangsanlage oder Satellitenempfangseinrichtung üblich. Die Funkfelder zwischen Satellit und Erde sind wie folgt unterscheidbar. Die Strecke von der Erdefunkstelle zum Satelliten heißt wegen der Wirkungsrichtung **Aufwärtsstrecke** [uplink], während die Bezeichnung für die Strecke vom Satelliten zur Satellitenempfangsanlage bzw. Satellitenempfangseinrichtung konsequenterweise **Abwärtsstrecke** [downlink] lautet (**Bild 8.73**).

Die Frequenzen für den Satellitenfunk liegen bekanntlich im GHz-Bereich, weil dabei einerseits die erforderlichen kleinen Öffnungswinkel für die Antennen mit vertretbarem Aufwand realisierbar sind und eine noch beherrschbare Dämpfung des Signals auftritt. Für die Aufwärtsstrecke kommen stets die größeren Frequenzen zum Einsatz, weil bei den Erdefunkstellen der Aufwand für die Erzeugung der Strahlungsleistungen im höherfrequenten Bereich eher möglich ist als beim Satelliten. Bei den für die Abwärtsstrecke verwendeten kleineren Frequenzen ist eine Dämpfung des Signals von etwa 200 dB zu berücksichtigen.

**Bild 8.73** Satellitenfunk (Struktur)**Beispiel:**

Der Abstand zwischen einem geostationären Satelliten und einer Satellitenempfangsanlage in Deutschland beträgt etwa 40 000 km. Wird eine Satellitenfunkverbindung auf der Frequenz 11,8 GHz betrieben, dann ergibt sich folgende Freiraumdämpfung:

$$a_0 = 20 \cdot \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot d \cdot f}{c_0} \text{ dB} = 20 \cdot \lg \frac{4 \cdot \pi \cdot 40 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot 11,8 \cdot 10^9 \text{ Hz}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \text{ dB} = 183,7 \text{ dB}$$

Das Signal vom Satelliten zur Erdoberfläche wird um 183,7 dB gedämpft.

Bei Satellitenfunk wird entweder lineare oder zirkulare Polarisation genutzt und zwar üblicherweise mit ihren beiden Varianten. Es handelt sich also entweder um horizontale und vertikale Polarisation oder um rechtsdrehende zirkulare und linksdrehende zirkulare Polarisation. Da die Polarisationsrichtungen jeweils orthogonal zueinander sind, ist eine gegenseitige Entkopplung gegeben und damit eine ökonomische Doppelnutzung der Frequenzen möglich.



Beim Satellitenfunk ermöglichen horizontale und vertikale Polarisation oder rechtsdrehende und linksdrehende Polarisation die frequenzökonomische Doppelnutzung der Übertragungskapazität.

Ein wesentliches Merkmal für Satellitenfunkverbindungen sind die von der Abwärtsstrecke auf der Erdoberfläche bewirkten Ausleuchtzonen [footprint]. Es handelt sich dabei um die Bereiche innerhalb der Konturlinie des kleinsten zulässigen Wertes der Leistungs-

flussdichte bzw. Feldstärke. Form und Größe jeder Ausleuchtzone hängen im Wesentlichen von der Antennenkonfiguration beim Satelliten ab.



Ausleuchtzone [footprint] = Bereich des auf der Erdoberfläche auftreffenden Satellitensignals, in dem ein vorgegebener Wert für die Leistungsflussdichte bzw. Feldstärke nicht unterschritten wird.

Der Satellit soll die von der Erdefunkstelle (EFuSt) abgestrahlten Signale empfangen und ohne weitere Verarbeitung in einer anderen Frequenzlage wieder aussenden. Diese als Durchschaltung bezeichnete Maßnahme kann unmittelbar in der hochfrequenten Lage erfolgen oder über den Umweg der Umsetzung in eine Zwischenfrequenz (ZF) oder auf das Basisband (BB).

Schaltungstechnisch erfolgt die Signalverarbeitung bei Satelliten durch **Transponder**, die jeweils eine definierte Bandbreite aufweisen. Derartige Baugruppen setzen das von der Erdefunkstelle (EFuSt) empfangene Signal auf die vorgesehene Sendefrequenz um. Mit Hilfe von der EFuSt fernsteuerbarer Antennenwahlschalter, auf der Empfangsseite als IMUX [input multiplexer] und auf der Sendeseite als OMUX [output multiplexer] bezeichnet, sind verschiedene Empfangs- bzw. Sendeantennen einsetzbar (**Bild 8.74**).

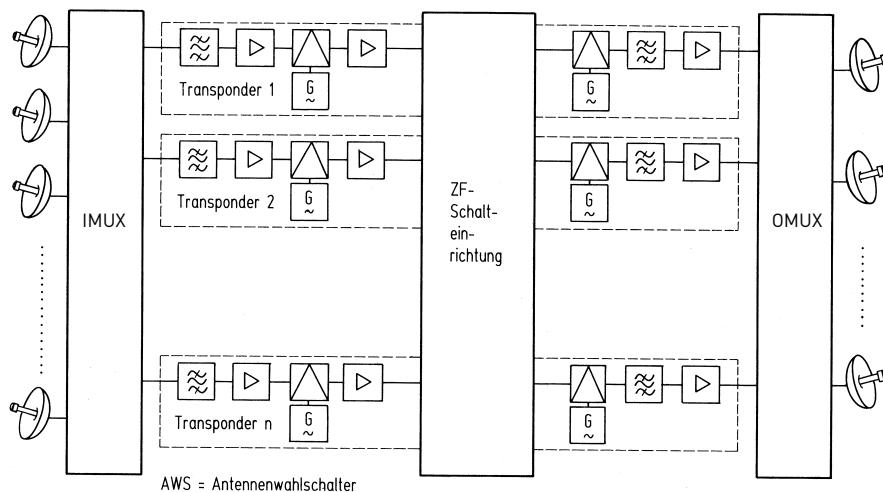


Bild 8.74 Satellit mit ZF-Durchschaltung



Transponder weisen eine definierte Bandbreite auf und setzen das empfangene Signal auf die Sendefrequenz um.

Da jeder Satellit ein autarkes, also von anderen Stellen unabhängiges, nachrichtentechnisches System darstellt, bedarf es auch einer entsprechenden Energieversorgung. Dafür hat sich bis auf Spezialfälle die Verwendung von Solarzellen durchgesetzt. Sie sind als große Flächen am Satelliten so angeordnet, dass sich ihre aktiven Seiten automatisch in

Richtung Sonne ausrichten. Es stehen dadurch 10 kW bis 15 kW elektrischer Leistung zur Verfügung. Die Energieversorgung zu Nachtzeiten wird üblicherweise durch Akkumulatoren sichergestellt und als Eklipseschutz bezeichnet (**Bild 8.75**).

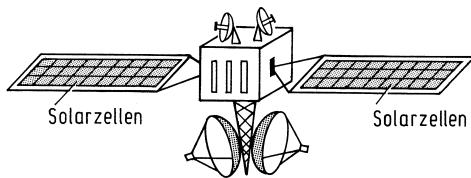


Bild 8.75 Satellit mit Energieversorgung über Solarzellen

Theoretisch ist die Lage eines geostationären Satelliten auf seiner Orbitposition konstant. Da jedoch die einwirkenden Schwerefelder von Erde, Mond und Sonne stets Schwankungen unterliegen, verändert auch der Satellit seine Lage im Raum. Wegen der gerichteten Funkverbindungen bedarf es der Lagekorrektur beim Satelliten, wenn die Abweichungen von der Sollposition einen bestimmten Wert überschreiten. Dies wird ermöglicht durch die automatische oder manuelle Fernsteuerung im Satelliten eingebauter kleiner Düsentriebwerke als Antriebsaggregate. Wie häufig diese Maßnahme möglich ist, hängt unmittelbar von der Treibstoffmenge ab, welche für die Aggregate in die Umlaufbahn mitgenommen wurde. Es handelt sich damit um ein Kriterium für die Lebensdauer [lifetime] des Satelliten.



Ein geostationärer Satellit erfordert Lagekorrektur, um Abweichungen von der Sollposition zu vermeiden.

Damit die Antenne der sendenden Bodenstation (EFuSt) stets optimal auf den Satelliten ausgerichtet ist, kann deren Nachführung [tracking] auf die jeweilige Satellitenposition manuell oder automatisch erfolgen. Dafür steht im Regelfall das Signal einer speziellen Funkbake des Satelliten zur Verfügung.



Die Sendeantenne der EFuSt wird ständig auf die Satellitenposition nachgeführt.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass die in den Leistungsverstärkern der Transponder eingesetzten Wanderfeldröhren funktionsbedingt auch nur eine begrenzte Lebensdauer aufweisen.

8.1.5 Portable Signalspeicher

Bei den portablen Signalspeichern kommen magnetische, optische und elektrische Verfahren für die Speicherung zum Einsatz.

Portable magnetische Signalspeicher für den Heimgebrauch, also den privaten Nutzer, werden auf dem Markt nicht mehr angeboten, da es inzwischen bessere Lösungen gibt. Über viele Jahre hatten sich die Magnetband-Videokassetten unter der Bezeichnung VHS-Kassetten durchaus bewährt, sie waren allerdings für das analoge Fernsehen konzipiert.

Es gibt allerdings durchaus professionelle Nutzungen von Magnetband-Kassetten, bei denen die Aufzeichnung mit hoher Qualität erfolgt. Ein typisches Beispiel sind Filmmarchive. Bei diesen ist ein schneller Zugriff auf bestimmte Stellen des gespeicherten Inhalts nicht erforderlich. Es geht vorrangig um die Signalqualität.

Eine besondere Variante der magnetischen Signalspeicher sind portable Festplattenspeicher. Sie werden als Wechselfestplatten bezeichnet, erfordern jedoch entsprechende Schnittstellen bei den dafür verwendeten Geräten. Mit derartigen Festplatten lassen sich große Datenmengen austauschen und einen schnellen Zugriff auf diese ermöglichen.



Portable magnetische Signalspeicher sind nur noch als Magnetband-Kassetten für professionelle Nutzungen und als Wechselfestplatten verfügbar.

Als **portable optische Signalspeicher** haben sich folgende Varianten durchgesetzt:

- CD [compact disc]
- DVD [digital versatile disc]
- BD [blu-ray disc]

Dabei handelt es sich in den meisten Fällen um bereits bespielte Speicher, die lediglich ausgelesen werden können. Dafür müssen verständlicherweise die als Spieler [player] bezeichneten Wiedergabegeräte geeignet sein. Auch wenn CD, DVD und BD dasselbe Speicherkonzept nutzen, so sind sie nicht unmittelbar kompatibel. Es gibt allerdings inzwischen auch Wiedergabegeräte, die alle drei Formen verarbeiten können.

Grundsätzlich besteht für die Nutzer aber auch die Möglichkeit, CDs, DVDs und BDs selber zu beschreiben, was mit „brennen“ bezeichnet wird. Dafür sind allerdings entsprechende Aufzeichnungsgeräte (sogenannte Brenner) erforderlich.



CDs, DVDs und BDs werden primär als Nur-Lese-Speicher verwendet, stehen aber auch als Schreib-Lese-Speicher zur Verfügung.

Portable elektrische Signalspeicher stellen die modernste und flexibelste Form dar, um digitale Signale zu speichern und einen schnellen Zugriff auf diese zu ermöglichen. Sie sind für den Heimgebrauch als steckbare Speicherkarten (Speicherchips) in unterschiedlichen Bauformen und mit verschiedenen Speicherkapazitäten für vielfältige Aufgaben im Einsatz. Im Regelfall werden die Speicherkarten ohne gespeicherte Informationen verkauft, sondern stehen für nutzereigene Daten zur Verfügung.



Beispiel:

Die Speicherkarte in einer Digitalkamera kann abhängig von ihrer Speicherkapazität durchaus Tausende vom Nutzer aufgenommene Bilder speichern und ermöglicht den schnellen und unkomplizierten Zugriff für die Wiedergabe.

Eine universelle Variante dieser Speicher sind in Stiftform aufgebaute elektrische Signalspeicher, die einen USB-Anschluss aufweisen und deshalb üblicherweise als USB-Sticks bezeichnet werden. Sie profitieren von der weiten Verbreitung der Schnittstelle USB [universal serial bus] bei Geräten der Informationstechnik (z. B. Notebook) und Unterhaltungselektronik. Die bisher erreichte Speicherkapazität von USB-Sticks liegt im zweistelligen GB-Bereich.



Mit steckbaren Speicherkarten und USB-Sticks kann der Nutzer vielfältige digitale Signale (Audio, Video, Daten) speichern und unproblematisch auf diese zugreifen.

Bei allen portablen elektrischen Signalspeichern ist zu berücksichtigen, dass die Einlesegeschwindigkeit und die Auslesegeschwindigkeit für die Daten unterschiedlich sein können. Es handelt sich dabei um vom jeweiligen Speicherhersteller abhängige Spezifikationen.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass in Kommunikationssystemen die in diesem Kapitel aufgezeigten Übertragungswege entweder einzeln oder in Kombination genutzt werden. So kommt zum Beispiel beim Mobilfunk abschnittsweise Funkübertragung, Übertragung mit elektrischen Leitungen und Übertragung mit optischen Leitungen zum Einsatz.

■ 8.2 Betriebsarten

Kommunikation stellt bekanntlich den Austausch von Information dar, die ein Kommunikationssystem ermöglichen soll. Teilnehmer (Tln) können dabei Menschen, als Einzelpersonen oder Gruppen, und/oder Maschinen sein. Für die Handhabung durch Menschen sind Endgeräte [terminal] erforderlich, während Maschinen selber die Funktion der Endgeräte wahrnehmen.



Endgeräte [terminal] ermöglichen die Handhabung der Kommunikation.



Beispiel:

Das Telefon ist ein Endgerät, das einer Person Sprachkommunikation mit einem anderen Teilnehmer ermöglicht. Beim Telefaxgerät handelt es sich dagegen um ein Endgerät für die Maschine-Maschine-Kommunikation für den Austausch von Texten, Grafiken und Festbildern zwischen den Teilnehmern.

Kommunikation findet stets zwischen mindestens zwei Endgeräten statt. Dabei lassen sich drei **Betriebsarten** [operation mode] unterscheiden.

Im einfachsten Fall läuft das Signal von dem Endgerät des Teilnehmers A in einer Richtung durch das Übertragungssystem zum Endgerät des Teilnehmers B. Diese Dialogform wird als **Simplexbetrieb**, Richtungsbetrieb oder unidirektonaler Betrieb bezeichnet (**Bild 8.76**).

**Bild 8.76** Simplexbetrieb

Beim Simplexbetrieb kann der Tln B also nur empfangen, was in verschiedenen Fällen auch durch den Begriff „receive only“ gekennzeichnet wird.

Diese Betriebsart stellt im Prinzip eine Einbahnstraße dar. Um den Austausch von Informationen zwischen den beiden Teilnehmern zu ermöglichen, muss die Verbindungsrichtung umschaltbar sein. Es besteht dann entweder eine Verbindung vom Tln A zum Tln B oder vom Tln B zum Tln A. Für diese Dialogform gilt dann die Bezeichnung **Halbduplexbetrieb**, Semiduplexbetrieb oder Wechselbetrieb (**Bild 8.77**).

**Bild 8.77** Halbduplexbetrieb

Beispiel:

Sprechfunkkommunikation arbeitet üblicherweise im Halbduplexbetrieb, um die verfügbaren Frequenzen optimal zu nutzen. Als erster Schritt erfolgt der Verbindungsaufbau vom Tln A zum Tln B auf der Frequenz f . Wenn er seine Informationen übertragen hat, dann signalisiert er das dem Tln B durch einen Signalton und/oder vereinbartes Kennwort (z.B. „Ende“ oder „over“). Erst danach kann Tln B über die Frequenz f eine Verbindung zum Tln A realisieren.



Beim Halbduplexbetrieb ist nur zeitlich gestaffelte Kommunikation zwischen den Teilnehmern möglich.

Für viele Anwendungen ist es hilfreich, wenn die Verbindung zwischen den Endgeräten in beiden Richtungen gleichzeitig besteht. Wird diese im Kommunikationssystem zur Verfügung gestellt, dann handelt es sich um **Voll duplexbetrieb**, Gegenbetrieb oder bidirektionalem Betrieb (**Bild 8.78**).

**Bild 8.78** Voll duplexbetrieb

Der Voll duplexbetrieb ermöglicht gleichzeitige Kommunikation zwischen den Teilnehmern. Dies lässt sich wie folgt realisieren:

- Verwendung separater Verbindungswege (Leitung oder Funk) vom Tln A zum Tln B und vom Tln B zum Tln A
- Einsatz von zwei unterschiedlichen Frequenzen über einen Verbindungsweg
- Frequenzmäßige oder zeitliche Staffelung der Kommunikation über einen Verbindungsweg

Für die frequenzmäßige Staffelung gilt die Bezeichnung FDD [frequency division duplex], bei der zeitlichen Staffelung ist es TDD [time division duplex].

Bei **TDD** wird also dieselbe Frequenz für den Hin- und Rückkanal genutzt, allerdings zu verschiedenen Zeiten. Es erfolgt eine periodische Umschaltung zwischen den beiden Kanälen im Rahmen eines Ping-Pong-Verfahrens. Dadurch ist der technische Aufwand kleiner als bei FDD und die uneingeschränkte Nutzbarkeit für Antennen-Diversity gegeben.

FDD verwendet für den Hin- und Rückkanal verschiedene Frequenzen. Gegenüber TDD stehen damit beide Kanäle ständig, also ohne zeitliche Unterbrechungen, zur Verfügung. Das bedeutet eine größere Übertragungskapazität. Bedingt durch die unterschiedlichen Frequenzen für den Hin- und Rückkanal können allerdings die Übertragungseigenschaften voneinander abweichen. Maßgebend ist der Abstand zwischen den Frequenzen für die beiden Kanäle, der auch als Duplexabstand bezeichnet wird.

Bei den aufgezeigten Betriebsarten spielt es grundsätzlich keine Rolle, ob analoge oder digitale Signale übertragen werden. Bei digitaler Übertragung muss außerdem sichergestellt werden, dass sendendes und empfangendes Endgerät für die aus mehreren Bits bestehenden Zeichen (= Datenworte) im Gleichlauf (also synchron) arbeiten, weil sonst Übertragungsfehler auftreten.



Bei digitaler Übertragung ist Gleichlauf (= Synchronität) zwischen sendendem und empfangendem Endgerät erforderlich.

Bei synchroner digitaler Übertragung wird der Gleichlauf zwischen den Endgeräten durch ein konstantes Taktsignal ständig sichergestellt. Sendung und Empfang erfolgen also mit gleicher Taktfrequenz.

Im Falle der asynchronen digitalen Übertragung ist nur bei jedem einzelnen Zeichen eine momentane Synchronität zwischen sendendem und empfangendem Endgerät gegeben. Das wird durch geeignete Startsignale am Anfang und Stoppsignale am Ende jedes Zeichens bewirkt.



Synchroner Betrieb = Ständig gleiche Taktfrequenz bei den Endgeräten

Asynchroner Betrieb = Nur während der Übertragung der einzelnen Zeichen gleiche Taktfrequenz bei den Endgeräten

Bei größeren Kommunikationssystemen kann die Sicherstellung der gleichen Taktfrequenz durchaus einen erheblichen Aufwand erfordern.

Bedingt durch die erforderlichen Start- und Stoppsignale sind beim asynchronen Betrieb die erreichbaren Netto-Bitraten stets kleiner als die bei synchronem Betrieb.

Bei jeder Kommunikation sind hinsichtlich des zeitlichen Zugriffs zwei Varianten möglich, nämlich online und offline. Online bedeutet Kommunikation in Echtzeit [realtime], der Dialog erfolgt dabei simultan. Bei offline ist dagegen stets eine Zwischenspeicherung gegeben, was durch den Begriff „store and forward“ gekennzeichnet wird. Der Abruf bzw. die Weiterleitung der Informationen weist deshalb stets einen Zeitversatz auf.



Online = Kommunikation in Echtzeit [realtime]

Offline = Kommunikation mit Zeitversatz durch Zwischenspeicherung [store and forward]

Die Wahl der Betriebsart für ein Kommunikationssystem hängt stets von der vorgesehenen Anwendung, der technischen Machbarkeit und den ökonomischen Randbedingungen ab.

■ 8.3 Nutzungsverfahren

Es gibt zahlreiche Aspekte für die Nutzung von Kommunikationssystemen, die für den Nutzer als Teilnehmer einzeln, aber auch in ihrer Gesamtheit von Interesse sind.

Eine grundsätzliche Unterscheidung für den Zugriff auf übertragene Informationen besteht darin, ob dies für den Nutzer mit Entgelten verbunden ist oder keine Kosten entstehen. Es sind somit für die angebotenen Dienste folgende Varianten unterscheidbar:

- **Entgeltfreie Dienste** [free service]
Für die Nutzung der Dienste sind keine Entgelte erforderlich.
- **Entgeltpflichtige Dienste** [pay service]
Für die Nutzung der Dienste sind Entgelte zu entrichten.

Entgeltpflichtige Dienste werden auch als Bezahltdienste bezeichnet. Für diese ist stets eine vertragliche Regelung zwischen Dienstanbieter und Teilnehmer erforderlich.

Der Zugang zu Bezahltdiensten wird im Regelfall durch geeignete Maßnahmen geschützt, damit nur autorisierte Teilnehmer darauf zugreifen können. Dabei handelt es sich üblicherweise um Verfahren, die mit dem Sammelbegriff Verschlüsselung bezeichnet werden. Eindeutiger ist hier allerdings der englische Begriff **Conditional Access (CA)**, was bedingter Zugang heißt und den Zugang unter der Bedingung eines entsprechenden Vertrags und der Zahlung der vereinbarten Entgelte meint. Die Authentifizierung des berechtigten Nutzers erfolgt dabei durch Einsatz einer als Smartcard oder SIM [subscriber identification module] ausgeprägten Chipkarte und/oder PIN [personal identification number].



Schutz vor unbefugtem Zugriff auf Bezahltdienste durch Verschlüsselung [conditional access (CA)].

Neben dem Zugang zu den Informationen kann auch deren Nutzung vorgegeben werden, zum Beispiel die Speichermöglichkeit. Dies basiert dann auf dem Urheberrecht und wird als **DRM [digital rights management]** bezeichnet.

Die Eigenschaft eines Dienstes wird auch durch die Methode des Zugriffs gekennzeichnet. Hier ist zwischen Verteildiensten und Abrufdiensten zu unterscheiden. Bei Verteildiensten werden die Informationen den Endgeräten der Teilnehmer automatisch zugeführt. Dieser „Bring-Dienst“ wird auch als Push-Dienst [push service] bezeichnet. Bei Abrufdiensten handelt es sich dagegen um „Hol-Dienste“, die auch als Pull-Dienste [pull service] bezeichnet werden. Der Nutzer muss dabei durch eigene Aktivitäten den Zugriff bewirken.



Verteildienste („Bring-Dienste“) [push service] = Dienste werden automatisch zum Endgerät des Teilnehmers (Nutzers) gebracht.



Abrufdienste („Hol-Dienste“) [pull service] = Der Teilnehmer (Nutzer) muss diese Dienste einzeln anfordern.

Während der klassische Rundfunk als Radio (Hörfunk) und Fernsehen ein typischer Verteildienst ist, handelt es sich bei einer Recherche im Internet stets um einen Abrufdienst.

Für Abrufdienste wird auch der Begriff „On Demand“ verwendet. So gilt beispielsweise für das Angebot des Zugriffs auf elektronische Videotheken die Bezeichnung VoD [video on demand]. Das bedeutet:

Jeder Abrufdienst ist ein „On Demand Service“.

Bei den aufgezeigten Nutzungsverfahren sind alle Kombinationen möglich. So kann jeder Verteildienst und jeder Abrufdienst entgeltfrei oder entgeltpflichtig sein und der Inhaltschutz im Bedarfsfall durch CA/DRM erfolgen. Bezogen auf entgeltpflichtige Dienste gibt es verschiedene Varianten für die Bezahlung:

- Abrechnung nach Nutzungsdauer
- Abrechnung nach Datenmenge (z. B. 100 MB)
- Monatlicher Festpreis ohne Begrenzung der Nutzungsdauer und Datenmenge
- Vorauszahlung [prepaid] und Abrechnung der Nutzung von diesem Guthaben

Für den monatlichen Festpreis gilt üblicherweise die Bezeichnung Flatrate [flat rate]. Bei Verträgen mit einer solchen Flatrate sollten allerdings stets die möglichen Randbedingungen für die Nutzung der Dienste beachtet werden. So kann es sich beispielsweise um Beschränkungen bei der Datenmenge und/oder Datenrate handeln.

Während die Flatrate im Prinzip ein Abonnement darstellt und sich für die regelmäßige Nutzung von Diensten bewährt hat, ist die Prepaid-Version besonders für Gelegenheitsnutzung bestens geeignet.



Beispiel:

Beim Mobilfunk ist neben der Abrechnung nach Nutzungsdauer oder Flatrate in der Regel auch Prepaidnutzung möglich. Dabei wird das SIM [subscriber identification module] im Handy elektronisch auf einen bestimmten Betrag aufgeladen. Dieses Guthaben steht nun für den Betrieb zur Verfügung und reduziert sich nutzungsabhängig. Im Bedarfsfall muss nachgeladen werden.

Bei allen Prepaid-Nutzungen kommt also das von der Geldkarte bekannte Konzept zum Einsatz.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass bei allen Nutzungsverfahren auch die Bedienfreundlichkeit von Interesse ist. Dafür gilt auch die Bezeichnung Usability.

9

Schaltungstechnische Funktionseinheiten

■ 9.1 Einführung

Jedes Kommunikationssystem besteht aus verschiedenen schaltungstechnischen Funktionseinheiten. Dabei kann es sich um Geräte [device], eigenständige Baugruppen [unit] oder die Zusammenschaltung von Komponenten [component] handeln.

Geräte sind stets aktive Eintore oder Zweitore, bestehen häufig aus verschiedenen Baugruppen, haben eine eigene Stromversorgung und sind meist auch portabel nutzbar, was Eigenständigkeit bedeutet.

Schaltungstechnische Funktionseinheiten sind stets durch umfangreiche Spezifikationen gekennzeichnet. Diese können aus den jeweiligen Datenblättern oder Gerätedokumentationen ersehen werden. Wegen des Zusammenwirkens der Funktionseinheiten im Kommunikationssystem sind besonderes ihre Eingangssignale und/oder Ausgangssignale hinsichtlich des Zeit- und Frequenzverhältnisses von Bedeutung. Aus diesen lässt sich auch die jeweilige Funktionsweise erkennen oder zumindest ableiten.

Für eine grobe Einteilung der schaltungstechnischen Funktionseinheiten lassen sich die Frequenz und die Art der Signale am Eingang bzw. Ausgang heranziehen. Bei Bezug auf die Frequenz handelt es sich entweder um den Niederfrequenzbereich (NF-Bereich), den Hochfrequenzbereich (HF-Bereich) oder den Höchstfrequenzbereich. Bei den Signalarten lassen sich unterscheiden:

- Audiosignale
- Videosignale
- Daten

Da es sich bei digitalen Audiosignalen, digitalen Videosignalen und Daten physikalisch um digitale Signale handelt, wird in der Praxis nur im Bedarfsfall zwischen den drei Formen unterschieden, sondern in der Regel ausschließlich der Begriff Daten genutzt. In speziellen Fällen sind zur Präzisierung auch die Bezeichnungen Audiodaten und Videodaten üblich.

Es sollen nun die für Kommunikationssysteme wesentlichen schaltungstechnischen Funktionseinheiten hinsichtlich ihrer Funktion und Leistungsmerkmale betrachtet werden.

■ 9.2 Verstärker

Verstärker [amplifier] sind schaltungstechnische Funktionseinheiten, die als aktive Zweitore dazu dienen, ein dem Eingang zugeführtes Signal so zu verarbeiten, dass es am Ausgang einen größeren Pegel aufweist, jedoch mit möglichst unverändertem Signalverlauf. Jeder Verstärker ist deshalb durch das Verstärkungsmaß gekennzeichnet, welches in den meisten Fällen im zweistelligen dB-Bereich liegt. Abhängig von der jeweiligen Aufgabenstellung kann auch ein variables Verstärkungsmaß erforderlich sein. Deshalb sind folgende Varianten zu unterscheiden:

- Verstärker mit festem Verstärkungsmaß
- Verstärker mit einstellbarem Verstärkungsmaß

Für den zweiten Fall ist verständlicherweise auch eine Information erforderlich, in welchem Bereich das Verstärkungsmaß verändert werden kann.

Eine wichtige Kenngröße für Verstärker ist auch deren Bandbreite für analoge Signale bzw. die mögliche Bitrate bei digitalen Signalen. Die Bandbreite ist bekanntlich durch die beiden Frequenzen definiert, bei denen der Amplituden-Frequenzgang bezogen auf den Wert bei einer Referenzfrequenz um 3 dB zurückgegangen ist. Dadurch sind die untere und obere Grenzfrequenz bestimmt. Abhängig von deren Abstand zueinander ist folgende Einteilung möglich:

- Schmalband-Verstärker
- Breitband-Verstärker

Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass Schmalbandigkeit und Breitbandigkeit stets relativ sind, also den Bezug auf einen Frequenzbereich erfordern. Bei diesem kann es sich um den NF-Bereich oder den HF-Bereich handeln, aber auch um Teilbereiche von diesen. Das führt zu folgendem Einteilungskriterium:

- Niederfrequenz-(NF-)Verstärker
- Hochfrequenz-(HF-)Verstärker

Im Idealfall würde ein Verstärker im Bereich seiner Bandbreite einen konstanten Verlauf des Frequenzganges aufweisen. In der Praxis weist jedoch der Amplituden-Frequenzgang mehr oder weniger starke Schwankungen auf. Diese Welligkeit darf bei der Verstärkung analoger Signale abhängig vom Einzelfall bestimmte Werte nicht überschreiten. Bei digitalen Signalen ist dagegen die Konstanz des Phasen-Frequenzganges von Bedeutung, um Übertragungsfehler zu vermeiden.

Da es sich bei Verstärkern um aktive Funktionseinheiten handelt, treten auch zusätzliche Rauschsignale auf, gekennzeichnet durch die Rauschzahl F . Dessen Wert beeinflusst unmittelbar den Störabstand, was vorrangig bei Verstärkern im Hochfrequenzbereich zu berücksichtigen ist. Deshalb sind Verstärker mit kleinen Rauschzahlen stets zu bevorzugen.

Die Arbeitskennlinie eines Verstärkers ist theoretisch eine Gerade, deren Steigungswinkel den Grad der Verstärkung kennzeichnet. Jede Abweichung vom idealen Verlauf führt zu

Mischvorgängen bei den Spektralanteilen des Eingangssignals. Das Ergebnis sind dann zusätzliche Anteile im Ausgangssignal, die als Intermodulationsprodukte bezeichnet werden und den Störabstand verringern.

■ 9.3 Sender

In der Nachrichtentechnik sind Sender [transmitter oder sender] Funktionseinheiten, die als aktive Zweitore ihren Eingang zugeführte analoge oder digitale Signale durch geeignete Verfahren (z. B. Modulation) so aufbereiten, dass sich ein Ausgangssignal ergibt, welches für einen vorgegebenen Übertragungskanal geeignet ist. Bei diesem kann es sich um eine Leitungsverbindung oder eine Funkverbindung handeln. Deshalb lassen sich folgende Senderarten unterscheiden:

- Leitungssender
- Funksender

Während Leitungssender im NF- und HF-Bereich zum Einsatz kommen, ist es bei den Funksendern, von speziellen Anwendungen abgesehen, nur der Hochfrequenzbereich.



Sender stellen für den Übertragungskanal aufbereitete Signale zur Verfügung.

Jeder Sender erfordert bestimmte Pegel beim Eingangssignal und stellt eine definierte Leistung am Ausgang bereit. Diese wird bei Leitungssendern unmittelbar in den durch Kabel realisierten Übertragungskanal eingespeist, während bei Funksendern stets eine Antenne an den Ausgang angeschlossen ist, welche die Funkverbindung bewirkt.

Im Falle von Funkverbindungen muss bei Leistungsangaben stets zwischen der Ausgangsleistung des Senders und der durch die Antenne hervorgerufenen Strahlungsleistung unterschieden werden. Beide Werte sind lediglich dann gleich, wenn das Gewinnmaß der Antenne 0 dB betragen würde. Es ist also immer der Antennengewinn zu berücksichtigen.

■ 9.4 Empfänger

Vergleichbar den Sendern sind auch Empfänger [receiver] aktive Zweitore. Sie nehmen übertragene Signale auf und stellen diese nach entsprechender Verarbeitung (z. B. Demodulation) für die weitere Nutzung zur Verfügung. Für diese Funktion benötigen sie allerdings immer einen Mindestpegel beim Eingangssignal, was üblicherweise als Empfindlichkeit [sensitivity] bezeichnet wird. Es sind folgende Empfängervarianten grundsätzlich unterscheidbar:

- Leitungsempfänger
- Funkempfänger

Bei Funkempfängern spielt die vorgeschaltete Empfangsantenne eine wesentliche Rolle, weil von deren Antennengewinn der Eingangspegel abhängig ist.



Empfänger verarbeiten vom Übertragungskanal bereitgestellte Signale.

Bei allen Empfängern spielt die Spezifizierung der Ausgangssignale eine wesentliche Rolle. Dabei sind auch die möglichen Abweichungen vom gesendeten Signal von Bedeutung. Es sei darauf hingewiesen, dass auch Empfänger zur Reduzierung des Störabstandes beitragen, weil sie durch ihre Elektronik ebenfalls zusätzliche Rauschsignale hervorrufen.

Jeder Empfänger benötigt für seine bestimmungsgemäße Funktion einerseits das bereits erwähnte Mindesteingangssignal, andererseits darf allerdings auch ein bestimmter großer Wert nicht unterschritten werden, weil sonst Übersteuerung eintritt.

Da jeder Empfänger komplementär zu einem Sender arbeitet, muss er für die gesendete Frequenz, aber ebenso für die Bandbreite des jeweiligen Signals ausgelegt sein. Für viele Anwendungen ist die Empfangsfrequenz in weiten Grenzen einstellbar. Ein typisches Beispiel stellt das Radio dar.

■ 9.5 Filter und Weichen

Filter sind Zweitore, die den Amplitudenfrequenzgang eines zugeführten Signals definiert beeinflussen. Dabei handelt es sich um Funktionseinheiten, die als aktive oder passive Schaltungen aufgebaut sein können.

Bei den Filtern sind folgende Varianten unterscheidbar:

- **Tiefpass** [lowpass]
Dieser lässt nur Signale **unterhalb** einer definierten Grenzfrequenz f_g passieren.
- **Hochpass** [highpass]
Dieser lässt nur Signale **oberhalb** einer definierten Grenzfrequenz f_g passieren.
- **Bandpass** [bandpass]
Dieser lässt nur Signale passieren, die **zwischen** einer definierten unteren Grenzfrequenz f_u und einer definierten oberen Grenzfrequenz f_o liegen.
- **Bandsperrre** [bandstopp]
Dieser lässt nur Signale passieren, die **unterhalb** einer definierten unteren Grenzfrequenz f_u und **oberhalb** einer oberen Grenzfrequenz f_o liegen.

Die Übergänge zwischen Durchlass und Sperrung verlaufen theoretisch sprunghaft, in der Praxis lässt sich allerdings nur eine endliche Flankensteilheit realisieren. Dabei ist folgender Zusammenhang zu berücksichtigen:

Je steiler die Flanke verläuft, desto größer werden die Überschwinger bei den Amplituden zum Durchlassbereich und Sperrbereich, was zu einer störenden Beeinflussung des Signals führt.

Die Angabe der Flankensteilheit erfolgt als auf die Frequenz bezogenes Dämpfungsmaß, also in dB/kHz oder dB/MHz. Dies bedeutet:

- Großes Dämpfungsmaß → Steile Flanke
- Kleines Dämpfungsmaß → Flache Flanke

Die Flankensteilheit stellt ein wichtiges Qualitätskriterium für jeden Filter dar. Dabei ist anzumerken, dass bei vergleichbarem Aufwand mit aktiven Filtern steilere Flanken erreichbar sind als mit passiven Filtern, die lediglich Kapazitäten und Induktivitäten nutzen.

Neben der Flankensteilheit spielt bei Filtern auch der Amplitudenverlauf im Durchlassbereich und im Sperrbereich eine Rolle. Dieser soll möglichst geradlinig sein, wobei auftretende Abweichungen davon häufig als Ripple bezeichnet werden. Der zulässige oder auftretende Bereich dafür wird in Dezibel (dB) angegeben, als Bezug dient der ideale geradlinige Verlauf.



Beispiel:

Wird für einen Filter als gemessener Wert für den Ripple +3 dB/-1 dB angegeben, dann sind die Amplituden bis 3 dB größer und bis zu 1 dB kleiner als der Idealwert von 0 dB.

Jeder Filter ist auch dadurch gekennzeichnet, welche Dämpfung es im Durchlassbereich für das Nutzsignal bewirkt. Diese Durchlassdämpfung sollte verständlicherweise möglichst kleine Werte aufweisen.



Mit Filtern werden von einem zugeführten Signal nur definierte Frequenzbereiche durchgelassen und vorgegebene Frequenzbereiche gesperrt.

Weisen bei einer Bandsperre die beiden Grenzfrequenzen nur einen sehr geringen Abstand auf, dann gilt üblicherweise die Bezeichnung **Kerbfilter** [notch filter], weil der Amplitudenverlauf nur einen schmalen Einbruch aufweist.

Der Spezialfall eines Filters liegt vor, wenn das Eingangssignal in zwei oder mehr festgelegte Frequenzbereiche aufgeteilt wird. Es ist dann ein Mehrtor gegeben, an dessen Ausgängen jeweils die durch eine untere und obere Grenzfrequenz gekennzeichneten Signale zur Verfügung stehen. Es liegt dann der Fall einer Frequenzweiche mit den bereits aufgezeigten Problemen der Flankensteilheit vor.



Frequenzweichen bewirken die Aufteilung des Eingangssignals in unterschiedliche Frequenzbereiche.

Eine besondere Variante ist bei Filtern gegeben, wenn ein ausgewählter Frequenzbereich an mehreren Ausgängen zur Verfügung stehen soll. Es handelt sich dann um einen **Verteiler**, der in passiver oder aktiver Schaltungstechnik ausgeführt sein kann. Abhängig von der Zahl der gleichwertigen Ausgänge lassen sich Zweifachverteiler, Dreifachverteiler usw. unterscheiden.

Bei Filtern, Frequenzweichen und Verteilern ist stets zu berücksichtigen, welche Dämpfung das Nutzsignal durch diese schaltungstechnischen Funktionseinheiten erfährt. Bei passiven Varianten ist diese durch die Verluste der eingesetzten Bauelemente bedingt, kann aber in der Regel auf 1 dB bis 2 dB begrenzt werden. Mit aktiven Schaltungen ist dagegen stets eine Einfügedämpfung von 0 dB erreichbar.

■ 9.6 Umsetzer

9.6.1 Einführung

In Kommunikationssystemen besteht häufig der Bedarf von einer Signalform in eine andere zu wechseln. Für solche Übergänge kommen Umsetzer [converter] zum Einsatz, die häufig auch als Wandler bezeichnet werden. Es handelt sich dabei stets um aktive Zweitore.

Da Audio- und Videosignale im Ursprung stets analog sind und für die Wiedergabe auch wieder diese Form haben müssen, ist bei digitalen Übertragungssystemen auf der Sendeseite immer eine Umwandlung von analog in digital erforderlich und auf der Empfangsseite die Rückwandlung von digital in analog. Beide Vorgänge sollen dabei so erfolgen, dass die Abweichungen des analogen Signals auf der Empfangsseite von dem auf der Sendeseite möglichst klein bleiben. Zur Erfüllung der vorstehend beschriebenen Aufgabe sind folgende schaltungstechnische Funktionseinheiten erforderlich:

- **Analog-Digital-Umsetzer (ADU)** [analog-to-digital converter (ADC)]
(auf der Sendeseite)
- **Digital-Analog-Umsetzer (DAU)** [digital-to-analog converter (DAC)]
(auf der Empfangsseite)

9.6.2 Analog-Digital-Umsetzer

Durch Analog-Digital-Umsetzer (ADU) werden also analoge (= vielwertige) Eingangssignale in digitale (= zweiwertige) Ausgangssignale umgesetzt (**Bild 9.1**).

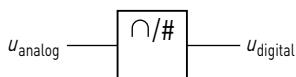


Bild 9.1 Schaltzeichen für ADU

Jeder ADU ist durch eine Umsetzerkennlinie mit stufigem Verlauf gekennzeichnet. Durch diese wird jedem Teilbereich der analogen Eingangsspannung ein aus mehreren Bits bestehendes Datenwort zugeordnet, dessen Ausgabe seriell oder parallel erfolgen kann. So ist dem im **Bild 9.2** markierten ersten Teilbereich des analogen Eingangssignals das Datenwort 101 zugeordnet, bei dem markierten zweiten Teilbereich ist es das Datenwort 011. Bei den Teilbereichen handelt es sich im Regelfall um konstante Zeitabschnitte.

Die Genauigkeit der Umsetzung hängt davon ab, wie viele Stufen die Umsetzerkennlinie aufweist. Je feiner die Stufung, desto länger werden allerdings die Datenworte.

Die maximale Zahl der Stufen einer Umsetzerkennlinie wird als Auflösung bezeichnet. Sie bezieht sich stets auf den zulässigen Gesamtbereich des analogen Eingangssignals, wobei für diesen auch die Abkürzung FS [full scale] üblich ist. Die Angabe der Auflösung erfolgt als Anzahl der Bits, welche für die Stufenzahl benötigt wird. So sind bei einer Auflösung von 8 bit maximal $2^8 = 256$ Stufen möglich.

Die Umsetzerkennlinie eines ADU kann gleichmäßige oder ungleichmäßige Stufen aufweisen. Im Fall der ungleichmäßigen Stufung werden bestimmte Eingangsspannungsbereiche in mehr Datenworte umgesetzt, während es bei den anderen weniger Datenworte sind.

 Die Stufung der ADU-Umsetzerkennlinie kann gleichmäßig oder ungleichmäßig sein.

Weicht der Verlauf der Umsetzerkennlinie von seiner vorgegebenen Form ab, dann ist die Umwandlung fehlerbehaftet. Bei Verschiebung der Kennlinie nach rechts oder links handelt es sich um Offsetfehler, während bei Abweichung von der ursprünglichen Steigung Verstärkungsfehler vorliegen. Beide Mängel sind im Regelfall abgleichbar. Dies gilt jedoch nicht, wenn die Kennlinie vom linearen Verlauf abweicht und eine gekrümmte Form aufweist. Es handelt sich dann um Linearitätsfehler.

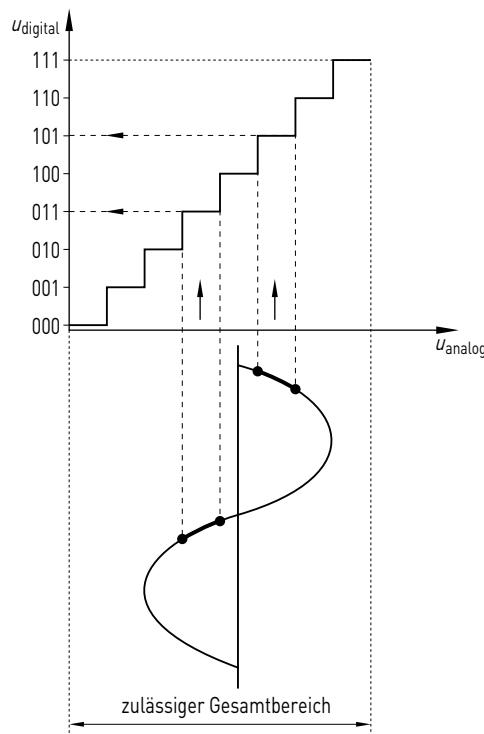


Bild 9.2 Analog-Digital-Umsetzung



Bei der ADU-Umsetzerkennlinie können Offsetfehler, Verstärkungsfehler und Linearitätsfehler auftreten.

Jeder ADU benötigt für die Umsetzung eines analogen Eingangswertes in ein Datenwort eine bestimmte Wandlungszeit [conversion time], die auch als Umsetzyklus bezeichnet wird. Dies führt zu einer Begrenzung der Bitrate des Ausgangssignals und über die Taktfrequenz für die Abtastung des analogen Eingangssignals ebenso zu einer maximal zulässigen Frequenz für dieses Signal. Die vom ADU realisierbare Bitrate wird deshalb als Arbeitsgeschwindigkeit bezeichnet, während die Umsetzfrequenz angibt, welche Frequenz das Eingangssignal für welche Datenwortlänge aufweisen darf (z. B. bis 10 MHz bei 8 bit). Je größer die Frequenz sein soll, desto kürzer werden die Datenworte. Umgekehrt sind bei kleineren Frequenzen längere Datenworte möglich.

Ein einfaches schaltungstechnisches Konzept für einen ADU ist der Einsatz eines **Spannungs-Frequenz-Umsetzers**. Dabei wird die analoge Eingangsspannung in eine Pulsfolge umgesetzt, deren Frequenz der Spannung proportional ist. Die Zahl der während einer festgelegten Torzeit ermittelten Impulse lässt sich dann als digitales Signal ausgeben.

Eine andere Möglichkeit für die Analog-Digital-Umsetzung besteht im Vergleich des jeweils abgetasteten Spannungswertes mit in Zweierpotenz gestuften Vergleichsspannungen, was als **Stufenumsetzer** bezeichnet wird. Die jeweilige Eingangsspannung bewirkt über einen Differenzverstärker, dass die Steuerschaltung beim elektronischen Schalter die Einschaltung der entsprechenden Vergleichsspannung auslöst. Diese kennzeichnet dann unmittelbar das digitale Signal (**Bild 9.3**). Wegen der Funktionsweise von Stufenumsetzern spricht man auch vom Wägeverfahren oder sukzessiver Approximation.

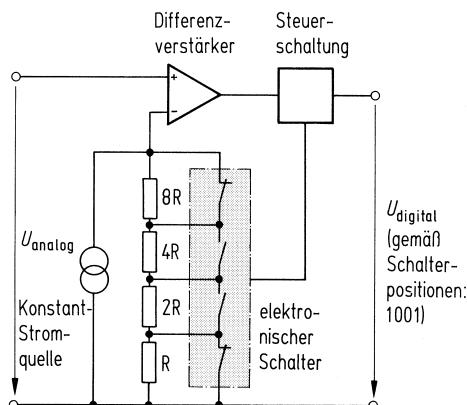


Bild 9.3 Stufenumsetzer (ADU)

Die analoge Eingangsspannung kann auch mit einer sägezahnförmigen Spannung verglichen werden. Dabei ist die Zeit maßgebend, bis der Sägezahn den Wert der Eingangsspannung erreicht. Dies wird durch Impulse mit definiertem Abstand ermittelt. Bei kleinen Werten der Eingangsspannung ergeben sich wenige Zählimpulse, während bei großen Werten entsprechend mehr Zählimpulse auftreten. Die Zahl der Impulse ist ein direktes Maß für die Eingangsspannung. Sie kann unmittelbar als digitales Signal ausgegeben werden. Das beschriebene Wandlerkonzept wird als Sägezahn-Umsetzverfahren oder Ein-Rampen-Verfahren bezeichnet (**Bild 9.4**).

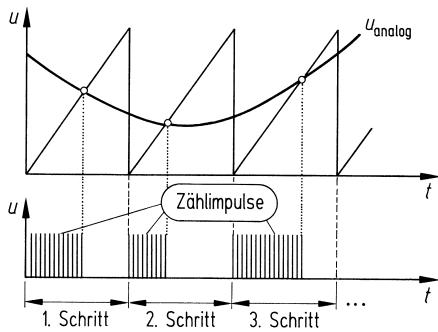


Bild 9.4 Sägezahn-Umsetzverfahren

Ein anderes Verfahren für Analog-Digital-Umsetzung verwendet ebenfalls Zählimpulse. Es handelt sich um das **Dual-Slope-Verfahren (Zwei-Rampen-Verfahren)**. Dabei lädt der für einen Abtastzeitpunkt gegebene Wert der Eingangsspannung für die konstante Zeit t_1 einen Kondensator auf. Danach erfolgt die Entladung bezogen auf eine Referenzspannung. Die Entladezeit t_2 ist ein direktes Maß für die Eingangsspannung, da von ihr die Aufladung des Kondensators abhängt (**Bild 9.5**). Der Name des Verfahrens erklärt sich aus den durch Aufladung und Entladung gegebenen beiden Rampen [slopes] im Spannungs-Zeit-Diagramm.

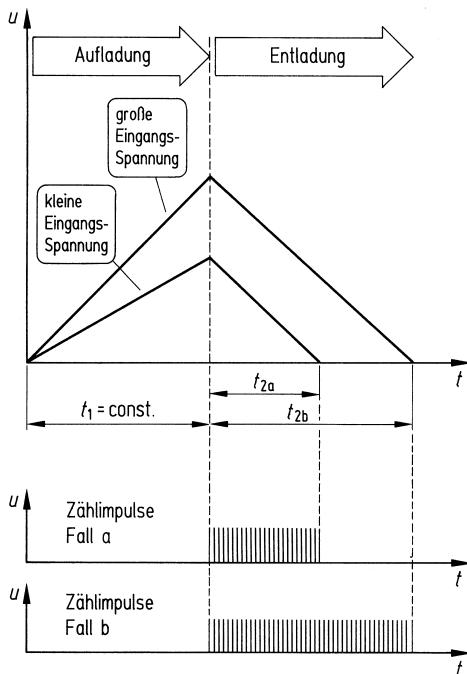


Bild 9.5 Dual-Slope-Verfahren

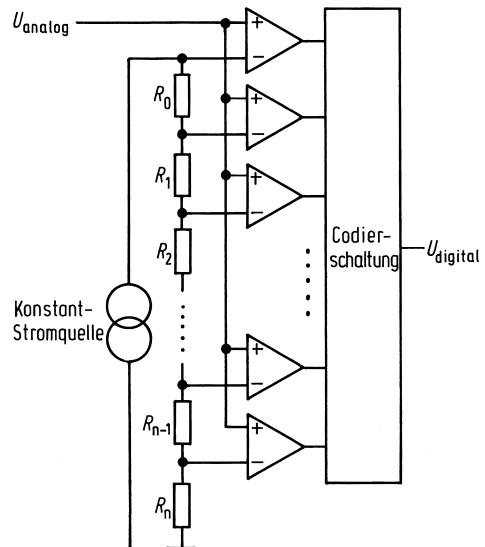


Bild 9.6 Parallelumsetzer (ADU)

Ein schaltungstechnisch aufwendiges Verfahren für Analog-Digital-Umsetzer kommt bei **Parallelumsetzern [flash converter]** zum Einsatz. Ähnlich dem Stufenumsetzer werden

auch hier mit Hilfe einer Konstantstromquelle Referenzspannungen gebildet und zwar bezogen auf die Stufung der Eingangsspannung, die für eine vorgesehene Auflösung erforderlich ist. Soll beispielsweise die Auflösung 8 bit betragen, dann sind 256 Referenzspannungen erforderlich. Der Vergleich mit dem analogen Eingangssignal erfordert eine entsprechende Zahl von Komparatoren. Deren Ausgangssignale werden mit Hilfe einer Codierschaltung in die gewünschten Datenworte umgesetzt (**Bild 9.6**). Parallelumsetzer können wegen des verwendeten Konzeptes für die Umsetzung sehr schnell arbeiten und sind deshalb auch für Signale mit Frequenzen im MHz-Bereich geeignet.

9.6.3 Digital-Analog-Umsetzer

Digital-Analog-Umsetzer (DAU) sind von ihrer Funktion her die Umkehrung der Analog-Digital-Umsetzer, weshalb vergleichbare Funktionsprinzipien gelten. Beim DAU werden die zugeführten Datenworte nacheinander in Spannungswerte umgesetzt und daraus ein kontinuierliches Signal gebildet (**Bild 9.7**).

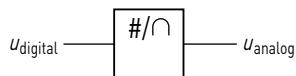


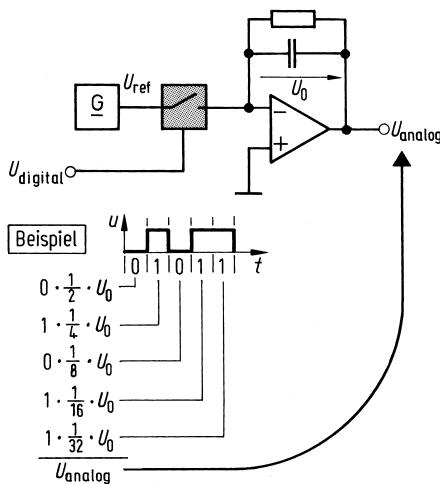
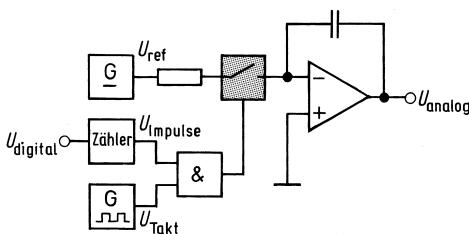
Bild 9.7 Schaltzeichen für DAU

Beim Digital-Analog-Umsetzer gibt es dem Analog-Digital-Umsetzer vergleichbare Kenngrößen. Auch hier ist die Umsetzerkennlinie von Wichtigkeit, mit allen bekannten Fehlermöglichkeiten. Linearitätsfehler liegen dabei üblicherweise im Promillebereich.

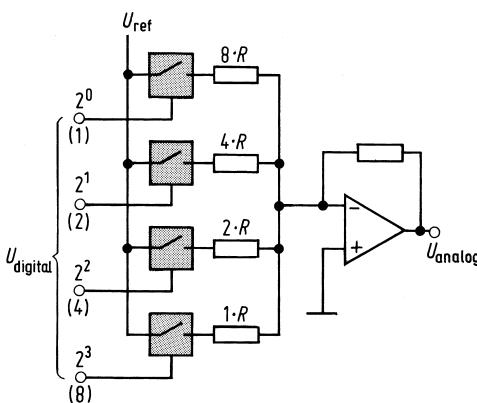
Während beim analogen Eingangssignal des ADU die Zahl der Stufen den zulässigen Gesamtbereich bestimmt, gilt dies beim DAU für die maximale Länge der Datenworte. Die Arbeitsgeschwindigkeit entspricht auch beim DAU der Umsetzfrequenz und ist unmittelbar von der Taktfrequenz abhängig.

Beim **Stufenumsetzer** wird eine Integrierstufe mit den Datenworten angesteuert. Jedes Bit mit dem Zustand „1“ bewirkt eine gleichstarke Aufladung des Kondensators. Über den Widerstand erfolgt ständig eine Entladung und zwar in der Weise, dass sich die Auflade spannung im Rahmen eines Datenwertes jeweils von einer zur nächsten Stelle halbiert. Dies entspricht der im dualen System erforderlichen Stellenbewertung. Am Ausgang der Integrierstufe ergibt sich deshalb das gewünschte analoge Signal (**Bild 9.8**).

Beim **Serienumsetzer** wird eine Integrierstufe durch Stromimpulse gespeist. Diese Ansteuerung gewinnt man einerseits aus den Datenworten durch einen Zähler, der in Abhängigkeit von der Wertigkeit der einzelnen Stellen entsprechende Mengen von Impulsen erzeugt. Anderseits erfolgt über ein UND-Glied die Verknüpfung mit einem Taktgenerator, damit die Datenworte nacheinander abgearbeitet werden. Die Zahl der Stromimpulse bewirkt die proportionale Aufladung des Kondensators und damit das analoge Ausgangs signal (**Bild 9.9**).

**Bild 9.8** Stufenumsetzer (DAU)**Bild 9.9** Serienumsetzer (DAU)

Parallelumsetzer können mit großen Taktfrequenzen arbeiten. Es kommt eine Summierstufe zum Einsatz, die von den Bits des Datenwortes bewirkte Teilströme addiert. Diese ergeben sich durch entsprechend gestufte Widerstände, wobei jedes Bit über einen elektronischen Schalter zur Steuerung beiträgt. Die Stufung der Widerstände ist von den Wertigkeiten der Stellen des Datenwortes abhängig. Als typische Wertigkeitsfolge gilt: $1 : 2 : 4 : 8 : 16 : \dots$ Die Teilströme stehen dann im Verhältnis $1 : 2 : 4 : 8 : 16 : \dots$ (**Bild 9.10**).

**Bild 9.10** Parallelumsetzer (DAU)

Abschließend sei noch erwähnt, dass einem Digital-Analog-Umsetzer häufig ein Tiefpass nachgeschaltet ist, um störende höherfrequente Anteile (z.B. Taktfrequenz) zu unterdrücken.

9.6.4 Elektrooptische und optoelektrische Umsetzer

Die zunehmende Nutzung optischer Leitungen in Kommunikationssystemen erfordert Umsetzer, die elektrische Signale in optische Signale wandeln und umgekehrt. Dabei spielt es grundsätzlich keine Rolle, ob es sich um analoge oder digitale elektrische Signale handelt. Es sind folgende Arten zu unterscheiden:

- **Elektrooptische Umsetzer**

Diese Funktionseinheiten benötigen am Eingang ein elektrisches Signal und stellen am Ausgang ein optisches Signal zur Verfügung.

- **Optoelektrische Umsetzer**

Solchen Funktionseinheiten wird über einen Lichtwellenleiter ein optisches Signal zugeführt und dieses in ein elektrisches Ausgangssignal gewandelt.

Für die Wandlung des elektrischen Signals in ein optisches Signal werden Lumineszenzdioden [light emitting diode (LED)] oder Laserdioden verwendet. Beide Komponenten weisen im mittleren Teil ihrer Kennlinien stets einen linearen Zusammenhang zwischen dem durch sie fließenden Strom I und der optischen Leistung P_{opt} auf. Der richtige Arbeitspunkt dieser Dioden ergibt sich durch einen konstanten Vorstrom I_0 , dem das zu wandelnde elektrische Signal überlagert wird. Das Licht dieser Sendedioden ändert sich somit im Rhythmus der Werte des elektrischen Signals. Dafür gilt die Bezeichnung **Intensitätsmodulation** (**Bild 9.11**). Es gilt:

$$P_{\text{opt}} \sim I_{\text{Sendediode}} \quad (9.1)$$

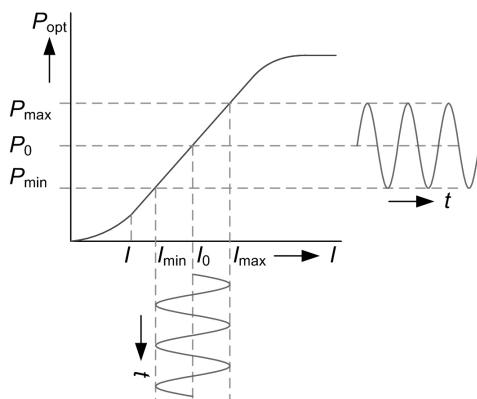


Bild 9.11 Intensitätsmodulation
[Quelle: dibkom]

Um das übertragene optische Signal wieder in ein elektrisches Signal wandeln zu können, werden Lichtdetektoren benötigt, die den Sendedioden entgegengesetztes Verhalten aufweisen. Dies ist bei Fotodioden gegeben, weil bei diesen der Fotostrom über weite Bereiche der Kennlinie proportional zur einfallenden optischen Leistung ist. Das bedeutet

$$I_{\text{Fotodiode}} \sim P_{\text{opt}} \quad (9.2)$$

Wird also eine LED oder Laserdiode über einen Lichtwellenleiter (LWL) mit einer Photodiode zusammengeschaltet, dann ergibt sich ein lineares optisches Übertragungssystem, bei dem sich der Strom auf der Empfangsseite proportional zu dem auf der Sendeseite ändert (**Bild 9.12**). Dies setzt allerdings voraus, dass nur der lineare Teil der Kennlinien genutzt wird, was durch entsprechenden Vorstrom und Begrenzung der Amplitude des Signalstroms problemlos erreichbar ist.

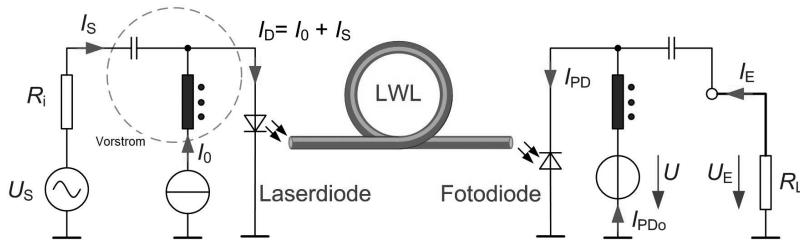


Bild 9.12 Optisches Übertragungssystem [Quelle: dibkom]



Elektrooptische und optoelektrische Umsetzer nutzen stets die bei entsprechenden Dioden gegebene Proportionalität zwischen Strom und optischer Leitung.

Besteht der Bedarf, ein moduliertes Signal in eine andere Form zu bringen, dann kommen Transcoder oder Transmodulatoren zum Einsatz. In der Praxis ist dies mit folgenden Funktionalitäten verknüpft:

- **Transcoder** setzen ein digital moduliertes Signal in eine andere digitale Modulation um.
- **Transmodulatoren** setzen ein Signal eines digital modulierten Multiplexsignals in eine analoge Modulation um.



Beispiel:

Transcoder werden in Kopfstellen von Breitbandkabelnetzen benötigt, um die über das digitale Satellitenfernsehen empfangenen Programme auf die bei Breitbandkabelnetzen verwendete digitale Modulation zu konvertieren.



Beispiel:

Transmodulatoren ermöglichen es in Kopfstellen von Breitbandkabelnetzen, jeweils einzelne Programme aus dem über das digitale Satellitenfernsehen empfangenen Multiplexsignal in analog modulierte Signale zu wandeln.

In Kommunikationssystemen gibt es vielfach auch den Bedarf, ein unmoduliertes oder moduliertes Signal von einer Frequenzlage in eine andere zu bringen. Dafür kommen Frequenzumsetzer [frequency converter] zum Einsatz. In der Regel handelt es sich dabei um

aktive Zweitore, denen das Signal mit der Frequenz f_1 zugeführt wird und an dessen Ausgang das Signal mit der Frequenz f_2 zur Verfügung steht. Es spielt dabei grundsätzlich keine Rolle, ob die Ausgangsfrequenz größer oder kleiner als die Eingangsfrequenz ist.

Es sei darauf hingewiesen, dass Frequenzumsetzer häufig auch als Mischer [mixer] bezeichnet werden.

■ 9.7 Netzwerkkomponenten

In allen digitalen Kommunikationssystemen werden Funktionseinheiten benötigt, die basierend auf den Schichten [layer] des OSI-Referenzmodells bestimmte Aufgaben erfüllen. Da ihr Einsatz in Datennetzen erfolgt, gilt für sie üblicherweise die Bezeichnung Netzwerkkomponenten. Zu diesen gehören typischerweise Switch, Hub, Repeater, Bridge, Router, Gateway und Server.

Switches (dt. Schalter) sind Kopplungselemente, die Segmente eines Datennetzes oder angeschlossene Endeinrichtungen miteinander verbinden. Sie arbeiten vorrangig auf dem Data Link Layer (Schicht 2). Durch Auswertung der Zieladressen der zugeführten Datenpakete erfolgt die Optimierung der Bandbreite für jede individuelle Verbindung. Damit wird die gesamt verfügbare Bandbreite bestmöglich genutzt.

Für an das Datennetz angeschlossene Geräte verhält sich ein Switch transparent, systembedingt ergibt sich allerdings eine Verzögerung in der Kommunikation. Diese wird als Latenzzeit bezeichnet.

Switches bieten eine hohe Flexibilität, weil alle ihre Ports unabhängig voneinander Daten empfangen und senden können.

Unter **Hubs** (dt. Nabe, Achse) werden üblicherweise Netzknoten verstanden, an denen die Endgeräte der Nutzer sternförmig angeschlossen sind und die nur Punkt-zu-Punkt-Verbindungen ermöglichen. Hubs arbeiten auf dem Physical Layer (Schicht 1) und bewirken keine Änderungen der Daten. Sie regenerieren die empfangenen Signale, gleichen gegebenenfalls aufgetretene Jitter aus und senden sie an alle angeschlossenen Endgeräte der Nutzer. Hubs sind somit transparente Verteiler für digitale Signale.

Ein auch als Regenerator bezeichneter **Repeater** (dt. Wiederholer) verbindet Segmente von Datennetzen (z.B. LAN) und erweitert damit die physikalische Reichweite, aber im Gegensatz zum Switch nicht die in den angeschlossenen Endgeräten verfügbare Bandbreite. Repeater arbeiten auf dem Physical Layer (Schicht 1). Es findet keine Veränderung der transportierten Datenpakete statt, was Transparenz bedeutet, jedoch die gleiche Bit-Übertragungsschicht bei den Segmenten erfordert. Es erfolgt allerdings im notwendigen Umfang die Erneuerung der Codierung und Synchronisation sowie Rauschunterdrückung und die Kompensation von Laufzeitverzerrungen (Jitter) und Amplitudenverzerrungen. Ein Repeater stellt also die Dienste der Schicht 1 als Transportsystem zur Verfügung, so dass die Verkopplung verschiedener Übertragungsmedien möglich wird oder bei Übertragungsmedien Verstärkung realisierbar ist (**Bild 9.13**).

Bei vielen Repeatern kann dem zu übertragenden Signal auch eine Kennung beigefügt werden, um die Rückverfolgung des Signalweges zu ermöglichen.

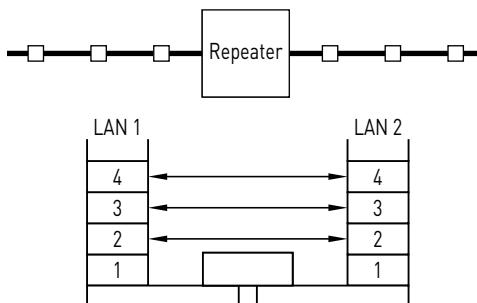


Bild 9.13 LAN-Kopplung durch Repeater

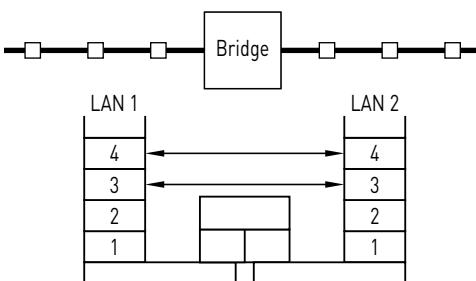


Bild 9.14 LAN-Kopplung durch Bridge

Eine **Bridge** (dt: Brücke) verbindet Segmente von Datennetzen (z.B. LAN), die unterschiedliche Bit-Übertragungsschichten aufweisen. Die Kopplung erfolgt erst auf dem Data Link Layer (Schicht 2), weshalb diese Schicht bei beiden Segmenten identisch sein muss (**Bild 9.14**). Wegen der individuellen Adressierbarkeit der Datenpakete kann die Bridge, im Gegensatz zum Repeater, dafür sorgen, dass nur solche Datenpakete zum anderen Segment des Datennetzes gelangen, die für dieses vorgesehen sind. Mit Hilfe einer Adressentabelle wird für jedes Datenpaket separat über die Weiterleitung entschieden. Eine Bridge ermöglicht deshalb eine optimierte Nutzung des Datennetzes.

Router (dt: Wege vorgeben) dienen zur Kopplung von Segmenten in Datennetzen auf dem Network Layer (Schicht 3), weshalb die Schichten 1 und 2 bei diesen unterschiedlich sein können, während die Schicht 3 bei verkoppelten Segmenten identisch sein muss. Beim Router ergeben sich mehr Möglichkeiten zur Beeinflussung der Datenpakete. Dazu gehören zum Beispiel Paketadressen ändern, alternative Verbindungswägen verwalten und Zugriff auf Segmente oder Endgeräte einschränken (**Bild 9.15**). Für diese Maßnahmen kommen Routingtabellen und Routingprotokolle zum Einsatz. Gegenüber einer Bridge weist ein Router allerdings größere Laufzeiten der Datenpakete auf. Router haben eine Vermittlungsfunktion, wobei Datenpakete entweder unmittelbar zum Endgerät gelangen oder über einen weiteren Router geleitet werden.

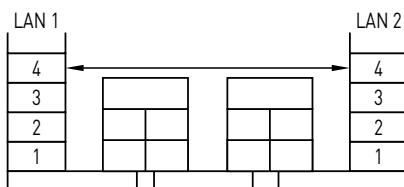
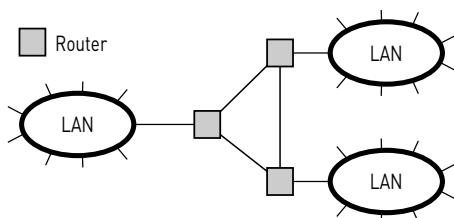


Bild 9.15 LAN-Kopplung durch Router

Die komplexeste Art der Verbindung zwischen zwei Segmenten eines Datennetzes ermöglicht ein **Gateway** (dt: Übergang). Bei diesem erfolgt die Verkopplung über den Application Layer (Schicht 7), also der obersten Schicht des OSI-Referenzmodells. Damit ist höchste Flexibilität gewährleistet und ermöglicht die Verbindung von Netzsegmenten mit beliebig unterschiedlichen Protokollen. Das führt allerdings zu relativ großen Durchlaufzeiten für die Datenpakete.

Das Einsatzfeld von Gateways ist gegeben, wenn Segmente von Datennetzen verkoppelt werden sollen, die sich in den unteren Schichten unterscheiden, weil dann Bridges, Repeater oder Router nicht möglich sind. Wegen der Protokollumsetzung lassen sich also mit Gateways völlig unterschiedliche Netzsegmente miteinander verbinden und auch alle erforderlichen Anpassungen realisieren.

Alle bisher aufgezeigten Netzwerkkomponenten ermöglichen den Übergang zwischen den Segmenten von Datennetzen. Die Leistungsfähigkeit hängt jeweils davon ab, auf welcher Schicht des OSI-Referenzmodells die Komponente arbeitet.

Eine besondere Form von Netzwerkkomponenten ist der **Server** (dt: Lieferant). Es handelt sich um Rechner (Computer) mit entsprechender Speicherkapazität, die Informationen oder Dienste auf Abruf über das Datennetz bereithalten. Die Anfragen kommen dabei von den als **Client** (dt: Kunde) bezeichneten Endgeräten der Nutzer. Der Server reagiert darauf mit der Lieferung der Information oder des Dienstes (**Bild 9.16**). Dies wird als Server-Client-Kommunikation bezeichnet.



Bild 9.16 Server und Client

10

Schnittstellen und Protokolle

■ 10.1 Grundlagen

Im Allgemeinen ist eine Schnittstelle [interface] der Teil in einem System, der die Interaktion mit anderen Systemen oder Systemteilen regelt. Das gilt verständlicherweise auch für Kommunikationssysteme. Diese bestehen aus verschiedenen Geräten, Baugruppen und Komponenten, die in bestimmter Weise zusammenwirken müssen, damit das gesamte System bestimmungsgemäß funktioniert.

Die Übergänge zwischen den Geräten, Baugruppen und Komponenten sind die Schnittstellen. Sie sind durch Schnittstellenbeschreibungen definiert, in der ihre Eigenschaften und die Anwendungsvorschriften festgehalten sind. Bei den Eigenschaften handelt es sich um Bedingungen für Hardware und/oder Software, die erfüllt werden müssen. Es kann sich um bestimmte mechanische und elektrische Werte handeln und/oder den störungsfreien Betrieb mit einer vorgegebenen Software.



Beispiel:

Soll ein DVD-Spieler an ein Fernsehgerät angeschlossen werden, dann müssen die Steckverbindungen als Schnittstelle bestimmte Anforderungen erfüllen, damit die einwandfreie Funktion der DVD-Wiedergabe gewährleistet ist. Dazu gehören die Bauform, die Kontaktbelegung, der zulässige Pegelbereich und sonstige Kriterien.

So gesehen sind schon Bedienelemente und Bedienungsanleitungen elektronischer Geräte Mensch-Maschine-Schnittstellen, die auch als Nutzerschnittstellen bezeichnet werden.



Schnittstelle [interface] = Definierte Übergänge bezüglich Hardware und/oder Software zwischen Geräten, Baugruppen und Komponenten von Kommunikationssystemen

Es lassen sich grundsätzlich folgende beiden Varianten von Schnittstellen unterscheiden:

- Hardwareschnittstellen
- Softwareschnittstellen

Hardwareschnittstellen werden häufig auch als Geräteschnittstellen bezeichnet und sind durch mechanische und elektrische Kennwerte eindeutig beschreibbar. Bei digitalen Signalen betrifft das auch die Art der Übertragung der Bits und Bytes. Diese kann beispiels-

weise nacheinander über eine Leitung oder gleichzeitig über mehrere Leitungen erfolgen. Im ersten Fall handelt es sich um serielle Übertragung, während bei Gleichzeitigkeit parallele Übertragung vorliegt (**Bild 10.1**). Bezüglich der Übertragungskapazität und -zeit hat die parallele Übertragung gegenüber der seriellen Übertragung zwar Vorteile, dafür ist allerdings bei Letzterer der Aufwand geringer. Zur Schnittstellenbeschreibung gehört bei digitalen Signalen auch die Angabe, bis zu welcher Bitrate die Schnittstelle störungsfrei arbeitet. Die richtige Funktion von Schnittstellen lässt sich durch Festlegung von Verfahren sicherstellen.

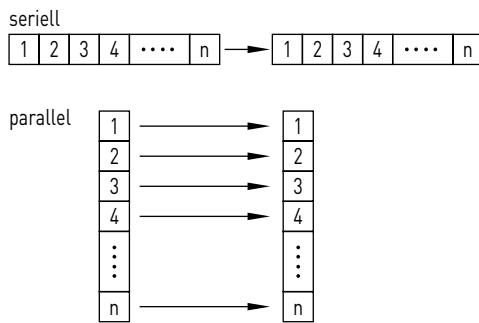


Bild 10.1 Serielle und parallele Übertragung digitaler Signale

Ein einfaches Beispiel dafür ist das Handschlagverfahren [handshake procedure]. Bei diesem erfolgt beim Verbindungsaufbau und Verbindungsabbau, also bei jeder Aktivität der einen Seite jeweils eine Bestätigung der anderen Seite. Ein typischer Anwendungsfall für das Handschlagverfahren liegt beim Telefaxdienst vor.



Handschlagverfahren [handshake procedure] = Bestätigung jeder Aktivität der einen Seite durch die andere Seite beim Verbindungsaufbau und Verbindungsabbau in digitalen Kommunikationssystemen

Arbeiten Kommunikationssysteme oder Teile davon funkgestützt statt mit Leitungen, dann sind auch dafür Schnittstellenbedingungen erforderlich. Die Kriterien für Senden und Empfangen werden deshalb als Luftschnittstelle [common air interface (CAI)] festgelegt, um die Besonderheiten der Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und die Funktion der Antennen zu berücksichtigen. Es gilt dafür auch die Bezeichnung Funkschnittstelle.



Luftschnittstelle [common air interface (CAI)] = Kriterien für die Funksendung und den Funkempfang in Kommunikationssystemen

Für Hardwareschnittstellen sind beliebige Formen möglich. Dabei kann es sich um proprietäre oder standardisierte Versionen handeln. Proprietäre Schnittstellen kommen nur bei einem Gerätshersteller zum Einsatz, während durch Standards (Normen) festgelegte Schnittstellen von möglichst vielen Gerätsherstellern genutzt werden und es damit möglich machen, Geräte verschiedener Hersteller problemlos miteinander verbinden und betreiben zu können. Das bedeutet:

- Proprietäre Schnittstellen sind herstellerspezifische Schnittstellen.
- Standardisierte Schnittstellen ermöglichen das Zusammenwirken von Geräten verschiedener Hersteller.

■ 10.2 Hardwareschnittstellen

Es gibt in der Nachrichtentechnik eine große Zahl standardisierter Hardwareschnittstellen. Davon soll nachfolgend eine typische Auswahl in alphabetischer Folge betrachtet werden.

- **Cinch**

Einpolige koaxiale Rundsteckverbindung für geschirmte Einzelleiter und Koaxkabel zur Übertragung von Fernseh-, Video- und Audiosignalen (**Bild 10.2**).



Bild 10.2 Cinchstecker

- **DVI [digital visual interface]**

Flache Steckverbindung mit jeweils 8 Kontakten in drei Reihen für die Übertragung digitaler Videosignale (**Bild 10.3**). Es stehen drei parallele Kanäle mit jeweils bis zu 1,65 Gbit/s zur Verfügung. Die Datenwortlänge beträgt 10 bit.



Bild 10.3 DVI-Buchse

- **HDMI [high definition multimedia interface]**

Flache Steckverbindung mit 19 Kontakten für die Übertragung digitaler Video- und Audiosignale (**Bild 10.4** und **Bild 10.5**). Es stehen drei parallele Kanäle mit jeweils 3,4 Gbit/s (bei Version HDMI 1.0 und HDMI 1.2) bzw. 8,16 Gbit/s (bei Version HDMI 1.3 und HDMI 1.4) zur Verfügung. Die Datenwortlänge beträgt 18 bit.

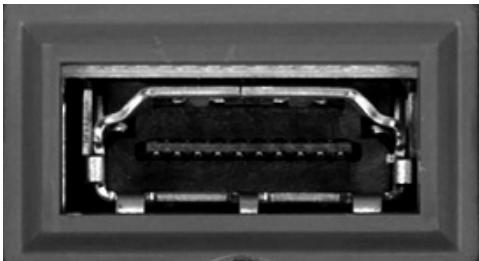
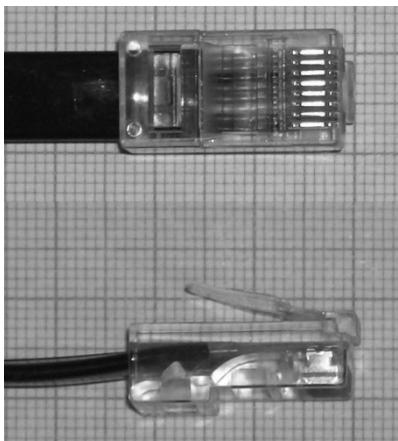
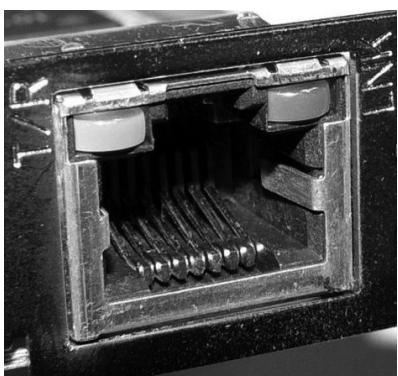


Bild 10.4 HDMI-Buchse



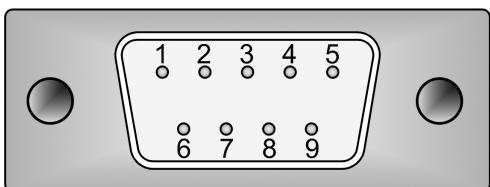
Bild 10.5 HDMI-Stecker

- **ISDN-S₀**
Schnittstelle im dienste-integrierenden Telekommunikationsnetz ISDN [integrated services digital network] zwischen dem Leitungsabschluss des ISDN-Basisabschlusses NTBA [network termination for ISDN basic rate access] und den Endgeräten. Die Datenrate (Bitrate) beträgt 192 kbit/s.
- **PS/2**
Sechspolige Rundsteckverbindung für Datenanwendung. Hauptsächliches Einsatzgebiet war bisher der Anschluss für Tastatur und Maus an den Computer.
- **RJ-11**
Vierpolig genutzte Steckverbindung am geräteseitigen Kabelende zum Anschluss von Telefonen, Faxgeräten oder Modems mit einem Netzanschluss.
- **RJ-45**
Achtpolige Steckverbindung für Telekommunikations- und Datenanwendungen, ausgelegt für den Anschluss von vier verdrillten Aderpaaren [twisted pair] (**Bild 10.6** und **Bild 10.7**). Ein typisches Einsatzgebiet geschirmter RJ-45-Steckverbindungen sind lokale Datennetze LAN [local area network], ungeschirmte Versionen werden im ISDN verwendet.

**Bild 10.6** RJ-45-Stecker**Bild 10.7** RJ-45-Buchse

- **RS-232**

Neunpolige Steckverbindung für Datenanwendungen (**Bild 10.8**). Die Schnittstelle unterstützt primär die bidirektionale Kommunikation zwischen Terminal DTE [data terminal equipment] (z.B. Computer) und externen Geräten DCE [data communication equipment] (z.B. Modem). Dabei wird üblicherweise mit dem Handschlagverfahren [handshake procedure] gearbeitet.

**Bild 10.8** RS-232-Stecker

- **SCART** [Syndicat des Constructeurs d'Appareils Radiorecepteurs et Televiseurs]
21-polige Schnittstelle für analoge Fernseh-, Video- und Audiosignale, die auch als Euro-AV bezeichnet wird (**Bild 10.9**). Die Kontakte sind dabei für verschiedene Anwendungen ausgelegt, deshalb ist stets eine Konfiguration erforderlich. Die Spezifikationen

sind im Standard DIN EN 50049-1 „Kennwerte für die Kleinsignalverbindung zwischen elektronischen Geräten für den Heimgebrauch und ähnliche Anwendungen: Peritelevision-Verbindung“ festgelegt.



Bild 10.9 SCART-Buchse

- **SPDIF [Sony/Philips digital interface]**

Von den Firmen Sony und Philips entwickelte Schnittstelle für hochwertige Audiosignalübertragung. Die Abtastfrequenz beträgt bis 48 kHz, die Datenrate (Bitrate) bis 3,072 Mbit/s und die Datenwortlänge bis 24 bit. Dabei werden auch mehrkanalige Audioformate unterstützt.

SPDIF kann elektrisch über Cinch realisiert werden. Es gibt aber auch eine Version für die optische Übertragung (**Bild 10.10**). Dieser Einsatz von Lichtwellenleitern wurde von der Firma Toshiba eingeführt, weshalb auch die Bezeichnung TOSLINK gilt.



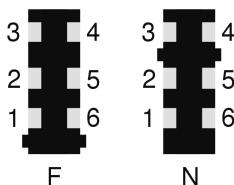
Bild 10.10 SPDIF-Schnittstelle

- **S-Video**

Vierpolige Rundsteckverbindung für die Übertragung analoger Fernsehsignale. Dabei werden die Helligkeitsinformation Y und die Farbinformationen C über separate geschirmte Leitungssadern geführt und auf diese Weise störendes Übersprechen verhindert.

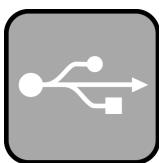
- **TAE (Teilnehmer-Anschlusseinheit)**

Sechspolige Fachsteckverbindung für den Anschluss von Fernsprechgeräten (z. B. Telefon) und Nichtfernsprechergeräten (z. B. Telefaxgerät, Modem) an das Telekommunikationsnetz. Die Unterscheidung der Stecker/Buchsen erfolgt durch mechanische Codierung. Dabei steht F für Fernsprechgeräte und N für Nichtfernsprechergeräte (**Bild 10.11**).

**Bild 10.11** TAE-F und TAE-N

- **USB [universal serial bus]**

Serielle vierpolige Datenschnittstelle, die bei der Version USB 2.0 eine Übertragung beliebiger Daten bis 480 Mbit/s ermöglicht. Bei der in Einführung befindlichen Version USB 3.0 wird eine Verdopplung angestrebt. USB ist bei nachrichtentechnischen Geräten weitverbreitet und zeichnet sich durch nutzerfreundliche Handhabung aus (**Bild 10.12**). Es gibt unterschiedliche Versionen bei den Steckern und Buchsen (A, B, C, D), die jedoch über Adapterkabel miteinander kompatibel sind (**Bild 10.13**).

**Bild 10.12** USB-Symbol**Bild 10.13** USB-Steckerformen

- **VGA [video graphics adapter]**

15-polige Flachsteckverbindung für den Anschluss von Anzeigeeinheiten (Bildröhre, Flachbildschirm, Videoprojektor) an einen Computer (PC, Laptop, Notebook, ...). Die VGA-Anschlüsse an den Geräten sind üblicherweise Buchsen, weshalb VGA-Kabel beidseitig Stecker aufweisen (**Bild 10.14**).

**Bild 10.14** VGA-Buchse

■ 10.3 Softwareschnittstellen und Protokolle

Die Funktion moderner Kommunikationssysteme basiert immer stärker auf dem Einsatz von Software. Es besteht aus diesem Grund verstärkt die Notwendigkeit, dass Software-pakete in vorgegebener Weise zusammenarbeiten. Dies erfolgt durch Softwareschnittstellen, die meist als Anwendungs-Programmier-Schnittstelle [application programming interface (API)] bezeichnet werden. Die API wirkt dabei als Anpassungsglied zwischen zwei unterschiedlichen Softwarepaketen. Ein typischer Fall ist bei Anwendungsprogrammen und Betriebssystemen gegeben. Jede Anwendung müsste ohne API-Einsatz für das jeweilige Betriebssystem gesondert angepasst werden. Bei einer API braucht jede Anwendung nur für diese geschrieben werden, während im Grundsatz beliebige Betriebssysteme zum Einsatz kommen können, wenn die Anpassung zwischen API und Betriebssystem erfolgt.

Durch eine Anwendungs-Programmier-Schnittstelle (API) ergeben sich somit folgende ökonomischen Vorteile:

- Anwendungen müssen nur für diese API geschrieben werden, sind also unabhängig von Betriebssystemen in den Geräten.
- Jeder Gerätetersteller kann beliebige Betriebssysteme einsetzen, wenn er für die Anpassung zwischen API und Betriebssystem sorgt.



Anwendungs-Programmier-Schnittstellen [application programming interface (API)] ermöglichen Wettbewerb und damit horizontale Märkte für Anwendungen und Endgeräte.

Die genauen Spezifikationen von Schnittstellen sind stets aus den jeweiligen Standards (Normen) oder sonstigen Festlegungen ersichtlich.

Neben den Vorgaben für die Schnittstellen sind auch Festlegungen für den Ablauf der Kommunikationsvorgänge erforderlich, weil nur so ein geordneter und damit effizienter Betrieb möglich ist. Es gibt deshalb einen Satz von Regeln über die Abwicklung der einzelnen Schritte eines Kommunikationsvorgangs. Dieses Regelwerk wird als Protokoll [protocol] bezeichnet. Es kann dienstespezifische und dienstunabhängige Eigenschaften aufweisen.



Protokoll [protocol] = Verbindliche Regelungen für die Abwicklung der einzelnen Schritte bei Kommunikationsvorgängen

Protokolle sind meist in nationalen Normen bzw. internationalen Standards festgelegt. Für die Abwicklung eines Protokolls gilt die Bezeichnung Prozedur, sie stellt also die Realisierung des Protokolls dar.



Prozedur [procedure] = Abwicklung eines Protokolls

Bei jedem Kommunikationsvorgang lassen sich drei Kategorien unterscheiden:

- Nutzinformation (Video, Audio, Daten)
- Signalisierung zur Verbindungssteuerung
(zwischen Endgerät und Netz, zwischen Netzknoten und zwischen Netzen)
- Informationen über die Netzkonfiguration [network operation], die Netzverwaltung [network administration] und die Netzwartung [network maintenance].

Die Aufgaben von Protokollen sind also sehr vielfältig und umfassen zum Beispiel:

- Erkennung und Behebung von Übertragungsfehlern
- Steuerung des Nachrichtenflusses, um beispielsweise die Sendegeschwindigkeit an eine langsame Empfangseinrichtung anzupassen
- Zusammenfassen bzw. Trennen von Nachrichtenströmen, für die nur ein physikalischer Übertragungskanal zur Verfügung steht
- Segmentierung bzw. Zusammensetzung von Nachrichtenblöcken, die länger sind als das Netz erlaubt
- Wahl von Übertragungswegen
- Vereinbarung von Übertragungsqualitäten



Protokolle gewährleisten die fehlerfreie Kommunikation zwischen den beteiligten Endgeräten in einem System.

Kommunikationssysteme bestehen häufig aus Teilsystemen, die über Schnittstellen verknüpft sind. Dies führt dazu, dass gegebenenfalls mehrere Protokolle zu berücksichtigen sind und gestaffelt abgearbeitet werden müssen. Es wird dann von einer Protokollarchitektur gesprochen.



Protokollarchitektur = Systematisch gestaffelte Struktur von Protokollen

Deckt ein Protokoll die vollständige Verbindung zwischen zwei Endgeräten ab, dann handelt es sich um ein Ende-zu-Ende-Protokoll [end-to-end protocol]. Solche Protokolle gelten im Regelfall jeweils nur für einen Dienst.



Ende-zu-Ende-Protokolle [end-to-end protocol] ermöglichen die Kommunikation zwischen zwei Endgeräten für einen Dienst.

Protokolle beziehen sich häufig auch auf einzelne Schichten des OSI-Referenzmodells. Für einen Kommunikationsvorgang, an dem mehrere oder alle Schichten beteiligt sind, müssen deshalb die Protokolle in der Reihenfolge der Schichten abgearbeitet werden. Es gilt dann auch die Bezeichnung Protokollstapel [protocol stack].

Viele Protokolle sind auf internationaler Ebene festgelegt. Maßgebend dafür ist die **Internationale Fernmeldeunion** [International Telecommunication Union (ITU)]. Sie erarbeitet in mit Experten besetzten Arbeitsgruppen Protokolle, die als Empfehlungen [recommendations] bezeichnet werden, allerdings für die Mitgliedsstaaten der ITU als verbindliche Vorgaben gelten.

Neben der ITU werden Protokolle auch von anderen Organisationen und der Industrie entwickelt. Deren Durchsetzung bestimmt sich aus wirtschaftlichen Interessen und der Akzeptanz am Markt.

Wie andere Regelwerke werden auch Protokolle in angemessenen Zyklen auf Mängel und Aktualität untersucht und im Bedarfsfall korrigiert oder dem neuesten Stand angepasst. Da bei digitaler Übertragung ein Übertragungsweg gleichzeitig auch für unterschiedliche Dienste nutzbar ist, werden die Protokolle zunehmend einer Struktur angepasst, welche dieser Entwicklung Rechnung trägt. Dies bedeutet den Übergang von geschlossenen Systemen zu offenen Systemen.

Ein besonderes Merkmal offener Systeme besteht darin, dass diese von spezifischen Diensten unabhängig sind, also eine „Mehr-Dienste-Fähigkeit“ aufweisen.



Offene Systeme sind von spezifischen Diensten unabhängig.

11

Standardisierung

■ 11.1 Einführung

Im Alltag ist es inzwischen fast selbstverständlich, dass viele Dinge unproblematisch zusammenpassen und in ihrer Gesamtheit bestimmungsgemäß funktionieren. Das gilt auch für die gesamte Nachrichtentechnik. Der Grund dafür sind festgelegte Vorgaben, die als Normen [standard] bezeichnet werden. Es hat sich allerdings im technischen Sprachgebrauch eingebürgert, für Norm auch die Bezeichnung Standard zu verwenden, was der englischen Übersetzung von Norm entspricht. Daraus folgt:

Standard = Norm

Standardisierung bedeutet im eigentlichen Wort Sinn die Vereinheitlichung von Maßen, Typen, Verfahren oder anderem. Ziel ist die Schaffung gemeinsamer Parameter. Vom British Standards Institute stammt nachfolgende Definition:

„Ein Standard ist ein öffentlich zugängliches technisches Dokument, das unter Beteiligung aller interessierter Parteien entwickelt wird und deren Zustimmung findet. Der Standard beruht auf Ergebnissen aus Wissenschaft und Technik und zielt darauf ab, das Gemeinwohl zu fördern.“



Standards beschreiben die anerkannten Regeln der Technik.

Standards können für die unterschiedlichsten Themen erstellt werden. Dabei spielen in der Nachrichtentechnik besonders Verfahren, Systeme, Schnittstellen, Produkte (d.h. Geräte und Komponenten), Messungen und Prüfungen eine wichtige Rolle.

Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass jeder Standard grundsätzlich erst einmal nur eine Empfehlung darstellt, die angewendet werden kann, aber nicht angewendet werden muss. Eine Verbindlichkeit zur Einhaltung bestimmter Standards lässt sich allerdings durch entsprechende Vorgaben in Ausschreibung, Spezifikation, Aufträgen und sonstigen technischen Festlegungen erreichen. Auch seitens des Gesetzgebers wird in Gesetzen und Verordnungen diese Möglichkeit durchaus genutzt.

Bei Standards sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Standards tragen zu einer Vereinheitlichung von Schnittstellen und Produkten bei und führen damit zu größeren Märkten, also zu einer geringeren Marktsegmentierung.
- Größere Märkte erhöhen den Wettbewerb zwischen den Anbietern.

- Der Wettbewerb führt zu sinkenden Preisen, steigenden Verkaufszahlen für die Produkte oder Dienstleistungen sowie einem besseren Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage.
- Der Wettbewerb erhöht den technischen Fortschritt, da mehr Forschung und Entwicklung getrieben wird.
- Durch den Bezug auf Standards lassen sich der Aufwand für Vertragsverhandlungen und Auftragserteilungen reduzieren, was zu geringeren Transaktionskosten führt.
- Erst die Standardisierung von Schnittstellen bei Teilsystemen ermöglicht den effizienten Aufbau komplexer Gesamtsysteme.
- Standards führen zu einer großen Verbreitung der darauf basierenden Produkte.
- Standardisierung ist oft ein recht langwiger Prozess und erfordert in der Regel Kompromisse bei der Festlegung von Anforderungen.

In der Praxis gibt es für Standards inzwischen drei Typen von Urhebern:

- Offizielle Standardisierungsgremien
- Fachverbände
- Einzelfirmen, Konsortien, Foren

Die Unterschiede bestehen hier einerseits bei den Beteiligten und andererseits in der Prozedur für die Erstellung/Pflege der Standards. Sie sollen nachfolgend näher betrachtet werden.

■ 11.2 Offizielle Standardisierungsgremien

Die Standardisierung erfolgt auf verschiedenen Ebenen, nämlich national, europäisch und international. Es gelten dabei folgende Zuständigkeiten:

- Nationale Standardisierungsgremien
 - Deutsches Institut für Normung (DIN)
 - Deutsche Elektrotechnische Kommission im DIN und VDE (DKE)
- Europäische Standardisierungsgremien
 - Europäisches Komitee für Normung CEN [Comité Européen de Normalisation (frz.)]
 - Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung CENELEC [Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (frz.)]
 - Europäisches Institut für Telekommunikationsstandards ETSI [European Telecommunications Standards Institute]
- Internationale Standardisierungsgremien
 - Internationale Organisation für Normung ISO [International Organization for Standardization]

- Internationale Elektrotechnische Kommission IEC
[International Electrotechnical Commission]
- Internationale Fernmeldeunion ITU [International Communication Union]

Aus der Auflistung lässt sich erkennen, dass die Standardisierung im Bereich der Elektrotechnik und Elektronik auf jeder Ebene durch spezifische Organisationen erfolgt. Außerdem gibt es auch gesonderte Zuständigkeiten für die Telekommunikation. Die Zusammenhänge sind aus der **Tabelle 11.1** ersichtlich.

Tabelle 11.1 Zuständigkeiten offizieller Standardisierungsgremien

	National	Europäisch	International
Alle Standards außer Elektrotechnik und Telekommunikation	DIN	CEN	ISO
Standards für den Bereich Elektrotechnik	DKE	CENELEC	IEC
Standards für den Bereich Telekommunikation		ETSI	IEC ITU

Die Ergebnisse der Standardisierungsarbeit der DKE werden als DIN-Normen im Deutschen Normenwerk herausgegeben. Enthalten diese auch sicherheitsrelevante Aspekte, dann werden sie gleichzeitig als VDE-Bestimmungen in das VDE-Vorschriftenwerk aufgenommen.

Die Erstellung einer DIN-Norm kann jeder Interessierte beantragen, er muss dies allerdings ausreichend begründen. Der zuständige Normungsausschuss des DIN entscheidet über die Annahme oder Ablehnung. Für diese Entscheidung sind folgende Punkte abzuklären:

- Besteht für die beantragte Normung ein Bedarf?
- Sind die interessierten Kreise bereit, an dem Normungsvorhaben mitzuarbeiten?

Die Erarbeitung der Norm erfolgt in Arbeitsgruppen und Kommissionen und führt zu einem im Konsens erstellten Dokument als Normentwurf. Dieser steht dann vier Monate öffentlich für Stellungnahmen zur Verfügung. Danach wird durch einen Ausschuss die endgültige Fassung erarbeitet und diese nach Prüfung durch das DIN als DIN-Norm veröffentlicht.

DIN-Normen weisen eine systematische Bezeichnung durch Nummerierung auf. Nach der Bezeichnung DIN folgt eine mehrstellige Zahl (= Nummer der Norm). Besteht die Norm aus mehreren Teilen, dann wird nach einem Bindestrich die Nummer des jeweiligen Teils angegeben. Das Ausgabedatum der Norm wird dann nach einem Doppelpunkt in der Art angegeben, dass an erster Stelle die Jahreszahl steht und durch einen Bindestrich getrennt der Monat als Ziffernangabe.



Beispiel:

Die Normbezeichnung **DIN 45385-2: 2008-5** bedeutet, dass es sich um den Teil 2 der DIN-Norm Nummer 45385 handelt, der im Mai 2008 herausgegeben (d.h. veröffentlicht) wurde.

Beim CEN wirken die offiziellen Standardisierungsgremien der meisten europäischen Staaten zusammen, beim CENELEC sind es die nationalen Komitees für die elektrotechnische Standardisierung. Deshalb ist die DKE Mitglied im CENELEC.

Bei dem 1988 von der Europäischen Kommission gegründeten ETSI wurde die im Falle von CEN und CENELEC gegebene Behördenstruktur durch das Konzept der Marktorientierung ersetzt. Alle von der Telekommunikation Betroffenen können deshalb bei ETSI Mitglied werden. Inzwischen sind es über 650 Mitglieder aus etwa fünfzig Ländern. Dazu gehören Netzbetreiber, Diensteanbieter, Hersteller, Entwickler, Anwender, Verwaltungen und andere.

Alle von ETSI erarbeiteten Dokumente basieren auf den Bedürfnissen der Mitglieder. Für die Erstellung eines neuen Standards müssen mindestens vier Mitglieder dies als sogenanntes „work item“ beantragen. Bis zur Fertigstellung eines Standards muss eine detaillierte Prozedur durchlaufen werden. Es lassen sich folgende Formen von ETSI-Veröffentlichungen unterscheiden:

- **EN → European Standard**
Dokument, das von ETSI gemäß dem Membership-Voting-Verfahren verabschiedet wurde und normative Regelungen enthält. Außerdem muss es von CEN als europäischer Standard angenommen worden sein.
An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass europäische Standards von den Mitgliedsstaaten des CEN als nationaler Standard übernommen werden.
- **ES → ETSI-Standard**
Dokument, das von ETSI gemäß dem Membership-Voting-Verfahren zur Veröffentlichung verabschiedet wurde und normative Regelungen enthält.
- **EG → ETSI-Guide**
Dokument, das von ETSI gemäß dem Membership-Voting-Verfahren zur Veröffentlichung verabschiedet wurde und hauptsächlich informative Regelungen enthält.
- **TS → Technical Specification**
Dokument, das von einem ETSI Technical Body zur Veröffentlichung verabschiedet wurde und normative Regelungen enthält.
- **TR → Technical Report**
Dokument, das von einem ETSI Technical Body zur Veröffentlichung verabschiedet wurde und hauptsächlich informative Regelungen enthält.
- **SR → Special Report**
Dokument, das Informationen enthält, die zu Referenzierungszwecken veröffentlicht werden.
- **Harmonized Standard**
Europäischer Standard (EN), der von ETSI im Rahmen eines Mandates der Europäischen Kommission gemäß Richtlinie 98/48/EG erstellt wurde.

Bei der ISO sind über 150 Länder Mitglied, Deutschland wird durch das DIN vertreten. Der Standardisierungsprozess läuft in mehreren definierten Schritten ab, das Ergebnis sind ISO-Standard (z.B. ISO 9000 für das Qualitätsmanagement). Es gibt allerdings auch Standards, die in Zusammenarbeit mit der IEC entwickelt und herausgegeben werden. Die

Bezeichnung solcher Standards beginnt dann mit ISO/IEC, als Kennung der beteiligten Organisationen.

Mitglieder im IEC sind die sogenannten Nationalen Komitees (NC), welche die nationalen elektrotechnischen Interessen vertreten. Die deutschen Interessen im IEC nimmt die DKE wahr. Nationale Komitees sind unterschiedlich organisiert, wobei im optimalen Fall der öffentliche und der private Sektor in gleicher Weise vertreten sind. Die IEC-Standards werden in fast einhundert technischen Kommissionen und ca. 700 Arbeitsgruppen erarbeitet. Das Arbeitsfeld der IEC sind alle Teilgebiete der Elektrotechnik und Elektronik. Dabei erfolgt nicht nur ein Bezug auf die Technik, sondern auch auf Sicherheit, Umwelt, Betriebsverhalten und Zuverlässigkeit.

Die ITU ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen, hat über 190 Mitgliedsländer und gliedert sich in die Sektionen Telecommunication (ITU-T) und Radiocommunication (ITU-R). Die von der ITU erarbeiteten Standards werden als Recommendations bezeichnet. Ihre Kennung besteht aus einem Buchstaben (für den Bereich), einen Punkt und einer Nummer. Als Beispiel sei H.264 für die beim digitalen Fernsehen verwendete Videocodierung erwähnt.

Wurde ein europäischer oder internationaler Standard in das nationale Normenwerk übernommen, dann ist das an einer entsprechenden Ergänzung nach Kennung DIN erkennbar.



Beispiel:

DIN EN bedeutet die Übernahme eines europäischen Standards EN

DIN IEC bedeutet die Übernahme eines IEC-Standards

DIN ISO bedeutet die Übernahme eines ISO-Standards

Bei solchen Übernahmen erfolgt lediglich die Übersetzung des Ursprungsdokuments, Änderungen des Inhalts sind unzulässig.

Die meisten Standards weisen einen normativen und einen informativen Teil auf. Unter normativ sind alle Festlegungen und der Anwendungsbereich des Standards zu verstehen. Als informativ gelten die Dokumentenkennzeichnung, der Entwicklungshintergrund und der Zusammenhang mit anderen Dokumenten.

Die von offiziellen Standardisierungsgremien entwickelten Standards werden wegen der Transparenz des gesamten Standardisierungsverfahrens und der Möglichkeit für jeden Interessierten, daran im Rahmen der festgelegten Prozedur mitzuwirken, als **offene Standards** [public standard] bezeichnet. Als grundsätzliche Merkmale dieser Standards gelten:

- Sie sind nicht von einem spezifischen Hersteller abhängig.
- Sie beziehen sich auf allgemein bekannte Schnittstellen.
- Sie beziehen sich nicht auf Patente oder Quellencodes von Software, die es Herstellern unmöglich machen, standardkonforme Produkte herzustellen.

Die technische Entwicklung macht es erforderlich, Standards in entsprechenden Zeitabständen daraufhin zu prüfen, ob sie noch dem aktuellen Stand entsprechen. Es sind dabei folgende Ergebnisse möglich:

- Der Standard bleibt unverändert.
- Der Standard wird überarbeitet.
- Der Standard wird zurückgezogen.

Vorstehende Situation erklärt auch, warum bei Standards stets auf den aktuellen Stand geachtet werden muss.

■ 11.3 Fachverbände

Es gibt zahlreiche Fachverbände, die sich auch bei der Standardisierung engagieren. Die Ergebnisse werden als **Verbandsstandard** bezeichnet, wobei die Erarbeitung dieser Dokumente ebenso wie bei den offenen Standards gemäß einer festgelegten Prozedur erfolgt. Die Mitwirkung an der Standardisierung und die Entscheidung über einen Standard bleibt allerdings in der Regel den Verbandsmitgliedern vorbehalten. Damit ist keine Transparenz für die Öffentlichkeit gegeben, weshalb es sich um einen proprietären Ansatz handelt, bei dem die Interessen der Verbandsmitglieder im Vordergrund stehen.

In der Praxis haben Verbandsstandards durchaus Bedeutung, weil sich zahlreiche von ihnen im Markt durchsetzen konnten. Ein typisches Beispiel ist die Standardfamilie IEEE 802.11x (wobei x für einen Kleinbuchstaben steht, der die Version des Standards angibt), die ein weltweit bedeutendes Regelwerk unter anderem für Aufbau, Funktionalität und Betrieb von funkgestützten lokalen Datennetzen [wireless local area network (WLAN)] darstellt. Der Herausgeber ist das **IEEE** [Institute of Electrical and Electronics Engineers] in den USA, also der Fachverband der Elektro- und Elektronikingenieure in den Vereinigten Staaten von Amerika.

Es ist zu beachten, dass sich von Fachverbänden herausgegebene Standards nicht nur bei deren Erstellung primär an den Interessen der Mitglieder orientieren, sondern auch bei deren regelmäßiger Fortschreibung.

Im europäischen Raum spielt auch die **Europäische Rundfunkunion** [European Broadcasting Union (EBU)] als Fachverband eine wichtige Rolle bei der Standardisierung.

■ 11.4 Einzelfirmen, Konsortien, Foren

Für jede Firma spielt ihr Marktanteil aus wirtschaftlichen Gründen eine bedeutende Rolle. Gelingt es ihr oder in einem Verbund mit anderen als Konsortium oder Forum einen Standard am Markt zu etablieren, dann ist dies aus ökonomischer Sicht von Vorteil.

Derartige Standards werden als **Industriestandards** bezeichnet. Es handelt sich stets um proprietäre Lösungen, weil der oder die Urheber keinen Vorgaben von außen unterliegen. Bei Industriestandards geht es ausschließlich um die Marktposition der jeweiligen Firma bzw. Firmen.

**Beispiel:**

Das Betriebssystem Windows 7 der Firma Microsoft ist ein typischer Industriestandard.

Das Problem jedes Industriestandards besteht darin, dass bei Erstellung, Änderung und Ergänzung ein Einfluss von Dritten nicht möglich ist. Wegen der nicht gegebenen Transparenz besteht durchaus das Problem der Diskriminierung anderer Marktbeteiligter.

Während offene Standards für jeden Marktbeteiligten Gleichbehandlung gewährleisten, sind Verbandsstandards und Industriestandards stets an spezifischen Interessenlagen orientiert. Es wird deshalb bei offenen Standards auch von De-jure-Standards gesprochen, während es sich bei den anderen um De-facto-Standards handelt. Dies gilt unabhängig davon, wie stark ein Standard am Markt vertreten ist.

12

Netze

■ 12.1 Netzarten

Wie schon bei den Grundbegriffen aufgezeigt wurde, dienen Netze der Verteilung oder Vermittlung analoger und/oder digitaler Signale über Leitungen oder funkgestützt, um die an das Netz angeschlossenen Endgeräte zu erreichen und eine entsprechende Nutzung durch die Teilnehmer zu ermöglichen.

Verteilung und Vermittlung stellen unterschiedliche Verbindungsarten dar. Bei der **Verteilung** [distribution] handelt es sich um Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen [point-to-multipoint connection]. Das bedeutet die gleichzeitige Verbindung von einem Netzknopen zu mehreren Endgeräten. Handelt es sich um eine Gruppe ausgewählter Endgeräte, dann liegt **Multicast** vor, was auch als „one to many“ bezeichnet wird. Die vom Netzknopen übertragenen Informationen sind dabei nur von diesem empfangbar. Dies kann durch einzelne Leitungsverbindungen vom Netzknopen zu den jeweiligen Endgeräten oder durch verschlüsselte Übertragung sichergestellt werden.



Beispiel:

Beim Bezahlfernsehen [Pay-TV] (z. B. Sky) handelt es sich um Multicast, weil nur die Abonnenten die verschlüsselt übertragenen Programme entschlüsseln und damit wiedergeben können.

Die Verteilung von Informationen kann auch gleichzeitig an alle an ein Netz angeschlossenen Endgeräte erfolgen. Das typische Beispiel für diese Variante ist beim Radio und Fernsehen gegeben. Hier kann jeder Teilnehmer jederzeit wahlfrei auf das Angebot zugreifen. Es handelt sich deshalb nun um **Broadcast**, was auch als „one to all“ verstanden werden kann.

Bei **Vermittlung** [switching] soll jedes an das Netz angeschlossene Endgerät wahlfrei im Rahmen einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung [point-to-point connection] jedes andere an das Netz angeschlossene Endgerät erreichen können. Bei diesen Individualverbindungen liegt **Unicast** vor. Dafür gilt konsequenterweise auch die Bezeichnung „one to one“.



Verteilung

- Multicast → „one to many“
- Broadcast → „one to all“

Vermittlung

- Unicast → „one to one“

Vermittlungseinrichtungen sind von ihrer Funktion her Koppelfelder, bei denen m Eingänge genau n Ausgänge erreichen können (**Bild 12.1**). Dies erfordert verständlicherweise eine entsprechende Steuerung des Verbindungsaufbaus und wird in modernen Netzen durch entsprechende Software unterstützt.

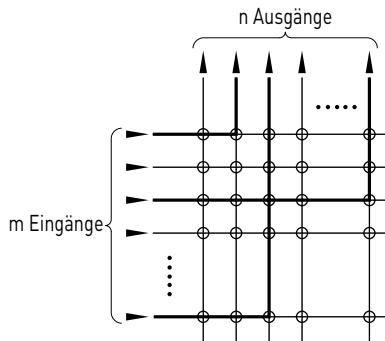


Bild 12.1 Koppelfeld

Für Vermittlungseinrichtungen gibt es zwei unterschiedliche funktionale Konzepte, nämlich die verbindungsorientierte Vermittlung und die verbindungslose Vermittlung.

Bei **verbindungsorientierter Vermittlung** ist für die Dauer der Verbindung zwischen den Endgeräten der beiden Teilnehmer eine physikalische Verbindung gegeben. Dabei kann es sich um Leitungen (elektrische oder optische) und/oder Funkstrecken handeln, aber auch um einen Zeitbereich oder Frequenzbereich in einem Gesamtsignal. Für diese Art der Vermittlung sind die Bezeichnungen Leitungsvermittlung [line switching] oder Durchschaltevermittlung üblich.



Leitungsvermittlung (Durchschaltevermittlung) [line switching] = Physikalische Verbindung zwischen beiden beteiligten Endgeräten für die Dauer der Verbindung



Die **verbindungslose Vermittlung** betrifft ausschließlich digitale Signale. Bei diesen ist die systematische Begrenzung auf definierte Datenmengen möglich. Dafür gelten die Begriffe Paket [packet], Rahmen [frame] oder Zelle [cell]. Sie bestehen immer aus einem Kopfteil [header] und der Nutzlast [pay load]. Im Kopfteil sind Steuerungsinformationen enthalten, wozu auch die Zieladresse gehört. Die Nutzlast umfasst dagegen die Bits der zu übertragenden Information. Der Umfang der Datenpakete kann konstant oder variabel sein, was auch für den Kopfteil und die Nutzlast gilt.



Paket [packet], Rahmen [frame] und Zelle [cell] bestehen stets aus dem Kopfteil [header] und einem Rumpfteil [body] für die Nutzlast [pay load].



Bei der Vermittlung von Paketen, Rahmen oder Zellen ist eine konstante physikalische Verbindung zwischen den beiden beteiligten Endgeräten nicht erforderlich. Da es sich um definierte kleine Datenmengen mit Zieladresse im Kopfteil handelt, können diese auf

unterschiedlichen Übertragungswegen und ohne vorgegebenes Zeitraster zum gewünschten Endgerät gelangen. Es handelt sich somit um virtuelle Verbindungen, also nur scheinbar direkte Übertragungswege von dem sendenden Endgerät zum empfangenden Endgerät. Dieses rekonstruiert aus dem auf verschiedenen Wegen und zu verschiedenen Zeiten ankommenden Paketen, Rahmen oder Zellen das ursprüngliche Signal. Für das aufgezeigte Konzept gilt die Bezeichnung Paketvermittlung [packet switching].



Paketvermittlung [packet switching] = Virtuelle Verbindung zwischen beiden beteiligten Endgeräten für die Dauer der Verbindung

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Zieladresse im Kopfteil eines Pakets, eines Rahmens oder einer Zelle von großer Bedeutung für die Kommunikationssysteme ist. Auf diese Weise kann nämlich jeder Teilnehmer adressiert werden, was besonders bei kommerziellen Anwendungen eine Rolle spielt.

Bei Netzen spielt es auch eine Rolle, welche Konditionen für den Anschluss der Teilnehmer herrschen. Es sind zwei Gruppen unterscheidbar, nämlich die öffentlichen Netze und die privaten Netze.

Bei öffentlichen Netzen [public network] ist der diskriminierungsfreie Zugang für jeden möglich, solange er bestimmte Vorgaben einhält.



Beispiel:

Das Telefonfestnetz und die Mobilfunknetze sind öffentliche Netze. Für den Zugang muss jeder Teilnehmer einen Vertrag mit dem Diensteanbieter abschließen. In diesem sind die technischen, betrieblichen und finanziellen Konditionen als Allgemeine Geschäftsbedingungen (AGB) festgelegt. Der Diensteanbieter muss jedem Nutzer sein Netz verfügbar machen, wenn dieser die AGB erfüllt.



Bei **öffentlichen Netzen** [public network] ist die Zugangsmöglichkeit für jeden diskriminierungsfrei gegeben, wenn er die Allgemeinen Geschäftsbedingungen des Diensteanbieters einhält.

Im Falle privater Netze [private network] hat sein Betreiber das exklusive Auswahlrecht bezüglich der Teilnehmer. Es sind im Prinzip beliebige Kriterien möglich, da es sich bei privaten Netzen um geschlossene Benutzergruppen (GBG) [closed user group (CUG)] handelt.



Bei privaten Netzen [private network] bestimmt der Netzbetreiber die Voraussetzungen für den Zugang.

Unabhängig von der Aufgabenstellung und Funktionsweise eines Netzes ist zu berücksichtigen, dass es eine Zuständigkeit für die technische Abwicklung der Nutzung des Netzes

gibt. Diese liegt beim Netzbetreiber [network operator]. Sein Angebot ist eine technische Dienstleistung, unabhängig von den zu übertragenden Informationen.

! Ein **Netzbetreiber** [network operator] bietet als Dienstleistung die technische Nutzung des Netzes an.

■ 12.2 Netzstrukturen

Für die Kommunikation in Netzen, also die Abwicklung von Diensten, müssen die Funktionseinheiten in bestimmter Weise miteinander verknüpft sein. Dies ist zwar grundsätzlich beliebig, basiert jedoch in der Praxis stets auf Grundstrukturen von Netzformen, was als Netztopologie bezeichnet wird.

Als grundlegende Netzformen gelten das Sternnetz, das Busnetz, das Ringnetz, das Baumnetz und das Maschennetz. Diese sollen nachfolgend genauer betrachtet werden (**Bild 12.2**).

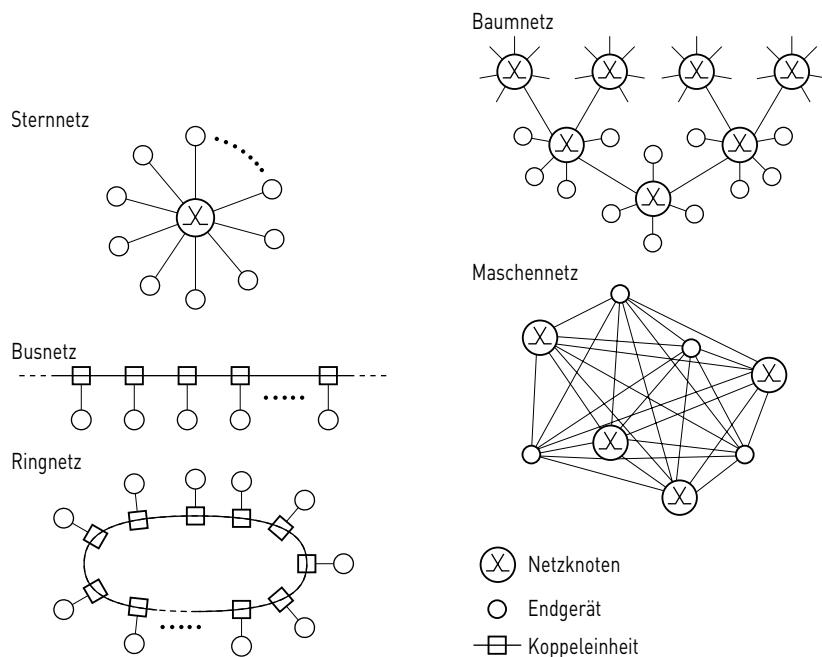


Bild 12.2 Grundstrukturen von Netzformen

Beim **Sternnetz** sind alle Endgeräte an einen Netzknoten angeschlossen. Dieser bildet den kritischen Punkt, da bei seinem Ausfall ein vollständiger Funktionsausfall des Netzes eintritt. Eine derartige Problematik kann beim **Busnetz** nicht auftreten, weil eine Busleitung (meist nur als Bus bezeichnet) als gemeinsames Medium für alle Endgeräte zur Verfügung steht. Alle Endgeräte werden über entsprechende Koppeleinheiten an den Bus angeschlossen.

sen. Bei diesem Konzept sind stets Regelungen über den Zugriff der Endgeräte auf das gemeinsame Medium erforderlich. Tritt bei der Busleitung allerdings eine Unterbrechung auf, dann ergibt sich jedoch eine Einschränkung der Funktionalität des Netzes.

Das **Ringnetz** ist durch eine Ringleitung als Bus gekennzeichnet, in der die Signale umlaufen können, was üblicherweise gerichtet erfolgt. Die Ringleitung stellt das gemeinsame Medium dar, an das die Endgeräte über entsprechende Koppeleinheiten angeschlossen werden. Wie beim Busnetz muss es auch hier für den Zugriff Regelungen geben. Bei einer Unterbrechung der Ringleitung kann die volle Funktion des Netzes erhalten bleiben, wenn die Richtung der Übertragung umgekehrt werden kann.

Bei **Baumnetzen** sind im Prinzip Sternnetze über ihre Netzknoten zu einem größeren Verbund zusammengefasst, wobei die Struktur baumförmig erscheint. **Maschennetze** weisen vom Prinzip her Verbindungen zwischen allen beteiligten Netzknoten und Endgeräten auf. Es handelt sich dann um eine Vollvermaschung. Da bei einer großen Zahl beteiligter Funktionseinheiten der Aufwand für die Verbindungen stark ansteigt, werden nicht immer alle möglichen Maschen realisiert. Es liegt dann eine Teilvermaschung vor. Maschennetze erfordern zwar einen großen technischen Aufwand, dafür bleibt aber auch bei Ausfall von Netzknoten im Falle der Vollvermaschung die Verfügbarkeit des Netzes vollständig erhalten.

In der Praxis realisierte große Netze weisen häufig Mischungen aus den aufgezeigten Grundformen als gekoppelte Strukturen auf. Dies erfolgt aus Gründen der Zweckmäßigkeit, wie einfachere Netzverwaltung, bessere Lastverteilung oder größere Verfügbarkeit. Diese Verkopplung kann über Busnetze oder Ringnetze erfolgen, die als **Backbone** [dt: Rückgrat] oder Backbone-Netz bezeichnet werden und sozusagen im Hintergrund eine leistungsfähige Verbindung zwischen den Teilnetzen sicherstellen (**Bild 12.3**). Deshalb kommen für solche Netze üblicherweise Lichtwellenleiter zum Einsatz, früher waren es üblicherweise Richtfunkverbindungen.

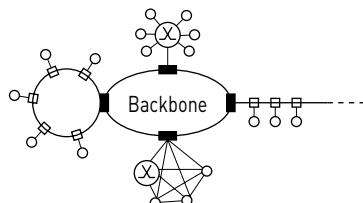


Bild 12.3 Backbone-Netz

Es ist auch möglich, einzelne Netze nur über bestimmte Verbindungen miteinander zu verkoppeln, um dadurch unterschiedliche Ebenen zu bilden. Es liegt dann eine **Netzhierarchie** vor (**Bild 12.4**).

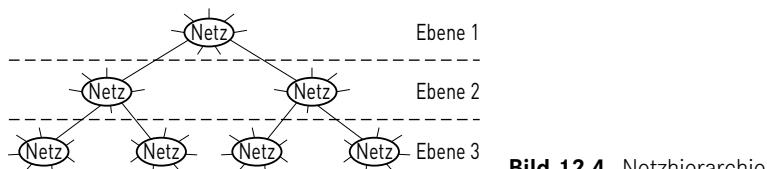


Bild 12.4 Netzhierarchie

Soll die Kapazität eines bestehenden Netzes erweitert werden, dann lässt sich dieses durch den Aufbau eines zweiten Netzes erreichen, welches das erste Netz überlagert. Es liegt dann ein Overlay-Netz vor, wobei die Technologie gleich oder verschieden sein kann. Für die Auswahl sind die gewünschte Übertragungskapazität und die Kosten maßgebend.



Overlay-Netze sind solche Netze, die bereits vorhandene Netze überlagern und damit zu einer größeren Übertragungskapazität führen.

Bezüglich ihrer Funktion ist bei Netzen auch zu unterscheiden, ob sie nur für einen bestimmten Dienst geeignet sind oder ob gleichzeitig mehrere unterschiedliche Dienste abgewickelt werden können. Es handelt sich dann entweder um ein dienstespezifisches Netz [dedicated services network] oder ein diensteintegrierendes Netz [integrated services network].

Dienstespezifische Netze können somit nur für vorgegebene Dienste genutzt werden, während sich bei diensteintegrierenden Netzen mehrere Dienste gleichzeitig und unabhängig voneinander über dieses Netz abwickeln lassen.



Netzfunktion

- dienstespezifisch [dedicated services]
- diensteintegrierend [integrated services]

■ 12.3 HFC-Netze

Die Leistungsfähigkeit leitungsgebundener Netze hängt auch unmittelbar von der verwendeten Technologie und den erforderlichen Leitungslängen ab. Hier spielen nun die Unterschiede zwischen elektrischen Leitungen (Koax oder Zweidraht) und optischen Leitungen (Glasfaser oder POF) eine wichtige Rolle. Bezogen auf gleiche Leitungslänge gilt:

- Elektrische Leitung
 - Übertragungskapazität: groß
 - Dämpfungsmaß: mittel
- Optische Leitung
 - Übertragungskapazität: sehr groß
 - Dämpfungsmaß: klein bis sehr klein

Für möglichst große Reichweiten und Übertragungskapazität bieten sich deshalb hybride Netze an, bei denen möglichst große Teile mit optischen Leitungen arbeiten und sich nur ein Rest auf elektrische Leitungen stützt, weil damit die Dämpfungsproblematik erheblich verringert wird. Ein typisches Beispiel für dieses Konzept sind die bei den Breitbandkabelnetzen immer häufiger vertretenen HFC-Netze, wobei die Abkürzung für „hybrid fibre coax“ steht.



Hybride Leitungsnetze arbeiten mit elektrischen und optischen Leitungen.

Um den ständig wachsenden Bedarf an Datenrate (Bitrate) für die Teilnehmer als Nutzer der Netze zu erfüllen, besteht eine Lösung darin, die Glasfaser den Endgeräten näherzubringen. Das bedeutet, den Kabelanteil der HFC-Netze möglichst klein zu halten. Hierfür gibt es folgende Varianten:

- FTTC [fibre to the curb]
- FTTB [fibre to the building]
- FTTH [fibre to the home]

Der Buchstabe C steht bei FTTC für „curb“ (dt: Bordsteinkante) und bedeutet in der Praxis den in einem Straßenschrank untergebrachten Kabelverzweiger (KVz). Bis zu diesem gelangen die Signale von Netzketten über Glasfaser [fibre]. Dann erfolgt die Umsetzung von optischen Signalen auf elektrische Signale und nachfolgend die Verzweigung auf die einzelnen Teilnehmer-Anschlussleitungen (TAL). Die Verbindung zwischen dem Kabelverzweiger und den Endgeräten bei den Nutzern erfolgt also durch individuelle elektrische Leitungen. Üblicherweise sind diese als verdrillte zweipolare Kupferleitungen ausgeführt, es können aber auch Koaxkabel zum Einsatz kommen.

Im Falle **FTTB** ist die Glasfaser bis zum Gebäude [building] geführt. Die optoelektrische Wandlung und die Verzweigung erfolgt hier in entsprechenden Gestellschränken, die meist im Keller des Hauses untergebracht sind. Dadurch werden die mit elektrischen Leitungen zu überbrückenden Entfernung zu den Endgeräten gegenüber FTTC merkbar reduziert. Es wird jetzt nur noch im Gebäude ein Sternnetz mit elektrischen Leitungen als Hausverteilanlage benötigt.

Der nächste Schritt ist, die Glasfaser bis in die Wohnung [home] zu führen und erst dort die optoelektrische Wandlung und die Verzweigung durchzuführen. Es handelt sich dann um die Variante **FTTH**, bei der nur noch relativ kurze elektrische Leitungen zu den Endgeräten erforderlich sind.

Der aus übertragungstechnischer Sicht bestmögliche Fall wäre es, wenn die Endgeräte einen optischen Anschluss aufweisen würden und damit eine Glasfaser unmittelbar bis zum Endgerät [device] geführt werden könnte. Auf diese Weise wäre **FTTD** [fibre to the device] realisiert.

Als Sammelbegriff für die vorstehend beschriebenen Varianten der Glasfaserführung wird **FTTX** (auch FttX geschrieben) verwendet. Das „X“ steht dabei als Platzhalter für die verschiedenen Ausführungen.

Die Wahl der FTTX-Variante hängt stets von folgenden Faktoren ab:

- Vorhandene Infrastruktur
- Investitionskosten

Das gilt vorrangig bei der Änderung bestehender Netze. Bei Neuinstallationen wird in der Regel FTTH eingesetzt. Grundsätzlich bedarf es allerdings stets der Einzelfallentschei-

dung, da immer der unmittelbare Zusammenhang zwischen der erreichbaren Leistungsfähigkeit des Netzanschlusses und den dafür erforderlichen Investitionskosten gegeben ist.



Die FTTX-Familie

- FTTC [fibre to the curb] → Glasfaser bis zum letzten Kabelverzweiger
- FTTB [fibre to the building] → Glasfaser bis ins Haus
- FTTH [fibre to the home] → Glasfaser bis in die Wohnung

■ 12.4 Passive optische Netze (PON)

Die Basis für moderne FTTX-Strukturen sind passive optische Netze [passive optical network (PON)]. Sie befinden sich zwischen den Netzketten mit der optischen Glasfaserabschlusseinheit [optical line terminal (OLT)] und den Standorten der Nutzer mit den teilnehmerseitigen Glasfaseranschlusseinheiten [optical network unit (ONU)]. Eine OLT versorgt dabei stets eine definierte Zahl von ONUs. Jedes PON weist eine rein passiv aufgebaute, baumförmige optische Netzstruktur auf. Sie benötigen deshalb keine Stromversorgung und sind somit wartungsfrei. Dabei ist die Glasfaser nicht nur dämpfungsärmer als eine Kupferleitung, sondern auch unempfindlich gegenüber elektromagnetischer Einstrahlung.



Passive optische Netze (PON) weisen ausschließlich passiven Komponenten auf, benötigen keine Stromversorgung, sind dämpfungsärmer als Netze mit Kupferleitungen und unempfindlich gegen elektromagnetische Einstrahlung.

Die Ausdehnung von PON-Strukturen kann bis etwa 30 km betragen. Die typischen Datenraten der Glasfaser für den Downstream (DS) betragen bis zu 2,5 Gbit/s, beim Upstream (US) sind es bis zu 1,25 Gbit/s.

Die einfachste Form eines PON weist nur eine Glasfaser auf. Über diese erfolgt die Übertragung von Downstream und Upstream mit unterschiedlichen Lichtwellenlängen, jeweils im Zeitmultiplex, bei der jeder angeschlossenen ONU zyklisch ein definiertes Zeitfenster zur Verfügung steht. Ein optischer Splitter auf der Teilnehmerseite teilt das von den OLT über die Glasfaser zugeführte Signal in der Regel für 32 oder 64 ONUs auf (**Bild 12.5**).

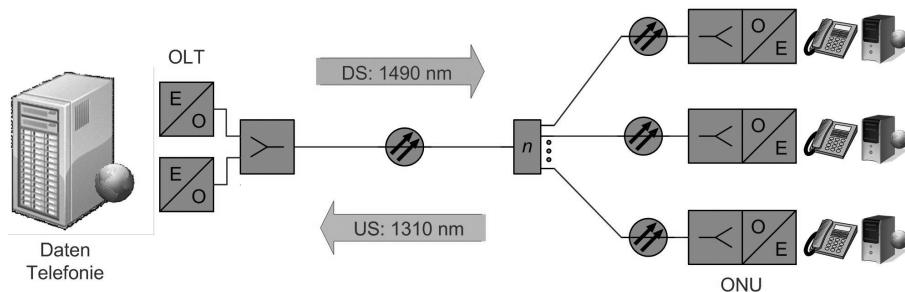


Bild 12.5 Passives optisches Netz mit einem Lichtwellenleiter [Quelle: dibkom]

Die bei vorstehend aufgezeigter Form eines PON erforderliche Frequenzweiche nach der OLT kann entfallen, wenn Downstream und Upstream auf getrennten Glasfasern übertragen werden. Dabei kann dann in beiden Richtungen dieselbe Frequenz zum Einsatz kommen (**Bild 12.6**).

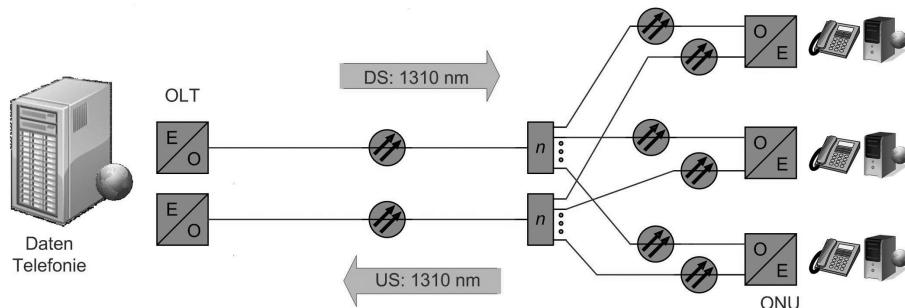


Bild 12.6 Passives optisches Netz mit zwei Lichtwellenleitern [Quelle: dibkom]

Ein weiterer Lösungsansatz für ein PON besteht darin, für jede ONU eine eigene Wellenlänge zu verwenden. Es handelt sich dann um **Wellenlängenmultiplex** [wavelength division multiplex (WDM)], bei dem durch einen Demultiplexer auf der Teilnehmerseite die Separierung der Wellenlängen für die einzelnen ONUs erfolgt (**Bild 12.7**). Abhängig von dem Abstand der Wellenlängen zueinander sind derzeit zwei Varianten standardisiert.

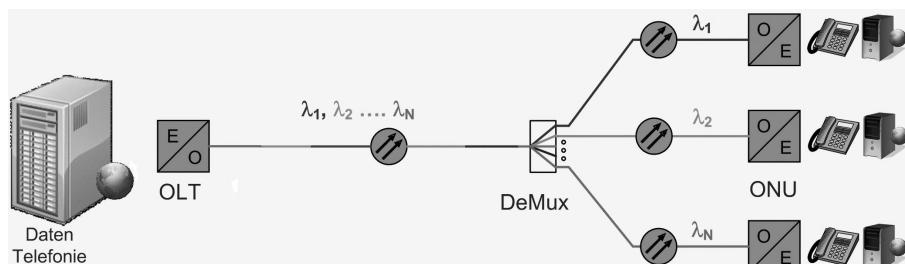


Bild 12.7 Passives optisches Netz mit Wellenlängen-Multiplex [Quelle: dibkom]

- **CWDM** [coarse WDM] → grober Wellenlängenmultiplex
Standard: ITU-T G.694.2
CWDM weist maximal 18 Wellenlängen im Abstand von mindestens 20 nm im Wellenlängenbereich von 1290 nm bis 1610 nm auf.
- **DWDM** [dense WDM] → dichter Wellenlängenmultiplex
Standard: ITU-T G.694.1
DWDM kann Hunderte von Wellenlängen im Abstand von 1,6 nm, 0,8 nm oder 0,4 nm im Wellenlängenbereich 1525 nm bis 1610 nm aufweisen.

Der technische Aufwand ist bei DWDM aufgrund der wesentlich geringeren Wellenlängenabstände gegenüber CWDM zwar größer und daher teurer, es wird dafür aber die verfügbare Übertragungskapazität optimal genutzt.



Aufbauvarianten für PON

- 1 Glasfaser, unterschiedliche Wellenlängen für Downstream und Upstream
- 2 Glasfasern, gleiche Wellenlänge für Downstream und Upstream
- 1 Glasfaser, eine Wellenlänge für jedes ONU (Wellenlängenmultiplex WDM)

■ 12.5 Netzbezeichnungen

Zum Abschluss noch ein Hinweis auf bei Breitbandkabelnetzen für multimediale Anwendungen verwendete Begrifflichkeiten. Das nach dem auch als Kopfstelle [headend] bezeichneten Einspeisepunkt der zu verbreitenden Signale folgende Netz dient der flächenmäßigen Verbreitung der Signale. Deshalb wird es als **Verteilnetz** [distribution network] bezeichnet. Solche Netze weisen in der Regel Übergabepunkte in den Häusern als Schnittstellen auf. Durch nachfolgende Netze im Gebäude soll der Zugang zu den Signalen realisiert werden können. Hierfür gilt nun die Bezeichnung **Zugangsnetz** [access network]. Diese weisen bei den Teilnehmern entsprechende Schnittstellen auf. An diese wird das jeweilige **Heimnetz** [home network] angeschlossen, welches die verschiedenen Endgeräte des Nutzers versorgt.



- Verteilnetz [distribution network]
↓
- Zugangsnetz [access network]
↓
- Heimnetz [home network]

Bei den aufgezeigten Netzen liegen üblicherweise verschiedene Zuständigkeiten vor, was bei Planung, Installation, Betrieb und Instandhaltung zu berücksichtigen ist.

13

Verfahren

■ 13.1 Übertragung

Bei der Übertragung von Signalen ist es ein wichtiges Kriterium, in welcher Frequenzlage dieser Vorgang stattfindet. Handelt es sich dabei um das ursprüngliche, also unmittelbar von einer Quelle stammende Signal, dann gilt für dieses die Bezeichnung Basisbandsignal [baseband signal]. Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um ein analoges oder digitales Signal handelt. Basisbandsignale sind durch ihre Frequenzlage (untere Grenzfrequenz, obere Grenzfrequenz, Bandbreite) gekennzeichnet, die durch reine Übertragung unverändert bleibt. Es liegt dann Basisbandübertragung [baseband transmission] vor, wobei die Frequenzlage des Quellsignals auch als natürliche Lage oder Regellage bezeichnet wird.



Beispiel:

Das Basisbandsignal für Telefonie liegt zwischen 300 Hz und 3,4 kHz.



Basisbandsignal = Signal einer Quelle in ursprünglicher Frequenzlage

Basisbandübertragung ist durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Sie lässt sich mit geringem Aufwand realisieren.
- Sie erfordert galvanische Kopplung zwischen Sende- und Empfangsseite, wenn das Signal einen Gleichanteil aufweist, weil er sonst nicht mitübertragen werden kann.
- Sie erschwert bei digitalen Signalen die Takt synchronisierung, wenn lange Folgen von Nullen (0) oder Einsen (1) auftreten.
- Sie erfordert für jede Übertragung einen separaten Kanal, es ist also keine Mehrfachnutzung von Übertragungswegen möglich.

Es lässt sich erkennen, dass die Basisbandübertragung nicht immer ausreichend ist. Ein weiteres Problem stellt die Übertragung von Basisbandsignalen über größere Entfernungen dar. Wegen der damit verbundenen Dämpfung der Signale wäre nämlich sehr viel Aufwand erforderlich, um notwendige Werte für Pegel und Störabstand einzuhalten zu können. Diese unwirtschaftliche Situation kann durch **frequenzversetzte Übertragung** des Basisbandsignals verhindert werden. Für diese Verschiebung des Basisbandsignals in den Bereich größerer Frequenzen kommen sinusförmige oder pulsförmige Trägersignale mit entsprechender Frequenz zum Einsatz, die das Basisbandsignal sozusagen im Huckepack-

Verfahren transportieren. Auf diese Weise lässt sich die Übertragung von Basisbandsignalen auch über große Entfernung effizient realisieren, also mit geringen Verlusten und bei optimaler Nutzung des jeweiligen Übertragungskanals. Die Verwendung von Trägersignalen führt zu den Verfahren der Codierung und Modulation, die nachfolgend genauer behandelt werden.

■ 13.2 Codierung/Decodierung

13.2.1 Grundlagen

Zur Übertragung digitaler Signale ist es in vielen Fällen aus technischen und/oder wirtschaftlichen Gründen erforderlich oder zweckmäßig, die zu übertragenden Zeichen durch andere zu ersetzen. Es muss sich dabei allerdings um die eindeutige Zuordnung von Zeichen aus einem festgelegten Zeichenvorrat zu Zeichen aus einem anderen festgelegten Zeichenvorrat handeln, damit auch wieder in die Ursprungsform umgesetzt werden kann.



Beispiel:

Das Morsealphabet ist ein klassisches Beispiel für Codierung. Für jeden Buchstaben des Alphabets wurde eine definierte Folge von Punkten und Strichen festgelegt, was sich durch elektrische Signale einfach realisieren lässt und auch die schnelle und eindeutige Rückumsetzung ermöglicht.



Codierung = Eindeutige Zuordnung von Zeichen aus einem festgelegten Zeichenvorrat zu Zeichen aus einem anderen festgelegten Zeichenvorrat

Jede Codierung wird mit Hilfe eines in der Fachliteratur auch als Encoder bezeichneten Coder realisiert. Nach Übertragung der codierten Zeichen erfolgt durch einen Decoder die Decodierung, damit beim Empfänger die ursprünglichen Zeichen wieder zur Verfügung stehen (**Bild 13.1**).

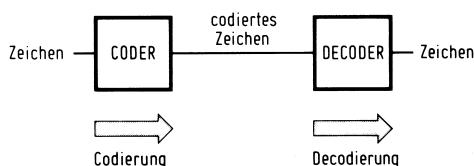


Bild 13.1 Codierung und Decodierung

Für die Verwendung der Codierung gibt es drei wesentliche Gründe. An erster Stelle steht der Vorteil der Übertragung mit weniger Aufwand. Wird die für den jeweiligen Fall optimale Codierung gewählt, dann ergibt sich eine geringe Bitrate bei den codierten Zeichen, was zu einer größeren Übertragungsgeschwindigkeit führt. Durch Codierung tritt außerdem auch eine Verschlüsselung als Schutz gegen unbefugten Zugriff auf, da die ursprünglichen Zeichen nicht unmittelbar erkennbar sind.



Gründe für Codierung:

- Einfachere Übertragung
- Schnellere Übertragung
- Gesicherte Übertragung

Für die am Ausgang eines Coders (= Encoders) auftretenden codierten Zeichen gilt der Begriff Codewort. Daraus folgt:

Das System für den Aufbau von Codeworten wird als Code bezeichnet.

In der Praxis besteht jedes Codewort aus einer entsprechenden Anzahl von Elementen mit jeweils nur zwei möglichen Zuständen, üblicherweise mit „0“ und „1“ bezeichnet. Es handelt sich also um eine Folge von Bits, wobei die Länge eines Codewortes unmittelbar von der Zahl und Dauer dieser Bits abhängt und deshalb auch die Bezeichnung Binärkode gilt. Daraus lässt sich ableiten:

Zahl der unterscheidbaren Codeworte = f (Zahl der Elemente pro Codewort)

Das wird in nachfolgender Zusammenstellung verdeutlicht.

Elemente pro Codewort [in bit]	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Zahl der unterscheidbaren Codeworte	2	4	8	26	32	64	128	256	518

Im Regelfall werden Codeworte mit konstanter Stellenzahl verwendet, was eine bestimmte Zahl verfügbarer Codeworte ergibt. Nicht genutzte Codeworte führen zur **Redundanz R**. Es gilt dafür:

Redundanz = verfügbare Codeworte - genutzte Codeworte



$$R = N_{\text{verfügbar}} - N_{\text{genutzt}} \quad (13.1)$$

Die Redundanz ist für die Feststellung von Übertragungsfehlern von Bedeutung.



Beispiel:

Besteht ein Code aus 3 bit, dann sind dadurch $2^3 = 8$ unterschiedliche Codeworte realisierbar. Sollen nun aber nur sechs Zeichen codiert werden, dann bleiben zwei Codeworte ungenutzt und gemäß vorstehender Gleichung ergibt sich folgende Redundanz: $R = 8 - 6 = 2$.

Bei der Stellenzahl pro Codewort ist neben dem Zustand des jeweiligen Codeelementes auch die Wertigkeit der Stellen von Bedeutung. Die Festlegung kann dabei grundsätzlich

für jede Stelle beliebig erfolgen. In den meisten Fällen gilt jedoch eine von rechts nach links ansteigende Wertigkeit, wobei dann das rechte Codeelement die niedrigste Wertigkeit besitzt, während das linke Codeelement die höchste Wertigkeit aufweist. Es lässt sich somit bei jedem Codewort zwischen dem **niedrigstwertigen Bit** [least significant bit (LSB)] und dem **höchstwertigen Bit** [most significant bit (MSB)] unterscheiden (**Bild 13.2**).

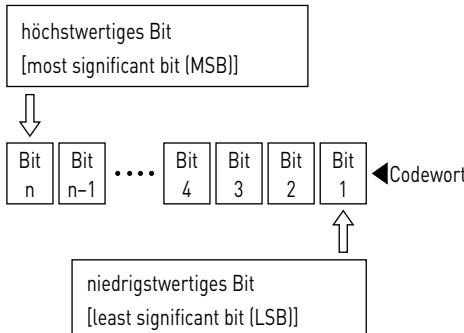


Bild 13.2 Stellenwertigkeit

Es ist bei Codierungen aber auch die Festlegung der umgekehrten Reihung für die Codelemente möglich. Deshalb ist stets darauf zu achten, welche Stellenwertigkeiten gelten.

Der für eine Übertragung auf der Sendeseite verwendete Code muss auf der Empfangsseite natürlich bekannt sein, damit durch den Decoder die ursprünglichen Zeichen wiedererwonnen werden können (**Bild 13.3**).

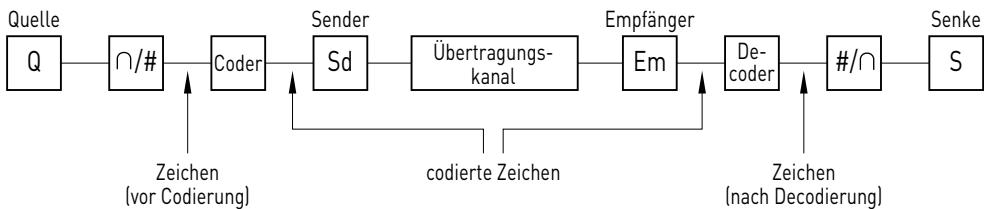


Bild 13.3 Übertragungssystem für codierte Zeichen

Handelt es sich bei den zu übertragenden Zeichen ausschließlich um Dezimalzahlen, dann kann jede Stelle einzeln codiert werden. Es sind für diesen Fall lediglich für die Ziffern 0 bis 9 Codeworte erforderlich. Diese müssen eine Länge von 4 bit aufweisen, um die zehn Ziffern unterscheidbar darstellen zu können. Das Ergebnis wird als **BCD** [binary coded decimal] bezeichnet und weist folgende Form auf:

Ziffer	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BCD-Codewort	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001



BCD [binary code decimal] = Ziffernweise Codierung einer Dezimalzahl durch vierstellige Codeworte

Bezüglich der Stellenwertigkeit gilt bei den Codeworten des BCD-Codes die aufsteigende Potenz zur Basis 2:

				MSB	LSB		
				2^3	2^2	2^1	2^0
8	4	2	1				↙ Dezimaler Stellenwert

Häufig ist die Codierung von Ziffern nicht ausreichend, sondern sie wird auch für Buchstaben und sonstige Zeichen (z.B. Komma, Punkt, Rechenzeichen, ...) benötigt. Dies führt zu alphanumerischen Codes. Deren Codeworte sind sieben- bis neunstellig, um die erforderliche Zahl der unterscheidbaren Codeworte zu ermöglichen.



Alphanumerischer Code = Codierung von Ziffern, Buchstaben und sonstigen Zeichen

Der wohl bekannteste alphanumerische Code heißt ASCII [American Standard Code for Information Interchange]. Er ist siebenstellig und umfasst alle Ziffern, alle Buchstaben (in Klein- und Großschreibung) sowie eine große Zahl sonstiger Zeichen.



ASCII [American Standard Code for Information Interchange] = International standardisierter siebenstelliger alphanumerischer Code

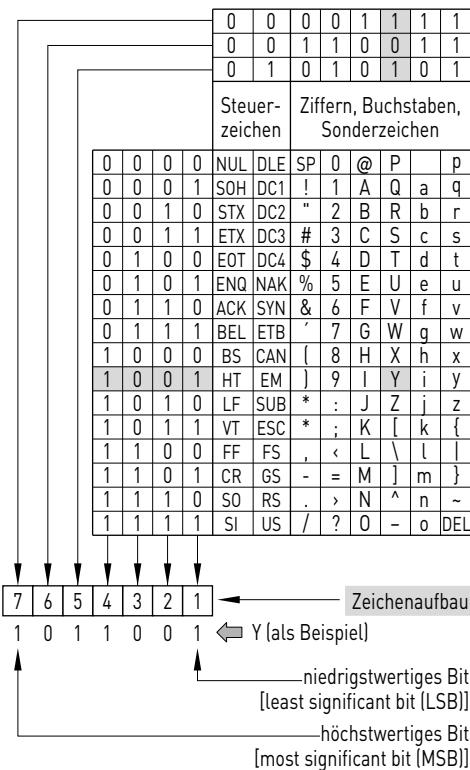


Bild 13.4 ASCII-Code

Aus **Bild 13.4** lassen sich die ASCII-Codeworte leicht ermitteln, als Beispiel ist es dort für den Buchstaben Y dargestellt.

Eine erhebliche Erweiterung des ASCII-Codes stellt der **Unicode** dar. Es handelt sich um einen international standardisierten 16-bit-Code, der gesamt 65 536 (= 2^{16}) unterschiedliche Codeworte ermöglicht. Damit lassen sich auch die Zeichen aller europäischen und außereuropäischen Sprachen darstellen, was im Rahmen der Globalisierung einen positiven Effekt darstellt.

Durch Ergänzung von Stellen kann bei jedem Code die Möglichkeit der Erkennung ggf. Korrektur von Übertragungsfehlern geschaffen werden.

Die bisher behandelte Codierung von Ziffern, Buchstaben und sonstiger Zeichen stellt nur einen Teil dieses Gebietes dar. Die bei Audio- und Videosignalen typischen Codierungsverfahren werden im Abschnitt „Quellencodierung“ behandelt.

13.2.2 Leitungscodierung

Die Leitungscodierung betrifft den Fall der Basisbandübertragung digitaler Signale über Leitungen. Die sich durch Codierung ergebenden Folgen von Nullen und Einsen müssen vom Decoder einwandfrei erkannt und verarbeitet werden können. Dies gilt auch, wenn derselbe Zustand (0 oder 1) mehrfach nacheinander auftritt.

In der Fachliteratur wird für den Zustand 1 auch die Bezeichnung „**Mark**“ verwendet, während es beim Zustand 0 die Bezeichnung „**Space**“ ist. Für die Darstellung der beiden Zustände 0 und 1 sind solche als Formate bezeichneten Codierungen wünschenswert, bei denen einerseits das Taktsignal leicht zurückgewonnen werden kann und andererseits möglichst kein Gleichspannungsanteil auftritt. Außerdem wird auch die Erkennung und/oder Korrektur von Übertragungsfehlern angestrebt.



Kriterien bei Leitungscodierung:

- Rückgewinnung des Taktsignals
- Gleichspannungsanteil
- Fehlererkennung/Fehlerkorrektur

Beim **RZ-Format [return to zero]** geht bei jedem Bit mit dem Zustand 1 der Pegel für Eins bei der Hälfte der Bitdauer auf den Pegel für Null zurück. Es findet also bei jedem Bit mit dem Zustand 1 ein Pegelwechsel statt, was die Taktsignalrückgewinnung erleichtert (**Bild 13.5**).

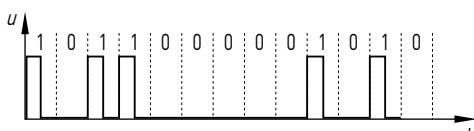


Bild 13.5 RZ-Format

Bleibt beim Bit mit dem Zustand 1 der Pegel über die gesamte Bitdauer erhalten, erfolgt also kein Wechsel auf den Zustand Null, dann liegt das **NRZ-Format [non return to zero]**

vor. Wegen des während der Bitdauer konstanten Pegels benötigt dieses Signal gegenüber dem RZ-Format eine geringere Bandbreite, dafür ist allerdings die Rückgewinnung des Taktsignals aufwendiger (**Bild 13.6**).

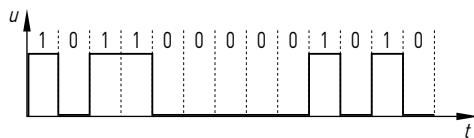


Bild 13.6 NRZ-Format

Bei dem auch als Biphase-Format bezeichneten **Manchester-Format** tritt bei jedem Bit jeweils bei der Hälfte der Bitdauer ein Pegelwechsel auf. Ein Eins-Bit weist damit in der ersten Bithälfte den Zustand 1 auf und in der zweiten Bithälfte den Zustand 0. Beim Null-Bit tritt dagegen in der ersten Bithälfte der Zustand 0 und in der zweiten Bithälfte der Zustand 1 auf (**Bild 13.7**).

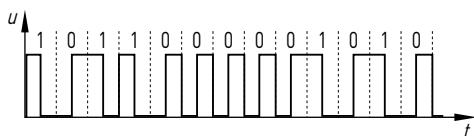


Bild 13.7 Manchester-Format

Werden beim RZ- bzw. NRZ-Format die Eins-Bits mit wechselnder Polarität übertragen, dann liegt das **AMI-Format [alternate mark inversion]** vor. Es wird auch als pseudoternär bezeichnet, weil drei Signalpegel (+1, 0, -1) auftreten. Diese Form ermöglicht Gleichspannungsfreiheit für die Übertragung.



Das AMI-Format weist drei Signalpegel auf und ermöglicht gleichspannungsfreie Übertragung.

Beim **RZ-AMI-Format** weist das Eins-Bit jeweils in der ersten Bithälfte den Pegel für +1 oder -1 auf. Der Wechsel zwischen beiden Werten erfolgt immer dann, wenn ein weiteres Eins-Bit auftritt (**Bild 13.8**).

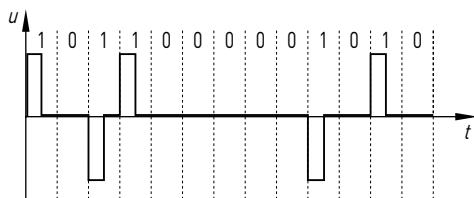


Bild 13.8 RZ-AMI-Format

Das **NRZ-AMI-Format** weist natürlich ebenfalls drei Signalpegel auf, jedoch ist der Pegel für +1 oder -1 für die gesamte Dauer jedes Eins-Bit vorhanden. Bei diesem Format ist wie bei RZ-AMI die Erkennung fehlerhaft übertragener Eins-Bits einfach möglich, weil auf jeden Fall das nachfolgende Eins-Bit gegenüber dem Vorgänger stets die andere Polarität aufweisen muss (**Bild 13.9**).

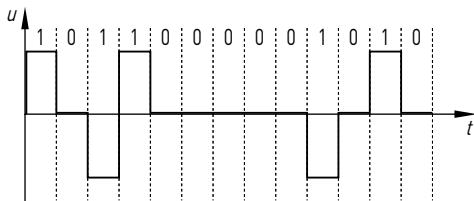


Bild 13.9 NRZ-AMI-Format

Bei längeren Folgen von Null-Bits ist auch bei einem AMI-Format die Taktsignalrückgewinnung auf der Empfangsseite problematisch. Dies lässt sich durch das **HDB-3-Format [high density bipolar of order 3]** vermeiden. Die Eins-Bits werden dabei wie vom AMI-Format bekannt dargestellt, für die Null-Bits gelten folgende Regeln: Es treten nur maximal drei Null-Bits nacheinander auf, ein viertes Null-Bit wird mit dem Pegel +1 oder -1 entgegen der AMI-Regel dargestellt. Dieses Bit bezeichnen wir deshalb als V(erletzungs)-[violating] Bit. Damit sich durch diese kein Gleichtakt ergibt, ist bei den nächsten vier Gruppen von Null-Bits jeweils wechselnde Polarität erforderlich (**Bild 13.10**).

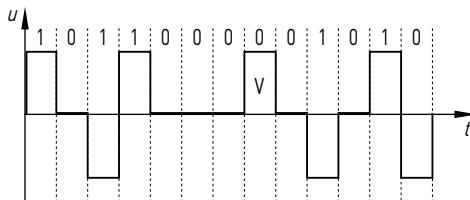


Bild 13.10 HDB-3-Format

Da unterschiedliche Formate für die Leitungscodierung verwendbar sind, muss das verwendete Format verständlicherweise auf der Empfangsseite bekannt sein, damit einwandfreie Decodierung möglich ist. Außerdem gilt es zu berücksichtigen, dass wegen der stets vorhandenen Bandbegrenzung beim Übertragungskanal die ideale Rechteckform der Bits nicht mehr gegeben ist, sondern eine Impulsverbreiterung auftritt. Dies kann zur gegenseitigen Beeinflussung der Bits führen. Die dadurch bewirkten Bitfehler werden auch als Intersymbolstörung bezeichnet.



Bandbegrenzung ruft Impulsverbreiterung hervor und kann dadurch unter Umständen Intersymbolstörungen bewirken.

13.2.3 Quellencodierung

Bei jedem digitalen Übertragungssystem stellt das digitalisierte analoge Quellensignal die Eingangsgröße dar. Für eine unbeeinflusste Übertragung muss der Übertragungskanal mindestens für die Bitrate dieses nun digitalen Quellensignals ausgelegt sein. Dabei stellt sich stets die Frage nach der Wirtschaftlichkeit, da mit zunehmender Bitrate auch die Kosten steigen. Die Problemlösung besteht nun darin, die Bitrate so stark wie möglich zu reduzieren, jedoch ohne Informationsverlust. Diese Art der Datenreduktion [data reduction] wird als Quellencodierung [source coding] bezeichnet und soll das digitale Quellensignal von allen Anteilen befreien, welche für die Senke nicht erforderlich sind.



Quellencodierung [source coding] = Datenreduktion [data reduction] beim digitalen Quellensignal, um es von allen Anteilen zu befreien, welche für die Senke nicht erforderlich sind

Durch Quellencodierung wird also die Bitrate gegenüber der des digitalen Quellensignals kleiner, wobei wir auf der Empfangsseite subjektiv keine Änderung gegenüber der Qualität des ursprünglichen Signals feststellen.



Bei datenreduzierten Signalen ist gegenüber dem ursprünglichen Signal subjektiv keine Veränderung feststellbar.

Da die Reduzierung der Bitrate wie ein Zusammenrücken der ursprünglichen Bitfolge des Quellensignals erscheint, wird in der Fachliteratur Datenreduktion häufig auch als Datenkompression [data compression] bezeichnet, obwohl dies sachlich und sprachlich nicht zutreffend ist.

Die Quellencodierung ist primär bei Audio- und Videosignalen von Bedeutung.



Beispiel:

Es soll die Bitrate eines digitalen Fernsehsignals mit normaler Bildauflösung (SDTV) betrachtet werden. Dafür gelten nachfolgende Ausgangsdaten.

- Bildauflösung: 720 Bildelemente (BE) pro Zeile × 576 Zeilen pro Bild
- Bildformat: 16:9
- Bilder pro Sekunde: 50
- Stufen im Wertebereich für die Helligkeit (Luminanz): 256

Damit ergibt sich:

$$(v_{\text{bit}})_{\text{SDTV}} = (720 \cdot 576) \frac{\text{BE}}{\text{Bild}} \cdot (8+8) \frac{\text{bit}}{\text{BE}} \cdot 50 \frac{\text{Bilder}}{\text{s}}$$

$$(v_{\text{bit}})_{\text{SDTV}} = 331,776 \text{ Mbit/s}$$

Übertragungskanäle für solche Bitraten lassen sich nicht wirtschaftlich betreiben.

Zur Realisierung der Datenreduktion als Quellencodierung werden die Unzulänglichkeiten des menschlichen Auges und Gehörs genutzt. Es sind nachfolgende Aspekte von Bedeutung:

- Das menschliche Auge nimmt Änderungen der Helligkeit (Luminanz) besser wahr als Änderungen der Farbe (Chrominanz). Deshalb kann die Chrominanz größer gestuft übertragen werden.

Fazit: Das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges ist für die Helligkeit (Luminanz) besser als für die Farbe (Chrominanz).

- Bei den für das digitale Fernsehen festgelegten 50 Vollbildern pro Sekunde ändert sich der Bildinhalt von Bild zu Bild nur minimal. Es reicht deshalb aus, nur die Unterschiede zwischen gleichen Bildelementen in aufeinanderfolgenden Bildern zu übertragen.
Fazit: Der Inhalt eines Fernsehbildes ändert sich von Bild zu Bild nur minimal. Die Übertragung der Unterschiede zwischen den Bildern ist deshalb ausreichend.
- In Bildern auftretende Bewegungsvorgänge sind weitgehend vorhersagbar, da bei den 50 Vollbildern pro Sekunde von Bild zu Bild keine sprunghaften Änderungen auftreten. Es ist deshalb für jedes bewegte Objekt als Prognose berechenbar, wo es sich im nächsten Bild befindet und welcher räumliche Bereich von Bildelementen betroffen ist.
Fazit: Die Bewegung von Objekten in Fernsehbildern ist für das jeweils nächste Bild ausreichend gut vorhersagbar.
- Bei Audiosignalen ist die Frequenzabhängigkeit des menschlichen Gehörs zu berücksichtigen. Signale mit gleichem Schalldruck werden bei unterschiedlichen Frequenzen mit unterschiedlicher Lautstärke empfunden. Diese nichtlineare Ohrempfindlichkeitskurve ermöglicht die Reduzierung der zu übertragenden Informationen.
Fazit: Das menschliche Ohr weist einen ausgeprägten Amplituden-Frequenzgang auf (Ohrempfindlichkeitskurve).
- Unterhalb bestimmter Schalldruckpegel tritt bei Tonsignalen überhaupt kein Höreindruck mehr auf. Die Übertragung von Pegelwerten, die unter dieser Ruhehörschwelle liegen ist deshalb überflüssig.
Fazit: Schalldruckpegel unterhalb der Ruhehörschwelle bewirken keinen Höreindruck.
- Bei lauten Einzeltönen sind frequenzmäßig benachbarte Töne mit kleinen Pegeln nicht wahrnehmbar. Sie werden durch den dominanten Ton verdeckt und sind deshalb für die Übertragung nicht erforderlich. Es gilt die Bezeichnung Verdeckungseffekt.
Fazit: Laute Töne verdecken frequenzmäßig benachbarte leise Töne.
- Das menschliche Gehör kann nicht jede Einzelfrequenz unterscheiden, es hat also nur ein begrenztes Auflösungsvermögen. Wir können deshalb den Frequenzbereich in schmale Teilbereiche gliedern und von diesen jeweils nur einen Mittelwert übertragen. Diese Subband-Codierung reduziert die Datenmenge erheblich.
Fazit: Einzelfrequenzen von Tonsignalen sind nicht unterscheidbar, deshalb reichen Mittelwerte von Frequenz-Teilbereichen für die Übertragung aus.

Das Ergebnis jeder Quellencodierung ist das quellencodierte Signal, das nun übertragen werden soll.

Bei der Datenreduktion sind zwei Anteile zu unterscheiden, nämlich die Redundanz und die Irrelevanz. Bei der Redundanz handelt es sich um Weitschweifigkeit, besonders aber um solche Anteile im Nutzsignal, die mehrfach vorhanden sind oder sich aus anderen Anteilen ergeben bzw. ableiten lassen. Die Irrelevanz steht für Bedeutungslosigkeit einer Information. Dazu zählen alle Anteile des Nutzsignals, die auf der Empfangsseite nicht von Bedeutung, also nicht relevant sind.



Redundanz = Anteile im Nutzsignal, die mehrfach vorhanden sind oder sich aus anderen Anteilen ergeben.



Irrelevanz = Anteile im Nutzsignal, die mit der zu übertragenden Information in keinem Zusammenhang stehen.

Daraus folgt als zusammenfassende Feststellung:

Quellencodierung = Redundanzreduktion + Irrelevanzreduktion

Da digitale Signale im Regelfall in Rahmen gleicher Länge übertragen werden, stellt die Differenzmethode den einfachsten Ansatz für eine Datenreduktion dar. Es erfolgt hierbei der systematische Vergleich zwischen aufeinanderfolgenden Rahmen. Nur für die Stellen, bei denen Unterschiede auftreten, wird eine Information übertragen, da die gleichbleibenden Stellen als redundant gelten.



Differenzmethode = Vergleich aufeinanderfolgender Rahmen und Übertragung von Informationen nur bei den Stellen, die unterschiedlich sind.

Die Differenzmethode erfordert auf der Empfangsseite entsprechenden schaltungstechnischen Aufwand für den Vergleich der Rahmen, außerdem tritt eine Verzögerung auf, weil für den Vergleich jeweils ein Rahmen zwischengespeichert werden muss.

Die Quellencodierung für Hörfunk und Fernsehen ist durch internationale Standards vorgegeben. Die meisten wurden von der internationalen Arbeitsgruppe „Motion Picture Experts Group“ entwickelt, weshalb diese Standards auch unter der Bezeichnung MPEG bekannt sind. Dabei ist unbedingt zwischen der Audiocodierung (also Quellencodierung der Audiosignale) und der Videocodierung (also Quellencodierung der Videosignale) zu unterscheiden.



MPEG [Motion Picture Experts Group] erarbeitete Standards für:

- **Audiocodierung** [audio coding]
(= Quellencodierung von Audiosignalen)
- **Videocodierung** [video coding]
(= Quellencodierung von Videosignalen)

Die Audiocodierung basiert auf den bereits aufgezeigten psychoakustischen Effekten und berücksichtigt den Frequenzbereich 20 Hz ... 20 kHz.

Mit Hilfe einer großen Zahl von Hörtests wurde dafür die Auswirkung des frequenz- und pegelabhängigen Verdeckungseffektes ermittelt. Das Ergebnis sind Pegel-Frequenz-Funktionen für jede Frequenz, wobei sich für jeden Pegel ein anderer Verlauf ergibt. Diese Kurven werden als **Mithörschwellen** bezeichnet und charakterisieren anschaulich die Auswirkung der Verdeckung (**Bild 13.11**).

Wegen des geringen Auflösungsvermögens des menschlichen Ohres erfolgt die Aufteilung des gesamten niederfrequenten Bereiches in 32 Teilbänder mit jeweils 750 Hz Bandbreite. Bezogen auf die Abtastfrequenz 48 kHz für das Gesamt signal beträgt die Abtastfrequenz je Teilband 1,5 kHz. Für die Aufteilung kommt eine entsprechende Filterbank zum Einsatz.

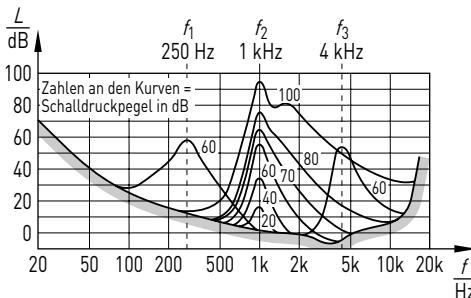


Bild 13.11 Mithörschwellen

Für jedes Teilband wird durch zwölf aufeinanderfolgende Abtastwerte die Mithörschwelle mit Hilfe eines psychoakustischen Modells ermittelt. Diese steuern Quantisierung und Codierung der Teilbandsignale. Danach erfolgen die Formatierung des Bitstroms und die Ergänzung des Fehlerschutzes (Bild 13.12).

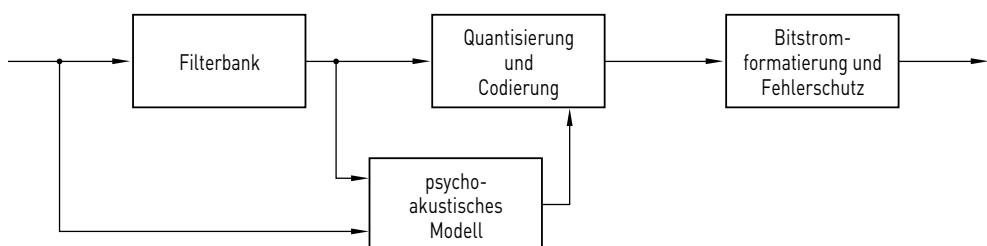


Bild 13.12 Audiocodierung (Konzept)

Da pro Teilband 64 unterscheidbare Pegelstufen möglich sein sollen, sind 6-bit-Codeworte erforderlich. Jede Pegelstufe entspricht einer Dynamik von 2 dB, weshalb eine Dynamik des Audiosignals von bis zu 128 dB verarbeitet werden kann.



Maximalwert der Dynamik des codierten Audiosignals: 128 dB

Die Qualität einer Audiocodierung ist wesentlich durch die für ein Stereosignal erforderliche Bitrate gekennzeichnet. Da der Wirkungsgrad der Codierungsverfahren bisher ständig verbessert wurde, ist dieser Wert auch ständig kleiner geworden. Die Bezugsgröße ist stets das digitalisierte analoge Quellsignal, also das Signal vor der Datenreduktion. Die Bitrate beträgt hier 1411 kbit/s. Die erste Version der Audiocodierung MPEG-1 Layer 1 ermöglichte anfänglich bereits eine Reduzierung auf 384 kbit/s und dann auf 256 kbit/s. Durch MPEG-1 Layer 2, auch als MUSICAM [masking pattern adapted universal subband integrated coding and multiplexing] bezeichnet, wurden 192 kbit/s erreicht. Die weitere Entwicklung führte zu MPEG-1 Layer 3, auch bekannt als MP 3, mit nur noch 128 kbit/s. Die neueste in der Praxis umgesetzte Entwicklung stellt MPEG-4 AAC dar, wobei die angehängte Abkürzung „advanced audio coding“ (= fortgeschrittene Audiocodierung) bedeutet. Bei AAC sind bereits 96 kbit/s für ein Stereosignal ausreichend, es wird durch das Ver-

fahren aber auch das Raumklangverfahren [surround sound] Dolby 5.1 unterstützt. Die Weiterentwicklung von AAC wird als AAC+ oder AACv2 (v2 steht für Version 2) bezeichnet und führte zu einer Reduzierung der Bitrate für ein Stereosignal auf 64 kbit/s (**Tabelle 13.1**).

Tabelle 13.1 Entwicklung der Audiocodierung

Verfahren		Bitrate für Stereosignal
ohne Codierung		1411 kbit/s
MPEG-1 Layer 1	1. Stufe	384 kbit/s
MPEG-1 Layer 1	2. Stufe	256 kbit/s
MPEG-1 Layer 2	(MUSICAM)	192 kbit/s
MPEG-1 Layer 3	(MP 3)	128 kbit/s
MPEG-4 AAC		96 kbit/s
MPEG-4 AAC+	(MPEG-4 AACv2)	64 kbit/s

Die neueren Methoden der Audiocodierung weisen also eine stetige Verbesserung der Codiereffizienz auf, dafür nimmt allerdings die Komplexität der Systeme zu, so dass auf der Sende- und Empfangsseite entsprechend mehr Aufwand betrieben werden muss.

Für die betrachteten Audiocodierungs-Verfahren gilt, dass sie skalierbar sind. Es ist also die Übertragungsqualität wählbar, wobei folgender Zusammenhang gilt:

Je höher die gewünschte Übertragungsqualität, desto größer ist die erforderliche Bitrate und umgekehrt.



Beispiel:

Für reine Sprachübertragung (z.B. Nachrichtensendung) ist im Vergleich zur Musikübertragung stets eine erheblich kleinere Bitrate ausreichend. Damit kann die gesamte verfügbare Übertragungskapazität besser genutzt werden.

Videocodierung soll das Videosignal von möglichst allen redundanten und irrelevanten Anteilen befreien. Dabei basieren alle Maßnahmen auf den Bildelementen (BE) [picture element (PEL)], aus denen sich das digitale Fernsehbild aufbaut. Sie werden auch als Bildpunkte bezeichnet, haben jeweils eine horizontale und vertikale Position im Bild und weisen für jeden Zeitpunkt spezifische Werte für die Helligkeit (Luminanz) und Farbe (Chrominanz) auf. Dabei ist es üblich, nicht die drei Grundfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) zu verwenden, sondern lediglich die beiden Farbdifferenzsignale C_R und C_B .



Kennzeichnende Merkmale für Bildelemente:

- Horizontale Position im Bild (x -Position)
- Vertikale Polarisation im Bild (y -Position)

- Zeit t
- Helligkeitswert Y
- Farbdifferenzwert $C_R = k \cdot (R - Y)$
- Farbdifferenzwert $C_B = k \cdot (B - Y)$

Die Videocodierung soll nun bei möglichst kleiner Bitrate sicherstellen, dass die vorstehenden Informationen über die Bildelemente auf der Empfangsseite entweder zur Verfügung stehen oder wiedergewonnen werden können.

Die für das Fernsehen relevante Videocodierung ist im internationalen Standard ISO/IEC 13813 festgelegt und wird als MPEG-2 bezeichnet. Sie berücksichtigt alle nachfolgend beschriebenen Aspekte bezüglich der Redundanz im Videosignal (**Bild 13.13**).

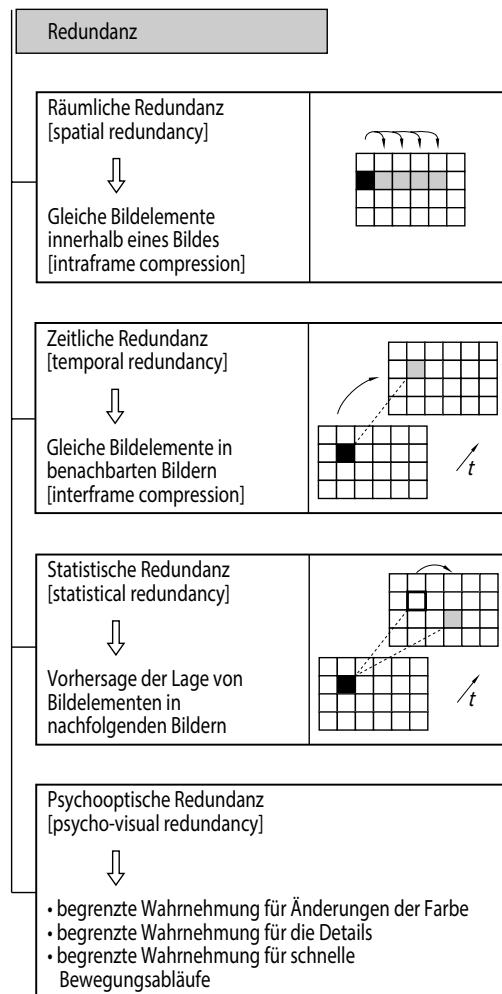


Bild 13.13 Redundanz im Videosignal

- **Räumliche Redundanz** [spatial redundancy]

Treten in Bildern größere Bereiche mit gleicher Helligkeit und Farbe auf (z. B. Himmel), dann gilt für diese Bereiche eine räumliche Korrelation. Es ist deshalb nicht erforderlich, für jedes Bildelement alle Informationen zu übertragen. Zeigen z. B. alle Bildelemente einer Zeile den Himmel in gleicher Helligkeit und Farbe, dann reicht es aus, das erste Bildelement exakt anzugeben und für die folgenden Bildelemente eine codierte Anweisung, dieses Bildelement zu duplizieren. Dadurch lässt sich die Bitrate abhängig vom Bildinhalt erheblich reduzieren.

Die räumliche Redundanz wird beim einzelnen Bild berücksichtigt, weshalb die Bezeichnung „intraframe compression“ gilt. Dabei steht „intra“ für „innerhalb“.

- **Zeitliche Redundanz** [temporal redundancy]

Zwischen aufeinanderfolgenden Bildern eines Videosignals treten wegen der Vollbildfrequenz von 50 Hz meist nur geringe Unterschiede auf. Es ist deshalb nicht erforderlich, jedes Bild vollständig zu übertragen, sondern es reicht aus, dies lediglich für die Unterschiede zwischen den Bildern durchzuführen. Auch dadurch reduziert sich die Bitrate abhängig vom Bildinhalt.

Die zeitliche Redundanz berücksichtigt nicht die Beziehung innerhalb des Bildes, sondern die zwischen benachbarten Bildern. Es gilt nun die Bezeichnung „interframe compression“, wobei „inter“ für „zwischen“ steht.

- **Statistische Redundanz** [statistical redundancy]

Da jedes Bild vom vorhergehenden nur geringfügig abweicht, kann diese Gegebenheit für Vorhersagen [prediction] des Bildinhaltes genutzt werden. Es besteht eine statistische Wahrscheinlichkeit, welche Informationen im nächsten Bild auch vorhanden sind, weshalb nur die vorhersagbaren (also die wahrscheinlichen) Änderungen übertragen zu werden brauchen. Dies führt ebenfalls zu einer Reduzierung der Bitrate.

- **Psychooptische Redundanz** [psycho-visual redundancy]

Das menschliche Auge hat stets ein begrenztes Auflösungsvermögen, was für die Datenreduktion optimal nutzbar ist.

- Das Auge ist für Änderungen der Farbe weniger empfindlich als für Änderungen der Helligkeit. Die Farbauflösung ist also geringer als die Schwarz-Weiß-Auflösung.
- Das Auge kann beliebig feine Details nicht unterscheiden. Es liegt ein begrenztes räumliches Auflösungsvermögen vor.
- Das Auge kann beliebig schnellen Bewegungsabläufen nicht folgen. Dies bedeutet ein begrenztes zeitliches Auflösungsvermögen.

Durch die Redundanzreduktion bleiben alle nicht redundanten Anteile für die Übertragung erhalten, so dass sich trotz der reduzierten Bitrate die ursprüngliche Bildqualität nicht verändert. Insoweit stellt die Redundanzreduktion ein verlustfreies Verfahren dar.



Redundanzreduktion arbeitet verlustfrei.

Die MPEG-2-Videocodierung stützt sich auf zwei wichtige „Werkzeuge“:

- **Diskrete Cosinus-Transformation (DCT)**

Es handelt sich um eine Sonderform der diskreten Fourier-Transformation, die einen unmittelbaren Übergang zwischen Einzelwerten im Zeitbereich und Frequenzbereich ermöglicht. Sie bewirkt die Beseitigung der räumlichen Redundanz durch Konzentration der Signalenergie auf wenige Koeffizienten in einem definierten Bildbereich.

- **Bewegungsschätzung**

Dieses Verfahren basiert auf dem Konzept der Differenz-Pulscodemodulation (DPCM) und bewirkt die Beseitigung der zeitlichen Redundanz.



DCT beseitigt räumliche Redundanz.

Bewegungsschätzung beseitigt zeitliche Redundanz.

Für die Durchführung der DCT wird das Bild in **Blöcke** zu je 8×8 Bildelementen aufgeteilt. Damit ergeben sich pro Bild 90×72 Blöcke. Wegen des geringen Auflösungsvermögens für die Farbe werden dafür aus vier Blöcken bestehende **Makroblöcke** gebildet, was pro Bild zu 45×36 Makroblöcken führt (**Bild 13.14**). Für die Blöcke bzw. Makroblöcke ergibt sich dann nur noch eine begrenzte Zahl von DCT-Koeffizienten an Stelle der Angaben für die einzelnen Bildelemente, was den Effekt der Datenreduktion bewirkt.

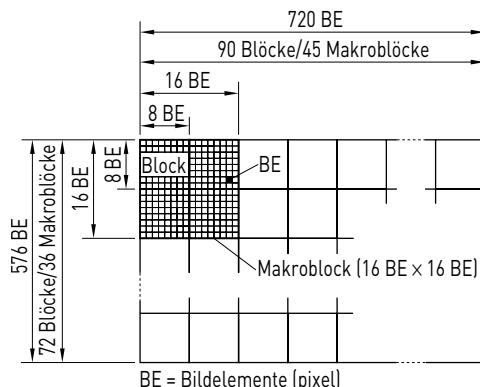
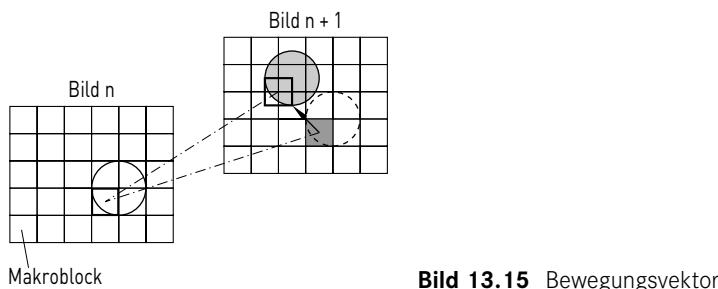


Bild 13.14 Blöcke und Makroblöcke

Die Bewegungsschätzung geht jeweils vom Makroblock aus. Er wird mit dem Makroblock verglichen, der sich im vorhergehenden und/oder nachfolgenden Bild an derselben Stelle befindet. Bei Bewegungen zeigen sich dabei natürlich Unterschiede. Nun wird durch einen Algorithmus (also eine Rechenvorschrift) der Makroblock in einem definierten Suchbereich solange verschoben, bis er mit einem Makroblock des anderen Bildes bestmöglich zur Deckung kommt. Es liegt dann eine als „block matching“ bezeichnete Anpassung vor. Aus der Verschiebung wird nun ein **Bewegungsvektor** ermittelt und für den Aufbau des nächsten Bildes verwendet (**Bild 13.15**).

**Bild 13.15** Bewegungsvektor

Bei der MPEG-2-Videoecodierung sind folgende Bildtypen zu unterscheiden:

- I-Bilder (intra-codierte Bilder)
Es handelt sich um durch DCT datenreduzierte Vollbilder.
- P-Bilder (unidirektional prädizierte Bilder)
Es handelt sich um solche Bilder, die aus vorangegangenen I-Bildern vorhergesagt werden.
- B-Bilder (bidirektional prädizierte Bilder)
Es handelt sich um solche Bilder, die aus einem vorangegangenen Bild und einem nachfolgenden Bild vorhergesagt werden.



- **I-Bilder** = Durch DCT datenreduzierte Vollbilder
- **P-Bilder** = Durch Prädiktion (Vorhersage) aus vorangegangenen I-Bildern gewonnene Bilder
- **B-Bilder** = Durch Prädiktion (Vorhersage) aus einem vorangegangenen Bild und einem nachfolgenden Bild gewonnene Bilder

Die Bitmengen dieser Bilder weisen unterschiedliche Werte auf:

- I-Bilder: $\approx 9 \cdot 10^5$ bit pro Vollbild
- P-Bilder: $\approx 3 \cdot 10^5$ bit pro Vollbild
- B-Bilder: $\approx 1 \cdot 10^5$ bit pro Vollbild

Je weniger Bit auftreten, desto kleiner ist auch die erforderliche Bitrate.

Im Standard ist die Reihenfolge der Bildtypen wie folgt festgelegt (**Bild 13.16**):

... I B B P B B P B P B B I ...

Auf der Empfangsseite werden durch Decodierung die ursprünglichen Bilder wiederhergestellt. Zuerst gilt dies für die I-Bilder, da sie alle Informationen enthalten. Es erfolgt dann mit Hilfe des I-Bildes die Decodierung des ersten P-Bildes. Der nächste Schritt ist die Rekonstruktion der beiden B-Bilder aus dem zwischengespeicherten I-Bild und P-Bild. Dann werden die weiteren P-Bilder decodiert und daraus die weiteren B-Bilder gewonnen.

Durch die Bewegungsschätzung und Prädiktion der P-Bilder und B-Bilder ergibt sich in Verbindung mit der diskreten Cosinus-Transformation (DCT) für übliche Fernsehbilder

eine Bitrate von nur 4...6 Mbit/s, während dieser Wert ohne Datenreduktion bekanntlich über 300 Mbit/s beträgt. Diese enorme Verringerung der Bitrate hat dabei subjektiv keinen Einfluss auf die Bildqualität.

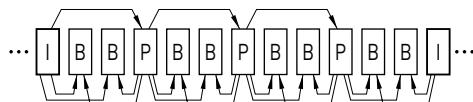


Bild 13.16 Bilderfolge bei MPEG-2



Durch MPEG-2 reduziert sich die Bitrate für übliche Fernsehbilder von über 300 Mbit/s auf 4...6 Mbit/s, ohne subjektiven Einfluss auf die Bildqualität.

Wie bei der Audiocodierung wurde auch die Videocodierung mit dem Ziel einer größeren Effizienz weiterentwickelt. Das Ergebnis trägt die Bezeichnung MPEG-4 und ist im internationalen Standard ISO/IEC 14496 festgelegt. Mit diesem Quellencodierungskonzept reicht im Vergleich zu MPEG-2 bereits die Hälfte der Bitrate für vergleichbare Fernsehbilder, also 2...3 Mbit/s. Damit können bei einem vorgegebenen Übertragungskanal entsprechend mehr Informationen übertragen werden.



MPEG-4 weist gegenüber MPEG-2 eine etwa fünfzig Prozent geringere Bitrate auf.

Der Vorteil von MPEG-2 und MPEG-4 ist ihre Skalierbarkeit. Es kann deshalb die gewünschte Bildqualität mit Hilfe entsprechender Parameter gewählt werden. Damit sind alle Stufen zwischen VHS-Qualität und hochauflösendem Fernsehen HDTV [high definition television] möglich. Die Bitrate ist unmittelbar von der gewünschten Bildqualität (= Bildauflösung) abhängig, so dass verfügbare Übertragungskapazität optimal genutzt werden kann. Es ist allerdings zu beachten, dass die Bitrate mit zunehmender Bildauflösung größer wird.

Es gelten also folgende Zusammenhänge:



MPEG-2 und MPEG-4 sind skalierbar



Die Bildqualität (= Bildauflösung) ist wählbar

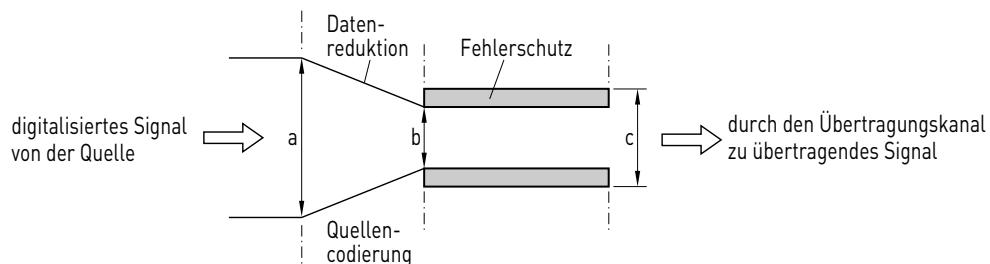


Zunehmende Bildauflösung erfordert größere Bitrate

13.2.4 Kanalcodierung

Das quellencodierte Signal stellt die auf ein Minimum „abgemagerte“ Bitfolge dar, die nun zu übertragen ist. Jede Störbeeinflussung würde dabei allerdings eine unzulässige Fehlerrate bewirken. Dies lässt sich durch einen entsprechenden Fehlerschutz vermeiden, der als „elektronische Verpackung“ des quellencodierten Signals auf dem Übertragungs-

kanal zu verstehen ist (**Bild 13.17**). Bei Störungen wird diese Schutzschicht angegriffen und nicht das Nutzsignal.



- a Bitrate des digitalisierten Signals der Quellen
- b Bitrate nach Datenreduktion
- c Bitrate des zu übertragenden Signals

Bild 13.17 Quellencodierung und Fehlerschutz



Fehlerschutz bedeutet die „elektronische Verpackung“ des quellencodierten Signals.

Alle Maßnahmen des Fehlerschutzes werden als **Kanalcodierung** [channel coding] bezeichnet. Sie dienen dazu, die Bitfolgen des Nutzsignals gegen Übertragungsfehler zu schützen, und zwar durch Erkennen von Fehlern und ggf. deren Korrektur. Es handelt sich im Prinzip um Codierungen, die mit wenig Aufwand optimalen Schutz des Nutzsignals bewirken sollen. Fehlerschutz umfasst deshalb stets die Komponenten Fehlererkennung und Fehlerkorrektur.



Fehlerschutz	=	Fehlererkennung	+	Fehlerkorrektur
[error protection]		[error detection]		[error correction]

Durch die Ergänzung des quellencodierten Signals mit Fehlerschutzbüts wird bewusst eine Redundanz aufgebaut. Dieses Fehlerschutzkonzept nutzt also den Hinkanal (Vorwärtskanal) zur Empfangsseite, weshalb dafür üblicherweise die Bezeichnung Vorwärtsfehlerkorrektur [forward error correction (FEC)] gilt. Es ist für jede Echtzeitübertragung von großer Bedeutung.



Vorwärtsfehlerkorrektur [forward error correction (FEC)] = Ergänzung von Redundanz im Hinkanal

Bei nicht zeitkritischen Übertragungen kann Fehlerschutz auch dadurch erfolgen, dass von der Empfangsseite durch die Fehlererkennung als fehlerhaft festgestellter Bitfolgen

über einen Rückkanal automatisch die wiederholte Übertragung angefordert wird. Es gilt dafür die Bezeichnung **ARQ** [automatic repeat request]. Diese fehlerorientierte Mehrfachübertragung stellt somit eine **Rückwärtsfehlerkorrektur** [backward error correction (BEC)] dar. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass für dieses Konzept ein Rückkanal erforderlich ist, was bei Broadcast-Anwendungen allerdings nicht gegeben ist.

Bei der Auswahl von Codierungen für den Fehlerschutz ist zuerst abzuklären, welche Fehlerarten erkannt und korrigiert werden sollen. Ausgangspunkt ist der zu übertragende Bitstrom. Dabei bildet stets eine definierte Zahl von Bits ein **Symbol** (oder Zeichen). Abhängig von Lage und Menge fehlerhaft empfangener Bits werden Bitfehler [bit error], Burstfehler [burst error] und Symbolfehler [symbol error] unterschieden (**Bild 13.18**). Ein als Einzelfehler bezeichneter Bitfehler bedeutet, dass ein einzelnes Bit falsch empfangen wird. Bei einem Burstfehler handelt es sich um das gehäufte Auftreten von Bitfehlern in einem Block mit vorgegebener Länge. Für derartige Fehler gilt auch der Begriff Bündelfehler.

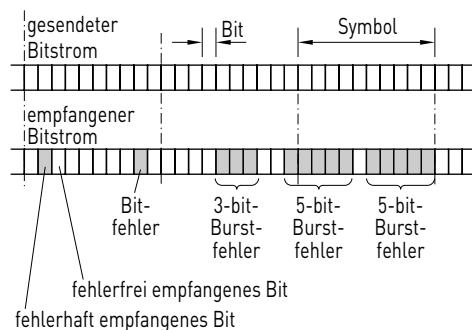


Bild 13.18 Fehlerarten beim Bitstrom

Beim Fehlerschutz ist zwischen Blockcodierung [block coding] und Faltungscodierung [convolution coding] zu unterscheiden. Für **Blockcodierung** wird der zu übertragende Bitstrom in Blöcke fester Länge eingeteilt. Den m Informationsbit werden dann k Fehlerschutzbits als Redundanz angehängt, um Fehlererkennung und Fehlerkorrektur zu ermöglichen. Die Blöcke weisen damit eine Länge von $n = (m + k)$ bit auf (**Bild 13.19**).

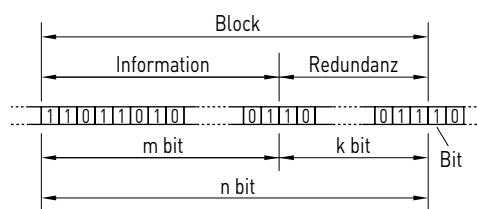


Bild 13.19 Blockcodierung

Als Beispiel für die Blockcodierung sei die Quer- und Längsparitätsprüfung [vertical/longitudinal redundancy check (VRC/LRC)] betrachtet. Dabei werden im einfachsten Fall die Informationsbit in Zeilen und Spalten angeordnet und jeweils die Quersummen per Modulo-2-Addition gebildet (**Bild 13.20**). Bei fehlerhafter Übertragung eines Bit lässt sich dies durch Prüfung der Quersummen für die Zeilen und Spalten erkennen und durch Inversion einfach korrigieren.

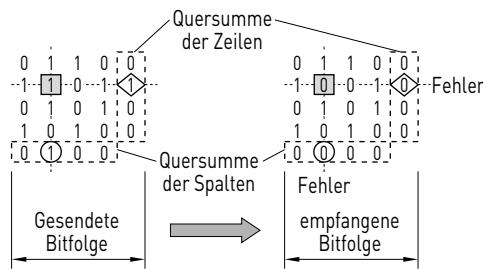


Bild 13.20 Quer- und Längsparitätsprüfung

In der Praxis wird bei der Blockcodierung üblicherweise mit Prüfbits als sogenannten Kontrollbits gearbeitet, die als Ergänzung der Nutzbits dienen. Für die Erzeugung der Prüfbits gibt es verschiedene Verfahren. Sie unterscheiden sich im Aufwand, aber auch in der Zahl der Bits. Davon hängt ab, wie viele Fehler erkannt werden können und wie viele davon korrigierbar sind.



Der Aufwand der Blockcodierung bestimmt die Zahl der erkennbaren und korrigierbaren Fehler.

Im Gegensatz zur Blockcodierung erfordert die **Faltungscodierung** keine Aufteilung des Bitstroms in definierte Segmente. Der Begriff Faltung stammt aus der Mathematik und bedeutet die Bildung des Produktes zweier Funktionen mit anschließender Integration. Eine Funktion ist durch den zu übertragenden Bitstrom gegeben, während die andere durch die Konstellation des Codes vorgegeben wird.



Faltung = Bildung des Produkts zweier Funktionen mit anschließender Integration

Faltungscodes sind stets bitorientiert und lassen sich durch Schieberegister realisieren. Es werden dabei m bit des zu übertragenden Bitstroms in diesem gespeichert und durch Kombination verschiedener Abgriffe beim Schieberegister zu einem aus n bit bestehenden faltungscodierten Bitstrom gewandelt. Die Zahl der auf einmal ausgelesenen n bit ist dabei stets größer als die Zahl der auf einmal eingelesenen m bit, die Differenz kennzeichnet die mit Hilfe der Faltungscodierung angestrebte Ergänzung redundanter Bit als Fehlerschutz.

Die bei der Faltungscodierung gleichzeitig eingelesenen Bits werden als Eingangsrahmenbreite m bezeichnet, für die gleichzeitig ausgelesenen Bits gilt der Begriff Ausgangsrahmenbreite n . Im **Bild 13.21** ist ein Beispiel für die Faltungscodierung mit $m = 1$ und $n = 2$ dargestellt. Ein in das Schieberegister eingespeistes Bit bewirkt dabei zwei Bits am Ausgang, erkennbar durch die beiden Zweige.

Die Speichertiefe M des Faltungscodes, als das „Gedächtnis“ dieser Funktionseinheit, ist definiert als das Produkt aus der Länge des Schieberegisters S und der Eingangsrahmenbreite m . Im aufgezeigten Beispiel gilt $M = S \cdot m = 4$. Die Gesamtzahl aller am Codierungsprozess beteiligten Bit wird als **Beeinflussungslänge** [constraint length] K bezeichnet. Für das Beispiel ergibt sich $K = (S + 1) \cdot m = 5$. Die Leistungsfähigkeit hinsichtlich Fehlererkennung und Fehlerkorrektur steigt mit zunehmender Beeinflussungslänge.

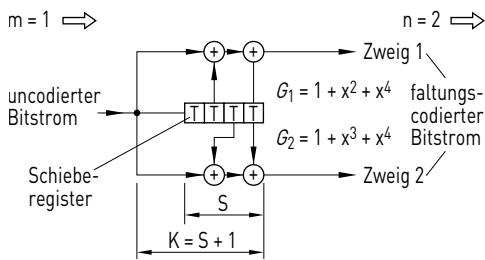


Bild 13.21 Faltungscodierung



Die Leistungsfähigkeit der Faltungscodierung steigt mit zunehmender Beeinflusungslänge.

Neben diesem Wert wird der Faltungscode durch Anzahl und Anordnung der Abgriffe beim Schieberegister charakterisiert, weil diese die zweite Funktion für die Faltung bewirken. Hierfür gilt üblicherweise die Bezeichnung **Generatorpolynom**. Abhängig von der Beschriftung des Schieberegisters sind die Koeffizienten dieser Polynome entweder 0 oder 1.



Das Generatorpolynom G bestimmt sich durch Anzahl und Anordnung der Abgriffe beim Schieberegister.

Für die Generatorpolynome des im Bild 13.21 dargestellten Beispiels gilt:

$$G_1 = 1 + 0 \cdot x^1 + 1 \cdot x^2 + 0 \cdot x^3 + 1 \cdot x^4$$

$$G_1 = 1 + x^2 + x^4$$

$$G_2 = 1 + 0 \cdot x^1 + 0 \cdot x^2 + 1 \cdot x^3 + 1 \cdot x^4$$

$$G_2 = 1 + x^3 + x^4$$

Faltungscodes können auch für andere Eingangs- und Ausgangsrahmenbreiten gebaut werden. Pro Bit des Ausgangsrahmens ist dabei jedoch ein gesonderter Codierzweig erforderlich. In allen Fällen gilt folgendes Funktionsprinzip:

Die m gespeicherten Eingangsbits und das aktuelle Bit am Eingang werden als $m + 1$ Werte mit genau so vielen durch das Generatorpolynom bedingte Werte gefaltet (also paarweise multipliziert) und dann addiert.

Eine Variante der Faltungscodierung stellen die **punktierten Faltungscodes** dar. Sie bieten die Möglichkeit, den Umfang der gewünschten Redundanz im faltungscodierten Bitstrom gezielt zu beeinflussen. Dies geht zwar zulasten der Fehlerkorrektur auf der Empfangsseite, andererseits verringert sich dadurch die zu übertragende Bitrate. Punktierung bedeutet, dass zu festgelegten Zeiten von den Bitströmen der Codierungszweige bestimmte Bit nicht übertragen werden. Dies ist möglich, weil jeder Codierungszweig das Potenzial zur vollständigen Rückgewinnung aller Informationsbit hat.

Mit punktierten Faltungscodes kann also die Wirkung der Codierung in einem bestimmten Rahmen verändert werden, um Vorgaben bezüglich Fehlerkorrektur und Bitrate erfüllen zu können.



Bedingt durch ihre Struktur sind Faltungscodes prädestiniert für die Korrektur einzelner Bitfehler.

Der Umfang einer Codierung für den Fehlerschutz bestimmt sich unmittelbar aus der Zahl der als Redundanz dem Nutzsignal zugefügten Bit. Das Verhältnis des nicht codierten Bitstroms zum codierten Bitstrom bezeichnen wir als Coderate R . Dafür gilt:



$$\text{Coderate } R = \frac{\text{Zahl der Nutzbit}}{\text{Zahl der Nutzbit} + \text{Zahl der Fehlerschutzbit}} \quad (13.2)$$

Die Coderate beschreibt also die Relation zwischen dem eigentlichen Nutzsignal und dem Gesamt signal. Da der Fehlerschutz als eine Art „Verpackung“ des zu übertragenden Bitstroms zu verstehen ist, können wir die Coderate auch mit Hilfe einer Netto-Bitrate $(v_{\text{bit}})_{\text{Netto}}$ und einer Brutto-Bitrate $(v_{\text{bit}})_{\text{Brutto}}$ beschreiben. Die Netto-Bitrate bezieht sich dabei auf das Nutzsignal vor dem Fehlerschutz, während die Brutto-Bitrate für das um den Fehlerschutz ergänzte Gesamt signal gilt.



$$\text{Coderate } R = \frac{\text{Netto-Bitrate}(v_{\text{bit}})_{\text{Netto}}}{\text{Brutto-Bitrate}(v_{\text{bit}})_{\text{Brutto}}} \quad (13.3)$$

Die Qualität des Fehlerschutzes hängt unmittelbar von der gewählten Coderate ab, also von der Menge der Fehlerschutzbit. Aus der Definition können wir erkennen, dass die Coderate stets kleiner/gleich eins ist. Je kleiner die Coderate, desto besser ist der Fehlerschutz und umgekehrt. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass mit steigendem Fehlerschutz auch die Bruttobitrate zunimmt.

Coderate R	klein	...	mittel	...	groß
	$\left(z.B. \frac{1}{2} \right)$		$\left(z.B. \frac{3}{4} \right)$		$\left(z.B. \frac{7}{8} \right)$
Fehlerschutz	stark		mäßig		schwach

Blockcodierung und Faltungscodierung erfordern wegen der dem Nutzsignal zugefügten Bits mehr Übertragungskapazität als ohne Fehlerschutz. Bei vorgegebener Bitrate für den Übertragungskanal reduziert sich deshalb wegen des Fehlerschutzes die Bitrate für das Nutzsignal.



Bei konstantem Übertragungskanal wird mit zunehmendem Fehlerschutz durch Blockcodierung und/oder Faltungscodierung die Bitrate für das Nutzsignal kleiner.

Bei einem anderen Ansatz für den Fehlerschutz bleibt dagegen die Bitrate unverändert. Es handelt sich um die Verschachtelung der zu übertragenden Informationen, was im Zeitbereich und/oder Frequenzbereich erfolgen kann. In der Fachsprache hat sich dafür die englische Bezeichnung Interleaving durchgesetzt. Es ist Zeit-Interleaving [time interleaving] und Frequenz-Interleaving [frequency interleaving] möglich.



Interleaving = Verschachtelung der zu übertragenden Informationen im Zeitbereich und/oder Frequenzbereich

Das Konzept des Interleaving besteht darin, die im ursprünglichen Signal nebeneinander liegenden (also zusammenhängenden) Informationen in kleinen Portionen breiter zu verteilen. Dadurch werden Burstfehlern in einem gewissen Umfang die Wirkung genommen, weil dann nur noch kleine Anteile zusammenhängender Informationen bei Störungen betroffen sind, so dass die Fehlerkorrektur nicht überfordert wird. Daraus folgt:

Interleaving reduziert die Wirkung von Burstfehlern.

Beim **Zeit-Interleaving** [time interleaving] wird die ursprüngliche Reihenfolge der Bits gemäß einer Systematik, die auf der Empfangsseite bekannt ist, verändert (**Bild 13.22**). Dort erfolgt das De-Interleaving und zwar mit Hilfe eines Pufferspeichers für eine festgelegte Blocklänge. Weil das Nutzsignal erst nach Einlesen wieder in die ursprüngliche Form gebracht werden kann, weist das Empfangssignal beim Zeit-Interleaving gegenüber dem Sendesignal stets eine Verzögerung auf.

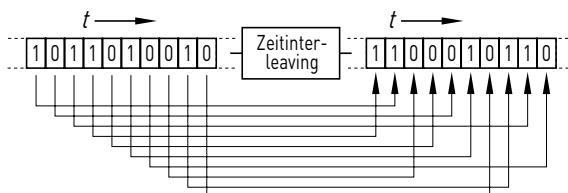


Bild 13.22 Zeit-Interleaving

Frequenz-Interleaving [frequency interleaving] ist dann von Bedeutung, wenn die Übertragung der Bits des digitalen Nutzsignals mit Hilfe einer großen Zahl nebeneinander liegender Trägersignale erfolgt. Die ursprüngliche Reihenfolge der Bits wird dabei vergleichbar dem Zeit-Interleaving auf die Trägerfrequenzen gemäß einer festgelegten Systematik verteilt; auf diese Weise reduziert sich die Auswirkung des selektiven Schwundes.



Frequenz-Interleaving reduziert die Wirkung des selektiven Schwundes.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei Fehlerschutz die Netto-Bitrate in die Brutto-Bitrate überführt wird. Es gilt:



Brutto-Bitrate = Netto-Bitrate + Fehlerschutz

Der Übertragungskanal muss dabei für die Bruttobitrate ausgelegt sein.

Bei Interleaving ist keine Unterscheidung zwischen Netto-Bitrate und Brutto-Bitrate erforderlich.

■ 13.3 Modulation

13.3.1 Grundlagen

Die Übertragung von Signalen in Basisbandlage über größere Entfernung würde wegen der auftretenden Dämpfung hohen Aufwand erfordern und deshalb nicht wirtschaftlich sein. Es kommen deshalb sinusförmige oder pulsförmige Trägersignale zum Einsatz, mit deren Hilfe ein Transport von Basisbandsignalen auch über große Entfernung effizient, also mit möglichst geringen Verlusten bei optimaler Nutzung des jeweiligen Übertragungskanals, möglich ist. Dabei beeinflusst das zu übertragende Basisbandsignal ein oder mehrere Parameter des Trägersignals systematisch und bewirkt dadurch ein neues Signal. Dieser Vorgang wird als Modulation bezeichnet und schaltungstechnisch durch Modulatoren realisiert.



Modulation = Systematische Beeinflussung eines Parameters oder mehrerer Parameter eines sinusförmigen oder pulsförmigen Trägersignals durch das als Modulationssignal bezeichnete zu übertragende Basisbandsignal

Das Eingangssignal eines Modulators ist das nun als Modulationssignal bezeichnete zu übertragende Basisbandsignal [baseband signal]. In Verbindung mit dem von einem Generator zugeführten Träger(signal) tritt am Ausgang das gewünschte modulierte Signal auf (**Bild 13.23**).

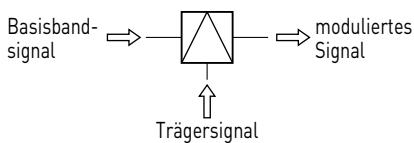


Bild 13.23 Modulator

Wird für die Modulation nur ein Träger verwendet, dann liegt ein **Ein-Träger-Verfahren** [single carrier system] vor. Neben dieser bisher typischen Form gibt es inzwischen allerdings auch Modulationsverfahren, die mit mehreren Trägersignalen arbeiten. Dafür gilt dann die Bezeichnung **Mehr-Träger-Verfahren** [multi carrier system].

Es gibt eine Menge unterschiedlicher Modulationsverfahren und zwar abhängig von folgenden Kriterien:

- Art des Modulationssignals (analog oder digital)
- Art des Trägersignals (analog oder digital)
- Betroffene(r) Parameter des Trägers (Amplitude, Frequenz, Phase, ...)
- Zahl der Träger (Ein-/Mehr-Träger-Verfahren)

Die Modulation eines sinusförmigen (analogen) Trägers wird auch als **Schwingungsmodulation** bezeichnet, während bei Modulation eines pulsförmigen (digitalen) Trägers **Pulsmodulation** gegeben ist.



Sinusförmiges Trägersignal → Schwingungsmodulation

Pulsförmiges Trägersignal → Pulsmodulation

Einen Sonderfall stellt die Modulation im Basisband dar, bei der kein Trägersignal zum Einsatz kommt. Hierbei wird ein analoges Basisbandsignal in ein digitales Signal überführt, allerdings ohne Betrachtung des Übertragungskanals.



Durch Modulation im Basisband wird ein analoges Basisbandsignal in ein digitales Signal überführt.

Jedes Modulationsverfahren hat seine spezifischen Vor- und Nachteile, es soll jedoch stets die verfügbare Bandbreite/Bitrate des Übertragungskanals bestmöglich genutzt werden.

Die Modulation kann als Beladevorgang des Trägersignals verstanden werden. Auf der Empfangsseite ist ein Abladevorgang erforderlich, der die Modulation rückgängig macht und damit den Zugriff auf das ursprüngliche Signal ermöglicht. Dieser Vorgang wird als **Demodulation** bezeichnet. Die schaltungstechnische Realisierung erfolgt durch Demodulatoren.

Vorstehende Erkenntnisse zeigen:

Wird bei einem Übertragungssystem ein Modulationsverfahren verwendet, dann ist vor dem Sender ein Modulator und nach dem Empfänger ein Demodulator erforderlich (**Bild 13.24**).

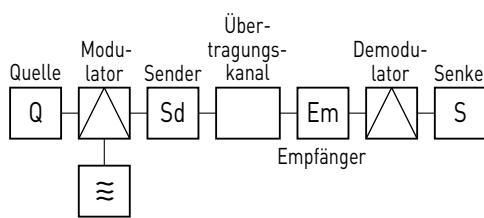


Bild 13.24 Übertragungssystem für modulierte Signale

Prinzipiell spielt es für den Einsatz von Modulationsverfahren keine Rolle, ob die Übertragung per Funk oder leitungsgebunden erfolgt. Bei der Wahl der Modulationsart sollte allerdings die Orientierung an den Spezifikationen des jeweiligen Übertragungskanals erfolgen.



Modulationsverfahren sind bei Funkübertragung und Leitungsübertragung einsetzbar.

13.3.2 Analoges Modulationssignal/Sinusförmiges Trägersignal

Einführung

Analoge Trägersignale $u_T(t)$ weisen sinusförmige Verläufe auf und sind wie folgt beschreibbar:

$$u_T(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t \pm \varphi_T) \quad (13.4)$$

Als veränderliche Parameter sind die Amplitude \hat{u}_T , die Frequenz ω_T und der Phasenwinkel φ_T möglich.

Allgemein weist das Modulationssignal $u_M(t)$ beliebige Verläufe auf. Da diese gemäß Fourier-Analyse bekanntlich als Summe von Sinuskurven unterschiedlicher Amplitude und Frequenz darstellbar sind, kann das Modulationssignal grundsätzlich als sinusförmig betrachtet werden.

$$u_M(t) = \hat{u}_M \cdot \sin(\omega_M \cdot t \pm \varphi_M) \quad (13.5)$$

Vorstehende Ausführungen zeigen, dass es drei Möglichkeiten zur Beeinflussung des Trägersignals gibt. Wird die Amplitude des Trägersignals im Rhythmus des Modulationssignals geändert, dann liegt Amplitudenmodulation (AM) vor. Die Variation der Frequenz des Trägersignals führt zur Frequenzmodulation (FM), während die Beeinflussung des Phasenwinkels Phasenmodulation (PM) bewirkt.

Die Modulationsarten lassen sich so verstehen, als ob der jeweilige Parameter des Trägersignals durch das mit Hilfe einer Konstante k angepasste Modulationssignal ersetzt wird.



Amplitudenmodulation (AM)

$$u_{AM}(t) = k \cdot u_M \cdot \sin(\omega_T \cdot t \pm \varphi_T) \quad (13.6)$$



Frequenzmodulation (FM)

$$u_{FM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(k \cdot u_M(t) \cdot t \pm \varphi_T) \quad (13.7)$$



Phasenmodulation (PM)

$$u_{PM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t \pm k \cdot u_M(t)) \quad (13.8)$$

Da FM und PM die zeitabhängige Veränderung der Winkelangabe des Sinus bewirken, werden beide Modulationsarten auch als **Winkelmodulation** bezeichnet.



Frequenzmodulation
Phasenmodulation } Winkelmodulation

Auf der Empfangsseite wird durch Demodulation das Modulationssignal $u_M(t)$ aus dem modulierten Signal zurückgewonnen.

Amplitudenmodulation (AM)

Bei der Amplitudenmodulation wird die Amplitude des sinusförmigen Trägersignals durch das Modulationssignal variiert. Die Phasenwinkel der Signale spielen dabei keine Rolle. Um den Verlauf des amplitudenmodulierten Signals (AM-Signal) zu ermitteln, gilt folgender Ansatz:

$$u_{AM}(t) = \underbrace{(\hat{u}_T + \hat{u}_M \cdot \sin(\omega_M \cdot t))}_{\text{Amplitude}} \cdot \sin(\omega_T \cdot t) \quad (13.9)$$

Die Multiplikation ergibt:

$$u_{AM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t) + \hat{u}_T \cdot \left(\frac{\hat{u}_M}{\hat{u}_T} \cdot \sin(\omega_M \cdot t) \cdot \sin(\omega_T \cdot t) \right) \quad (13.10)$$

Umformung mit Hilfe des Additionstheorems führt zu folgender Form:

$$u_{AM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t) + \frac{m}{2} \cdot \left(\frac{\hat{u}_M}{\hat{u}_T} \cdot \cos((\omega_T - \omega_M) \cdot t) \right) - \frac{\hat{u}_T}{2} \cdot \left(\frac{\hat{u}_M}{\hat{u}_T} \cdot \cos((\omega_T + \omega_M) \cdot t) \right) \quad (13.11)$$

Das Verhältnis zwischen den Amplituden von Modulationssignal und Trägersignal wird als **Modulationsgrad** m bezeichnet.

$$m = \frac{\hat{u}_M}{\hat{u}_T} \quad (13.12)$$

Daraus folgt für das AM-Signal:

$$u_{AM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t) + \frac{m}{2} \cdot \hat{u}_T \cdot \cos((\omega_T - \omega_M) \cdot t) - \frac{m}{2} \cdot \hat{u}_T \cdot \cos((\omega_T + \omega_M) \cdot t) \quad (13.13)$$

Das am Ausgang des Modulators auftretende amplitudenmodulierte Signal $u_{AM}(t)$ ist nicht mehr rein sinusförmig, sondern es variieren die Amplituden des Trägersignals im Rhythmus der Amplituden des Modulationssignals. Die Verbindungsline zwischen den Maximal- und Minimalwerten wird als **Hüllkurve** bezeichnet. Deren Verlauf entspricht dem des Modulationssignals (**Bild 13.25**).

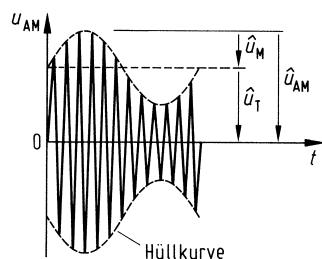


Bild 13.25 AM-Signal im Zeitbereich

Der Modulationsgrad m kann alle Werte zwischen null und eins annehmen, die Amplitude des Modulationssignals somit zwischen den Werten null und \hat{u}_T variieren.

$$0 \leq m \leq 1 \quad (13.14)$$

Wird das Modulationssignal größer als das Trägersignal, dann liegt Übermodulation vor. Diese ist jedoch unerwünscht, weil dann das Modulationssignal durch Demodulation nicht mehr ungestört zurückgewonnen werden kann.

$$\hat{u}_M > \hat{u}_T \rightarrow m > 1 \rightarrow \text{Übermodulation} \quad (13.15)$$

Die **Gleichung 13.13** zeigt, dass ein AM-Signal aus folgenden Anteilen besteht:

- Trägerfrequenz
- Summe aus Trägerfrequenz und Modulationsfrequenz
- Differenz aus Trägerfrequenz und Modulationsfrequenz

Die Anteile oberhalb und unterhalb der Trägerfrequenz werden als Seitenfrequenzen bezeichnet. Deren Amplituden sind vom Modulationsgrad abhängig. Im Regelfall weist das Modulationssignal nicht nur eine Frequenz auf, sondern besteht aus einer Summe von Anteilen mit unterschiedlichen Frequenzen. Da jeder Anteil eine Seitenfrequenz im AM-Signal bewirkt, ergeben sich als Gesamtheit Seitenbänder, und zwar oberhalb und unterhalb der Trägerfrequenz. Das Seitenband oberhalb der Trägerfrequenz ist das **obere Seitenband (OSB)** [upper sideband (USB)], während das Seitenband unterhalb der Trägerfrequenz **unteres Seitenband (USB)** [lower sideband (LSB)] heißt. Jedes Seitenband weist alle Anteile zwischen der kleinsten Frequenz des Modulationssignals $f_{M\min}$ und der größten Frequenz des Modulationssignals $f_{M\max}$ auf (**Bild 13.26**).

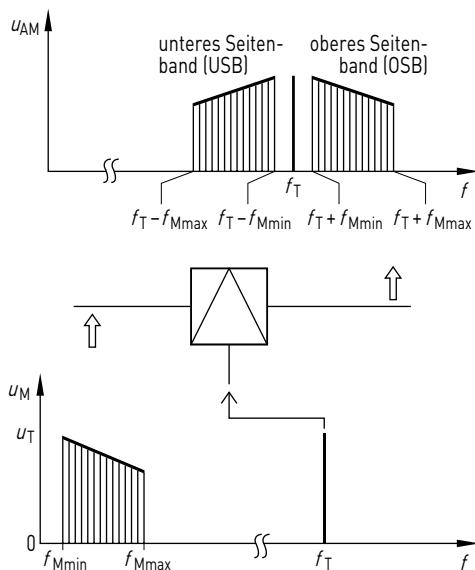


Bild 13.26 AM-Signal im Frequenzbereich

Das AM-Signal ist bezogen auf die Trägerfrequenz symmetrisch aufgebaut. Das Frequenzband des Modulationssignals tritt zweimal auf, wobei die Lage des oberen Seitenbandes dem des Basisbandsignals entspricht, während beim unteren Seitenband Umkehrung gegeben ist. Das OSB befindet sich also in Regellage (d. h. je größer die Frequenz des Modulationssignals, desto größer die Frequenz des AM-Signals), während für das USB Kehrlage (d. h. je größer die Frequenz des Modulationssignals, desto kleiner die Frequenz des AM-Signals) gilt (**Bild 13.27**).

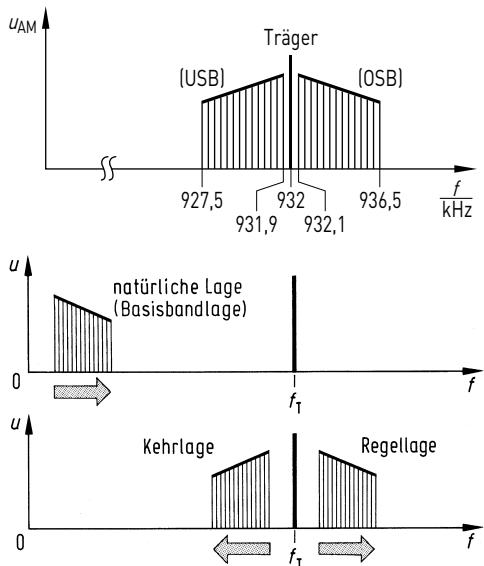


Bild 13.27 Regellage und Kehrlage beim AM-Signal

Die Darstellung des AM-Signals im Frequenzbereich zeigt, dass dessen Bandbreite unmittelbar von der größten Modulationsfrequenz abhängt. Wegen des symmetrischen Aufbaus des Signals entspricht der Frequenzbedarf genau dem doppelten Wert der größten Modulationsfrequenz. Soll also ein Signal von maximal 3,4 kHz übertragen werden, dann beträgt die Bandbreite des AM-Signals 6,8 KHz.

$$B_{\text{AM}} = 2 \cdot f_{\max} \quad (13.16)$$

Für die Dimensionierung von Schaltungen sind die Grenzwerte des AM-Signals von Interesse, also bei kleinstem Modulationsgrad ($m = 0$) und größtem Modulationsgrad ($m = 1$).

Ohne Modulation, also bei $m = 0$, besteht das AM-Signal nur aus dem Trägersignal \hat{u}_T . Beim maximalen Modulationsgrad $m = 1$ ergibt sich für das AM-Signal als kleinster Wert null, beim größten Wert ist es dagegen das Doppelte der Spitzenspannung des Trägersignals.

$$u_{\text{AM}(m=0)} = \hat{u}_T \quad (13.17)$$

$$u_{\text{AM}(m=1)} = 2 \cdot \hat{u}_T \quad (13.18)$$

$$u_{\text{AM}(m=1)} = 0 \quad (13.19)$$

$$u_{\text{AM}(m=1)} = 2 \cdot \hat{u}_T \quad (13.20)$$

Dies lässt sich auch mit Hilfe der Zeigerdarstellung veranschaulichen. Dabei wird der Zeiger für den Träger als feststehend betrachtet, während sich die Zeiger der beiden Seitenfrequenzen an deren Spitze angeordnet gegenläufig drehen und für jeden Zeitpunkt einen anderen resultierenden Gesamtzeiger bewirken (**Bild 13.28**).

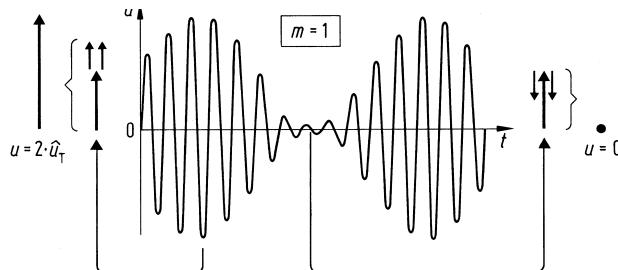


Bild 13.28 Grenzwerte beim AM-Signal

Damit der Modulator aus den beiden Eingangssignalen, nämlich Modulations- und Trägersignal, das AM-Signal als Ausgangssignal bilden kann, muss er eine bestimmte Arbeitskennlinie aufweisen. Sie soll die richtige Verknüpfung zwischen den beiden Eingangssignalen (Trägersignal, Modulationssignal) und dem Ausgangssignal (AM-Signal) bewirken. Eine lineare Kennlinie $u_2 = k \cdot u_1$ ist dafür nicht ausreichend, weil sich damit nur eine Überlagerung der beiden Eingangsfrequenzen ergibt. Für die Erzeugung der beiden Seitenbänder wird deshalb eine nichtlineare Kennlinie benötigt, im einfachsten Fall handelt es sich dabei um eine quadratische Kennlinie. Bei dieser ist die Ausgangsspannung u_2 mit der Eingangsspannung u_1 über eine Konstante k quadratisch verknüpft.

$$u_2 = k \cdot u_1^2 \quad (13.21)$$

Wird bei der Eingangsspannung von einer Reihenschaltung der Spannungen von Trägersignal $u_T(t)$, Modulationssignal $u_M(t)$ und einer den Arbeitspunkt bestimmenden Gleichspannung U_0 ausgegangen, dann ergibt sich:

$$u_2 = k \cdot (U_0 + \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t) + \hat{u}_M \cdot \sin(\omega_M \cdot t))^2 \quad (13.22)$$

Das Ergebnis der Ausrechnung zeigt, dass bedingt durch die quadratische Kennlinie einerseits die für AM relevanten Anteile auftreten, andererseits aber auch einige unerwünschte Anteile im Signal enthalten sind. Es gilt:

$$\begin{aligned} u_2 = & k \cdot (U_0^2 + 2 \cdot U_0 \cdot \hat{u}_T \cdot \sin(\omega_T \cdot t) + 2 \cdot U_0 \cdot \hat{u}_M \cdot \sin(\omega_M \cdot t) \\ & + \hat{u}_T \cdot \hat{u}_M \cdot \cos((\omega_T - \omega_M) \cdot t) - \hat{u}_T \cdot \hat{u}_M \cdot \cos((\omega_T + \omega_M) \cdot t) \\ & + \hat{u}_T^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega_T \cdot t) \right) - \hat{u}_M^2 \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega_M \cdot t) \right)) \end{aligned} \quad (13.23)$$

Die nicht erwünschten Anteile liegen mit ihren Frequenzen ausreichend entfernt von der Trägerfrequenz und den Seitenbandfrequenzen, so dass sie durch einen Bandpass unterdrückt werden können. Mit $U_0 = \hat{u}_T$ und $k = 1 / (2 \cdot \hat{u}_T)$ geht dann der verbleibende Rest vorstehender Gleichung in die bekannte Form für das AM-Signal über.

Die beim AM-Modulator erforderliche nichtlineare Abhängigkeit zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung kann durch den Einsatz von Dioden, Transistoren und Röhren erreicht werden.

Bei Verwendung der Amplitudenmodulation (AM) für Funkdienste ist eine entsprechende Ausgangsleistung des AM-Senders erforderlich, um die gewünschte Strahlungsleistung bewirken zu können. Dies wird üblicherweise durch eine dem AM-Modulator nachgeschaltete Leistungsverstärkerstufe erreicht.

Wie das AM-Signal selbst, ist auch die Ausgangsleistung P_{AM} vom Modulationsgrad abhängig. Grundsätzlich gilt für die Wirkleistung das Integral über eine Periode des Quadrates des AM-Signals:

$$P_{\text{AM}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T \frac{(u_{\text{AM}}(t))^2}{R} dt \quad (13.24)$$

Ein Grenzfall liegt bei $m = 0$ vor, also ohne Modulationssignal. Die Ausgangsleistung wird dann nur durch das Trägersignal bestimmt. Sie wird als Trägerleistung P_T [carrier power P_c] bezeichnet und gilt als Bezuggröße für weitere Leistungsangaben.

$$P_{\text{AM}} (m=0) = \frac{u_T^2}{R} \quad (13.25)$$



Trägerleistung P_T [carrier power P_c] = Wirkleistung während einer Periode des AM-Signals, wenn kein Modulationssignal vorhanden ist

Betrachtet man nun das AM-Signal, wenn das Modulationssignal den größten Augenblickswert aufweist, dann ergibt sich der Wert für die Spitzenleistung \hat{P}_{AM} [peak envelope power (PEP)]. Er kann als Fläche unter der über eine Periode des Trägersignals betrachteten $u_{\text{AM}}^2(t)$ -Kurve verstanden werden (**Bild 13.29**).

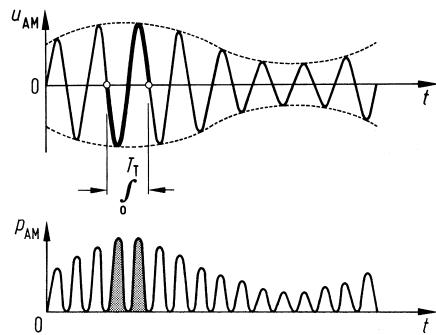


Bild 13.29 AM-Spitzenleistung

Die Berechnung führt zu folgendem Ergebnis:

$$\hat{P}_{\text{AM}} = (1+m)^2 \cdot P_T \quad (13.26)$$

Der größte Wert der Spitzenleistung tritt bei $m = 1$ auf. Er beträgt das Vierfache der Spitzenleistung.

$$\hat{P}_{\text{AM}} = (m+1) = 4 \cdot P_T \quad (13.27)$$



Spitzenleistung \hat{P}_{AM} [peak envelope power (PEP)] = Wirkleistung während einer Periode des AM-Signals, wenn das Modulationssignal seinen größten Augenblickswert aufweist

Während die Spitzenleistung für die elektrische Belastbarkeit der Bauelemente von Bedeutung ist, stellt die mittlere Leistung \bar{P}_{AM} [mean power (P_m)] ein Kriterium für die auftretende Wärmebelastung des Senders dar. Die mittlere Leistung bezieht sich auf das AM-Signal während einer Periode der kleinsten Frequenz (also größte Periodendauer) des Modulationssignals.

Die Berechnung der mittleren Leistung erfolgt in analoger Weise zur Spitzenleistung. Die Integration ist jedoch etwas aufwendiger, da sie zuerst über die Periode des Trägersignals T_T und dann über die größte Periodendauer des Modulationssignals $T_{M\max}$ erfolgen muss.

$$\bar{P}_{\text{AM}} = \frac{1}{T_{\max}} \cdot \int_0^{T_{M\max}} \left(\frac{1}{T_T} \cdot \int_0^{T_T} \frac{u_{\text{AM}}(t)^2}{R} dt \right) dt \quad (13.28)$$

Die Ausrechnung ergibt:

$$\bar{P}_{\text{AM}} = \left(1 + \frac{m^2}{2} \right) \cdot P_T \quad (13.29)$$

Daraus folgt, dass der größte Wert der mittleren Leistung bei $m = 1$ auftritt und den anderthalbfachen Wert der Trägerleistung annimmt.

$$\bar{P}_{\text{AM}} (m=1) = \frac{3}{2} \cdot P_T \quad (13.30)$$



Mittlere Leistung \bar{P}_{AM} [mean power P_m] = Wirkleistung des AM-Signals während der kleinsten Frequenz (d. h. größten Periodendauer) des Modulationssignals

Die bisherigen Betrachtungen gelten stets für das gesamte AM-Signal. Es setzt sich aus der Trägerleistung und den Seitenbandleistungen zusammen.

$$\bar{P}_{\text{AM}} = P_T + P_{\text{USB}} + P_{\text{OSB}} \quad (13.31)$$

Da die beiden Seitenbandleistungen gleich sind, ist folgende Vereinfachung möglich:

$$\bar{P}_{\text{AM}} = P_T + 2 \cdot P_{\text{SB}} \quad (13.32)$$

Die Ausrechnung führt zu folgendem Ergebnis für die Seitenbandleistung:



$$P_{\text{SB}} = \frac{m^2}{4} \cdot P_T$$

Das bisher betrachtete AM-Verfahren wird wegen des symmetrischen Signalaufbaus als **Zweiseitenband-Amplitudenmodulation** (ZSB-AM) [double sideband amplitude modu-

lation (DSB-AM)] bezeichnet. Da für die zu übertragende Information eigentlich nur ein Seitenband erforderlich ist und auch der Träger nicht zur Information beiträgt, sind abgeleitet von der ZSB-AM verschiedene AM-Verfahren mit besserem Wirkungsgrad entwickelt worden.

Im AM-Signal hat das Trägersignal bekanntlich den größten Anteil. Wird der Träger völlig oder teilweise unterdrückt, dann verändert sich die Leistungsaufteilung im Ausgangssignal, weil die Anteile für die Seitenbänder größer werden. Die vollständige Unterdrückung des Trägers wird konsequenterweise als **Trägerunterdrückung** [carrier suppression] bezeichnet (Bild 13.30). Bei teilweiser Reduzierung des Trägersignals handelt es sich um **Trägerabsenkung** [carrier reduction] (Bild 13.31). Die Angabe über den Umfang der Absenkung des Trägersignals erfolgt in Dezibel (dB). Das verbleibende Trägersignal heißt Restträger.

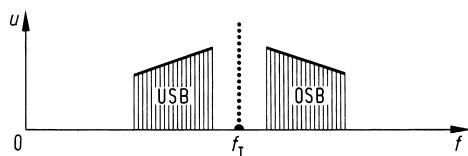


Bild 13.30 Zweiseitenband-AM mit Trägerunterdrückung

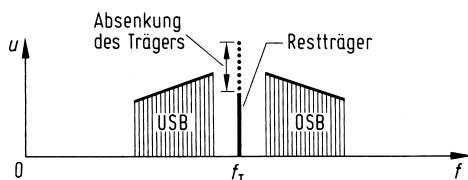


Bild 13.31 Zweiseitenband-AM mit Trägerabsenkung

Durch Trägerunterdrückung oder Trägerabsenkung vergrößert sich der Leistungsanteil für die Seitenbänder. Da beide Seitenbänder dieselbe Information beinhalten, kann ohne Informationsverlust auch nur ein Seitenband übertragen werden. Dieses Verfahren wird als **Einseitenband-Amplitudenmodulation** (ESB-AM) [single sideband amplitude modulation (SSB-AM)] bezeichnet und ist für das obere und untere Seitenband möglich (Bild 13.32).

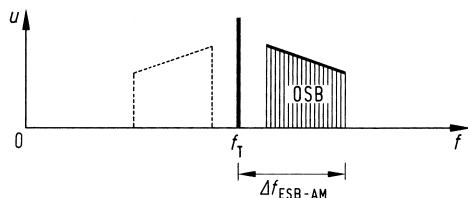


Bild 13.32 Einseitenband-AM

In beiden Fällen beträgt die Bandbreite dann nur noch die Hälfte des Wertes für die ZSB-AM, nämlich genau der größten Frequenz des Modulationssignals.

$$B_{\text{ESB-AM}} = f_{\text{Mmax}} \quad (13.33)$$

Das Einseitenbandverfahren wird in der Praxis mit Trägerunterdrückung oder Trägerabsenkung eingesetzt. Dies ermöglicht eine optimale Kombination zwischen Leistung und Bandbreite.

Das Einseitenbandverfahren ist auch zweimal bei demselben Träger anwendbar. Dazu wird bei einem ZSB-AM-Signal das obere Seitenband unterdrückt und bei einem anderen das untere Seitenband. In jedem Seitenband treten damit unterschiedliche Informationen auf, also **voneinander unabhängige Seitenbänder** [independent sideband (ISB)]. Der Vorteil besteht darin, dass nur eine Trägerfrequenz für zwei Modulationssignale erforderlich ist.



Zweiseitenband-AM mit voneinander unabhängigen Seitenbändern [independent sideband (ISB-AM)] ermöglicht die gleichzeitige Übertragung zweier unterschiedlicher Modulationssignale.

Sollen durch Amplitudenmodulation auch sehr kleine Modulationsfrequenzen übertragen werden, dann liegen diese ganz nahe beim Trägersignal. Dies führt bei der Auf- und Abbereitung eines ESB-Signals zu Filterproblemen. Abhilfe dafür bietet die **Restseitenband-Amplitudenmodulation** (RSB-AM) [vestigial sideband amplitude modulation (VSB-AM)]. Dabei wird noch ein Teil des zweiten Seitenbandes mit übertragen, so dass die Rückgewinnung der kleinen Modulationsfrequenzen unproblematisch erfolgen kann (**Bild 13.33**).

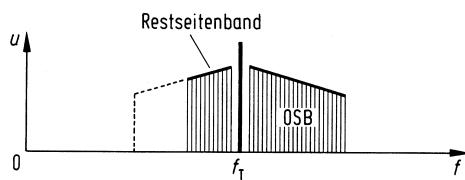


Bild 13.33 Restseitenband-AM

Die Bandbreite eines RSB-AM-Signals liegt somit zwischen den Werten für ESB-AM und ZSB-AM. Eine typische Anwendung der Restseitenband-Amplitudenmodulation ist beim analogen Fernsehen gegeben.

Bei der ISB-AM werden bekanntlich mit Hilfe eines Trägersignals zwei unterschiedliche Modulationssignale übertragen. Dies kann technisch eleganter mit der **Quadratur-Amplitudenmodulation** (QAM) [quadrature amplitude modulation (QAM)] gelöst werden. Es handelt sich um zwei ZSB-AM-Signale, bei denen zwar die Frequenz der beiden Trägersignale gleich ist, jedoch eine Phasenverschiebung von 90° besteht. Die Zusammenfassung beider Signale führt zu dem resultierenden QAM-Signal, dessen Bandbreite dem eines ZSB-AM-Signals entspricht (**Bild 13.34**).

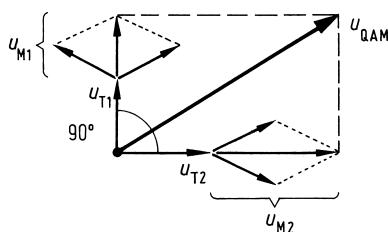


Bild 13.34 Quadratur-Amplitudenmodulation

Für die Erzeugung des QAM-Signals wird ein Trägerfrequenzgenerator verwendet und dessen Ausgangssignal dem einen ZSB-AM-Modulator direkt zugeführt, während es der andere über einen 90° -Phasenschieber erhält. Mit Hilfe eines Summierers werden die Ausgänge der beiden Modulatoren zum QAM-Signal zusammengefasst (Bild 13.35).

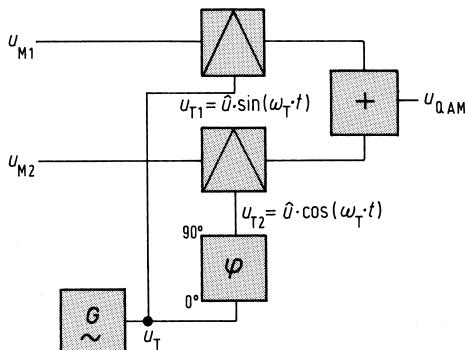


Bild 13.35 Modulator für QAM

Mathematisch betrachtet, weist das Trägersignal für den einen Modulator Sinusform auf, während der Phasenschieber für den anderen Modulator Cosinusform bewirkt. Der Ausgang des direkt angesteuerten Modulators wird auch als **Inphase-Komponente** (I-Komponente) bezeichnet, während es beim phasenverschoben angesteuerten Modulator die **Quadratur-Komponente** (Q-Komponente) ist.

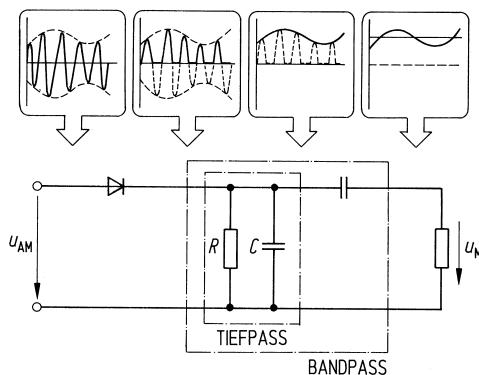


Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM)

- Trägersignal sinusförmig →
Signal am Modulatorausgang: Inphase-Komponente (I-Komponente)
- Trägersignal cosinusförmig →
Signal am Modulatorausgang: Quadratur-Komponente (Q-Komponente)

Bei der Demodulation von AM-Signalen ist zwischen inkohärenten und kohärenten Verfahren zu unterscheiden. Bei **inkohärenter Demodulation** wird das Trägersignal nicht benötigt, während bei kohärenter Demodulation für die Funktionsfähigkeit das Träger-Signal erforderlich ist.

AM-Demodulation für das inkohärente Verfahren nutzen die in der Hüllkurve des AM-Signals enthaltenen Informationen. Dafür reicht bereits eine einfache Diodenschaltung aus. Die Diode bewirkt dabei die Gleichrichtung des AM-Signals. Durch einen nachgeschalteten Bandpass erfolgt die Ausfilterung des Modulationssignals. Dieser lässt sich bereits mit einem *RC*-Glied als Tiefpass in Verbindung mit einem Kondensator zur Abtrennung des Gleichspannungsanteils realisieren (Bild 13.36).

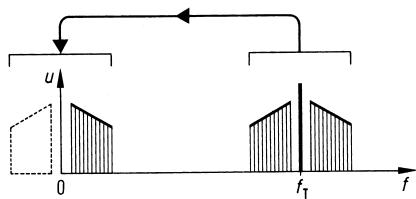
**Bild 13.36** AM-Demodulator mit Diode

Das RC -Glied muss dabei so bemessen sein, dass zwar die hochfrequenten Trägersignalanteile möglichst gut unterdrückt werden, jedoch keine signifikante Beeinflussung des niederfrequenten Modulationssignals auftritt. Für diese Zeitkonstante des RC -Gliedes gilt folgender Bereich:

$$T_T < T = R \cdot C < T_M \quad (13.34)$$

Wegen der aufgezeigten Funktionsweise des Dioden-Demodulators gilt für ihn die Bezeichnung **Hüllkurvendetektor** oder Spitzenvoltgleichrichter. Er erfordert nur geringen Schaltungsaufwand, es sind allerdings Verzerrungen beim Ausgangssignal nicht ganz vermeidbar.

Bei **kohärenter Demodulation** wird das durch die Modulation frequenzmäßig um die Trägerfrequenz verschobene Modulationssignal wieder in die Basisbandbreite gebracht (**Bild 13.37**). Es handelt sich im Prinzip um eine Abwärtsmischung, die bei großen Frequenzen auch in mehreren Schritten über Zwischenfrequenzen erfolgen kann. Derartige Demodulationsschaltungen heißen **Synchondemodulator** oder Produktdetektor und erfordern für ihre bestimmungsgemäße Funktion stets ein Signal mit der Trägerfrequenz.

**Bild 13.37** Kohärente Demodulation

Wird bei einem amplitudenmodulierten Signal mit vollem oder abgesenktem Träger gearbeitet, dann lässt sich das trägerfrequente Signal aus dem AM-Signal durch Filterung gewinnen, was als **Trägerrückgewinnung** bezeichnet wird. Bei unterdrücktem Träger muss dagegen ein frequenzstabil Generator zur Verfügung stehen.



Für kohärente Demodulation ist Trägerrückgewinnung oder ein ausreichend frequenzstabil Generator erforderlich.

Es lässt sich aus den Gleichungen für die AM-Signale ableiten, dass im Regelfall bei der Demodulation das Signal mit der Trägerfrequenz auch in der Phasenlage mit dem Trägersignal übereinstimmen muss.

Synchron demodulatoren sind für alle aufgezeigten AM-Varianten verwendbar. Sie liefern bei vertretbarem technischem Aufwand optimale Ergebnisse. Im Falle der QAM wird das Demodulationskonzept zweifach angewendet, wobei die beiden Signale mit Trägerfrequenz allerdings 90 Grad Phasenverschiebung zueinander aufweisen müssen.



Synchro demodulation bei QAM erfordert zwei Signale mit Trägerfrequenz und 90 Grad Phasenverschiebung zueinander.

Frequenzmodulation (FM)

Bei Frequenzmodulation (FM) ändert sich die Frequenz des Trägersignals f_T proportional zum Spannungsverlauf des Modulationssignals $u_M(t)$. Der Phasenwinkel kann als konstant betrachtet werden und lässt sich für die weiteren Betrachtungen vernachlässigen. Das frequenzmodulierte Signal (FM-Signal) am Ausgang des Modulators $u_{FM}(t)$ ist sinusförmig, weist im Gegensatz zum AM-Signal eine konstante Amplitude auf und ist für jeden Zeitpunkt durch eine bestimmte Frequenz gekennzeichnet, wobei diese zwischen einem kleinsten und größten Wert liegt. Die Abweichung von der Trägerfrequenz wird als **Frequenzhub** Δf_T oder $\Delta \omega_T$ bezeichnet (**Bild 13.38**).

$$\Delta \omega_T = 2 \cdot \pi \cdot \Delta f_T \sim u_M(t) \quad (13.35)$$

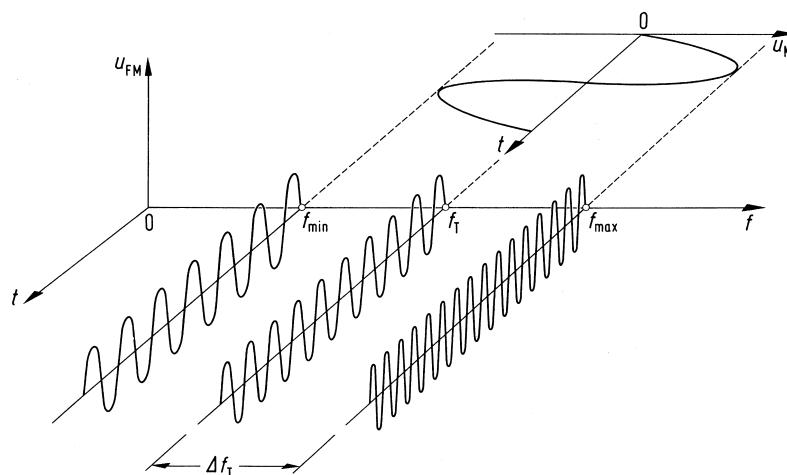


Bild 13.38
Frequenzhub



FM-Signal

- Sinusförmiger Verlauf
- Konstante Amplitude
- Frequenz ändert sich proportional zum Modulationssignal $u_M(t)$

Die Amplitude des Modulationssignals bestimmt bekanntlich die Frequenz des FM-Signals, die Frequenz des Modulationssignals dagegen die zeitliche Änderung des zum Sinus gehörenden Winkels α . Es gilt:

$$u_{\text{FM}}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin(\alpha(t)) \quad (13.36)$$

Wird jetzt das Modulationssignal einbezogen, dann ergibt sich:

$$u_{\text{FM}}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin\left((\omega_T \cdot t) + \frac{\Delta\omega_T}{\omega_M} \cdot \sin(\omega_M \cdot t)\right) \quad (13.37)$$

Für das Verhältnis zwischen Frequenzhub $\Delta\omega_T$ und Modulationsfrequenz ω_M gilt die Bezeichnung Modulationsindex M .

$$M = \frac{\Delta\omega_T}{\omega_M} = \frac{\Delta f_T}{f_M} \quad (13.38)$$

Die Zeitfunktion des FM-Signals weist damit folgende Form auf:

$$u_{\text{FM}}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin((\omega_T + M \cdot \sin \omega_M) \cdot t) \quad (13.39)$$

Die Berechnung dieser ineinander verschachtelten Winkelfunktionen ergibt eine Überlagerung von Sinuskurven, deren Amplituden vom Modulationsindex abhängen. Die Werte bestimmen sich aus den Bessel-Funktionen $J_n(M)$ und können entsprechenden Kurven oder Tabellen entnommen werden (**Bild 13.39**). Die Frequenzen der vorstehend angeführten Sinuskurven liegen jeweils im Abstand der Modulationsfrequenz beidseitig zur Trägerfrequenz.

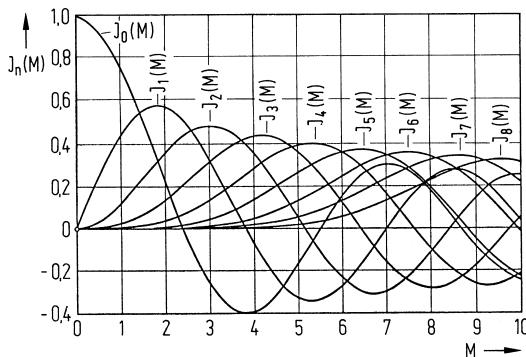


Bild 13.39 Bessel-Funktionen

Bei FM-Signalen treten also Seitenfrequenzen auf, deren Amplituden durch die Bessel-Funktionen bestimmt sind. Es gilt:

$$u_{\text{FM}}(t) = \hat{u}_T \cdot J_0(M) \cdot \sin(\omega_T \cdot t) + \hat{u}_T \cdot \sum_{n=1}^{\infty} J_n(M) \cdot \sin((\omega_T + n \cdot \omega_M) \cdot t) + \hat{u}_T \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot J_n(M) \cdot \sin((\omega_T - n \cdot \omega_M) \cdot t) \quad (13.40)$$

In ausgeschriebener Form ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 u_{\text{FM}}(t) = & \hat{u}_{\text{T}} \cdot J_0(M) \cdot \sin(\omega_{\text{T}} \cdot t) \\
 & + \hat{u}_{\text{T}} \cdot J_1(M) \cdot \sin((\omega_{\text{T}} + \omega_{\text{M}}) \cdot t) \\
 & + \hat{u}_{\text{T}} \cdot J_2(M) \cdot \sin((\omega_{\text{T}} + 2 \cdot \omega_{\text{M}}) \cdot t) \\
 & + \hat{u}_{\text{T}} \cdot J_3(M) \cdot \sin((\omega_{\text{T}} + 3 \cdot \omega_{\text{M}}) \cdot t) + \dots + \dots \\
 & - \hat{u}_{\text{T}} \cdot J_1(M) \cdot \sin((\omega_{\text{T}} - \omega_{\text{M}}) \cdot t) \\
 & + \hat{u}_{\text{T}} \cdot J_2(M) \cdot \sin((\omega_{\text{T}} - 2 \cdot \omega_{\text{M}}) \cdot t) \\
 & + \hat{u}_{\text{T}} \cdot J_3(M) \cdot \sin((\omega_{\text{T}} - 3 \cdot \omega_{\text{M}}) \cdot t) + \dots - \dots
 \end{aligned} \tag{13.41}$$

Während die Seitenfrequenzen oberhalb der Trägerfrequenz stets positive Amplitudenwerte aufweisen, treten bei den Seitenfrequenzsignalen unterhalb der Trägerfrequenz alternierende Vorzeichen auf. Dies ist bei Darstellung der Frequenzfunktion zu beachten. In der Fachliteratur wird allerdings häufig nur mit Beträgen gearbeitet, wobei dann ausschließlich positive Anteile auftreten.

Das Spektrum des FM-Signals ist also theoretisch unbegrenzt. Die neben dem Trägersignal auftretenden Seitenfrequenzsignale werden auch als Seitenschwingungen bezeichnet und sind mit zunehmender Frequenz vernachlässigbar, weil mit steigender Ordnungszahl die Amplituden abnehmen.



Die Amplituden der Seitenschwingungen nehmen mit zunehmender Frequenz ab.



Beispiel:

Für ein FM-Signal sei der Modulationsindex $M = 2$ und die Modulationsfrequenz $f_{\text{M}} = 5 \text{ kHz}$. In welchem Verhältnis stehen die Seitenschwingungen zum Träger?

Die gesuchten Werte ergeben sich aus den Bessel-Funktionen:

$$f_{\text{T}} : J_0(2) = +0,22$$

$$f_{\text{T}} - 5 \text{ kHz} : J_1(2) = -0,58$$

$$f_{\text{T}} + 5 \text{ kHz} : J_1(2) = 0,58$$

$$f_{\text{T}} - 10 \text{ kHz} : J_2(2) = +0,35$$

$$f_{\text{T}} + 10 \text{ kHz} : J_2(2) = 0,35$$

$$f_{\text{T}} - 15 \text{ kHz} : J_3(2) = -0,13$$

$$f_{\text{T}} + 15 \text{ kHz} : J_3(2) = 0,13$$

$$f_{\text{T}} - 20 \text{ kHz} : J_4(2) = +0,03$$

$$f_{\text{T}} + 20 \text{ kHz} : J_4(2) = 0,03$$

Die Zahl der Seitenschwingungen ist unmittelbar vom Modulationsindex M abhängig. Es gilt:

- M klein → Wenige Seitenschwingungen
- M groß → Viele Seitenschwingungen

Die Praxis zeigt, dass mindestens $M + 1$ Seitenschwingung für eine Übertragung berücksichtigt werden müssen, wenn diese eine vertretbare Qualität aufweisen soll.

Die Bandbreite des FM-Signals lässt sich deshalb unmittelbar aus dem Frequenzhub und der größten Frequenz des Modulationssignals berechnen, da sich Modulationsindex M und Frequenzhub Δf_T proportional zueinander verhalten.

$$B_{\text{FM}} = 2 \cdot (\Delta f_T + f_M) \quad (13.42)$$



Beispiel:

Im UKW-Bereich (87,5 MHz bis 108 MHz) wird Hörfunk mit Frequenzmodulation übertragen. Der maximale Frequenzhub ist mit 75 kHz festgelegt, während die größte Modulationsfrequenz 15 kHz beträgt. Aus diesen Vorgaben lassen sich als Modulationsindex $M = 5$ und als Bandbreite des FM-Signals $B_{\text{FM}} = 180$ kHz berechnen.

Im Gegensatz zum AM-Signal benötigt das FM-Signal erheblich mehr Bandbreite. Diesem Nachteil steht allerdings der Vorteil einer geringeren Empfindlichkeit gegen Störungen bei der Übertragung gegenüber.



FM erfordert gegenüber AM mehr Bandbreite, weist dafür aber eine geringere Empfindlichkeit gegen Störeinflüsse auf.

Die Erzeugung eines FM-Signals basiert immer auf dem Konzept, dass die Kapazität oder Induktivität eines Oszillators proportional zum Verlauf des Modulationssignals geändert wird.

In der Praxis werden häufig Kapazitätsdioden (Varicap-Dioden) eingesetzt. Sie arbeiten als spannungsgesteuerte Kapazität und ermöglichen damit die Variation der Frequenz der Oszillatorschaltung. Mit Hilfe einer Gleichspannung wird der Arbeitspunkt der Kapazitätsdiode festgelegt und damit auch die Trägerfrequenz. Durch Überlagerung des Modulationssignals variiert die Spannung an der Diode und damit auch deren Kapazität. Folge ist die gewünschte Änderung der Frequenz des Oszillators (**Bild 13.40**).

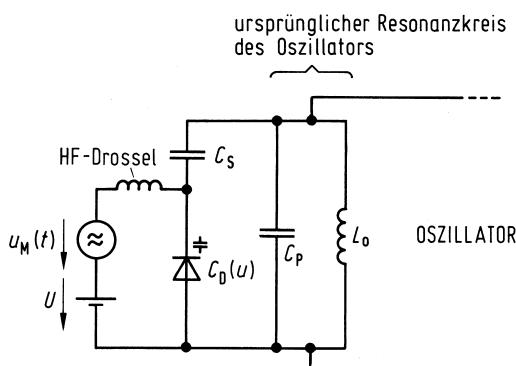


Bild 13.40 FM mit Kapazitätsdiode

Es können auch elektronische Kapazitäten oder Induktivitäten für die Frequenzbestimmung eingesetzt werden (**Bild 13.41**). Diese nutzen die Phasenbeziehungen zwischen Strom und Spannung bei aktiven und passiven Bauelementen. Bei der elektronischen Kapazität muss die Ausgangsspannung dem Ausgangsstrom um 90 Grad nacheilen, während bei der elektronischen Induktivität eine Voreilung um 90 Grad erforderlich ist. Da als Steuerspannung das Modulationssignal dient, ergibt sich am Ausgang des Oszillators das gewünschte FM-Signal, weil die Oszillatorkreisfrequenz proportional zum Modulationssignal variiert.

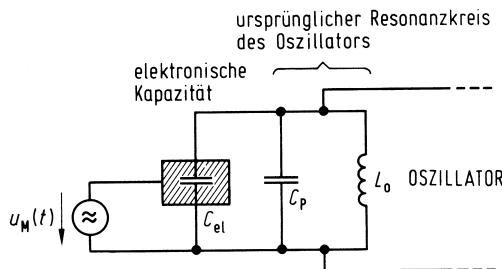


Bild 13.41 FM mit elektronischer Kapazität

Bei der Demodulation von FM-Signalen ist die Umsetzung von Frequenzänderungen in Spannungsänderungen erforderlich. Die einfachste Lösung dafür ist die Nutzung der Frequenzabhängigkeit von Resonanzkreisen. Dabei ist deren Resonanzfrequenz so zu wählen, dass die Trägerfrequenz des FM-Signals auf der Mitte einer der Flanken der Resonanzkurve liegt. Die durch den Frequenzhub bedingte Variation der Frequenz bewirkt dann eine Spannungsänderung. Sie stellt eine Amplitudenmodulation dar, deren weitere Verarbeitung schon bekannt ist. Das Konzept der Wandlung von FM in AM mit anschließender Demodulation wird als **Flankendiskriminator** bezeichnet (**Bild 13.42**). Die Qualität seiner Funktion hängt von der Länge und Geradlinigkeit der Flanke des Resonanzkreises ab. Außerdem muss vor dem Flankendiskriminator unbedingt ein Amplitudengrenzer eingesetzt werden, damit sich Stör-AM nicht auswirken kann.

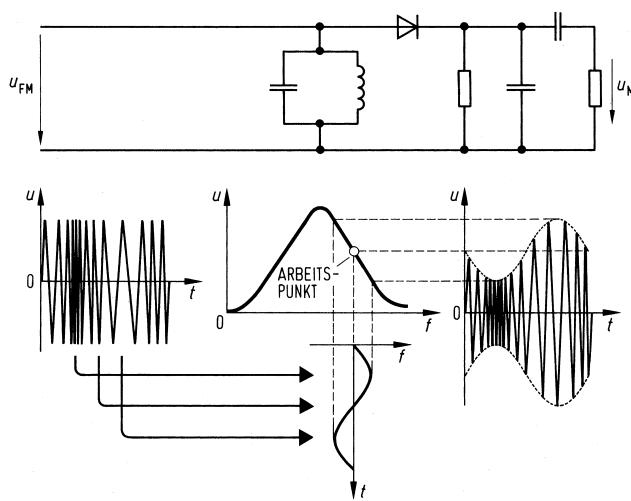


Bild 13.42 Flankendiskriminator

Durch zwei gegeneinander geschaltete Flankendiskriminatoren lässt sich die Arbeitskennlinie verlängern, so dass auch größere Frequenzhübe verzerrungsfrei verarbeitet werden können.

Die Demodulation von FM-Signalen kann auch mit Hilfe phasenabhängiger Schaltungen erfolgen. Dabei werden Bandfilter verwendet, die zweifach miteinander gekoppelt sind. Durch feste Kopplung bleibt die Phasenlage des Signals erhalten, während bei loser Kopplung bezogen auf die Resonanzfrequenz eine Phasenverschiebung von genau 90° zwischen den Spannungen am Eingang und Ausgang auftritt. Abweichungen von der Resonanzfrequenz bewirken proportionale Änderungen der Phasenverschiebung.

In der Praxis eingesetzte Schaltungen verwenden eine Mittelanzapfung am Ausgangskreis des Bandfilters, auf die sich zwei Dioden beziehen. Im Falle dieser als **Phasendiskriminator** bezeichneten Schaltung tritt vor den Dioden jeweils eine Spannung auf, die aus der Phasenbeziehung zwischen den beiden eingekoppelten Spannungen u_1 und $u_2/2$ resultiert (**Bild 13.43**). Bei Trägerfrequenzen ergeben sich an den beiden Widerständen gleich große, aber wegen der Diodenpolung gegeneinander gerichtete Spannungen u_a und u_b . Das Ausgangssignal ist deshalb null. Bei Abweichungen von der Trägerfrequenz ändert sich die Phasenlage der lose eingekoppelten Spannung und damit auch das Ausgangssignal. Dessen Verlauf entspricht dabei genau der Frequenzänderung im FM-Signal.

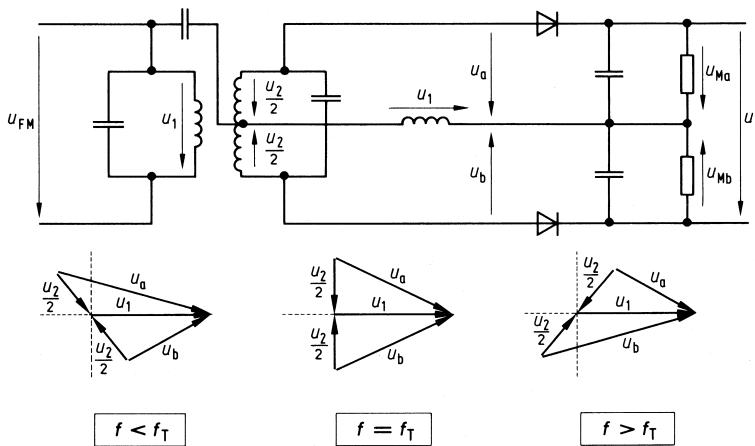


Bild 13.43 Phasendiskriminator

Für Phasendiskriminatoren gibt es zahlreiche schaltungstechnische Varianten, die aber alle auf dem vorstehend beschriebenen Konzept basieren.

Die Demodulation von FM-Signalen erfolgt in den meisten Fällen inzwischen nicht mehr mit Diskriminatoren, die passive Schaltungen mit Resonanzkreisen nutzen, sondern durch **Phasenregelkreise** [phase-locked loop (PLL)], die aktive Zweitore darstellen. Das FM-Signal gelangt dabei zu einem Kompensator für den Phasenvergleich. Als Referenzfrequenz dient das Signal eines spannungsgesteuerten Oszillators [voltage controlled oscillator (VCO)]. Dessen Steuerspannung ergibt sich aus dem Ausgangssignal des Komparators nach entsprechender Verarbeitung (**Bild 13.44**).

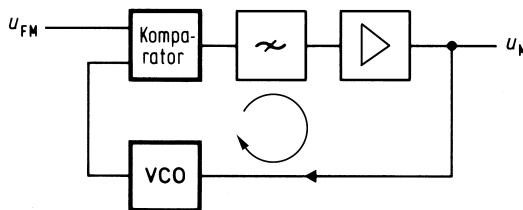


Bild 13.44 FM-Demodulator mit Phasenregelkreis

Der Regelkreis ist so eingestellt, dass bei der Trägerfrequenz auch der VCO diese Frequenz erzeugt. Damit ist die Ausgangsspannung null. Jede Variation der Frequenz des Eingangssignals bewirkt ein Ausgangssignal beim Komparatoren. Über den Tiefpass wird der VCO angesteuert. Er führt seine Frequenz damit auf die Eingangs frequenz nach. Die Ausgangsspannung der PLL-Schaltung entspricht deshalb dem Modulationssignal.

FM-Demodulatoren mit Phasenregelkreisen sind im Regelfall nicht mit diskreten Bauelementen aufgebaut, sondern stehen als einfach beschaltbare Integrierte Schaltungen (IC) zur Verfügung.

Eine weitere Möglichkeit für die FM-Demodulation bietet der **Zähldiskriminator** (**Bild 13.45**). Diese Schaltung formt die Nulldurchgänge des FM-Signals in Pulse konstanter Amplitude und Dauer um. Der Abstand zwischen den Pulsen bestimmt sich aus dem Modulationssignal. Durch Mittelwertbildung über den zeitlichen Verlauf der Pulsfolge kann dieses zurückgewonnen werden.

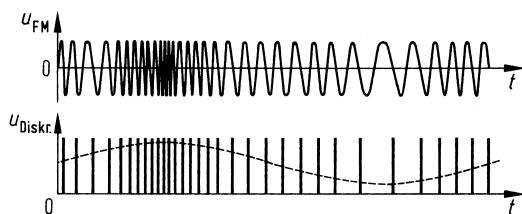


Bild 13.45 Zähldiskriminator

Phasenmodulation (PM)

Bei der Phasenmodulation (PM) wird im Gegensatz zur FM nicht die Frequenz, sondern der Phasenwinkel des Trägersignals proportional zum Modulationssignal $u_M(t)$ verändert. Die Abweichung aus der Ruhelage wird deshalb konsequenterweise als Phasenhub $\Delta\varphi_T$ bezeichnet.

$$\Delta\varphi_T = |\varphi_T - \varphi_M| \sim u_M(t) \quad (13.43)$$

Die Geschwindigkeit für die Änderung des Phasenwinkels ist von der Modulationsfrequenz abhängig. Die Zeigerdarstellung der PM veranschaulicht, wie der Zeiger des Phasenhubs aus seiner Ruhelage ausgelenkt wird.

Unter Berücksichtigung des Phasenhubs ergibt sich folgende Zeitfunktion für das phasenmodulierte Signal:

$$u_{PM}(t) = \hat{u}_T \cdot \sin((\omega_T + \Delta\varphi_T \cdot \sin \omega_M) \cdot t) \quad (13.44)$$

Es ist eine der Frequenzmodulation vergleichbare Signalstruktur gegeben. Der Vorteil von PM gegenüber FM besteht allerdings darin, dass bei gleichen Randbedingungen ein kleinerer Störabstand für die bestimmungsgemäße Funktion ausreicht.



Phasenmodulation (PM) weist gegenüber Frequenzmodulation (FM) eine größere Störfestigkeit auf.

PM-Signale werden üblicherweise durch Überlagerung von zwei AM-Signalen gebildet, die 90 Grad Phasenverschiebung zueinander aufweisen, jedoch dasselbe Modulationssignal verwenden. Das bedeutet:

$$u_{\text{PM}}(t) = u_{\text{AM}}(t) + (u_{\text{AM}}(t) + 90^\circ) \quad (13.45)$$

Für die Demodulation von PM-Signalen sind den Demodulatoren für FM vergleichbare Schaltungen verwendbar.

13.3.3 Analoges Modulationssignal/Pulsförmiges Trägersignal

Anstelle sinusförmiger Trägersignale sind auch rechteckförmige Pulsfolgen als digitale Trägersignale möglich. Diese können einfach erzeugt werden und lassen sich gemäß Fourier-Analyse auf die Überlagerung von Sinuskurven unterschiedlicher Frequenz und Amplitude zurückführen.

Für die Modulation stehen bei einem solchen Trägersignal die Pulsamplitude, die Pulsfrequenz, die Pulspause und die Pulsdauer als Parameter zur Verfügung. Es liegen also bei dieser Pulsmodulation vergleichbare Verhältnisse wie bei analogen Trägern vor.



Parameter des pulsförmigen Trägersignals

- Pulsamplitude
- Pulsfrequenz
- Pulspause
- Pulsdauer

Es lassen sich deshalb folgende Modulationsvarianten unterscheiden:

- Pulsamplitudenmodulation (PAM)
- Pulsfrequenzmodulation (PFM)
- Pulspausenmodulation (PPM)
- Pulsdauermodulation (PDM)

Pulsmodulation wird nur bei leitungsgebundener Übertragung verwendet, da sich pulsförmige Träger für Funkanwendungen nicht realisieren lassen.

Pulsamplitudenmodulation (PAM)

Bei der Pulsamplitudenmodulation (PAM) variieren die Amplituden der Pulsfolge im Rhythmus des Modulationssignals, während Pulsfrequenz, Pulsphase und Pulsdauer konstant bleiben. Dies kann auch als Abtastung verstanden werden, also die Feststellung des Amplitudenwertes des Modulationssignals in konstanten Zeitabständen (**Bild 13.46**).

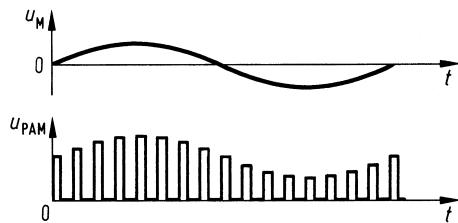


Bild 13.46 Pulsamplitudenmodulation

Das PAM-Signal lässt sich mit Hilfe einer Diodenschaltung erzeugen, auf welche die Überlagerung des Trägersignals und des Modulationssignals einwirkt.

Das am Ausgang dieses **Eintakt-Diodenmodulators** auftretende modulierte Signal wird als unipolares PAM-Signal bezeichnet, weil nur positive oder negative Spannungswerte auftreten.



Unipolares PAM-Signal = Bei diesem Signal treten nur positive oder negative Spannungswerte auf.

Eine andere Variante stellt der **Gegentakt-Diodenmodulator** dar, bei dem die Dioden in beiden Zweigen gleiche Polung aufweisen (**Bild 13.47**). Das digitale Trägersignal schaltet dabei das Modulationssignal in der Weise zum Ausgang durch, dass positive und negative Spannungswerte auftreten. Es handelt sich dann um ein bipolares PAM-Signal.

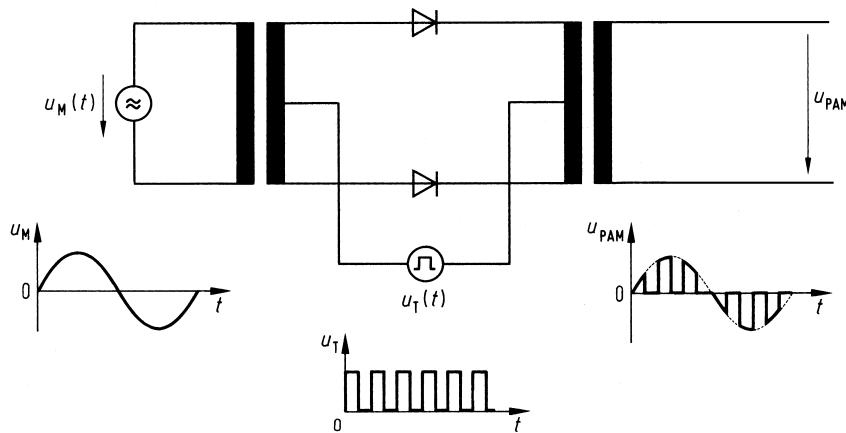


Bild 13.47 Gegentakt-PAM-Demodulator



Bipolares PAM-Signal = Bei diesem Signal treten positive und negative Spannungswerte auf.

Für die Demodulatoren von PAM-Signalen können die bereits bekannten **Hüllkurvendektoren** verwendet werden. Dabei müssen die Zeitkonstanten für die Aufladung und Entladung des Kondensators hinter der Diode so dimensioniert werden, dass die Abweichungen vom Spitzenvwert möglichst klein bleiben.

Wird die Breite der Abtastimpulse bei PAM klein gewählt, dann bleibt in den zeitlichen Lücken zwischen den Pulsen Platz für andere Abtastungen. Auf diese Weise können mehrere PAM-Signale gleichzeitig über einen gemeinsamen Kanal übertragen werden, was zu einem entsprechenden Multiplexsignal führt.



Abhängig von der Breite der Abtastimpulse können mehrere PAM-Signale gleichzeitig über einen Kanal übertragen werden.

Pulsfrequenzmodulation (PFM)

Das Konzept der Frequenzmodulation ist auch bei digitalem Träger anwendbar. Dabei stellt die Zahl der Impulse pro Zeiteinheit ein Maß für den zu übertragenden Wert des Modulationssignals dar. Es handelt sich dann um Pulsfrequenzmodulation (PFM) (**Bild 13.48**). Bei großen Werten des Modulationssignals liegen die Pulse dicht beieinander, während die Abstände zu kleineren Spannungswerten hin größer werden.

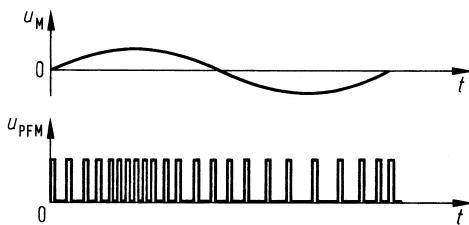


Bild 13.48 Pulsfrequenzmodulation

PFM-Signale lassen sich durch entsprechend gesteuerte Kippschaltungen erzeugen. Die Demodulation ist durch eine Diode mit nachgeschaltetem RC-Glied als Tiefpass zur Mittelwertbildung möglich. Viele Pulse ergeben große Spannungswerte, während bei wenigen Pulsen die Spannung entsprechend sinkt (**Bild 13.49**).

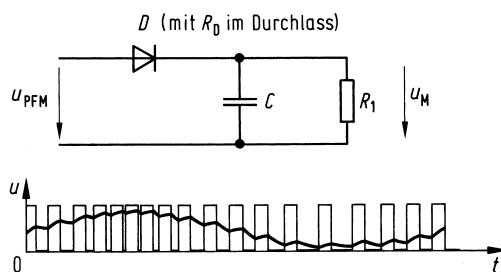


Bild 13.49 Demodulation von PFM-Signalen

Pulsphasenmodulation (PPM)

Geht man von konstanten Intervallen beim pulsförmigen Trägersignal aus, dann kann die Information auch durch die Phasenlage der Pulse ausgedrückt werden. Abhängig vom Modulationssignal ändert sich die Lage der Pulse im Intervall. Diese Form der Trägerbeeinflussung wird als Pulsphasenmodulation (PPM) bezeichnet, es ist aber auch der Begriff Pulslagmodulation üblich (**Bild 13.50**).

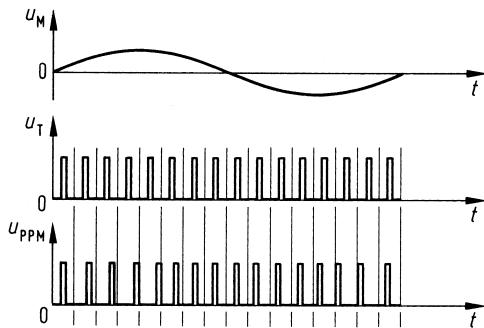


Bild 13.50 Pulsphasenmodulation

Ein PPM-Signal wird üblicherweise dadurch erzeugt, dass im ersten Schritt für das Modulationssignal eine Pulsamplitudenmodulation (PAM) durchgeführt wird und danach die Verarbeitung in einer phasenabhängigen Schaltung erfolgt.

Für die Demodulation von PPM-Signalen werden diese im Rahmen des Betrachtungsintervalls mit einem sägezahnförmigen Signal verglichen. Das Ergebnis ist ein PAM-Signal, bei dem die Pulse allerdings unterschiedliche Abstände zueinander aufweisen. Das Modulationssignal ergibt sich dann durch Spitzenwertgleichrichtung (**Bild 13.51**).

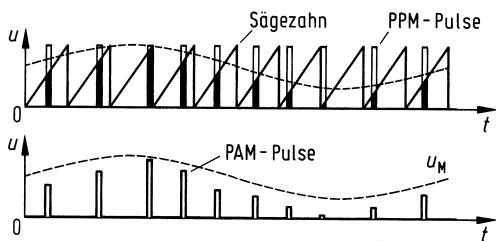


Bild 13.51 Demodulation von PPM-Signalen

Pulsdauermodulation (PDM)

Bei den bisher behandelten Pulsmodulationsverfahren wird stets mit Pulsen gearbeitet, die gleiche Zeitspannen aufweisen. Wird diese nun in Abhängigkeit vom Modulationssignal variiert, dann ergibt sich Pulsdauermodulation (PDM), die auch als Pulsbreitenmodulation [pulse width modulation (PWM)] oder Pulslängenmodulation bezeichnet wird. Wie bei der PPM sind auch hier konstante Zeitintervalle erforderlich, damit für den jeweiligen Puls eine Bezugsgröße gegeben ist (**Bild 13.52**).

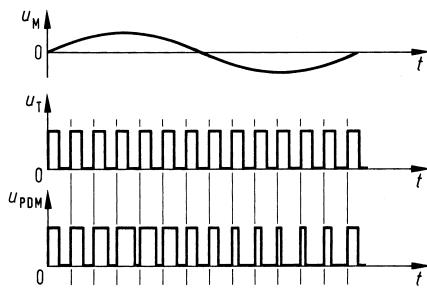


Bild 13.52 Pulsdauermodulation

PDM-Signale können auch durch den Vergleich des Modulationssignals mit einem sägezahnförmigen Signal gewonnen werden. Dabei muss der Sägezahn dem Betrachtungsintervall entsprechen. Für das PDM-Signal sind die Zeiten vor oder nach der Schnittstelle von Modulationssignal und Sägezahn verwendbar.

Schaltungstechnisch lässt sich ein PDM-Signal mit einem Komparator erzeugen. Dem einen Eingang dieser Vergleicherschaltung wird dabei das Modulationssignal zugeführt, dem anderen das Sägezahnsignal als Referenz (Bild 13.53).

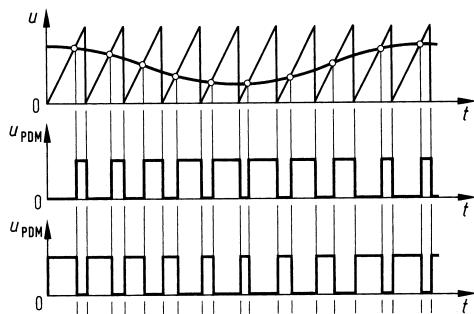


Bild 13.53 Erzeugung von PDM-Signalen

Zur Demodulation wird zuerst das PDM-Signal mit Hilfe eines Sägezahns in ein PAM-Signal gewandelt. Dabei kann die vordere oder hintere Flanke der Pulse als Bezug gelten. Das Modulationssignal ergibt sich aus den Mittelwerten der nun mit unterschiedlichen Abständen vorliegenden Pulse des PAM-Signals (Bild 13.54).

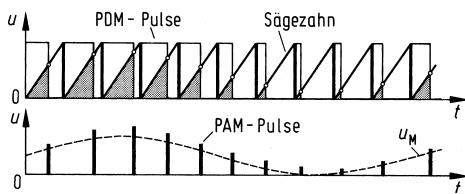


Bild 13.54 Demodulation von PDM-Signalen

13.3.4 Digitales Modulationssignal/Sinusförmiges Trägersignal

Bei digitalen Modulationssignalen treten ausschließlich diskrete Werte in einem konstanten Zeitraster auf. Dadurch ergeben sich unstetige Änderungen der Parameter des analogen Trägersignals (Amplitude, Frequenz, Phase) und ermöglichen die Übertragung

entsprechender Bitraten. Eine derartige Modulation wird als Umtastung [shift keying] bezeichnet. Es sind folgende Arten unterscheidbar:

- Amplitudenumtastung
[amplitude shift keying (ASK)]
- Frequenzumtastung
[frequency shift keying (FSK)]
- Phasenumtastung
[phase shift keying (PSK)]

Für die grafische Darstellung der Verhältnisse bei diesen Modulationsverfahren können die Zeitfunktion, die Frequenzfunktion oder das Zeigerdiagramm verwendet werden. Es handelt sich um gleichwertige Darstellungen, aus denen allerdings die Parameter in unterschiedlicher Form ersichtlich sind. Das Bild 13.55 zeigt die Zusammenhänge für ein zweiwertiges Modulationssignal, also ein Bit.

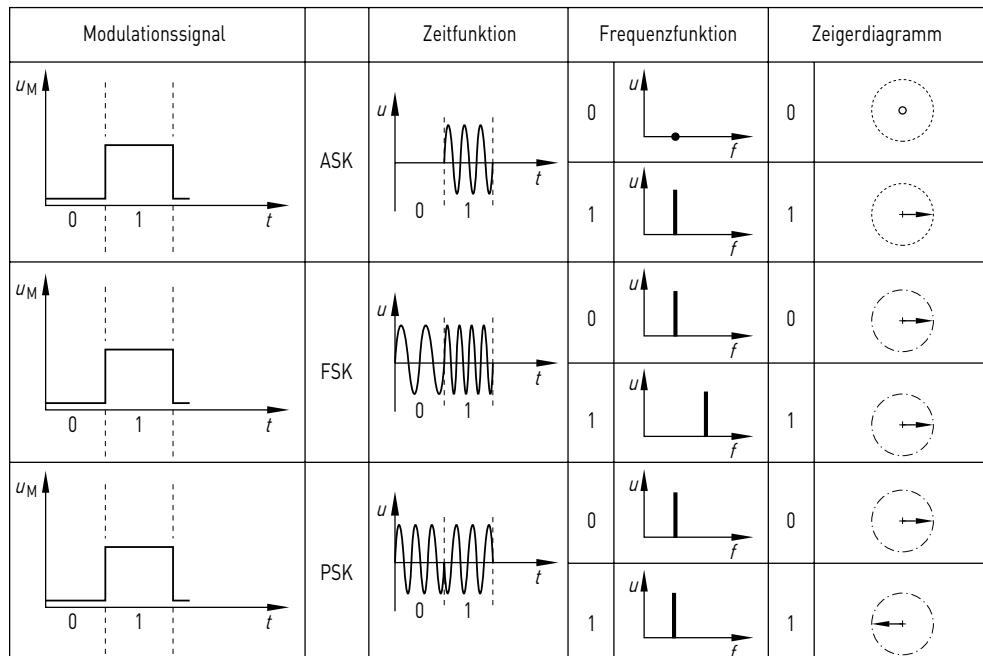


Bild 13.55 Digitale Modulation mit zweiwertigen Modulationssignalen

Wird der jeweilige Parameter des Trägersignals durch ein Modulationssignal mit 4, 8, 16, 32, 64, 128 oder mehr mögliche Wertigkeiten beeinflusst, dann sind auch entsprechend mehr unterschiedliche Zustände übertragbar und damit eine größere Bitrate realisierbar. Es liegt dann ein höherwertiges Modulationsverfahren vor.



Weist das digitale Modulationssignal mehr als zwei Wertigkeiten auf, dann ist eine größere Bitrate realisierbar.

Während bei der analogen Modulation die Bandbreite und der erforderliche Störabstand die wesentlichen Kriterien darstellen, sind es bei der digitalen Modulation die übertragbare Bitrate und die für eine störungsfreie Übertragung zulässige Bitfehlerrate (*BER*).



Kriterien für digitale Modulation

- Übertragbare Bitrate
- Zulässige Bitfehlerhäufigkeit

Die übertragbare Bitrate ist unmittelbar von der Bandbreite des verfügbaren Übertragungskanals abhängig. Das Verhältnis zwischen beiden Größen wird als Bandbreitenausnutzung ε , Bandbreiteneffizienz oder spektrale Effizienz [spectral efficiency] bezeichnet und in bit/s pro Hz angegeben.



Bandbreitenausnutzung $\varepsilon =$

Angabe der pro Hz Bandbreite übertragbaren Bitrate, also (bit/s)/Hz



Beispiel:

Wird bei der Übertragung eines Fernsehsignals durch digitale Modulation eine Bandbreitenausnutzung von $\varepsilon = 2,4$ (bit/s)/Hz erreicht, dann bedeutet das bei einer typischen Kanalbandbreite von 8 MHz folgenden Wert für die übertragbare Bitrate:

$$v_{\text{bit}} = \varepsilon \cdot B_{\text{Kanal}} = 2,4 \text{ (bit/s)}/\text{Hz} \cdot 8 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 19,2 \text{ Mbit/s}$$

Über den vorgegebenen Kanal sind also 19,2 Mbit/s übertragbar.

Es werden stets möglichst große Werte für die Bandbreitenausnutzung angestrebt. Dafür gilt folgende grundsätzliche Erkenntnis:



Je höherwertiger das Modulationsverfahren, desto größer die Bandbreitenausnutzung.

Um die zulässige Bitfehlerrate (*BER*) nicht zu überschreiten, darf der Störabstand einen Mindestwert nicht unterschreiten. Es wird dafür im Regelfall der Träger-Rausch-Abstand *C/N* angegeben.

Amplitudenumtastung (ASK)

Bei der Amplitudenumtastung [amplitude shift keying (ASK)] handelt es sich um eine Amplitudenmodulation mit rechteckförmigem Modulationssignal. Der Modulationsgrad wird dabei an den Übergängen zwischen 0 und 1 sprunghaft geändert, was auch die Bezeichnung **digitale Amplitudenmodulation** erklärt.

Bei der Amplitudenumtastung hat deshalb die Hüllkurve auch einen rechteckförmigen Verlauf. Dabei kann der Wechsel zwischen $m = 0$ und $m = 1$ vorliegen, es ist jedoch grund-

sätzlich nur eine ausreichende Unterscheidbarkeit der Modulationsgrade erforderlich. In der Praxis sind deshalb Wechsel beim Modulationsgrad zwischen 0,1 und 0,9 bzw. 0,2 und 0,8 üblich (**Bild 13.56**).

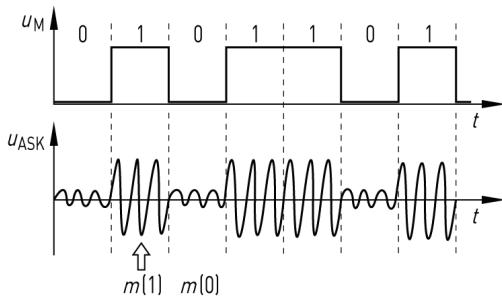


Bild 13.56 Amplitudenumtastung

Für die Demodulation von ASK-Signalen sind alle bekannten Schaltungen für AM-Demodulatoren verwendbar.

Frequenzumtastung (FSK)

Während bei ASK die Amplitude gemäß des zweiwertigen Modulationssignals geändert wird, gilt dies bei der als digitale Frequenzmodulation bezeichneten Frequenzumtastung [frequency shift keying (FSK)] für die Frequenz. Bezogen auf ein zweiwertiges Modulationssignal treten am Ausgang eines FSK-Modulators die Frequenzen $f_T + \Delta f$ für $f(1)$ und $f_T - \Delta f$ für $f(0)$ auf (**Bild 13.57**).

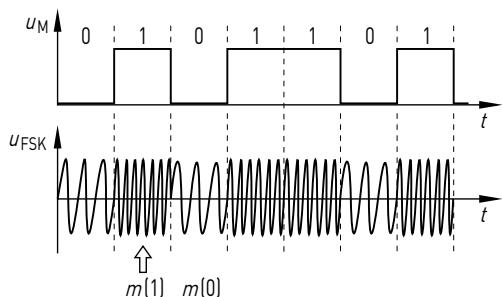


Bild 13.57 Frequenzumtastung

Die Frequenzänderung muss so gewählt werden, dass durch den Demodulator die beiden Frequenzen (für 1 und 0) bis zu einem festgelegten C/N -Wert unterscheidbar sind.

Eine höherwertigere FSK lässt sich erreichen, wenn der Wechsel nicht zwischen zwei Frequenzen erfolgt, sondern zwischen vier, acht oder mehr Frequenzen. Auf diese Weise ist die gleichzeitige Übertragung mehrerer Bitströme möglich, was die Bandbreitenausnutzung verbessert.



Höherwertige Frequenzumtastung (FSK) erfordert mehr als zwei diskrete Frequenzen.

Die Demodulation von FSK-Signalen erfordert die Feststellung, welche der definierten diskreten Frequenzen vorliegt. Dafür sind alle behandelten FM-Demodulatoren geeignet. Es sind aber auch frequenzselektive Komponenten (z.B. Resonanzkreise) verwendbar. An einem entsprechend dimensionierten Parallelschwingkreis ergibt sich bei der Frequenz für den Zustand 1 maximale Spannung, während beim Zustand 0 ein auf diese Frequenz abgestimmter Reihenschwingkreis die Spannung null bewirkt, da er als Saugkreis im Resonanzfall bekanntlich einen Kurzschluss darstellt (Bild 13.58).

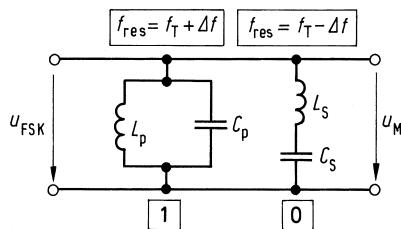


Bild 13.58 FSK-Demodulation mit Schwingkreisen

Phasenumtastung (PSK)

Bei der Phasenumtastung [phase shift keying (PSK)] ändert sich die Phasenlage des Trägersignals sprunghaft, wobei für jeden Zustand 0 und 1 ein definierter Wert gegeben ist. Wird eine Bitfolge übertragen, dann treten bei jedem Wechsel von 0 nach 1 bzw. 1 nach 0 Phasensprünge von 180 Grad auf. Es handelt sich dann um **zweiwertige Phasenumtastung**, üblicherweise als 2-PSK oder BPSK [binary phase shift keying] bezeichnet (Bild 13.59).

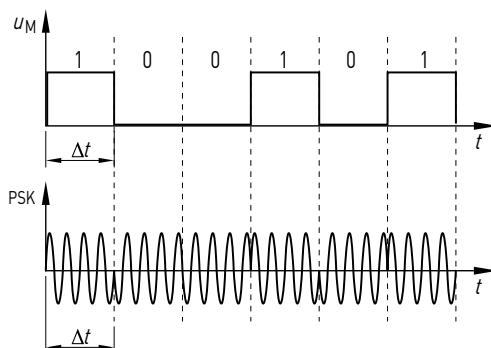


Bild 13.59 Zweiwertige Phasenumtastung

Bei der 2-PSK ergibt sich eine Bandbreitenausnutzung von nur 1 (bit/s)/Hz, da lediglich zwei Phasenzustände auftreten. Eine Verbesserung ist durch **höherwertige Phasenumtastung** möglich. Die erste Stufe stellt dabei die vierwertige Phasenumtastung (4-PSK) dar, die auch als QPSK [quadrature phase shift keying] bezeichnet wird. Man kann sie als zweifache Anwendung der 2-PSK bei 90 Grad Phasenverschiebung verstehen. Je Phasenlage werden zwei Bits repräsentiert, was die Bandbreitenausnutzung von 1 (bit/s)/Hz auf 2 (bit/s)/Hz erhöht.

Weitere Steigerungen ergeben sich bei Verwendung von noch mehr Phasenlagen. So beträgt die Bandbreitenausnutzung bei 8-PSK genau 3 (bit/s)/Hz, bei 16-PSK sind es 4 (bit/s)/Hz, während bei 32-PSK sogar 5 (bit/s)/Hz gelten (Bild 13.60). Größere Wertigkeiten kommen in der Praxis kaum zum Einsatz, weil dann die Phasenlagen bei der Demodulation nicht mehr ausreichend unterscheidbar wären. Es ist nämlich zu berücksichtigen, dass durch Störbeeinflussungen bei der Übertragung für jede Phasenlage nur ein bestimmter **Entscheidungsbereich** für die eindeutige Zeichenerkennung auftritt (Bild 13.61). Mit zunehmender Wertigkeit der Phasenumtastung werden diese Bereiche immer kleiner. Das lässt sich anschaulich mit Hilfe eines Analysators durch das **Konstellationsdiagramm** verdeutlichen, bei dem nur die jeweilige Lage der Endpunkte der Phasen anzeigen dargestellt wird. Die Reduzierung der Entscheidungsbereiche ist auch daran erkennbar, dass der Mindestwert für den Signal-Rausch-Abstand C/N mit zunehmender Wertigkeit der PSK größer wird. So beträgt er für eine Bitfehlerrate BER von 10^{-6} bei 4-PSK etwa 13,7 dB, während es bei 16-PSK bereits 24 dB sind.

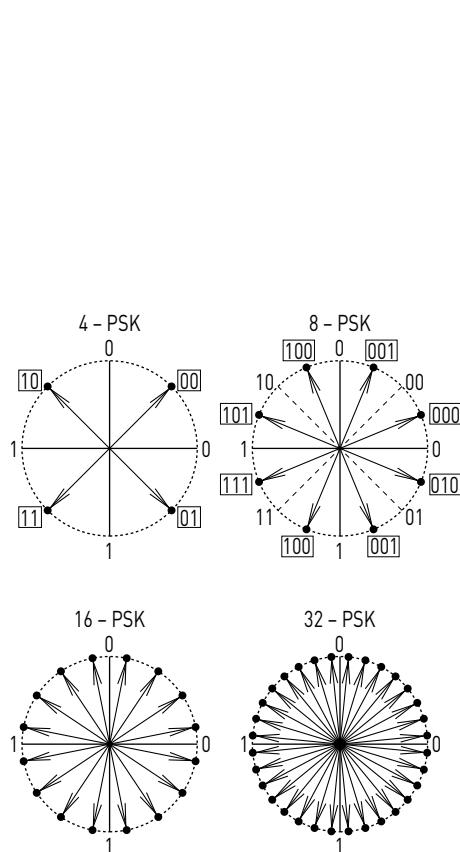


Bild 13.60 Varianten der Phasenumtastung

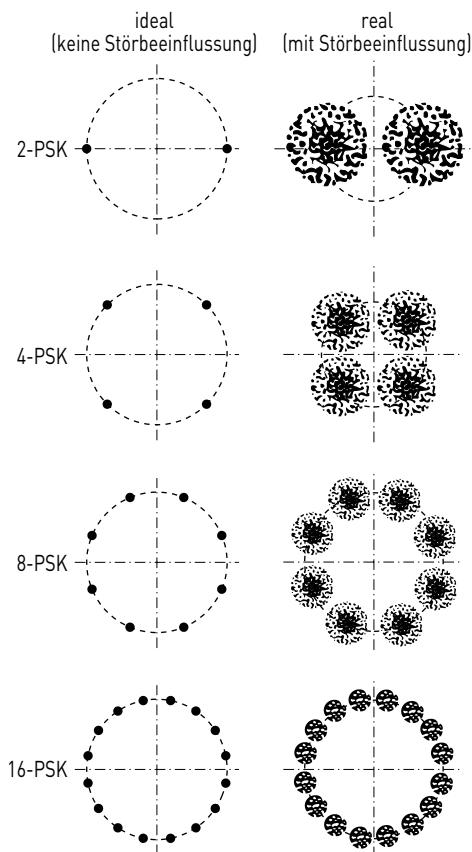


Bild 13.61 Entscheidungsbereiche für eindeutige Zeichenerkennung bei PSK

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die angeführten Bandbreitenausnutzungen bei den verschiedenen PSK-Varianten nur für den Idealfall gelten. Da in der Praxis die Bits jedoch wegen der üblichen Bandbegrenzungen keinen exakten rechteckförmigen Verlauf aufweisen, sind die realen Werte etwa um ein Viertel kleiner.



In der Realität ist bei PSK der Wert für die Bandbreitenausnutzung etwa um ein Viertel kleiner als der theoretische Wert beim exakt rechteckförmigen Modulationssignal.

Die Demodulation von PSK-Signalen erfordert phasenempfindliche Detektoren. Bei höherwertiger PSK handelt es sich dabei fast ausschließlich um digitale Signalprozessoren. In jedem Fall ist große Genauigkeit für die Taktfrequenz erforderlich, um die eindeutige Zuordnung zwischen Phasenlage und Zeichen sicherzustellen.



Bei der Demodulation höherwertiger PSK-Signale ist eine große Genauigkeit für die Taktfrequenz erforderlich.

Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM)

Bei der PSK hat sich gezeigt, dass die Zahl der möglichen Phasenzustände begrenzt ist. Um die verfügbare Übertragungskapazität optimal zu nutzen, also die Bandbreitenausnutzung zu verbessern, bietet sich eine Kombination aus Phasenumtastung und Amplitudenumtastung an. Sie wird als Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) [quadrature amplitude modulation (QAM)] bezeichnet. Das Konzept wurde bereits bei der analogen Amplitudenmodulation behandelt.



Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) ist eine Kombination aus Phasenumtastung und Amplitudenumtastung.

Mit der QAM ist prinzipiell die Übertragung zweier voneinander unabhängiger digitaler Signale möglich. Für das eine Signal wird ein sinusförmiges Trägersignal verwendet, während es für das andere Signal ein cosinusförmiges Trägersignal ist. Für beide Signale wird Amplitudenumtastung (ASK) durchgeführt, danach erfolgt die Zusammenfassung der beiden modulierten Signale zu einem Zeiger (**Bild 13.62**). Das mit dem sinusförmigen Träger modulierte Signal wird als Inphase-Komponente (I-Komponente) bezeichnet, beim cosinusförmigen Träger handelt es sich um die Quadratur-Komponente (Q-Komponente). Es gilt somit folgender Zusammenhang:



QAM-Signal = I-Komponente + Q-Komponente

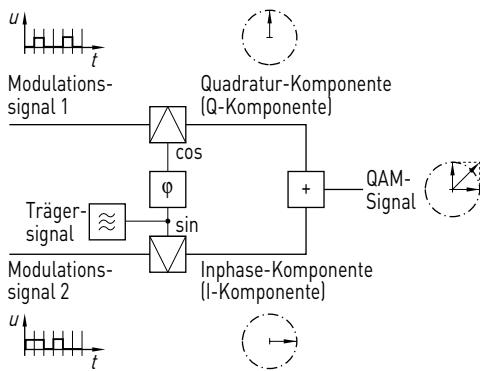


Bild 13.62 Quadratur-Amplitudenmodulation (Konzept)

Die Phasenzeiger beider Komponenten können innerhalb eines vorgegebenen Wertebereichs jede Länge aufweisen. Wie bei der PSK wird grundsätzlich die Wertigkeit bei der QAM ebenfalls mit einer Ziffer gekennzeichnet. Aus dem Konstellationsdiagramm ist ersichtlich, welche Kombinationen aus Amplituden und Phasenwinkeln auftreten. Die Bezeichnung 64-QAM bedeutet deshalb, dass 64 Zustände auftreten können (**Bild 13.63**). Dabei beträgt die Bandbreitenausnutzung im Idealfall 6 (bit/s)/Hz, real ist es etwa ein Viertel weniger. Für $BER = 10^{-6}$ beträgt der Mindestwert für C/N allerdings 27 dB.

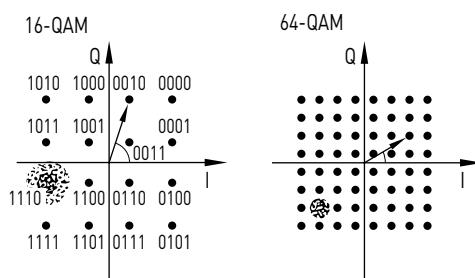


Bild 13.63 Arten der QAM

In der Praxis sind bisher folgende Arten der QAM üblich: 16-QAM, 64-QAM und 256-QAM. Es wird allerdings auch an der technischen Realisierung von 512-QAM und 1024-QAM gearbeitet, um eine noch bessere Bandbreitenausnutzung zu erreichen.

Die Amplituden und Phasenwinkel sind bei QAM für alle Konstellationen so gewählt, dass sich eine gleichmäßige Verteilung der Punkte ergibt. Das führt zu gleich großen Entscheidungsbereichen für die eindeutige Zeichenerkennung.

Für die Demodulation von QAM-Signalen sind folgende Schritte erforderlich:

- Phasenlage der Zeiger feststellen
- Mischung mit cosinusförmigem Trägersignal
→ Ergibt Modulationssignal 1
- Mischung mit sinusförmigem Trägersignal
→ Ergibt Modulationssignal 2

Dadurch lassen sich die beiden ursprünglichen Signale zurückgewinnen.

Ein Vergleich zwischen acht- und höherwertigen Formen von QAM mit PSK zeigt, dass bei gleicher Wertigkeit die Bereiche für Störbeeinflussungen bei QAM größer sind, was größere Störfestigkeit und damit kleinere Mindestwerte für den Signal-Rausch-Abstand bedeutet. Im Bild 13.64 ist diese Situation am Beispiel der 16-QAM und 16-PSK dargestellt.

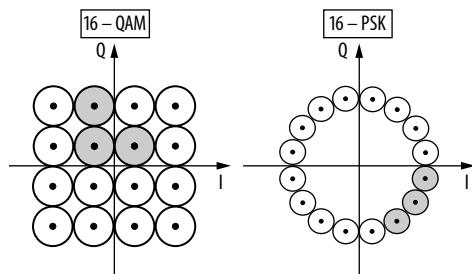


Bild 13.64 Gegenüberstellung von QAM und PSK gleicher Wertigkeit

13.3.5 Digitale Modulation im Basisband

Bei den bisher dargestellten Verfahren der Pulsmodulation wird stets ein Parameter des digitalen Trägersignals gemäß dem Verlauf des analogen Modulationssignals variiert. Dies führt zu einer begrenzten Störfestigkeit bei der Übertragung. Diese Situation lässt sich erheblich verbessern, wenn das analoge Modulationssignal in ein digitales Signal gewandelt wird, bei dem Bitfolgen auftreten, die von festgelegten Abtastzeitpunkten und Wertestufen für das Modulationssignal abhängen. Diese Art der Modulation findet im Basisband statt, es wird also kein Trägersignal verwendet.



Digitale Modulation im Basisband ermöglicht die Wandlung analoger Signale in digitale Signale.



Digitale Modulation im Basisband erfordert kein Trägersignal.

Die einfachste Form der digitalen Modulation im Basisband wird als **Pulscodemodulation** [pulse code modulation (PCM)] bezeichnet. Sie umfasst stets drei Schritte, nämlich die Zeitquantisierung, die Wertequantisierung und die Codierung.

Bei der Zeitquantisierung handelt es sich um die bereits bekannte Abtastung des analogen Modulationssignals in konstanten Zeitintervallen. Für die dabei möglichen Amplitudenwerte erfolgt als zweiter Schritt die Festlegung von Werteintervallen. Diese als Wertequantisierung bezeichnete Einteilung kann über den gesamten Wertebereich konstant sein oder variable Stufungen aufweisen. Jeder Abtastwert lässt sich somit einem Werteintervall zuordnen. Der letzte Schritt ist dann die Verknüpfung dieser Werteintervalle mit Codeworten, also Bitfolgen definierter Länge (Bild 13.65). Deren Stellenzahl ist davon abhängig, wie viele quantisierte Wertebereiche unterscheidbar sein sollen. Bei einer größeren Zahl von Quantisierungsstufen sind längere Codeworte erforderlich als bei größerer Stufung

des Wertebereichs. Dies ist einsichtig, weil jeder Wert nach der Übertragung unterschiedbar sein muss.

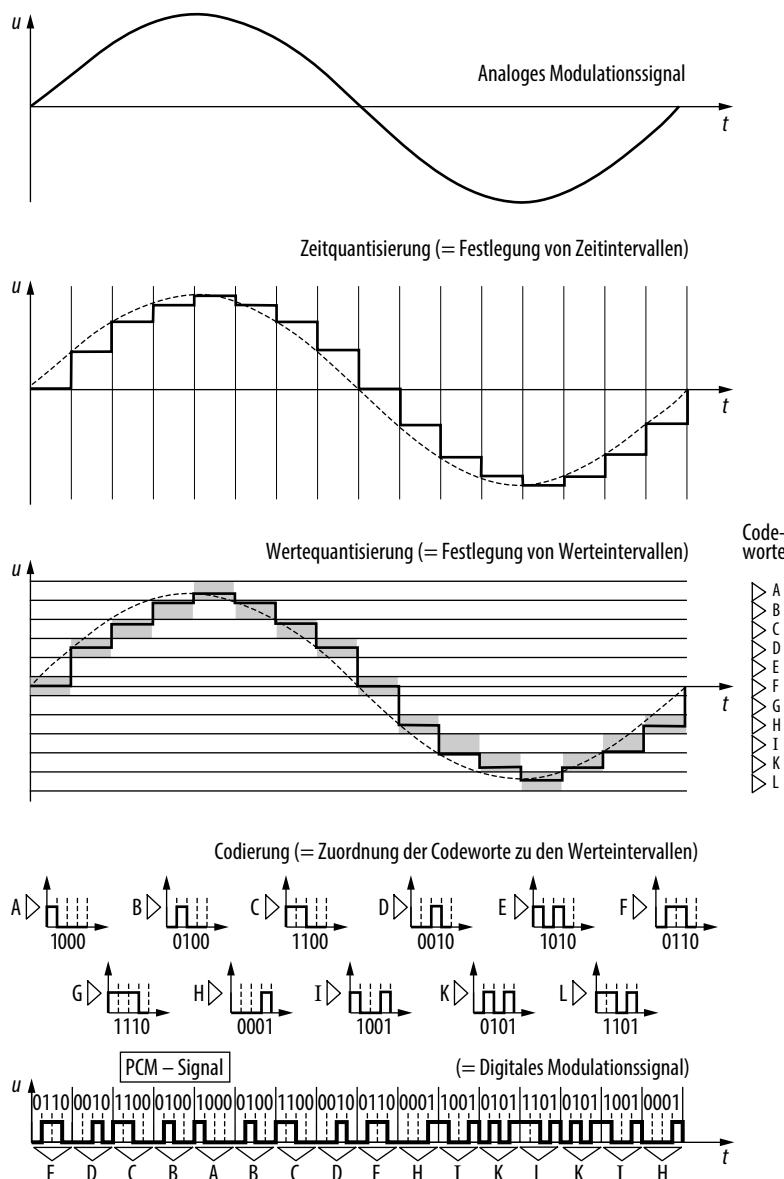


Bild 13.65 Prinzip der Pulscodemodulation

Zeitquantisierung = Bildung konstanter Intervalle im Zeitbereich

Wertequantisierung = Bildung konstanter oder variabler Intervalle im Wertebereich

Codierung = Zuordnung von Codeworten zu den Intervallen im Wertebereich

Die Qualität einer Pulscodemodulation ist unmittelbar von der Zahl der Quantisierungsintervalle im Zeit- und Wertebereich abhängig. Je feiner die Stufung im Zeitbereich, umso mehr Codeworte müssen pro Zeiteinheit übertragen werden. Dagegen erfordert eine große Zahl von Intervallen im Wertebereich längere Codeworte, damit jede Stufung unterscheidbar ist.



Viele Intervalle im Zeitbereich erfordern viele Codeworte pro Zeiteinheit.



Viele Intervalle im Wertebereich erfordern lange Codeworte.

Im Wertebereich kann es für verschiedene Anwendungen sinnvoll sein, kleine und große Werte unterschiedlich zu quantisieren. Dies wird durch größere und kleinere Intervalle realisiert, wobei große Intervalle zu einer entsprechend geringeren Genauigkeit der Abbildung des analogen Signals führen, während kleine Intervalle die größere Genauigkeit ergeben. Diese Form wird als nicht-lineare Quantisierung bezeichnet, während es sich bei gleichen Intervallen im Wertebereich um lineare Quantisierung handelt. Dies bedeutet:

- **Lineare Quantisierung** = Gleich große Intervalle im Wertebereich
- **Nichtlineare Quantisierung** = Unterschiedlich große Intervalle im Wertebereich

Von der Quantisierung im Wertebereich hängt auch der mindestens erforderliche Störabstand ab. Grundsätzlich gilt, dass er mit zunehmender Zahl der Intervalle im Wertebereich, also abnehmender Länge der Intervalle, immer größer wird. Außerdem erfordern mehr Intervalle im Wertebereich auch längere Codeworte, da jedes Intervall vom anderen unterscheidbar sein muss.

Tabelle 13.2 Quantisierung und Störabstand

Zahl der Intervalle im Wertebereich	Länge des Codewortes	Mindestwert des Störabstandes
4	2 bit	14 dB
8	3 bit	20 dB
16	4 bit	26 dB
32	5 bit	32 dB
64	6 bit	38 dB
128	7 bit	44 dB
256	8 bit	50 dB
512	9 bit	56 dB
1024	10 bit	62 dB

Die Quantisierung im Zeit- und Wertebereich bestimmt auch unmittelbar die erforderliche Bitrate. Die Intervalle im Zeitbereich sind mit der Abtastfrequenz verkoppelt, während von der Zahl der Intervalle im Wertebereich bekanntlich die Länge des Codewortes abhängt. Die Bitrate ergibt sich deshalb als Produkt aus Abtastfrequenz und Codewortlänge.



$$\text{Bitrate} = \text{Abtastfrequenz} \cdot \text{Codewortlänge}$$

Bei der Demodulation von PCM-Signalen werden zuerst die Codeworte wiedergewonnen und dann das ursprüngliche wertequantisierte Signal. Die Rückwandlung in das analoge Signal erfolgt wie bei der PAM.

Da Codeworte im Regelfall konstante Länge aufweisen, lässt sich das einzelne Codewort durch eine Zählschaltung ermitteln. Mit Hilfe einer Matrix werden darauf dann die quantisierten Amplitudenwerte wiedergewonnen. Das Ergebnis ist ein entsprechend demodulierbares PAM-Signal (**Bild 13.66**).

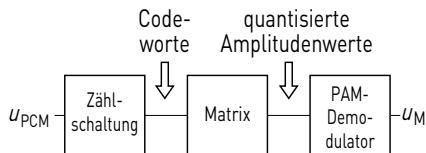


Bild 13.66 Demodulation von PCM-Signalen

Es gibt verschiedene Varianten der Pulscodemodulation, deren Zielsetzung darin besteht, die Bitrate des Ausgangssignals möglichst klein zu halten, allerdings ohne Änderung der Signalqualität. Diese sollen nachfolgend betrachtet werden.

Durch die Quantisierung der Amplituden findet bei der PCM eine Reduktion der Irrelevanz statt, die Redundanz bleibt jedoch erhalten. Sie ist dadurch erklärbar, dass sich der Signalwert von Abtastung zu Abtastung im Regelfall nur wenig ändert. Durch Redundanzreduktion lässt sich die Bitrate des zu übertragenden Signals verringern.

Eine dafür geeignete Variante der PCM ist die **Differenz-Pulscodemodulation** [differential puls code modulation (DPCM)]. Diese arbeitet mit prädiktiver Codierung und bedeutet, dass mit einer als Prädiktor bezeichneten Funktionseinheit jeweils aus dem vorangegangenen Abtastwert und unter Einbeziehung statistischer Abhängigkeiten ein Vorhersagewert für die nächste Abtastung gebildet wird. Dann erfolgt die Bildung des Differenzwertes zwischen dem aktuellen Signalwert und dem vorhergesagten Schätzwert für die nächste Abtastung. Die nachfolgende Codierung der quantisierten Differenzwerte ermöglicht nun kürzere Codeworte, was zu einer Reduzierung der Bitrate führt.



Differenz-Pulscodemodulation

[differential puls code modulation (DPCM)]



Nutzt die Differenz zwischen Abtastwerten und Vorhersagen

Auf der Empfangsseite werden mit Hilfe des dort eingesetzten Prädiktors ebenfalls Vorhersagewerte gewonnen, diese dann zu den übertragenen Differenzwerten addiert und damit das ursprüngliche Signal rekonstruiert. Auf diese Weise wird die Funktion des sendeseitigen Prädiktors wieder aufgehoben (**Bild 13.67**).

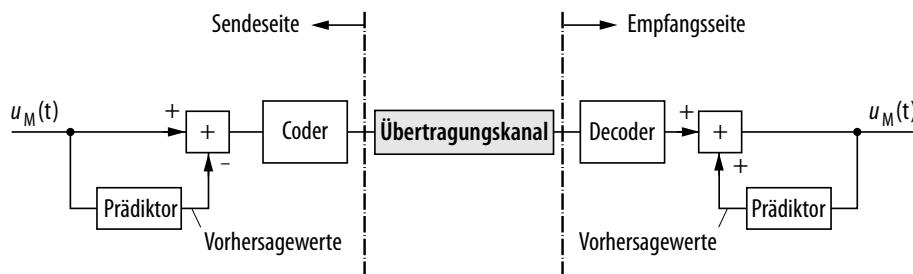


Bild 13.67 Funktionsprinzip der DPCM

Erfolgt die Skalierung der Wertequantisierung abhängig vom Verlauf des analogen Signals, dann handelt es sich um **adaptive Differenz-Pulscodemodulation** [adaptive differential pulse code modulation (ADPCM)].

Der einfachste Fall einer DPCM liegt vor, wenn 1-bit-Codeworte verwendet werden, was zwei Intervalle im Wertebereich bedeutet. Damit lässt sich allerdings nur die Vorhersage übertragen, dass der nächste Abtastwert kleiner oder größer ist als der aktuelle Wert. Diese Variante wird als **Deltamodulation** (DM) bezeichnet. Gegenüber DPCM und ADPCM bewirkt diese eine noch kleinere Bitrate, weist allerdings dafür auch eine größere Ungenauigkeit auf. Außerdem wird eine größere Abtastfrequenz benötigt.



Deltamodulation (DM) = DPCM mit 1-bit-Codeworten

Bei der **adaptiven Deltamodulation** (ADM) wird als Vergleichswert nicht der unmittelbar vorangegangene Abtastwert verwendet, sondern ein nach einem Algorithmus errechneter Wert. Das führt zu einer größeren Dynamik, weil die Werteintervalle dem Signalverlauf angepasst werden.

13.3.6 Mehr-Träger-Verfahren

Bei den bisher betrachteten Modulationsverfahren wurde stets nur jeweils ein Trägersignal verwendet. Das modulierte Signal weist dabei eine von der verwendeten Modulationsart abhängige Bandbreite auf. Davon hängt bei der Übertragung digitaler Signale auch der maximale Wert der verfügbaren Bitrate ab.

Für die Übertragung möglichst großer Bitraten bietet sich die Verwendung mehrerer Trägersignale an, die einen bestimmten konstanten Abstand zueinander aufweisen. Im ersten Schritt wird bei solchen Mehr-Träger-Verfahren die zu übertragende Bitrate in Teildatenströme aufgeteilt, die dann im zweiten Schritt jeweils einen Träger modulieren. Dabei

handelt es sich entweder um eine Version der Phasenumtastung (z.B. QPSK) oder der Quadratur-Amplitudenmodulation (z.B. 64-QAM). Das bedeutet pro Trägerfrequenz Symbole von 1 bit bis 8 bit oder mehr. Im nächsten Schritt erfolgt die Addition der Trägersignale zum Gesamt signal.



Beispiel:

Werden bei einem Mehr-Träger-System 7000 Träger verwendet und pro Träger 4 bit übertragen, dann besitzt das resultierende Symbol einen Informationsgehalt von 28 kbit, die parallel (also gleichzeitig) in einem Schritt übertragen werden.

Das Gesamt signal besteht also aus der Summe der modulierten Träger, wobei jeder von ihnen ein Symbol übernimmt. Dies kann man sich als eine Parallelschaltung entsprechender Modulatoren vorstellen, denen das Modulationssignal über einen Seriell-Parallel-Wandler zugeführt wird und nach der Modulation eine Summierstufe das modulierte Mehr-Träger-Signal bewirkt (**Bild 13.68**).

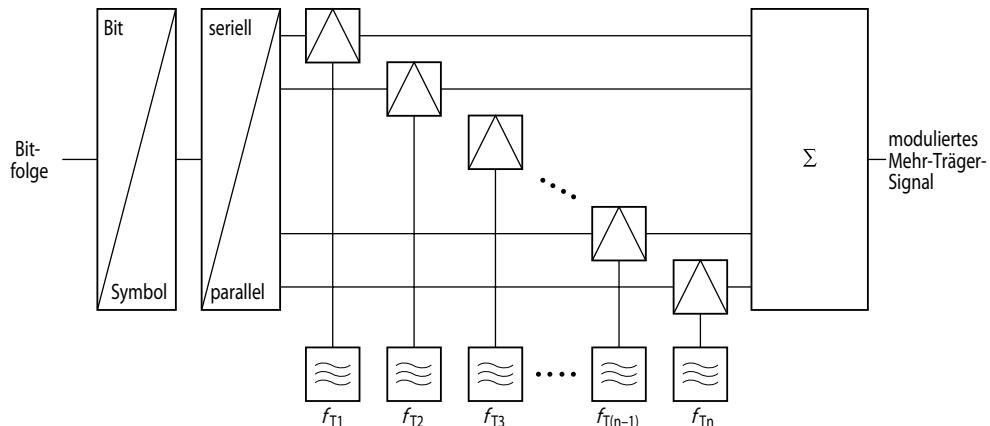


Bild 13.68 Bildung des modulierten Mehr-Träger-Signals (Konzept)

Um die einzelnen Trägersignale auf der Empfangsseite für die Demodulation eindeutig erkennen zu können, sind definierte Frequenzabstände zwischen diesen erforderlich. Sie müssen mindestens dem Kehrwert der Symboldauer entsprechen. Das bedeutet:

$$\Delta f_T = \frac{1}{T_{\text{Symbol}}} \quad (13.46)$$

Die Erfüllung dieser Vorgabe bedeutet **Orthogonalität** und stellt sicher, dass die Amplituden der durch die Träger bewirkten Subkanäle auf der Mittenfrequenz der jeweilig benachbarten Subkanäle exakt null betragen und damit keine gegenseitige Beeinflussung der Subkanäle auftritt. Dieses Konzept wird als **orthogonaler Frequenzmultiplex** [orthogonal frequency division multiplex (OFDM)] bezeichnet (**Bild 13.69**).

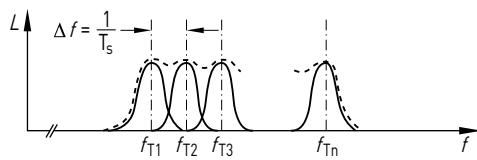


Bild 13.69 Spektrum des OFDM-Signals

Die Zusammenfassung der durch die Modulation bedingten Spektren in den Subkanälen führt zu einem Frequenzblock mit relativ gleichen Amplituden, weshalb das OFDM-Signal mit einem Rauschsignal vergleichbar ist.

Die für das OFDM-Signal aufgezeigte Parallelschaltung der verschiedenen Modulatoren entspricht exakt der Rechenvorschrift für die **inverse diskrete Fourier-Transformation** (IDFT). Es handelt sich dabei um den Übergang vom Frequenzbereich in den Zeitbereich für die einzelnen Spektralanteile, wird in der Praxis in Basisbandlage durchgeführt und ist mit den heute verfügbaren Signalprozessoren gut beherrschbar.

Systembedingt ist die Symboldauer bei OFDM sehr viel länger als bei Ein-Träger-Verfahren. Die Symboldauer muss für die Orthogonalität der Trägerfrequenzen gemäß Gleichung 13.44 auf den erforderlichen spektralen Abstand abgestimmt sein. Grundsätzlich gilt folgende Abhängigkeit:

Wird bei konstanter Bandbreite die Zahl der Träger vergrößert, dann sinkt die Symboldauer.

Das breitbandige OFDM-Signal weist bei Fading, also frequenzselektiven Schwunderscheinungen, gegenüber dem schmalbandigen Ein-Träger-Signal erhebliche Vorteile auf. Der Störeffekt betrifft nur eine kleine Zahl der verwendeten Träger, was bis zu einer bestimmten Grenze durch entsprechende Fehlerschutzverfahren (z. B. Frequenz-Interleaving) als Kanalcodierung kompensierbar ist.

Wird OFDM um eine Vorwärts-Fehlerkorrektur [forward error correction (FEC)] ergänzt, dann gilt die Bezeichnung **COFDM** [coded orthogonal frequency division multiplex].



COFDM = OFDM + FEC

(13.47)

Eine besondere Stärke weist COFDM bei **Mehr-Wege-Empfang** auf. Dieser ist gegeben, weil Empfänger im Regelfall nicht nur das direkt vom Sender stammende Signal aufnehmen, sondern auch solche, die über einen Umweg durch Reflexion an topografischen Gegebenheiten oder Gebäuden zum Empfänger gelangen (**Bild 13.70**). Bei analoger Übertragung führt die Überlagerung der verschiedenen Signale zu Verzerrungen, bei der digitalen Übertragung sind es Beeinflussungen der Symbolfolgen, was als **Intersymbol-Interferenzen** (ISI) bezeichnet wird.

Um diesen Störeffekt zu beheben, wird vor jeder Symboldauer ein **Schutzintervall** [guard interval] verwendet, das üblicherweise ein Viertel der Symboldauer aufweist und damit erfahrungsgemäß der längsten Laufzeit der Echokomponenten entspricht (**Bild 13.71**). In dieser Zeit wertet der Empfänger das eintreffende Signalgemisch nicht aus, weil es auch noch Echoanteile des vorhergehenden Symbols enthalten kann. Das nächste Symbol steht also erst zur Verfügung, wenn der eingeschwungene Zustand erreicht ist.

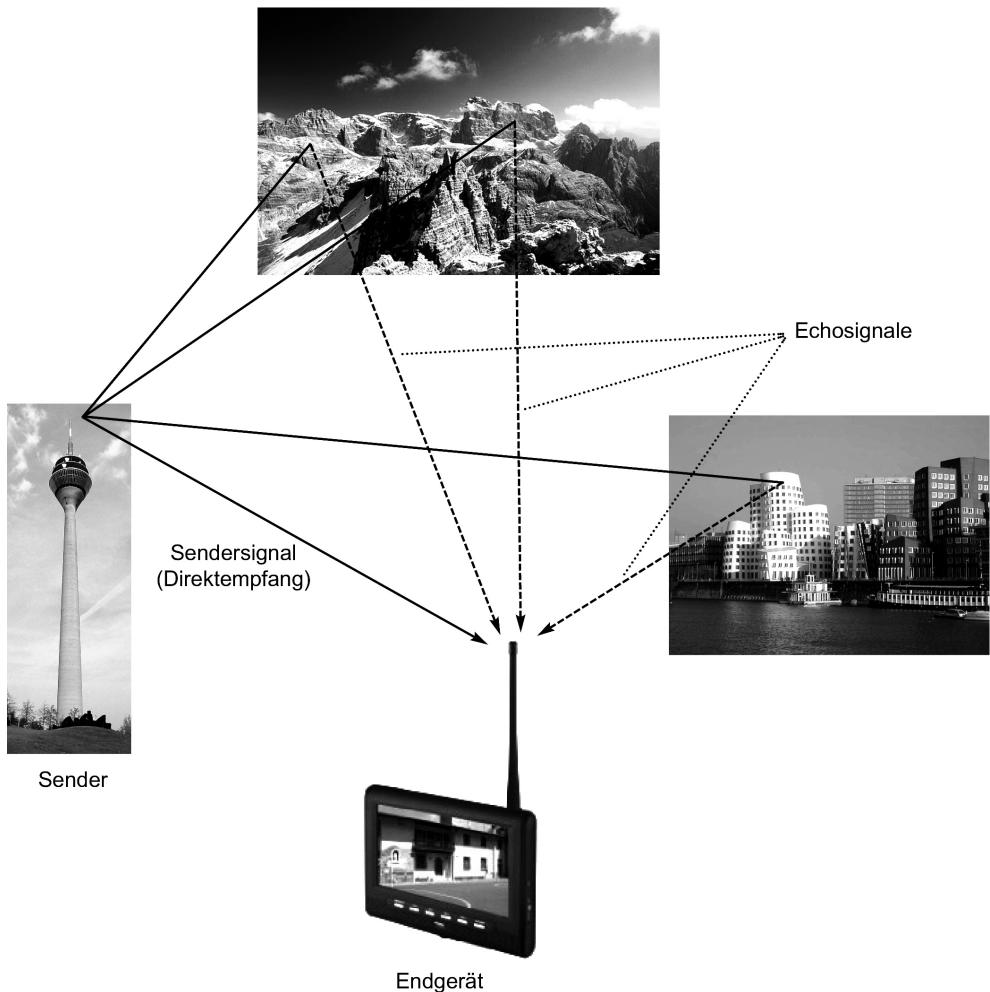


Bild 13.70 Mehr-Wege-Empfang

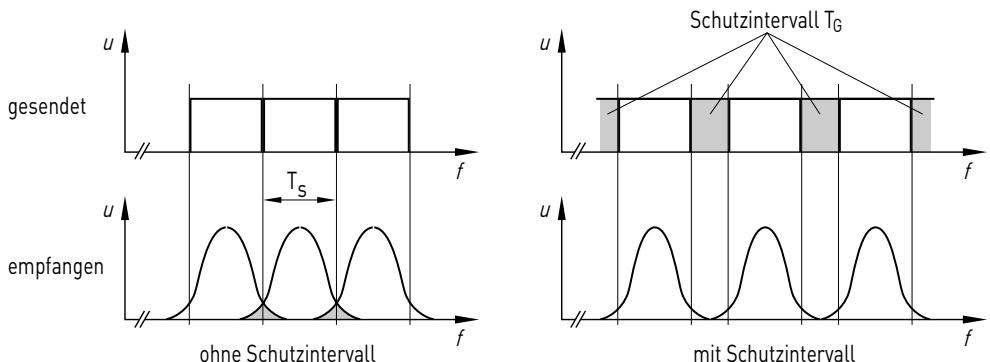


Bild 13.71 Wirkungsweise des Schutzintervalls



Während der Dauer des Schutzintervalls [guard interval] wird das empfangene Signal nicht ausgewertet.

Mit der Verwendung des Schutzintervalls werden zwar Empfangsstörungen vermieden, dies geht allerdings zulasten der Übertragungskapazität.



Das Schutzintervall reduziert die Übertragungskapazität.

Ergibt sich durch Mehr-Wege-Empfang, dass ein Symbol mit entsprechender Verzögerung mehrfach beim Empfänger eintrifft, dann führt dies wegen der Rahmenstruktur nicht zu Störungen, sondern bewirkt sogar eine Vergrößerung des Eingangssignals. Erreicht wird dies durch Zwischenspeicherung mit entsprechender Verzögerung und nachfolgender Summierung.



Mehr-Wege-Empfang desselben Symbols bewirkt die Vergrößerung des Eingangssignals.

Die Unempfindlichkeit des mit Schutzintervall versehenen COFDM-Signals bezüglich der Mehr-Wege-Ausbreitung lässt sich für die Sendernetzplanung nutzen. Im Gegensatz zum analogen Rundfunk ist es mit COFDM möglich, benachbarte Sender auf derselben Frequenz zu betreiben, auch wenn sich deren Versorgungsbereiche überlappen. Es sind deshalb beim digitalen terrestrischen Rundfunk (DAB und DVB) **Gleichwellennetze** [single frequency network (SFN)] realisierbar, die auch als Gleichfrequenznetze bezeichnet werden (**Bild 13.72**). Sie sind im Gegensatz zu den beim analogen Rundfunk erforderlichen Mehrfrequenznetzen [multi frequency network (MFN)] erheblich frequenzökonomischer.

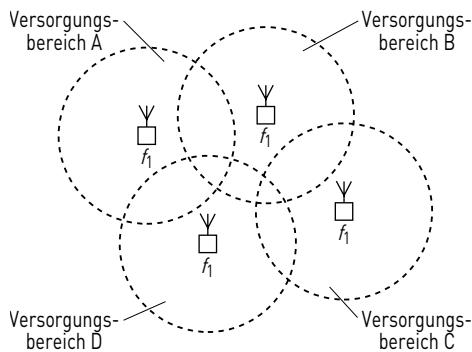


Bild 13.72 Gleichwellennetz

13.3.7 Mehrfachmodulation

Bei den bisher betrachteten digitalen Modulationsarten wurde jeweils nur ein Parameter des Trägersignals vom Modulationssignal beeinflusst. Dies betraf die Amplitude, die Frequenz oder die Phase. Es ist aber auch möglich, gleichzeitig zwei dieser Parameter für die

Modulation zu verwenden. In der Praxis hat sich dafür besonders die Kombination von Amplitudenumtastung [amplitude shift keying (ASK)] und Phasenumtastung [phase shift keying (PSK)] bewährt. Das Ergebnis wird konsequenterweise als **Amplituden- und Phasenumtastung** [amplitude & phase shift keying (APSK)] bezeichnet. Es wird aber auch die Bezeichnung asymmetrische Phasenmodulation verwendet.

Der Vorteil von APSK besteht darin, dass gegenüber Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) gleicher Wertigkeit weniger Amplitudenstufen auftreten (**Bild 13.73**). Dadurch sind Nichtlinearitäten im Übertragungssystem eingesetzter Verstärker weniger problematisch. Im Konstellationsdiagramm liegen allerdings die Endpunkte der Zeiger enger beieinander. Deshalb erfordert APSK gegenüber QAM einen größeren Störabstand.

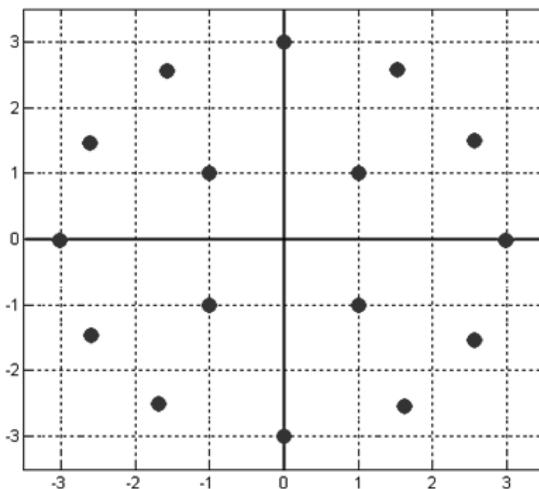


Bild 13.73 16-APSK

APSK kann auch als Untergruppe des QAM verstanden werden. In der Praxis sind sechszehnwertige APSK (16-APSK) und zweiunddreißigwertige APSK (32-APSK) typische Anwendungen dieser digitalen Modulation.

■ 13.4 Multiplexierung/Demultiplexierung

Jeder Übertragungskanal ist bekanntlich durch seine Kanalkapazität definiert. Für das zu übertragende Signal wird diese allerdings in vielen Fällen nicht vollständig benötigt, was aus wirtschaftlicher Sicht unbefriedigend ist. Es wurden deshalb Verfahren entwickelt, bei denen die gleichzeitige Nutzung eines Übertragungskanals für mehrere zu übertragende Signale möglich ist. Es handelt sich somit um die Vielfachnutzung (auch Mehrfachnutzung genannt) eines Übertragungskanals. Derartige Konzepte werden als Multiplexverfahren bezeichnet.



Multiplexverfahren = Gleichzeitige Nutzung von Übertragungskanälen durch mehrere Signale

Auf der Sendeseite erfolgt durch entsprechende Zusammenfassung mehrerer zu übertragender Signale die Multiplexierung. Dieser Vorgang wird auf der Empfangsseite rückgängig gemacht, damit die Signale wieder einzeln zur Verfügung stehen. Es erfolgt also die Demultiplexierung. Für die Realisierung der beiden Funktionen werden als technische Funktionseinheiten auf der Sendeseite ein **Multiplexer** (MUX) und auf der Empfangsseite ein **Demultiplexer** (DEMUX) benötigt (**Bild 13.74**).

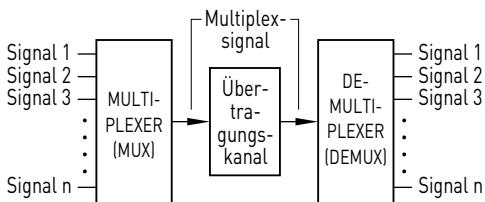


Bild 13.74 Multiplexverfahren (Konzept)

Das Multiplexsignal stellte eine Verschachtelung der zu übertragenden Signale dar. Es können dafür folgende Parameter verwendet werden:

- Zeit
- Frequenz
- Codierung
- Raum
- Polarisation

Auf der Empfangsseite soll durch die Demultiplexierung der Zugriff auf alle übertragenen Signale einzeln erfolgen können.

Multiplexverfahren erhöhen die Wirtschaftlichkeit von Übertragungssystemen und kommen deshalb in der Praxis häufig zum Einsatz. Sie sollen nachfolgend näher betrachtet werden.

Zeitmultiplex (TDM)

Die Abtastung eines analogen Signals muss bekanntlich mit mindestens dem doppelten Wert der größten im Signal enthaltenen Frequenz erfolgen. Die Zeiten zwischen den auftretenden Abtastimpulsen stehen grundsätzlich für andere Nutzungen zur Verfügung. Dabei kann es sich auch um Abtastimpulse anderer Signale handeln. Abhängig von den erforderlichen zeitlichen Abständen der Abtastimpulse können wir auf diese Weise mehrere Signale zeitlich gestaffelt übertragen. Dieses Verfahren wird als Zeitmultiplex [time division multiplex (TDM)] bezeichnet und durch zyklische Abtastung der zu übertragenen Signale realisiert (**Bild 13.75**). Für die ordnungsgemäße Funktion müssen dabei Multiplexer und Demultiplexer synchron arbeiten.



Zeitmultiplex [time division multiplex (TDM)] =
Zeitlich gestaffelte Übertragung mehrerer Signale

Zwischen Multiplexer und Demultiplexer muss bei TDM Synchronität bestehen, damit die richtige Zuordnung der Zeitschlüsse zu den einzelnen Signalen störungsfrei erfolgen kann.

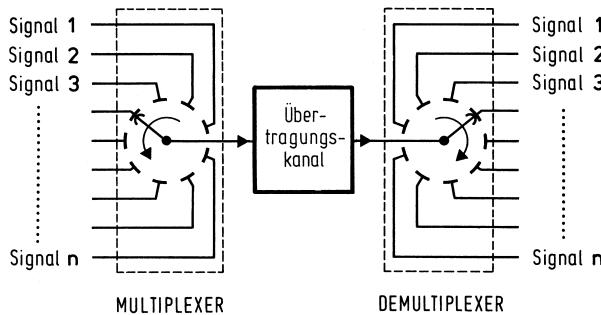


Bild 13.75 Zeitmultiplex (Konzept)



Bei TDM müssen Multiplexer und Demultiplexer synchron arbeiten.

Das Zeitmultiplexsignal besteht somit aus Abtastimpulsen in einem festen Zeittakt, was die sichere Rückgewinnung der einzelnen Signale durch den Demultiplexer ermöglicht (**Bild 13.76**). Bei jeder Abtastung steht dabei die gesamte Kanalkapazität zur Verfügung.

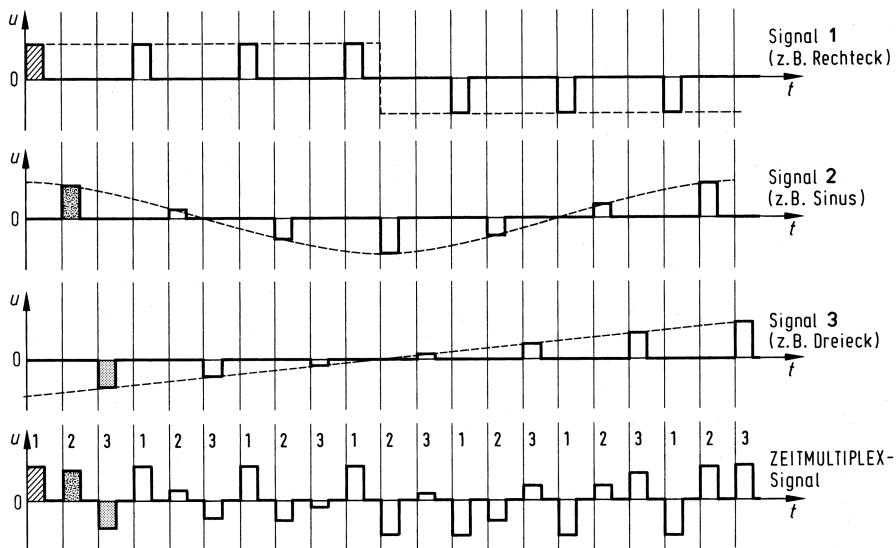


Bild 13.76 Zeitmultiplexsignal

Eine einfache Anwendung des Zeitmultiplexverfahrens ist das System PCM 30 zur gleichzeitigen Übertragung von dreißig Telefongesprächen in PulscodeModulation (PCM) über einen Übertragungskanal. Es bildet die Basis für die höherwertigen Systeme wie PCM 120, PCM 480 und PCM 960.

Wegen der oberen Grenzfrequenz in der Telefontechnik von 3,4 kHz wird beim System PCM 30 mit einer Abtastfrequenz von 8 kHz gearbeitet. Aus dem Kehrwert ergibt sich als Rahmendauer der Wert von 125 µs. Da im System gesamt 32 Kanäle vorgesehen sind, wobei zwei Kanäle für die Übertragung von Steuerungsinformationen dienen, stehen für jeden Kanal 3,9 µs zur Verfügung. In dieser Zeit sind jeweils die achtstelligen Codeworte des PCM-Signals für den jeweiligen Kanal zu übertragen (**Bild 13.77**). Es ergibt sich damit eine maximale Bitdauer von 487,5 ns, die der Demultiplexer verarbeiten müssen.

Dies führt zu folgender Bitrate, für die der Übertragungskanal ausgelegt sein muss:

$$\nu_{PCM30} = f_A \cdot N_{Codewort} \cdot N_{Kanal}$$

$$= 8\text{kHz} \cdot 8\text{bit} \cdot 32$$

$$\nu_{PCM30} = 2,048 \text{ Mbit/s}$$

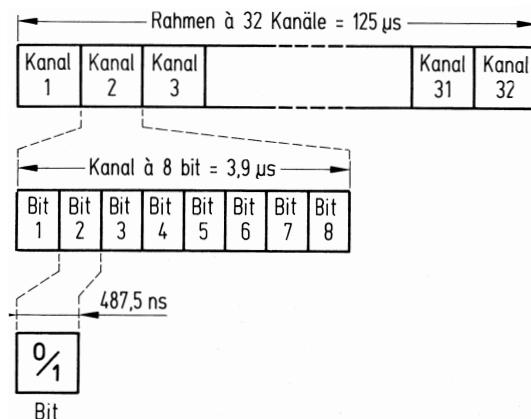


Bild 13.77 Struktur des Systems
PCM 30

Die Kapazität eines Zeitmultiplexsystems wird durch die Bitdauer bzw. Abtastdauer bestimmt, die auf der Empfangsseite noch verarbeitet werden kann.

Frequenzmultiplex (FDM)

Im Gegensatz zum Zeitmultiplex erfolgt beim Frequenzmultiplex [frequency division multiplex (FDM)] keine zeitliche, sondern die frequenzmäßige Staffelung der zu übertragenen Signale. Durch Mischung wird deshalb jedes Signal im Frequenzbereich so verschoben, dass sie für die Übertragung nebeneinander liegen.



Frequenzmultiplex [frequency division multiplex (FDM)] =
Frequenzmäßig gestaffelte gleichzeitige Übertragung mehrerer Signale

Dabei ist für jede Umsetzung eine andere Trägerfrequenz erforderlich. Über entsprechend dimensionierte Bandpässe werden die entstandenen Signale zum Gesamtsignal zusammengefasst, wobei zwischen den einzelnen Signalen stets Schutzabstände eingehalten werden, um gegenseitige Störbeeinflussungen zu vermeiden (**Bild 13.78**).

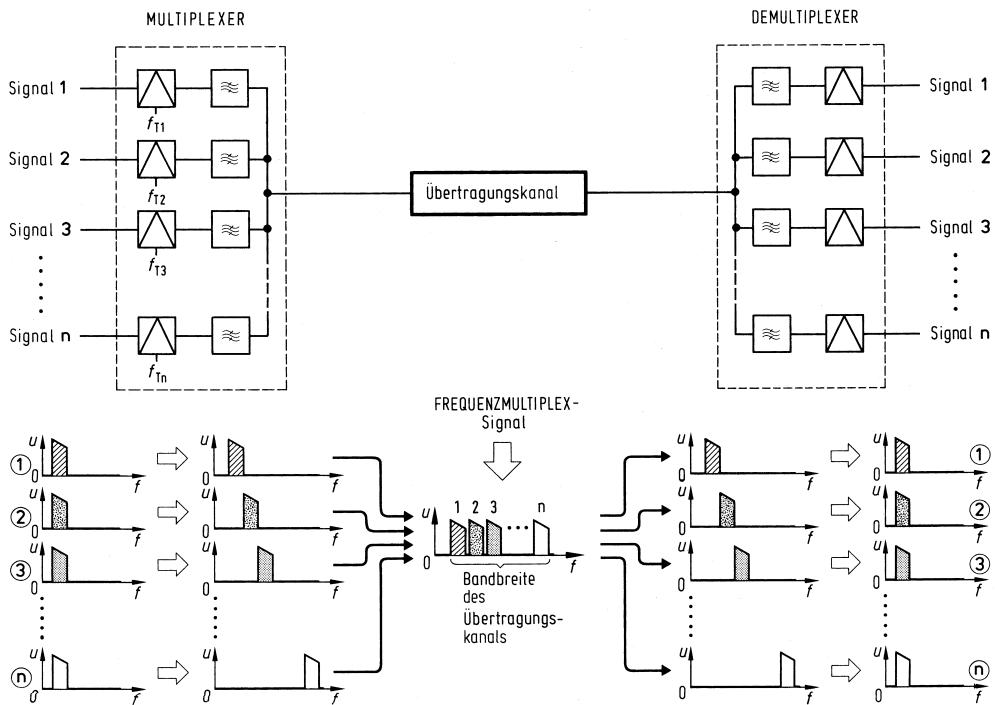


Bild 13.78 Frequenzmultiplex



Bei FDM sind zwischen den Signalen Schutzabstände erforderlich.

Im Demultiplexer trennen Bandfilter das Multiplexsignal in die einzelnen Signalanteile. Danach erfolgt durch Mischung die Rückumsetzung in die Basisbandlage.

Ein einfaches Beispiel für Frequenzmultiplex ist die Trägerfrequenztechnik (TF-Technik). Durch systematische Frequenzstaffelung wird dabei die gleichzeitige Übertragung von einigen Hundert Telefongesprächen möglich. Den Ausgangspunkt bildet der als Kanal bezeichnete Frequenzbereich 0,3...3,4 kHz für ein Telefongespräch. Mit Hilfe der Trägerfrequenzen 12 kHz, 16 kHz und 20 kHz erfolgt die Umsetzung von drei Kanälen zu einer Vorgruppe (VG) im Bereich 12 kHz...24 kHz und steht als Signal für weitere Umsetzungen zur Verfügung (**Bild 13.79**). Dies erfolgt in einer hierarchischen Struktur. Die Schutzabstände zwischen den Kanälen sind wegen der nicht idealen Dämpfungsverläufe der Bandpässe erforderlich.

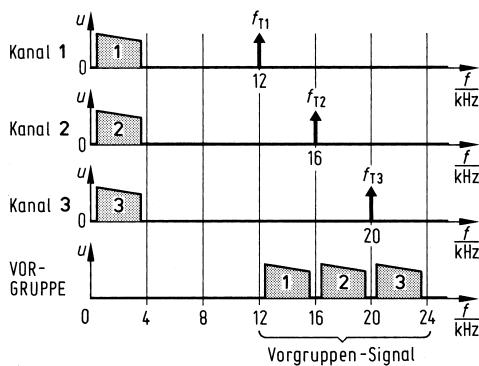


Bild 13.79 Vorgruppe im Trägerfrequenzsystem

Um den störungsfreien Betrieb von FDM-Systemen zu gewährleisten, ist für alle Trägerfrequenzen eine große Präzision erforderlich. Deshalb ist es üblich, sie von einer frequenzstabilen Quelle abzuleiten.

Bei optischen Übertragungssystemen kommt eine der FDM vergleichbare Multiplexierung zum Einsatz. Es handelt sich um den **Wellenlängenmultiplex** [wavelength division multiplex (WDM)]. Bei diesem Konzept werden verschiedene Lichtwellenbereiche gleichzeitig über einen Lichtwellenleiter (LWL) übertragen. Da Wellenlänge und Frequenz bekanntlich über die Ausbreitungsgeschwindigkeit verkoppelt sind, stellt WDM ein der FDM vergleichbares System dar, bedingt durch die Wellenlängen liegen die Frequenzen allerdings im THz-Bereich.



Wellenlängenmultiplex [wavelength division multiplex (WDM)] bedeutet Frequenzmultiplex im optischen Bereich.



Gleichzeitige Nutzung verschiedener Lichtwellenbereiche in einem Lichtwellenleiter (LWL)

Codemultiplex (CDM)

Werden die zu übertragenden Signale jeweils mit einer für den Nutzer individuellen Bitfolge überlagert, dann bedeutet dies mathematisch eine Multiplikation der beiden Signale. Für diese zweite Bitfolge gilt der Begriff **Spreizsignal** oder Spreizfrequenzsignal (**Bild 13.80**). Der auch als **Spreizung** bezeichnete Multiplikationsvorgang bewirkt, dass sich die Bandbreite des ursprünglichen Signals auf die Bandbreite des verfügbaren Übertragungskanals vergrößert. Deshalb wird auch von gespreiztem Spektrum [spread spectrum] gesprochen. Für das aufgezeigte Verfahren gilt die Bezeichnung Codemultiplex [code division multiplex (CDM)] (**Bild 13.81**). Die Verwendung der sendeseitig jedem Nutzsignal zugeordneten Spreizsignale ermöglicht die optimale Nutzung der Kapazität des jeweiligen Übertragungskanals.

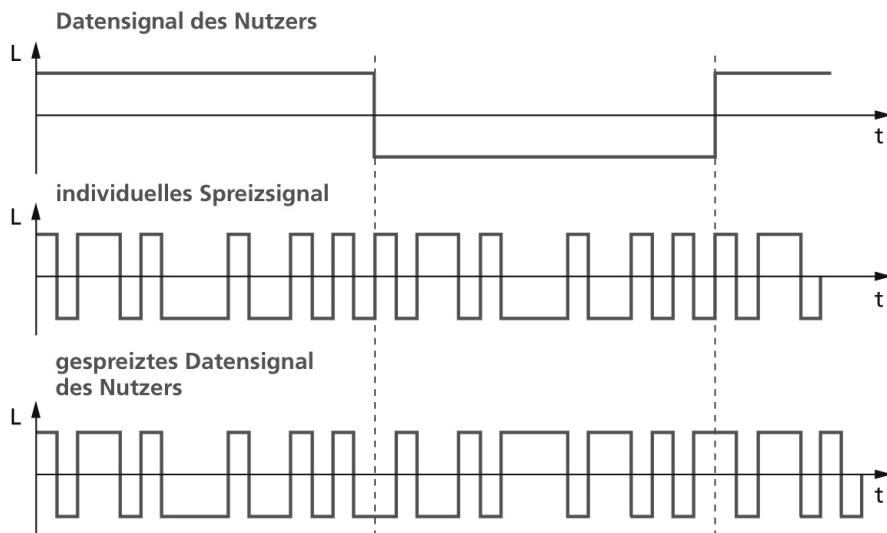


Bild 13.80 Auswirkung eines Spreizsignals

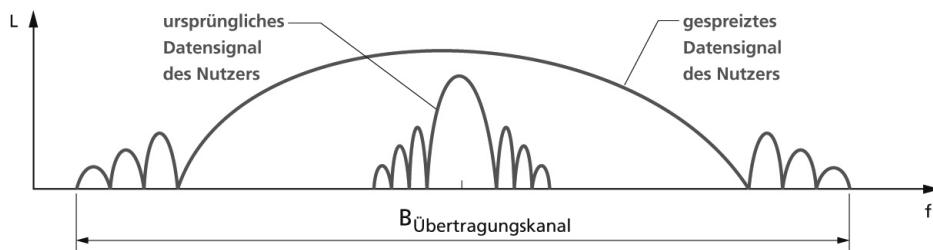


Bild 13.81 Spektrum des CDM-Signals

Ein wesentlicher Vorteil von CDM besteht darin, dass eine Synchronität zwischen sendender und empfängernder Stelle nicht erforderlich ist.



Beispiel:

Auf eine Menschenmenge bezogen, lassen sich die Unterschiede zwischen den bisher aufgezeigten Verfahren wie folgt verdeutlichen:

- Bei TDM stehen alle Personen an einer Stelle im Raum und sprechen nacheinander.
- Bei FDM stehen die Personen im Raum verteilt und sprechen gleichzeitig.
- Bei CDM stehen alle Personen an einer Stelle im Raum und sprechen gleichzeitig, allerdings in verschiedenen Sprachen. Jeder Zuhörer selektiert die für ihn relevante Sprache und empfindet die anderen Sprachen als Hintergrundgeräusch.

Raummultiplex (SDM)

Wird bei einem mehradrigen Kabel für jedes zu übertragende Signal eine Doppelader (DA) verwendet, dann besteht für jedes Signal ein räumlich getrennter Weg. Dabei handelt es sich um ein Beispiel für Raummultiplex [space division multiplex (SDM)]. Die Kapazität solcher Systeme hängt somit von bestimmten Kenndaten (z.B. Abmessungen) für die Übertragung der einzelnen Signale ab. Diese müssen solche Werte aufweisen, dass gegenseitige Störungen einen festgelegten Wert nicht überschreiten.



Raummultiplex [space division multiplex (SDM)] =
Räumlich gestaffelte gleichzeitige Übertragung mehrerer Signale

In der Funktechnik bedeutet Raummultiplex eine derartige räumliche Staffelung der Sendestellen, dass sich deren Strahlungsdiagramme nicht überschneiden. Auf diese Weise lassen sich mit einer Sendefrequenz mehrere Gebiete gleichzeitig versorgen, wobei unterschiedliche Informationen übertragen werden können (**Bild 13.82**). Bei richtiger Standortwahl für die Sender treten keine gegenseitigen Beeinflussungen auf.

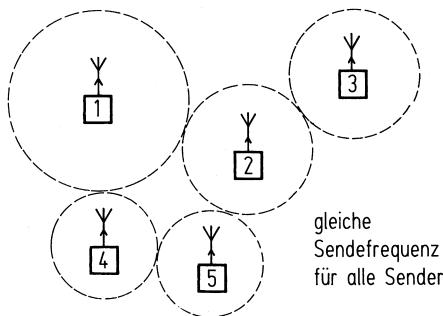


Bild 13.82 Raummultiplex mit Funksendern

Polarisationsmultiplex (PDM)

Um die Frequenzressourcen optimal zu nutzen, bietet sich ihre Mehrfachnutzung [frequency reuse] an. Ein Ansatz stellt dabei die gleichzeitige Verwendung unterschiedlicher Polarisationen des hochfrequenten Sendesignals dar, was besonders bei Satellitenübertragung eine Rolle spielt. Man bezeichnet ein solches Konzept als Polarisationsmultiplex [polarisation division multiplex (PDM)].



Polarisationsmultiplex [polarisation division multiplex (PDM)] =
Gleichzeitige Übertragung mehrerer Signale mit Hilfe unterschiedlicher Polarisationen des Sendesignals

Dabei sind folgende Varianten möglich:

- **Zirkulare Polarisation**
 - Rechtsdrehende Polarisation
 - Linksdrehende Polarisation

■ Lineare Polarisation

- Horizontale Polarisation
- Vertikale Polarisation

Zwischen diesen Polarisationen ist jeweils eine ausreichende Entkopplung gegeben, so dass keine gegenseitige Störbeeinflussung der Signale auftritt.

Die Antennen auf der Sende- und Empfangsseite müssen bei PDM für die verwendeten unterschiedlichen Polarisationen ausgelegt sein. Zur Trennung der Polarisationen sind auf der Empfangsseite entsprechende Polarisationsweichen erforderlich.



Die Empfangsantennen müssen jeweils für die auf der Sendeseite verwendete Polarisation ausgelegt sein.

■ 13.5 Vielfachzugriff

Jedes digitale Übertragungssystem soll Informationen nach vorgegebenen Kriterien unidirektional oder bidirektional übertragen. Dies kann leitungsgebunden oder funkgestützt erfolgen. Solche Systeme sind funktionsbedingt stets für mehrere Nutzer ausgelegt. Deshalb erfordert es Lösungsansätze, wie die Nutzer auf die digitalen Informationen zugreifen können. Das ist unproblematisch, wenn einem Nutzer die Information individuell, also einzeln und direkt zur Verfügung steht. In der Praxis handelt es sich jedoch meist um Multiplexsysteme oder strukturiert aufgebaute Datennetze. Dabei liegen die Informationen für alle Nutzer in gebündelter oder gestaffelter Form vor. Es bedarf deshalb entsprechender Betriebsverfahren, wie und unter welchen Bedingungen der einzelne Nutzer Zugriff auf das digitale Angebot hat. Im Prinzip geht es dabei stets um die Frage, wie die Separierung der Inhalte aus dem Gesamtignal für den einzelnen Nutzer erfolgt. Diese Kriterien sind maßgebend für den erforderlichen Aufwand und die Leistungsfähigkeit eines Systems.

Die bei vielen Medienanwendungen typische Verwendung von Multiplexsignalen macht Vielfachzugriff (auch die Bezeichnung Mehrfachzugriff ist üblich) erforderlich. Dieser lässt sich wie folgt definieren:



Vielfachzugriff [multiple access] = Unabhängige und gleichzeitige Nutzung eines über ein Kommunikationssystem übertragenes Multiplexsignals durch mehrere Nutzer

Dieser Zugriff kann bezogen auf die verschiedenen Parameter des übertragenen Multiplexsignals erfolgen.

Wird die Zeit als Zugriffskriterium verwendet, dann liegt **Vielfachzugriff im Zeitmultiplex** [time division multiple access (TDMA)] vor. Für jeden Nutzer stehen dabei für den Zugriff definierte **Zeitschlitzte** [time slots] in einem festen Raster zur Verfügung (**Bild 13.83**). Die Menge der übertragbaren Information hängt von deren Länge ab. Sie können

aus betrieblichen und technischen Gründen nicht beliebig klein gemacht werden, weshalb TDMA-Systeme eine maximale Kanalzahl nicht überschreiten können.

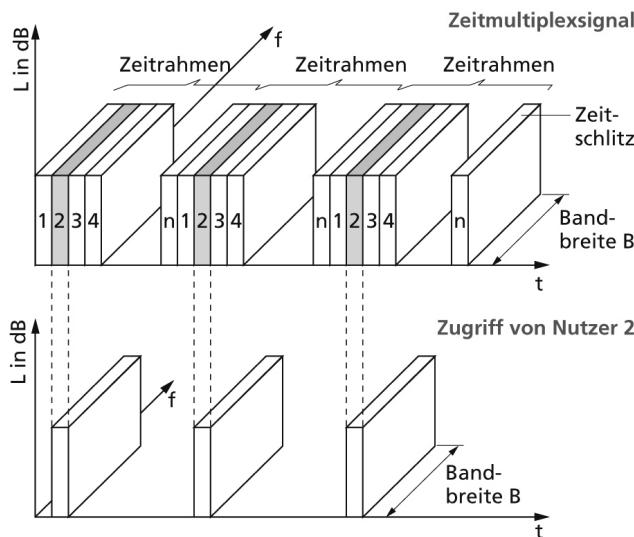


Bild 13.83 TDMA



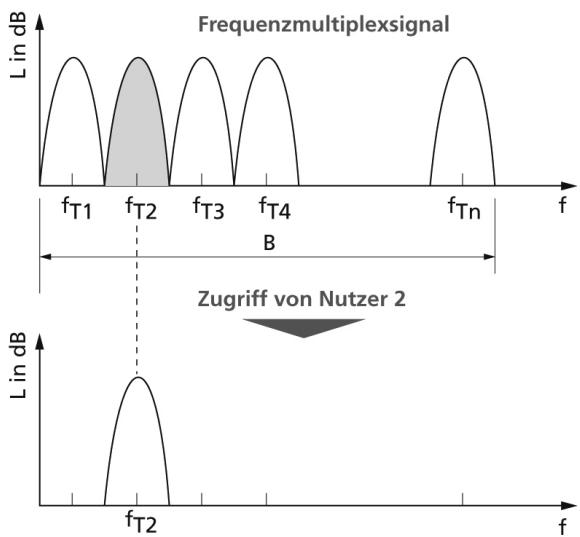
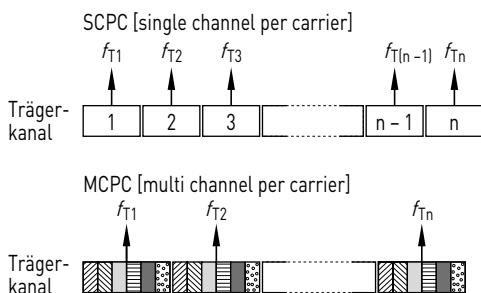
Vielfachzugriff im Zeitmultiplex [time division multiple access (TDMA)] = Definierte Zeitschlitzte für jeden Nutzer.

Während beim TDMA bei jedem Zeitschlitz die volle Bandbreite zur Verfügung steht, erfolgt beim **Vielfachzugriff im Frequenzmultiplex** [frequency division multiple access (FDMA)] die Aufteilung in Teilbereiche, denen dann jeweils eine Trägerfrequenz zugeordnet ist (**Bild 13.84**). Für den Zugriff auf eine bestimmte Information muss deshalb die entsprechende Trägerfrequenz bekannt sein.



Vielfachzugriff im Frequenzmultiplex [frequency division multiple access (FDMA)] = Ein Kanal oder mehrere Kanäle pro Träger

Wird pro Träger ein Kanal übertragen, dann handelt es sich um Einzelkanalträger und es gilt die Bezeichnung **SCPC** [single channel per carrier]. Eine andere Lösung stellen die Mehrkanalträger dar. Dabei wird mit einem Träger auf mehrere Kanäle zugegriffen, was zu der Bezeichnung **MCPC** [multi channel per carrier] führt (**Bild 13.85**).

**Bild 13.84** FDMA**Bild 13.85** Einzelkanalträger und Mehrkanalträger

Der **Vielfachzugriff im Codemultiplex** [code division multiple access (CDMA)] erfordert den Einsatz der individuellen **Spreizsignale**, um jeweils den Zugriff auf das ursprüngliche Signal zu ermöglichen.



Vielfachzugriff im Codemultiplex [code division multiple access (CDMA)] =
Zugriff auf einzelne Kanäle mit Hilfe der spezifischen Spreizsignale

CDMA gewährleistet eine relativ hohe Übertragungssicherheit, erfordert jedoch auf der Sende- und Empfangsseite einen entsprechenden technischen Aufwand.

Eine weitere Möglichkeit für den gleichzeitigen Zugriff mehrerer Teilnehmer ist beim **Vielfachzugriff im Raummultiplex** gegeben. Er wird als SDMA [space division multiple access] bezeichnet und ermöglicht den gezielten Zugriff auf einzelne Kanäle. Für drahtgebundene Systeme ist dies mit einfachen Mitteln realisierbar, bei Funksystemen wird mit Antennen gearbeitet, die ausgeprägte Richtcharakteristik aufweisen.



Vielfachzugriff im Raummultiplex [space division multiple access (SDMA)] = Gezielter Zugriff auf die einzelnen räumlich getrennten Kanäle

Die doppelte Nutzung von Frequenzen bzw. Frequenzbereichen ist bekanntlich durch Einsatz unterschiedlicher Polarisationen möglich. Bei diesem Polarisationsmultiplex kann es sich um lineare Polarisation (horizontal/vertikal) oder zirkulare Polarisation (rechtsdrehend/linksdrehend) handeln.

Für den **Vielfachzugriff im Polarisationsmultiplex** [polarisation division multiple access (PDMA)] sind für die jeweilige Polarisation geeignete Antennen erforderlich. Sie weisen zu der jeweils komplementären Polarisationsrichtung eine ausgeprägte Entkopplung auf.



Vielfachzugriff im Polarisationsmultiplex [polarisation division multiple access (PDMA)] = Gezielter Zugriff auf gewünschte Polarisation

■ 13.6 Einzelzugriff

Bei Datennetzen soll sichergestellt werden, dass der Datenstrom zielgerichtet von einer sendenden Station zur jeweils gewünschten empfangenden Station gelangt. Es bedarf also geeigneter Verfahren, wie dieses sichergestellt werden kann. Dabei ist Voraussetzung, dass unabhängig von der physikalischen Struktur des Datennetzes alle beteiligten Nutzerstationen in einem logischen Ring angeordnet sind. Diese Situation liegt vor, wenn jede Station ihren Nachfolger kennt.

Es besteht nun die Möglichkeit, das ungestörte Senden einzelner Stationen mit Hilfe eines als **Token** (dt: Zeichen, Merkmal) bezeichneten „elektronischen Staffelstabes“ sicherzustellen.

Das Token stellt die Sendeberechtigung dar, realisiert durch ein spezielles Bitmuster, das von Station zu Station weitergereicht wird. Will eine Station Daten senden, dann nimmt sie das Token, versieht es mit einem Besetzt-Flag, hängt die zu übertragenden Daten sowie die Zieladresse an und sendet es zur nächsten Station. Diese prüft die Adresse und sendet die Daten unverändert weiter, wenn diese nicht für sie bestimmt sind. Treffen die Daten bei der Zielstation ein, dann stellt diese eine elektronische Empfangsquittung aus und sendet sie an die absendende Station. Das dargestellte Konzept wird meist als **Token-Ring-Verfahren** bezeichnet und führt dazu, dass stets nur eine Station in einem logischen Ring ungestört Daten senden kann (**Bild 13.86**). Es handelt sich dabei um Separierung durch Reservierung. Da beim Token-Ring-Verfahren die nächsten Daten erst übertragen werden können, wenn die Empfangsquittung der vorherigen Daten bei der sendenden Station vorliegt, sind große Übertragungsgeschwindigkeiten nicht erreichbar.



Token-Ring = Zugriff nach erteilter Sendeberechtigung

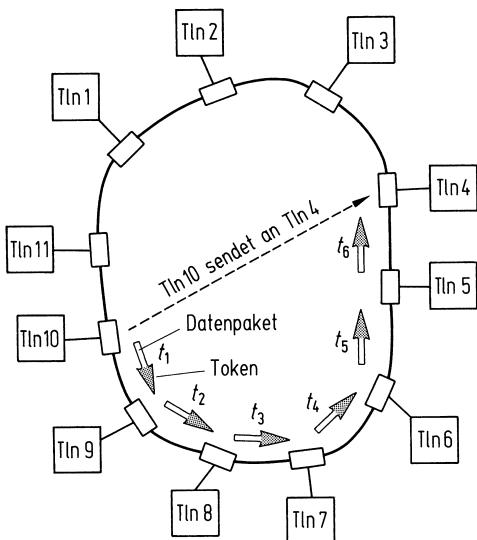


Bild 13.86 Token-Ring-Verfahren

Das Zugriffsverfahren **CSMA/CD** [carrier sense multiple access with collision detection] arbeitet nach dem Konzept der Überwachung und Erkennung von Kollisionen bei gleichzeitigem Zugriff mehrerer Nutzerstationen und ist besonders für Netze mit Busstruktur geeignet.

Bei CSMA/CD greifen die angeschlossenen Stationen immer dann auf den Bus als Übertragungsmedium zu, wenn Daten gesendet werden sollen. Bei zwei oder mehr gleichzeitigen Aussendungen treten zwangsläufig Kollisionen auf. Sie werden mit Hilfe einer Überwachungsschaltung entdeckt, was die „collision detection“ bedeutet. Dies bewirkt den sofortigen Stopp aller Aussendungen. Mit Hilfe eines Zufallsgenerators wird dann festgelegt, welche Station senden darf. Danach beginnt wieder der Vielfachzugriff der Stationen auf den Bus. Es gilt somit folgender Funktionsablauf:

Gleichzeitige Aussendung durch mehrere Stationen

↓

Kollisionen

↓

Kollisionserkennung

↓

Stopp aller Aussendungen

↓

Bestimmung der vorrangigen Station durch Zufallsgenerator

Durch das aufgezeigte CSMA/CD-Verfahren ist die Abfolge der Kommunikation zwischen den an das Datennetz angeschlossenen Stationen nicht vorhersehbar. Es sind deshalb auch keine Prioritäten für die Übertragung möglich.



CSMA/CD [carrier sense multiple access/collision detection] = Zugriff nach Kollisionserkennung

■ 13.7 Mehr-Antennen-Systeme

Bei jedem funkgestützten Übertragungssystem sind auf der Sende- und Empfangsseite Antennen erforderlich. Sendeantennen wandeln dabei die hochfrequente Ausgangsspannung des Senders in Feldstärke, während Empfangsantennen die verfügbare Feldstärke in die Eingangsspannung für den jeweiligen Empfänger umsetzen. Dieses Funktionskonzept gilt für alle verwendeten Übertragungsfrequenzen.

Die bisher typische Konstellation funkgestützter Übertragungssysteme umfasst in der Regel eine Antenne auf der Sendeseite und eine Antenne am jeweiligen Empfangsort. Bei digitaler Übertragung bietet es sich zur Verbesserung der Effizienz an, mehrere Sende- und Empfangsantennen zu verwenden. Dadurch ist es möglich, die **spektrale Effizienz** (= Bandbreitenausnutzung) zu verbessern und die **Bitfehlerrate** [bit error ratio (BER)] zu reduzieren, weil dann nicht nur die zeitliche, sondern auch die räumliche Dimension für die Informationsübertragung genutzt werden kann.

Als grundsätzliche Bezeichnung für vorstehendes Konzept gilt die Abkürzung MIMO. Sie steht für „multiple input, multiple output“, was mit „mehrfacher Eingang, mehrfacher Ausgang“ übersetzt werden kann. Die Bezeichnungen Eingang [input] und Ausgang [output] beziehen sich dabei auf den Übertragungskanal (= Funkkanal).



MIMO [multiple input, multiple output]

→ Eingänge und Ausgänge beziehen sich auf den Funkkanal

Beim Einsatz von MIMO sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Es ist die nachgeschaltete Signalverarbeitung von Bedeutung, damit die empfangenen Signale optimal aufbereitet werden.
- Mit mehreren Empfangsantennen lässt sich mehr Energie aus dem elektromagnetischen Feld auskoppeln als mit einer Einzelantenne. Das wird als Gruppengewinn bezeichnet.
- Bei der Übertragung auftretendes Fading macht sich nicht bei allen Empfangsantennen in gleicher Weise bemerkbar.
- Bei Einsatz mehrerer Antennen auf der Sendeseite und/oder Empfangsseite sollten diese einen Abstand zueinander von durchschnittlich zehn Wellenlängen der Betriebsfrequenz aufweisen.
- Durch MIMO lässt sich über die verfügbare Bandbreite eine größere Bitrate übertragen.
- MIMO ermöglicht eine höhere Zuverlässigkeit der Übertragung.

Das MIMO-Konzept basiert auf mehreren Antennen auf der Sendeseite und Empfangsseite. Allgemein wird die Zahl der Sendeantennen mit n_s bezeichnet, während für die Zahl der Empfangsantennen n_e gilt. Da jede Empfangsantenne die Signale jeder Sendeantenne empfängt, ergeben sich $n_s \cdot n_e$ einzelne Kanäle, die auf derselben Frequenz arbeiten (**Bild 13.87**). Dadurch lässt sich über jeden dieser Kanäle ein separater Bitstrom übertragen.

Dies setzt allerdings voraus, dass die Kanäle ausreichende Unterschiede aufweisen. Das ist wegen der räumlichen Separierung der Antennen in der Regel gegeben, weil es sich im Prinzip um Mehr-Wege-Empfang handelt.

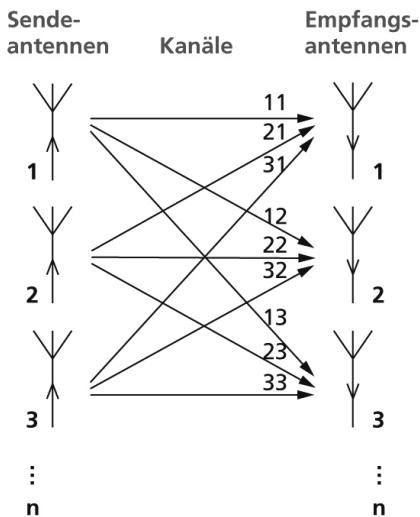


Bild 13.87 MIMO-Konzept

Mathematisch betrachtet, lässt sich der MIMO-Gesamtkanal durch eine Matrix darstellen, deren Komponenten die übertragungstechnischen Merkmale jedes einzelnen Kanals beschreiben. Die Zahl der Spalten und Zeilen dieser Matrix hängt unmittelbar von der Zahl der verwendeten Sende- und Empfangsantennen ab.



Beispiel:

Bei einem MIMO-System werden jeweils drei Sende- und Empfangsantennen verwendet. Der zu übertragende Bitstrom wird dabei in drei separate Bitströme aufgeteilt und parallel übertragen. Auf der Empfangsseite empfängt jede Antenne ein durch die drei Sendeantennen bewirktes Summensignal. Um die empfangenen Einzelbitströme richtig decodieren und zum Gesamtbittstrom zusammenfassen zu können, muss durch entsprechende Signalverarbeitung die Kanalmatrix gelöst werden. Es treten dabei drei Gleichungen mit drei Unbekannten auf. Sind die bereits erwähnten unterschiedlichen Kanalkonstellationen gegeben, dann kann ohne zusätzliche Bandbreite die dreifache Menge Daten übertragen werden. Das bedeutet eine um den Faktor drei höhere spektrale Effizienz (= Bandbreitenausnutzung).

Der bei MIMO verwendete Einsatz mehrerer Sende- und Empfangsantennen wird auch als **Antennendiversität** [antenna diversity] bezeichnet. Der damit verbundene Aufwand an Antennen und Software für die Signalverarbeitung ist nicht bei allen Übertragungssystemen grundsätzlich erforderlich oder aus wirtschaftlichen Gründen gewünscht. Es gibt deshalb folgende Abarten von MIMO, die ebenfalls das Prinzip der Antennendiversität nutzen:

- **MISO** [multiple input, single output]
Konzept: Mehrere Sendeantennen, aber nur eine Empfangsantenne
- **SIMO** [single input, multiple output]
Konzept: Nur eine Sendeantenne, aber mehrere Empfangsantennen



MIMO → Antennendiversität

Bei MISO kommt die Antennendiversität also nur auf der Sendeseite zum Einsatz, während sie bei SIMO ausschließlich für die Empfangsseite gilt. Dabei kann in beiden Fällen zwischen Raum- und Polarisationsdiversität unterschieden werden.

Im Falle der **Raumdiversität** sind gleiche Antennen in einem definierten Abstand zueinander angeordnet. Für maximalen Diversitätsgewinn sollte als Faustformel ein Mindestabstand der Antennen von zwei Wellenlängen eingehalten werden.

Die **Polarisationsdiversität** nutzt die Entkopplung der Polarisationsrichtungen bei linearer und zirkularer Polarisierung. Grundsätzlich ist es auch möglich, in einem Übertragungssystem gleichzeitig lineare und zirkulare Polarisierung zu verwenden. Bei linearer Polarisierung werden in der Regel um 90 Grad versetzt montierte Dipolantennen verwendet, während es bei zirkularer Polarisierung Wendelantennen mit entgegengesetzten Wendelrichtungen sind.

Für MISO gilt auch die Bezeichnung **Sendediversität**. Hier erfolgt die Abstrahlung stets so, dass es sich für den Empfänger um Mehr-Wege-Ausbreitung handelt. Bei gleichzeitiger Abstrahlung des Signals über die Sendeantennen wäre dies allerdings nicht gegeben. Deshalb wird bei nur einem Sendestandort entweder schnell zwischen den Sendeantennen umgeschaltet oder die Abstrahlung erfolgt für jede Sendeantenne mit einem definierten Zeitversatz im Milli- oder Mikrosekundenbereich. Eine Variante stellt in der Praxis auch die Verwendung mehrerer Senderstandorte dar, bei denen das Signal von allen Sendern gleichzeitig auf derselben Frequenz abgestrahlt wird. Für jeden Empfänger im versorgten Gebiet ergibt sich damit ausgeprägter Mehr-Wege-Empfang, weil die Entferungen zu den Sendern und damit auch die Signallaufzeiten unterschiedliche Werte aufweisen. Eine solche Konstellation wird bekanntlich als Gleichwellennetz (oder Gleichfrequenznetz) [single frequency network (SFN)] bezeichnet.



MISO → Sendediversität

Der MISO-Effekt ist auch erreichbar, wenn zwar über jede Sendeantenne dasselbe Signal abgestrahlt wird, jedoch jeweils mit einer unterschiedlichen Codierung. Es liegt dann **Diversitätscodierung** vor. Sie erfordert allerdings Empfänger mit geeigneter Signalverarbeitung für diese Codierung.

SIMO wird auch als **Empfangsdiversität** bezeichnet. Sie ist durch verschiedene Konzepte realisierbar, bei denen sich Aufwand und Leistungsmerkmale unterscheiden.



SIMO → Empfangsdiversität

Wird jeder Antenne ein eigener Empfänger nachgeschaltet, dann besteht die Möglichkeit, durch eine Auswerteschaltung zeitlich das jeweils beste Antennensignal festzustellen und dieses über einen elektronischen Schalter dem eigentlichen Hauptempfänger zuzuführen. Die Auswahlkriterien können dabei der Pegel, der Störabstand (z.B. *SNR*, *CNR*, ...), die Bitfehlerrate (*BER*) oder das Modulationsfehlerverhältnis (*MER*), einzeln oder in festgelegter Kombination, sein.

Bei diesem SIMO-Konzept mit einzelnen Empfängern ist keine Umschaltung zwischen den Empfangsantennen erforderlich, weil das Signal jeder Antenne separat bewertet wird. Dies bedeutet verständlicherweise einen relativ großen technischen Aufwand. Dieser ist mit entsprechenden Kosten verbunden, die gerade bei mobilen Endgeräten häufig als nicht vertretbar erscheinen.

SIMO lässt sich auch mit nur einem Empfänger realisieren. Es werden dabei die Empfangsantennen über einen zyklischen Umschalter an den Empfängereingang geschaltet. Solange das jeweilige Antennensignal vorgegebene Qualitätsmerkmale erfüllt, bleibt es das Eingangssignal des Empfängers. Sobald es diese Vorgaben nicht mehr erfüllt, werden solange die nächsten Antennen eingesetzt, bis die gewünschten Kriterien wieder erfüllt sind.

Die vorstehend angeführten Verfahren verwenden das Hochfrequenzsignal der Empfangsantennen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, diese Signale in das Basisband umzusetzen und durch digitale Filterung und sonstige Maßnahmen weiterzuverarbeiten. Auf diese Weise lassen sich z.B. Nachbarkanalstörungen optimal unterdrücken.

Abschließend ist feststellbar, dass für die Übertragung digitaler Signale verschiedene Antennenkonzepte zum Einsatz kommen können. Diese unterscheiden sich im Aufwand für die Antennen und die Signalverarbeitung auf der Empfangs- und/oder Sendeseite, aber auch durch spezifische Leistungsmerkmale. Neben der Zielsetzung, das Quellensignal störungsfrei zu übertragen, wird auch stets eine möglichst große spektrale Effizienz angestrebt. Dafür gilt die Angabe der Bitrate pro Hertz Bandbreite in (bit/s)/Hz. Je größer der Wert, desto besser ist die Bandbreitenausnutzung. Es sei auch angemerkt, dass die Wahl eines Antennenkonzeptes davon abhängt, ob das jeweilige Übertragungssystem für mobile, portablen oder stationären Empfang ausgelegt sein soll.

■ 13.8 Zugangsberechtigung

Sollen in Kommunikationsnetzen nur autorisierte Nutzer Zugang haben, dann sind entsprechende Maßnahmen erforderlich, um dies sicherzustellen. Bei Kommunikationssystemen mit Sternnetzen ist dies relativ einfach, weil hier die Kommunikation zwischen der zentralen Sendestelle im Sternpunkt und den Nutzern stets über Punkt-zu-Punkt-Verbindungen erfolgt. Dadurch ist die eindeutige Adressierung jedes Nutzers gegeben, und zwar bedingt durch die individuelle Leitungsverbindung. Der Zugang kann damit unmittelbar vom Sternpunkt für jeden Nutzer gesteuert werden.



Sternnetze



Punkt-zu-Punkt-Verbindungen



Zugang für jeden Nutzer über die individuelle Anschlussleitung vom Sternpunkt steuerbar

Eine andere Situation liegt bei einem Verteilsystem nach dem Punkt-zu-Mehrpunkt-Konzept vor, wie es sich bei Baumnetzen darstellt. In diesem Fall erhalten alle angeschlossenen Nutzer gleichzeitig dieselben Inhalte. Um nun den autorisierten Zugang sicherzustellen, wird üblicherweise **Verschlüsselung** eingesetzt. Für diesen Begriff gelten in der Fachsprache die eigentlich richtigere Bezeichnung „**Conditional Access**“ und die Abkürzung „CA“. Das lässt sich mit „bedingter Zugang“ oder „Zugang unter Bedingungen“ übersetzen und bedeutet „Zugang nur für Berechtigte“.



Baumnetze



Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen



Einsatz von Conditional Access (CA)



Zugang zu Inhalten nur für Berechtigte



Beispiel:

Ein typischer Anwendungsfall für Conditional Access (CA) im Alltag ist das Bezahlfernsehen [Pay-TV]. Der Nutzer kann auf Pay-TV-Programme nur dann zugreifen, wenn er über einen kostenrelevanten Vertrag mit dem Anbieter von diesem dafür autorisiert wird.



CA [conditional access] ermöglicht den Zugang auf Inhalte nur für Berechtigte.

Bei dem Begriff Zugang stellt sich natürlich die Frage: Zugang zu was? Es lassen sich dafür folgende Bereiche unterscheiden:

- **Inhalte** [content]:
Dazu gehören Programme, audiovisuelle Angebote, Filme, Dokumentationen, Nachrichten, Spiele oder andere Angebote.
- **Dienste** [service]:
Dazu gehören kostenlose Dienste (z.B. Free-TV, Bezahlendienste (z.B. Pay-TV), Abrufdienste (z.B. Video on Demand (VoD), interaktive Dienste und andere Dienste).
- **Netze** [network]:
Dazu gehören Satellit, Breitbandkabel, Terrestrik, DSL, WLAN und andere Netze.

Conditional Access (CA) kann als Spezialfall der Codierung/Decodierung verstanden werden, weil die Nutzer individuelle Zugangsberechtigungen erhalten.

! Conditional Access (CA) ist ein Spezialfall der Codierung/Decodierung.

Es handelt sich bei CA stets um nachfolgend aufgezeigte Schritte (**Bild 13.88**):

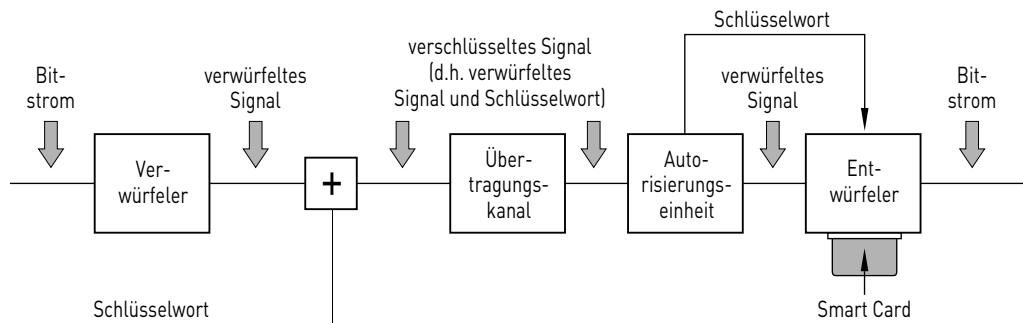


Bild 13.88 Verwürfelung und Verschlüsselung

- 1. Schritt: **Verwürfelung** [scrambling]

Zuerst erfolgt bei jedem CA-System die Verwürfelung [scrambling] des zu übertragenen Signals. Dies bedeutet die Änderung der ursprünglichen Reihenfolge im Bitstrom nach einem festgelegten Algorithmus. Dieser wird vertraulich behandelt, um Piraterie [piracy], also „Hacken“ zu erschweren.

- 2. Schritt: **Verschlüsselung** [encryption]

Die eigentliche Verschlüsselung [encryption] bedeutet die Bereitstellung eines elektronischen Schlüssels, also eines spezifischen Codeworts [control word] als Schlüsselwort.

- 3. Schritt: **Übertragung** [transmission]

Das Schlüsselwort wird mit dem Signal zum Nutzer übertragen, der sich mit Hilfe einer entsprechenden intelligenten Chipkarte (üblicherweise als Smartcard bezeichnet) authentifizieren muss.

- 4. Schritt: **Entschlüsselung** [decryption]

Das Schlüsselwort wird in einer sogenannten Autorisierungseinheit aus dem Bitstrom wiedergewonnen, damit es in Verbindung mit den Informationen von der Smartcard den Entwürfeler in Funktion setzen kann. Es handelt sich dabei um die Entschlüsselung [decryption].

- 5. Schritt: **Entwürfelung** [descrambling]

Durch den Entwürfeler wird danach das verwürfelte Signal wieder in seine ursprüngliche Form gebracht. Dabei handelt es sich um Entwürfelung [descrambling].

Passen das Schlüsselwort und die Daten der Smartcard nicht zueinander, dann ist weder Entschlüsselung noch Entwürfelung möglich.

Die Authentifizierung des Nutzers kann bei CA-Systemen auch mit Hilfe einer SIM-Karte [subscriber interface module card] erfolgen und gegebenenfalls mit der Eingabe einer PIN [personal identification number] verbunden sein. Es besteht grundsätzlich aber auch die Möglichkeit, ohne eine Karte zu arbeiten und ausschließlich nur eine PIN für den Nachweis der Zugangsberechtigung zu verwenden.

Ein CA-System umfasst auf der Sendeseite die Verwürfelung und die Verschlüsselung, während es sich auf der Empfangsseite um die Entschlüsselung und die Entwürfelung handelt. Im **Bild 13.89** sind diese Zusammenhänge nochmals am Beispiel des digitalen Fernsehens, DVB, veranschaulicht.

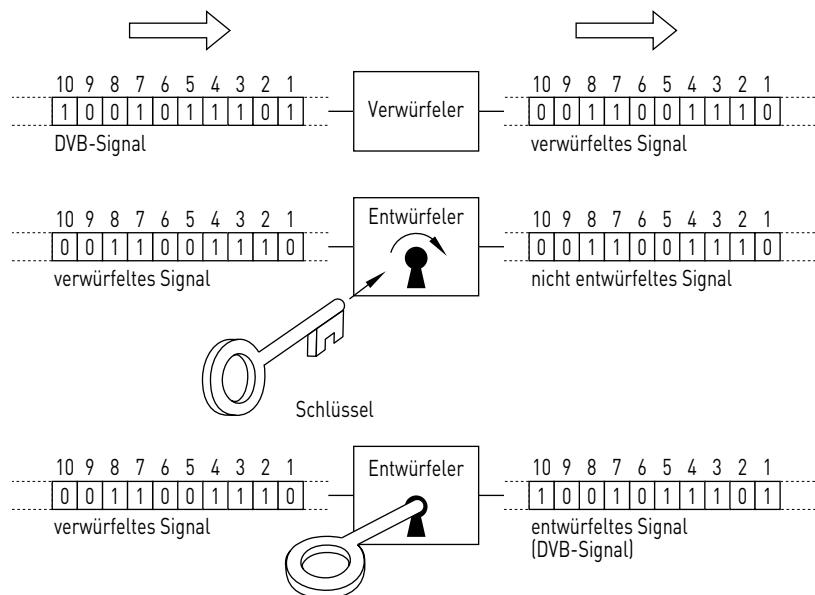


Bild 13.89 Conditional Access (Prinzip)

Damit ein CA-System möglichst große Sicherheit gegen Piraterie gewährleistet, wird mit einer Kombination folgender Signale gearbeitet (**Bild 13.90**):

- Control Word (CW)
- Entitlement Management Message (EMM)
- Entitlement Control Message (ECM)

Das CW ist das **Schlüsselwort**, welches für die Freigabe des Entwürfeler benötigt wird. Die EMM ist ein nutzerspezifisches Signal. Es autorisiert den einzelnen Nutzer für den Zugriff auf Inhalte. Die administrative Abwicklung erfolgt dabei über die Teilnehmerverwaltung, üblicherweise als **Subscriber Management System** (SMS) bezeichnet.

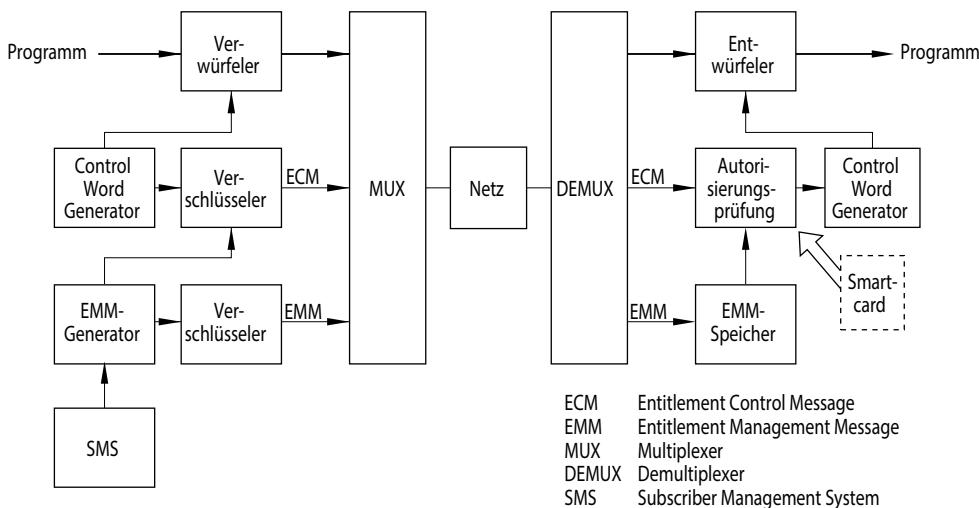


Bild 13.90 Arbeitsweise des CA-Systems

Die EMM ist ein nutzerspezifisches Signal.

Die ECM ist dagegen ein inhaltespezifisches Signal und sichert den Zugriff auf den gewünschten Inhalt. Aus Gründen der Sicherheit werden die EMM und die ECM selbst auch verschlüsselt übertragen. Außerdem erfolgt alle 10 s ein Wechsel der ECMs.

Die ECM ist ein inhaltespezifisches Signal und wird alle 10 s gesendet.

Auf der Empfangsseite erfolgt die Autorisierungsprüfung mit Hilfe der EMMs und der ECMs. Außerdem ist eine **Smartcard** erforderlich. Es handelt sich um eine Chipkarte, die der Teilnehmer individuell vom SMS bei Vertragsabschluss erhält. Die Auswertung des EMM und ECM ist allerdings nur in Verbindung mit der Smartcard des Nutzers möglich.

Die Smartcard erhält der Nutzer bei Vertragsabschluss von der Teilnehmerverwaltung SMS.

Für die Realisierung eines CA-Systems wird im Endgerät des Nutzers auf jeden Fall eine als **CAM** [conditional access module] bezeichnete technische Funktionseinheit benötigt. Sie kann entweder im Endgerät integriert sein, wofür die Bezeichnung „**embedded CA**“ (= integriertes CA) gilt, oder über die standardisierte Schnittstelle **CI** [common interface] oder **CI+** [common interface plus] als externes CA in das Endgerät eingesteckt werden. Im letzteren Fall ist für die CAM-Steckkarte auch die Bezeichnung **CICAM** [common interface conditional access module] üblich. Bei beiden CA-Varianten wird dem Modul an einem

Anschluss das verschlüsselte Signal zugeführt, während an einem anderen Anschluss das unverschlüsselte Signal zur Verfügung steht (**Bild 13.91**). Jedes CAM weist auch einen **Kartenleser** [card reader] auf, um die Auswertung der Smartcard des Nutzers zu ermöglichen.

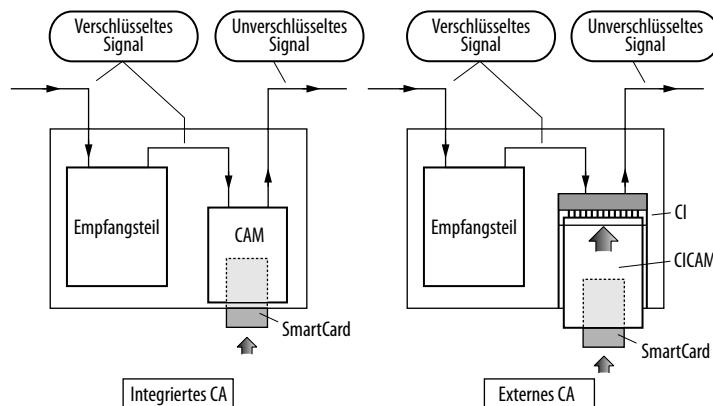


Bild 13.91 Integriertes und externes CA



Jedes Conditional Access Module (CAM) weist einen Kartenleser für die Smartcard auf.

Die meisten CA-Systeme verwenden zwar einen standardisierten Verwürfelungs-Algorithmus, sind aber ansonsten proprietäre Systeme, die sich durch den Aufwand für die Schlüsselworte unterscheiden.



CA-Systeme sind stets proprietär.

Bei steigendem Aufwand für die Schlüsselworte nimmt auch der **Signalschutz** zu. Es ist deshalb in der Praxis stets ein Abwagen zwischen der gewünschten Schutzwirkung und der Wirtschaftlichkeit erforderlich.

14

Anwendungen

■ 14.1 Hörfunk (Radio)

14.1.1 Einführung

Beim Hörfunk [radio] handelt es sich um ein Rundfunksystem, bei dem von einem Sender jeweils möglichst viele Empfänger gleichzeitig erreichbar sein sollen. Dieser unidirektionale Verteildienst überträgt ausschließlich Audiosignale und ggf. verschiedene Zusatzinformationen als Text, Grafik oder Bild. Es kann sich beim Hörfunk um analoge oder digitale Audiosignale handeln.

Es sei darauf hingewiesen, dass die nachfolgenden Betrachtungen keine schaltungstechnischen Lösungen aufzeigen, sondern lediglich die verschiedenen Funktionalitäten behandeln.

Am 29. Oktober 1923 begann in Deutschland der Regelbetrieb für den Hörfunk. Während es damals nur eine kleine Zahl von Rundfunkteilnehmern gab, ist der Hörfunk inzwischen längst ein Massenkommunikationsmittel, wobei stationärer, portable und mobiler Empfang realisierbar ist.



Hörfunk ist ein Massenkommunikationsmittel.

Für die Übertragung des Hörfunks sind im Rahmen der Internationalen Fernmeldeunion (ITU UIT) Frequenzbereiche verbindlich festgelegt. Damit wird die universelle Nutzung des Hörfunks sichergestellt.



Übertragung von Hörfunk erfolgt in international festgelegten Frequenzbereichen.

Die ersten Hörfunksender arbeiteten auf möglichst kleinen Frequenzen, also mit großen Wellenlängen, weil dies technisch einfacher realisierbar war. Im Laufe der Zeit wurden allerdings schrittweise der Langwellenbereich (LW), der Mittelwellenbereich (MW) und die verschiedenen Bänder im Kurzwellenbereich (KW) erschlossen, um den steigenden Frequenzbedarf für Hörfunk erfüllen zu können. Ende der vierziger Jahre wurde der Ultrakurzwellenbereich (UKW) eingeführt. Die für den terrestrischen Hörfunk relevanten Frequenzbereiche sind aus nachfolgender Tabelle ersichtlich.

Tabelle 14.1 Frequenzbereiche für den terrestrischen Hörfunk

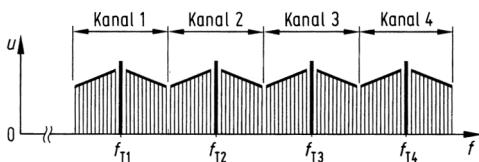
Bezeichnungen	Bereiche
Langwellen (LW)	148,5 kHz bis 1283,5 kHz
Mittelwellen (MW)	526,5 kHz bis 1606,5 kHz
Kurzwellen (KW) (11-m-Band bis 120-m-Band)	2,3 MHz bis 26,1 MHz
Ultrakurzwellen (UKW)	87,5 MHz bis 108,0 MHz
L-Band	1452,0 MHz bis 1467,5 MHz

14.1.2 Analoger Hörfunk

Der UKW-Bereich ist der wichtigste Frequenzbereich für die analoge Hörfunkverbreitung. Dies lässt sich aus den beim Hörfunk verwendeten Modulationsverfahren erklären. Während es sich bei LW, MK und KW um Amplitudenmodulation (AM) handelt, wird bei UKW die Frequenzmodulation (FM) genutzt. In beiden Fällen sind die Bereiche in Kanäle aufgeteilt. Deren Zahl hängt von der größten zu übertragenden Frequenz des niederfrequenten Modulationssignals, also dem zu übertragenden Audiosignal ab. Bei AM-Hörfunk ist dies auf 4,5 kHz festgelegt worden, was bei der üblichen Zweiseitenband-AM eine Kanalbandbreite von 9 kHz bedeutet. Der FM-Hörfunk arbeitet dagegen mit 15 kHz als größte Frequenz des NF-Signals. Das führt zu einer Kanalbandbreite von 180 kHz, wenn man von $M = 5$ als typischem Wert für den Modulationsindex ausgeht.

LW, MW, KW	→	Amplitudenmodulation (AM)
		* $f_{NF(max)} = 4,5 \text{ kHz}$
		* $B_{AM} = 9 \text{ kHz}$
UKW	→	Frequenzmodulation
		* $f_{NF(max)} = 15 \text{ kHz}$
		* $B_{FM} = 180 \text{ kHz}$

Das aufgezeigte **Kanalraster** erfordert eine solche Staffelung der Trägerfrequenzen, dass sich die Kanäle nicht überlappen, weil sonst Störungen auftreten (**Bild 14.1**). Die Trägerfrequenzen dürfen deshalb nur im Abstand der Kanalbandbreite auftreten, um die Trennung zwischen den Kanälen sicherzustellen.

**Bild 14.1** Kanalraster

Wegen der Bandbreite des modulierten Hochfrequenzsignals ist die Zahl der Sender in jedem Wellenbereich begrenzt. Nur bei ausreichender Entfernung zwischen zwei Sendern ist es möglich, dass beide störungsfrei auf derselben Frequenz arbeiten. Dabei sind die

Strahlungsleistung und die Strahlungscharakteristik sowie die Antennenhöhe und die Topografie zu berücksichtigen.

-  Zwei Sender können störungsfrei auf derselben Frequenz arbeiten, wenn die Entfernung ausreichend groß ist.

Bedingt durch die Festlegung für die Bandbreite des Audiosignals, ist die FM-Übertragung im UKW-Bereich gegenüber der AM-Übertragung bei LW, MW und KW von höherer Qualität. Dazu kommen auch noch die systembedingten Vorteile der geringeren Anfälligkeit von FM-Signalen gegen Störbeeinflussungen auf dem Übertragungsweg.

-  FM weist gegenüber AM eine größere Störfestigkeit auf.

Unabhängig vom Wellenbereich und Modulationsverfahren ist jedoch die Technik der analogen Hörfunkübertragung in allen Fällen prinzipiell gleich. Es handelt sich um ein typisches Übertragungssystem, bei dem die Sender und Empfänger die für den Hörfunk spezifischen Forderungen erfüllen müssen, wobei die Übertragung durch ungeführte Funkwellen erfolgt.

Dem Sender wird das niederfrequente Modulationssignal vom Studio zugeführt. Er erzeugt damit das modulierte Hochfrequenzsignal, welches über die Sendeantenne abgestrahlt wird.

-  ▪ Sender-Eingangssignal: Niederfrequentes Modulationssignal
▪ Sender-Ausgangssignal: Moduliertes Hochfrequenzsignal

Nach der Übertragung setzt die Empfangsantenne die Feldstärke in die hochfrequente Eingangsspannung für den Empfänger um. Dieser wird mit Hilfe einer geeigneten Abstimmseinrichtung auf die Frequenz des zu empfangenden Senders eingestellt. Für das so selektierte Signal ist nun unterschiedliche Verarbeitung möglich. An letzter Stelle erfolgt stets die Demodulation, also die Wiedergewinnung des Audiosignals mit nachfolgender Verstärkung.

-  **Empfänger** [receiver] selektieren und demodulieren modulierte Hochfrequenzsignale.

Jeder Sender [transmitter] lässt sich primär als Modulator verstehen, bei dem die Quelle für das Trägersignal integriert ist. Das wesentliche Kriterium jedes Senders ist die Trägerleistung P_T [carrier power (P_c)], die am Senderausgang zur Verfügung gestellt wird. Als typische Werte gelten für AM-Sender 500 W bis 1 MW, bei FM-Sendern ist es der Bereich 10 W bis 50 kW. Im Bedarfsfall kann durch angepasste Parallelschaltung von zwei oder mehreren Sendern eine größere Gesamtausgangsleistung erreicht werden.



Trägerleistung analoger Hörfunksender

- AM: 500 W...1 MW
- FM: 10 W...50 kW

Hörfunksender weisen stets bestimmte funktionelle Strukturen auf. So kann zum Beispiel Endstufenmodulation oder Vorstufenmodulation genutzt werden. Bei der Endstufenmodulation wird das in einer meist als Steuersender bezeichneten Signalquelle erzeugte Trägerfrequenzsignal bis zur Modulationsstufe getrennt vom niederfrequenten Modulationssignal verstärkt. Die Modulationsstufe bewirkt dann den gewünschten Modulationsvorgang, wobei die vorgesehene Ausgangsleistung erreicht wird (**Bild 14.2**). Dieses Konzept ist typisch für AM-Sender.

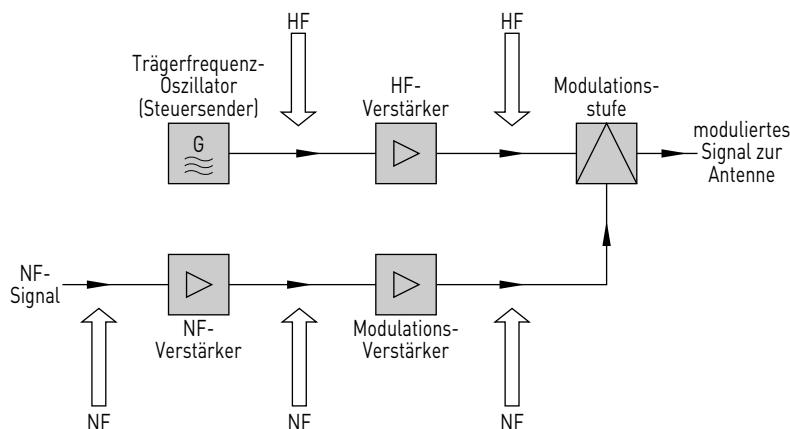


Bild 14.2 Endstufenmodulation



Bei **Endstufenmodulation** erfolgt der Modulationsvorgang in der letzten Stufe des Senders. Modulationssignal und Trägersignal werden bis zur Modulationsstufe getrennt geführt und verstärkt.

Der Modulationsvorgang kann aber auch in den ersten Stufen des Senders erfolgen, also im Kleinleistungsbereich. Es muss bei dieser Vorstufenmodulation dann allerdings das modulierte Signal im Rahmen seiner Bandbreite linear verstärkt werden (**Bild 14.3**). Dies ist für AM-Sender wegen der unvermeidbaren Nichtlinearitäten unzweckmäßig, stellt dagegen für FM-Sender eine sinnvolle Lösung dar, weil unterschiedliche Amplituden die Information nicht beeinflussen. Es ist außerdem schaltungstechnisch wesentlich einfacher, die Frequenzmodulation im Kleinleistungsbereich durchzuführen.



Bei **Vorstufenmodulation** erfolgt der Modulationsvorgang in der ersten Stufe des Senders. Danach ist die lineare Verstärkung des modulierten Signals erforderlich.

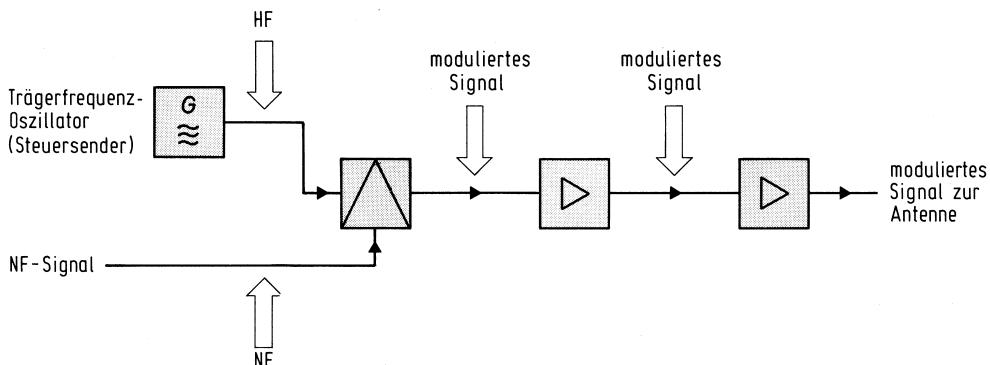


Bild 14.3 Vorstufenmodulation

Damit ein Sender im festgelegten Kanalraster bleibt, muss die Sendefrequenz mit hoher Genauigkeit eingehalten werden. Aus diesem Grund ist eine große Frequenzkonstanz des Steuersenders erforderlich. Dafür gibt es verschiedene Möglichkeiten. Der typische Fall sind temperaturstabilisierte Quarz-Oszillatoren. Aufwendiger, jedoch genauer, arbeiten Frequenzstandards, welche die Atomresonanzen von Rubidium oder Cäsium nutzen. Eine weitere Möglichkeit ist der Bezug auf Normalfrequenzen, die von bestimmten Sendern mit entsprechender Konstanz abgestrahlt werden, meistens kombiniert mit Zeit- und Datumsignalen.



Frequenzkonstanz durch:

- Quarz-Oszillator
- Frequenzstandard
- Normalfrequenz

Wenn die Sendefrequenz nicht zu groß ist, kann sie unmittelbar vom Steuersender erzeugt werden. Bei größeren Werten bietet sich das Konzept der **Frequenzvervielfachung** an. Dabei wird die Sendefrequenz durch Verdopplung, Verdreifachung oder Vervierfachung einer kleinen Frequenz gewonnen. Diese Vervielfachung ist auf einfache Weise mit Schwingkreisen realisierbar, die als Außenwiderstand von Verstärkern geschaltet und auf eine Oberschwingung der zugeführten Grundfrequenz abgestimmt sind (**Bild 14.4**).

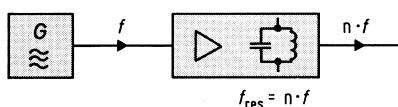
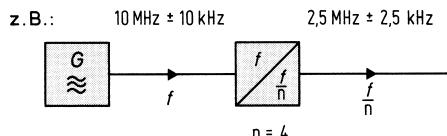


Bild 14.4 Frequenzvervielfachung

Bei Frequenzvervielfachung ist zu beachten, dass sich schaltungsbedingte Schwankungen der Grundfrequenz beim Ausgangssignal entsprechend stärker bemerkbar machen. Diese Problematik ist nicht gegeben, wenn die Sendefrequenz so klein ist, dass sie von einer zweifach, dreifach oder vierfach größeren Grundfrequenz durch **Frequenzteilung** abgeleitet werden kann. Dies führt sogar zu einer noch größeren Konstanz der so gewonnenen Sendefrequenz (**Bild 14.5**).

**Bild 14.5** Frequenzteilung

Abhängig von der vorgesehenen hochfrequenten Ausgangsleistung eines Senders muss dieser eine entsprechende Stromversorgungseinrichtung besitzen. Bei größeren Werten ist dafür der Anschluss an das Mittelspannungsnetz (6 kV, 10 kV, 15 kV) üblich. Jeder Sender arbeitet nur mit einem bestimmten Wirkungsgrad η_{Sender} . Es gilt:

$$\eta_{\text{Sender}} = \frac{P_{\text{RF}}}{P_{\text{el}}} \quad (14.2)$$

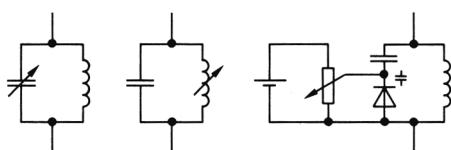
Die aufgenommene elektrische Leistung P_{el} ist deshalb stets größer als die Ausgangsleistung P_{RF} . Wirkungsgrade von Sendern liegen in der Praxis im Bereich 40...80 %. Der nicht in hochfrequente Energie umgesetzte Anteil tritt als Wärme auf, die abgeführt werden muss. Im einfachsten Fall ist dies durch Gebläse möglich, was Luftkühlung bedeutet. Bei Sendern großer Ausgangsleistung ist Flüssigkeitskühlung mit destilliertem Wasser als Kühlmittel üblich. Als Funktionsarten sind Verdampfungskühlung und Siedekühlung unterscheidbar. Im Falle der Verdampfungskühlung handelt es sich um ein offenes System, bei dem das Kühlwasser verdampft und die Wärmeabfuhr durch dessen Kondensation zu Wasser erfolgt. Siedekühlung arbeitet mit geschlossenen Systemen, in denen das Kühlmittel bis zum Siedepunkt erhitzt wird. Die Reduzierung der Temperatur erfolgt dann durch einen Wärmetauscher. Dieses Konzept entspricht dem, was auch für die Kühlung von Automotoren zum Einsatz kommt.

Beim Hörfunk sollen bekanntlich mit wenigen Sendern möglichst viele Empfänger erreicht werden. Die erste Aufgabe jedes Empfängers besteht darin, aus dem von der Empfangsantenne zugeführten hochfrequenten Signal, die des gewünschten Senders zu selektieren. Dafür gilt die Bezeichnung Abstimmung [tuning]. Es wird dabei also nur ein definierter Teil des Empfänger-Eingangssignals verwendet.



Abstimmung [tuning] = Einstellung des Empfängers auf die Frequenz des gewünschten Senders

Für die Realisierung der aufgezeigten Selektion bieten sich Parallel-Resonanzkreise mit variablen Komponenten an. Die Einstellbarkeit auf verschiedene Frequenzen können wir durch veränderliche Kondensatoren oder Spulen erreichen, ebenso durch den Einsatz von Kapazitätsdiode. Es sind auch elektronische Kapazitäten oder elektronische Induktivitäten möglich (**Bild 14.6**).

**Bild 14.6** Resonanzkreis als Abstimmeinrichtung

Nach der Abstimmeinrichtung ist nur noch das hochfrequente Signal des gewünschten Senders vorhanden. Die Rückgewinnung des ursprünglichen Audiosignals erfolgt durch Demodulation und anschließender elektroakustischer Wandlung. Es liegt somit ein gerader Weg für die Signalverarbeitung von der Antenne bis zum Lautsprecher/Hörer vor. Es gilt als Funktionsfolge:

- Abstimmung
- Demodulation
- Wandlung

Nach diesem Konzept arbeitende Empfänger heißen deshalb **Geradeausempfänger**, wobei zwischen den Stufen ggf. eingeschaltete Verstärker das Funktionsprinzip nicht ändern (**Bild 14.7**).

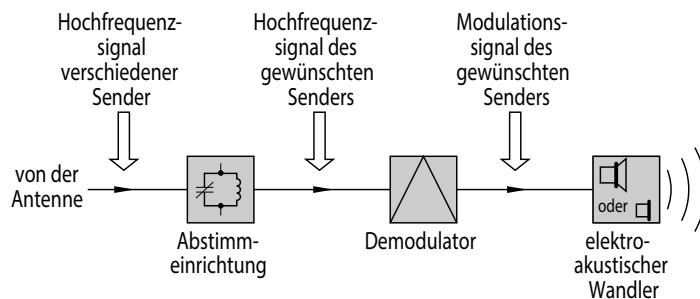


Bild 14.7 Geradeaus-empfänger

Da jeder Resonanzkreis durch die nachgeschaltete Stufe gedämpft wird, kann durch Rückkopplung der Resonanzkreis entdämpft werden, so dass sich eine höhere Güte ergibt und damit auch eine größere Spannung für den Demodulator. Dieses Konzept wird als **Audion** bezeichnet. Die Einstellung der Rückkopplung ist allerdings problematisch, weil bei zu starker Rückkopplung Selbsterregung auftritt. Dadurch würde der Empfänger zum Störsender.



Beim Audion wird durch Rückkopplung der Resonanzkreis entdämpft und damit die Empfindlichkeit gesteigert.

Eine Lösung dieser Problematik stellt die Umsetzung jeder Empfangsfrequenz auf eine möglichst kleine konstante Frequenz dar. Dies führt um Konzept des Überlagerungsempfängers, auch Superheterodynempfänger oder kurz nur Super genannt. Mit Hilfe eines Oszillators und einer Mischstufe wird dabei die Empfangsfrequenz in eine konstante Zwischenfrequenz (ZF) [intermediate frequency (IF)] umgesetzt (**Bild 14.8**).



Beim **Überlagerungsempfänger** (Super) wird jede Empfangsfrequenz in eine konstante Zwischenfrequenz (ZF) [intermediate frequency (IF)] umgesetzt.

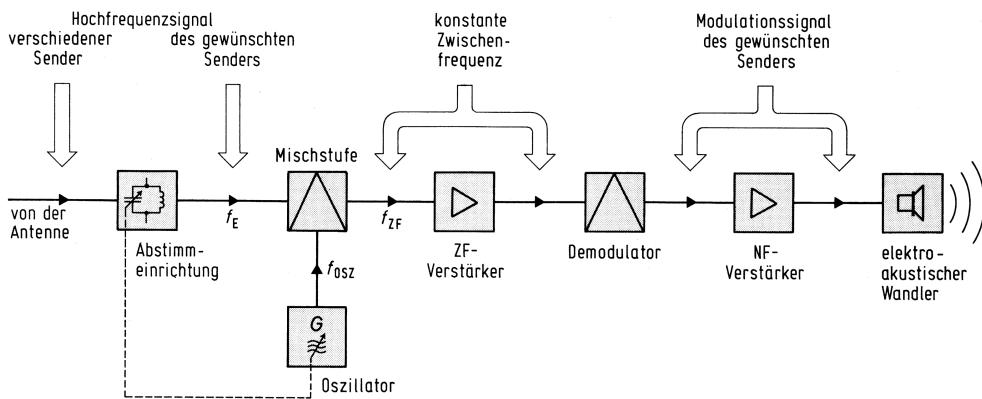


Bild 14.8 Überlagerungsempfänger

Bei jeder Änderung der Empfangsfrequenz wird dafür gesorgt, dass sich auch die Oszillatorkennfrequenz so verändert, damit stets die konstante Zwischenfrequenz am Ausgang auftritt. Dafür ist ein Gleichlauf zwischen Abstimmeinrichtung und Oszillator erforderlich.



Beim Super ist Gleichlauf zwischen Abstimmeinrichtung und Oszillator erforderlich.

Die Zwischenfrequenz kann nun in fest abgestimmten Verstärkern auf den erforderlichen Pegel gebracht werden, welcher für die nachfolgende Demodulation und elektroakustische Wandlung benötigt wird. Ein Überlagerungsempfänger weist gegenüber einem Geradeausempfänger Mischstufe, Oszillator und ZF-Verstärker als zusätzliche Funktionsseinheiten auf.

Bei Überlagerungsempfängern wird bis auf Ausnahmen mit Abwärtsmischung gearbeitet. Die Oszillatorkennfrequenz f_{OSZ} liegt dabei um die Zwischenfrequenz f_{ZF} oberhalb der Empfangsfrequenz f_E . Es gelten in den AM-Bereichen (LW, MK, KW) 450...470 kHz und im FM-Bereich (UKW) 10,7 MHz als Standard für die Zwischenfrequenz (**Bild 14.9**).

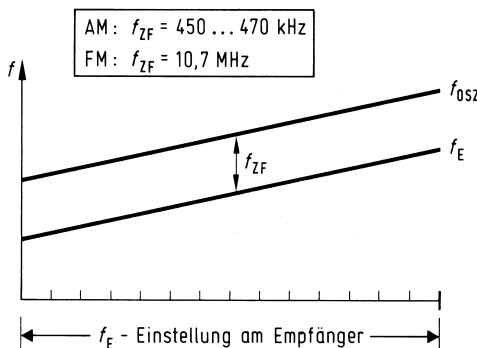


Bild 14.9 Zwischenfrequenz



Beispiel:

Wird bei einem MW-Super mit einer ZF von 460 kHz gearbeitet, dann muss die Oszillatorfrequenz jeweils um 460 kHz über der Empfangsfrequenz liegen. Daraus folgt:

$$f_{\text{OSZ(min)}} = f_{\text{MW(min)}} + f_{\text{ZF}} = 526,5 \text{ kHz} + 460 \text{ kHz} = 986,5 \text{ kHz}$$

$$f_{\text{OSZ(max)}} = f_{\text{MW(max)}} + f_{\text{ZF}} = 1606,5 \text{ kHz} + 460 \text{ kHz} = 2066,5 \text{ kHz}$$

Der Einstellbereich des Oszillators liegt somit zwischen 986,5 kHz und 2066,5 kHz.

Durch das Überlagerungsverfahren ergibt sich neben den Vorteilen auch eine Problemstellung. Gelangt nämlich das Signal eines Senders an die Mischstufe, das genau um die ZF größer als die Oszillatorfrequenz ist, dann erfolgt ebenso die Umsetzung auf die Zwischenfrequenz, wie beim normalen Empfang. Für jede Empfangsfrequenz gibt es somit eine weitere Frequenz, die ebenfalls empfangen werden könnte. Sie wird als **Spiegelfrequenz** [image frequency] bezeichnet, weil sie genau um die ZF oberhalb der Oszillatorfrequenz liegt. Bezogen auf die jeweilige Empfangsfrequenz weisen die Spiegelfrequenzen den doppelten ZF-Abstand auf (**Bild 14.10**).

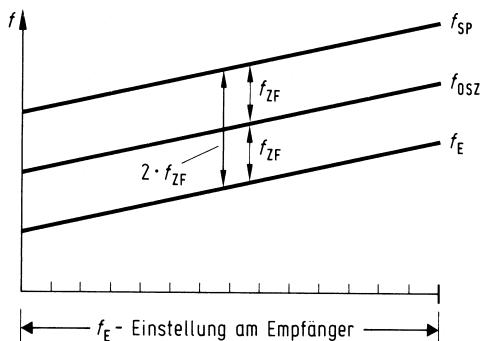


Bild 14.10 Spiegelfrequenz

Der Empfang von Spiegelfrequenzen ist verständlicherweise unerwünscht, weshalb der als Spiegelfrequenzfestigkeit bezeichnete Grad der Unterdrückung der Spiegelfrequenz eine wichtige Spezifikation für jeden Empfänger darstellt.



Spiegelfrequenzfestigkeit = Grad der Unempfindlichkeit eines Empfängers gegen den Empfang von Spiegelfrequenzen

Spiegelfrequenzfestigkeit kann durch entsprechende Selektion der Abstimmeinrichtung erreicht werden. Eine elegantere Lösung stellt jedoch die zweifache Anwendung des Überlagerungsprinzips dar. Dabei wird im ersten Schritt eine ZF so weit über den Empfangsfrequenzen erzeugt, dass in diesem Spiegelfrequenzbereich kein Signal empfangbar ist. Durch die zweite Überlagerung erfolgt danach die Umsetzung in die übliche ZF-Lage, wobei Signale von Sendern am Empfängereingang sich nicht mehr auswirken können.

Das aufgezeigte Konzept wird als Doppel-Super bezeichnet (Bild 14.11). Es ist allerdings auch anwendbar, wenn sehr große Frequenzen empfangen werden sollen und die übliche ZF aus schaltungstechnischen Gründen nicht in einem Schritt erreichbar ist.

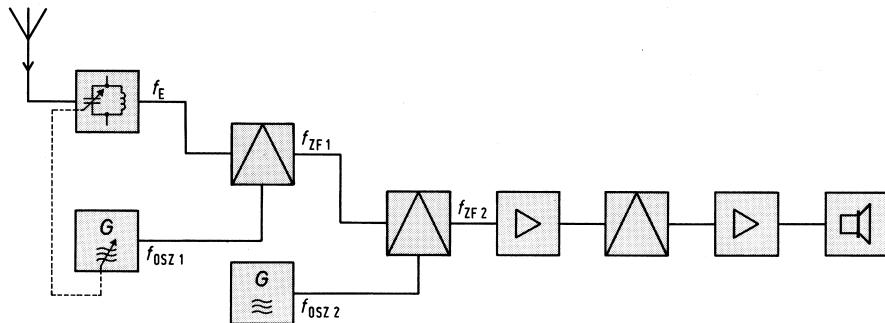


Bild 14.11 Doppel-Super



Doppel-Super = Empfänger mit zweifacher Anwendung des Überlagerungsprinzips

Das Audiosignal nach der Demodulation ist unmittelbar von der Feldstärke des jeweiligen Senders am Empfangsort abhängig. Da die Werte im Regelfall für jeden Sender unterschiedlich sind, tritt bei jedem Senderwechsel unterschiedliche Lautstärke auf. Dieser Nachteil ist durch eine Regelschaltung behebbar. Dazu wird eine vom Eingangssignal abgeleitete Regelspannung gewonnen. Ein Beispiel ist der Gleichspannungsanteil am Demodulator. Mit Hilfe dieser Regelspannung erfolgt die Beeinflussung der Verstärkung vor und/oder nach dem Demodulator. Die Regelung der Verstärkung im NF-Teil des Empfängers bezeichnen wir als Vorwärtsregelung, während es sich um Rückwärtsregelung handelt, wenn es die Hochfrequenz- und Zwischenfrequenzstufen betrifft (Bild 14.12).

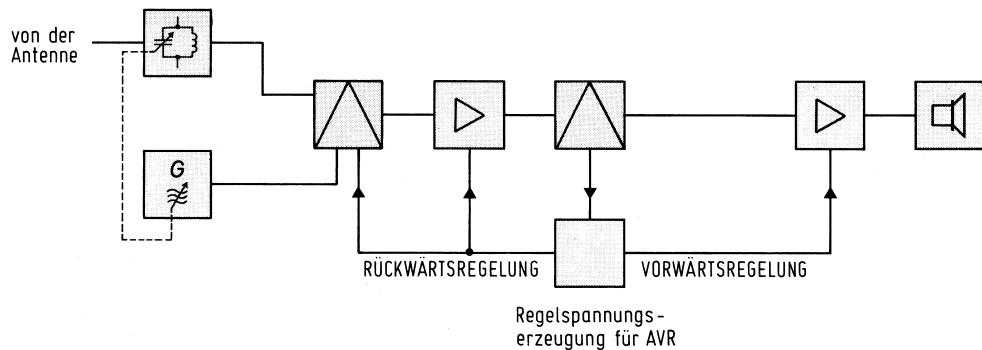


Bild 14.12 Vorwärts- und Rückwärtsregelung



Vorwärtsregelung = Regelung nach dem Demodulator

Rückwärtsregelung = Regelung vor dem Demodulator

Durch Vorwärtsregelung und/oder Rückwärtsregelung ist es möglich, das niederfrequente Ausgangssignal unabhängig vom jeweiligen hochfrequenten Eingangssignal in einem weiteren Rahmen konstant zu halten. Für dieses bei AM und FM bewährte Verfahren gilt die Bezeichnung automatische Verstärkungsregelung (AVR) [automatic gain control (AGC)] oder auch automatische Lautstärkeregelung (ALR) [automatic volume control (AVC)].

Ein wesentliches Kriterium für jeden Empfänger ist die kleinste Eingangsspannung, welche für einen einwandfreien Empfang benötigt wird. Dieser Wert wird als Empfindlichkeit [sensitivity] bezeichnet und ist stets auf einen bestimmten Rauschabstand bezogen.



Empfindlichkeit [sensitivity] = Wert der Empfängereingangsspannung, die für ein Ausgangssignal mit vorgegebenem Rauschabstand mindestens erforderlich ist



Beispiel:

Die Angabe der Empfindlichkeit für einen Empfänger von $1,5 \mu\text{V}$ für 26 dB bedeutet, dass ein hochfrequentes Eingangssignal von mindestens $1,5 \mu\text{V}$ erforderlich ist, damit das Audiosignal nach dem Demodulator einen Rauschabstand von 26 dB aufweist.

Da bei UKW-Empfängern wegen des Empfangsbereichs $87,5\dots108 \text{ MHz}$ die Oszillatorkreisfrequenz über 100 MHz liegt, ist darauf zu achten, dass sie ausreichend konstant gehalten wird, um Empfangsstörungen zu vermeiden. Es bietet sich deshalb die Verwendung einer automatischen Frequenzregelung (AFR) [automatic frequency control (AFC)] an. Dabei wird die Regelspannung ähnlich wie bei AVR/ALR aus dem Demodulator gewonnen oder eine frequenzstabile Referenzquelle verwendet.



Automatische Frequenzregelung (AFR) [automatic frequency control (AFC)] ermöglicht Konstanz der Oszillatorkreisfrequenz.

Während bei einem AM-Signal der Rauschabstand über die gesamte Bandbreite konstant ist, reduziert sich dieser Wert bei einem FM-Signal mit steigender Modulationsfrequenz. Dies kann kompensiert werden und zwar beim Sender durch Anhebung der Amplitude des Modulationssignals mit zunehmender Frequenz. Dieser Vorgang wird als **Preemphasis** bezeichnet (**Bild 14.13**). Er verbessert den Rauschabstand bei großen Modulationsfrequenzen.

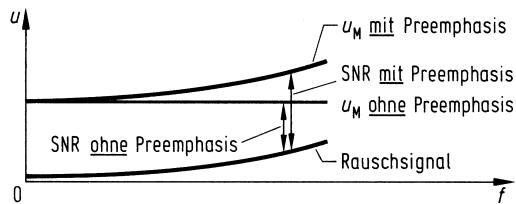


Bild 14.13 Preemphasis

Im Empfänger muss die Preemphasis rückgängig gemacht werden, damit das ursprüngliche Audiosignal wieder zur Verfügung steht. Dies geschieht mit Hilfe einer **Deemphasis-Schaltung**, die eine der Preemphasis spiegelbildliche Absenkung der Amplitude des Modulationssignals bewirkt, was zu einem quasi konstanten Rauschabstand über die gesamte Bandbreite des Modulationssignals führt (**Bild 14.14**).

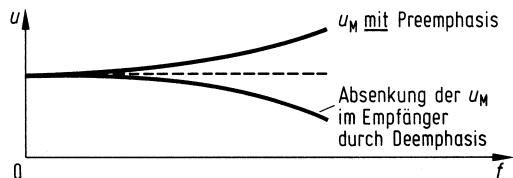


Bild 14.14 Deemphasis

Die klassische Hörfunkübertragung ist einkanalig. Auf diese Weise besteht allerdings keine Möglichkeit, die räumliche Lage der Schallquelle festzustellen, im Gegensatz zum direkten Hörvorgang. Bedingt durch die versetzte Lage der Ohren zueinander, treten für diese nämlich unterschiedlich lange Wege für den Schall auf, wenn sich die Schallquelle nicht genau in der Mitte vor dem Gesicht des Hörers befindet. Dadurch ergibt sich der räumliche Höreindruck (**Bild 14.15**).

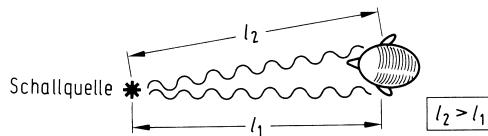


Bild 14.15 Hörvorgang



Der räumliche Höreindruck ist bedingt durch die versetzte Lage der Ohren.

Soll dieser natürliche Effekt auch beim Hörfunk ermöglicht werden, dann muss von der einkanaligen Übertragung (Monofonie) auf zweikanalige Übertragung (Stereofonie) übergegangen werden. Dazu wird die zu übertragende Schallinformation mit zwei Mikrofonen aufgenommen, die mindestens im Abstand der Ohren angeordnet sind. Es ergeben sich zwei Audiosignale, die beide vom Sender übertragen werden. Für die Wiedergabe sind zwei elektroakustische Wandler erforderlich. Sie weisen ebenfalls einen entsprechenden Abstand zueinander auf, damit sich der gewünschte räumliche Höreindruck ergibt (**Bild 14.16**).

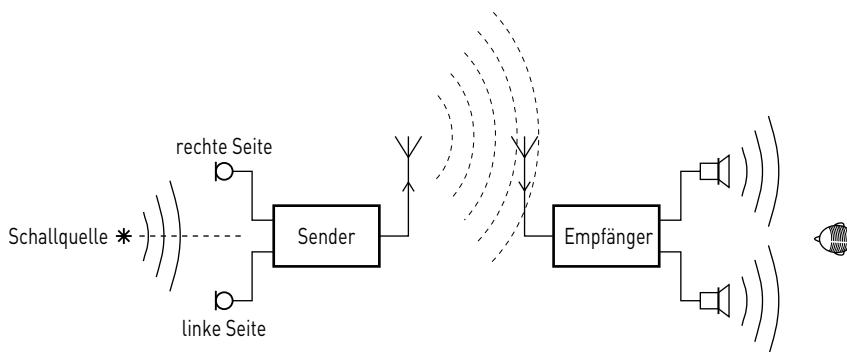


Bild 14.16 Stereofone Übertragung



Monofonie (→ Mono) = Einkanalige Übertragung für das Gesamtsignal

Stereofonie (→ Stereo) = Zweikanalige Übertragung für rechte und linke Seite

Der Übergang von Mono(fonie) auf Stereo(fonie) stellt beim Hörfunk aber auch die Forderung nach der **Kompatibilität**. Dies bedeutet, dass Monoempfänger auch bei Stereoübertragung weiter verwendbar sind. Andererseits müssen aber auch Stereoempfänger bei Monoübertragung funktionieren, wobei dann identische Kanäle auftreten.



Mono- und Stereoübertragungen sollen kompatibel sein.

Um eine ausreichende Qualität des Audiosignals zu gewährleisten, erfolgt die hochfrequente Stereoübertragung über FM-Sender im UKW-Bereich.

Um der Forderung nach Kompatibilität zu entsprechen, ist es nicht ausreichend, das Signal des linken Stereokanals L und des rechten Stereokanals R ohne gegenseitige Beeinflussung zu übertragen, weil dem Monoempfänger die gesamte Information (also die Summe aus beiden Kanälen) zur Verfügung stehen muss.



L = Signal des linken Stereokanals

R = Signal des rechten Stereokanals

Die Problemlösung wird durch Verwendung von Frequenzmultiplex erreicht. Ausgangspunkt für das Stereo-Multiplexsignal ist die Bildung des Summensignals $L + R$ und des Differenzsignals $L - R$.



Summensignal: $L + R$

Differenzsignal: $L - R$

Während L + R in der natürlichen Lage verbleibt und damit den Monoempfang sicherstellt, wird das Differenzsignal durch Zweiseitenband-AM mit unterdrücktem Träger von 38 kHz oberhalb des Summensignals angeordnet. Dadurch ergibt sich für das Stereo-Multiplexsignal der Frequenzbereich 50 Hz bis 53 kHz. Das bei 19 kHz eingefügte Signal wird als **Pilot** bezeichnet und im Empfänger zur Rückgewinnung von L und R benötigt (**Bild 14.17**).

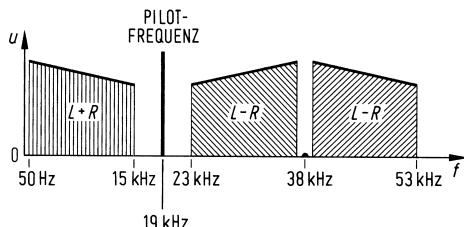


Bild 14.17 Stereo-Multiplexsignal

Das Stereo-Multiplexsignal ist also eine geschickte Verschachtelung von L und R. Die Aufbereitung erfolgt schaltungstechnisch im **Stereo-Coder**, dessen Ausgangssignal als Modulationssignal für den FM-Sender dient (**Bild 14.18**).

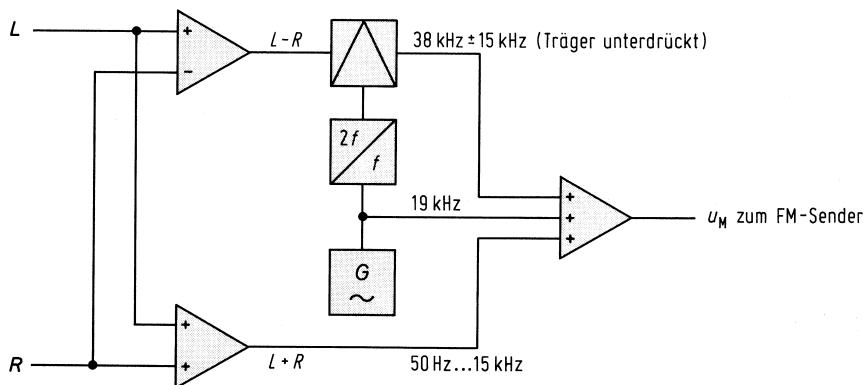


Bild 14.18 Stereo-Coder (Übersichtsplan)

Wird bei Stereoübertragung ein Monoempfänger verwendet, dann erfolgt keine Auswertung der über dem Summensignal liegenden Anteile des Multiplexsignals.



Monoempfänger werten nur das Summensignal L + R aus.

Bei Stereoempfängern wird L und R im **Stereo-Decoder** zurückgewonnen. Er ist dem Demodulator unmittelbar nachgeschaltet. Es erfolgt hier zuerst mit Hilfe von Bandpassen und Tiefpassen die Aufteilung des Stereo-Multiplexsignals in seine ursprünglichen Anteile. Die Verdoppelung der Pilotfrequenz 19 kHz ergibt dann das Trägersignal 38 kHz für die Demodulation des Differenzsignals L - R, während das Summensignal L + R unmittelbar durch einen Tiefpass aus dem Gesamt signal ausgekoppelt wird. Die Signale L und R lassen

sich nachfolgend aus dem Summen- und Differenzsignal durch vorzeichenrichtige Zusammenfassung rekonstruieren (**Bild 14.19**).

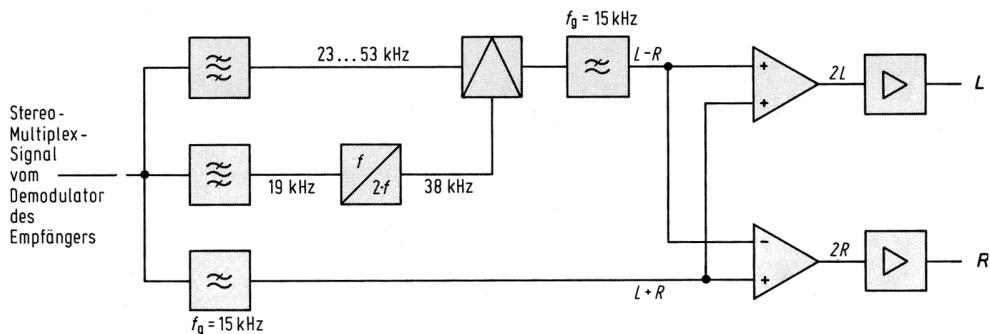


Bild 14.19 Stereo-Decoder (Übersichtsplan)

Aus dem Übersichtsschaltplan für den Stereo-Decoder ist ersichtlich, warum die Trägerunterdrückung bei der Zweiseitenband-AM und die Wahl der Pilotfrequenz sehr zweckmäßig sind. Da im Bereich 15 kHz bis 23 kHz des Stereo-Multiplexsignals keine Informationen enthalten sind, kann die Pilotfrequenz mit einem Bandpass ausgesiebt werden, der keine besondere Flankensteilheit benötigt. Bei Übertragung des Trägersignals 38 kHz wäre dagegen ein sehr steilflankiger Bandpass erforderlich, da die kleinste Modulationsfrequenz bei 50 Hz liegt.

Seit den siebziger Jahren wurde das Stereo-Multiplexsignal durch ARI ergänzt. Diese Abkürzung bedeutet **Autofahrer-Rundfunk-Information** und ermöglichte durch die Übertragung von drei Kennungen den automatischen Empfang von Verkehrsfunk. Inzwischen wurde ARI durch das Radio-Daten-System [radio data system (RDS)] abgelöst. Dieses basiert auf dem europäischen Standard EN 762 106 und kann wegen seiner Brutto bitrate von 1,1875 kbit/s erheblich mehr digitale Zusatzinformationen übertragen als ARI. Die Signalübertragung erfolgt durch Phasenumtastung (PSK) eines Hilfsträgers von 1,1875 kHz. Da hier bei jedem Wechsel zwischen den Zuständen „0“ und „1“ ein Phasenwechsel von 180° auftritt, gilt auch die Bezeichnung Bi-Phasen-Codierung (**Bild 14.20**).

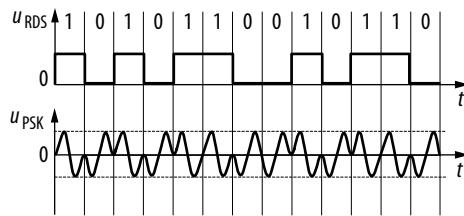


Bild 14.20 Bi-Phasen-Codierung



Radio-Daten-System (RDS) = Übertragung digitaler Zusatzinformationen beim FM-Signal mit einer Brutto bitrate von 1,1875 kbit/s.

Die zu übertragenden RDS-Daten bereitet der **RDS-Coder** auf der Sendeseite als RDS-Signal auf. Zuerst erfolgt dabei die Bildung des PSK-Signals. Dieses wird als Modulationsignal für Zweiseitenband-AM mit unterdrücktem Träger (57 kHz) verwendet. Das in dieser Art modulierte Signal wird dann dem bisherigen FM-Signal hinzugefügt (**Bild 14.21**).

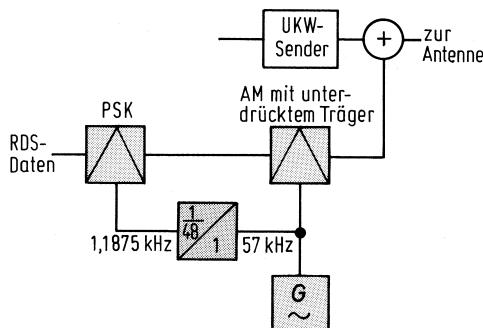


Bild 14.21 Gewinnung des RDS-Signals

Der **RDS-Decoder** im Empfänger macht die Signalaufbereitung für das RDS-Signal schrittweise wieder rückgängig. Am Ausgang stehen deshalb wieder die ursprünglichen RDS-Daten zur Verfügung.

Im RDS-Standard sind verschiedene Anwendungen festgelegt. Die Daten der damit verbundenen Informationen werden in 16 Gruppen aufgeteilt und zyklisch gestaffelt übertragen.

Die Häufigkeit der Übertragung einer Gruppe hängt von deren festgelegter Wichtigkeit ab. Jede Gruppe besteht aus vier Blöcken von 26 bit. Davon bilden 16 bit das Informationswort, während es sich bei den restlichen 10 bit um das Kontrollwort (Prüfwort) handelt (**Bild 14.22**). Es ist zu erkennen, dass bei RDS ein aufwendiger Fehlerschutz durch Fehlererkennung und Fehlerkorrektur besteht.

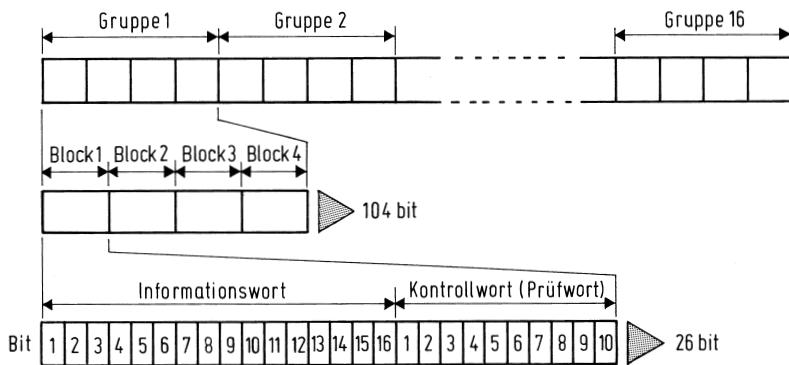


Bild 14.22 Struktur der RDS-Daten

Zu den wichtigsten RDS-Anwendungen zählen die Anzeige des Programmnamens (PS), die Listen der alternativen Frequenzen (AF), die Verkehrsfunkkennung (TP), die Kennung für Verkehrsfunkdurchsagen (TA) und der Traffic Message Channel (TMC).

Durch PS [programme service name] ist es möglich, den Programmnamen auf einer bis zu sechzehnstelligen Anzeige durch alphanumerische Zeichen darzustellen.

PS [programme service name] = Anzeige des Programmnamens mit bis zu 16 alphanumerischen Zeichen

Die Anwendung AF [alternative frequencies] bietet die Information, auf welcher Frequenz bzw. welchen Frequenzen dasselbe Programm auch noch gesendet wird. Es erfolgt damit die automatische Einstellung des Empfängers auf die für den Empfang des jeweiligen Programms beste Frequenz. Das ist ein großer Vorteil für den mobilen Empfang.

AF [alternative frequencies] = Liste der Frequenzen, auf denen das eingestellte Programm auch noch abgestrahlt wird und automatische Umschaltung auf die für den jeweiligen Empfangsort beste Frequenz.

Durch TP [traffic programme identification] wird angezeigt, dass ein Sender Verkehrsfunk ausstrahlt, während TA [traffic announcement identification] eine laufende Verkehrsfundurchsage im Programm kennzeichnet.

TP [traffic programme identification] → Sender strahlt Verkehrsfunk aus.

TA [traffic announcement identification] → Verkehrsfundurchsage läuft.

Eine optimale Weiterentwicklung des Verkehrsfunks stellt TMC [traffic message channel] dar, weil hier die Durchsagen unabhängig vom Programm zur Verfügung stehen.

Die Verkehrsfunkmeldungen weisen bei TMC eine einheitliche Struktur auf, bestehen also aus einer Menge von Standardtexten. Es brauchen nur noch die variablen Daten (wie Staulänge, Autobahnnummer, betroffene Anschlussstellen der Autobahn, ...) übertragen zu werden, um diese Textteile entsprechend aufzufüllen. Die Ausgabe der Meldung erfolgt mit Hilfe eines Sprachgenerators im Empfänger, der die Standardtexte aus einem Speicher entnimmt und mit den aktuell übertragenen Angaben entsprechend ergänzt.

TMC [traffic message channel] = Konzept für Verkehrsfunkmeldungen, bei dem einheitlich strukturierte Textteile im Empfänger gespeichert sind, die variablen Angaben als Daten übertragen werden und die Ausgabe mit Hilfe eines Sprachgenerators erfolgt.

Auf diese Weise ist es sogar möglich, die Ausgabe der Informationen in unterschiedlichen Sprachen durchzuführen. Außerdem ist auch der selektive Zugriff auf Verkehrsfunkmeldungen (z. B. für bestimmte Autobahnen) möglich.

Bei TMC kann die Ausgabe in verschiedenen Sprachen realisiert werden und/ oder der selektive Zugriff auf einzelne Meldungen erfolgen.

In Verbindung mit einem Navigationsgerät ist es mit Hilfe von TMC auch möglich, bei Staus oder sonstigen Verkehrsbehinderungen Ausweichrouten als Umleitungen zu erfahren.

Als eine weitere RDS-Anwendung sei noch EON [enhanced other networks] erwähnt. Durch diese wird automatisch auf ein anderes Programm der Kette umgeschaltet, sobald dort Verkehrsfunkmeldungen ausgestrahlt werden. Danach erfolgt wieder die Rückschaltung auf das ursprüngliche Programm.



EON [enhanced other networks] = Automatische Umschaltung auf ein anderes Programm der Kette für die Dauer einer Verkehrsfunkmeldung

Abhängig vom Empfänger kann EON unter Umständen auch für die automatische Umschaltung auf andere Anwendungen [application] konfiguriert werden.

14.1.3 Digitaler Hörfunk

Wie in anderen Bereichen der Kommunikationstechnik soll auch beim Hörfunk der Übergang von analog zu digital erfolgen. Anfang der 90er-Jahre wurde der Aufbau des ersten digitalen Hörfunksystems begonnen. Es handelt sich um DAB [digital audio broadcasting], was unter dem Begriff „Digital Radio“ vermarktet wird.

Das DAB-Konzept basiert auf einem Quellencodierungsverfahren, mit dem die Bitrate des Eingangssignals bis über 80 Prozent reduziert wird. Die Übertragung erfolgt als Multiplexsignal in etwa 1,5 MHz breiten Frequenzblöcken durch ein Mehr-Träger-Verfahren.

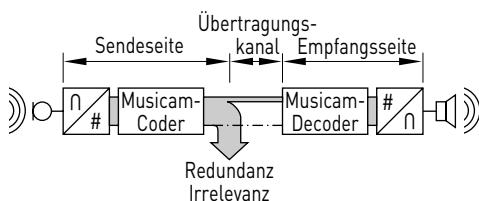


DAB [digital audio broadcasting] (Digital Radio)

Konzept:

- Quellencodierung
- Multiplexsignal
- Mehr-Träger-Verfahren

Die bei DAB verwendete Quellencodierung ist gemäß ISO/IEC 11172-3 „Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media up to 1,5 Mbit/s“ international als MPEG-1-Layer 2 standardisiert und wird üblicherweise als MUSICAM [masking pattern adapted universal subband integrated coding and multiplexing] bezeichnet. Es handelt sich um ein Teilbandverfahren, bei dem das gesamte niederfrequente Modulationssignal in 32 Teilbändern mit jeweils 750 Hz Bandbreite aufgeteilt wird. Unter Berücksichtigung der Mithörschwelle und des Verdeckungseffektes findet dann für jedes Teilband die Berechnung eines repräsentativen Mittelwertes statt. Danach erfolgt unter Verwendung eines psychoakustischen Modells deren Codierung in einer Rahmenstruktur. Mit MUSICAM ergibt sich eine Datenreduktion bis über 80 Prozent, was den großen Anteil von Redundanz und Irrelevanz im Signal kennzeichnet. Auf der Sendeseite ist für diese Quellencodierung ein MUSICAM-Coder erforderlich, auf der Empfangsseite ist es ein MUSICAM-Decoder (**Bild 14.23**).

**Bild 14.23** Quellencodierung mit MUSICAM

Das mit MUSICAM datenreduzierte Audiosignal ermöglicht trotz relativ geringer Bitraten eine der CD vergleichbare Qualität. So sind für ein Stereosignal bereits 192 kbit/s ausreichend. Wegen der Teilbandcodierung ist eine Bitfehlerrate BER bis 10^{-3} ohne hörbare Störeffekte zulässig. Das Signal am Ausgang des MUSICAM-Coders steht nun als quellen codiertes Signal für die weitere Übertragung zur Verfügung.



Bitrate für ein Stereosignal in CD vergleichbarer Qualität: 192 kbit/s

Um die Kapazität der Übertragungskanäle optimal zu nutzen, wird auch bei DAB Multiplexbildung verwendet. In einem DAB-Multiplexsignal, für das auch die Bezeichnung Transport-Multiplex gilt, können gleichzeitig mehrere Hörfunkprogramme und eine variable Zahl sonstiger Dienste als Daten übertragen werden. Der Transport-Multiplex weist eine Bruttobitrate von 2,4 Mbit/s auf. Bedingt durch den üblicherweise bei DAB gewählten Fehlerschutz liegt die Nettobitrate bei 1,5 Mbit/s.



Transport-Multiplex

- Brutto-Bitrate: 2,4 Mbit/s
- Netto-Bitrate: 1,5 Mbit/s (bei typischem Fehlerschutz)

Bei den Datendiensten sind zwei Varianten zu unterscheiden. Die einen werden verkoppelt mit den Programmsignalen übertragen und deshalb als PAD [programme associated data] bezeichnet, während die anderen getrennt im Transport-Multiplex untergebracht sind und die Bezeichnung NPAD [non programme associated data] tragen. Es ergeben sich für die Programme und Dienste parallele Wege mit entsprechenden Bitraten, die durch den Multiplexer zum Transport-Multiplex zusammengefasst werden (**Bild 14.24**).

Bezüglich PAD gilt, dass der Zugriff nur über das dazugehörige Programmsignal möglich ist. Die Bitrate für PAD kann bis 64 kbit/s betragen, sie geht jedoch stets zulasten der Bitrate für das Audiosignal, weil die Kapazität für das einzelne Programm als Gesamtheit von Audio und PAD festgelegt wird. Für NPAD sind im Rahmen der verfügbaren Kapazität beliebige Bitraten möglich.

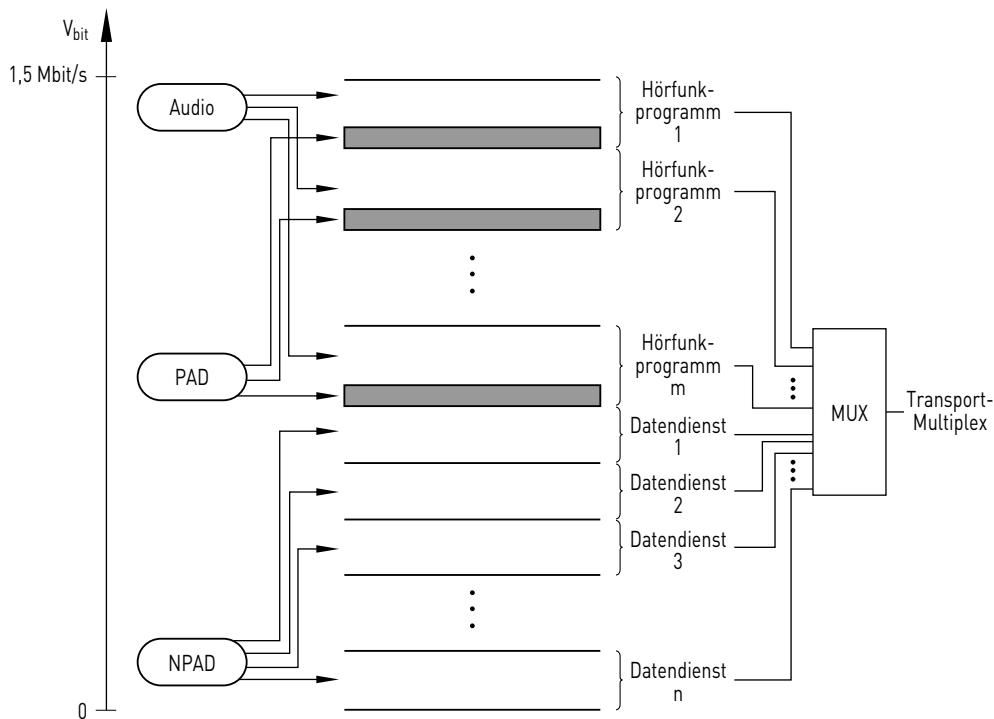


Bild 14.24 Zusammensetzung des Transport-Multiplex



PAD [programme associated data]

werden verkoppelt mit den Programmsignalen übertragen.

Kapazität: max. 64 kbit/s (geht zulasten des Audiosignals)



NPAD [none programme associated data]

werden über separate Kapazitäten im Transport-Multiplex übertragen.

Kapazität: beliebig (im Rahmen der verfügbaren Bitrate)

Bei DAB wird mit einer Rahmenstruktur gearbeitet, wobei SC [synchronisation channel], FIC [fast information channel] und MSC [main service channel] zu unterscheiden sind. Der SC dient der Synchronisation zwischen Sender und Empfänger. Er besteht aus zwei Symbolen, wobei am Anfang stets ein Nullsymbol vorliegt, das zur Erkennung eines neuen Rahmens dient. Durch den FIC wird die Rückgewinnung der Signale für die einzelnen Programme und Dienste im Empfänger sichergestellt. Dafür stehen drei bis acht Symbole zur Verfügung. Es sind beim FIC die Gruppen MCI [multiplex configuration information] und SI [service information] unterscheidbar. Die MCI gibt dem Empfänger alle Informationen über die Zusammensetzung des MSC und alle erforderlichen Parameter, welche für die Decodierung der Dienste erforderlich sind. Bei den SI handelt es sich um Zusatzinforma-

tionen wie Programmname, Programmart, Sprache, Länderkennung, Startzeit, Dauer, usw. Sie dienen unmittelbar zur Selektion der Programme und Dienste im MSC. Dieser Kanal transportiert die eigentlichen Nutzdaten und umfasst 67 bis 72 Symbole (**Bild 14.25**).

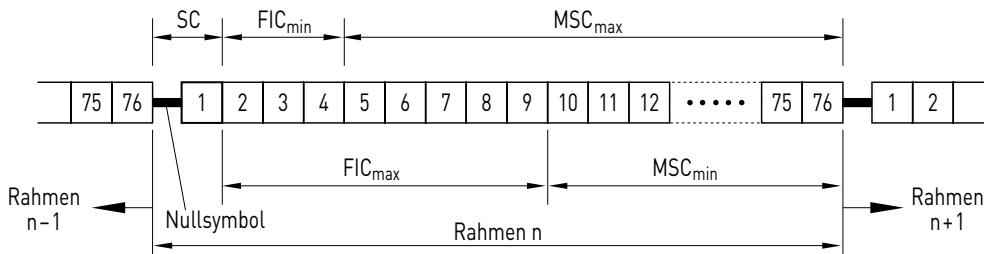


Bild 14.25 DAB-Rahmenstruktur



DAB-Rahmenstruktur

- SC [synchronisation channel]
- FIC [fast information channel]
- MCI [multiplex configuration information]
- SI [service information]
- MSC [main service channel]

Die Struktur des Transport-Multiplexes ergibt sich durch die Zusammenfassung von SC, FIC und MSC im Transport-Multiplexer (Transport-MUX), wobei ein vorgeschalteter MSC-MUX aus den verschiedenen Audiosignalen und Datendienten den MSC aufbaut (**Bild 14.26**).

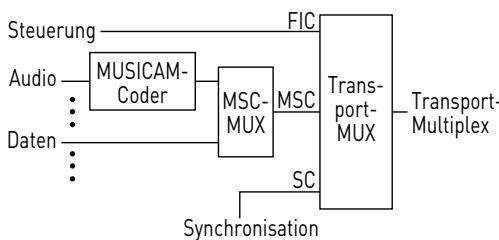


Bild 14.26 Aufbau des Transport-Multiplex

Der Transport-Multiplex ist das DAB-Basisbandsignal für die Modulation. Um die optimale mobile Empfangbarkeit zu ermöglichen, wird DAB in 1,536 MHz breiten Frequenzblöcken mit dem Mehr-Träger-Verfahren OFDM [orthogonal frequency division multiplex] übertragen. Abhängig von dem verwendeten Frequenzbereich liegt die Zahl der Träger zwischen 192 und 1526, wobei mit zunehmender Frequenz die Trägerzahl kleiner wird.

Im Standard EN 300401 ist das Übertragungsverfahren für DAB festgelegt. Das schließt auch eine Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC) ein, so dass es sich bei DAB um ein COFDM-Verfahren handelt. Für die Trägersignale wird vierwertige Differenz-Phasenumtastung

(4-DPSK [four state differential phase shift keying]) verwendet, bei der nur die Übertragung der Unterschiede des Eingangssignals gegenüber dem vorhergehenden Zeittakt erfolgt.



Kennzeichnende Merkmale von DAB

- COFDM
- 1,536 MHz breite Frequenzblöcke
- Trägerzahl: 192...1536
- Trägermodulation: 4-DPSK

Das im Basisband erzeugte COFDM-Signal kann prinzipiell in jede hochfrequente Lage gebracht werden. Für DAB sind folgende Frequenzbereiche für DAB festgelegt:

- 74 MHz bis 230 MHz
- 1452 MHz bis 1467,5 MHz

Beim Bereich 174 MHz bis 230 MHz handelt es sich um das VHF-Band III, welches die Fernsehkanäle 5 bis 12 umfasst. Wegen der Bandbreite der VHF-Kanäle von 7 MHz finden pro Kanal genau vier DAB-Frequenzblöcke Platz. Am Beispiel des Kanals 12 ist dies aus **Bild 14.27** ersichtlich.

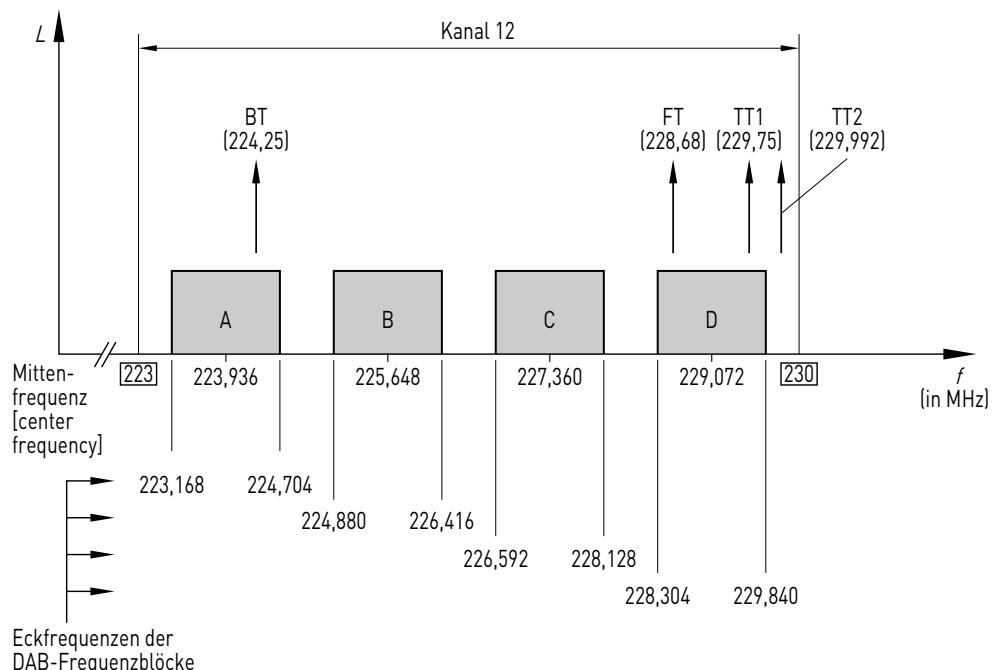


Bild 14.27 DAB-Frequenzblöcke im Kanal 12

Der Bereich 1452 MHz bis 1492 MHz wird als L-Band bezeichnet. Für die terrestrische Ausstrahlung von DAB (T-DAB) sind dabei die Frequenzen bis 1467,5 MHz vorgesehen, was neun DAB-Frequenzblöcke ermöglicht.

Wie bei jedem Übertragungssystem besteht die Aufgabe des Empfängers darin, das ursprüngliche Modulationssignal wiederzugewinnen. Beim DAB-Empfang kann es sich um Audiosignale oder Daten handeln. An erster Stelle steht das Hochfrequenzteil, welches das empfangene Signal meistens über eine Zwischenfrequenz in die Basisbandlage umsetzt. Danach gewinnt der COFDM-Demodulator den Transport-Multiplex zurück und führt in dem Demultiplexer zu.

 Durch den COFDM-Demodulator wird der Transport-Multiplex wiedergewonnen.

Nach der Kanaldecodierung im Viterbi-Decoder, welcher die auf der Sendeseite verwendete Faltungscodierung rückgängig macht, erfolgt die Decodierung der übertragenen Signale. Bei Audiosignalen handelt es sich um den MUSICAM-Decoder, während bei Daten ein entsprechender **Datendecoder** erforderlich ist (**Bild 14.28**).

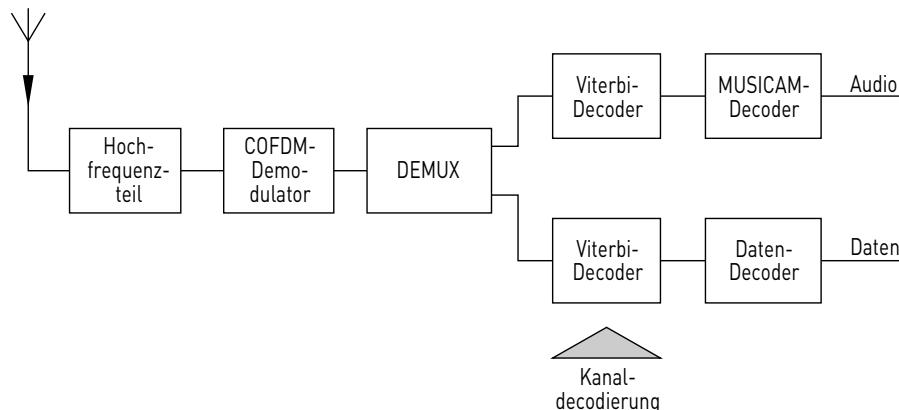


Bild 14.28 Funktionseinheiten des DAB-Empfängers

Bei der bisherigen Quellencodierung für DAB lassen sich bis zu neun Stereoprogramme in einem Frequenzblock unterbringen. Die Zahl reduziert sich entsprechend, wenn Datendienste als PAD oder NPAD übertragen werden sollen. In **Tabelle 14.2** sind einige für DAB spezifizierte Datendienste aufgelistet.

Tabelle 14.2 DAB-Datendienste

Bezeichnung	Bedeutung	Erklärung
TMC	traffic message channel	von RDS übernommenes Verkehrsfunkkonzept mit gespeicherten Standardtexten, Ergänzung durch empfangene variable Daten und Ausgabe durch Sprachgenerator

Tabelle 14.2 DAB-Datendienste (*Fortsetzung*)

Bezeichnung	Bedeutung	Erklärung
DLS	dynamic label service	Übertragung programmbezogener Zusatzinformationen (z. B. Titel, Interpret, ...) als PAD
MOT	multimedia object transfer protocol	Übertragung beliebiger Dateien (Audio, Video, Daten) als multimediale Objekte als Push-Dienste
TPEG	transport protocol experts group	Übertragung multimedialer Verkehrs- und Reiseinformationen
IP over DAB	Internet Protocol over DAB	Übertragung von Inhalten auf IP-Basis (z. B. Videostreams)

Eine Verbesserung der Frequenzökonomie ist bekanntlich stets durch effizientere Verfahren der Quellencodierung erreichbar. Das bei DAB bisher eingesetzte MUSICAM-Verfahren (MPEG-1, Layer 2) erfüllt aus heutiger Sicht diese Forderung nicht mehr. Es wurde deshalb der DAB-Standard um die Audiocodierung von MPEG-4 erweitert, also um AAC+ v2, wobei v2 für zweite Version der Quellencodierung AAC steht. Geht man von gleichem Fehlerschutz aus, dann verdoppelt sich mit AAC+ v2 die Übertragungskapazität im DAB-Frequenzblock gegenüber MUSICAM. Diese modernisierte Form von Digital Radio wird üblicherweise als DAB+ (DABplus) bezeichnet.



DAB+ = DAB + AAC+ v2

Es ist zu beachten, dass wegen der unterschiedlichen Quellencodierung bei DAB und DAB+ zwischen diesen Verfahren Kompatibilität nicht besteht. DAB+-Empfänger sind zwar in der Regel so aufgebaut, dass sie auch DAB empfangen können, jedoch gilt Vergleichbares nicht für die bei den Nutzern vorhandenen DAB-Empfänger. Für DAB+ wird deshalb ein neuer Empfänger benötigt.



DAB-Empfänger sind für DAB+ nicht verwendbar.

Das bei DAB besonders für den mobilen Empfang bewährte Mehr-Träger-Konzept findet auch bei der Digitalisierung der AM-Bereiche (LW, MW, KW) Verwendung. Das hierfür standardisierte Verfahren wird als DRM [digital radio mondiale] bezeichnet. Es basiert auf den typischen Kanalbandbreiten von 9 kHz für LW und MW bzw. 10 kHz für KW.



DRM [digital radio mondiale] = Digital Radio für LW, MW, KW

Das OFDM-Signal arbeitet abhängig vom Übertragungsmodus mit 88 bis 228 Trägersignalen, die im Abstand von 42 Hz bis 107 Hz liegen. Die Modulation der Träger erfolgt mit 16-QAM und 64-QAM.

Bei DRM kann wegen des gewählten Übertragungsverfahrens mit Gleichwellennetzen [single frequency network (SFN)] gearbeitet werden.

Kennzeichnende Merkmale von DRM

- OFDM
- Kanalbandbreite: 9 kHz oder 10 kHz
- Trägerzahl: 88...228
- Trägerabstand: 42 Hz bis 107 Hz
- Trägermodulation: 16-QAM oder 64-QAM

Als Quellencodierung wird AAC eingesetzt, also die Audiocodierung von MPEG-4, allerdings in Verbindung mit der „Spectral Band Replication“ (SBR). Diese Kombination wird auch als HE AAC bezeichnet, wobei HE für „high efficiency“ (d.h. hoch wirksam) steht. Damit lässt sich trotz der geringen Kanalbandbreiten bei Bitraten von 20...24 kbit/s dem analogen FM-Hörfunk subjektiv vergleichbare Audioqualität erreichen.

HE AAC = AAC + SBR

(14.3)

Bei HE AAC wird das zu übertragende Audiosignal innerhalb der Kanalbandbreite durch AAC codiert, während SBR Informationen über die Hüllkurve des ursprünglichen, also uncodierten Audiosignals liefert. Damit kann der Empfänger das decodierte Signal harmonisch um Frequenzanteile erweitern, die oberhalb der Kanalbandbreite liegen, und damit bis 16 kHz als obere Grenzfrequenz erreichen (**Bild 14.29**).

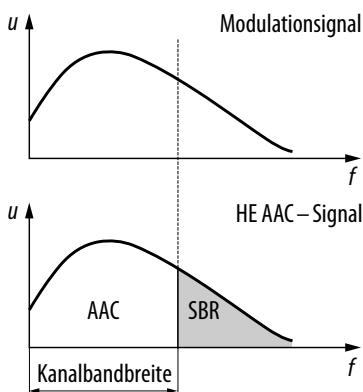


Bild 14.29 Spectral Band Replication

DRM ist ein leistungsfähiges digitales Übertragungssystem für den Hörfunk im Bereich bis 30 MHz. Es zeichnet sich neben guter Audioqualität besonders durch große Störfestigkeit gegen Fading und Mehr-Wege-Empfang aus.



Weitere Merkmale von DRM

- Einsetzbar bis 30 MHz
- Bitrate: 20 kbit/s bis 24 kbit/s
- FM vergleichbare Audioqualität
- Robust gegen Störungen durch Fading und Mehr-Wege-Empfang

DAB, DAB+ und DRM zeigen eindeutig den Vorteil der Mehr-Träger-Verfahren in Verbindung mit effizienter Quellencodierung. Deshalb ist die Nutzung des DRM-Konzepts bis mindestens 120 MHz vorgesehen, um mittelfristig auch den FM-Hörfunk im UKW-Bereich (87,5 MHz bis 108 MHz) durch digitalen Hörfunk ablösen zu können. Diese Erweiterung des Einsatzbereichs wird als DRM+ (gesprochen: DRM plus) bezeichnet, wobei im Standard von dem beim FM-Hörfunk festgelegten Kanalraster von 100 kHz ausgegangen wird.



DRM+ [digital radio mondiale plus] = DRM für den VHF-Bereich

Bei dem OFDM-Signal von DRM+ sind 213 Träger in einem Abstand von 444,4 Hz vorgesehen, für die Modulation wahlweise 16-QAM oder 64-QAM. Durch die Quellencodierung MPEG-4 AAC ist eine Bitrate zwischen 35 kbit/s und 185 kbit/s in Abhängigkeit von der gewünschten Audioqualität möglich. Es können in den Kanälen vergleichbar zu DAB auch Zusatzinformationen übertragen werden.



Kennzeichnende Merkmale von DRM+

- OFDM
- Kanalbandbreite: 100 kHz
- Bitrate: 35 kbit/s bis 185 kbit/s
- Trägerzahl: 213
- Trägerabstand: 444,4 Hz
- Trägermodulation: 16-QAM oder 64-QAM

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass es auch Erprobungen gibt, im UKW-Bereich mit einem System zu arbeiten, das in einem Kanal gleichzeitig und unabhängig voneinander ein analoges und ein digitales Programm verbreitet. Dieses als **HD-Radio** bezeichnete Konzept stammt aus den USA und wurde dort als IBOC [in-band on channel] bezeichnet.



Bei HD-Radio werden über jeden Kanal gleichzeitig ein analoges und ein digitales Programm verbreitet.

Es könnte theoretisch den Übergang von analog auf digital erleichtern. Da es jedoch eine Kanalbandbreite von 200 kHz erfordert, ist HD-Radio bei dem in Deutschland bestehenden 100-kHz-Raster im UKW-Bereich nur in Ausnahmefällen störungsfrei realisierbar.



HD-Radio erfordert 200 kHz breite Kanäle.

■ 14.2 Fernsehen (TV)

14.2.1 Einführung

Beim Fernsehen [television (TV)] liegt, vergleichbar dem Hörfunk, ein Rundfunksystem vor, bei dem mit jedem Sender möglichst viele Empfänger erreicht werden sollen. Es handelt sich um Simplex-Betrieb für die Übertragung von Video- und Audiosignalen, was in der Praxis Bewegtbild (in Farbe oder Schwarz-Weiß) mit Begleitton in Mono, Stereo oder Raumklang bedeutet. Außerdem sind auch verschiedene Zusatzinformationen möglich. Bei Bild und Ton kann es sich um analoge oder digitale Videosignale bzw. Audiosignale handeln.



Fernsehen [television (TV)] = Unidirektonaler Verteildienst für Bewegtbild mit Begleitton und Zusatzinformationen

Die Übertragung des Audiosignals erfolgt beim analogen Fernsehen durch Frequenzmodulation, beim digitalen Fernsehen ist es nach der Quellencodierung ein Bestandteil des standardisierten Datenstroms.



Übertragung des Begleittons

- beim analogen Fernsehen durch FM
- beim digitalen Fernsehen im Datenstrom

Die in Deutschland verwendeten Fernsehstandards erlauben es beim Begleitton auch, dass gleichzeitig zwei unterschiedliche Audiosignale unabhängig voneinander übertragen werden. Dafür gilt die Bezeichnung **Zweikanalton**. So kann zum Beispiel bei einem Film die Originalsprache und die deutsche Synchronisierung angeboten werden, die dem Nutzer dann zur Auswahl stehen. Um diese Möglichkeit nutzen zu können, muss allerdings das Fernsehgerät dafür ausgelegt sein.

Es sei darauf hingewiesen, dass die nachfolgenden Betrachtungen keine schaltungstechnischen Lösungen aufzeigen, sondern die verschiedenen Funktionalitäten behandeln.

Das Prinzip der TV-Bildübertragung basiert auf Bildelementen (BE) [picture element (pixel)], in die jedes einzelne Bild aufgeteilt wird. Es ist auch die Bezeichnung Bildpunkt gebräuchlich. Jedes Bildelement weist jeweils einen Wert für die Helligkeit und für die Farbe auf. Die Erfassung dieser Werte erfolgt durch entsprechende Abtastung des Bildes. Da sich bei bewegten Bildern Helligkeit und Farbe der BE ständig ändern können, ist regelmäßige Wiederholung der Abtastung erforderlich. Auf der Empfängerseite müssen die Bildelemente wieder in richtiger Reihenfolge zur Verfügung stehen, um das Bild rekonstruieren zu können.



Bildelement (BE) [picture element]



Jedes BE weist Helligkeitswert und Farbe auf



Feststellung dieser Werte durch Abtastung des Bildes



Wegen Bewegtbild regelmäßige Wiederholung der Abtastung

Für die Bildübertragung spielt beim Fernsehen das Bildformat, also das Verhältnis der Bildbreite zur Bildhöhe, eine wichtige Rolle.

Bildformat = Bildbreite : Bildhöhe

(14.4)

Es gelten dafür folgende Festlegungen:

- Analoges Fernsehen → 4:3 (Normalbild [standard screen])
- Digitales Fernsehen → 16:9 (Breitbild [wide screen])

Das Bildformat 16:9 ist für das menschliche Gesichtsfeld günstiger als 4:3, weil es zu einem größeren Sehwinkel führt. Bezogen auf die gleiche Bildhöhe ergibt sich nämlich bei 16:9 etwa 30 Prozent mehr Bildbreite (**Bild 14.30**).

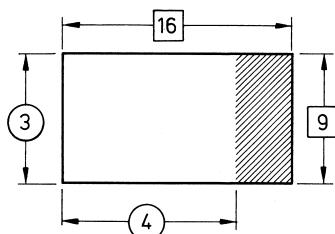


Bild 14.30 Gegenüberstellung der Bildformate

14.2.2 Analogen Fernsehen

Beim analogen Fernsehen [analog television] werden die Bild- und Toninformationen als analoge Signale übertragen. Dieses Konzept hat sich seit vielen Jahren bei den Übertragungswegen Satellit, Kabel und Terrestrik bestens bewährt. Wegen der größeren Leistungsfähigkeit wird allerdings das analoge Fernsehen schrittweise vom digitalen Fernsehen abgelöst. Bei terrestrischem Fernsehen ist dieser Übergang bereits abgeschlossen, beim Satelliten ist die Verbreitung analoger Fernsehprogramme am 30. April 2012 eingestellt worden, lediglich in den Breitbandkabelnetzen spielen die analogen Programme noch eine Rolle. Aus vorstehenden Gründen weist das analoge Fernsehen in der Praxis abnehmende Bedeutung auf. Das Thema wird nachfolgend dennoch mit seinen Schwerpunkten behandelt, weil diese Übertragungsform noch genutzt wird und weil verschiedene physikalische und technische Aspekte auch für das digitale Fernsehen Gültigkeit haben.



Die Bedeutung des analogen Fernsehens geht zurück. Es werden deshalb nachfolgend nur die Schwerpunkte dieser Übertragungsform behandelt.

Beim analogen Fernsehen erfolgt die Abtastung des Bildes zeilenförmig. Jedes Bild besteht aus 625 Zeilen, wobei 25 Bilder pro Sekunde übertragen werden. Bezogen auf das relevante Bildformat 4:3 ergibt sich, dass jedes Bild 520 833 BE aufweist. Wegen der 25 Bilder pro Sekunde führt dies zu $13 \cdot 10^6$ BE/s.

Aufgrund vorstehender Festlegungen und Erkenntnisse ist der Verlauf des Abtastvorgangs beim Fernsehbild eindeutig bestimmt. Die Bildelemente werden dabei auf ihre Helligkeits- und Farbwerte überprüft. Es beginnt mit dem ersten BE der 1. Zeile, verläuft bis zum letzten BE der 1. Zeile und setzt sich mit dem ersten BE der 2. Zeile fort. Nach dem letzten BE der 2. Zeile erfolgt der Wechsel zum ersten BE der 3. Zeile. Dieses System gilt bis zum letzten BE der 625. Zeile. Danach folgt der Rücksprung zum ersten BE der 1. Zeile und damit der Start für die Abtastung des nächsten Bildes (**Bild 14.31**).

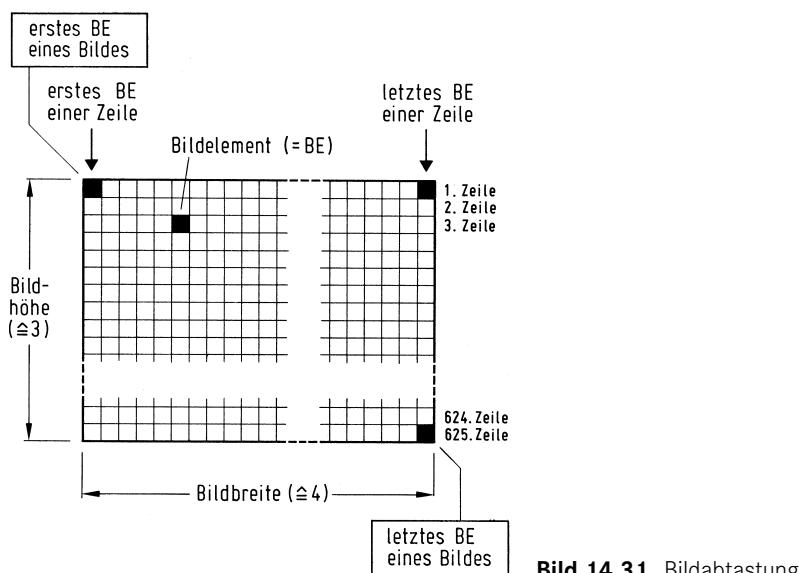


Bild 14.31 Bildabtastung

Die pro Sekunde beim Fernsehbild vorgesehenen Zeilen und Bilder stellen Frequenzen dar, konsequenterweise als Zeilenfrequenz und Bildfrequenz bezeichnet. Die Kehrwerte dieser Angabe sind die Zeilendauer und die Bilddauer.



Bildfrequenz: 25 Hz → Bilddauer 40 µs

Zeilenfrequenz: 15 625 Hz → Zeilendauer: 64 µs

Im Grenzfall kann bei den Bildelementen in einer Zeile ein ständiger Wechsel zwischen schwarz und weiß auftreten. Als Ausgangsspannung des Bildabtasters würde eine rechteckförmige Wechselspannung auftreten, deren Frequenz den halben Wert der Zahl der BE pro Sekunde aufweist, also 6,5 MHz (**Bild 14.32**). Dieses, dem Helligkeitsverlauf entsprechende elektrische Signal wird als **Bildsignal** (B-Signal) bezeichnet. Da in der Praxis ein ständiger Schwarz-Weiß-Wechsel zwischen den Bildelementen die Ausnahme darstellt, wurde in der Standardisierung die größte Bildsignalfrequenz auf 5 MHz festgelegt.

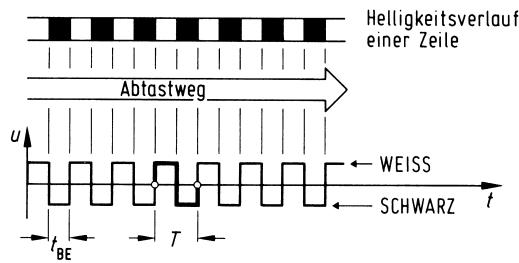


Bild 14.32 Bildsignal (B-Signal)



$$f_{\text{Bild}(\max)} = 5 \text{ MHz}$$

(14.5)

Das Bildsignal ist somit eine auf 5 MHz begrenzte Wechselspannung, mit der die beim analogen Fernsehen verwendete Bildröhre als typische Wiedergabekomponente angesteuert wird. Die zeilenweise Ablenkung bewirkt dabei die Aktivierung der einzelnen BE, was zur Rekonstruktion des Bildes führt.

Die zeilenweise Abtastung hat bei der Wiedergabe mit Bildröhren einen Nachteil. Wegen der begrenzten Nachleuchtdauer der Leuchtstoffe des Bildschirms sind die oberen Zeilen bereits erheblich dunkler, wenn die unteren Zeilen dargestellt werden. Dadurch ergibt sich im Bild ein unerwünschter Flimmereffekt. Abhilfe bringt das Zeilensprungverfahren [line interlacing]. Dabei wird das Bild in zwei Halbbilder aufgeteilt, wobei das 1. Halbbild aus den ungeraden Zeilen besteht, während es sich bei dem 2. Halbbild um die geraden Zeilen handelt (**Bild 14.33**). Für die Bildwiedergabe werden beide Halbbilder verschachtelt dargestellt, was wegen der Trägheit des menschlichen Auges Flimmereffekte weitgehend kompensiert.

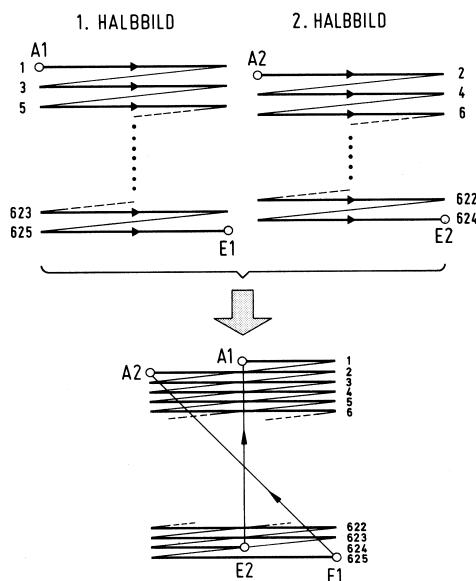


Bild 14.33 Zeilensprungverfahren



Zeilensprungverfahren [line interlacing] = Übertragung des Fernsehbildes durch zwei Halbbilder, die aus den geradzahligen und ungeradzahligen Zeilen bestehen

Bedingt durch den Übergang auf Halbbilder ergeben sich 50 Halbbilder pro Sekunde, was eine Halbbild(wechsel)frequenz von 50 Hz bedeutet.

Damit die Bildwiedergabe fehlerfrei verlaufen kann, muss sie synchron zur Bildabtastung erfolgen.



Bildabtastung und Bildwiedergabe müssen synchron verlaufen.

Dieser Gleichlauf wird durch zusätzliche Signale bewirkt, die Anfang und Ende von Zeilen bzw. Bildern markieren. Dabei handelt es sich um rechteckförmige Impulse, die eindeutig und störungsfrei in das Bildsignal zu integrieren sind. Dies geschieht während des Zeilensrücklaufs bzw. Bildrücklaufs, weil während dieser Zeiten keine Übertragung des Bildsignals erfolgt (**Bild 14.34**). Durch rechteckförmige **Austastsignale** (A-Signale) wird zuerst die Unterbrechung des Bildsignals sichergestellt, dann folgt an diesen Stellen das Einfügen der **Synchronsignale** (S-Signale) für Zeile und Bild.

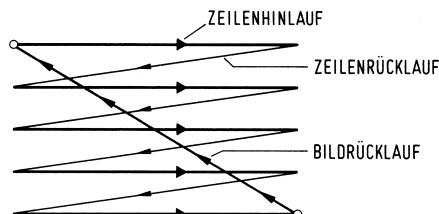


Bild 14.34 Zeilen- und Bildrücklauf

Die Amplituden der Synchronsignale bestimmen sich aus dem Amplitudengradienten für das Bildsignal. Bezogen auf das gesamte übertragene Signal ist für dieses der Bereich zwischen 10 % und 75 % festgelegt. Bei 10 % der maximalen Signalamplitude liegt Weiß vor, während es sich bei 75 % um Schwarz handelt. Die beiden Grenzwerte der Bildsignalamplituden werden als **Weißpegel** bzw. **Schwarzpegel** bezeichnet. Das Bildsignal liegt somit im Bereich 10 %...75 %. Da die Synchronsignale eindeutig vom Bildsignal getrennt sein müssen, wird für diese der Amplitudengradient 75 %...100 % verwendet (**Bild 14.35**).

Helle Stellen eines Bildes werden also in kleine Amplituden des Bildsignals umgesetzt, während es sich bei dunklen Stellen um große Amplituden handelt. Dieses als **Negativmodulation** bezeichnete Verfahren hat Vorteile. Die Synchronsignale liegen oberhalb des Schwarzpegels, können sich deshalb im Bild nicht bemerkbar machen und stellen die Synchronisation vorrangig sicher. Die Lage des Weißpegels verhindert dagegen störende Einflüsse von Rauschsignalen, deren Amplituden üblicherweise kleinere Werte aufweisen. Gegebenenfalls dennoch auftretende Störimpulse machen sich als dunkle Punkte im Bild bemerkbar. Dies wird vom menschlichen Auge als weniger störend empfunden als der umgekehrte Fall heller Punkte.

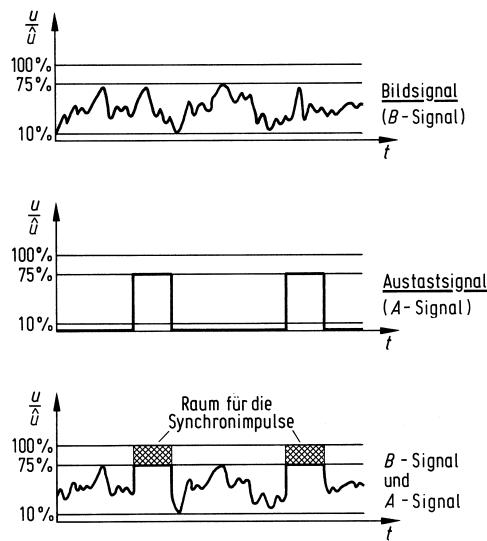


Bild 14.35 Bildsignal mit Austastung

Damit im Empfänger eindeutig zwischen Zeilenwechsel und Bildwechsel unterschieden werden kann, weisen die Synchronsignale dafür auch verschiedene Formen auf.



Unterschiedliche Synchronsignale für Zeilenwechsel und Bildwechsel

Die pro Bild erforderlichen 625 Zeilenwechsel werden jeweils durch einen Rechteckimpuls von $4,7 \mu\text{s}$ Dauer ausgelöst. Vor und nach dem Impuls gilt für definierte Zeiten der Schwarzpegel, was wir als vordere bzw. hintere **Schwarzschulter** bezeichnen. Die aufgezeigte Signalform ist das **Zeilensynchronsignal**, in Kurzform häufig als H-Sync bezeichnet (Bild 14.36).

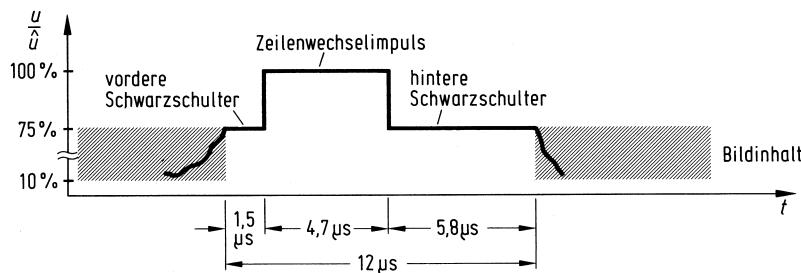


Bild 14.36 Zeilensynchronsignal

Die Bildwechsel werden durch das **Bildsynchrosignal** (B-Sync) ausgelöst. Es besteht gesamt aus fünfzehn Rechteckimpulsen. Die ersten fünf Impulse haben jeweils $2,5 \mu\text{s}$ Dauer und werden als Vortrabanten bezeichnet. Danach folgen fünf $27 \mu\text{s}$ lange Wechselimpulse und abschließend wieder fünf Impulse mit $2,5 \mu\text{s}$ Dauer als Nachtrabanten (Bild 14.37). Die beschriebene Kombination der Impulse sichert den störungsfreien Bildwechsel.

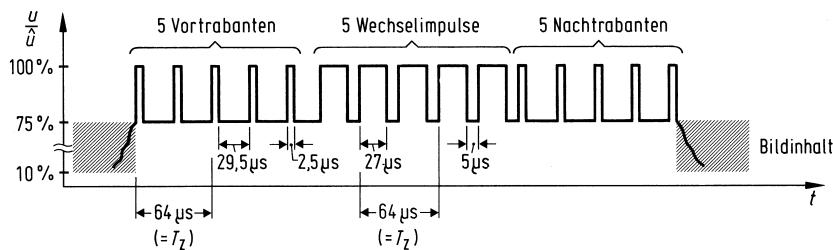


Bild 14.37 Bildsynchrosignal

Da die **Synchronsignale** (S-Signale) während der Zeiten der Austastsignale (A-Signale) übertragen werden, ergibt sich in Verbindung mit dem Bildsignal (B-Signal) ein für die Schwarz-Weiß-Übertragung typisches Gesamt signal, das **BAS-Signal** (**Bild 14.38**).

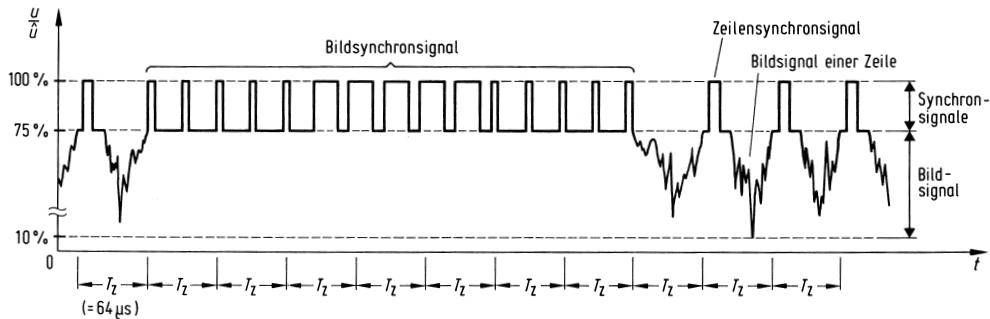
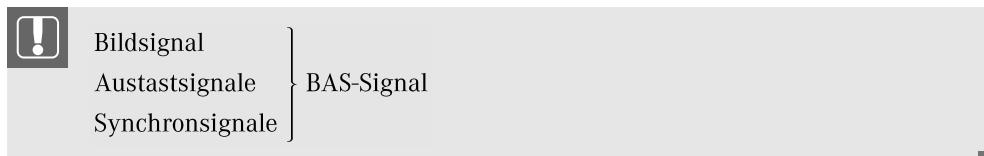


Bild 14.38 BAS-Signal



Während des Zeilenrücklaufs bzw. Bildrücklaufs, also beim Zeilenwechsel bzw. Bildwechsel, erfolgt bekanntlich keine Übertragung des Bildsignals. Gegenüber den bisher aufgezeigten Daten reduziert sich dadurch die Fläche für das sichtbare Bild. Während der Zeilendauer von 64 µs wird nur 52,48 µs lang ein Bildsignal übertragen. Bedingt durch das Bildsynchrosignal weist das sichtbare Bild nur 576 Zeilen von den gesamt 625 Zeilen auf (**Bild 14.39**). Die Bildbreite ist somit um etwa 18 Prozent kleiner, bei der Bildhöhe sind es etwa 8 Prozent.

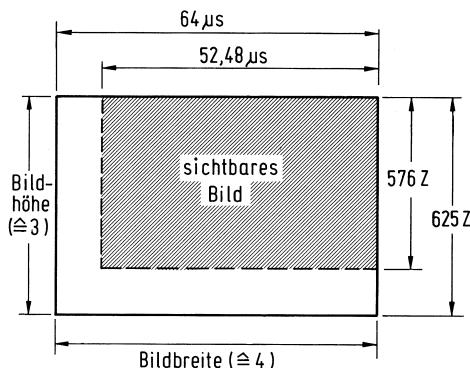


Bild 14.39 Auswirkung der Synchronsignale auf das sichtbare Bild



Von den 625 übertragenen Zeilen sind nur 576 Zeilen sichtbar.

Das bisher betrachtete BAS-Signal ermöglicht nur die Übertragung von Schwarz-Weiß-Bildern. Für den Übergang auf Farübertragung müssen zuerst die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Lichtes betrachtet werden.

Das sichtbare Licht ist ein Teil des Spektrums der elektromagnetischen Wellen und liegt im Bereich 400 nm ... 750 nm. Jede Wellenlänge nimmt das menschliche Auge als unterschiedliche Farbe wahr. Jeder Farbe kann deshalb eine bestimmte Wellenlänge zugeordnet werden (**Bild 14.40**).



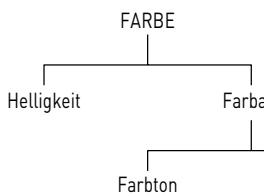
Bild 14.40 Spektrum des sichtbaren Lichts

Jede Farbe ist durch drei Größen vollständig bestimmt. An erster Stelle steht die bereits vom Schwarz-Weiß-Fernsehen bekannte **Helligkeit**. Die nächste Größe heißt **Farbton** und gibt an, welche Farbe (d.h. Wellenlänge) vorhanden ist. Als weitere Information ist die **Farbsättigung** erforderlich. Sie beschreibt, mit welcher Intensität die durch den Farbton bestimmte Farbe auftritt. Farbton und Farbsättigung bilden zusammen die **Farbart**.

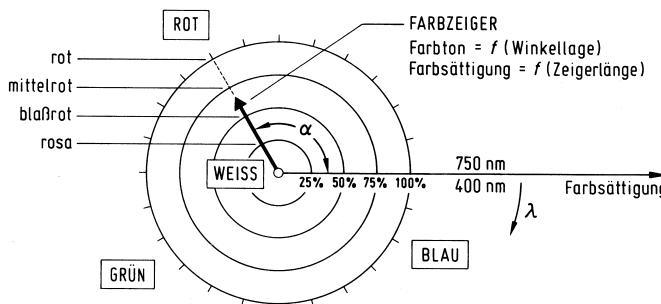
Vorstehende Ausführungen zeigen, dass für die Übertragung farbiger Bilder neben der Helligkeit auch Informationen über die Farbart erforderlich sind (**Bild 14.41**). Diese lässt sich durch additive Farbmischung von drei Grundfarben gewinnen, also der Überlagerung des Lichtes dieser Farben. Es handelt sich somit um Lichtmischung, mit der bei entsprechender Wahl der Sättigungswerte alle mit dem Auge wahrnehmbaren Farben erzeugt werden können.



Durch **additive Farbmischung** (= Lichtmischung) von drei Grundfarben können alle wahrnehmbaren Farben erzeugt werden.

**Bild 14.41** Bestimmungsgrößen einer Farbe

Für das Farbfernsehen wurden die Grundfarben Rot ($\lambda_R = 700 \text{ nm}$), Grün ($\lambda_G = 546,1 \text{ nm}$) und Blau ($\lambda_B = 435,8 \text{ nm}$) gewählt, wobei als Bezeichnung meist nur die Kurzformen R, G und B üblich sind. Jede durch Mischung der Grundfarben entstandene Farbe ist als Zeiger in einem Farbkreis darstellbar, wobei seine Winkellage den Farbton angibt, während seine Länge ein Maß für die Farbsättigung ist. Der **Farbzeiger** lässt sich auf einfache Weise als elektrisches Signal abbilden, wobei jeder Winkel einer Phasenlage entspricht und jede Zeigerlänge einer Amplitude (Bild 14.42).

**Bild 14.42** Farbkreis mit Farbzeiger

- !** Grundfarben für Farbfernsehen
- **Rot (R)** $\lambda = 700 \text{ nm}$
 - **Grün (G)** $\lambda = 546,1 \text{ nm}$
 - **Blau (B)** $\lambda = 435,8 \text{ nm}$

Für die Einführung des **Farbfernsehens** war die Kompatibilität zum Schwarz-Weiß-Fernsehen von ausschlaggebender Bedeutung. Der zuerst nur vorhandene Schwarz-Weiß-Fernsehempfänger musste auch bei Farübertragung noch bestimmungsgemäß funktionieren. Andererseits sollten Farbfernsehempfänger auch bei Schwarz-Weiß-Übertragung verwendbar sein.

Um die geforderte Kompatibilität zu erreichen, wird aus den drei Grundfarben die Helligkeitsinformation gewonnen. Das die Helligkeit repräsentierende Signal wird als **Luminanzsignal** (Y-Signal) bezeichnet, während die Farbart im **Chrominanzsignal** (C-Signal) steckt.

!	Farbfernsehsignal	=	Luminanzsignal	+	Chrominanzsignal
			(Y-Signal)		(C-Signal)

Um aus den drei Grundfarbsignalen der Aufnahmekomponente (z. B. Fernsehkamera) U_R , U_G und U_B das Luminanzsignal (= Helligkeitssignal) (Y-Signal) zu gewinnen, ist zu berücksichtigen, dass zwar alle drei Grundfarben zur Helligkeit beitragen, das menschliche Auge jedoch unterschiedliche Empfindlichkeit für die einzelnen Farben aufweist. Es wurde deshalb nach einer großen Zahl von Versuchen und Messungen die **Augenempfindlichkeitskurve** als Funktion der Empfindlichkeit von der Wellenlänge festgelegt (**Bild 14.43**). Daraus ergeben sich die Anteile der Grundfarben am Y-Signal wie folgt:



$$U_Y = 0,3 \cdot U_B + 0,59 \cdot U_G + 0,11 \cdot U_R \quad (14.6)$$

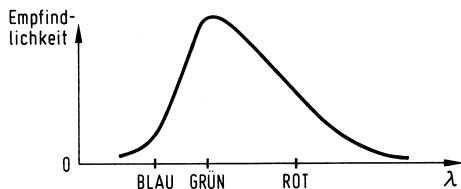


Bild 14.43 Augenempfindlichkeitskurve

Das Y-Signal lässt sich durch eine einfache Matrixschaltung aus den drei Grundfarbsignalen gewinnen, im einfachsten Fall handelt es sich um entsprechend dimensionierte Spannungsteiler mit nachfolgender Summierung.

Um den Aufwand für die Signalübertragung möglichst klein zu halten, werden nicht die Signale der Grundfarben verwendet, sondern folgende Differenzwerte zum Luminanzsignal:

$$U_R - U_Y = U_{R-Y} \quad (14.7)$$

$$U_B - U_Y = U_{B-Y} \quad (14.8)$$

Um bei der Übertragung dieser Farbdifferenzsignale mögliche Übermodulation zu vermeiden, erfolgt eine Reduzierung der Amplituden um bestimmte Faktoren. Das Ergebnis sind die reduzierten Farbdifferenzsignale, die als U- und V-Signale bezeichnet werden. Es gilt:



$$U'_{R-Y} = 0,87 \cdot U_{R-Y} = V\text{-Signal} \quad (14.9)$$

$$U'_{B-Y} = 0,49 \cdot U_{B-Y} = U\text{-Signal} \quad (14.10)$$

Die beiden reduzierten Farbdifferenzsignale werden für die Übertragung zu einem Signal zusammengefasst. Diese Aufbereitung ergibt das **Farbartsignal** (F-Signal), das in Verbindung mit dem BAS-Signal das Farbfernsehsignal vollständig beschreibt. Es handelt sich nun um das FBAS-Signal, welches als Modulationssignal für den Fernsehsender dient.



$$\text{FBAS-Signal} = \text{F-Signal} + \text{BAS-Signal}$$

Für die Übertragung des Luminanzsignals (Y-Signals) wird Restseitenband-Amplitudenmodulation (RSB-AM) verwendet, da im Signal auch Gleichanteile (also Anteile mit $f = 0 \text{ Hz}$) auftreten können. Sie ergeben sich, wenn mehrere nebeneinanderliegende Bildelemente einer Zeile gleiche Helligkeit aufweisen.

Die Übertragung des analogen Fernsehens erfolgt über 7 MHz breite Kanäle im VHF-Bereich oder 8 MHz breite Kanäle im UHF-Bereich. Es handelt sich dabei stets um das obere Seitenband und definierte Teile des unteren Seitenbandes. Das dafür verwendete Trägersignal wird als **Bildträger** (BT) bezeichnet. Das standardisierte Frequenzschema ist aus **Bild 14.44** ersichtlich.

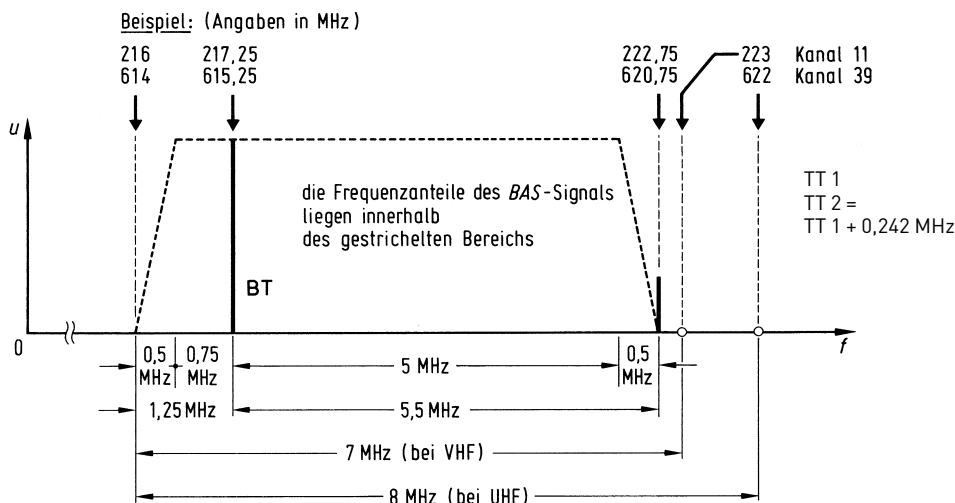


Bild 14.44 Frequenzschema für analogen Fernsehkanal

Neben dem Bildsignal erfolgt in jedem Fernsehkanal auch die Übertragung des Tonsignals bzw. der beiden Tonsignale bei Zweikanalton. Dabei wird Frequenzmodulation (FM) eingesetzt, wobei der erste Tonträger (TT1) genau $5,5 \text{ MHz}$ oberhalb des Bildträgers liegt, während der zweite Tonträger (TT2) zu diesem einen Abstand von 242 kHz aufweist. Die Amplituden der **Tonträger** sind gegenüber dem Bildträger kleiner (TT1: -13 dB , TT2: -20 dB), da dies für die gleiche Reichweite von Bild und Ton ausreicht.



Abstand Bildträger (BT)/Tonträger 1 (TT1): $5,5 \text{ MHz}$

Abstand Bildträger (BT)/Tonträger 2 (TT2): $5,724 \text{ MHz}$

Ein Fernsehsender besteht im Prinzip aus zwei Einzelsendern, deren Ausgangssignale über ein als Diplexer bezeichnetes Netzwerk rückwirkungsfrei zusammengefasst zur Antenne gelangen. Der eine Sender wird als Bildsender bezeichnet. Sein Modulationssignal ist das relativ breitbandige BAS-Signal, wobei die Signale für die Austastung (A) und Synchronisation (S) von einem zentralen Taktgeber gesteuert in das B-Signal integriert werden.

Das Tonsignal kann dagegen unmittelbar dem anderen Sender zugeführt werden. Er heißt konsequenterweise Tonsender und arbeitet auf dem festgelegten Frequenzabstand zum

Bildträger. Die Trägerfrequenzen der Sender werden stets von einer Referenzquelle abgeleitet (**Bild 14.45**).

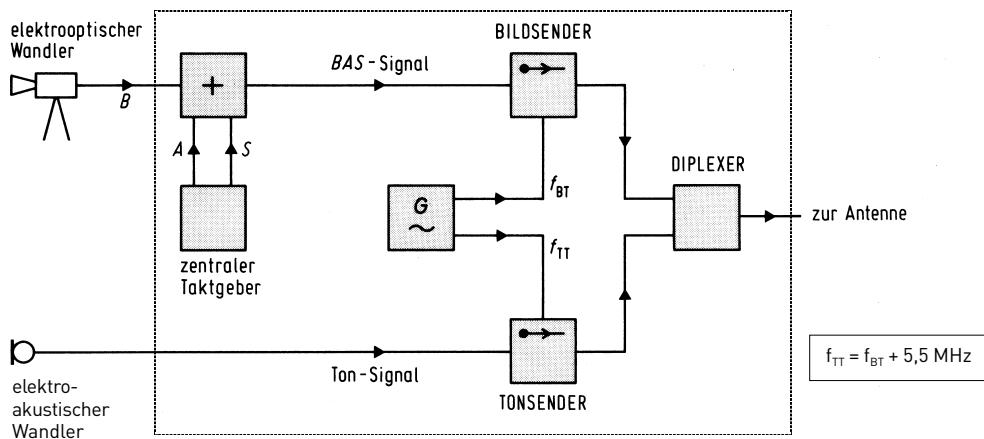


Bild 14.45 Analog Fernsehsender (ohne Zweiton)

Bei Zweikanalton sind zwei Tonsender erforderlich, deren Trägerfrequenzen einen Abstand von 242 kHz aufweisen.

Für die Übertragung des F-Signals wird ein **Farbträger** (FT) und Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) verwendet. Es erfolgt deshalb für beide Signale U und V eine Zwei-seitenband-Amplitudenmodulation (ZSB-AM) mit unterdrücktem Träger, wobei die Trägersignale eine Phasenverschiebung von 90° zueinander aufweisen. Am Ausgang der Modulatoren wird ein Summensignal C und stellt sich als Farbartzeiger F dar (**Bild 14.46**).

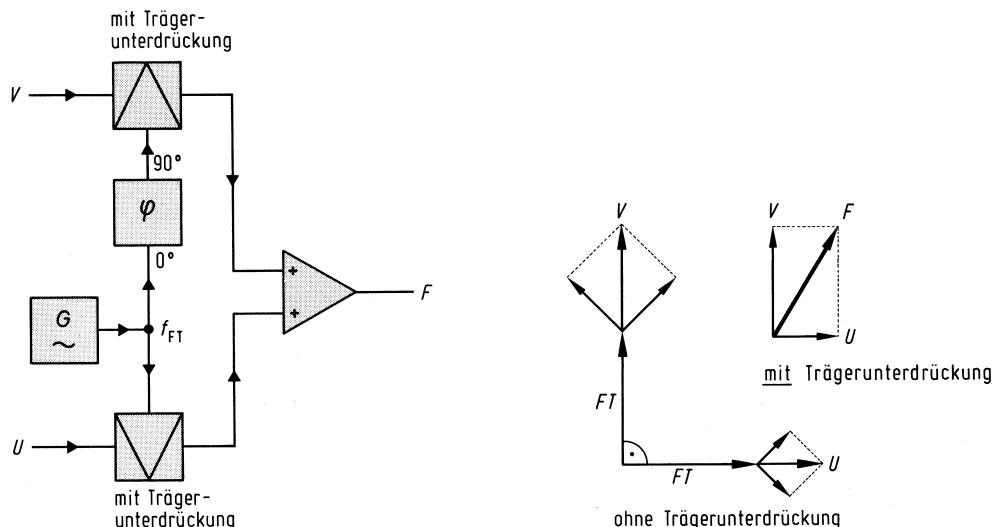


Bild 14.46 Gewinnung des Farbartzeigers durch QAM

Während beim Luminanzsignal für die Bandbreite bezogen auf die Bildträger $+5 \text{ MHz} / -1,25 \text{ MHz}$ gilt, wurde sie für das Chrominanzsignal bezogen auf den Farbträger mit $+0,57 \text{ MHz} / -1,3 \text{ MHz}$ festgelegt. Diese Begrenzung der Bandbreite ist vertretbar, weil das Auge für Faränderungen unempfindlicher ist als für Helligkeitsänderungen.

Um Störungen bei der Bildwiedergabe zu vermeiden, muss die Frequenz des Farbträgers so gewählt sein, dass sich Luminanz- und Chrominanzsignal möglichst wenig beeinflussen. Dafür ist es hilfreich, die zu übertragenden Spektren der beiden Signale zu betrachten. Wegen der zeilenweisen Bildabtastung treten nämlich Spektralanteile nur im Abstand der Zeilenfrequenz f_v auf. Bedingt durch den normalerweise variierenden Bildinhalt treten zusätzlich Spektrallinien im Abstand von ganzzahligen Vielfachen der Bildfrequenz f_v auf (**Bild 14.47**). Der Farbträger kann deshalb so gewählt werden, dass sich die Spektrallinien beider Signale gegenseitig nicht berühren. Diese Verschachtelung (auch als Verkämmung bezeichnet) erreichen wir, wenn der Farbträger wie folgt gewählt wird:

$$f_{FT} = 283,75 \cdot f_v + 0,5 \cdot f_v \quad (14.11)$$

Die Ausrechnung ergibt:

$$f_{FT} = 4,43361875 \text{ MHz} \approx 4,43 \text{ MHz} \quad (14.12)$$

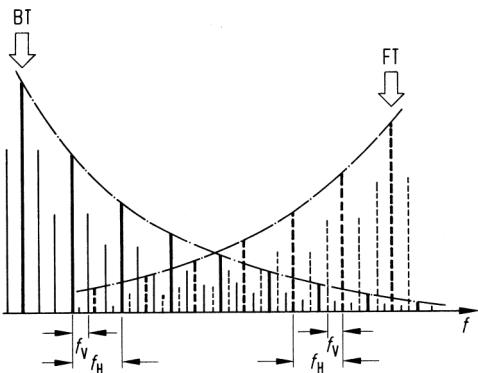


Bild 14.47 Verschachtelung der Spektrallinien von Luminanz- und Chrominanzsignal

Die Modulation des Farbträgers mit dem Chrominanzsignal erfolgt als Restseitenband-Amplitudenmodulation (RSB-AM) mit unterdrücktem Träger. Das Spektrum liegt wegen der gewählten Frequenz des Farbträgers im oberen Teil des Luminanzsignals, wo dessen Amplituden bereits kleine Werte aufweisen (**Bild 14.48**).

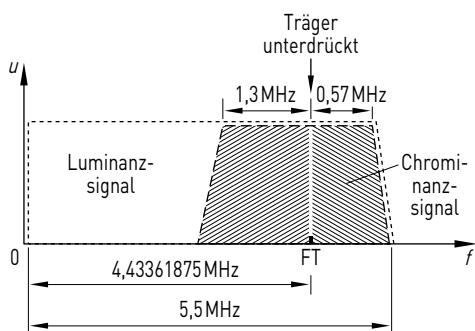


Bild 14.48 Frequenzlage des Chrominanzsignals

Wegen der Trägerunterdrückung steht der Farbträger auf der Empfangsseite nicht unmittelbar zur Verfügung. Er wird jedoch für die Demodulation mit richtiger Frequenz und Phasenlage benötigt. Deshalb erfolgt die Übertragung eines geeigneten Signals, um die Synchronisierung der Oszillatorschaltung für die Farbträgerfrequenz im Empfänger sicherzustellen. Es handelt sich um das auch als Burst bezeichnete **Farbsynchronsignal** und besteht aus zehn Schwingungen mit der Farbträgerfrequenz f_{FT} , die auf der hinteren Schwarzscherter jedes Zeilensynchronsignals aufgebracht sind (**Bild 14.49**).

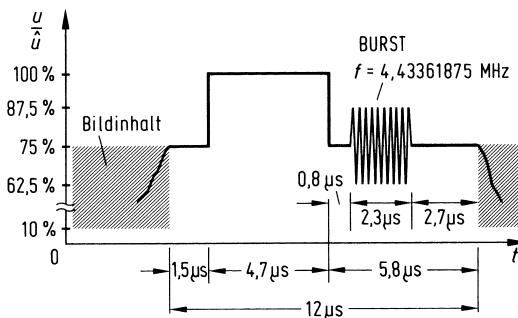


Bild 14.49 Farbsynchronsignal (Burst)

Für die Farbfernsehübertragung ist es erforderlich, aus den drei Grundfarbensignalen R, G und B das FBAS-Signal zu bilden. Als erster Schritt erfolgt die Wandlung in das Luminanzsignal Y und die beiden reduzierten Farbdifferenzsignale U und V. Danach wird die bereits behandelte QAM durchgeführt, um das Chrominanzsignal C zu erzeugen. Bei dieser Modulation wird nun allerdings die Phasenlage des V-Signals von Zeile zu Zeile um 180° umgeschaltet. Dieser zeilenweise Phasenwechsel ist die Besonderheit des in Deutschland und vielen anderen Staaten verwendeten analogen Farbfernsehsystems, das üblicherweise nur unter der Kurzbezeichnung **PAL** [phase alternating line] bekannt ist. Das PAL-Konzept bewirkt eine reduzierte Empfindlichkeit der Farbinformation gegen Störungen im Übertragungskanal.

Für die Aufbereitung des FBAS-Signals gilt somit folgender Weg:

```

R, G, B
↓
Y, U, V
↓
PAL [phase alternating line]
(d. h. zeilenweiser Phasenwechsel des V-Signals)
↓
Y, C
↓
Ergänzung durch A-Signale, S-Signale und Burst
↓
FBAS

```

Analoge Fernsehempfänger sollen die Wiedergabe der übertragenen Bild- und Tonsignale ermöglichen. Es wird dabei stets mit Überlagerungsempfängern gearbeitet. Die Selektion des gewünschten Kanals erfolgt durch den Kanalwähler (Tuner) im HF-Teil.

Bezogen auf den Bildträger (BT) und die beiden Tonträger (TT1 und TT2) gelten folgende Zwischenfrequenzen:

- Bild-ZF: 38,9 MHz
- 1. Ton-ZF: 33,4 MHz
- 2. Ton-ZF: 33,158 MHz

Dabei bleiben verständlicherweise die Frequenzabstände wie bei den Trägerfrequenzen erhalten. Die Zwischenfrequenzen stehen am Ausgang des Tuners zur Verfügung, wobei die Bild-ZF das Luminanz- und das Chrominanzsignal umfasst und außerdem die Synchronsignale enthält. Während bei den Ton-Zwischenfrequenzen die vom Hörfunk bekannte Signalverarbeitung zur Wiedergewinnung der Tonsignale erfolgen kann, sind nach der Demodulation der Bild-ZF folgende Maßnahmen bei dem nun vorhandenen FBAS-Signal erforderlich:

- Wiedergewinnung des Y-Signals im Luminanzteil
- Wiedergewinnung der reduzierten Farbdifferenzsignale im Chrominanzteil
- Wiedergewinnung des Farbträgers nach Frequenz und Phase
- Wiedergewinnung der Synchronsignale für Zeilen- und Bildwechsel

Die Durchlasskurve des Bild-ZF-Teils stellt durch ihre besondere Form sicher, dass die wegen der RSB-AM zweimal auftretenden kleinen Modulationsfrequenzen in ihren Amplituden begrenzt werden, damit sie denen der anderen Frequenzen entsprechen. Die dabei gewählte Abschrägung der Durchlasskurve um 38,9 MHz trägt die Bezeichnung Nyquistflanke (**Bild 14.50**).

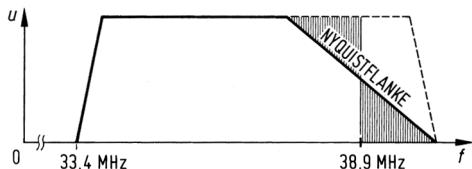


Bild 14.50 Durchlasskurve Bild-ZF-Teil

Im Luminanzteil erfolgt neben der erforderlichen Verstärkung eine Verzögerung des Y-Signals um $0,8 \mu\text{s}$, da die Farbdifferenzsignale im Chrominanzanteil bedingt durch unterschiedliche Bandbreiten längere Laufzeiten aufweisen. Außerdem wird die Farbträgerfrequenz unterdrückt, um mögliche Störungen zu vermeiden.

Im Chrominanzteil wird das Chrominanzsignal aus dem FBAS-Signal gefiltert, nach Verstärkung in zwei gleiche Kanäle aufgeteilt und dann den Demodulatoren zugeführt. Die Trägersignale weisen die Farbträgerfrequenz auf, wobei zwischen den Kanälen 90° Phasenverschiebung besteht.

Für die Farbträgerregenerierung wird zuerst der Burst mit Hilfe einer Torschaltung aus dem FBAS-Signal ausgetastet. Er synchronisiert dann über eine Regelschaltung den Farbträgergenerator phasenstarr zum Farbträgersignal des Senders. Das Ausgangssignal des Farbträgergenerators wird dann einmal direkt und einmal mit einer Phasenverschiebung von 90 Grad dem Chrominanzsignal zugeführt.

Der bei jeder Zeile auftretende Burst bewirkt über eine Steuerschaltung, dass der PAL-Schalter das um 90 Grad phasenverschobene Farbträgersignal in seiner Phasenlage jeweils um 180 Grad umschaltet. Dadurch ändert sich die Richtung des V-Signals von Zeile zu Zeile um 180 Grad. Auf diese Weise sind Farbtönänderungen, wie sie bei der Übertragung auftreten können, automatisch korrigierbar. Derartige Mängel äußern sich in der Veränderung der Winkellage des Farbartzeigers. Durch den Vergleich der Farbartzeiger von zwei aufeinanderfolgenden Zeilen, wobei das Signal der ersten Zeile um die Zeitspanne verzögert und das Signal der zweiten Zeile in die ursprüngliche Phasenlage zurückgeschaltet sein muss, weist der resultierende Farbartzeiger bei Phasenfehlern wieder die ursprüngliche Lage auf (Bild 14.51).

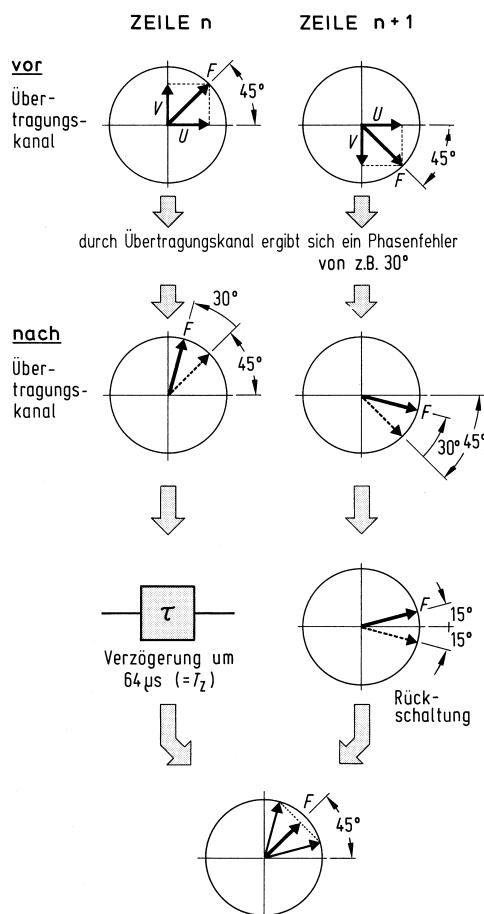


Bild 14.51 Kompensation von Phasenfehlern beim PAL-System

Mit dem Konzept der zeilenweisen Phasenumschaltung können Phasenfehler bis etwa dreißig Grad ausgeglichen werden. Es ergibt sich allerdings eine Verringerung der Farbsättigung.

Die Ausgangssignale des Luminanzanteils, nämlich das Y-Signal, und des Chromianzsignals, nämlich die reduzierten Farbdifferenzsignale U und V, werden über eine Matrix in die drei Grundfarbensignale R, G und B gewandelt. Diese stehen dann für die Ansteuerung der Wiedergabekomponente zur Verfügung. Beim analogen Fernsehen handelt es sich typi-

scherweise um die Bildröhre, bei der ein fokussierter Elektronenstrahl eine Leuchtschicht gesteuert aktiviert. Bei dieser Form der Wiedergabe werden für die Zeilenablenkung und Bildablenkung entsprechende Leistungsstufen benötigt, die jeweils sägezahnförmige Ströme durch die Ablenkspulen bewirken sollen. Die Ansteuerung der Horizontal-Endstufe (für die Zeilenablenkung) und der Vertikal-Endstufe (für die Bildablenkung) erfolgt über Sägezahngeneratoren mit nachgeschalteten Impulsformern. Damit diese Generatoren taktgenau arbeiten, ist die Aufbereitung der Synchronsignale erforderlich.

Die Selektion der Synchronsignale aus dem FBAS-Signal erfolgt durch eine als Amplitudensieb bezeichnete Schaltung. Sie berücksichtigt nämlich nur die oberhalb des Schwarzpegels liegenden Signalanteile, also den H-Sync und den B-Sync. Wegen der unterschiedlichen Form und Dauer ist die Separierung mit Hilfe einer Impulstrennstufe einfach möglich, so dass die entsprechende Triggerung des Horizontalgenerators und Vertikalgenerators erfolgen kann.

Die bisher betrachtete Struktur bezog sich auf Fernsehempfänger mit analoger Signalverarbeitung. Kommt **digitale Signalverarbeitung** zum Einsatz, dann werden wesentliche Funktionen durch Prozessoren wahrgenommen. Dazu gehören primär der Videoprozessor, der Audioprozessor und der Ablenkprozessor.

Die Übergänge von und zu den analogen Baugruppen erfolgen bei der digitalen Signalverarbeitung mit Hilfe geeigneter Analog-Digital-Umsetzer (ADU) und Digital-Analog-Umsetzer (DAU). Das Herzstück ist der **Taktgenerator**. Er gewinnt aus dem Burst das Farbträgersignal, vervielfacht es und stellt damit ein Taktsignal von 17,73 MHz über einen Bus für alle anderen digitalen Stufen zur Verfügung. Auch die zentrale Steuerschaltung arbeitet digital, wobei für die Steuersignale ebenfalls ein Bussystem verwendet wird (**Bild 14.52**).

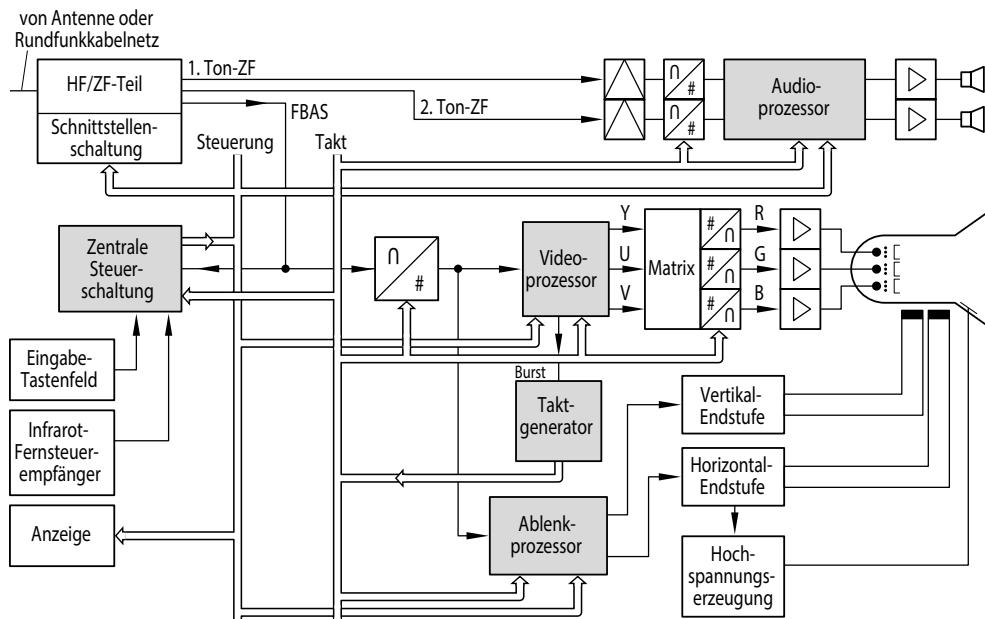


Bild 14.52 Analog Fernsehempfänger mit digitaler Signalverarbeitung

Das analoge Fernsehen wurde für die Bildwiedergabe über Bildröhren konzipiert. Es besteht aber auch die Möglichkeit der Wiedergabe über Flachbildschirme, die in Verbindung mit dem digitalen Fernsehen auf den Markt gekommen sind. Es ist dabei allerdings zu berücksichtigen, dass es sich bei Flachbildschirmen um digitale Funktionseinheiten handelt, bei denen die Bildelemente matrixförmig angeordnet sind und jeweils einzeln angesteuert werden müssen. Das ist mit den beim analogen Fernsehen spezifischen drei Grundfarbesignalen nicht unmittelbar möglich, sondern erst nach einer entsprechenden Analog/Digital-Signalumwandlung. Solche Funktionseinheiten sind bei älteren Flachbildschirmen in der Regel integriert. Ihre Verfügbarkeit ist daran erkennbar, dass neben der typischen Schnittstelle HDMI auch noch ein SCART-Anschluss vorhanden ist.

Die aufgezeigte Umsetzung von analoger auf digitale Ansteuerung ist allerdings stets mit Qualitätsverlusten beim Bild verbunden. Deshalb stellt die Wiedergabe analoger Fernsehbilder über Flachbildschirme keine vorteilhafte Lösung dar. Dies gilt in gleicher Weise für den Einsatz von Videoprojektoren [beamer].



Das analoge Fernsehen ist für die Wiedergabe über Bildröhren konzipiert.

Teletext (Videotext)

Beim analogen Fernsehen ist auch die Übertragung von **Zusatzinformationen** möglich. Es handelt sich um das standardisierte digitale Verfahren Teletext, für das sich in Deutschland die Bezeichnung Videotext (VT) eingebürgert hat. Jede Informationseinheit besteht dabei aus 24 Zeilen à 40 Zeichen und wird als Videotext-Seite oder Videotext-Tafel bezeichnet. Auf diese Weise ist es möglich, Text und einfache Grafiken mit dem Fernsehsignal ohne gegenseitige Beeinflussung zu übertragen. Es handelt sich dabei um Simplex-Betrieb.



Teletext = Videotext (VT) = Standardisiertes Verfahren für die Übertragung von Texten und einfachen Grafiken mit dem analogen Fernsehsignal als unabhängige Zusatzinformationen

Videotextseiten sind mit jedem Programmsignal übertragbar, eine Abhängigkeit der Inhalte vom jeweiligen Programm besteht allerdings nicht. Typische Nutzungen für Videotext sind Informationsdienste wie Programmübersichten, aktuelle Nachrichten, Wetterberichte, Börsenkurse, Flugpläne, Sportergebnisse usw. Ein fernsehspezifischer Einsatz sind Untertitel für Hörgeschädigte oder im Rahmen der Übertragung nicht in deutscher Sprache synchronisierte Filme.

Videotext-Nutzungen:

- Informationen
- Untertitel für Hörgeschädigte
- Untertitel bei nicht synchronisierten Filmen

Für die Übertragung der Videotext-Daten werden folgende Zeilen verwendet:

- Zeile 11...15 (1. Halbbild)
- Zeile 20...21 (1. Halbbild)
- Zeile 323...328 (2. Halbbild)
- Zeile 333...334 (2. Halbbild)

Diese sieben bzw. acht Zeilen in den Halbbildern liegen in der Austastlücke für den Bildwechsel, so dass der Inhalt des Fernsehbildes nicht beeinflusst wird.

Das Zeichen in den Videotext-Zeilen ist als Matrix mit 12×20 Punkten festgelegt. Für jedes Zeichen werden 8 bit benötigt, einschließlich des Paritätsbits. Für jede Videotext-Zeile sind außerdem auch noch fünf Steuerworte mit je 8 bit erforderlich. Daraus lassen sich für die Datenmenge einer Videotext-Seite 8640 bit errechnen.

Da pro Fernsehsignal-Zeile eine Videotext-Zeile übertragen wird, ergibt sich wegen der verwendeten Zeilenzahl und der Bildfrequenz eine Kapazität von 375 Videotext-Seiten pro Sekunde, was 15 Videotext-Seiten pro Sekunde ermöglicht. Die Übertragung von z.B. 200 Seiten dauert deshalb etwa 13 Sekunden.

	Kennzeichnende Merkmale von Videotext
▪ Videotext-Zeichen:	12×20 -Matrix, 8 bit
▪ Videotext-Zeile:	40 Videotext-Zeichen
▪ Videotext-Seite:	24 Videotext-Zeilen
▪ Übertragungsgeschwindigkeit:	4,16 Videotext-Seiten/s
▪ Übertragungsdauer:	0,24 s/Videotext-Seite

Damit die Nutzer auf die angebotenen Videotext-Seiten wahlfrei und möglichst schnell zugreifen können, werden diese Zusatzinformationen zyklisch wiederholt übertragen, also das Karussell-Prinzip verwendet. Häufig gewünschte Seiten sind dabei mehrfach im Kreislauf enthalten (**Bild 14.53**).

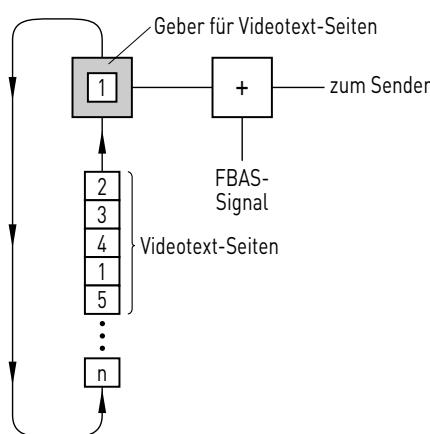


Bild 14.53 Videotext-Übertragung (Konzept)

Die Videotext-Daten werden auf der Sendeseite dem FBAS-Signal hinzugefügt. Der Zugriff auf die einzelnen Videotext-Seiten ist auf der Empfangsseite nur möglich, wenn der Fernsehempfänger mit einem **Videotext-Decoder** ausgestattet ist. Dieser selektiert zuerst die Videotext-Daten aus dem empfangenen Gesamtsignal, führt dann die Signalabbereitung durch und ermöglicht die Darstellung der gewünschten Videotext-Seite. Deren Identifizierung ist durch Nummerierung sichergestellt.



Videotext-Decoder im Fernsehempfänger selektiert die Videotext-Daten und führt die Signalabbereitung durch.

Bei einem großen Angebot an Videotext-Seiten sind Wartezeiten zwischen dem Abruf und dem Eintreffen gewünschter Seiten systembedingt nicht vermeidbar. Diesem Nachteil kann durch Zwischenspeicherung einzelner Seiten im Fernsehempfänger begegnet werden. Durch dieses Konzept ist es dem Teilnehmer möglich, auf diese Videotext-Seiten schnell zugreifen zu können.

14.2.3 Digitales Fernsehen

Digitales Fernsehen [digital video broadcasting (DVB)] bedeutet, dass die Luminanz- und Chrominanzwerte für die einzelnen Bildelemente als digitale Signale übertragen werden. Dafür ist allerdings eine wirkungsvolle Quellencodierung erforderlich, um Bitraten zu erhalten, die eine wirtschaftliche Übertragung ermöglichen. Wie bereits im Kapitel über die Quellencodierung angeführt, ist mit MPEG-2 ein solches System verfügbar, das sich seit vielen Jahren in der Praxis bewährt hat.

MPEG-2 ermöglicht die transparente Datenübertragung durch das Container-Konzept. Es handelt sich dabei um Rahmen, die eine konstante Länge von 188 Byte aufweisen, wobei 4 Byte als Kopfteil [header] dienen. Es können auf diese Weise Video, Audio und sonstige Daten in beliebiger Kombination datenreduziert übertragen werden. Das dafür benötigte Signal wird als **MPEG-2-Transportstrom** (MPEG-2-TS) bezeichnet. Er besteht aus einem Multiplex mehrerer Programmsignale, die ihrerseits mit Hilfe von Programm-Multiplexern aus den jeweiligen Video-, Audio- und Datensignalen gebildet werden (**Bild 14.54**). Auf diese Weise ist eine große Flexibilität gegeben.

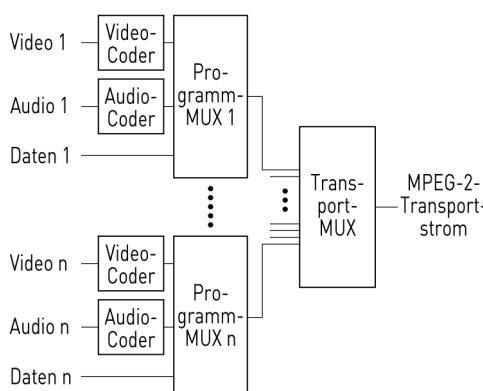


Bild 14.54 Bildung des MPEG-2-Transportstroms

Die Besonderheit von MPEG-2 liegt in der Skalierbarkeit. Dies bedeutet die Auswahlmöglichkeit zwischen verschiedenen Anwendungen und Qualitäten. Es sind bei MPEG-2 fünf Anwendungskategorien definiert, die als „Profiles“ bezeichnet werden. Außerdem gibt es vier als „Level“ bezeichnete Qualitätsstufen.



Skalierbarkeit bei MPEG-2 durch Profiles (Anwendungskategorien) und Levels (Qualitätsstufen)

Die Profiles bilden in Verbindung mit den Levels eine Matrix, so dass sich theoretisch 20 Kombinationen ergeben. Es sind folgende Arten bei den **Profiles** zu unterscheiden:

- Simple Profile (SP) → Einfachste Systemlösung
- Main Profile (MP) → Normale Systemlösung
- SNR [signal-to-noise ratio] → Systemlösung mit Rauschabstands-Skalierbarkeit
Scalable Profile (SNRP)
- Spatial Scalable Profile (SSP) → Systemlösung mit Orts-Skalierbarkeit
- High Profile (HP) → Aufwendigste Systemlösung

Bei den **Levels** gibt es folgende Formen:

- Low Level (LL) → Niedrigste Qualitätsstufe
- Main Level (ML) → Normale Qualitätsstufe
- High-1440-Level (H14L) → Hohe Qualitätsstufe
- High Level (HL) → Höchste Qualitätsstufe

Die Unterschiede bei den Profiles stellen eine Staffelung der Eigenschaften dar. So arbeitet SP ohne bidirektionale Bewegungsschätzung, bei MP ist dagegen keine Skalierbarkeit zur Anpassung an unterschiedliche Empfangssituationen gegeben, bei SNRP ist die Skalierung in Abhängigkeit vom Quantisierungsfehler möglich, bei SSP zusätzlich die Skalierung der Bildauflösung. HP verwendet alle Skalierungen und ist auch für das Bildformat 16:9 geeignet.



- SP** Ohne bidirektionale Bewegungsschätzung
- ↓
- MP** Mit bidirektionaler Bewegungsschätzung
- ↓
- SNRP** Mit Skalierung in Abhängigkeit vom Quantisierungsfehler
- ↓
- SSP** Zusätzlich Skalierung der Bildauflösung
- ↓
- HP** Alle Skalierungen und Bildformat 16:9

Eine vergleichbare Stufung liegt auch bei den Levels vor. LL bietet eine reduzierte Auflösung, während ML als Standardauflösung der Bildqualität gemäß PAL-Standard entspricht.

H14L und HL unterstützen dagegen das hochauflösende Fernsehen [high definition television (HDTV)], bei dem statt 625 Zeilen die doppelte Zeilenzahl (1250) verwendet wird. H14L gilt für HDTV mit 1440 Bildelementen pro Zeile, während es bei HL 1920 Bildelemente pro Zeile sind, weil dieser Level auch für das Bildformat 16:9 geeignet ist.



- LL** Reduzierte Auflösung
- ↓
- ML** Standardauflösung
- ↓
- H14L** HDTV, 1440 BE/Zeile
- ↓
- HL** HDTV, 1920 BE/Zeile, Bildformat 16:9

Für die Angabe der verwendeten Profile/Level-Kombinationen gilt folgende Struktur:

Kurzzeichen @ Kurzzeichen
für das Profile für das Level



Beispiel:

MP @ ML

Durch MPEG-2 stehen alle nötigen Werkzeuge zur Verfügung, um Fernsehsignale in unterschiedlicher Qualität für die Übertragung codieren zu können. In der Fachsprache sind folgende Begriffe für die typischen Qualitätsebenen üblich:

Begriff	Bild- und Tonqualität	Bitrate (bei MPEG-2)	Profile/Level-Kombinationen
LDTV [low definition television]	gering	1,5 ... 3 Mbit/s	SP@ML
SDTV [standard definition television]	normal	3 ... 6 Mbit/s	MP@ML
EDTV [extended definition television]	verbessert	6 ... 8 Mbit/s	HP@ML
HDTV [high definition television]	hoch	20 ... 30 Mbit/s	HP@HL

Die bisherigen Ausführungen zu MPEG-2 gelten vergleichbar auch für MPEG-4. Wie im Kapitel über die Quellencodierung bereits aufgezeigt wurde, umfasst diese Quellencodierung folgende Bestandteile:

- Audiocodierung AAC [advanced audio coding]
- Videocodierung AVC [advanced video coding]

Es wird auch die Bezeichnung H.264 verwendet. Dabei handelt es sich um die Referenznummer der zu MPEG-4 deckungsgleichen ITU-Empfehlung [ITU recommendation]. Da MPEG-4 gegenüber MPEG-2 bekanntlich eine erheblich stärkere Datenreduktion bewirkt und damit bei gleicher Qualität weniger Bitrate erforderlich ist, spielt dieses Verfahren eine zunehmend wichtigere Rolle.

Für DVB sind besonders SDTV und HDTV von Interesse. Bei SDTV handelt es sich im Prinzip um die Übertragung der bisher analogen Bildsignale in digitaler Form, also nach Analog-Digital-Umsetzung. Da beim analogen Fernsehen bekanntlich nur 576 Zeilen sichtbar sind und das Bildformat 4:3 betrug, ergibt sich für SDTV eine Bildauflösung von 720×576 . Dies bedeutet 720 Bildelemente pro Zeile und 576 Zeilen pro Bild, also 414 720 Bildelemente pro Bild. Es werden dabei 50 Bilder pro Sekunde übertragen. Weil bei SDTV auch weiterhin mit dem Zeilensprungverfahren [line interlacing] gearbeitet wird, hat sich als Kurzform die Bezeichnung „576i“ eingebürgert. Der Buchstabe „i“ kennzeichnet den englischen Begriff „interlaced“, was sich mit „ineinander verschachtelt“ übersetzen lässt.

Bezogen auf das Bildformat sei erwähnt, dass inzwischen auch der Übergang von 4:3 auf 16:9 erfolgt ist.

! SDTV → 576i

- Bildformat: 4:3 und 16:9
- Zeilen pro Vollbild: 576
- Bildelemente pro Zeile: 720
- Bildauflösung: 720×576
- Bildelemente pro Vollbild: 414 720
- Bilder pro Sekunde: 50

Das hochauflösende Fernsehen HDTV bietet eine sichtbar höhere Bildauflösung, wobei nur das Bildformat 16:9 zum Einsatz kommt. Es sind jedoch zwei Varianten zu unterscheiden, nämlich die Übertragung mit Halbbildern vergleichbar SDTV und die mit Vollbildern. Letztere stellt für die Flachbildschirme und Videoprojektoren [beamer] als typische Wiedergabeeinheiten die technisch bessere Lösung dar. Bei HDTV wurden 720 und 1080 Zeilen pro Bild festgelegt, was zu 1280 bzw. 1920 Bildelementen pro Zeile führt. Bei 720 Zeilen wird mit Vollbildübertragung gearbeitet und die Bezeichnung 720p verwendet. Der Buchstabe „p“ steht dabei für den Begriff „progressiv“, was in diesem Zusammenhang „kontinuierlich fortschreitend“ bedeuten soll. Die HDTV-Übertragung mit 1080 Zeilen erfolgt dagegen mit dem Zeilensprungverfahren wie bei SDTV, weshalb hierfür die Bezeichnung 1080i gilt.

Bei 720p beträgt die Bildauflösung 1280×720 , was zu 921 600 Bildelementen pro Bild führt. Wegen der Halbbildübertragung hat die Bildauflösung bei 1080i den Wert 1920×540 , was 1 036 800 Bildelemente pro Bild bedeutet.

! HDTV → 720p

- Bildformat: 16:9
- Vollbildübertragung
- Zeilen pro Vollbild: 720
- Bildelemente pro Zeile: 1280
- Bildauflösung: 1280×720
- Bildelemente pro Vollbild: 921 600
- Vollbilder pro Sekunde: 50



HDTV → 1080i

- Bildformat: 16:9
- Halbbildübertragung
- Zeilen pro Halbbild: 540
- Bildelemente pro Zeile: 1920
- Bildauflösung: 1920×540 (auf Halbbild bezogen)
- Bildelemente pro Halbbild: 1 036 800
- Halbbilder pro Sekunde: 100

Schnelle Bewegungsvorgänge und Details im Bild lassen sich bekanntlich umso besser erkennen, je höher die Bildauflösung ist. Dieser Erkenntnis trägt die als Full-HD bezeichnete HDTV-Variante Rechnung. Hier wird beim Bildformat 16:9 mit 1080 Zeilen gearbeitet, was 1920 Bildelemente pro Zeile bedeutet. Damit ergibt sich eine Vergrößerung der Bildauflösung auf 2 073 600 Bildelemente pro Bild. Als Kurzbezeichnung wird „1080p“ verwendet.



Full HD → 1080p

- Bildformat: 16:9
- Vollbildübertragung
- Zeilen pro Vollbild: 1080
- Bildelemente pro Zeile: 1920
- Bildauflösung: 1920×1080
- Bildelemente pro Vollbild: 2 073 600
- Vollbilder pro Sekunde: 50

Es gibt auch bereits erste Versuche, die Bildauflösung noch weiter zu steigern, was besonders bei großen Flachbildschirmen oder Projektionsflächen von Interesse ist. Dabei handelt es sich um die zweifache oder achtfache Bildauflösung von Full-HD.

Jede übertragene Art von DVB setzt verständlicherweise voraus, dass der Empfänger dafür ausgelegt ist. Im Regelfall sind die Geräte abwärtskompatibel. So kann zum Beispiel mit einem Empfänger für Full-HD auch HDTV und SDTV verarbeitet werden.



DVB-Empfänger sind üblicherweise abwärtskompatibel.

Neben den Fernsehprogrammen mit ihren Bild- und Tonsignalen sind bei DVB auch Hörfunkprogramme und beliebige Datendienste möglich, besonders natürlich solche, die für ihre Funktion einen Bildschirm erfordern. Solche Dienste werden üblicherweise als Applikationen (= Anwendungen) bezeichnet und sind durch entsprechende Bitraten gekennzeichnet, die dann einen Bestandteil des Transportstroms (TS) bilden. Diese Daten werden entweder einem Programm-Multiplexer oder direkt dem Transport-Multiplexer zugeführt. Auf der Empfangsseite muss allerdings für jede Applikation die entsprechende Software für deren Verarbeitung zur Verfügung stehen.



Applikationen [application] = Beliebige Datendienste, die zusammen mit den Programmen im DVB-Transportstrom übertragen werden und für deren Verarbeitung auf der Empfangsseite entsprechende Software erforderlich ist.

Eine Besonderheit von DVB stellen die Service-Informationen (SI) dar, die als Teil des DVB-Transportstroms standardisiert sind. Es handelt sich um technische, betriebliche und inhaltliche Parameter, die in Form definierter Tabellen übertragen werden. Deren grundätzliche Struktur ist aus **Bild 14.55** ersichtlich.

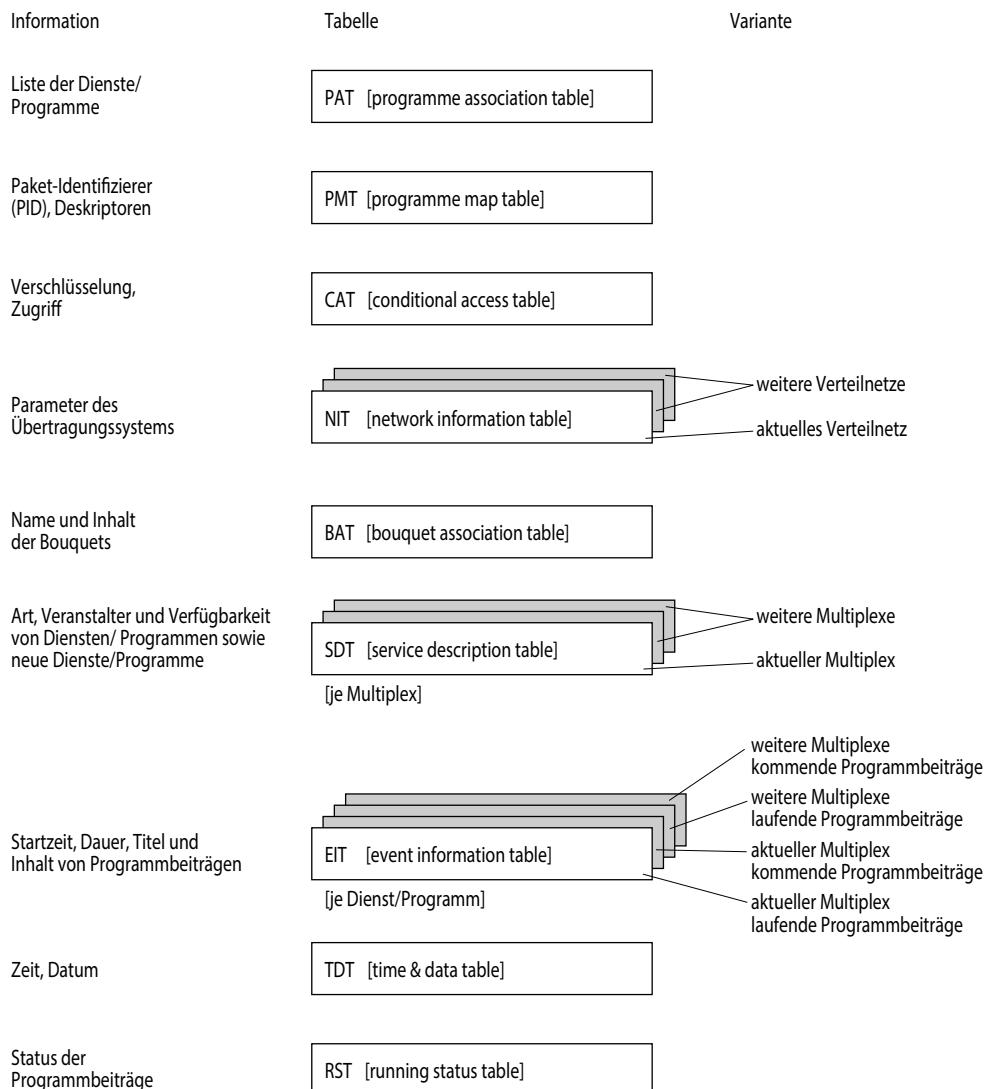


Bild 14.55 Tabellen der Serviceinformationen (SI)



Service-Informationen (SI) = Zusatzdaten im DVB-Signal über technische, betriebliche und inhaltliche Parameter der Übertragung

Die Service-Informationen (SI) unterstützen folgende Funktionen auf der Empfangsseite:

- Automatische Konfiguration des Empfangsgerätes entsprechend der Programmwahl/Dienstewahl
- Realisierung einer komfortablen Nutzerführung durch einen elektronischen Programmführer

Der elektronische Programmführer [electronic programme guide (EPG)] ermöglicht die strukturierte Darstellung der großen Zahl empfangbarer Programme und Dienste, die dem Nutzer eine schnelle Auswahl und einen komfortablen Zugriff ermöglichen.



Elektronische Programmführer [electronic programme guide (EPG)] = Strukturierte Darstellung der empfangbaren Programme und Dienste

Bei DVB wird für Programme oder Dienste auch das bereits behandelte Conditional Access (CA) verwendet, um den Zugriff nur autorisierten Nutzern zu ermöglichen. Das kann sich gegebenenfalls auch nur auf einzelne Beiträge beziehen.

DVB ist für die Übertragungsarten Satellit, Kabel und Terrestrik standardisiert. Das Konzept auf der Sendeseite und der Empfangsseite ist in allen drei Fällen gleich. Auf der Sendeseite handelt es sich um die Quellencodierung, die Kanalcodierung und die Modulation (**Bild 14.56**). Auf der Empfangsseite werden die Demodulation, die Kanaldecodierung und die Quellendecodierung durchgeführt. Soll Verschlüsselung verwendet werden, dann erfolgt diese in der Regel nach der Quellencodierung (**Bild 4.57**).

DVB-Sendeseite	DVB-Empfangsseite
■ Quellencodierung	■ Demodulation
■ Kanalcodierung	■ Kanaldecodierung
■ Modulation	■ Quellendecodierung

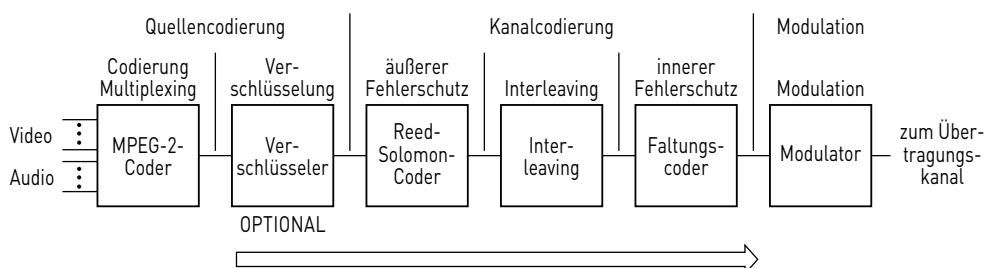


Bild 14.56 DVB-Sendeseite (Konzept)

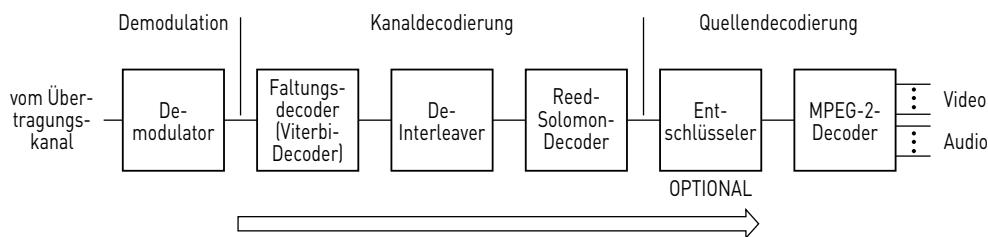


Bild 14.57 DVB-Empfangsseite (Konzept)

Bei dem äußeren Fehlerschutz der Kanalcodierung wird ein Reed-Solomon-Code (RS-Code) verwendet, der den üblichen Transportrahmen von 188 Byte um 16 Byte Redundanz ergänzt, wodurch sich ein Gesamtrahmen von 204 Byte ergibt. Deshalb gilt die Bezeichnung RS (204, 188). Er gewährleistet besonders Schutz gegen Bündelfehler. Das anschließende Interleaving vereinzielt Burstfehler, was für den nachgeschalteten bitorientierten Faltungscoder wichtig ist.

! RS (204, 188) = Reed-Solomon-Code mit 188 Byte langen Transportrahmen, die um 16 Byte Redundanz auf 204 Byte ergänzt sind.

Bei der Modulation werden solche Verfahren verwendet, die bezogen auf den jeweiligen Übertragungskanal optimal geeignet sind.

Digitales Fernsehen über Satellit

DVB über Satellit (DVB-S) ist gemäß EN 300 421 standardisiert. Das System arbeitet im Frequenzbereich 10,7...12,75 GHz, wobei die Kanalbandbreite, also die Transponderbandbreite, in der Regel 36 MHz beträgt. Das vom Satelliten abgestrahlte Signal muss bis zur Erdoberfläche in Deutschland etwa 40 000 km zurücklegen, was sehr kleine Feldstärkewerte am Empfangsort bedeutet. Da außerdem die erreichbaren Störabstände bei der Satellitenübertragung relativ klein sind, wurde die auch als QPSK bezeichnete vierwertige Phasenumtastung (4-PSK) als Modulationsverfahren festgelegt. Dies führt zu einer Brutto-Bandbreitenausnutzung von 1,57 (bit/s)/Hz. Die nutzbare Nettobitrate ist davon abhängig, welche Coderate für den Faltungscoder gewählt wird. Die möglichen Werte liegen zwischen 1/2 und 7/8, was eine Netto-Bandbreitenausnutzung zwischen 0,7 (bit/s)/Hz und 1,3 (bit/s)/Hz bedeutet. Außerdem muss ein Mindestwert für den Träger-Rausch-Abstand (CNR) eingehalten werden. Bezogen auf die Transponderbandbreite von 36 MHz gilt:

Coderate	1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
Nettobitrate (in Mbit/s)	26,1	34,8	39,1	43,5	45,6
CNR_{min} (in dB)	4,1	5,9	6,9	7,9	8,5

Bei DVB-S kommt als Quellencodierung MPEG-2 zum Einsatz. Dies stellt allerdings keinen Bestandteil des DVB-Standards dar, sondern wurde aus Gründen der Zweckmäßigkeit gewählt.



DVB-S [digital video broadcasting via satellite]

Digitales Satellitenfernsehen

Standard: EN 300 421

Quellencodierung: MPEG-2

Kanalbandbreite: 36 MHz (typisch)

Modulation: 4-PSK (= QPSK)

Kanalcodierung: RS (204, 188), Faltungscode

Coderate: 1/2...7/8

Träger-Rausch-Abstand: 4,1...8,5 dB

Netto-Bitrate: 26,1...45,6 Mbit/s

Das permanente Streben nach größerer Frequenzeffizienz führte inzwischen zur 2. Generation des DVB-S-Standards, als Kurzbezeichnung gilt deshalb konsequenterweise DVB-S2. Es handelt sich um den Standard EN 302 307. Die besonderen Kennzeichen von DVB-S2 sind eine gegenüber DVB-S leistungsfähigere Kanalcodierung und der Einsatz höherwertiger Modulationsverfahren.

Die Kanalcodierung arbeitet mit dem BCH-Code [Base, Chaudhuri, Hocquenghem] als äußeren Fehlerschutz und dem LDPC [low density power code] als innerem Fehlerschutz. Dieses Verfahren ermöglicht Coderaten von 1/2 bis 9/10 und arbeitet äußerst robust. Es kann Störabstände zwischen -2 dB und 16 dB bewältigen. Als Modulation sind bei DVB-S2 neben der für DVB-S festgelegten 4-PSK nun auch 8-PSK, 16-APSK und 32-APSK zugelassen. Bei diesen höherwertigen Verfahren können mehr Bit pro Zeichen übertragen werden. Es ergeben sich dadurch größere Symbolraten und bei gleichem Träger-Rausch-Abstand gegenüber DVB-S auch größere Nettobitraten. Abhängig von der gewählten Coderate und dem eingesetzten Modulationsverfahren sind Steigerungen von 30 Prozent und mehr möglich.



Beispiel:

Bei einem Satelliten mit EIRP = 53,7 dBW und CNR = 7,8 dB ergibt sich:

- **DVB-S** mit Coderate 7/8 und Modulation 4-PSK
 - Symbolrate: 27,5 MBaud
 - Nettobitrate: **44,4 Mbit/s**
- **DVB-S2** mit Coderate 2/3 und Modulation 8-PSK
 - Symbolrate: 29,7 MBaud
 - Nettobitrate: **58,8 Mbit/s**

Bei DVB-S2 wird MPEG-4 für die Quellencodierung verwendet, was gegenüber MPEG-2 eine Verdoppelung der Übertragungskapazität ermöglicht.

Für den Empfang von DVB-S2 sind bei der Satellitenempfangsanlage keine Änderungen erforderlich, wenn diese für den gesamten Satelliten-Frequenzbereich 10,7...12,75 GHz ausgelegt ist. Ansonsten bedarf es der Nachrüstung durch Austausch des LNB und ggf. Ergänzung der Leitungsverbindungen zwischen LNB und Multischalter. Es wird allerdings ein für DVB-S2 geeigneter Empfänger (z. B. Set-Top-Box) benötigt. Obwohl solche Geräte so aufgebaut sind, dass sie auch DVB-S verarbeiten können, ist Kompatibilität zwischen DVB-S2 und DVB-S grundsätzlich nicht gegeben. Der Standard bietet jedoch die Option einer Verknüpfung. In diesem Fall wird dem 4-PSK-Signal mit DVB-S-Inhalten ein 8-PSK-Signal mit DVB-S2-Inhalten überlagert und gemeinsam übertragen. Bei diesem als **hierarchische Modulation** bezeichneten Konzept sind vorhandene DVB-S-Empfänger weiter verwendbar, während bei den DVB-S2-Empfängern Übertragungskapazität für zusätzliche Programme und Dienste zur Verfügung steht.

Bei DVB-S2 steht als besonderes Leistungsmerkmal auch ACM [adaptive coding and modulation] zur Verfügung. Damit können die Übertragungsparameter von Datenrahmen [data frame] zu Datenrahmen geändert werden. Die Anpassung an die Konditionen des Übertragungskanals erfolgt durch relevante Informationen von der Empfangsseite.



DVB-S2 [DVB via satellite, second generation]

Digitales Satellitenfernsehen, zweite Generation

Standard: EN 302 307

Quellencodierung: MPEG-4

Kanalbandbreite: 36 MHz (typisch)

Modulation: 4-PSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK

Kanalcodierung: BCH-Code, LDPC

Coderate: 1/2...9/10

Träger-Rausch-Abstand: -2...16 dB

Netto-Bitrate: bis 60 Mbit/s

Digitales Fernsehen über Kabel

Die bei DVB-S/S2 bestehenden Problemstellungen bezüglich Dämpfung und Störabständen bestehen bei der Übertragung von DVB über Breitbandkabelnetze nicht. Deshalb können die Modulation und der Fehlerschutz weniger robust sein, was eine positive Auswirkung auf die Übertragungskapazität hat.

Für DVB über Breitbandkabelnetze gilt die Kurzbezeichnung DVB-C. Dabei steht der Buchstabe C für „cable“ (Kabel). DVB-C ist gemäß EN 300 429 standardisiert und für alle 7-MHz-Kanäle und 8-MHz-Kanäle in Breitbandkabelnetzen geeignet. Wie bei DVB-S wird auch bei DVB-C als Quellencodierung MPEG-2 verwendet. Das gilt in gleicher Weise für die Kanalcodierung mit dem RS-(204,188-)Code und dem Faltungscode. Als Modulationsverfahren wurde Quadratur-Amplitudenmodulation (QAM) festgelegt und zwar die Variante 16-QAM, 64-QAM und 256-QAM.



Beispiel:

DVB-C mit 64-QAM führt in einem 8-MHz-Kanal zu folgenden Werten:

- Nettobitrate: 38,5 Mbit/s
- Träger-Rausch-Abstand: 28 dB
- Netto-Bandbreiteausnutzung: 4,8 (bit/s)/Hz

Bei 7-MHz-Kanälen würden sich die Werte entsprechend reduzieren.

Die Nettobitraten liegen bei DVB-C zwischen 25,6 Mbit/s und 51,3 Mbit/s. Bei den Störabständen ist der Bereich zwischen 18 dB (bei 16-QAM) und 29,5 dB (bei 256-QAM) möglich.

Bedingt durch die Übertragungskapazitäten ist es möglich, dass der Inhalt eines Transponders genau in einen Kabelkanal „passt“, was aufwendige Wandlungen zwischen Satellit und Kabel verhindert.



DVB-C [digital video broadcasting via broadband cable networks]

Digitales Kabelfernsehen

Standard: EN 300 429

Quellencodierung: MPEG-2

Kanalbandbreite: 8 MHz (typisch)

Modulation: 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM

Kanalcodierung: RS-(204, 188-)Code, Faltungscode

Träger-Rausch-Abstand: 18...29,5 dB

Netto-Bitrate: 25,7...51,3 Mbit/s

Wie bei DVB-S gibt es auch eine zweite Generation von DVB-C. Sie wird konsequenterweise als DVB-C2 bezeichnet und ist als EN 302 769 standardisiert. DVB-C2 ist durch folgende Besonderheiten gekennzeichnet:

- Als Quellencodierung wird MPEG-4 eingesetzt.
- Es wird vergleichbar DVB-S2 als Kanalcodierung BCH-Code und LDPC verwendet.
- Es sind nun auch die höherwertigeren Modulationsverfahren 1024-QAM und 4096-QAM möglich.
- Es besteht die Möglichkeit der Kanalbündelung. Dabei wird OFDM genutzt, so dass im vorgesehenen Frequenzbereich durchgängig Träger vorhanden sind.
Diese Kanalbündelung kann grundsätzlich auch über große Frequenzbereiche erfolgen.
- Es werden die typischen Charakteristika von In-Haus-Netzen in Koaxialtechnik berücksichtigt.
- DVB-C2 ist verträglich mit dem europäischen DOCSIS-Standard [data over cable service interface specification].
- DVB-C2 unterstützt auch die in Einführung befindliche Adressierung im Internet IPv6.

Die bei DVB-C2 möglichen neuen Modulationsverfahren führen zu einer besseren Bandbreitenausnutzung und damit auch zu einer größeren Übertragungskapazität. Dies erfordert allerdings größere Störabstände. Es gilt:

	1024-QAM	4096-QAM
Bandbreitenausnutzung		
■ theoretisch	10 (bit/s)/Hz	12 (bit/s)/Hz
■ praktisch	8,5 (bit/s)/Hz	10,5 (bit/s)/Hz
Übertragungskapazität (bezogen auf 8-MHz-Kanal)	68 Mbit/s	84 Mbit/s
Erforderlicher Störabstand	30 dB	46 dB

Es sei darauf hingewiesen, dass für DVB-C2 geeignete Empfänger erforderlich sind. Die Einführung von DVB-C2 hängt von den Geschäftsmodellen und sonstigen Erkenntnissen der Kabelnetzbetreiber/Plattformbetreiber ab.



DVB-C2 [DVB via cable systems, second generation]

Digitales Kabelfernsehen, zweite Generation

Standard: EN 302 769

Quellencodierung: MPEG-4

Kanalbandbreite: 8 MHz (typisch)

Modulation: 1024-QAM, 4096-QAM

Kanalcodierung: BCH-Code, LDPC

Träger-Rausch-Abstand: 30...46 Mbit/s

Netto-Bitrate (bei 8-MHz-Kanal): 68...84 Mbit/s

Besonderheiten: Möglichkeit der Kanalbündelung, dabei Einsatz von OFDM

Digitales Fernsehen über Terrestrik

DVB über terrestrische Sender wird als DVB-T bezeichnet, wobei der Buchstabe „T“ für „terrestrial“ steht, was terrestrische Sendernetze bedeutet. Es gibt bei DVB-T einige Vergleichbarkeiten mit dem digitalen Hörfunk DAB. Der für DVB-T geltende Übertragungsstandard ETS 300 744 sieht nämlich auch das Mehr-Träger-Verfahren COFDM vor. Dabei kann im Prinzip auf allen VHF- und UHF-Kanälen gearbeitet werden. Für die Zahl der Träger sind bezogen auf 8-MHz-Kanäle folgende Modi festgelegt:

- 2k-Modus: 1795 Träger (netto)/2048 Träger (brutto)
- 8k-Modus: 6817 Träger (netto)/8192 Träger (brutto)

Auch bei DVB-T wird mit Schutzintervallen [guard interval] gearbeitet, weil bei terrestrischem Empfang stets Mehr-Wege-Empfang auftreten kann. Für das Verhältnis der Dauer

des Schutzintervalls T_g zur Symboldauer T_s sind die Stufen 1/4, 1/8, 1/16 und 1/32 zulässig. Ihr Wert beeinflusst unmittelbar den zulässigen Senderabstand d_{zul} in Gleichwellennnetzen [single frequency network (SFN)]. Es gilt:

		T_g / T_s	1/4	1/8	1/16	1/32
2k-Modus	d_{zul} (in km)	16,8	8,2	4,2	2,1	
8k-Modus	d_{zul} (in km)	67,2	33,6	16,8	8,4	

$$T_g = \text{Schutzintervalldauer}$$

$$T_s = \text{Symboldauer}$$

$$d_{zul} = \text{zulässiger Senderabstand im SFN}$$

Jeder Träger des COFDM-Signals wird individuell moduliert. Dafür sind QPSK, 16-QAM und 64-QAM vorgesehen. Die für ein DVB-T-System verfügbare Netto-Bitrate bestimmt sich aus der Modulationsart, der Coderate für den Faltungscoder und dem Verhältnis T_g/T_s . Die beiden Modi 2k und 8k müssen nicht gesondert betrachtet werden, weil das Verhältnis T_g/T_s als relative Angabe für beide gleich ist (**Tabelle 14.3**).

 Nettobitrate DVB-T = f(Modulationsart für die Einzelträger, Coderate und Verhältnis T_g/T_s). ■

Tabelle 14.3 Nettobitrate bei T-DVB

		Nettobitrate (Mbit/s)			
		Schutzintervalldauer T_g /Symboldauer T_s			
Modulation	Coderate	1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	4,98	5,53	5,85	6,03
	2/3	6,64	7,37	7,81	8,04
	3/4	7,46	8,29	8,78	9,05
	5/6	8,29	9,22	9,76	10,05
	7/8	8,71	9,68	10,25	10,56
16-QAM	1/2	9,95	11,06	11,71	12,06
	2/3	13,27	14,75	15,61	16,09
	3/4	14,93	16,59	17,56	18,10
	5/6	16,59	18,43	19,52	20,11
	7/8	17,42	19,35	20,49	21,11
64-QAM	1/2	14,93	16,59	17,56	18,10
	2/3	19,91	22,12	23,42	24,13
	3/4	22,39	24,88	26,35	27,14
	5/6	24,88	27,65	29,27	30,16
	7/8	26,13	29,03	30,71	31,67

Bei extrem geschützter Übertragung und robuster Modulation ergibt sich eine Nettobitrate von etwa 5 Mbit/s, was nur für ein Fernsehprogramm ausreicht. Bei geringstem Schutz und höherwertiger Modulation steigt der Wert auf knapp 32 Mbit/s. In der Praxis liegen die typischen Werte für die Netto-Bitrate im Bereich 12...20 Mbit/s, weil stationärer, portabler und mobiler Empfang möglich sein sollen.

	Fehlerschutz:	gering	...	hoch
		↓	...	↓
	Netto-Bitrate:	groß	...	klein

Die Werte für den mindestens erforderlichen Träger-Rausch-Abstand hängen nicht nur von der Modulationsart und der Coderate ab, sondern auch von den Gegebenheiten, die bei der Übertragung vorliegen. Es lassen sich deshalb verschiedene „Kanal-Modelle“ unterscheiden. Sie sind nach Forschern und Entwicklern benannt, die zu der Thematik wesentliche Erkenntnisse beigetragen haben.

Die relevanten Unterschiede bei den **Kanal-Modellen** betreffen die Art der Antenne und die Empfangsart. Beim Gauß-Kanal handelt es sich um eine auf den Sender ausgerichtete Richtantenne, außerdem soll nur direkter Empfang vom Sender erfolgen. Beim Rice-Kanal wird zwar auch von einer gerichteten Sendeantenne ausgegangen, jedoch nun der übliche Mehr-Wege-Empfang berücksichtigt. Die ungünstigste Situation ist beim Rayleigh-Kanal gegeben. Er bezieht sich auf eine ungerichtete Sendeantenne (also ein kreisförmiges Strahlungsdiagramm) und Mehr-Wege-Empfang. Es gilt nachfolgende Zusammenfassung:

Kanal-Modell	Empfangsantenne	Empfangsart
Gauß-Kanal	ungerichtet	Direktempfang
Rice-Kanal	gerichtet	Mehr-Wege-Empfang
Rayleigh-Kanal	ungerichtet	Mehr-Wege-Empfang

Unter Berücksichtigung der relevanten Parameter ergibt sich damit für die Mindestwerte des Signal-Rausch-Abstandes ein Bereich von 3,1 dB bis 27,9 dB (**Tabelle 14.4**).

Tabelle 14.4 Signal-Rausch-Abstand in Abhängigkeit vom Kanal-Modell

Modulation	Coderate	Signal-Rausch-Abstand (Mindestwert) [in dB]		
		Kanal-Modell		
QPSK	1/2	3,1	3,6	5,4
	2/3	4,9	5,7	8,4
	3/4	5,9	6,8	10,7
	5/6	6,9	8,0	13,1
	7/8	7,7	8,7	16,3

Tabelle 14.4 Signal-Rausch-Abstand in Abhängigkeit vom Kanal-Modell (*Fortsetzung*)

		Signal-Rausch-Abstand (Mindestwert) [in dB]		
		Kanal-Modell		
Modulation	Coderate	Gauß	Rice	Rayleigh
16-QAM	1/2	8,8	9,6	11,2
	2/3	11,1	11,6	14,2
	3/4	12,5	13,0	16,7
	5/6	13,5	14,4	19,3
	7/8	13,9	15,0	22,8
64-QAM	1/2	14,4	14,7	16,0
	2/3	16,5	17,1	19,3
	3/4	18,0	18,6	21,7
	5/6	19,3	20,0	25,3
	7/8	20,1	21,0	27,9

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass der erforderliche Störabstand mit steigender Wertigkeit des Modulationsverfahrens, abnehmendem Fehlerschutz und zunehmender Komplexität des Kanal-Modells größer wird.



DVB-T [digital video broadcasting via terrestrial networks]

Digitales Antennenfernsehen

Standard: EN 300 774

Quellencodierung: MPEG-2

Kanalbandbreite: 7 MHz oder 8 MHz

Übertragungsverfahren: COFDM (2k, 8k)

Modulation: 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM

Kanalcodierung: RS-(204,188)-Code, Faltungscode

Coderate: 1/2...7/8

T_g/T_s : 1/4...1/32

Träger-Rauschabstand: 3,1...27,9 dB

Netto-Bitrate: 5 ... 31,7 MHz

Die zweite Generation von DVB-T wird als DVB-T2 bezeichnet, ist als EN 302 755 standardisiert und weist folgende Veränderungen gegenüber DVB-T auf:

- MPEG-4 als Quellencodierung
- Beim Übertragungsverfahren COFDM zusätzlich die Modi 1k, 4k, 16k und 32k

- 256-QAM als zusätzliches Modulationsverfahren
- Ergänzung der Schutzintervalle um 19/128, 19/256 und 1/128
- Verwendung des BCH-Codes und des LDPC für die Kanalcodierung
- Optimierungen beim Zeit- und Frequenz-Interleaving

Alle aufgeführten Spezifikationen stellen eine Art Werkzeugkiste [toolbox] dar. Abhängig vom gewählten Parameter sind Netto-Bitraten von 7,5 Mbit/s bis 50,3 Mbit/s pro Kanal erreichbar. Es können außerdem Gleichwellennetze mit Senderabständen bis 170 km aufgebaut werden.

DVB-T2 unterstützt auch die als **Physical Layer Pipe** (PLP) bezeichnete Spezifikation. Damit können unterschiedliche Anwendungen (z.B. Programme) in einem Kanal übertragen werden, wobei für jede Anwendung eine andere Robustheit möglich ist.



Beispiel:

Mit der Spezifikation PLP sind gleichzeitig folgende Funktionen mit einem Kanal möglich:

- Versorgung stationärer Empfänger mit HDTV über Außenantenne
- Versorgung portabler/mobile Empfänger mit SDTV über integrierte Antennen oder Zimmerantennen
- Versorgung stationärer/portabler/mobile Empfänger mit Radioprogrammen

In der Praxis ist stets ein Kompromiss zwischen Signalqualität und Robustheit erforderlich. So wird bei stationärem Empfang in der Regel eine möglichst große Nettobitrate angestrebt, um hohe Signalqualität zu erreichen. Beim Mobilempfang spielt dagegen die Robustheit gegen Störeinflüsse auf dem Übertragungsweg die wichtigere Rolle.

Durch die Verwendung des **Zeit-und-Frequenzscheiben-Verfahrens** [time frequency slicing] können bei DVB-T2 mehrere Kanäle zu einem virtuellen Kanal gebündelt werden, wenn für bestimmte Anwendungen mehr Übertragungskapazität erforderlich ist, als ein Kanal bereitstellen kann. Die Kanäle müssen dabei nicht benachbart sein.

Die durch Störungen eines Kanals möglichen Informationsverluste lassen sich bei DVB-T2 mit Hilfe der **Empfangsdiversität** reduzieren. Dabei werden die zu übertragenden Programme in festen Zeitabschnitten ohne zeitliche Überlappungen auf mehrere Kanäle verteilt. Auftretende Störungen sind deshalb in den meisten Fällen durch die Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC) kompensierbar.

Wegen der gegenüber DVB-T erheblich größeren Übertragungskapazität bietet DVB-T2 eine bessere Frequenzökonomie. Es lässt sich also die stets begrenzte Zahl terrestrischer Frequenzen für mehr Programme nutzen, besonders in Verbindung mit der Quellencodierung MPEG-4.



DVB-T2 [DVB via terrestrial networks generation, second]

Digitales Antennenfernsehen, zweite Generation

Standard: EN 302 755

Quellencodierung: MPEG-4

Kanalbandbreite: 8 MHz (typisch)

Übertragungsverfahren: COFDM (1k, 2k, 4k, 8k, 16k, 32k)

Modulation: 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM

Kanalcodierung: BCH-Code, LPDC

Coderate: 1/2 ... 5/6

T_G/T_S : 1/4 ... 1/128

Träger-Rausch-Abstand: 14,4 ... 39,6 dB

Netto-Bitrate: 7,5 ... 50,3 Mbit/s

Digitales Fernsehen über DSL

Beim Telefonfestnetz besteht die grundsätzliche Möglichkeit, ergänzend zur Übertragungskapazität für Telefonie auch solche für zusätzliche Datenübertragung verfügbar zu machen. Dieses Konzept wird als digitale Teilnehmer-Anschlussleitung [digital subscriber line (DSL) bezeichnet. Dabei lassen sich Bitraten bis 50 Mbit/s erreichen.

Über einen DSL-Anschluss kann der Internetzugang realisiert werden, es ist aber ebenso die Übertragung des digitalen Fernsehens möglich. Im Gegensatz zu den bisher betrachteten DVB-Varianten basiert dieses Verfahren nun allerdings auf dem Internet Protokoll (IP), also dem für das Internet verbindlich festgelegten Übertragungsprotokoll.

Dabei handelt es sich zwar wie bei DVB um rahmenweise Übertragung der digitalen Fernsehsignale, jedoch unterscheiden sich die Struktur der Rahmen und die Abwicklung des Datentransports. Zur Unterscheidung zu DVB wird deshalb das digitale Fernsehen über DSL als Internet Television (IPTV) bezeichnet.



IPTV [Internet television] = Digitales Fernsehen über DSL des Telefonfestnetzes

Wegen der unterschiedlichen Übertragungsmechanismen sind IPTV und DVB nicht kompatibel. Vorhandene DVB-Empfänger sind deshalb nicht für IPTV verwendbar und umgekehrt.



Zwischen IPTV und DVB besteht keine Kompatibilität.

Da es sich beim Telefonfestnetz im Gegensatz zum offenen Internet um ein geschlossenes Netz handelt, kann der Netzbetreiber eine als **Dienstgüte** [quality of service (QoS)] bezeichnete gute bis sehr gute Signalqualität sicherstellen. Für die ungestörte Bildwiedergabe müssen allerdings am DSL-Anschluss folgende Bitraten verfügbar sein:

- SDTV (Normal auflösendes Fernsehen): mindestens 4 Mbit/s
- HDTV (Hochauflösendes Fernsehen): mindestens 10 Mbit/s

Es ist dabei zu berücksichtigen, dass am DSL-Anschluss neben IPTV gleichzeitig auch das Internet genutzt werden kann. Die am Anschluss verfügbare Bitrate müssen sich dann beide Anwendungen „teilen“, es handelt sich nämlich um ein „shared medium“.

Bei IPTV liegt im Gegensatz zu DVB Unicast-Betrieb vor. Der Nutzer ruft mit Hilfe der Fernbedienung seines IPTV-Empfängers das von ihm gewünschte Programm im Netzknoten ab. Dieses wird ihm dann über seine individuelle Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL) verfügbar gemacht. Grundsätzlich besteht allerdings auch die Möglichkeit, zwei oder mehr unterschiedliche Programme gleichzeitig zu empfangen, wenn der DSL-Anschluss eine dafür entsprechende Bitrate aufweist, der Netzbetreiber dieses Konzept unterstützt und der erforderliche technische Aufwand auf der Empfangsseite getrieben wird.



Bei IPTV handelt es sich um Unicast-Betrieb über die Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL).

14.2.4 Hybrides Fernsehen

Die Verbreitung von Rundfunk, also Fernsehen und Radio, erfolgte ursprünglich nur über terrestrische Sender. Seit Mitte der achtziger Jahre kamen die Übertragungswege Kabel und Satellit dazu. Inzwischen spielt für diese Mediennutzung auch das Internet zunehmend eine Rolle.

Beim Rundfunk handelt es sich bekanntlich um einen reinen Verteildienst, für den auch der englische Fachbegriff „Broadcast“ gilt. Das Internet ist dagegen ein interaktives Medium, gekennzeichnet durch die Datenrate (Bitrate) als Datenübertragungsgeschwindigkeit. Es war eigentlich nur für den Austausch von Daten bestimmt, durch die Entwicklung sogenannter Streamingverfahren ist inzwischen aber auch die Übertragung von Audio und Video in guter bis ausgezeichneter Qualität möglich. Die meisten Internetanwendungen erfordern große Datenraten, weshalb dafür üblicherweise die englische Bezeichnung „Broadband“ verwendet wird. Es gilt aber auch der deutsche Begriff „Breitband“:



- **Broadcast** → Verteildienst → Rundfunk
- **Broadband** → breitbandiger interaktiver Dienst → Internet

Broadcast und Broadband weisen unterschiedliche Merkmale auf. Bei Broadcast liegt unidirektionale Übertragung vor. Auf die von einer Stelle verbreiteten Programme können dabei alle Nutzer gleichzeitig zugreifen, was als Massenkommunikation bezeichnet werden wird. Broadband steht dagegen für bidirektionale Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, also Individualkommunikation. Für jede Verbindung muss auf der Sendeseite ein als Port bezeichneter Anschluss zur Verfügung stehen. Sollen viele Broadband-Zugriffe gleichzeitig erfolgen können, dann ist ein entsprechender technischer Aufwand erforderlich.



Broadband bedeutet Individualkommunikation und erfordert stets Punkt-zu-Punkt-Verbindungen.

Der Computer (PC, Laptop, Notebook, ...) ist vom Konzept her für Broadband ausgelegt. Durch den Einsatz entsprechender Steckkarten, Sticks oder sonstiger Ausstattung ist allerdings mittlerweile auch der konventionelle Fernsehempfang via Satellit, Kabel und Terrestrik möglich. Es liegt dann **hybride Nutzung** vor. Der Begriff „Hybrid“ stammt aus dem Lateinischen und bedeutet „von zweierlei Herkunft“. Im betrachteten Fall handelt es sich um Broadcast (= klassischer Rundfunk) und Broadband (= Internet).



Hybrid [lat.] = von zweierlei Herkunft

Die hybride Nutzung von Broadcast und Broadband mit dem Computer ist aus folgenden Gründen für das Wohnzimmer nicht geeignet:

- Der Bildschirm des Computers ist gegenüber dem des Fernsehgerätes klein, 15 Zoll bis 27 Zoll Bildschirmdiagonale stehen da 32 Zoll bis 80 Zoll gegenüber.
- Der übliche Betrachtungsabstand beträgt beim Computer etwa 40 cm, während es sich beim Fernsehgerät um 2,5 m und mehr handelt.
- Computer sind für Einzelnutzer ausgelegt, während bei Fernsehgeräten mehrere Betrachter gleichzeitig typisch sind.

Es stellte sich die Frage, ob und wie Inhalte aus dem Internet auch über den großen Fernsehbildschirm dargestellt werden können. Die einfachste Lösung für solche hybride Fernsehgeräte wäre es, eine Set-Top-Box (STB) als digitalen Empfänger und einen Multimedia-PC zusammen mit einem Flachbildschirm in ein Gehäuse zu integrieren, wobei Letzterer entweder von der STB oder dem PC genutzt wird. Dieser Lösungsansatz ist allerdings wenig „wohnzimmertauglich“, weil für die Bedienung des Computers Tastatur und Maus erforderlich sind, was der gewohnten Bedienung des Fernsehgerätes mit der Fernbedienung entgegensteht. Bei dem als **Hybrid-TV**, Smart-TV oder Connected-TV bezeichneten hybriden Fernsehen ist deshalb die Bedienung mit Hilfe der Fernbedienung vorgesehen, um neben dem klassischen Fernsehprogramm auch Internetanwendungen auf den Bildschirm zu bringen.



Beim hybriden Fernsehen wird die Fernbedienung auch für Internetanwendungen eingesetzt.

Bei diesen **Anwendungen** [application (App)] handelt es sich vorrangig um den Zugriff auf Portale wie ARD-Mediathek, YouTube, AutoBild, Netlog, tomtom, Falk, Börsenzeitung und viele andere (**Bild 14.58**). Die Auswahl wird üblicherweise vom Gerätehersteller festgelegt, in der Regel kann allerdings der Nutzer diese durch Eingabe entsprechender Internetadressen ergänzen. Jedes Portal wird auf dem Fernsehbildschirm als grafisches Symbol [icon] signalisiert. Deren Auswahl und Aktivierung aus dem Gesamtangebot ist

dem Nutzer mit der Fernbedienung möglich. Es stehen dafür die Zifferntasten (0...9), die Richtungstasten (= Cursortasten), die OK-Taste und die vier Farbtasten (Rot, Grün, Gelb, Blau) zur Verfügung (**Bild 14.59**).



Bild 14.58 Internetportale

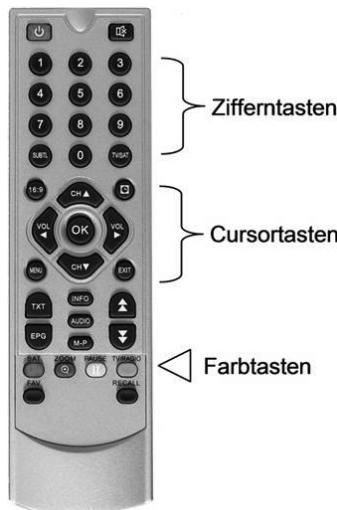


Bild 14.59 Fernbedienung



Anwendung [application (App)] = Durch grafisches Symbol [icon] auf dem Bildschirm signalisiertes Internetportal

Hybride Fernsehgeräte unterscheiden sich äußerlich nicht von den bisherigen Fernsehgeräten, jedoch in ihrem „Innenleben“. Sie weisen nämlich neben einem Anschluss für Kabel

oder Satellit auch einen Anschluss für den Internetzugang auf. Letzterer kann leitungsgebunden im Rahmen eines lokalen Datennetzes [local area network (LAN)] erfolgen und/oder funkgestützt über ein drahtloses lokales Datennetz [wireless local area network (WLAN)]. Nur auf diese Weise lässt sich die für jede Internetanwendung erforderliche Interaktivität realisieren.



Hybride Fernsehgeräte weisen einen Antennenanschluss und einen Internetanschluss auf.

Für die Darstellung von Internetinhalten auf dem Fernsehbildschirm bedarf es wegen seiner Größe und Bildauflösung stets eines **Browsers**, also einer spezifischen Software als Anwendungsprogramm. Es liegt eine dem Computer vergleichbare Situation vor, wenn zum Beispiel für die E-Mail-Abwicklung „Outlook“ oder für die Erstellung von Präsentationen „PowerPoint“ genutzt wird. In der Anfangsphase des hybriden Fernsehens kamen für die aufgezeigten Browser unterschiedliche Arten zum Einsatz und zwar abhängig von den Geräteherstellern, was in der Regel auch unterschiedliche Programmiersprachen bedeutete. Bei solchen firmenspezifischen Aufbereitungen für die Bildschirmwiedergabe handelt es sich um proprietäre Konzepte. Diese sind stets aufwendig, stellen vertikale Märkte dar und fördern nicht die Akzeptanz der Nutzer für das hybride Fernsehen.

Einen zweckmäßigen Lösungsansatz für diese Problematik stellt ein Standard dar, der am 10. Juni 2010 als ETSI TS 102 796 unter dem Titel „Hybrid Broadcast Broadband Television“ (**HbbTV**) herausgegeben wurde (**Bild 14.60**). Dieses transparente Regelwerk legt einheitliche Rahmenbedingungen für Hybrid-TV fest. Diese umfassen unter anderem den Browser, aber auch die dafür verwendete Programmiersprache. Es handelt sich um CE-HTML, ein „Dialekt“ der bereits im Internet verwendeten Programmiersprache HTML [hypertext markup language], jedoch nun optimiert für die Darstellung von Internetseiten auf Geräten der Unterhaltungselektronik [consumer electronics (CE)]. Durch diese Vereinheitlichung wird sichergestellt, dass Inhalte und Design einer Internetanwendung vom jeweiligen Anbieter verantwortet werden und die Darstellung auf dem Bildschirm unabhängig vom Gerätehersteller stets in gleicher Weise erfolgt. Der Standard HbbTV unterstützt folgende Varianten bei den Anwendungen:

- **Programmunabhängige Anwendungen** [unbounded application]
Es handelt sich um alle Internetseiten, die keinen Bezug zu einem der empfangbaren Fernsehprogramme haben. Dazu gehören zum Beispiel die bereits behandelten Portale.
- **Programmbezogene Anwendungen** [bounded application]
In diesem Fall haben die Internetseiten einen unmittelbaren Bezug zum laufenden Fernsehprogramm.



Bild 14.60 HbbTV-Logo



HbbTV [hybrid broadcast broadband television]

- ETSI TS 102 706 (10. Juni 2010)
- Programmiersprache: CE-HTML
- Anwendungen:
 - Programmunabhängige Anwendungen [unbounded application]
 - Programmbezogene Anwendungen [bounded application]

Eine Besonderheit stellt bei HbbTV die Signalisierung programmbezogener Anwendungen dar. Im Bild des betroffenen Programms taucht dann nämlich in einer Ecke ein roter Punkt auf. Der Nutzer kann nun mit der roten Farbtaste [red button] der Fernbedienung die Anwendung aufrufen. Wegen dieser farbtastenorientierten inhaltlichen Verknüpfung von Rundfunk- und Internetinhalten wird deshalb auch von der „**red button**“-Funktion gesprochen.

Bei Abruf einer programmbezogenen Anwendung gibt es folgende Möglichkeiten der Darstellung, zwischen denen der Nutzer meist wählen kann:

- Die Anwendung wird in das laufende Fernsehbild eingeblendet.
- Die Anwendung wird neben dem Fernsehbild eingeblendet. Dadurch teilen sich das Programm und die programmbezogene Anwendung den Bildschirm hälftig. Deshalb gilt dafür auch die Bezeichnung **geteilter Bildschirm** [split screen].
- Die Anwendung überblendet das Fernsehbild komplett.
- Es wird das Konzept „Bild im Bild“ [picture in picture (PIP)] verwendet. Dies bedeutet eine den Bildschirm füllende Darstellung der programmbezogenen Anwendung, wobei jedoch in einer Ecke des Bildschirms das Programm im Kleinformat erhalten bleibt.



Die „red button“-Funktion bewirkt einen ständigen Kontext zwischen Programm und programmbezogener Anwendung in verschiedenen Darstellungsarten.

Auf Basis von HbbTV lässt sich auch Videotext als programmbezogene Anwendung realisieren. Diese Form ist erheblich leistungsfähiger, als die bisher vom analogen Fernsehen bekannte Version dieser Zusatzinformationen, weil größere Übertragungskapazität zur Verfügung steht (**Bild 14.61**). Es sei allerdings darauf hingewiesen, dass es grundsätzlich vom jeweiligen Programmveranstalter abhängt, ob er programmbezogene Anwendungen (wie z.B. Videotext) anbieten will.

Für den Nutzer stellt das hybride Fernsehen einen Mehrwert dar, weil er dadurch neben den bisherigen Fernsehprogrammen auch vielfältige Internetinhalte auf dem Bildschirm darstellen kann und zwar durch einfache Bedienvorgänge mit der Fernbedienung. Auf diese Weise stehen nun unter anderem auch die zahlreichen Mediatheken der Programmveranstalter in hoher Bildqualität auf dem großen Fernsehbildschirm zur Verfügung.



Bild 14.61 Entwicklung beim Videotext

Um hybrides Fernsehen nutzen zu können, muss das Fernsehgerät dafür geeignet sein und ein möglichst breitbandiger Internetanschluss zur Verfügung stehen. Solche Fernsehgeräte werden häufig als „internettauglich“ bezeichnet. Neue Geräte sind in der Regel HbbTV-tauglich und ermöglichen damit die optimale Konvergenz von Broadcast und Broadband. Bei Geräten mit proprietären Lösungen ist zwar der Zugriff auf eine mehr oder weniger große Zahl von Internetportalen möglich, es lassen sich jedoch keine programmbezogenen Anwendungen verarbeiten.

Der für Hybrid-TV erforderliche Internetzugang sollte mindestens 6 Mbit/s aufweisen, besser sind jedoch verfügbare Datenraten von 16 Mbit/s, 25 Mbit/s oder mehr. Dabei spielt es keine Rolle, welche Infrastruktur für den Internetzugang verwendet wird. Es sind DSL, Kabel oder Satellit möglich, bei denen sich allerdings die Anschlüsse nicht unbedingt am Standort des Fernsehgeräts befinden. Deshalb haben Wohnungen mit einem Kabelanschluss, über den Fernsehen, Internet und Telefonie (also Triple Play) angeboten wird, einen Vorteil, weil in diesem Fall Fernsehen und Internet an derselben Anschlussdose zur Verfügung stehen. Dann werden lediglich zwei Anschlusskabel für die Verbindung zum Fernsehgerät benötigt.



Hybrides Fernsehen erfordert breitbandigen Internetzugang.

Ist der Internetanschluss des hybriden Fernsehgerätes für WLAN ausgelegt, dann kann diese funkgestützte Anschlussvariante auch genutzt werden, wenn sich das Modem mit der WLAN-Sendeeinrichtung in einem anderen Raum der Wohnung befindet. Es müssen allerdings die physikalischen Gegebenheiten der bei jedem WLAN vorliegenden Funkwellenausbreitung beachtet werden. Dazu zählt primär die Dämpfung des Funksignals durch Wände, Decken, Türen und Fenster. Es bedarf deshalb stets der Prüfung für den Einzelfall, ob WLAN erfolgreich einsetzbar ist.

Der Internetzugang kann auch über Mobilfunkkapazitäten erfolgen. Es kommen dann üblicherweise sogenannte Internetsticks zum Einsatz. Diese Baugruppen weisen die vergleichbare Bauform wie USB-Speichersticks auf.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass hybrides Fernsehen eine konsequente Weiterentwicklung der Mediennutzung darstellt. Die Verbindung zwischen Broadcast und Broadband bietet durch HbbTV außer dem bisher üblichen Empfang der Fernsehprogramme einen nutzerfreundlichen Zugriff auf eine Vielzahl programmunabhängiger und programmbezogener Internetanwendungen. Außerdem besteht für den Nutzer inzwischen fast ausnahmslos bei allen hybriden Fernsehgeräten die Möglichkeit, beliebige Internetadressen [universal resource locator (URL)] eingeben zu können. Damit besteht grundsätzlich Zugriff auf alle Internetaktivitäten. Bevorzugte Anwendungen können wie bei den Programmen in eine Favoritenliste gespeichert werden. Dieses Konzept vereinfacht die Nutzung des hybriden Fernsehens erheblich.

14.2.5 Dreidimensionales Fernsehen

Wichtige Kriterien für jedes Fernsehbild sind sein Format und seine Auflösung. Das Bildformat beschreibt das Verhältnis der Bildbreite zur Bildhöhe und beträgt beim digitalen Fernsehen 16:9, was auch als Breitbild [wide screen] bezeichnet wird. Übliche Fernsehbilder weisen somit nur zwei Dimensionen auf. Das entspricht allerdings nicht dem natürlichen Sehen, das bekanntlich auch durch die Bildtiefe als dritte Dimension bestimmt ist. Um diesen natürlichen Bildeindruck auch beim digitalen Fernsehen zu erreichen, ist es jedoch nicht möglich, für die Bildtiefe lediglich eine zusätzliche Information zu übertragen. Das ist durch das Konzept des menschlichen Sehens erklärbar. Durch den Abstand der Augen voneinander, der etwa 65 mm beträgt, ergeben sich beim natürlichen Sehen für beide Augen leicht unterschiedliche Bildinformationen auf der jeweiligen Netzhaut. Dies lässt sich einfach nachvollziehen, wenn man wechselweise ein Auge abdeckt. Auf der Netzhaut handelt es sich allerdings auch nur um zweidimensionale Bildinformationen. Diese werden über die Sehnerven dem Gehirn zugeführt und dort verarbeitet. Wegen des leichten Versatzes der beiden von den Augen wahrgenommenen Bildeindrücke ergibt sich erst das dreidimensionale Bild.



Das dreidimensionale Bild liefern nicht die Augen, sondern das Gehirn.

Physikalisch stellt das dreidimensionale Sehen einen Fall von **Stereoskopie** dar, also der Bildbetrachtung über zwei räumlich versetzte Kanäle, was zu einem linken und einem rechten Teilbild führt. Als Vergleich sei die Stereofonie im Audiobereich angeführt, bei der vom Schallereignis die rechte und linke Seite als separate Kanäle übertragen werden. Die Wiedergabe erfolgt dann über zwei Lautsprecher, die einen bestimmten Abstand zueinander aufweisen. Für jedes Ohr bewirkt das einen anderen Schalleindruck und führt dadurch über das Gehirn zu dem gewünschten räumlichen Klangerlebnis. Sollen nun Fernsehbilder für den Zuschauer dreidimensional erscheinen, dann müssen also den beiden Augen entsprechende, gegeneinander versetzte zweidimensionale Bilder angeboten werden. Es gibt unterschiedliche Konzepte für die Darstellung und Betrachtung dieser linken und rechten Teilbilder, die im Ergebnis zum dreidimensionalen Fernsehen (3D-TV) führen.



Dreidimensionales Fernsehen (3D-TV) ist ein Fall von Stereoskopie und erfordert linke und rechte Teilbilder.

Beim Anaglyphen-Verfahren werden die beiden stereoskopischen Teilbilder unterschiedlich eingefärbt (z. B. rot und grün) und übereinander angeordnet dargestellt. Zur Trennung der Einzelbilder werden 3D-Brillen mit Farbfiltern benötigt. Typisch sind Rotfilter vor dem rechten und Grüngfilter vor dem linken Auge. Das Rotfilter unterdrückt dabei das rot eingefärbte Teilbild und das grün eingefärbte Teilbild wird vom rechten Auge in Schwarz wahrgenommen. Das Grüngfilter unterdrückt dagegen das grün eingefärbte Teilbild, wobei das rot eingefärbte Teilbild nun in Schwarz vom linken Auge wahrgenommen wird. Damit sehen beide Augen unterschiedliche Bilder, so dass im Gehirn das räumliche Bild entstehen kann.

Das Anaglyphen-Verfahren erfordert wenig Aufwand und wurde schon vor Jahren bei gedruckten Vorlagen mit guten Ergebnissen eingesetzt. Für die beim Fernsehen vorliegenden Bewegtbilder in Farbe ist es dagegen nur begrenzt geeignet. Deshalb spielt es für 3D-TV keine Rolle.

Die Darstellung der stereoskopischen Teilbilder kann auch mit **polarisiertem Licht** erfolgen. Bei der typischen linearen Polarisation erfolgen die Lichtschwingungen in horizontaler (waagerechter) Richtung für das eine Teilbild und in vertikaler (senkrechter) Richtung für das andere Teilbild, bilden also ein orthogonales System. Diese unterschiedlich polarisierten Teilbilder werden übereinanderliegend dargestellt. Für die Betrachtung ist nun eine 3D-Brille mit Polarisationsfiltern erforderlich, wobei das eine horizontal und das andere vertikal polarisiert sein muss. Dadurch nimmt jedes Auge nur das für es bestimmte Teilbild wahr und ermöglicht dem Gehirn das dreidimensionale Bild aufzubauen.

Bei dem Verfahren mit Polarisationsfilter-Brillen besteht stets das Problem der gleichmäßigen Polarisation über die gesamte Bildfläche und der Verzerrungen bei unterschiedlichen Betrachtungswinkeln. Bei 3D-TV wird derzeit deshalb für die meisten Anwendungen das Konzept mit sogenannten Shutter-Brillen (gesprochen: Schalter-Brille) verwendet (**Bild 14.62**). Die Übertragung der beiden Teilbilder erfolgt dabei nacheinander im Wechsel. Es gilt:

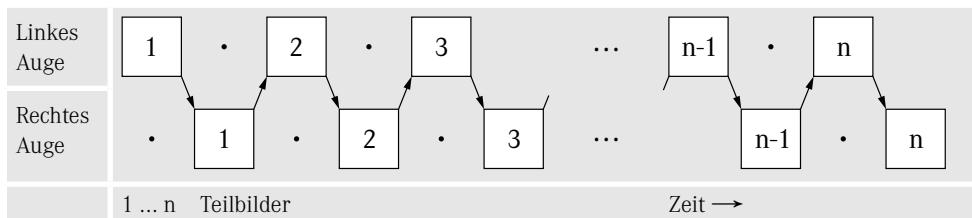


Bild 14.62 Shutter-Brille [Quelle: Samsung]

Die auch als Blenden-Brille bezeichnete Shutter-Brille sorgt nun dafür, dass jedes Auge nur das für ihn bestimmte Teilbild sehen kann. Dieses geschieht durch Dunkelsteuerung des

rechten bzw. linken Brillengläsern im Rhythmus der Bildfolgefrequenz. Die Synchronisation der Shutter-Brille mit dem Empfangsgerät bzw. Wiedergabegerät erfolgt entweder über Kabelverbindung, drahtlos über Infrarotsignale oder Funk.



Bei der **Shutter-Brille** erfolgt die Synchronisation mit den linken und rechten Teilbildern.

Im Gegensatz zu Farbfilter-Brillen und den Polarisationsfilter-Brillen handelt es sich bei den Shutter-Brillen um ein aktives System. Die Realisierung erfolgt in der Regel mit Flüssigkeitskristallflächen, die in ihrer Funktion LCD[liquid crystal display]-Flachbildschirmen vergleichbar sind.

Die Übertragung von 3D-TV über Satellit, Kabel und DSL (IPTV) erfolgt in der Weise, dass die vorhandenen HDTV-Empfangseinrichtungen ohne Änderungen verwendbar sind, es ist allerdings eine für 3D geeignete Wiedergabeeinrichtung erforderlich. Da bei 3D-TV bekanntlich zwei stereoskopische Teilbilder zu übertragen sind, diese aber in den verfügbaren Übertragungsrahmen von HDTV passen müssen, ergibt sich eine Reduzierung der Bildauflösung um 50 Prozent. Dies führt zwar zu einer guten 3D-Darstellung, jedoch mit verringelter Bildqualität. Anders sieht die Situation bei den auf der BD [blu-ray disc], dem Nachfolger der bewährten DVD, gespeicherten 3D-Inhalten aus. Hier bleibt die volle Auflösung für jedes 3D-TV-Teilbild erhalten.

Die Wiedergabe von 3D-TV kann über für 3D-geeignete Flachbildschirme [flat screen] in LCD- oder Plasmatechnologie erfolgen, aber auch über entsprechende Videoprojektoren [beamer]. Während beim zweidimensionalen (2D) digitalen Fernsehen 50 Vollbilder pro Sekunde übertragen werden, sind bei 3D-TV zu übertragende Teilbilder von Bedeutung. Die Wiedergabeeinheit muss deshalb mindestens 100 Teilbilder pro Sekunde mit voller Auflösung wiedergeben können. Sonst ist eine ruckelfreie Wiedergabe von Filmen nicht möglich. Als optimale Lösung wird eine Teilbildfrequenz von 120 Hz angestrebt, also 120 Teilbilder pro Sekunde, was jeweils 60 Vollbilder pro Sekunde bedeutet. Dies wird von den Geräteherstellern auch unter dem Begriff „Full HD 3D“ vermarktet, weil dabei die Leistungsmerkmale von 1080p zur Verfügung stehen. Dies lässt sich zwar nicht bei 3D-TV-Übertragungen nutzen, aber bei der BD als Signalquelle, weil diese über ausreichende Speicherkapazität verfügt.



Es müssen bei 3D-TV mindestens 100 Teilbilder mit voller Auflösung wiedergegeben werden können.

Bei der BD wird nach folgendem Konzept gearbeitet:

- Aufnahme der stereoskopischen Teilbilder
- Parallel Abspeicherung dieser Teilbilder auf der BD
- Ausgabe der Teilbilder an das Wiedergabegerät (Flachbildschirm oder Videoprojektor) nacheinander im Wechsel zwischen den Bildern für das linke und das rechte Auge.

Damit ist die derzeit bestmögliche Qualität der 3D-Darstellung erreichbar. Dies wäre grundsätzlich auch für 3D-TV-Übertragungen realisierbar, würde allerdings neue Empfänger erforderlich machen.

Für die Darstellung des dreidimensionalen Fernsehens muss in jedem Fall ein 3D-TV-fähiger Flachbildschirm oder Videoprojektor (inklusive geeigneter Projektionsleinwand) zur Verfügung stehen, der mindestens 100 Teilbilder pro Sekunde darstellen kann. Werden bei Geräten größere Werte angegeben, dann handelt es sich bei den zusätzlichen Bildern um solche, die durch Interpolation rechnergestützt ermittelt werden, also keine originalen Bilder von der Quelle sind.

Für die Betrachtung von 3D-Bildern ist eine Shutter-Brille erforderlich und zwar bei jedem Zuschauer. Die im Markt erhältlichen Typen sind dabei in der Regel nur für bestimmte Typen von Flachbildschirmen bzw. Videoprojektoren verwendbar. Kompatibilität besteht also (noch) nicht. Wie beim „normalen Fernsehen“ können auch bei 3D-TV mehrere Zuschauer gleichzeitig das Bild betrachten.



Für 3D-TV benötigt jeder Zuschauer eine Shutter-Brille.

Während bei den 3D-TV-Übertragungen keine Änderungen bei den Empfängern erforderlich sind, gilt bei der Blu-ray Disc (BD) eine andere Situation. Für 3D-BDs wird nämlich ein dafür geeigneter Spieler [player] benötigt, ein bisher beim Nutzer vorhandener „normaler“ BD-Spieler ist nämlich für 3D nicht geeignet (**Bild 14.63**).



Bild 14.63 3D-BD-Logo

Der Anschluss eines 3D-BD-Spielers an den entsprechenden Flachbildschirm bzw. Videoprojektor muss unbedingt über die Schnittstelle HDMI 1.4 erfolgen. Nur durch Nutzung dieses Standards ist die störungsfreie Übertragung der bei 3D-TV gegebenen großen Datenmengen gewährleistet. Deshalb muss auch das Verbindungskabel für HDMI 1.4 geeignet sein. Es sei außerdem darauf hingewiesen, dass 3D-BDs auch das Raumklangverfahren [surround sound] 5.1 und 7.1 unterstützen (**Bild 14.64**).



Bild 14.64 Raumklangverfahren 5.1



Der Anschluss von 3D-BD-Spielern muss über HDMI 1.4 erfolgen.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass mit 3D-fähigen Flachbildschirmen bzw. Videoprojektoren auch übliches 2D-TV wiedergeben werden kann. Bei der häufig angeführten Wandlung normaler 2D-Beiträge in 3D ist allerdings Vorsicht geboten. Eine solche 2D/3D-Konversion basiert auf der rechnergestützten Ermittlung der Tiefeninformation durch mehr oder weniger aufwendige Interpolation des 2D-Bildes. Das Ergebnis ist kein echtes dreidimensionales Bild, wenn auch der subjektive Eindruck einer gewissen Bildverbesserung eintreten kann.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass 3D-TV gegenüber dem bisher üblichen zweidimensionalem Fernsehen (2D-TV) eine wesentlich gesteigerte Bild- und Tonqualität liefert. Das gesamte Konzept ist aus Bild **14.65** ersichtlich.

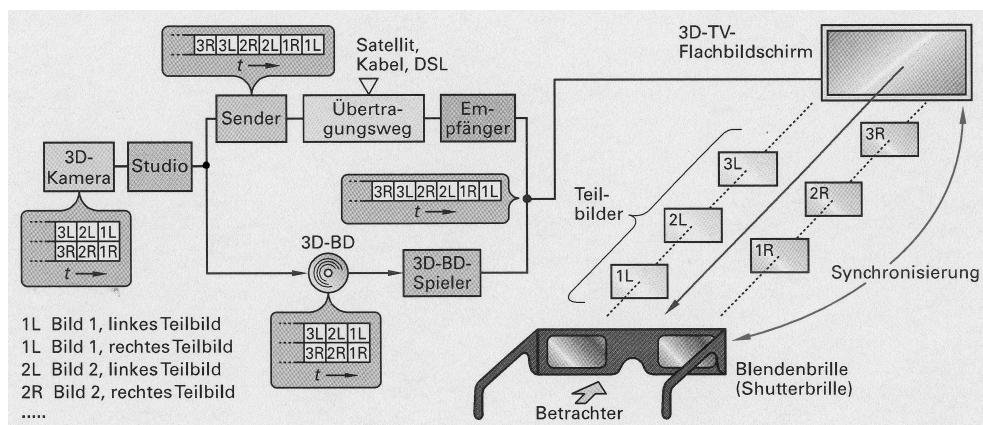


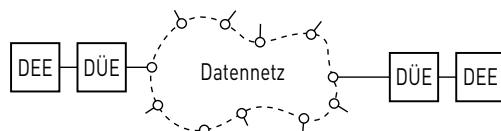
Bild 14.65 3D-TV (Konzept)

Abschließend sei noch auf die Entwicklung **autostereoskopischer Bildschirme** hingewiesen. Bei diesen sind für die 3D-Betrachtung keine speziellen Brillen erforderlich, weil nun die erforderlichen Filter in die Bildschirmoberfläche integriert sind. Bei diesem Lösungsansatz müssen bisher allerdings bestimmte Positionen vor dem Bildschirm eingehalten werden, außerdem kann nur eine begrenzte Zahl von Zuschauern das Bild gleichzeitig betrachten. Mit autostereoskopischer Bilddarstellung wird das dreidimensionale Fernsehen mehr Akzeptanz bei den Nutzern hervorrufen.

■ 14.3 Lokale Datennetze

Bei der **Datenkommunikation** handelt es sich funktionsbedingt um Maschine-Maschine-Kommunikation. Für solche Übertragungssysteme sind Datenquelle, Datensender, Übertragungskanal, Datenempfänger und Datensenke erforderlich. Die Datenquellen und Datensenken werden als Datenendeinrichtungen (DEE) [data terminal equipment (DTE)]

bezeichnet, für die Datensender und Datenempfänger gilt der Begriff Datenübertragungseinrichtung (DÜE) [data circuit terminating equipment (DCE)] (**Bild 14.66**). Die Übertragung zwischen den Datenendeinrichtungen auf der Sende- und Empfangsseite erfolgt leitungsgebunden oder funkgestützt über das Datennetz. Es ist dabei synchroner oder asynchroner Betrieb möglich.



DEE = Datenendeinrichtung

DÜE = Datenübertragungseinrichtung

Bild 14.66 Datenkommunikation (Konzept)

Prinzipiell kann die Übertragung der Datenworte parallel oder seriell erfolgen. Da im Falle des Parallelbetriebs für jedes Bit eines Datenwortes gleichzeitig eine Verbindung erforderlich ist, wird diese Lösung aus wirtschaftlichen Gründen für Datennetze nur in Ausnahmefällen verwendet. Die Übertragung der Daten erfolgt deshalb in der Regel seriell in Paketen [packet], die auch als Rahmen [frame] bezeichnet werden. Dabei hat jedes Datenpaket eine definierte Bitmenge als Kopfteil [header], das als Adresse für die im Paket enthaltenen Informationen dient. Dieses Konzept ermöglicht eine gezielte Übertragung mit möglichst kleiner Fehlerquote.

Bei Datennetzen werden nach dem räumlichen Wirkungsbereich spezifische Arten unterschieden. Die kleinsten Datennetze sind nur im nahen Umfeld des Nutzers (z. B. Wohnung, Büro) einsetzbar. Man bezeichnet sie deshalb als Nahbereichsdatennetze [personal area network (PAN)]. Bei Datennetzen für ein begrenztes Gebiet in der nahen Umgebung (z. B. Gebäude, Grundstück, Firmengelände) handelt es sich um lokale Datennetze [local area network (LAN)]. Großräumige Datennetze in Ballungsgebieten sind städtische/regionale Datennetze [metropolitan area network (MAN)]. Bezogen auf die nationale oder internationale Ebene gilt der Begriff Weitbereichsdatennetze [wide area network (WAN)].



Arten der Datennetze

- Nahbereichsdatennetz [personal area network (PAN)]
- Lokales Datennetz [local area network (LAN)]
- Städtisches/Regionales Datennetz [metropolitan area network (MAN)]
- Weitbereichsdatennetz [wide area network (WAN)]

Bei jedem Datennetz sind technische und betriebliche Kriterien zu berücksichtigen. Deshalb spielen folgende Spezifikationen eine wichtige Rolle:

- Netztopologie
- Übertragungsmedium
- Kommunikationsart
- Übertragungskapazität

- Betriebsverfahren
- Übertragungsprotokoll
- Zugriffsverfahren

Lokale Datennetze (LAN) haben die Aufgabe, in einem lokal begrenzten Bereich Datenübertragung zu ermöglichen. Diese kann zwischen den an das Netz angeschlossenen und häufig als Stationen bezeichneten Datenendeinrichtungen untereinander erfolgen, aber auch zwischen ihnen und Servern als Funktionseinheiten, die Dienste erbringen. Bei allen Konstellationen handelt es sich allerdings um verbindungslose Kommunikation. Es gibt also weder einen Verbindungsaufbau, noch einen Verbindungsabbau, sondern lediglich den Austausch von Datenpaketen. Es steht dafür jeweils die volle Bitrate des Netzes zur Verfügung. Die Stationen und die Server in einem LAN haben spezifische Adressen, so dass jedes Datenpaket richtig adressierbar ist (**Bild 14.67**).

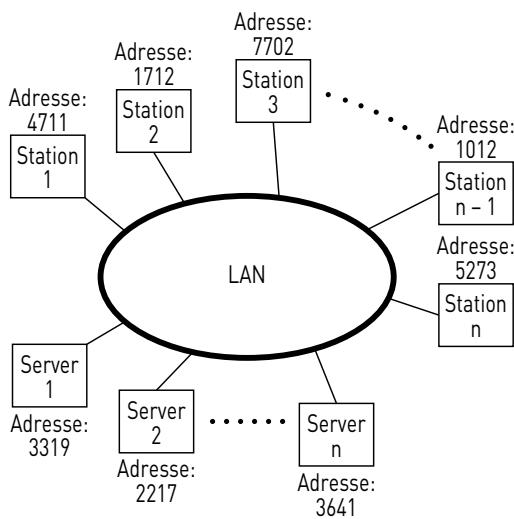


Bild 14.67 LAN (Basisstruktur)



Das LAN arbeitet verbindungslos, es erfolgt lediglich die adressierte Übertragung von Datenpaketen.

Da es beim LAN keine zentrale Steuerung gibt, kommt für den Zugriff auf das Übertragungsmedium hauptsächlich CSMA/CD [carrier sense multiple access with collision detection] zum Einsatz, was signalabhängiger Vielfachzugriff mit Kollisionserkennung bedeutet. Dieses Konzept wird als **Ethernet** (gesprochen: Isernät) bezeichnet, ist gemäß IEEE 802.3 und Ergänzungen spezifiziert und arbeitet mit Datenpaketen (Rahmen), die mindestens 72 Byte und maximal 1526 Byte umfassen.

CSMA/CD ist für alle lokale Datennetze geeignet, die Busstruktur aufweisen. Es greifen die angeschlossenen Stationen immer dann auf den Bus als Übertragungsmedium zu, wenn auszusendende Daten vorliegen. Bei zwei oder mehr gleichzeitigen Aussendungen treten zwangsläufig Kollisionen auf. Sie werden mit Hilfe einer Überwachungsschaltung ent-

deckt, was die „collision detection“ bedeutet. Dies bewirkt den sofortigen Stopp aller Aussendungen. Durch einen Zufallsgenerator wird dann festgelegt, welche Station senden darf. Danach beginnt wieder der Vielfachzugriff der Stationen auf den Bus.

Durch das aufgezeigte CSMA/CD-Verfahren ist die Abfolge der Kommunikationen zwischen den am LAN angeschlossenen Stationen und Servern nicht vorhersehbar. Es sind deshalb auch keine Prioritäten möglich.



Bei lokalen Datennetzen wird in der Regel CSMA/CD als Zugriffsverfahren eingesetzt.

Die wesentlichen Unterscheidungskriterien beim Ethernet sind die übertragbare Bitrate, also die Übertragungsgeschwindigkeit, und das verwendete Übertragungsmedium. Daraus ergeben sich wegen der zulässigen Leitungslängen auch die realisierbaren Netzgrößen. Bezogen auf die Übertragungskapazität gelten folgende Strukturen:

- Ethernet bis 10 Mbit/s
- Fast Ethernet bis 100 Mbit/s
- Gigabit Ethernet bis 1 Gbit/s
- 10-Gigabit-Ethernet bis 10 Gbit/s
- 100-Gigabit-Ethernet bis 100 Gbit/s

Es kommen beim Ethernet folgende Übertragungsmedien zum Einsatz:

- Verdrillte Zweidrahtleitungen [twisted pair (TP)]
- Koaxiale Leitungen
- Lichtwellenleiter (LWL)

Bei TP sind verschiedene Kategorien (Cat. 3 bis Cat. 7) der Datenkabel zu unterscheiden, außerdem werden häufig auch mehrere Doppeladern parallel geschaltet, um eine größere Bitrate zu erreichen. Auch durch die Parallelschaltung koaxialer Leitungen lassen sich größere Bitraten realisieren. Dafür werden sogenannte Twinaxkabel verwendet, bei denen zwei koaxiale Leitungen in einem Mantel untergebracht sind. Bei LWL kann es sich um Glasfasern (GF) oder Polymerfasern (POF) handeln, die sich bekanntlich wesentlich durch ihre Dämpfungswerte unterscheiden. In **Tabelle 14.5** ist eine Auswahl der verschiedenen Ethernet-Versionen ersichtlich. Dabei steht die Bezeichnung „Base“ für die Basisbandlage der Datensignale der jeweiligen Station. Dies bedeutet, dass stets jeweils nur eine der an das Netz angeschlossenen Datenstationen das Übertragungsmedium nutzen kann.

Tabelle 14.5 Ethernet-Varianten

Ethernet-Typ	Spezifikation	Maximale Bitrate	Übertragungsmedium	Realisierbare Netzgröße
10 Base5	IEEE 802.3	10 Mbit/s	Koaxialkabel	500 m
10 Base-T	IEEE 802.3	10 Mbit/s	TP Cat. 3, 2 DA	100 m
10 Base-F	IEEE 802.3	10 Mbit/s	LWL, $\lambda = 850$ nm, Multimode	2 km
100 Base-T4	IEEE 802.3a	100 Mbit/s	TP Cat. 3, 4 DA	100 m
100 Base-T8	IEEE 802.3a	100 Mbit/s	TP Cat 5, 2 DA	100 m
1000 Base-FX	IEEE 802.3a	100 Mbit/s	LWL, $\lambda = 850$ nm, Multimode	2 km
1000 Base-LX	IEEE 802.3z	1 Gbit/s	LWL, $\lambda = 1.310$ nm,	3 km
1000 Base-SX	IEEE 802.3z	1 Gbit/s	Monomode	500 m
1000 Base-CX	IEEE 802.3z	1 Gbit/s	LWL, $\lambda = 850$ nm, Multimode	25 m
10 GBase-L	IEEE 802.3ac	10 Gbit/s	Twinaxkabel	10 km
10 GBase-E	IEEE 802.3ac	10 Gbit/s	LWL, $\lambda = 1310$ nm,	30 km
10 GBase-CX	IEEE 802.3ak	10 Gbit/s	Monomode	15 m
CX			LWL, $\lambda = 1550$ nm, Monomode Twinaxkabel (4 x parallel)	

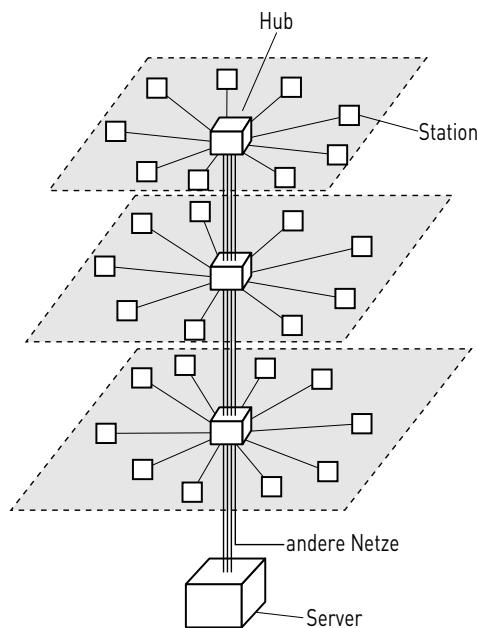


Für die Bewertung eines LAN ist die Bitrate und das Übertragungsmedium maßgebend.

Beim Aufbau lokaler Datennetze wird stets eine als Architektur bezeichnete Aufbaustruktur verwendet. Hier muss zwischen Bürogebäuden und dem Heimbereich in Haus und Wohnung unterschieden werden. In Bürogebäuden ist die auch als strukturierte Verkabelung bezeichnete **anwendungsneutrale Verkabelung** typisch. Dabei sind die Stationen auf einer Ebene (z.B. Etage) über Kupferkabel (Koax oder verdrillter Zweidraht) sternförmig an einen als Hub bezeichneten Verteiler angeschlossen. Die Verbindung der Hubs untereinander erfolgt im Regelfall mit Lichtwellenleitern. Über diesen Weg erfolgt auch der Anschluss der Server sowie der Übergang zu anderen Netzen (**Bild 14.68**). Die strukturierte Verkabelung ist eine zukunftsorientierte und leistungsfähige Lösung für die Datenkommunikation im LAN, weil sie nicht nur dem heutigen Bedarf Rechnung trägt, sondern auch Reserve für Erweiterungen aufweist. Im Heimbereich ist dagegen eine Struktur üblich, bei der die verschiedenen Stationen beim Nutzer über einen **Router** angegeschlossen sind. Dies führt zur **Sternnetz-Struktur**. Dies entspricht der strukturierten Verkabelung auf den einzelnen Ebenen.



Für den Aufbau lokaler Datennetze bietet sich die strukturierte Verkabelung an.

**Bild 14.68** Strukturierte Verkabelung

Lokale Datennetze (LAN) können auf vielfältige Weise miteinander verbunden werden. Dabei sind bei Bezug auf das OSI-Referenzmodell mit seinen sieben Schichten folgende Unterschiede zu beachten:

- Die LAN-Kopplung durch **Repeater** ermöglicht die Verkopplung verschiedener Übertragungsmedien oder bei gleichem Übertragungsmedium die Verstärkung der Signale.
- Bei der LAN-Kopplung durch **Bridges** gelangen nur solche Datenpakete zum anderen LAN, die auch für dieses Netz bestimmt sind.
- Bei der LAN-Kopplung durch **Router** besteht der Vorteil, dass für die Datenpakete stets der optimale Weg genutzt wird.
- Bei der LAN-Kopplung durch **Gateways** können völlig unterschiedlich strukturierte lokale Datennetze miteinander verbunden werden.

Wird das lokale Datennetz nicht leitungsgebunden aufgebaut, sondern durch Funkverbindungen realisiert, dann liegt ein **WLAN** [wireless local area network] vor. Die grundätzliche Funktionalität des lokalen Datennetzes bleibt dabei unverändert, es ist allerdings ergänzend mehr Flexibilität für die Positionierung der Endgeräte (z. B. Notebook) gegeben. Sie können nämlich überall eingesetzt werden, wo der jeweilige WLAN-Sender die funkmäßige Versorgung sicherstellt. Für diese Sender gilt die Bezeichnung **Access Point**, im Heimbereich sind das WLAN-Router, während es sich im öffentlichen Bereich um Hot Spots handelt (**Bild 14.69**). Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei einem WLAN die Endgeräte für diese Funknutzung ausgelegt sein müssen, also WLAN-Fähigkeit erforderlich ist.



Bild 14.69 WLAN-Router [Quelle: AVM]

I Beim WLAN erfolgt die Verbindung zwischen den angeschlossenen Endgeräten nicht leitungsgebunden, sondern drahtlos durch Funkübertragung.

WLAN baut auf den LAN-Spezifikationen auf. Die Unterschiede bestehen durch die unterschiedliche Verbindungstechnik, also die physikalische Schicht [physical layer] des OSI-Referenzmodells. Diese ist für WLAN in der Standardfamilie IEEE 802.11 definiert. Dabei spielen vergleichbar dem LAN das Übertragungsmedium und die Übertragungskapazität eine wichtige Rolle. Das Übertragungsmedium ist durch den nutzbaren Frequenzbereich gekennzeichnet. Hier gelten für WLAN:

- 2,4-GHz-Bereich 2,401 GHz bis 2,482 GHz
- 5-GHz-Bereich 5,150 GHz bis 5,350 GHz
und 5,470 GHz bis 5,725 GHz

Der 2,4-GHz-Bereich weist eine Bandbreite von 82 MHz auf und liegt im ISM-Band [industrial, scientific and medical], das lizenfrei genutzt werden kann, jedoch mit einer Begrenzung der Sendeleistung auf maximal 10 mW verbunden ist. Wegen der starken Nutzung und der relativ geringen Bandbreite dieses Frequenzbereichs sind große Bitraten, wie sie z. B. für das Video-Streaming benötigt werden, nur bedingt erreichbar, wenn viele Nutzer gleichzeitig auf das WLAN zugreifen. Es wurde deshalb zusätzlich der o. a. 5-GHz-Bereich für WLAN reserviert. Hier ist nun eine Bandbreite von (200 + 255) MHz verfügbar. Im Rahmen der Standardisierung wurden bezüglich der Übertragungskapazität folgende Varianten festgelegt.

- IEEE 802.11b 2,4 GHz-Bereich 1 Mbit/s bis 11 Mbit/s
- IEEE 802.11g 2,4 GHz-Bereich 6 Mbit/s bis 54 Mbit/s
- IEEE 802.11a/h 5 GHz-Bereich 6 Mbit/s bis 54 Mbit/s
- IEEE 802.11n 2,4 GHz-Bereich
und
5-GHz-Bereich 6 Mbit/s bis 600 Mbit/s

Die technische Reichweite eines WLAN in Wohnungen und Häusern ist stets von den funktischen Ausbreitungsbedingungen abhängig und wird wesentlich durch die von Wänden und Decken bewirkte Dämpfung bestimmt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei

unzureichender Feldstärke Übertragungsfehler durch den Verlust von Datenpaketen auftreten, was im Rahmen der Fehlerkorrekturverfahren zu einer Reduzierung der nutzbaren Bitrate führt.



Die Reichweite eines WLAN hängt von den funktechnischen Ausbreitungsbedingungen ab.

Bei lokalen Datennetzen handelt es sich stets um transparente Übertragung, es sind also beliebige Inhalte in den Paketen (Rahmen) möglich. Dazu gehören z. B. auch digitale Audio- und Videosignale. Systembedingt lassen sich auch unterschiedliche Signale gleichzeitig übertragen. Dies wird als Konvergenz bezeichnet, was als das Zusammenwachsen von Anwendungen zu verstehen ist.

■ 14.4 Internet und Intranet

Die Bezeichnung Internet ist die Kurzform von „interconnected networks“ und bedeutet die wahlfreie Verbindung zwischen unabhängigen Computernetzen. Es handelt sich beim Internet im Prinzip um das Zusammenwirken einer sehr großen Zahl von Computern und Servern in einem weltumspannenden Netz. Es dient dem Austausch von Informationen und der Kommunikation. Jeder Computer eines Netzes kann dabei grundsätzlich mit jedem Computer eines anderen Netzes kommunizieren, wobei dies über definierte Protokolle erfolgt.

Das wesentliche Merkmal des Internets ist die Verwendung des **Transportprotokolls IP [internet protocol]** in Verbindung mit einer einheitlich strukturierten Adressierung (IP-Adresse) jedes angeschlossenen Gerätes.



Internet [interconnected networks] = Weltweite Kommunikation zwischen Computern und/oder Servern unter Verwendung des Transportprotokolls IP [internet protocol] und einheitlich strukturierter IP-Adressen

Das Internet kann als funktionierender Wildwuchs aus Computern, Servern und lokalen Datennetzen (LAN) verstanden werden. Es gibt kein zentrales Netzmanagement, sondern lediglich die gezielte Übertragung von Datenpaketen auf Basis der im Kopfteil [header] angegebenen Adresse.



Im Internet gibt es kein zentrales Netzmanagement.

Der Weg von Datenpaketen ist im Internet nicht vorbestimbar, sie werden von Router zu Router weitergereicht und gelangen nicht unbedingt auf direktem Weg zum Zielcomputer, sondern stets auf dem Weg, für den Übertragungskapazität zu dem Zeitpunkt verfügbar ist. Abhängig vom Verkehrsaufkommen im Netz kann theoretisch jedes Datenpaket auf

einem anderen Weg zum Ziel gelangen. Die Festlegung des Übertragungsweges im Internet wird als **Routing** bezeichnet (**Bild 14.70**).

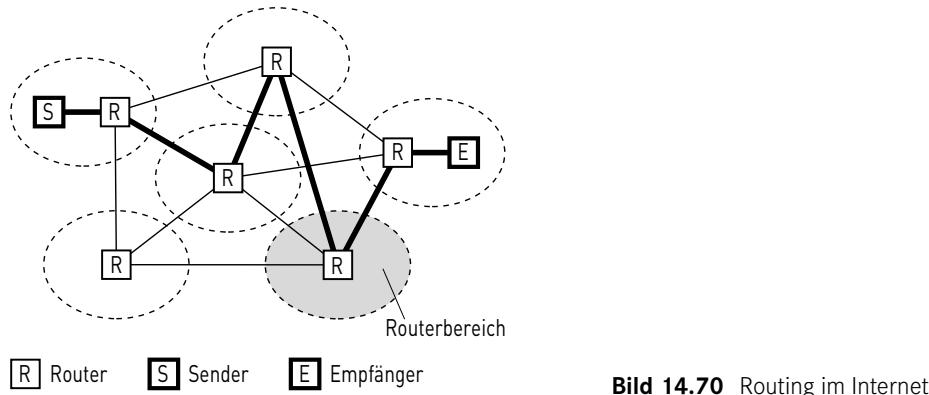


Bild 14.70 Routing im Internet

Der große Erfolg des Internets erklärt sich aus den zahlreichen Diensten und Anwendungen, die jedoch alle eine **einheitliche Protokollarchitektur** für die Übertragung verwenden. Das verwendete Schichtenmodell entspricht zwar dem OSI-Referenzmodell nicht in allen Details, es besteht jedoch eine gute Vergleichbarkeit (**Bild 14.71**).

OSI	Protokolle	Internet
Anwendung	SMTP FTP	
Darstellung	HTTP	Anwendung
Sitzung	RTP/RTCP	
Transport	TCP UDP	Transport
Netzwerk	IP	Internet
Sicherung		
Bitübertragung		Netzwerk

Bild 14.71 Schichten und Protokolle beim Internet

Die Basis für jede Übertragung stellt das bereits aufgezeigte Transportprotokoll IP [internet protocol] dar. Es ist für die verbindungslose Datenübermittlung vom Sender zum Empfänger zuständig, wobei dies auch über mehrere Netze erfolgen kann. Eine Abhängigkeit vom verwendeten Übertragungsmedium ist nicht gegeben.

Folgende Informationen werden vom Internet Protokoll (IP) erstellt oder ausgelesen:

- Quell-IP-Adresse:
Identifiziert den Sender über seine IP-Adresse
- Ziel-IP-Adresse:
Identifiziert den Empfänger, also das Ziel

- Protokoll:
Informiert das Ziel, ob die Datenpakete an TCP oder UDP weitergegeben werden sollen
- Prüfsumme:
Prüfvorgang, ob die Datenpakete unbeschädigt beim Ziel angekommen sind
- „Lebenszeit“ [time to live (TTL)] von IP-Datenpaketen:
Angabe der Existenz eines IP-Datenpaketes in Sekunden. Um Endlosläufe von Datenpaketen zu verhindern, wird die TTL reduziert, wenn es in einem Router aufgehalten wird.

Das IP ist für folgende wichtige Aktivitäten zuständig:

- Es bietet der darüberliegenden Schicht (TCP, UDP) einen ungesicherten verbindungslosen Dienst an.
- Es adressiert Computer.
- Es fragmentiert Informationspakete.
- Es führt das Routing durch, also den zielgerichteten Transport.

Die Bestätigung empfangener Datenpakete erfolgt in einer höheren Schicht des Internet-Kommunikationsmodells.



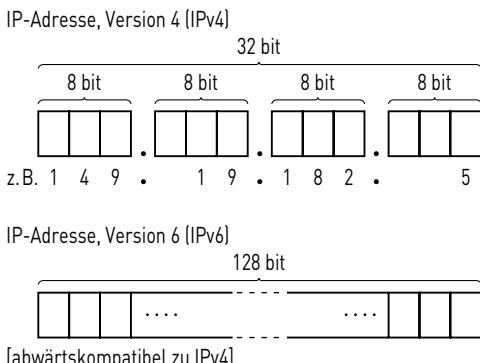
IP [internet protocol]:

Ermöglicht verbindunglose Datenübermittlung zwischen Sender und Empfänger über mehrere Netze

Über das IP können Computer im Internet oder auch in anderen Netzen miteinander kommunizieren. Dies wird durch eine spezielle Adressierung ermöglicht. Jedes Gerät benötigt eine individuelle IP-Adresse, um entsprechend genutzt werden zu können. Nur auf diese Weise kann nämlich die übertragene Information eindeutig einer Quelle und einem Ziel zugeordnet werden. Die IP-Adresse stellt so eine Art Hausnummer für jedes Gerät dar.

Die IP-Adresse besteht in der bisher noch überwiegend verwendeten Version 4 (IPv4) aus vier Zahlen, die durch Punkt voneinander getrennt sind. Die Zahlen müssen im Bereich 0 ... 255 liegen und können deshalb jeweils durch ein 8-bit-Wort ausgedrückt werden. Eine **IPv4-Adresse** umfasst somit 32 bit.

Inzwischen erfolgt der Übergang auf die Version 6 der IP-Adressierung. Jede **IPv6-Adresse** umfasst 128 bit und verfügt deshalb im Vergleich zu IPv4 über einen wesentlich größeren Adressvorrat. Sie ist für Multimedia besser geeignet und zu IPv4 abwärtskompatibel (**Bild 14.72**).

**Bild 14.72** IP-Adressierung

Die Darstellung von IPv6-Adressen erfolgt in hexadezimaler Schreibweise. Sie besteht aus acht Gruppen mit jeweils vier Zeichen, die durch Doppelpunkte getrennt werden. Dies sei an folgendem Beispiel verdeutlicht:

4 A 3 F : A F 6 7 : F 2 4 0 : 5 6 C 4 : 3 4 0 9 : A E 5 2 : 4 4 0 F : 1 4 0 6

Die Vergabe von IP-Adressen erfolgt durch die nationalen Organisationen des Internet Network Information Center (INIC). Sie trägt in Deutschland die Bezeichnung DENIC. Damit wird sichergestellt, dass sich jede IP-Adresse eindeutig von jeder anderen unterscheidet.



Jede IP-Adresse ist einmalig.

Neben den aus Zahlen bestehenden IP-Adressen ist es auch möglich, leichter merkbare Begriffe zu verwenden. Es handelt sich dann um symbolische Adressen, die üblicherweise als Internetadresse bezeichnet werden. Kennzeichen dafür ist das Zeichen @ (gesprochen: ät), welches den Empfängernamen mit dem Namen des Providers, der Firma oder der Organisation verbindet. Ergänzend folgt nach einem Punkt (dot) der Länderkennung oder eine Netzkennung wie „com“, „org“, „gov“ oder ähnlich.



Beispiel:

Internetadressen weisen folgende Struktur auf:

meier	@	unitymedia	•	de
Namedes Empfängers	zu erreichen bei	Provider/Firma/Organisation		Länderkennung/Netzkennung

Der vom IP angebotene Dienst wird entweder vom Protokoll TCP oder UDP genutzt.

Das Transmission Control Protocol (TCP) ermöglicht eine sichere verbindungsorientierte Punkt-zu-Punkt-Datenübertragung, soweit diese nicht in Echtzeit erfolgen soll. Diese Situation liegt bei der klassischen Daten- und Textkommunikation stets vor. Die Sicherheit des TCP ist in der Möglichkeit begründet, Fehler bei der Übertragung erkennen und korrigieren zu können. So werden die korrekte Reihenfolge der Datenpakete überprüft, doppelte

Pakete gelöscht und verlorengegangene Pakete erneut gesendet. TCP ermöglicht den bidirektionalen Austausch von Daten, wobei es einen virtuellen Kanal zwischen den beiden Endpunkten der Verbindung aufbaut.

**TCP [transmission control protocol]:**

Ermöglicht verbindungsorientierte Datenübertragung als Punkt-zu-Punkt-Verbindung mit Datensicherung im Voll duplex-Betrieb, wenn kein Echtzeitbetrieb vorgesehen ist

Das User Datagram Protocol (UDP) ist speziell für Übertragungen in Echtzeit ausgelegt. Dazu gehören IP-Telefonie [voice over internet protocol (VoIP)], Audio-Streaming, Video-Streaming und andere Verfahren. Die Datenpakete werden beim UDP direkt zum Empfänger gesendet, ohne dabei auf eine wie beim Handshakeverfahren systembedingte Quittierung zu warten. Dadurch kann allerdings weder ein eventueller Datenverlust erkannt werden noch ist die richtige Reihenfolge der empfangenen Datenpakete prüfbar. Es lässt sich lediglich die Vollständigkeit der Pakete mit der Prüfsumme überwachen. Die beim UDP fehlende Datensicherung muss bei Bedarf von einem anderen Protokoll gewährleistet werden.

**UDP [user datagram protocol]:**

Ermöglicht ungesicherte verbindungslose Datenübertragung in Echtzeit

Die beim Internet oberhalb von TCP und UDP angeordneten Anwendungsprotokolle haben folgende Aufgaben bzw. Funktionen:

- **RTP [realtime transfer protocol]**
Dieses Protokoll setzt auf IP und UDP auf. Es sichert Echtzeitübertragungen, da es fehlende, doppelte oder in falscher Reihenfolge empfangene Datenpakete erkennt und entsprechende Korrekturmaßnahmen veranlasst.
- **RTCP [realtime control protocol]**
Dieses Protokoll steuert den Datentransport in Verbindung mit der Funktionalität des RTP. Es überträgt außerdem Statusinformationen über die vom Sender verwendeten Daten- und Codierungsformate.
- **HTTP [hypertext transfer protocol]**
Dieses Protokoll ist objektorientiert, stellt die Kommunikation zwischen Browsern und Servern im Internet sicher und ermöglicht Multimediakommunikation mit Sprüngen zu verschiedenen Datenquellen. Die Daten werden dabei in der „Markierungssprache“ HTML [hypertext markup language] übertragen.
- **FTP [file transfer protocol]**
Dieses Protokoll ermöglicht den bidirektionalen Datenaustausch unmittelbar zwischen zwei Computern und/oder Servern.
- **SMTP [simple mail transfer protocol]**
Dieses Protokoll ist TCP/IP-basiert und ermöglicht die Übermittlung von E-Mails. Es

besteht aus Kopfteil [header] und Rumpfteil [body] für die Nutzlast [payload]. Der Zusatz MIME [multipurpose internet mail extension] gestattet mehrere Kopfteile und mehrere Rumpfteile. Das ermöglicht den Versand verschiedenartiger Dokumente (z.B. Text, Grafik, Audio, Videosequenzen) per E-Mail.

Obwohl das Internet vielfach als völlig unkontrolliertes Netz gesehen wird, gibt es dennoch zahlreiche Grundsätze und Regelungen, aber auch organisatorische Strukturen.

Beispiele sind verbindliche Vereinbarungen über die Kommunikationsprotokolle, das Verfahren für den Aufbau und die Vergabe von Adressen sowie Regularien für die Weiterentwicklung des Internets. Dabei erfolgt die Diskussion der Themen öffentlich im Internet in sogenannten Requests for Comments (RFC). In einem mehrstufigen Abstimmungsprozess werden Festlegungen getroffen, die zu einem Internetstandard führen können. Dabei gilt dann die Bezeichnung RFC mit einer Folgenummer.



RFC [request for comments] =

- Öffentliche Diskussion relevanter Themen
- Mehrstufiger Abstimmungsprozess
- Festlegung als Internetstandard (optional)

Zu den Grundstrukturen des Internets gehören die Autonomie der einzelnen Netzknoten. Die Erreichbarkeit der Knoten wird durch ein entsprechendes Protokoll definiert. Damit sind bei Unterbrechungen, Protokollfehlern oder Ausfällen Änderungen der Netztopologie möglich.



Erreichbarkeit von Netzknoten ist durch Protokoll definiert.

Jeder Netzknoten hat durch entsprechende Kommunikation Kenntnis über den Zustand der benachbarten Knoten, Computer und Server. Die Verkehrslenkung im Netz führt jeder Knoten selbsttätig gemäß definierter **Routing-Prozeduren** durch.



Jeder Netzknoten ist autonom und führt die Kommunikation zu den anderen Knoten gemäß definierter Routing-Prozeduren durch.

Auch wenn das Internet ohne zentrales Management arbeitet, so gibt es doch einige internationale besetzte Gremien, die Empfehlungen und Regeln erarbeiten, deren Einhaltung nicht erzwungen werden kann, sondern freiwillig aus Überzeugung der Zweckmäßigkeit erfolgt. Dazu gehören:

- ISOC [Internet Society]
- IAB [Internet Architecture Board]
- IETF [Internet Engineering Task Force]
- IESG [Internet Engineering Steering Group]

- IANA [Internet Assigned Number Authority]
- INIC [Internet Network Information Center]

Die ISOC ist zuständig für die Strategie des Internets, während sich das IAB um die Gesamtarchitektur kümmert. Das IETF hat die Technik- und Protokollentwicklung als Aufgabenfeld, bei der IESG sind es die Standardisierungsprozesse. Die IANA trägt die Verantwortlichkeit für die Adressierungsverfahren, während die INIC die Vergabe der IP-Adressen managt.

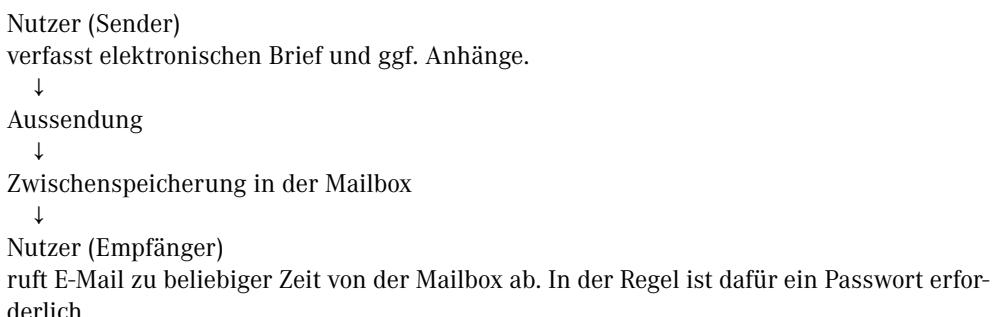


Zuständigkeiten im Internet

ISOC	→ Strategie
IAB	→ Gesamtarchitektur
IETF	→ Technik und Protokolle
IESG	→ Standardisierung
IANA	→ Adressierungsverfahren
INIC	→ IP-Adressen

Das Internet bietet eine Vielzahl von Anwendungen und Diensten. Davon soll nachfolgend eine Auswahl näher betrachtet werden.

Bei der auch als elektronische Post bezeichneten **E-Mail** erfolgt der Versand elektronisch erstellter Briefe. Dafür wird mit einem Editor gearbeitet, der üblicherweise nur ASCII-Zeichen zur Verfügung stellt. Bei solchen Briefen sind allerdings beliebige Anhänge [attachment] möglich. Der Austausch von E-Mails erfolgt über Mailboxen, die als Server die Zwischenspeicherung der E-Mails sicherstellen. Es ist deshalb keine unmittelbare Verbindung zwischen Sender und Empfänger erforderlich. Der Abruf der E-Mails von der Mailbox durch den Empfänger kann zu jeder beliebigen Zeit erfolgen. In der Regel ist der Zugriff auf die Mailbox durch ein Passwort oder eine andere Form der Authentifizierung gesichert. Bei der E-Mail gilt somit nachstehend aufgezeigte Abfolge:



Bei E-Mail handelt es sich um die Übermittlung mit einem Editor erstellter Briefe, die beliebige Anhänge aufweisen können. Mit E-Mail lässt sich weltweite Kommunikation zwischen Nutzern des Internets realisieren.

Durch das **World Wide Web (WWW)**, häufig auch nur als Web bezeichnet, ist der einfache Zugriff auf multimediale Informationen in WWW-Servern möglich, ohne an bestimmten Dateistrukturen gebunden zu sein. Diese Datenbanken können sich weltweit an beliebigen Standorten befinden.



Das World Wide Web (WWW) ermöglicht den weltweiten Zugriff auf multimediale Informationen von WWW-Servern.

Für den Abruf und die Behandlung von WWW-Informationen ist als Bedienoberfläche ein Browser erforderlich. Typische Beispiele dafür sind Firefox und Explorer, die als Front-End-Software den Zugriff auf die multimedialen Informationen (Text, Grafik, Audio, Standbild, Bewegtbilder) durch einfache Bedienvorgänge ermöglichen.

Soll auf Informationen eines WWW-Servers zugegriffen werden, dann muss die als **URL [universal resource locator]** bezeichnete Fundstelle bekannt sein. Sie hat die vergleichbare Funktion wie eine Internetadresse und beginnt üblicherweise mit dem Kürzel http. Dies steht für „hypertext transfer protocol“ und ist die Bezeichnung für das Kommunikationsprotokoll, welches den Zugriff auf das WWW ermöglicht.



Zugriff auf WWW-Server durch URL [universal resource locator]



Beispiel:

Die URL des Hanser Verlags hat folgende Form: <http://www.hanser.de>

Zur Erstellung der Multimediadokumente im World Wide Web wird die speziell dafür entwickelte Programmiersprache HTML [hypertext markup language] verwendet.



HTML [hypertext markup language] = Programmiersprache zur Erstellung multimedialer WWW-Dokumente

Bei Wahl einer URL gelangt man im Regelfall zuerst auf eine meist als Homepage bezeichnete Startseite. Durch Anklicken entsprechender Felder sind dann die darunterliegenden Seiten erreichbar, aber auch an anderen Stellen gespeicherte Informationen. Wegen dieser Navigationsmöglichkeit wird bei dem vorstehend aufgezeigten Zugang auch von einem **Portal** gesprochen. Die Verbindungen zwischen den Informationen im WWW werden als **Hyperlinks** bezeichnet.

Für den Austausch von Dateien beliebigen Inhalts gibt es das bereits angeführte Übertragungsprotokoll FTP [file transfer protocol]. Es ermöglicht dem Internetnutzer Dateien von den zahlreichen FTP-Servern in seinem System zu speichern, was üblicherweise als Download bezeichnet wird. Die Daten sind auf den Servern häufig in komprimierten Formaten (z.B. zip) abgespeichert, um die Übertragungszeiten zum Nutzer möglichst kurz zu halten.



FTP [file transfer protocol] = Übertragungsprotokoll für Abruf und Download von Dateien, die komprimiert oder nicht komprimiert auf FTP-Servern zur Verfügung stehen

Eine besondere Kommunikationsform im Internet sind Foren, bei denen die Nutzer unmittelbar miteinander in Kontakt stehen und zwar durch den wechselseitigen Austausch von Textnachrichten. Es handelt sich dabei um Halbduplex-Betrieb und wird auch als „Chatten“ bezeichnet.



Foren ermöglichen den Nutzern unmittelbare Textkommunikation im Halbduplex-Betrieb.

Es gibt allerdings auch Foren, die als multilaterale Diskussionsrunden ausgelegt sind und häufig als Newsgroup bezeichnet werden. Hier werden zu vorgegebenen Themen Argumente, Meinungen und Stellungnahmen gespeichert und stehen wie an einem schwarzen Brett weltweit für jeden Nutzer zur Verfügung.



Newsgroups sind elektronische Diskussionsrunden für festgelegte Themen.

Neben der bisher betrachteten Datenübertragung wird das Internet inzwischen auch für Telefonie und Rundfunk, also Radio und Fernsehen, genutzt. Da es sich in beiden Fällen um Echtzeitübertragung handelt, im Internet jedoch paketweise Übertragung über beliebige Wege erfolgt, müssen entsprechende Vorkehrungen getroffen werden, um die ungestörte Wiedergabe beim Empfänger sicherzustellen. Es kommt deshalb ein als **Streaming** bezeichnetes Verfahren zum Einsatz, durch das Kontinuität und richtige Reihenfolge der Datenpakete sichergestellt wird.



Streaming stellt kontinuierliches Signal für Echtzeitwiedergabe sicher.

Telefonie über das Internet wird als VoIP [voice over internet protocol] bezeichnet. Es ist dafür eine geeignete Software erforderlich. Mit VoIP lassen sich weltweit kostenlose oder zumindest kostengünstige Telefongespräche realisieren.



VoIP (voice over IP) → Internettelefonie

Über das Internet besteht auch die Möglichkeit der weltweiten Übertragung von Radio- und Fernsehprogrammen im Streamingverfahren. Es gelten dafür die Bezeichnungen Internetradio oder Webradio bzw. Internetfernsehen oder Web-TV. Bei der Quellen-codierung wird die Bitrate typischer Internetanschlüsse berücksichtigt. Da es sich im Internet wegen der Adressierung stets um Punkt-zu-Punkt-Verbindungen handelt, muss

dies für Rundfunkübertragung auf Punkt-zu-Mehrpunkt erweitert werden. Je mehr gleichzeitige Zugriffe auf ein Programm möglich sein sollen, umso größer wird allerdings der technische und damit kostenrelevante Aufwand.



Beim Internetradio und Internetfernsehen ist stets nur eine definierte Zahl von gleichzeitigen Zugriffen auf ein Programm möglich.

Grundsätzlich ist Internetfernsehen für die Wiedergabe mit Computern konzipiert. Die Bildqualität reicht damit meist nicht für Fernsehgeräte mit großen Bildschirmen aus.



Internetfernsehen ist für die Wiedergabe mit Computern konzipiert.

Werden Programmbeiträge von Servern im Internet heruntergeladen und vor der Wiedergabe zwischengespeichert, dann liegt Podcasting vor. Es handelt sich also nicht um Echtzeit-Direktwiedergabe, weshalb die Bitrate des Internetanschlusses unkritisch ist.



Podcasting = Herunterladen von Programmbeiträgen zur Zwischenspeicherung vor der Wiedergabe

Die mit dem Internet realisierbaren Anwendungen und Dienste haben dazu geführt, dass diese auch in privaten Datennetzen (LANs oder MANs) angestrebt werden und zwar auf derselben technisch-betrieblichen Basis wie beim Internet. Für solche Konzepte mit netz-internen Varianten von E-Mail, WWW (mit Browser), FTP, Foren sowie Audio- und Videoübertragung gilt die Bezeichnung Intranet, da sie nur einer geschlossenen Benutzergruppe zur Verfügung stehen.



Intranet = Private Netze mit internetvergleichbaren Anwendungen und Diensten

Intranets sind bei vielen Firmen und Organisationen bereits ein Teil ihrer organisatorischen Struktur. Dabei kann sich ein Intranet auch an mehreren Standorten befinden, die über entsprechende Technologie miteinander verbunden sind. Im Grenzfall kann ein Intranet auch weltweit verteilt sein.

Da von Intranets auch auf das Internet zugegriffen werden soll, werden solche Übergänge jeweils mit einer **Firewall** geschützt (**Bild 14.73**). Auf diese Weise ergibt sich eine ausreichende Sicherheit für die verschiedenen Informationswege bei optimaler Zugriffsmöglichkeit auf die Daten.

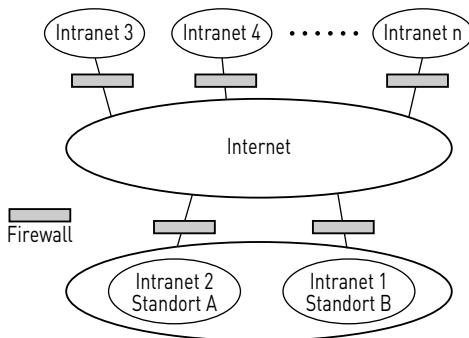


Bild 14.73 Verknüpfung zwischen Intranets und dem Internet

■ 14.5 Telefonie

14.5.1 Festnetz-Telefonie

Neben Fernsehen und Internet stellt das meist als Telefonie bezeichnete Fernsprechen die wichtigste Mediennutzung dar. Es handelt sich dabei stets um bidirektionale Individualkommunikation für Sprache, also Voll duplex-Betrieb, der über das Fernmeldenetz abgewickelt wird. Jeder an dieses Netz angeschlossene Teilnehmer (Tln) als Nutzer der Telefonie soll dabei mit seinem Telefon wahlfrei jeden anderen Teilnehmer erreichen können. Es bedarf deshalb der Vermittlung im Netz, um die erforderlichen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen aufzubauen zu können. Das erfolgt durch die als Netzknoten (NK) [network nod] bezeichneten Vermittlungsstellen (VSt). Diese weisen untereinander Verbindungsleitungen auf. Die Verbindung zwischen einem Netzknoten und dem Anschluss bei einem Teilnehmer wird als Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL) [subscriber line] bezeichnet (**Bild 14.74**).

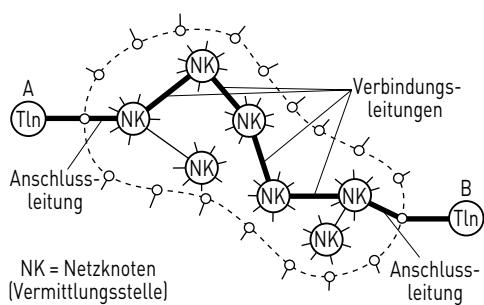


Bild 14.74 Struktur des Fernmeldenetzes



Das Fernmeldenetz ermöglicht durch Vermittlung wahlfrei bidirektionale Sprachkommunikation zwischen zwei Teilnehmern.

Für die Steuerung der Verbindungen in einem Netzknoten ist eine entsprechende Signalisierung vom Teilnehmer erforderlich, damit die gewünschte Verknüpfung erfolgt. Diese werden durch das Koppelfeld, dem Kern jeder Vermittlungsstelle realisiert. Am Eingang und Ausgang befinden sich Anschalteinheiten, die einerseits die Anpassung an die

ankommenden bzw. abgehenden Leitungen bewirken, andererseits aber auch die Verarbeitung der Signalisierung zur Steuerung des Koppelfeldes sicherstellen (**Bild 14.75**).

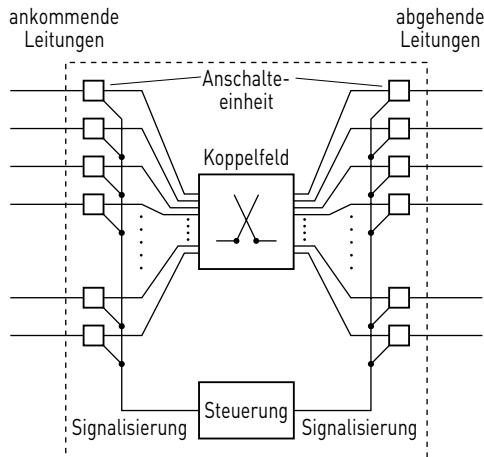


Bild 14.75 Netzknoten (Konzept)

Bei Netzknoten können die ankommenden bzw. abgehenden Leitungen auch Teilnehmer-Anschlussleitungen sein. Es handelt sich dann um eine Teilnehmer-Vermittlungsstelle (TVSt).

Die Durchführung der Kommunikation, also Vermittlung und Übertragung, erfolgt im heutigen Fernmeldenetz ausschließlich digital. Es lassen sich folgende Ebenen unterscheiden:

- Übertragungsebene
- Vermittlungsebene
- Dienstebene

Für ihre Funktion benötigt jede Ebene die Zuarbeit der darunterliegenden Ebene(n) (**Bild 14.76**). Die Übertragungsebene bildet die Basis jedes Netzes und umfasst alle für die Übertragung erforderlichen Verbindungstechniken. Dabei kann es sich um elektrische Leitungen (Kupferkabel), optische Leitungen (Lichtwellenleiter) oder Funkstrecken handeln. Dazu gehören aber auch alle Modulations-, Multiplex- und Zugriffsverfahren, weil diese die effiziente Nutzung der Übertragungskanäle ermöglichen.

Bei leitungsgebundenen Konzepten wird die Bezeichnung Festnetz verwendet. Bei diesem sind systembedingt nur stationäre Anwendungen möglich. Erfolgt dagegen der Einsatz von Funkverbindungen, dann handelt es sich um Mobil(funk)netze. Bei diesen lässt sich auch portable und mobile Kommunikation realisieren.



Telefonie kann über Festnetze oder über Mobilfunknetze (Mobilnetze) erfolgen.

Die Vermittlungsebene wird durch die verschiedenen Netzknoten gebildet. Diese sind durch Abstützung auf die Übertragungsebene miteinander vernetzt und bilden die Drehscheibe für die Kommunikation, da nur mit ihrer Hilfe eine gezielte (also individuelle)

Verbindung zwischen zwei Netzzugangspunkten mit den angeschlossenen Endgeräten der Teilnehmer realisierbar ist. Das kann verbindungsorientiert oder verbindungslos erfolgen. Im Falle des Fernmeldenetzes handelt es sich um eine verbindungsorientierte Variante, bei der für die Dauer der Übertragung eine Verbindung zwischen den Endgeräten der Teilnehmer besteht. Dabei lassen sich festgelegte drei Phasen unterscheiden, nämlich der Verbindungsauftbau, die Übertragung und der Verbindungsabbau.

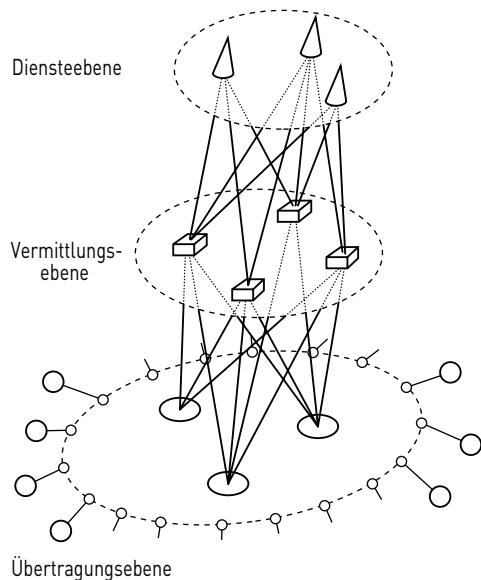


Bild 14.76 Ebenen beim Fernsprechnetz

Während Übertragungs- und Vermittlungsebene zur Infrastruktur gehören, bezieht sich die Dienstebene auf die Nutzung. Es lassen sich folgende Arten unterscheiden:

- **Dienste-dedizierte Netze**
Bei diesen Netzen ist nur ein spezifischer Dienst möglich.
- **Dienste-integrierende Netze**
Bei diesen Netzen können gleichzeitig und ohne gegenseitige Beeinflussung mehrere unterschiedliche Dienste abgewickelt werden. Dies bedeutet, dass für zwei oder mehr unterschiedliche Dienste nur eine Verbindung erforderlich ist.

Beim Fernmeldenetz waren ursprünglich nur Sprachdienste vorgesehen, im Rahmen der Digitalisierung ist aber inzwischen der Übergang zum dienste-integrierenden Netz erfolgt.



Fernmeldenetze wurden für Sprachdienste konzipiert, ermöglichen inzwischen aber auch andere Dienste.

Obwohl die menschliche Sprache ein relativ breites Frequenzband aufweist, reichen für eine gute Sprachverständlichkeit wegen der frequenzabhängigen Empfindlichkeit des menschlichen Gehörs Anteile im Bereich zwischen 1 kHz und 3 kHz aus. Die Bandbreite des Telefonsignals wurde deshalb international auf den Bereich 300 Hz bis 3,4 kHz fest-

gelegt. Dies ermöglicht den wirtschaftlichen Aufbau von Telefonnetzen mit ausreichender Übertragungsqualität in einem 4-kHz-Raster.



Standardisierter Frequenzbereich für das Telefonsignal:

300 Hz (untere Grenzfrequenz) ... **3,4 kHz** (obere Grenzfrequenz)

Jedes **Telefon** (auch als Telefonapparat bezeichnet) weist die Grundfunktionen „Rufen“, „Wählen“ und „Sprechen“ auf, wobei die Sprecheinheit Mikrofon und Hörer umfasst (**Bild 14.77**). Die Rufleinheit tritt in Aktion, wenn das Telefon über die Vermittlungsstelle von einem anderen Tln gerufen wird. Die Wähleinheit bewirkt, dass die Wählsignale in der für die Vermittlungsstelle geeigneten Form zur Verfügung stehen. Die Sprecheinheit dient der eigentlichen Sprachkommunikation.

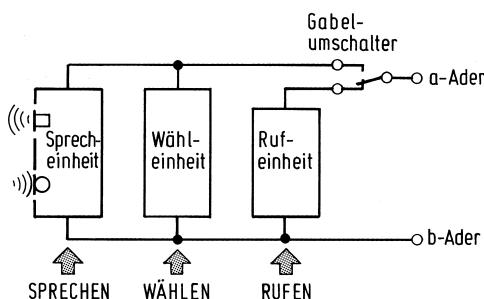


Bild 14.77 Grundfunktionen eines Telefons

Für den Wählvorgang werden in der Regel nur noch Tonfrequenzsignale und die dafür erforderlichen Tastenwahltelefone verwendet. Letztere weisen für jede Ziffer (0 bis 9) eine gesonderte Taste auf, deren Betätigung jeweils ein Mischsignal zweier Tonfrequenzen auslöst. Dieses wird zur Vermittlungsstelle (VSt) übertragen. Neben den Zifferntasten gibt es zusätzlich auch noch die Tasten „Stern“ und „Raute“ für spezifische Steuervorgänge (**Bild 14.78**). Mit Hilfe frequenzselektiver Empfänger ist in der VSt jede vom Teilnehmer gewählte Ziffer eindeutig identifizierbar und für die Ansteuerung der Koppelfelder verwendbar. Das aufgezeigte Konzept wird als Mehrfrequenzwahl-Verfahren (MFV) bezeichnet.

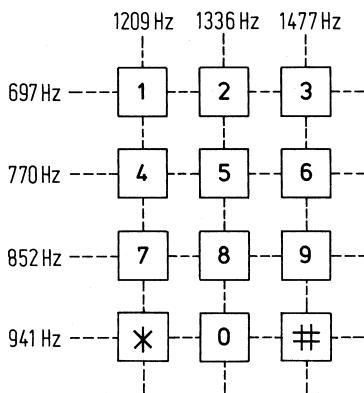


Bild 14.78 Frequenzpaare beim Mehrfrequenzwahl-Verfahren

Das MFV ist für elektronisch gesteuerte Koppelfelder in Vermittlungsstellen konzipiert, weil dadurch der Zeitaufwand für den Aufbau einer Verbindung gegenüber mechanischen Vermittlungseinrichtungen (Wählern) erheblich geringer und betriebssicherer ist.



Beim **Mehrfrequenzwahl-Verfahren** (MFV) bewirkt jeder Tastendruck die Übertragung einer Kombination von zwei Tonfrequenzsignalen zur Vermittlungsstelle.

Bei der Vermittlung einer Verbindung zwischen Teilnehmer (Tln) A und B sind stets folgende Schritte erforderlich:

- Tln A lässt die Vermittlungsstelle erkennen, dass er eine Verbindung zu einem anderen Teilnehmer aufbauen will.
→ z. B. durch Abheben des Telefonhörers
- Vermittlungsstelle lässt Tln A erkennen, dass sie zum Verbindungsauftbau bereit ist.
→ z. B. durch Dauerton als akustisches „Freizeichen“
- Tln A informiert die Vermittlungsstelle, dass er eine Verbindung zum Tln B haben möchte.
→ z. B. durch Wahl der Telefonnummer
- Vermittlungsstelle lässt Tln B erkennen, dass für ihn eine Verbindung vorgesehen ist.
→ z. B. durch akustisches Signal (Rufsignal) im Telefonapparat des Tln B
- Dabei erfolgt gleichzeitig die Prüfung, ob Tln B vielleicht bereits ein Gespräch führt. Falls dies der Fall ist, wird dem Tln A eine entsprechende Information gegeben.
→ z. B. durch unterbrochene Tonfolge als akustisches „Besetztzeichen“

Die Verbindung zwischen einem Telefonapparat, als Endgerät beim Teilnehmer, und der Vermittlungsstelle (VSt) erfolgt bekanntlich über die als verdrillte Zweidrahtleitung (a-Ader und b-Ader) ausgeführte Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL). Sie läuft bei der VSt auf eine als Teilnehmerschaltung (TS) bezeichnete Baugruppe auf. Damit wird einerseits die Steuerung der Koppelfelder in der Vermittlungsstelle ausgelöst und andererseits die Belegung durch andere Anrufer verhindert, solange der Teilnehmer selber eine Verbindung aufbauen will oder bereits ein Gespräch führt.

Die Struktur des öffentlichen Fernmeldenetzes weist zwei Ebenen auf, die Ortsnetzebene und die Fernnetzebene. Die Netzknoten in der **Ortsnetzebene** werden als digitale Ortsvermittlungsstellen (DIVO) bezeichnet und lassen sich in Teilnehmer-Vermittlungsstellen (TVSt) und Durchgangs-Vermittlungsstellen (DVSt) einteilen. An einer TVSt sind die Endgeräte der Teilnehmer angeschlossen, weshalb für diese Verbindungen die Bezeichnung Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL) gilt. Die Durchgangs-Vermittlungsstellen sind dagegen für Verbindungen zu anderen Netzknoten (Vermittlungsstellen) in der Fernnetzebene oder Ortsnetzebene zuständig.

Während es sich in der Ortsnetzebene um Sternnetze handelt, weist die **Fernnetzebene** eine ausgeprägte Maschenstruktur auf. Die dort eingesetzten Netzknoten werden als digitale Fernvermittlungsstellen (DIVF) bezeichnet. Es handelt sich dabei um Regional-Vermittlungsstellen (RVSt), welche die Verbindung zwischen Ortsnetzebene und Fernnetzebene sicherstellen und Weitverkehrs-Vermittlungsstellen (WVSt), die ein robustes

Netzkonzept und hohe Netzverfügbarkeit gewährleisten (**Bild 14.79**). Außerdem stellen sie den Übergang in das internationale Fernsprechnetz sicher.

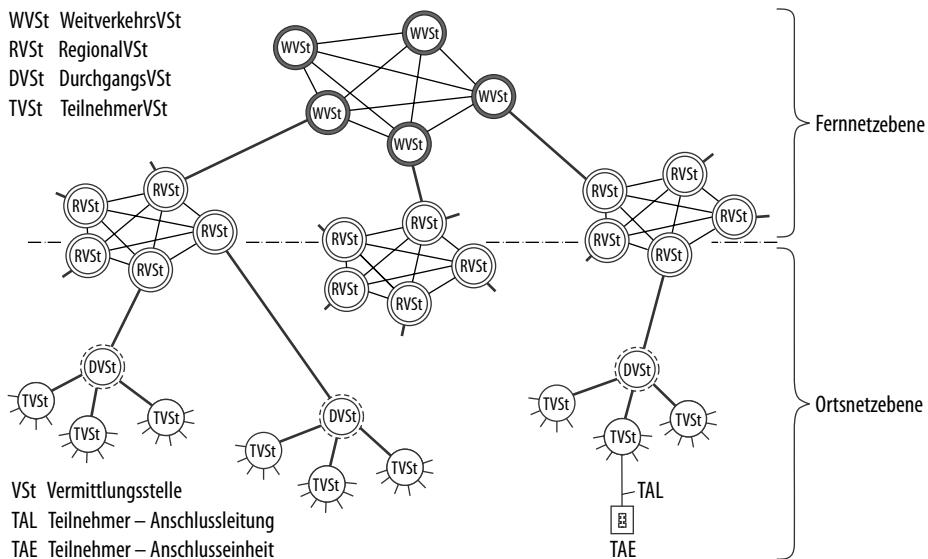


Bild 14.79 Vermittlungsstellen im digitalen Fernmeldenetz



Öffentliches Fernmeldenetz

- Ortsnetzebene → Digitale Ortsvermittlungsstellen (DIVO)
- Fernnetzebene → Digitale Fernvermittlungsstellen (DIVF)

Der vollständige Übergang auf digitale Vermittlung und Übertragung führte beim öffentlichen Fernmeldenetz zum dienste-integrierenden digitalen Fernmeldenetz [integrated services digital network (ISDN)]. Es bestand dabei die Vorgabe, aus wirtschaftlichen Gründen die vorhandenen Teilnehmer-Anschlussleitungen (TAL) ohne Änderungen weiterzuverwenden. Dadurch wurden für den **ISDN-Basisanschluss** zwei gleichzeitig ohne gegenseitige Beeinflussung verfügbare Nutzkanäle und ein gesonderter Kanal für Steuerung, Signalisierung und Überwachung möglich. Jeder **Basiskanal** (B-Kanal) weist dabei eine Bitrate von 64 kbit/s auf. Während es sich beim **Datenkanal** (D-Kanal) um 16 kbit/s handelt, was zu 144 kbit/s für den ISDN-Basisanschluss führt.

Beim ISDN benötigt jeder Teilnehmer einen **ISDN-Basisnetzabschluss** [network termination basic access (NTBA)], an deren teilnehmerseitigen Ausgang bis zu acht ISDN-fähige Endgeräte angeschlossen werden können. Es handelt sich um eine Parallelschaltung, realisiert durch den **S₀-Bus** in Vierdrähtertechnik. Für den Anschluss ISDN-fähiger Endgeräte an diesen Bus wurde die ISDN-Anschluseinheit (IAE) standardisiert. Mit Hilfe entsprechender Endgeräte-Adapter [terminal adapter (TA)] ist es aber auch möglich, die bisher üblichen analogen Endgeräte (z. B. Telefon) weiterzuverwenden (**Bild 14.80**). Dabei sind verständlicherweise nicht alle Leistungsmerkmale von ISDN verfügbar, wie Anklopfen,

Dienstwechsel, Endgerätewechsel, Parken einer Verbindung, Makeln, Konferenzschaltung und andere.

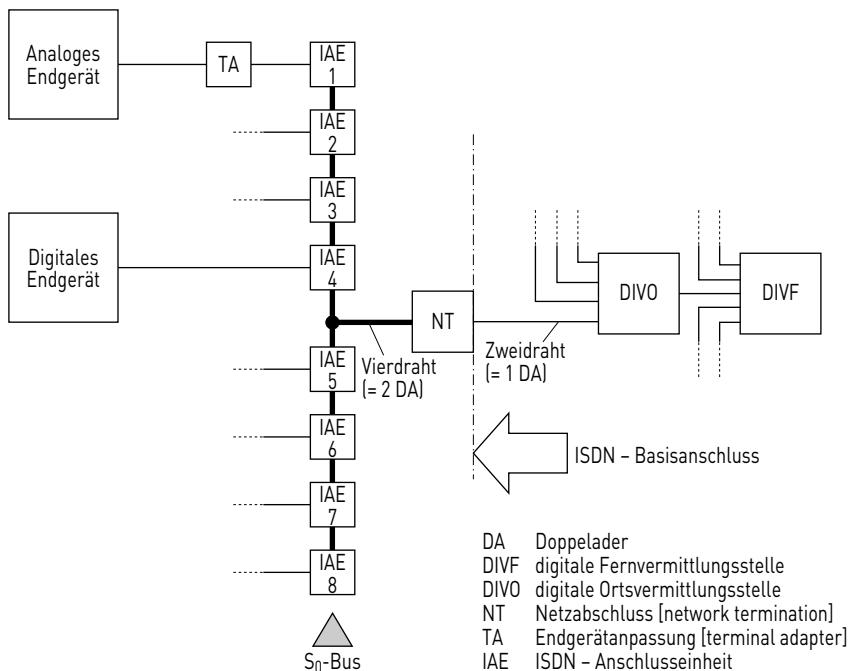


Bild 14.80 Funktionsprinzip des ISDN



Beim ISDN sind gleichzeitig zwei Basiskanäle mit jeweils 64 kbit/s ohne gegenseitige Beeinflussung nutzbar.

Der Anschluss analoger Telefone oder anderer Geräte nach einem Endgeräte-Adapter erfolgt über die als **Telekommunikations-Anschlussseinheit** (TAE) bezeichnete standardisierte Steckverbindung. Es handelt sich um einen Flachstecker mit jeweils drei Kontakten auf beiden Seiten, wobei durch mechanische Codierung die Varianten „F“ (Fernsprech) und „N“ (Nicht-Fernsprech) zu unterscheiden sind (**Bild 14.81**). An die TAE-F können nur Telefone angeschlossen werden, für alle anderen Geräte (z.B. Telefaxgerät, Modem, ...) ist es die TAE-N.

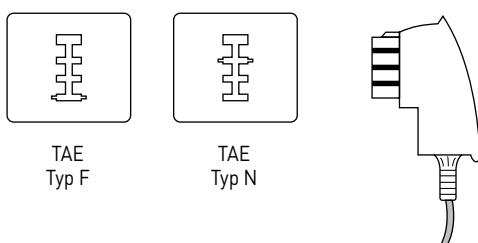


Bild 14.81 Telekommunikations-Anschlussseinheit

Jeder Teilnehmer-Anschluss an das öffentliche Fernmeldenetz ist bekanntlich durch eine Rufnummer (Telefonnummer) eindeutig identifizierbar. Da jedoch bei einem ISDN-Anschluss zwei Verbindungen gleichzeitig möglich sind und auch mehrere Endgeräte für unterschiedliche Dienste angeschlossen werden können, erfolgt hier die Zuordnung von drei oder mehr Rufnummern für den Anschluss, um die Dienste- und Endgeräteauswahl zu ermöglichen (**Bild 14.82**). Für dieses Konzept gilt die Bezeichnung „Mehrfachrufnummer“ [multiple subscriber number (MSN)].

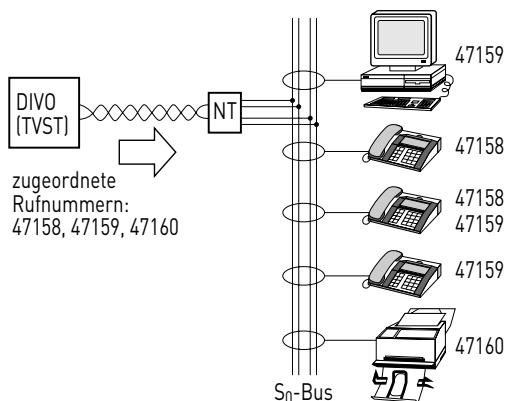


Bild 14.82 Mehrfachrufnummern

Sollen bei ISDN mehr als zwei Verbindungen über einen Anschluss abgewickelt werden können, dann reicht der ISDN-Basisanschluss nicht mehr aus, sondern es ist ein höherwertiger ISDN-Anschluss erforderlich. Es handelt sich dann um den **Primärmultiplexanschluss** [primary rate multiplex access (PMXA)]. Er stellt dreißig B-Kanäle, einen D-Kanal und einen S-Kanal mit jeweils 64 kbit/s zur Verfügung, wobei der S-Kanal für die Synchronisation benötigt wird. Die Gesamtbitrate eines PMXA beträgt somit 2,048 Mbit/s.

!	ISDN-Anschlüsse <ul style="list-style-type: none"> ▪ Basisanschluss (144 kbit/s) Kanäle: $2 \times B$ (à 64 kbit/s), $1 \times D$ (16 kbit/s) ▪ Primärmultiplexanschluss (2048 kbit/s) Kanäle: $30 \times B$, $1 \times D$ und $1 \times S$ (à 64 kbit/s)
--	---

14.5.2 DSL

Der Frequenzbereich für das Telefonsignal ist international von 300 Hz bis 3,4 kHz festgelegt. Aus physikalischer Sicht stellt das jedoch nicht den Grenzwert für die Teilnehmer-Anschlussleitungen (TAL) dar. Es wurden deshalb Verfahren entwickelt, um unabhängig vom Telefonsignal zusätzliche digitale Übertragungskapazität verfügbar zu machen, die für beliebige Anwendungen genutzt werden kann. Dafür gilt die Bezeichnung „Digitale Teilnehmer-Anschlussleitung“ [digital subscriber line (**DSL**)].

DSL arbeitet im Vollduplex-Betrieb mit einem Hinkanal (Vorwärtskanal) [forward channel] vom Netzknoten zum Teilnehmeranschluss und einem Rückkanal [return channel] vom Teilnehmeranschluss zum Netzknoten. Für den Hinkanal wird auch die Bezeichnung Downlink (Abwärtsstrecke) verwendet, beim Rückkanal ist es Uplink (Aufwärtsstrecke). Die Leistungsfähigkeit beider Kanäle ist durch ihre Bitraten gekennzeichnet. In der Regel weist bisher der Hinkanal stets größere Bitraten auf als der Rückkanal. Dafür gilt die Bezeichnung ADSL [asymmetrical digital subscriber line] (**Bild 14.83**). Die in der Praxis üblichen DSL-Varianten sind aus der **Tabelle 14.5** ersichtlich. Dabei ist erkennbar, dass mit zunehmender Bitrate auch die genutzte Bandbreite ansteigt. Da diese über die verdrillte Zweidrahtleitung ausgeführte TAL bereitgestellt werden muss, spielen deren Länge und die Durchmesser der Leitungsdänen eine wichtige Rolle. Je länger die TAL, umso größer ist die Dämpfung des Signals. Da die Werte frequenzabhängig sind, wird die für eine störungsfreie Übertragung zulässige Länge der TAL mit zunehmender Bandbreite bzw. Bitrate immer kleiner. Wird der Durchmesser der Leitungsdänen betrachtet, dann lässt sich feststellen, dass die Dämpfung des Signals mit abnehmendem Aderndurchmesser ansteigt. Die zulässige Länge der TAL hängt somit unmittelbar von der Dimensionierung des Leitermaterials ab.

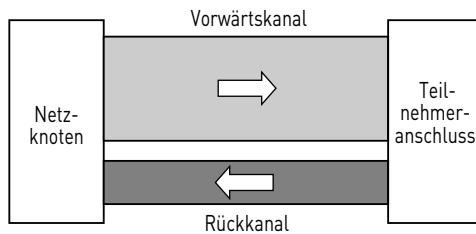


Bild 14.83 ADSL

Tabelle 14.5 DSL-Varianten

Bezeichnung	Genutzte Bandbreite	Hinkanal	Rückkanal
ADSL			
Asymmetrical Digital Subscriber Line	0,138...1,1 MHz	4...6 Mbit/s	0,1...1 Mbit/s
ADSL2+			
Extended Asymmetrical Digital Subscriber Line	0,138...2,2 MHz	16...25 Mbit/s	1...3,5 Mbit/s
VDSL1			
Very High Data Rate Digital Subscriber Line	0,138...12 MHz	25...50 Mbit/s	2...5 Mbit/s
VDSL2			
Extended Very High Data Rate Digital Subscriber Line	0,138...30 MHz	50...100 Mbit/s	5...10 Mbit/s



DSL nutzt den Frequenzbereich oberhalb des Telefonsignals. Die Leistungsfähigkeit eines DSL-Anschlusses hängt von der Länge und dem Aderndurchmesser der Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL) ab.

14.5.3 Schnurloses Telefon

Als spezifisches Merkmal jedes Festnetzes gilt, dass bedingt durch die erforderliche Verbindung vom Telefon zur TAE lediglich stationärer Betrieb möglich ist. Dieser nicht immer als komfortabel geltenden Situation kann durch den Einsatz **schnurloser Telefone** [cordless telephone (CT)] abgeholfen werden. Solche Telefone bestehen aus einer Basisstation, die mit der TAE über einen TAE-F-Stecker verbunden wird, für die Stromversorgung ein Steckernetzteil aufweist und bis zu sechs Mobilteilen, die über eine bidirektionale Funkverbindung mit der Basisstation kommunizieren. Durch die von der Basisstation bewirkte Funkzelle können innerhalb deren Versorgungsreichweite überall in Wohnung oder Haus Telefongespräche empfangen oder aufgebaut werden. Dieses Konzept ist unter der Bezeichnung **DECT** [digital enhanced cordless telecommunications] als EN 300 175 standardisiert. Die wichtigsten Spezifikationen von DECT sind aus **Tabelle 14.6** ersichtlich.

Tabelle 14.6 DECT-Spezifikationen

Frequenzbereich	1880 ... 1900 MHz
Sendeleistung	10 mW
Kanalzahl	10
Kanalbandbreite	1728 kHz
Duplexverfahren	TDD
Modulationsverfahren	GFSK
Zugriffsverfahren	TDMA
Rahmenlänge	10 ms
Zahl der Zeitschlitte pro Rahmen	24
Dauer eines Zeitschlitzes	416,7 µs
Übertragungsgeschwindigkeit	1,152 Mbit/s
Kanalzuweisung	dynamisch
Sprachübertragung	digital
Sprachcodierung	ADPCM, 32 kbit/s
Abhörsicherheit	ja



DECT ermöglicht ortsunabhängiges Telefonieren in Wohnung oder Haus.

14.5.4 Telefax

Während das Telefon der Sprachkommunikation dient, können **Telefaxgeräte** (Fernkopierer) beliebige Bild- und Textvorlagen über den Telefonkanal im Halbduplex-Betrieb von einem Teilnehmer zu einem anderen in Schwarz-Weiß übertragen. Dazu wird die Vorlage zeilenweise optisch abgetastet, die daraus gewonnenen elektrischen Signale übertragen und auf der Empfangsseite mit Hilfe einer entsprechenden Druckeinrichtung als Papierdokument ausgegeben.

Ein Telefaxgerät besteht aus vier Hauptgruppen (**Bild 14.84**). Die Leseeinrichtung setzt die Vorlage in elektrische Signale um. Für die Abtastung kommen elektrooptische Wandler zum Einsatz, im Regelfall sind es als ladungsgekoppelte Schaltungen [charge coupled device (CCD)] aufgebaute Bildsensoren. Sie tasten die Vorlage punktweise oder zeilenweise ab. Die Schreibeinrichtung soll dagegen die empfangenen elektrischen Signale in einen Ausdruck auf Papier umsetzen. Dabei kann es sich um Normalpapier oder Thermopapier handeln. Die Verbindung zum Fernmeldenetz erfolgt über einen Modulator (für Sendung) bzw. Demodulator (für Empfang). Diese Baugruppe wird deshalb als Modem bezeichnet. Sie stellt für beide Betriebsrichtungen die Anpassung zum Übertragungskanal her. Das Zusammenspiel der aufgezeigten drei Funktionsgruppen wird durch eine Steuereinheit bewirkt.

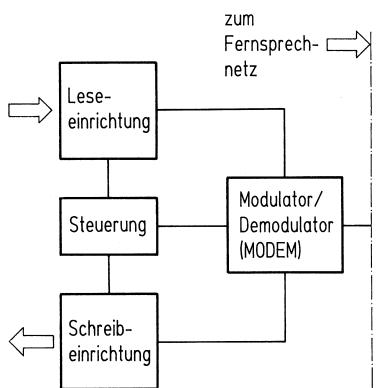


Bild 14.84 Telefaxgerät (Funktionseinheiten)

Die Telefaxübertragung stellt einen Kompromiss zwischen Auflösung und Übertragungsdauer der Vorlage dar. Bei den gängigen Telefaxgeräten beträgt die Auflösung 3,85 Zeilen/mm oder 7,8 Zeilen/mm, wobei die Übertragung einer Vorlage im A4-Format weniger als eine Minute dauert. Es wird mit Frequenzumtastung [frequency shift keying (FSK)] gearbeitet und Fehlerschutz verwendet, so dass bei Übertragungsfehlern deren automatische Korrektur möglich wird.

Das Übertragungsprotokoll für Telefax basiert auf einer Handschlagprozedur [handshake procedure]. Die beiden zu einer Verbindung gehörenden Telefaxgeräte stimmen sich dabei vor Beginn der Übertragung aufeinander ab. Durch dieses Verfahren ist auch sichergestellt, dass bei Übertragungsfehlern im Bedarfsfall fehlerhafte Teile wiederholt übertragen werden.

Telefaxgeräte treten verstärkt als Bestandteil von Multifunktionsgeräten auf, die auch scannen (abtasten) und drucken können.



Telefax nutzt den Telefonkanal für die Übertragung von Bild- und Textvorlagen im Halbduplex-Betrieb.

14.5.5 Mobilfunk

Die durch das Festnetz bedingte örtliche Bindung für die Nutzung führte zur Forderung nach portabler und mobiler Kommunikation. Diese lässt sich durch funkgestützte Netze realisieren, die in ihrer Gesamtheit den **Mobilfunk** ermöglichen.

Beim Mobilfunk wird die Teilnehmer-Anschlussleitung (TAL) im Prinzip durch eine Funkverbindung ersetzt, wobei als Endgeräte nun **Mobiltelefone** (in Deutschland meist als Handy bezeichnet) zum Einsatz kommen. Die Frequenzen der vorhandenen und in Einführung befindlichen Mobilfunksysteme liegen im Bereich 790 MHz bis 2,6 GHz. Für jede Verbindung sind wegen des Vollduplex-Betriebs zwei Frequenzen erforderlich.

Grundsätzlich kann bei Mobilfunknetzen die Vermittlung und/oder Signalübertragung analog oder digital erfolgen. Bei den heute im Betrieb befindlichen Systemen kommen allerdings inzwischen nur digitale Verfahren zum Einsatz.

Alle Mobilfunknetze sind zellulare Netze, bestehen also aus **Funkzellen**, die jeweils bestimmte Bereiche versorgen. Sie weisen immer eine **Basisstation** (BS) auf, die als Funkfeststation (FuFSt) für die Kommunikation mit den Mobiltelefonen als **Mobilstationen** (MS) zuständig ist. Die Betriebsfrequenzen für Senden und Empfangen in jeder Funkzelle müssen sich von denen der benachbarten Funkzellen unterscheiden, um gegenseitige Störungen zu vermeiden.

Planungstechnisch wird bei Funkzellen von der Form eines Sechsecks ausgegangen. Damit lässt sich deren frequenzmäßige Nutzung gut in einer Wabenstruktur verdeutlichen. Es bilden jeweils sieben Funkzellen ein Zellbündel, das als **Cluster** bezeichnet wird, wobei jede Funkzelle unterschiedliche Frequenzen für Senden und Empfangen aufweist (**Bild 14.85**). Alle sieben Basisstationen eines Clusters sind an eine Funkvermittlungsstelle (FuVSt) angeschlossen, die Verbindungen zu anderen Funkvermittlungsstellen und zum Festnetz ermöglicht (**Bild 14.86**).



Mobilfunk arbeitet mit Funkzellen, bei denen jeweils eine Basisstation (BS) für die Kommunikation mit den Mobilstationen (MS) der Teilnehmer zuständig ist.

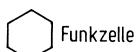
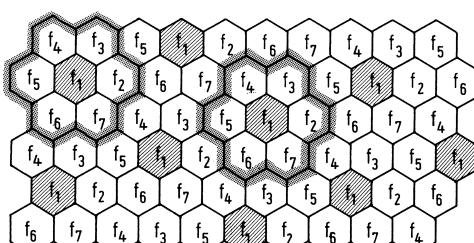
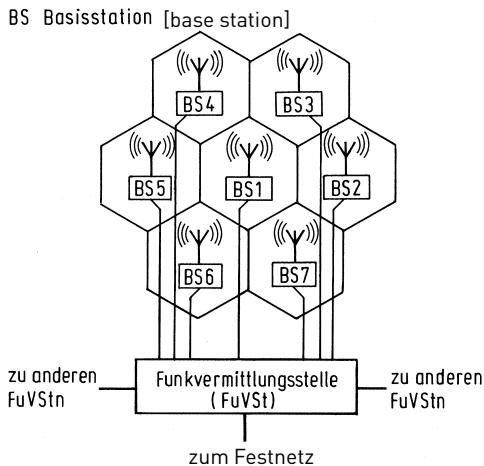
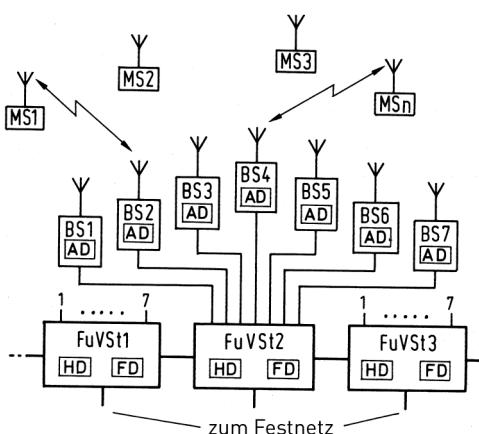


Bild 14.85 Zellenstruktur beim Mobilfunk

**Bild 14.86** Cluster und Funkvermittlungsstelle

Eine wichtige betriebliche Forderung beim Mobilfunk besteht darin, dass jeder Teilnehmer unabhängig von der Funkzelle erreichbar ist, in der er sich gerade befindet. Außerdem soll auch eine bestehende Verbindung beim Wechsel von einer Funkzelle in eine andere erhalten bleiben. Um diese Vorgaben erfüllen zu können, wird mit verschiedenen Dateien gearbeitet. Jeder Teilnehmer ist mit seinen individuellen Kenndaten und den aktuellen Betriebsdaten (Ein/Aus, Besetzt, momentaner Standort bezogen auf die Basisstation, ...) seines Mobiltelefons in der seinem Wohnort zugeordneten FuVSt erfasst. Es handelt sich dabei um die **Heimatdatei** (HD) [home location register (HLR)]. Es gibt in der FuVSt auch noch die **Besucherdatei** (BD) [visitors location register (VLR)]. Hier sind die Daten aller Mobiltelefone gespeichert, die sich gerade im Cluster dieser FuVSt aufhalten und im Netz angemeldet sind. In den einzelnen Basisstationen gibt es vergleichbare Dateien. Sie heißen **Aktivdateien** (AD), gelten nur für die Mobilstationen im Bereich der Funkzelle und werden durch zyklische Abfrage regelmäßig aktualisiert (**Bild 14.87**).



BS Basisstation

MS Mobilstation

FuVSt Funkvermittlungsstelle

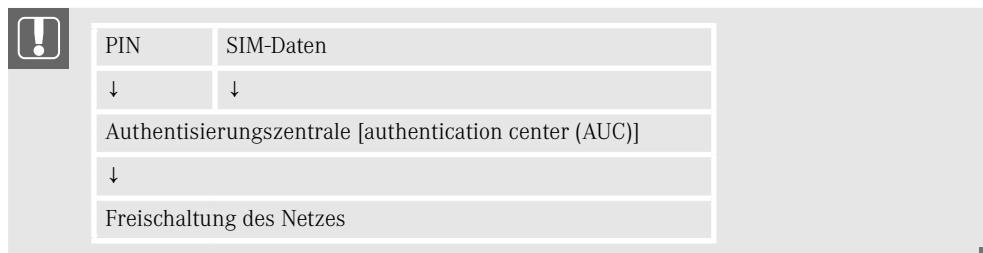
AD Aktivdatei

BD Besucherdatei

HD Heimatdatei

Bild 14.87 Dateien im Mobilfunknetz

Damit nur Berechtigte ein Mobilfunknetz nutzen können, ist jedes Mobiltelefon mit einer SIM-Karte [subscriber identification module card] ausgestattet, auf der die relevanten Daten des Nutzers gespeichert sind. Nach Einschalten des Mobiltelefons und Eingabe der persönlichen Identifizierungsnummer [personal identification number (PIN)] prüft der Netzbetreiber die Daten von der SIM-Karte und die PIN. Bei positivem Ergebnis erfolgt die Freischaltung für die Nutzung des Netzes.



Der vorstehend beschriebene Vorgang stellt das Einbuchen [login] dar, wird aber auch als Einloggen bezeichnet. Nach Abschluss der Prozedur ist der Teilnehmer im Netz bekannt, weil sich seine Daten in der jeweils „zuständigen“ Besucherdatei und Aktivdatei befinden. Er kann also Verbindungen aufbauen, aber auch gerufen werden.

! Einbuchen (Einloggen) [login] = Teilnehmer ist im Netz erreichbar und kann auch selber Verbindungen aufbauen.

Durch Ausschalten des Mobiltelefons werden die Daten des Teilnehmers in der Besucherdatei und Aktivdatei gelöscht. Der Teilnehmer hat sich damit aus dem Netz abgemeldet, was man nun als Ausbuchen [logout] oder Ausloggen bezeichnet. Direkte Gesprächsverbindungen zum Teilnehmer sind dann nicht mehr möglich, jedoch kann in den meisten Mobilfunknetzen in diesem Fall eine als Sprachbox bezeichneter Anrufbeantworter beim Netzbetreiber verfügbar gemacht werden, so dass der Teilnehmer damit wenigstens indirekt erreichbar ist.

! Ausbuchen (Ausloggen) [logout] = Teilnehmer ist nicht mehr direkt erreichbar, sondern nur noch über die Sprachbox. Der Aufbau von Verbindungen ist nicht möglich.

Die in einem Mobilfunknetz aufgebauten Verbindungen werden stetig auf ihre Qualität überwacht. Ein besonderer Aufwand ist erforderlich, wenn zum Beispiel bei einem Gespräch aus einem fahrenden Auto die Grenze zweier benachbarter Zellen überschritten wird. Bei diesem Wechsel ist eine Frequenzumschaltung erforderlich, wobei allerdings keine Unterbrechung der Verbindung auftreten soll. Als Kriterium für den Umschaltzeitpunkt dient das Ergebnis relativer Entfernungsmessungen zwischen Mobilstation und Basisstation durch Ermittlung der Laufzeiten. Zu diesem Zweck strahlt jede Basisstation Signale aus. Die beschriebene Übergabe des Gesprächs von einer Funkzelle an eine andere wird als „Handover“ bezeichnet.



Handover = Übergabe eines Gesprächs zwischen benachbarten Funkzellen

Mobilfunk gibt es in Deutschland seit den 50er-Jahren des letzten Jahrhunderts. Folgende Netze haben dabei nur noch historische Bedeutung:

- A-Netz (ab 1957)
156 ... 174 MHz, Handvermittlung, analoge Sprachübertragung
- B-Netz (ab 1972)
146 ... 174 MHz, Selbstwählbetrieb in 170 Funkbereichen, analoge Sprachübertragung
- C-Netz (ab 1986)
450-MHz-Bereich, landesweiter Selbstwählbetrieb, analoge Sprachübertragung, digitale Vermittlung/Steuerung

In den 90er-Jahren des letzten Jahrhunderts wurde der Grundstein für die digitale Mobilfunkkommunikation gelegt. Es handelt sich um den europäischen Standard **GSM** [global system for mobile communications]. Darauf basierend wurden die D- und E-Netze aufgebaut und an folgende Betreiber vergeben:

- **D1-Netz:** Telekom
- **D2-Netz:** Vodafone
- **E1-Netz:** E plus
- **E2-Netz:** Telefonica Germany (O_2)

Die beiden Netzfamilien unterscheiden sich durch ihre Betriebsfrequenzbereiche. Die D-Netze arbeiten im 900-MHz-Bereich, während es bei den E-Netzen der 1800-MHz-Bereich ist. Deshalb sind auch die Bezeichnungen GSM 900 und GSM 1800 üblich. Es lassen sich folgende technische Daten gegenüberstellen:

	GSM 900	GSM 1800
Downlink (BS → MS)	935...960 MHz	1805...1880 MHz
Uplink (MS → BS)	90...915 MHz	1710...1785 MHz
Duplexabstand	45 MHz	95 MHz
Trägerfrequenzen je Funkzelle	124	372
Kanalzahl	992	2976
Kanalbandbreite	200 kHz	200 kHz
Bitdauer	3,692 µs	3,692 µs
Dauer eines Zeitschlitzes	0,577 ms	0,577 ms

Für die Übertragung kommt eine Kombination von TDMA und FDMA zum Einsatz. Dazu werden die Frequenzbereiche von Downlink und Uplink in jeweils 124 (bei GSM 900) bzw.

372 (bei GSM 1800) Funkkanäle mit 200 kHz Bandbreite aufgeteilt. In jedem dieser Funkkanäle stehen acht Zeitschlüsse als Verkehrskanäle im Zeitmultiplex zur Verfügung. Bei auftretendem Fading wird bei GSM nach Möglichkeit automatisch ein Frequenzwechsel durchgeführt. Dafür gilt die Bezeichnung Frequenzsprungverfahren [frequency hopping].

Die Übertragung der Sprache erfolgt bei den D- und E-Netzen digital. Dazu werden zuerst die Sprachsignale digitalisiert und dann als Quellencodierung das Datenreduktionsverfahren RLEP [residual excited linear prediction] oder vergleichbare Versionen eingesetzt. Auf diese Weise ist es möglich, mit einer Bruttobitrate von 22,8 kbit/s für den Sprachkanal auszukommen, wobei 10 kbit/s für den Fehlerschutz genutzt werden. Bei den verbleibenden 12,8 kbit/s sind neben der Sprache auch noch die Signalisierungsdaten enthalten.

Um die **Signalisierungsdaten** der Basisstation ohne zusätzlichen Aufwand übertragen zu können, wird bei den D- und E-Netzen ein Zeitmultiplexverfahren verwendet. Die Quellencodierung des Sprachsignals bewirkt, dass im Takt von 12,5 ms Zeitschlüsse von ca. 1,1 ms auftreten. Diese werden nun für die Signalisierungsdaten genutzt, so dass auf dem Funkkanal zeitlich gestaffelt Sprache und Daten vorliegen.

Durch Einsatz des Zeitmultiplexverfahrens sind pro Funkkanal zehn Verbindungen gleichzeitig realisierbar. Die Übertragung zwischen Basisstationen und Mobilstationen erfolgt durch TDMA, also Vielfachzugriff im Zeitmultiplex. Die Daten von zehn Sprachkanälen werden zu einem TDMA-Rahmen von 32 ms Dauer zusammengefasst, wobei am Ausgang jeweils ein Rahmensynchronwort eingefügt ist. Jeder TDMA-Rahmen mit den zehn Sprachkanälen wird dem Träger eines der 124 Funkkanäle (bei GSM 900) bzw. 372 Funkkanälen (bei GSM 1800) aufmoduliert, die sich bei 200 kHz Kanalabstand im Rahmen der zugewiesenen Frequenzen ergeben. Als Modulationsverfahren wird vierwertige Phasenumtastung (4-PSK) verwendet (**Bild 14.88**).

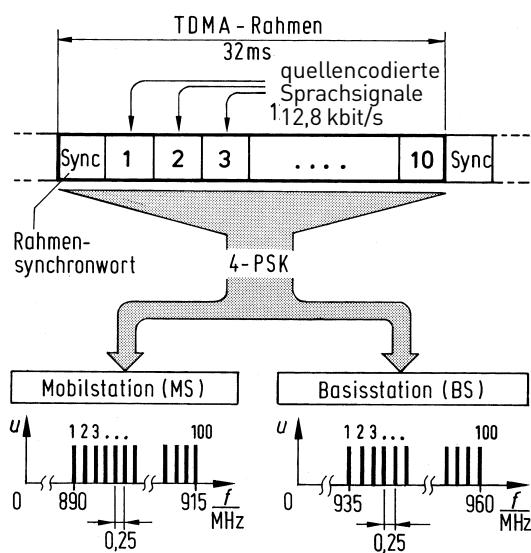


Bild 14.88 Übertragung durch TDMA beim D-Netz



GSM [global system for mobile communications]

- GSM 900: D1-Netz, D2-Netz
- GSM 1800: E-Netz, E2-Netz
- Quellencodierung: RELP [residual excited linear prediction]
- Übertragung/Zugriff: TDMA und FDMA
- Modulation: 4-PSK

Bei den D- und E-Netzen wird für die Sprachübertragung Leitungsvermittlung verwendet, also für jedes Gespräch eine individuelle Punkt-zu-Punkt-Verbindung aufgebaut. Die dafür typische Bitrate ist 9,6 kbit/s. GSM ermöglicht allerdings nicht nur Sprachübertragung, sondern zusätzlich auch Datenübertragung. Es wurde dabei durch stufenweise Entwicklung dem zunehmenden Bedarf an Übertragungskapazität im Rahmen der Systemwerte wie folgt Rechnung getragen:

HSCDS [high speed circuit switched data]

Leitungsvermittlung und Kanalbündelung, bis 115 kbit/s



GPRS [general packet radio system]

Paketvermittlung, bis 171 kbit/s



EDGE [enhanced data rate for GSM evolution]

Paketvermittlung, bis 384 kbit/s

Als sogenannte **dritte Mobilfunkgeneration** (3G) steht inzwischen **UMTS** [universal mobile communications system] zur Verfügung. Dieses System weist gegenüber GSM deutlich höhere Bitraten auf, nämlich bis zu 2 Mbit/s. Damit lassen sich vielfältige multimediale Anwendungen realisieren, was auch den komfortablen mobilen Internetzugang einschließt.

Auch bei UMTS handelt es sich um ein zellulares Funknetz. Es gibt einen terrestrischen und einen satellitengestützten Teil, weshalb der UMTS-Zugang über terrestrische Sender [UMTS terrestrial radio access network (UTRAN)] und der UMTS-Netzzugang über Satellit [UMTS radio access network (URAN)] zu unterscheiden sind. In beiden Fällen ist eine Verbindung der Basisstationen (BS) mit UMTS-Funkvermittlungsstellen [radio node controller (RNC)] als Netzketten gegeben. Diese sind über eine leistungsfähige leitungsgebundene Infrastruktur miteinander verknüpft. Übergeordnet ist die zentrale Systemsteuerung [main system controller (MSC)], die auch alle Verbindungen zu Netzen und Systemen außerhalb von UMTS sicherstellt (**Bild 14.89**).

UMTS arbeitet im Frequenzbereich 1,9 GHz bis 2,2 GHz. Bei dem für die meisten UMTS-Anwendungen genutzten UTRAN kommt CDMA (also Vielfachzugriff im Codemultiplex) im Modus Frequenzduplex [frequency division duplex (FDD)] zum Einsatz. Damit ist die verfügbare Übertragungskapazität optimal nutzbar.

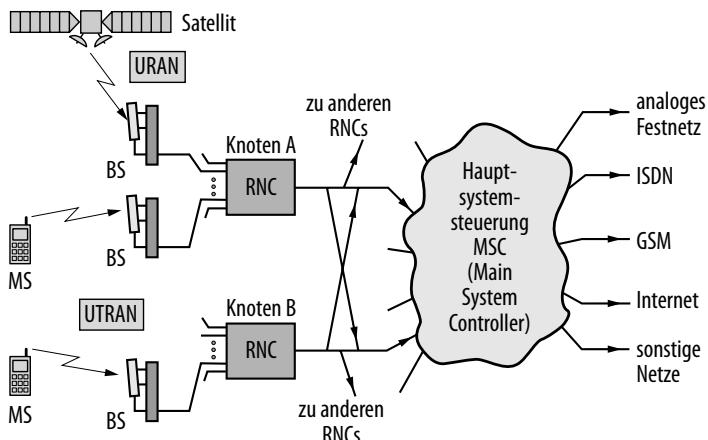


Bild 14.89 UMTS-Netzstruktur

Durch ergänzende Verfahren wird auch der Forderung nach schnellerer Datenübertragung Rechnung getragen. Beim Downlink, also vom Netz zum Teilnehmer, handelt es sich um **HSDPA** [high speed downlink packet access]. Hier ist theoretisch eine Bitrate von 14,6 Mbit/s erreichbar, in der Praxis sind Werte zwischen 7 Mbit/s und 10 Mbit/s verfügbar. Für den bei Interaktivität ebenfalls wichtigen Uplink, also vom Teilnehmer ins Netz, wurde **HSUPA** [high speed uplink packet access] entwickelt. Die Bitrate liegt bei maximal 5,8 Mbit/s, in der Praxis sind es in der Regel etwa 1,5 Mbit/s.



UMTS [universal mobile communications system]

- Frequenzbereich: 1,9 GHz bis 2,2 GHz
- Übertragung/Zugriff: CDMA im FDD-Modus
- HSDPA [high speed downlink packet access]
→ maximal 14,6 Mbit/s
- HSUPA [high speed uplink packet access]
→ maximal 5,8 Mbit/s

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass es beim Mobilfunk neben der Sprach- und Datenkommunikation auch noch einen weiteren typischen Dienst gibt. Es handelt sich um die Übertragung von Kurzmitteilungen in Textform. Für dieses Verfahren wird meist nur die Abkürzung SMS verwendet, abgeleitet von der englischen Bezeichnung „short message service“. Die Eingabe der Texte erfolgt über die normale Tastatur des Handys, weil durch Mehrfachbelegung der Zifferntasten auch die gewünschten Buchstaben generiert werden können.

Die Länge der einzelnen SMS ist begrenzt, die Übertragung erfolgt über das Netz, wenn es das Verkehrsaufkommen zulässt. Dadurch sind keine Prioritäten möglich.

SMS wird beim Mobilfunk umfassend genutzt, lässt sich aber in gleicher Weise auch im Festnetz realisieren.



SMS [short message service] = Kurzmitteilungsdienst für Texte begrenzter Länge; Übertragung in Mobilfunknetzen und im Festnetz ohne Priorität

Als nächster Schritt zur Optimierung der mobilen Breitbandkommunikation befindet sich die als **LTE** [long term evolution] bezeichnete **vierte Mobilfunkgeneration** in der Einführung. Der wesentliche Unterschied zu den bisherigen Mobilfunksystemen besteht darin, dass LTE vollständig IP-basiert arbeitet, also die für das Internet verbindlich festgelegte paketorientierte Übertragungsstruktur verwendet. Für LTE sind der 800-MHz-Bereich, der 1,8 GHz-Bereich und der 2,6 GHz-Bereich vorgesehen, wobei Bandbreiten im Downlink und Uplink von 1,4 MHz bis 20 MHz verarbeitet werden können. Dabei sind FDD [frequency division duplex] und TDD [time division duplex] möglich.

LTE nutzt für den Downlink orthogonalen Frequenzmultiplex [orthogonal frequency division multiplex (OFDM)]. Die verfügbare Kanalbandbreite wird dabei in Unterträger von 15 kHz Breite und Zeitschlitz von 0,5 ms Dauer aufgeteilt. Damit ergeben sich aus $12 \times 7 = 84$ Elementen bestehende **Ressource-Blöcke**, deren einzelne Elemente mit QPSK, 16-QAM oder 64-QAM moduliert werden können. Das Verhältnis der bei LTE durch die Unterträger bedingten Kanäle zueinander wird als orthogonal bezeichnet, weil die Amplitude jedes Kanals auf der Mittenfrequenz seines Nachbarkanals exakt null beträgt. Damit ist sichergestellt, dass sich benachbarte Kanäle nicht gegenseitig beeinflussen können. Beim Uplink kommt bei LTE nicht OFDM, sondern das weniger rechenintensive Verfahren SC-FDMA [single carrier – frequency division multiplex access] zum Einsatz.

LTE ist primär für Breitbandanwendungen konzipiert, wobei pro Funkzelle bis zu 100 Mbit/s zur Verfügung stehen sollen.



LTE [long term evolution]

- Frequenzen: 800-MHz-Bereich, 1,8-GHz-Bereich, 2,6-GHz-Bereich
- Übertragung Downlink: OFDM
- Trägermodulation: QPSK, 16-QAM, 64-QAM
- Übertragung Uplink: SC-FDMA [single carrier FDMA]
- Modi: FDD, TDD

Zum Abschluss sei noch eine weitere Form der digitalen Kommunikation aufgezeigt. Es handelt sich um **VoIP** [voice over internet protocol] und bedeutet die paketorientierte Übertragung von Signalen gemäß dem Internet-Protokoll. Dabei spielt das **Session Initiation Protocol (SIP)** eine wichtige Rolle, weil es als Netzprotokoll zum Aufbau, zur Steuerung und zum Abbau einer Kommunikationssitzung zwischen zwei und mehr Teilnehmern dient und in der **IP-Telefonie** ein häufig angewendetes Protokoll ist. Da SIP zum TCP/IP-Protokollstapel gehört, kann es neben dem Internet auch für beliebige andere Infrastrukturen genutzt werden. Es ist die Tendenz erkennbar, dass zumindest im Festnetz VoIP mit SIP in näherer Zukunft verstärkt eine Rolle spielen wird, weil dies eine effizientere Nutzung der Netze ermöglicht.

■ 14.6 Triple Play

14.6.1 Einführung

Fernsehen, Internet und Telefonie stellen in der Praxis die wichtigsten Mediennutzungen dar. Für den Nutzer (Teilnehmer) soll deshalb der Zugang zu diesen Anwendungen mit möglichst geringem Aufwand erfolgen können. Hier liegt nun der Ansatz für Triple Play (TP), was mit „drei Dienste aus einer Hand“ übersetzt werden kann. Es sollen dabei nämlich Fernsehen, Internet und Telefonie über nur einen Netzanschluss gleichzeitig und ohne gegenseitige Beeinflussung verfügbar sein.



Triple Play (TP) = Gleichzeitige Nutzung eines Netzanschlusses für Fernsehen, Internet und Telefonie ohne gegenseitige Beeinflussung

Für Triple Play sind in der Praxis Breitbandkabelnetze, das Telefonfestnetz und inzwischen auch Satelliten von Bedeutung. Die dabei eingesetzten Verfahren werden nachfolgend gegenübergestellt.

14.6.2 Triple Play über das Breitbandkabelnetz

Die Umrüstung eines Kabelanschlusses auf die drei Nutzungen erfordert, bisherige Vertriebsysteme für Rundfunkprogramme durch interaktive Datenübertragung (Internet und Telefonie) zu ergänzen. Auf der Nutzerseite wird dafür die bisherige Teilnehmer-Anschlussdose (TAD) gegen eine Multimediasversion ausgetauscht. Diese weist einen zusätzlichen F-Stecker-Anschluss auf, an den das **Kabelmodem** angeschlossen wird. Die Anschlüsse für TV und Radio bleiben unverändert. Der Computer und das Telefon lassen sich unmittelbar an das Kabelmodem anschließen (**Bild 14.90**).



Beim Nutzer (Teilnehmer) ist ein Kabelmodem erforderlich.

Für die einwandfreie Funktion des Kabelmodems, nämlich die interaktive Datenübertragung zwischen der Anwender- und Anbieterseite, ist es allerdings erforderlich, dass die als Netzebene 4 bezeichnete Hausverteilanlage bis 862 MHz ausgelegt und rückkanalfähig ist. Das Gegenstück zum Kabelmodem ist auf der Anbieterseite die Funktionseinheit **CMTS** [cable modem termination system]. Sie befindet sich meist in der Kopfstelle für die Programmeinspeisung und stellt die bidirektionale Datenkommunikation über Hin- und Rückkanal sicher (**Bild 14.91**).

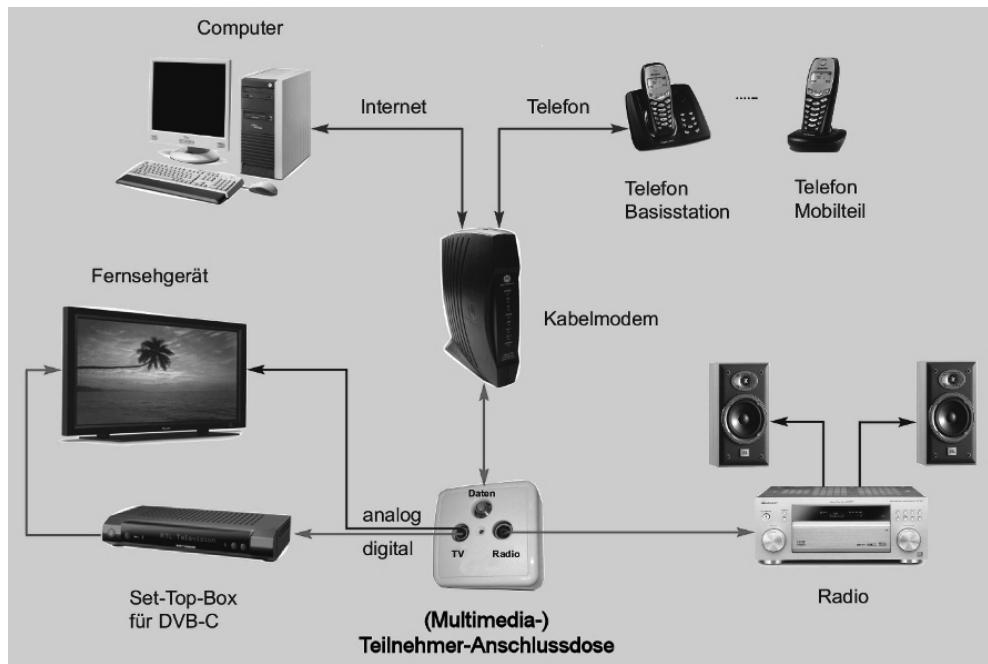


Bild 14.90 Nutzerseitige Ausstattung für Triple Play über Breitbandkabelnetze

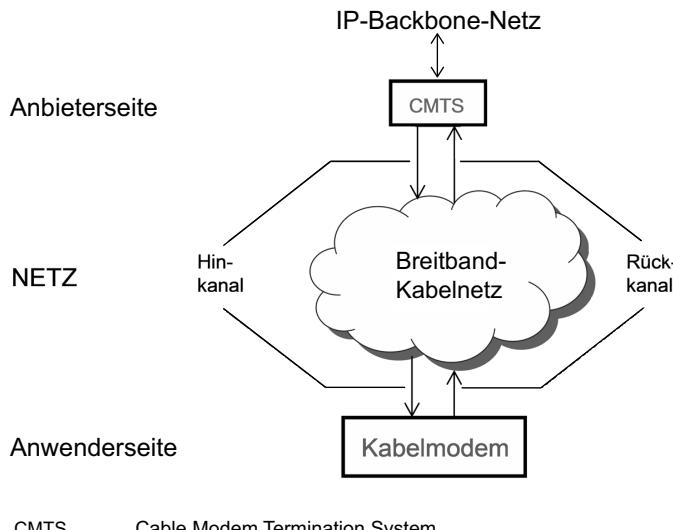


Bild 14.91 Struktur der interaktiven Datenübertragung über Breitbandkabelnetze

An jede CMTS kann stets nur eine begrenzte Zahl von Nutzern (z. B. 5000 oder 10 000) angeschlossen werden. Bei großen Breitbandkabelnetzen ist deshalb die Bildung von als **Cluster** bezeichneten Teilnetzen erforderlich (**Bild 14.92**).

Für das Zusammenwirken von Kabelmodem und CMTS kommt der DOCSIS-Standard [data over cable service interface specification] zum Einsatz. In ihm sind die Anforderungen für Datenübertragung in Breitbandkabelnetzen festgelegt, deshalb ist mit DOCSIS Kabelinternet und Kabeltelefonie realisierbar. Bei der in Einführung befindlichen Version DOCSIS 3.0 können im Hinkanal Bitraten bis 200 Mbit/s und im Rückkanal 120 Mbit/s erreicht werden. Hinzu kommt die Kompatibilität zu IPv6-Netzen.

DOCSIS [data over cable service interface specification] ermöglicht die Verwendung von Breitbandkabelnetzen für Datenübertragung. ■

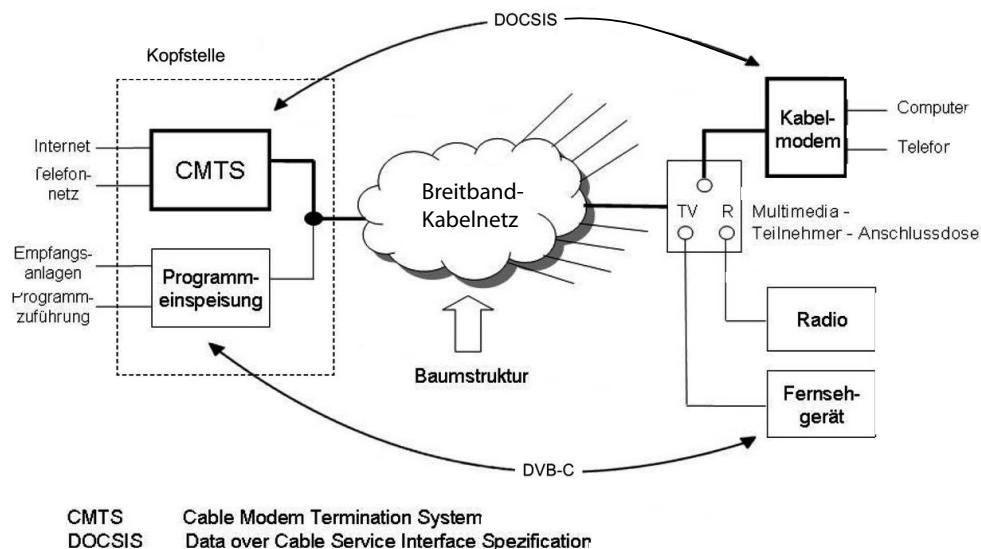


Bild 14.92 Triple Play über Breitbandkabelnetze

14.6.3 Triple Play über das Telefonfestnetz

Beim Telefonfestnetz werden verdrillte Kupfer-Doppeladern als Leitungsverbindungen vom Teilnehmeranschluss zur Vermittlungsstelle (Netzknoten) verwendet, die im Regelfall nicht abgeschirmt sind. Sie dienen zur Übertragung der üblichen Telefoniefrequenzen bis 3,4 kHz. Dafür genügen Bitraten von maximal 138 kbit/s. Die für Fernsehen und Internet erforderlichen Werte lassen sich bekanntlich durch DSL [digital subscriber line] realisieren. Dafür wird die Frequenzlage oberhalb des Telefoniebereichs genutzt.

Mit DSL können bis zu 50 Mbit/s im Hinkanal über die bisher verwendeten Teilnehmer-Anschlussleitungen (TAL) übertragen werden. Für den geregelten Datenverkehr über Hin- und Rückkanal ist ein **DSL-Modem** erforderlich. Sein Gegenstück auf der Anbieterseite ist der **DSLAM** [digital subscriber line access multiplexer] (**Bild 14.93**).

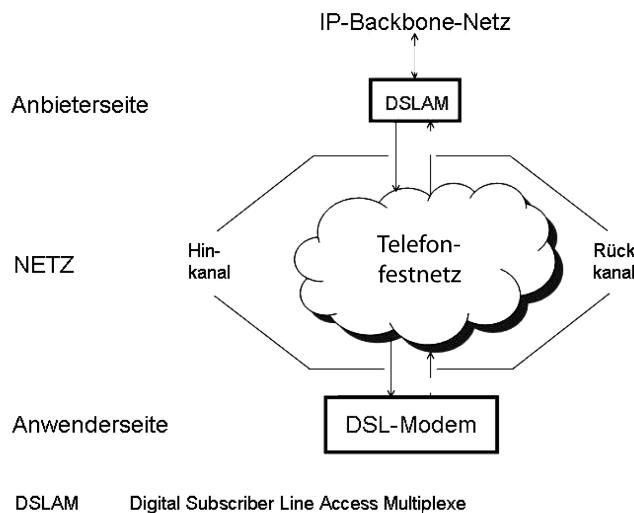


Bild 14.93 Struktur der interaktiven Datenübertragung über das Telefonfestnetz



Beim Nutzer (Teilnehmer) ist ein DSL-Modem erforderlich.

Bei Triple Play über das Telefonfestnetz bleibt im Gegensatz zum Kabelnetz die Anschlussdose beim Teilnehmer unverändert. Für die Trennung zwischen Telefon und DSL ist eine als **DSL-Splitter** bezeichnete Funktionseinheit erforderlich. Außerdem wird nach diesem ein **DSL-Router** mit mindestens zwei Ausgängen benötigt, da sich der Computer und das Fernsehgerät die Bitrate teilen müssen.

Fernsehprogramme werden bei Triple Play über das Telefonfestnetz nicht per DVB, sondern als IPTV übertragen. Der Teilnehmer benötigt deshalb eine dafür geeignete Set-Top-Box. Für die Telefonie muss man den entsprechenden Ausgang des DSL-Splitters mit einem **Netzabschluss** [network termination (NT)] verbinden. An diesen wird dann das bisherige Telefon angeschlossen (**Bild 14.94**).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass DSL-Splitter, DSL-Modem, DSL-Router und Netzabschluss (NT) häufig in einer Baugruppe integriert sind. Das vereinfacht die Anschlussarbeiten erheblich.

Die bei DSL tatsächlich erreichbare Bitrate hängt unter anderem von folgenden Faktoren ab:

- Leitungslänge zwischen DSL-Modem und DSLAM
- Frequenzabhängige Leitungsdämpfung
- Genutzte Bandbreite
- Leitungscode
- Fehlerschutz

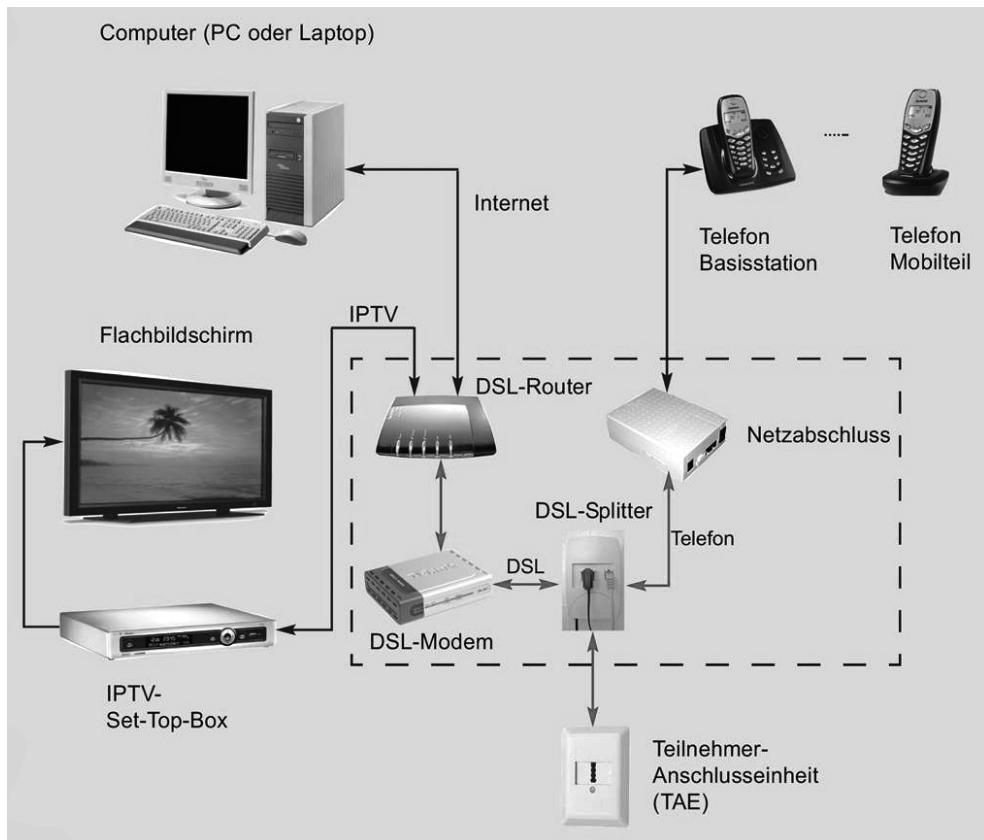


Bild 14.94 Nutzerseitige Ausstattung für Triple Play über das Telefonfestnetz

! Die Leistungsfähigkeit eines DSL-Anschlusses hängt von verschiedenen technischen Spezifikationen ab.

Die Datenübertragung zwischen DSL-Modem und DSLAM funktioniert nur bestimzungsgemäß, wenn bestimmte Pegelwerte nicht unterschritten werden. Deshalb sollten stets möglichst kurze Leitungsverbindungen zwischen den beiden Funktionseinheiten angestrebt werden. Bei ADSL kann der DSLAM meist noch im Netzknoten untergebracht werden, weil die üblichen Leitungslängen zu den Teilnehmeranschlüssen keine unzulässigen Dämpfungen bewirken. Im Falle von VDSL ist wegen der großen Bitrate und der damit auch größeren genutzten Bandbreite eine andere Lösung erforderlich. Die DSLAM-Installation erfolgt hier im letzten Kabelverzweiger (KVz) vor dem Teilnehmeranschluss. Bis zum KVz wird dann das Signal über Glasfaserleitungen zugeführt, bei denen die Dämpfungsprobleme elektrischer Leitungen nicht gegeben sind. Die ab dem KVz verbleibende Teilnehmer-Anschlussleitung ist damit für die große Bitrate kurz genug. Es gilt somit folgende Struktur:

Netzknoten
 ↓
 Glasfaserleitung
 ↓
 Kabelverzweiger (KVz) mit DSLAM
 ↓
 Verdrillte Kupfer-Doppelader
 ↓
 DSL-Modem

Da Telefonnetze für Sprachkommunikation konzipiert wurden, ist die Erweiterung auf Fernsehen und Internet technisch entsprechend aufwendig (**Bild 14.95**).

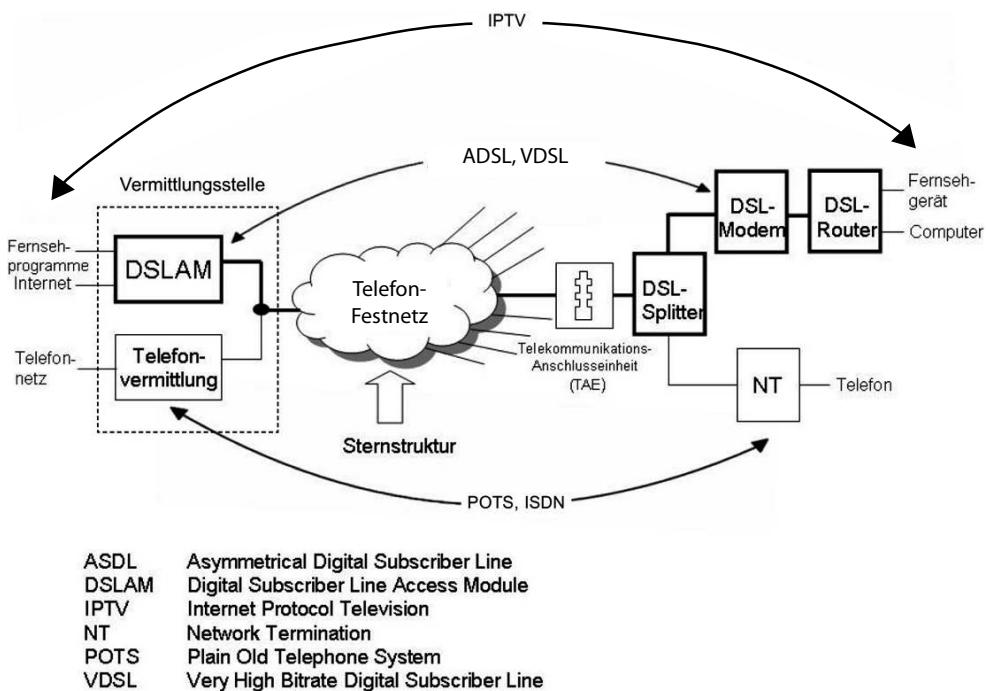


Bild 14.95 Triple Play über das Telefonfestnetz

14.6.4 Triple Play über Satellit

Der Empfang von Rundfunkprogrammen via Satellit ist ein seit vielen Jahren bewährtes Verfahren. Über Satelliten ist aber auch Datenkommunikation möglich, wobei sich beim Downlink als Hinkanal Bitraten im Mbit/s-Bereich realisieren lassen. Bei den ersten An-sätzen wurde als Rückkanal Bitraten stets eine Telefonleitung benötigt. Dieses Konzept stellte sich allerdings als wenig komfortabel heraus und erlangte keine Akzeptanz im Markt.

Für „richtiges“ Triple Play über Satellit wird ein **interaktiver LNB** [interactive low noise block converter] für die Satellitenantenne benötigt. Damit kann nicht nur vom Satelliten empfangen, sondern auch zum Satelliten gesendet werden (**Bild 14.96**). Auf diese Weise ist die angestrebte bidirektionale Datenkommunikation für Internet und Telefonie realisierbar. Für den Anschluss des Computers und des Telefons benötigt der Nutzer ein **Satellitenmodem** (Sat-Modem).



Bild 14.96 Satellitenantenne mit interaktivem LNB



Beim Nutzer ist ein interaktiver LNB und ein Satellitenmodem erforderlich.

Bei den im Markt verfügbaren Systemen tooway® (Eutelsat) und ASTRA 2Connect® stehen beim Downlink bis 10 Mbit/s und beim Uplink bis 4 Mbit/s zur Verfügung.

Für den Empfang der Fernseh- und Hörfunkprogramme wird eine Set-Top-Box oder ein digitales Fernsehgerät (d.h. Flachbildschirm mit integriertem Tuner) benötigt. In beiden Fällen müssen die Geräte für DVB-S ausgelegt sein, sollen auch HDTV-Programme empfangen werden, dann ist DVB-S2 erforderlich.

Wenn Internet und Telefonie nicht über denselben Satelliten abgewickelt werden wie die Programmzuführung, dann ist die Verbindung zu zwei Satelliten erforderlich (**Bild 14.97**). Es kann dabei in der Regel eine Satellitenantenne mit Mehrfachspeisung [multifeed] zum Einsatz kommen.

Der Vorteil von Triple Play über Satellit besteht darin, dass es keine Abhängigkeit von einer leitungsbezogenen Infrastruktur gibt. Dieses konvergente Angebot ist somit überall nutzbar, wo ungestörte Sichtverbindung zu dem bzw. den Satelliten besteht.

Es gilt bei Triple Play über Satellit allerdings zu berücksichtigen, dass wegen der systembedingten langen Übertragungswege jede Übertragung eine Verzögerung erfährt, was bei bestimmten Echtzeitanwendungen problematisch sein kann.



Bei Echtzeitanwendungen müssen die systembedingten Laufzeiten der Satellitenübertragung berücksichtigt werden.

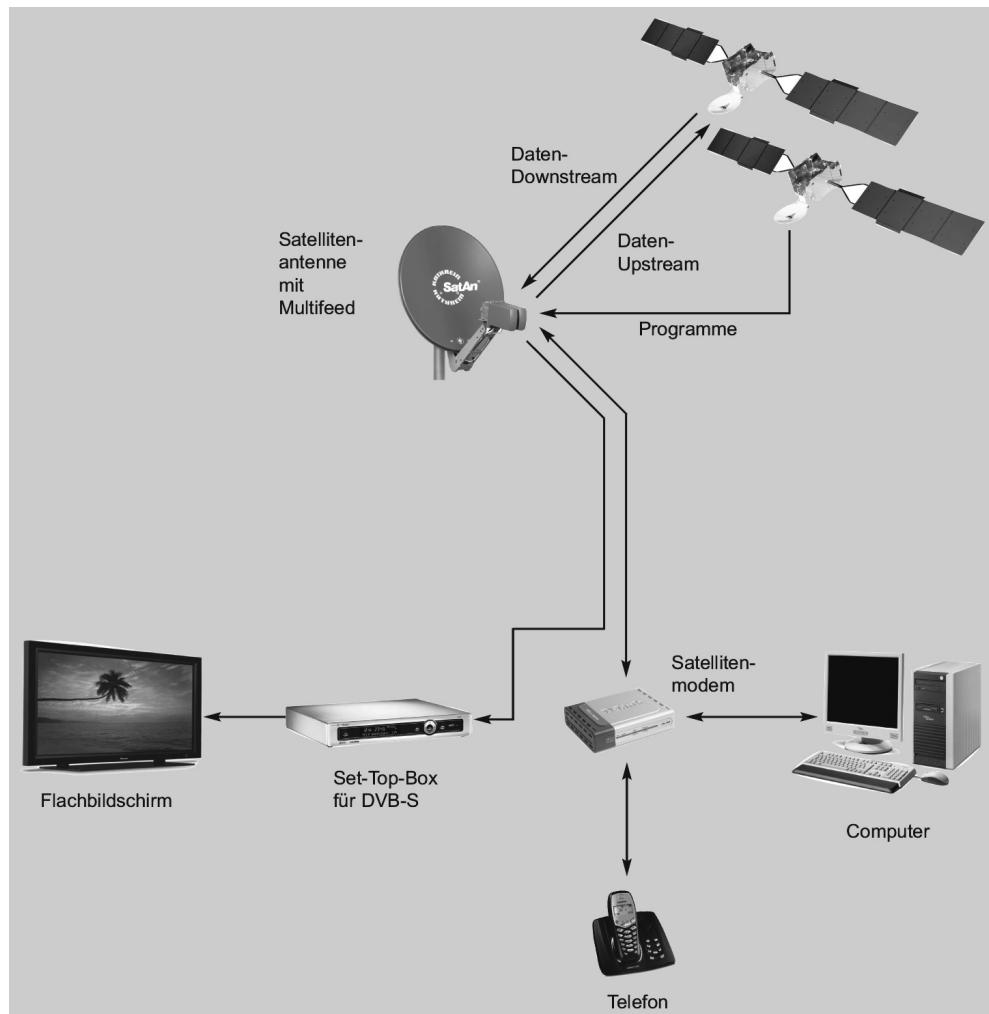


Bild 14.97 Nutzerseitige Ausstattung für Triple Play über Satellit

14.6.5 Auswahlkriterien

Die vorstehend aufgezeigten Möglichkeiten für Triple Play über die verschiedenen Netze unterscheiden sich durch ihre Leistungsmerkmale. Diese hängen von der genutzten Technik und dem jeweiligen Anbieter [provider] ab. Für den Nutzer sind dabei primär folgende Kriterien von Bedeutung:

- Zahl der empfangbaren Fernsehprogramme
- Zahl der empfangbaren Hörfunkprogramme
- Bitrate (Datenrate) der Abwärtsstrecke (Downlink)

- Bitrate (Datenrate) der Aufwärtsstrecke (Uplink)
- Höhe der monatlichen Nutzungsentgelte (Flatrate)
- Investitionskosten, die für technische Ausstattung und deren Installation erforderlich sind
- Vertragslaufzeit und Kündigungsfrist

Es gilt deshalb für den Nutzer, die für ihn verfügbaren Angebote sorgfältig zu prüfen und die Entscheidung nach seinen individuellen Wünschen zu treffen.

■ 14.7 Perspektiven

Schon vor längerer Zeit hat in der Nachrichtentechnik der Übergang von der analogen in die digitale Welt begonnen. Mittelfristig wird diese Entwicklung abgeschlossen sein und jede Signalverarbeitung und Signalübertragung nur noch digital erfolgen.



Der Übergang in die digitale Welt wird abgeschlossen.

Es zeichnet sich außerdem ein stetig steigender Bedarf an Übertragungskapazität ab. Dies bedeutet größere Bitraten (Datenraten) für unterschiedliche Anwendungen und gilt für die Hinkanäle (Downlink) in gleicher Weise wie für die Rückkanäle (Uplink). Deshalb wird bei den bisher üblichen unsymmetrischen Internetzugängen (d.h. Bitrate Hinkanal >> Bitrate Rückkanal) ein Übergang zu symmetrischen Varianten (d.h. Bitrate Hinkanal = Bitrate Rückkanal) erfolgen.



Bedarf für größere Bitraten im Hin- und Rückkanal

Im Bereich Video wird sich der Trend fortsetzen, die **Bildauflösung** und damit die Bildqualität zu verbessern. Dies bedeutet, dass der bisherige Wert von 1920×1080 (HD), also etwa 2 Mio. Bildpunkte pro Bild, auf die vierfache oder sogar sechzehnfache Zahl von Bildpunkten steigen wird. Das bedeutet:

- $3840 \times 2160 \rightarrow$ Bezeichnung: Quad Full HD, Super HD oder 4K (~8 Mio. Bildpunkte pro Bild)
- $7680 \times 4320 \rightarrow$ Bezeichnung: Ultra HD, UHDTV oder 8K (~32 Mio. Bildpunkte pro Bild)

Eine weitere Perspektive stellt die dreidimensionale Bildwiedergabe dar. Bei den bisherigen Systemen sind stets entsprechende Brillen erforderlich. Die Entwicklung geht allerdings zu **autostereoskopischen Verfahren**. Hier benötigt der Betrachter keine Brille mehr und unterliegt auch keinen Einschränkungen des Betrachtungswinkels. Dies bedeutet einen großen Schritt in die Richtung des natürlichen Sehens mit allen drei Dimensionen.



Verbesserung der Bildqualität durch Steigerung der Bildauflösung und dreidimensionale Bilddarstellung, für deren Betrachtung keine Brille erforderlich ist

Auch im Bereich Audio werden die Möglichkeiten verbessert, dem natürlichen Hören noch näherzukommen. Dazu gehörte anfangs die Stereofonie und danach die Raumklangverfahren 2.1, 4.1 und 5.1, wobei die Ziffer 1 auf den Einsatz eines **Subwoofers** hinweist. Dieser ist für die tiefen Frequenzen bis etwa 200 Hz ausgelegt, die keine Richtwirkung im Schallfeld haben. Die Zahl der im Raum unterschiedlich angeordneten Lautsprecher für die anderen Frequenzen wird zunehmen. Es gibt bereits die ersten Systeme 7.1 und 9.1. Die ultimative Lösung wäre das **Schallwellenfeld**, dessen Konzept an der TU Ilmenau entwickelt wurde. Hier sind im Prinzip sehr viele kleine Lautsprecher an den Wandflächen des zu beschallenden Raums verteilt angebracht, die prozessorgestützt mit entsprechender Amplitude und Phase angesteuert werden und somit einen optimalen Raumklang bewirken, und zwar unabhängig vom Standort des hörenden Nutzers im Raum.



Verbesserung der Audioqualität durch höherwertigere Raumklangverfahren

Bei allen zu übertragenden Audio- und Videoinformationen spielen bekanntlich die **Datenreduktionsverfahren** eine entscheidende Rolle, weil diese unmittelbar Einfluss auf die erforderliche Bitrate des Systems haben. Durch aufwendigere psychoakustische bzw. psychooptische Modelle wird angestrebt, die zu übertragenden Bitraten so klein wie möglich zu halten, ohne dass der Nutzer subjektiv eine Änderung der Qualität des Ursprungsignals feststellen kann. Der beschriebene Übergang von MPEG-2 auf MPEG-4 ist ein reales Beispiel für die bessere Nutzung verfügbarer Bandbreite.



Reduzierung der Bitrate durch aufwendigere Audio- und Videocodierung.

Bei allen Anwendungen und Nutzungen der Nachrichtentechnik spielt der Wunsch der Nutzer nach **Mobilität** eine wesentliche Rolle. Ein typisches Beispiel stellen die mit Smartphone oder Tablet-PC nutzbaren Apps dar, die einen schnellen und komfortablen Zugriff auf eine Vielzahl von Informationen ermöglichen. Mit solchen Apps werden zukünftig verstärkt auch Dienstleistungen angeboten, was dann zu dem Begriff „App Economy“ führt.



Durch die App Economy wird nutzerfreundlicher mobiler Zugriff auf Anwendungen und Dienstleistungen möglich.

Grundsätzlich lassen sich die Wünsche der Nutzer für den Zugriff auf Informationen mit den Schlagworten „alles“, „immer“ und „überall“ kennzeichnen. Es sollen also alle Informationen zu jeder Zeit und unabhängig vom Standort verfügbar sein. Die möglichst umfassende Erfüllung dieser Zielvorstellung ist einerseits eine technische Herausforderung, hängt andererseits von der Akzeptanz der Nutzer ab, die damit verbundenen Mehrkosten zu tragen.



Es wird angestrebt, dass die Nutzer auf alle Informationen zu jeder Zeit und an jedem Ort zugreifen können.

Als ein Lösungsansatz für vorstehende Zielvorstellung wird das Konzept „Next Generation Network“ (NGN) gesehen, also die nächste Generation der Kommunikationsnetze. Beim NGN wird die Unterscheidung zwischen Festnetz und Mobilnetz keine Rolle mehr spielen. Dies gilt ebenso für die verschiedenen Übertragungsmedien, wie Zweidrahtleitung, Koaxialleitung, Lichtwellenleiter, Richtfunk, Satellitenfunk oder sonstige. Das NGN lässt sich als virtuelles Universalnetz verstehen, bei dem nur noch die angebotenen Dienste [service] eine Rolle spielen, die durch spezifische Merkmale gekennzeichnet sind.



Das Next Generation Network (NGN) ist ein virtuelles Universalnetz, das nicht mehr durch Netzformen und Übertragungsmedien gekennzeichnet ist, sondern lediglich durch die angebotenen Dienste.

Beim NGN spielt auch die universelle Erreichbarkeit der Teilnehmer eine wichtige Rolle, wobei dies für Mensch und Maschine gilt. Dies ist durch eine individuelle und weltweit gültige Teilnehmernummer erreichbar.



Individuelle Erreichbarkeit durch universelle Teilnehmernummer

Nutzer verwenden für die Kommunikation unterschiedliche Endgeräte. Für die Ausgabe von Bildern kommen deshalb verschiedene Bildschirmgrößen zum Einsatz. Die Palette reicht vom relativ kleinen Bildschirm des Smartphones, über den des Tablet-PCs, des Laptops/Notebooks, des PCs, des Flachbildschirms des Fernsehgeräts bis hin zum Videoprojektor für große Projektionsflächen. Es wird zunehmend möglich sein, alle Inhalte auf den verschiedenen Bildschirmen darstellen zu können, wobei allerdings ggf. erforderliche Adaptierungen erfolgen. Dieses als **Multiscreen** bezeichnete Konzept gestattet es dem Nutzer, die Bilddarstellungen beliebig an andere Orte „mitzunehmen“. Das kann beim Wechsel des Raumes hilfreich sein, aber auch bei Umstieg von stationären auf mobile Geräte.



Jeder Inhalt soll auf allen Bildschirmgrößen dargestellt werden können.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es in der Kommunikationstechnik eine stetige Weiterentwicklung gibt. Dabei gilt als grundsätzliche Zielsetzung, die Nutzungsmöglichkeiten, aber auch die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

15

Elektromagnetische Verträglichkeit

■ 15.1 Grundlagen

Die Funktion der Kommunikationstechnik basiert bekanntlich auch auf der Nutzung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder. Dabei lassen sich folgende Arten unterscheiden:

- **Elektrisches Feld**
 - statisch/konstant (d. h. elektrisches Gleichfeld)
 - zeitabhängig (d. h. elektrisches Wechselfeld)
- **Magnetisches Feld**
 - statisch/konstant (d. h. magnetisches Gleichfeld)
 - zeitabhängig (d. h. magnetisches Wechselfeld)
- **Elektromagnetisches Feld**
 - niederfrequentes elektromagnetisches Feld
 - hochfrequentes elektromagnetisches Feld

Besondere Bedeutung haben elektromagnetische Felder, weil sich diese bekanntlich bei geführter und nicht geführter Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ergeben. Dabei sollen allerdings keine unerwünschten Störeffekte auftreten. Deshalb sind Festlegungen für die Verträglichkeit technischer und biologischer Systeme gegenüber dem Einfluss elektromagnetischer Felder erforderlich. Dafür wird der Begriff elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) [electromagnetic compatibility (EMC)] verwendet. Bezogen auf technische Systeme (wie Baugruppen, Geräte, Anlagen) ist für die EMV folgende Definition möglich:



Die **elektromagnetische Verträglichkeit** (EMV) technischer Systeme ist gegeben, wenn diese in einem vorgegebenen Umfeld bestimmungsgemäß arbeiten können und dabei die Umgebung nicht unzulässig beeinflussen.

Handelt es sich bei technischen Systemen um solche, die funkgestützt arbeiten, dann wird in der Regel die Bezeichnung „Funkverträglichkeit“ verwendet.



Funkverträglichkeit bezieht sich stets auf die gegenseitige Beeinflussung von Funkdiensten.

Menschen, Tiere und Pflanzen gehören zu den biologischen Systemen. Bezogen auf den Menschen gilt folgende Forderung:



Beim Menschen dürfen durch das Einwirken elektromagnetischer Felder zu keiner Zeit gesundheitliche Schäden auftreten.

Für derartige Einwirkungen ist umgangssprachlich auch der Begriff „**Elektrosmog**“ üblich.

Um den Wirkungsmechanismus der EMV zu erklären, kann das bereits bekannte Konzept der Kommunikationssysteme verwendet werden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass jetzt die Betrachtungen nur auf Störsignale bezogen sind. Das für die EMV geltende System besteht aus der **Störquelle** (= Störsender), dem Störkanal und der **Störsenke** (= Störenpfänger). Bei der Störquelle ist das Problem der **Störemission** gegeben, also der Aussendung von Störsignalen. Für die Störsenke ist die **Störimmission** maßgebend, also die Einwirkung von Störsignalen. Der maximal zulässige Wert dafür wird als **Störfestigkeit** oder Störenpfindlichkeit bezeichnet (**Bild 15.1**).

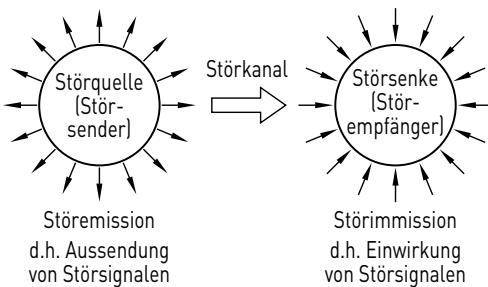


Bild 15.1 Wirkungsmechanismus der EMV

Vorstehende Erkenntnisse zeigen, dass die EMV aus den Bereichen elektromagnetische Aussendungen (EMA) und elektromagnetische Beeinflussbarkeit (EMB) besteht.



$\text{EMV} = \text{EMA} + \text{EMB}$

Der Störkanal kann als galvanische Kopplung, induktive Kopplung, kapazitive Kopplung oder Wellenkopplung zwischen dem störenden und dem gestörten System verstanden werden.

Da die elektromagnetische Verträglichkeit die ungestörte Funktion von Systemen betrifft, stellt die EMV ein Umweltschutzhema dar.

■ 15.2 Elektromagnetische Aussendungen (EMA)

Elektromagnetische Aussendungen können verständlicherweise nur bei technischen Systemen auftreten. In Standards ist festgelegt, welche Grenzwerte für die Störsignale nicht überschritten werden dürfen. Die Angaben erfolgen entweder als Feldstärkepegel (z.B. in dB(μ V/m)) oder als Leistungspegel (z.B. in dB(pW)). Es gelten dann die Bezeichnungen **Störfeldstärke** bzw. **Störstrahlungsleistung** (oft auch nur Störleistung). Für diese erfolgt auch stets die Vorgabe eines Messverfahrens mit Bezug auf Frequenzen und Messbandbreiten. Da die messtechnische Ermittlung von Leistungswerten aufwendig ist, werden diese üblicherweise in Feldstärkewerte umgerechnet.

Auch bei geführter Übertragung elektromagnetischer Wellen treten Abstrahlungen von den Leitungssystemen auf, das gilt auch bei Verwendung geschirmter Kabel.



Auch bei geführter Übertragung treten elektromagnetische Aussendungen auf.

Um die Grenzwerte der Störfeldstärke bzw. Störstrahlungsleistung nicht zu überschreiten, sind schaltungstechnische Maßnahmen und/oder Abschirmungen möglich. Im ersten Fall wird sichergestellt, dass Störsignale möglichst erst gar nicht entstehen (z.B. Oszillatorschaltungen mit hoher spektraler Reinheit) und damit auch keine Abstrahlung erfolgen kann. Durch Abschirmung wird dagegen auftretende Störstrahlung reduziert, bevor sie bei der Störsenke einwirken kann.



Schaltungstechnische Maßnahmen und/oder Abschirmung können störende Abstrahlungen verhindern oder zumindest begrenzen.

Die Grenzwerte für Störaussendungen und die zu berücksichtigenden Randbedingungen sind in der Norm DIN EN 50081 „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV); Fachgrundnorm Störaussendung“ festgelegt.



Fachgrundnorm für Störaussendungen: **DIN EN 50081**

Bei den bisher betrachteten Fällen handelt es sich üblicherweise um kontinuierliche Störstrahlung. Neben dieser Form ist aber auch impulsförmige Störstrahlung möglich. Auslöser dafür sind durch Schaltvorgänge bewirkte Funken, Blitzentladungen, elektrostatische Entladungen, Störimpulse auf der Netzspannung sowie alle anderen schnellen Ausgleichsvorgänge. Geht eine Funkentladung in einen Lichtbogen über, dann ergibt sich wieder eine kontinuierliche Störstrahlung.

Impulsförmige Störstrahlung lässt sich bei Leitungen durch Kondensatoren oder RC-Glieder wirkungsvoll dämpfen. Mit Hilfe dieser „Entstörelemente“ kann die Wirkung der Störung unmittelbar an der Quelle reduziert werden, weil sie für die unerwünschten Spektralanteile einen Kurzschluss bewirken.



Auslöser impulsförmiger Störstrahlung:

- Schalfunk
- Blitzentladungen
- Elektromagnetische Entladungen
- Netzspannungs-Störimpulse
- Schnelle Ausgleichsvorgänge

■ 15.3 Elektromagnetische Beeinflussbarkeit (EMB)

Damit die bei technischen Systemen einwirkenden Störaussendungen möglichst geringe Auswirkungen hervorrufen, sind folgende Maßnahmen einzeln oder kombiniert möglich:

- Abschirmung (Kurzform: Schirmung)
- Ableitung
- Filterung
- Kompensation

Durch **Abschirmung** soll theoretisch ein feldfreier Raum um die Störsenke geschaffen werden. Dabei gilt zu berücksichtigen, dass bei niederfrequenten elektromagnetischen Feldern vorrangig die magnetische Feldkomponente von Bedeutung ist, während bei hochfrequenten elektromagnetischen Feldern nur die elektrische Feldkomponente berücksichtigt werden braucht.

Die Abschirmung gegen elektrische Felder ist durch eine geschlossene elektrisch leitende Hülle möglich, die auch als faradeyscher Käfig bezeichnet wird. Die Feldlinien des Störfeldes enden senkrecht auf der Hülle, wobei wegen ihrer Leitfähigkeit der Ladungsausgleich stattfindet (**Bild 15.2**). Durch Erdung der Hülle werden Störspannungen gegen Masse abgeleitet.

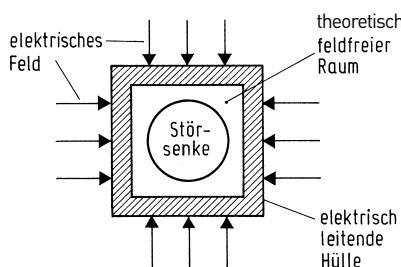


Bild 15.2 Abschirmung gegen elektrisches Feld

In der Praxis ist keine unendlich gute Abschirmung erreichbar, weshalb sich auch innerhalb der Abschirmung stets ein Störfeldanteil feststellen lässt. Das logarithmierte Verhältnis zwischen den Störfeldstärken außerhalb und innerhalb der Abschirmung ergibt das Schirmdämpfungsmaß α_E . Es gilt:

$$\alpha_e = 20 \cdot \lg \frac{E_{\text{außen}}}{E_{\text{innen}}} \text{dB} \quad (15.1)$$

Für die Abschirmung gegen magnetische Felder sind magnetisch leitende Hälften erforderlich. Der Werkstoff soll dafür eine möglichst große Permeabilität, also eine große Permeabilitätszahl μ_r aufweisen. Für die magnetischen Feldlinien ist dann im Abschirmmaterial der Widerstand kleiner als außerhalb, weshalb der größte Teil des einwirkenden Feldes nicht zur Störsenke gelangt (**Bild 15.3**).

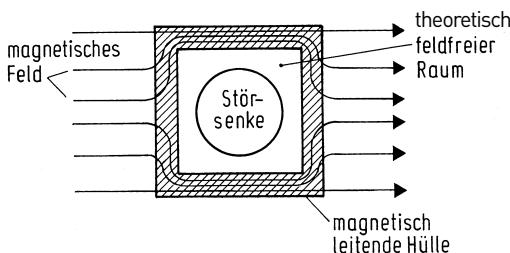


Bild 15.3 Abschirmung gegen magnetisches Feld

Vergleichbar dem elektrischen Feld ergibt sich als Schirmdämpfungsmaß:

$$\alpha_s = 20 \cdot \lg \frac{H_{\text{außen}}}{H_{\text{innen}}} \text{dB} \quad (15.2)$$



Angaben für das Schirmdämpfungsmaß beziehen sich üblicherweise auf das elektrische Feld.

Leitungsgebundene Störsignale sind durch die schaltungstechnische Maßnahme „**Ableitung**“ reduzierbar. Dabei ist allerdings stets die Frequenzabhängigkeit zu berücksichtigen, damit das Nutzungssignal möglichst unbeeinflusst bleibt.

Mit Zusammenschaltungen von R , C und L sind Entstörungsschaltungen realisierbar, durch die Störsignale vor der Störsenke gegen Masse abgeleitet oder zumindest gedämpft werden. Mit Resonanzkreisen kann dies frequenzselektiv erfolgen, was eine gezielte **Filtrierung** von Störsignalen ermöglicht (**Bild 15.4**).

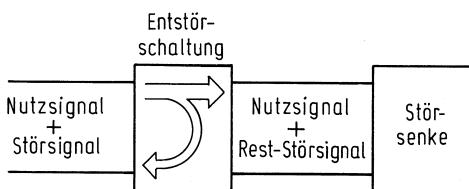


Bild 15.4 Einsatz von Entstörschaltungen

Eine weitere Variante zur Verringerung der Wirkung leitungsgebundener Störsignale besteht darin, durch eine Schaltung das Störsignal zu erkennen, danach eine Phasenverschiebung von 180° vorzunehmen und abschließend das gegenphasige Signal und das ursprüngliche Signal zu addieren. Wegen der Phasensituation heben sich die störenden

Anteile theoretisch vollständig auf. In der Praxis ergibt sich durch die Kompensation eine wirksame Störsignalunterdrückung, erfordert allerdings entsprechenden schaltungstechnischen Aufwand (**Bild 15.5**).

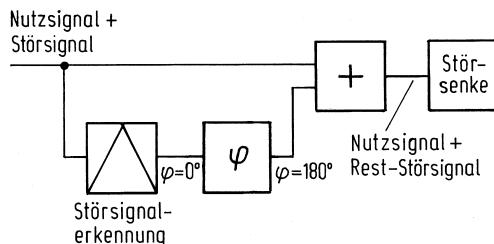


Bild 15.5 Kompensation von Störsignalen

Die Grenzwerte für die Einstrahlungsfestigkeit technischer Systeme sind in der Norm DIN EN 50082 „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV); Fachgrundnorm Störfestigkeit“ festgelegt.



Fachgrundnorm für Störfestigkeit: **DIN EN 50082**

Bei der Einwirkung elektromagnetischer Felder auf den Menschen ist zwischen thermischen und nichtthermischen Wirkungen zu unterscheiden. Durch zu große Feldstärkewerte ergeben sich im Körper punktuell starke Überhitzungen, was sich als innere Verbrennungen auswirken würde.

Die in Normen festgelegten Grenzwerte für die zulässige Einwirkung elektromagnetischer Felder auf Personen sind stets so gewählt, dass thermische Wirkungen mit Sicherheit nicht auftreten.



Die Grenzwerte für die Einwirkung elektromagnetischer Felder auf Personen stellen sicher, dass thermische Wirkungen nicht auftreten.

Unterhalb dieser Grenze liegende Werte lösen bei einem kleinen Prozentsatz der Bevölkerung dennoch körperliche Effekte (z.B. Kopfschmerzen, Konzentrationsschwäche, Schlafstörungen, Mattigkeit, ...), also nichtthermische Wirkungen, aus. In diesen Fällen liegt sogenannte Elektrosensibilität vor, deren Ursache bisher noch nicht eindeutig abgeklärt werden konnte.



Elektrosensibilität ist die ungewollte Fähigkeit von Personen, nichtthermische Wirkungen bei elektromagnetischen Feldern unterhalb der Grenzwerte zu empfinden.

Die Einwirkung elektromagnetischer Felder auf Personen kann durch Abschirmung und/oder durch möglichst großen Abstand zur Störquelle reduziert werden.

16

Messtechnik

■ 16.1 Einführung

Für den Betrieb, die Wartung und Instandsetzung von Kommunikationssystemen oder sonstigen nachrichtentechnischen Anlagen ist Messtechnik unentbehrlich. Nur dadurch können nämlich auftretende physikalische Größen (z.B. Spannung, Feldstärke, ...) erfasst, festgestellt und bewertet werden. Aus diesen lassen sich dann auch andere Größen ableiten.



Messtechnik bedeutet die Erfassung, Feststellung und Bewertung physikalischer Größen.

Auf diese Weise ist erkennbar, ob die vorgegebenen **Betriebsparameter** eingehalten und **Grenzwerte** nicht überschritten werden. Dies bedeutet im Prinzip den Vergleich der realen Situation mit den geplanten Werten.

In der Nachrichtentechnik gibt es eine Vielzahl von Messaufgaben. Für jede ist ein spezifisches Messverfahren erforderlich, was sich im jeweiligen Messaufbau niederschlägt. Dabei können universelle Messgeräte oder Messgeräte für besondere Aufgaben zum Einsatz kommen.

Grundsätzlich bedarf es der Unterscheidung zwischen elektrischer und optischer Messtechnik, da bei elektrischer Übertragung andere physikalische Größen auftreten als bei der optischen Übertragung.



Es ist zwischen elektrischer Messtechnik und optischer Messtechnik zu unterscheiden.

Das Messen [measuring] ist immer ein experimenteller Vorgang, um den Wert elektrischer oder optischer Größen als Vielfache oder Teile einer Bezugseinheit zu ermitteln. Dabei gilt die grundsätzliche Zielstellung eines möglichst kleinen Messfehlers, also der Abweichung des ermittelten (= angezeigten) Wertes vom realen Wert.

Bei der elektrischen Messtechnik erfolgen die Messungen im Zeitbereich und/oder Frequenzbereich. Als wichtigste Aufgabenstellungen umfasst dies:

- Signalpegel
- Störabstände

- Fehlerraten
- Frequenzgänge
- Feldstärken
- Zeitliche Abhängigkeiten

Mit Ausnahme der Fehlerraten kann es sich dabei um analoge oder digitale Signale handeln, die wegen ihrer unterschiedlichen Struktur entsprechend angepasste Messverfahren und Bewertungen der Ergebnisse erfordern.

■ 16.2 Elektrische Messtechnik

Das klassische Messgerät für die Betrachtung von Signalen im Zeitbereich ist das Oszilloskop [oscilloscope]. Es wird dabei der Pegel L am jeweiligen Messpunkt in Abhängigkeit von der Zeit t auf einem Bildschirm angezeigt. Die zeitabhängige Steuerung erfolgt dabei durch sägezahnförmige Signale eines Generators, mit dem unterschiedlich schnelle Durchläufe und damit auch entsprechende Auflösungen erreichbar sind.



Oszilloskope stellen den Pegel L als Funktion der Zeit t dar.

Das frequenzabhängige Verhalten eines Messobjekts lässt sich mit einem Wobbelmessplatz ermitteln. Es speist dabei ein in der Frequenz veränderlicher Generator in das Messobjekt ein. An dessen Ausgang wird ein Detektor mit nachgeschalteter Eichleitung angeschlossen. Die Darstellung des Ergebnisses erfolgt auf einem Bildschirm. Die Anzeige wird dabei synchron zum Generator mit Hilfe eines Sägezahngenerators gesteuert.



Mit **Wobbelmessplätzen** lässt sich das frequenzabhängige Verhalten von Messobjekten ermitteln.

In Kommunikationssystemen eingesetzte elektrische Leitungen lassen sich auf ihre Eigenschaften am besten mit einem **Impulsreflektometer** untersuchen. Dabei werden hochfrequente oder niederfrequente Impulse in die mit dem Wellenwiderstand abgeschlossene Leitung geschickt und dann das auftretende Echo gemessen. Die Darstellung des hin- und rücklaufenden Signals erfolgt auf einem Bildschirm (**Bild 16.1**). Sind im Kabel Fehlerstellen vorhanden, dann kann deren Lage mit ausreichender Genauigkeit ermittelt und die Störbehebung eingeleitet werden.

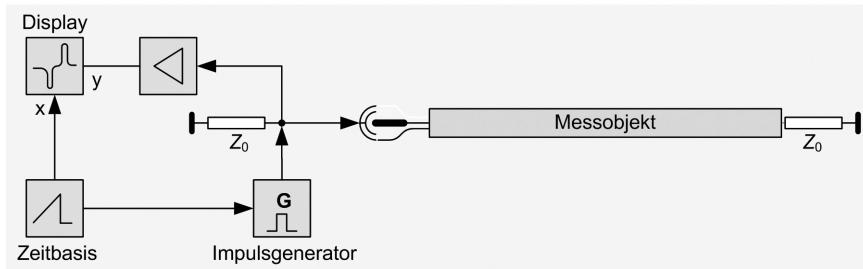


Bild 16.1 Messaufbau mit Impulsreflektometer



Mit einem Impulsreflektometer sind Betriebseigenschaften und Fehler elektrischer Leitungen feststellbar.

Fast alle Vorgänge in Kommunikationssystemen sind mehr oder weniger stark von der Frequenz abhängig. Für die Ermittlung des Pegels L als Funktion der Frequenz f sind **Spektrum-Analysatoren** [spectrum analyser] geeignet. Bei diesen Geräten gelangt das Signal vom jeweiligen Messpunkt zu einer breitbandigen Mischstufe, die von einer Oszillatorkreisfrequenz aus einem variablen Frequenzgenerator gespeist wird. Die Steuerung des Oszillators erfolgt dabei synchron mit der X-Ablenkung auf dem Bildschirm. Die Ausgangssignale der Mischstufe, deren Mischprodukte aus Eingangsfrequenz und Oszillatorkreisfrequenz die Zwischenfrequenz (ZF) ergeben, passieren dann den ZF-Verstärker und das ZF-Filter. Es erfolgt danach die Demodulation und eine Rauschunterdrückung durch einen Video-Filter, bevor das Signal zur Y-Ablenkung (Amplitude) des Bildschirms gelangt. Die vor dem Demodulator eingesetzte Logarithmierstufe sorgt dafür, dass die Anzeige der Pegel im logarithmischen Maß erfolgt (**Bild 16.2**).

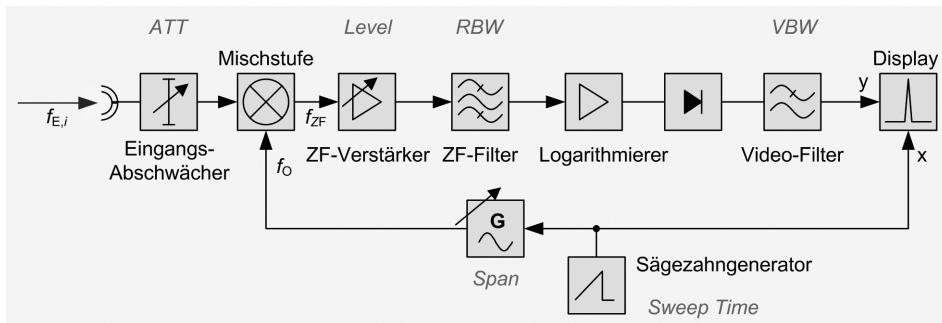


Bild 16.2 Spektrumanalysator (Übersichtsplan)

Spektrum-Analysatoren stellen somit das Ergebnis als Funktion $L = f(f)$ auf einem Bildschirm dar, so dass die Pegelwerte für jede Frequenz im vorher gewählten Bereich erkennbar sind (**Bild 16.3**). Die Messungen können abhängig von den Anforderungen im Prinzip mit jeder beliebigen Bandbreite durchgeführt werden. Als Beispiele sind in den **Bildern 16.4** und **16.5** die Spektren eines analogen bzw. digitalen TV-Kanals dargestellt.

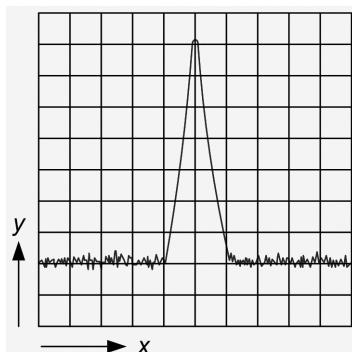


Bild 16.3 Anzeige beim Spektrum-Analysator

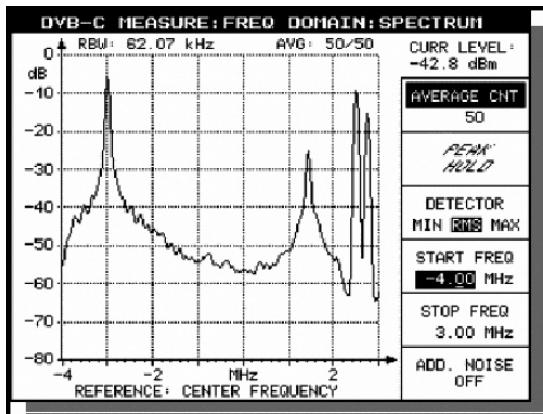


Bild 16.4 Spektrum eines analogen TV-Kanals

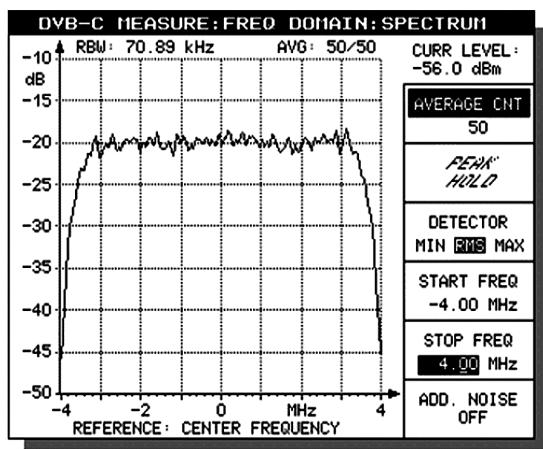


Bild 16.5 Spektrum eines digitalen TV-Kanals



Spektrum-Analysatoren stellen den Pegel L als Funktion der Frequenz f dar.

Mit dem Spektrum-Analysator lässt sich auch der für die Übertragungsqualität stets wichtige Störabstand ermitteln. Beim Träger-Rausch-Abstand [carrier-to-noise ratio (CNR)] ergibt sich folgender Weg: Der Pegel des ausgewählten Trägers wird vom Analysator angegeben. Gleiches gilt auch für die Rauschleistungsdichte N_o . Für das tatsächlich wirksame Rauschen muss die Bandbreite des Kanals berücksichtigt werden. Daraus folgt:

$$CNR = \frac{C}{N_o + 10 \cdot \lg \frac{B_{\text{Kanal}}}{\text{Hz}}} \text{dB}$$

mit C = Trägersignalpegel und N_o = Rauschsignaldichte (16.1)

Dieser Wert lässt sich unter Berücksichtigung des „roll-off“-Faktors r_0 , der die durch Filtrierung bedingte Abweichung von der idealen Rechteckform kennzeichnet, einfach auf den Signal-Rausch-Abstand [signal-to-noise ratio (SNR)] umrechnen. Es gilt:

$$SNR = CNR + 10 \cdot \lg \left(1 - \frac{r_0}{4} \right) \text{dB} \quad (16.2)$$

Das bei digitalen Fernsehsignalen häufig auch verwendete Verhältnis der Energie pro Bit E_b zur Rauschleistungsdichte N_o lässt sich aus dem Signal-Rausch-Abstand wie folgt ermitteln:

$$\frac{E_b}{N_o} = SNR - 10 \cdot \lg \left(\frac{188}{204} \right) \text{dB} - 10 \cdot \lg(m) \text{dB} - 10 \cdot \lg(R) \text{dB} \quad (16.3)$$

mit m = Wertigkeit der Modulation und R = Coderate

Spektrum-Analysatoren stellen inzwischen universelle Messgeräte für analoge und digitale Signale dar, die komfortabel bedienbar sind, große Leistungsfähigkeit besitzen und Pegelwerte, Störabstände und Fehlerhäufigkeiten unmittelbar als Werte anzeigen können. Bei den Störabständen handelt es sich um CNR , SNR , E_b/N_o und andere. Für die Fehlerhäufigkeiten (Fehlerraten) sind folgende Arten üblich:

- BER [bit error rate]
- MER [modulation error rate]
- PER [packet error rate]

Das Messkonzept für diese Fehlerhäufigkeiten stellt sich wie folgt dar: Das zu messende Signal wird parallel über einen Decoder und ein Verzögerungsglied geführt. Nach dem Decoder erfolgt dann der Vergleich des decodierten Signals mit dem verzögerten ursprünglichen Signal.

Vorstehend beschriebene Geräte werden im Markt üblicherweise als **Messempfänger** bezeichnet (**Bild 16.6**). Diese sind in der Regel für große Frequenzbereiche, verschiedene Übertragungsverfahren, mehrere Modulationsarten, vielfältige Codierungen und andere Spezifikationen ausgelegt. Bei digitalen Signalen ist auch die Ausgabe der jeweiligen Konstellationsdiagramme von Bedeutung. Dabei werden in der Regel alle Varianten der Phasenumtastung (n -PSK) und der Quadratur-Amplitudenmodulation (n -QAM) berücksichtigt, was zu entsprechenden Zahlen von Konstellationspunkten führt (**Bild 16.7**).



Bild 16.6 Messempfänger
[Quelle: Kathrein]

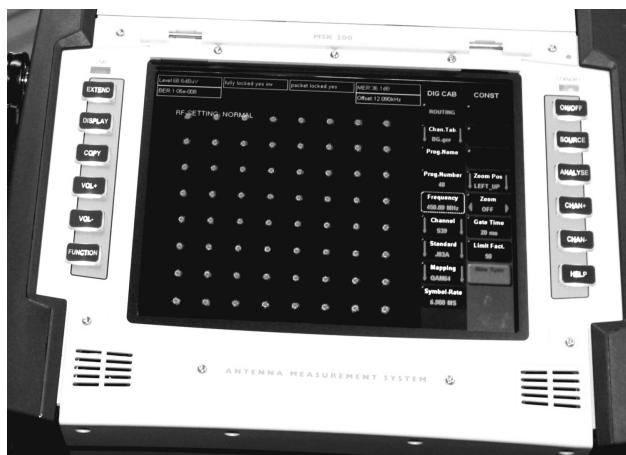


Bild 16.7 Konstellationsdiagramm für 64-QAM



Messempfänger sind leistungsfähige Analysatoren für analoge und digitale Signale.

Aus der Lage der Konstellationspunkte im systembedingten Entscheidungsbereich lassen sich verwertbare Rückschlüsse auf bestehende Mängel im System ziehen. Deshalb stellen Konstellationsdiagramme stets eine wichtige Information dar. Aus **Bild 16.8** und **Bild 16.9** sind die Auswirkungen erkennbar, wenn das Signal eine Brumm-Modulation bzw. ein Jitter der Phasenlage aufweist.

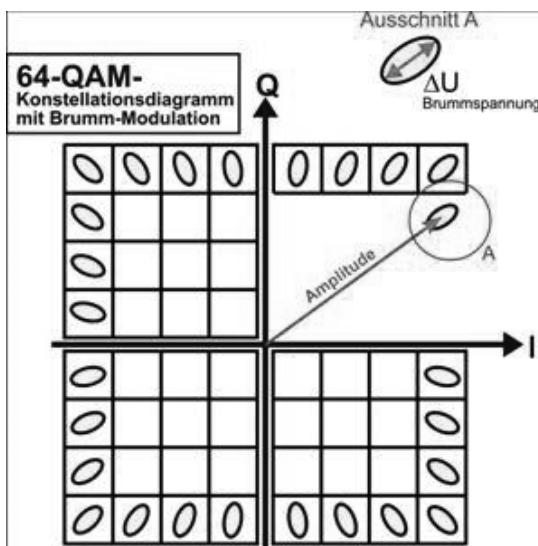


Bild 16.8 Auswirkung von Brumm-Modulation im Konstellationsdiagramm
[Quelle: KWS-Electronic]

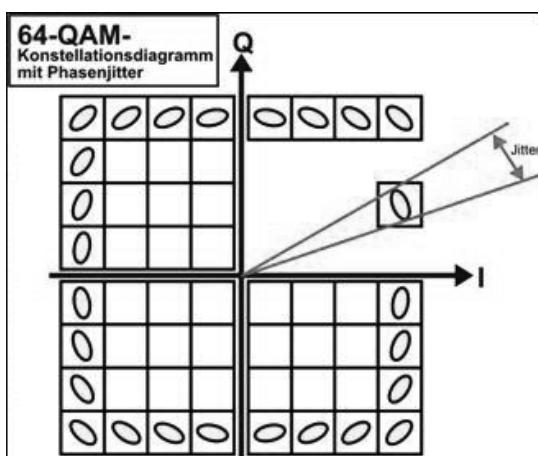


Bild 16.9 Auswirkung von Phasenjitter im Konstellationsdiagramm
[Quelle: KWS-Electronic]

■ 16.3 Optische Messtechnik

Bei der optischen Messtechnik beziehen sich alle Ergebnisse auf Licht in verschiedenen relevanten Wellenlängenbereichen. Es erfolgt jedoch an geeigneter Stelle stets eine Umsetzung der optischen Größen in elektrische Größen, die dann nach bereits bekannten Verfahren verarbeitet werden können. So wird bei der optischen Leistungsmessung durch lichtempfindliche Sensoren der detektierte Lichtstrom in eine elektrisch messbare Größe gewandelt. Dabei ist allerdings ein großer Dynamikbereich erforderlich, weil einerseits die große Ausgangsleistung des Sendelasers berücksichtigt werden muss, aber andererseits ebenso die kleine Eingangsleistung des optischen Empfängers.

Bei der **optischen Dämpfungsmessung** kommt meist die **Substitutionsmethode** zum Einsatz. Dabei wird zuerst ein Referenzkabel verwendet und eingemessen. Danach erfolgt der Austausch gegen das Messobjekt. Der Vergleich zwischen beiden Schritten führt zum gewünschten Ergebnis.

Ein besonders wichtiges Verfahren zur Messung optischer Leitungen ist der Einsatz von **Zeitbereichsreflektometern**, die meist nur als **OTDR** [optical time division reflectometer] bezeichnet werden. Sie arbeiten vergleichbar dem Radar, senden Lichtimpulse in die optische Leitung und werten die durch Rückstreuung bewirkten Signale aus (**Bild 16.10**). Auf diese Weise lassen sich von einer Stelle aus Dämpfungswerte, Reflexionen, Lage von Störstellen und andere wesentliche betriebliche Parameter relativ einfach ermitteln.

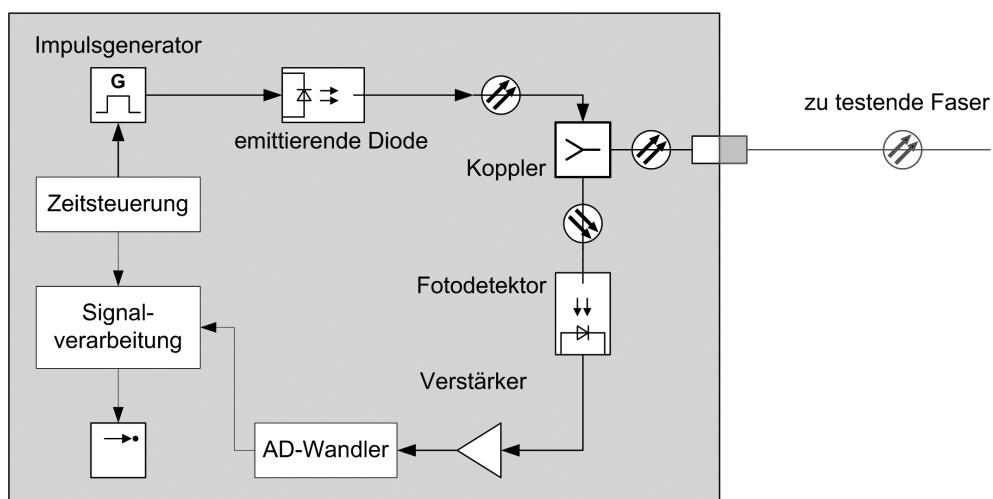


Bild 16.10 OTDR (Übersichtsplan)

! Das OTDR nutzt die in optischen Leitungen auftretende Rückstreuung.

■ 16.4 Perspektive

Die Messtechnik befindet sich in einer stetigen Weiterentwicklung. Das Ziel ist immer die Verbesserung der Leistungsfähigkeit bei aufgabenspezifischer Genauigkeit. Außerdem sollen auch neue Messanforderungen erfüllt werden. Es gilt dabei stets zu berücksichtigen, dass nur durch valide Messergebnisse die Errichtung und der störungsfreie Betrieb nachrichtentechnischer Einrichtungen (z.B. Kommunikationssysteme) sichergestellt werden können.

Literatur

Adams, Claus [u. a.]: Multimedia-Handbuch. – Staßfurt: Deutsches Institut für Breitbandkommunikation, 2009

Buchholz, Günther [u. a.]: Fachkunde Industrieelektronik und Informationstechnik. – Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2009

Burgmaier, Monika [u. a.]: Tabellenbuch Informations- und Systemtechnik. – Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2009

Dehler, Elmar [u. a.]: Fachkunde Büro- und Informationselektronik mit Radio-, Fernseh- und Medientechnik. – Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2009

Engelke, Carsten [u. a.]: Kabelnetz-Handbuch. – Staßfurt: Deutsches Institut für Breitbandkommunikation, 2011

Fischer, Walter: Digitale Fernseh- und Hörfunktechnik in der Praxis. – Heidelberg: Springer, 2010

Freyer, Ulrich: Nachrichten-Übertragungstechnik. – München: Hanser, 2009

Freyer, Ulrich [u. a.]: Optische Netze. – Staßfurt: Deutsches Institut für Breitbandkommunikation, 2010

Göbel, Jürgen: Informationstheorie und Codierungsverfahren. – Berlin: VDE Verlag, 2007

Hoheisel, Ralf [u. a.]: Informationstechnik und Telekommunikationstechnik. – Haan-Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel, 2010

Hübscher, Heinrich [u. a.]: IT-Handbuch (Tabellenbuch). – Braunschweig: Westermann, 2011

Kammeyer, Karl-Dirk: Nachrichtenübertragung. – Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008

Kühn, Manfred [Hrsg.]: Der digitale terrestrische Rundfunk. – Heidelberg: Hüthig, 2008

Meyer, Martin: Kommunikationstechnik. – Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2008

Reimers, Ulrich: DVB – Digitale Fernsehtechnik. – Berlin: Springer, 2008

Sauter, Martin: Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme. – Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2011

Siegmund, Gerd: Einführung in die Telekommunikation (UTB 8376). – Heidelberg: REDLINE GmbH, 2003

Siegmund, Gerd: Technik der Netze 1. – Berlin: VDE Verlag, 2010

Siegmund, Gerd: Technik der Netze 2. – Berlin: VDE Verlag, 2009

Strutz, Tilo: Bilddatenkompression. – Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009

Werner, Martin: Nachrichtentechnik. – Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009

Wübbe, Thomas: Telekommunikation. – Würzburg: Vogel Verlag, 2010

Index

Symbolen

2,4-GHz-Bereich 361
2D/3D-Konversion 355
2k-Modus 339
2-PSK 248
3D-BD 354
3D-Brillen 352
3D-TV 351
3D-TV-Teilbild 353
3G 388
4 : 3 310
4-DPSK 304
4-PSK 248
5-GHz-Bereich 361
8k-Modus 339
8-PSK 249
10-Gigabit-Ethernet 358
16 : 9 310
16-APSK 261
16-PSK 249
16-QAM 251
32-APSK 261
32-PSK 249
64-QAM 251
100-Gigabit-Ethernet 358
256-QAM 251
512-QAM 251
576i 331
720p 331
1024-QAM 251
1080i 331
1080p 332
 $\lambda/2$ -Dipol 120
 λ -Dipol 120

A

AAC 307, 330
AAC+ 208
AAC+ v2 306
AACv2 208

a-Ader 376
Ableitung 406
Ablenkprozessor 325
Ablenkspur 325
Abrufdienst 18, 152
Abschirmung 82, 97, 405
absoluter Leistungspegel 34
absolute Pegel 34
absolute Spannungspegel 34
Abstand 35
Abstimmeinrichtung 285
Abstimmung 288
Abstrahlung 111
Abszisse 20
Abtastfrequenz 255
Abtastquelle 63
Abtasttheorem 81
Abtastung 63, 81
abwärtskompatibel 332
Abwärtsmischung 232, 290
Abwärtsstrecke 143, 144, 380, 398
access network 195
Access Point 360
ACM 337
AD 384
Adaptierung 401
adaptive coding and modulation 337
adaptive differential pulse code modulation 256
adaptive Differenz-Pulscodemodulation 256
adaptive Deltamodulation 256
ADC 58, 158
additive Farbmischung 316
Adern 96
ADM 256
ADPCM 256
Adressen 357
Addressierung 277
ADSL 380
ADU 58, 158, 325
advanced audio coding 330
AF 299

- AFC 293
 AFR 293
 AGC 293
 Aktivdateien 384
 aktives Filtern 157
 aktives Eintor 54
 aktives Zweitor 56
 Akzeptanzkegel 102
 Akzeptanzwinkel 102
 Aliasing 82
 Aliasing-Filter 82
 alphanumerischer Code 200
 ALR 293
 alternate mark inversion 202
 alternative frequencies 299
 AM 222, 223, 284
 American Standard Code for Information Interchange 200
 AMI-Format 202
 amplifier 154
 Amplitude 26, 222
 amplitude distortion 74
 amplitude frequency response 26
 Amplituden-Frequenzgang 26, 72, 154
 Amplitudengang 26, 73
 Amplitudenmodulation 222, 223, 284
 amplitudenmoduliertes Signal 223
 Amplitudensieb 325
 Amplitudenumtastung 246
 Amplituden- und Phasenumtastung 261
 Amplitudenverzerrungen 74
 amplitude & phase shift keying 261
 amplitude shift keying 246
 AM-Signal 223
 Anaglyphen-Verfahren 352
 Analog-Digital-Umsetzer 58, 158, 325
 analoger Fernsehempfänger 322
 analoge Dienste 40
 analoges Fernsehen 310
 analoger Hörfunk 284
 analoge Signale 22
 analoge Trägersignale 222
 analog television 310
 analog-to-digital converter 58, 158
 Anbieter 398
 A-Netz 386
 Anhänge 368
 Anpassung 85
 Anpassungsbedingung 85
 Anpassungsfaktor 86, 87
 Anrufbeantworter 385
 Anschalteeinheit 372
 antenna diversity 275
 Antenne 90, 118
 Antennen-Array 128
 Antennendiversität 275
 Antennen-Diversity 150
 Antennen-Eingangsimpedanz 119
 Antennengewinn 121
 Antennenwahlschalter 145
 Anti-Aliasing-Filter 82
 Anwendung 39, 332, 346
 anwendungsneutrale Verkabelung 359
 anwendungsorientierte Protokolle 44
 Anwendungs-Programmier-Schnittstelle 176
 API 176
 Apogäum 142
 App 346, 400
 App Economy 400
 application 39, 346
 application layer 43, 168
 application programming interface 176
 Applikation 332
 äquatoriale Umlaufbahn 143
 Architektur 359
 ARI 297
 ARQ 215
 Array 127
 ASCII 200
 A-Signal 313, 315
 ASK 246
 ASPK 261
 asynchroner Betrieb 150
 Atmosphäre 132
 attachment 368
 attenuation 32
 AUC 385
 Audio 12
 Audiocodierung 206, 330
 audio coding 206
 Audiokassette 61
 Audioprozessor 325
 Audiosignal 283
 Audio-Streaming 366
 Aufbaustruktur 359
 Auflösung 159
 Aufnahme 60
 Aufwärtsstrecke 143, 380, 399
 Aufzeichnung 60
 Augendiagramm 84
 Augenempfindlichkeitskurve 318
 ausbuchen 385

- Ausgangsleistung 227
Ausgangspegel 52
Ausgangsrahmenbreite 216
Ausgangsspannung 55
Ausgangsstrom 55
Ausgangswiderstand 55
Auslesegeschwindigkeit 59, 70, 148
auslesen 14, 58
Ausleuchtzone 144
ausloggen 385
Außenleiter 98
Außenwiderstand 85
äußerer Fehlerschutz 336
Austastsignal 313, 315
authentication center 385
Authentifizierung 151, 280
Authentisierungszentrale 385
Autofahrer-Rundfunk-Information 297
automatic frequency control 293
automatic gain control 293
automatic repeat request 215
automatic volume control 293
automatische Lautstärkeregelung 293
automatische Frequenzregelung 293
automatische Verstärkungsregelung 293
autostereoskopisches Verfahren 399
autostereoskopische Bilddarstellung 355
autostereoskopischer Bildschirm 355
AVC 293, 330
AVR 293
Azimutwinkel 123
- B**
- Backbone 190
Backbone-Netz 190
backward error correction 215
b-Ader 376
Bandbreite 49, 72
Bandbreitenausnutzung 88, 246, 274
Bandbreiteneffizienz 88, 246
Bandbreiten-Entfernungs-Produkt 104
Bandbreiten-Längen-Produkt 104
Bandpass 156
Bandspur 156
bandstop 156
bandwidth 72
baseband signal 196, 220
baseband transmission 196
Basisband 145
Basisbandlage 358
- Basisbandsignal 196, 220
Basisbandübertragung 196
Basiskanal 377
Basisstation 383, 388
BAS-Signal 315
BAT 333
Baumnetz 190, 278
BB 145
B-Bild 212
BCD 199
BCH-Code 336, 338, 343
BD 68, 147, 353, 384
BE 208, 309, 310
beamer 353
BEC 215
Bedienfreundlichkeit 152
bedingter Zugang 278
Beeinflussungslänge 216
BER 83, 246, 274, 412
berührungslose Abtastung 64
Besetzt-Flag 272
Bessel-Funktionen 234
Besucherdatei 384
Betriebsart 148
Betriebs-Dämpfungsfaktor 56
Betriebs-Dämpfungsmaß 56
Betriebsparameter 408
Betriebs-Verstärkungsfaktor 56
Betriebs-Verstärkungsmaß 56
Beugung 138
Bewegungsenergie 108
Bewegungsschätzung 211, 212
Bewegungsvektor 211
bewerteter Rauschabstand 81
Bezahlendienst 18, 151
bidirektional 13
bidirektionale Individualkommunikation 372
bidirektonaler Betrieb 149
Bildabtastung 313
Bildauflösung 399
Bildbreite 310
Bildelement 208, 309, 310
Bildformat 310, 331
Bildfrequenz 311
Bildhöhe 310
Bildpunkt 208, 309
Bildröhre 325
Bildrücklauf 313, 315
Bildsender 319
Bildsensor 382

- Bildsignal 311, 313, 315
 Bildsynchrosignal 314
 Bildtiefe 351
 Bildträger 319
 Bildwechsel 314
 Bildwiedergabe 313
 Bild-ZF 323
 Bild-ZF-Teil 323
 binary coded decimal 199
 binary phase shift keying 248
 Bi-Phasen-Codierung 297
 bipolares PAM-Signal 241
 Bit 24
 Bitdauer 25
 bit error 215
 bit error rate 83, 412
 bit error ratio 274
 Bitfehler 215
 Bitfehlerhäufigkeit 83
 Bitfehlerrate 83, 246, 274, 277
 Bitfolge 64
 Bitrate 25
 Bitübertragungsschicht 41
 B-Kanal 377
 Blau 317
 Blenden-Brille 353
 Blockcodierung 215
 Block 211
 block matching 211
 Blockschaltbild 53
 blu-ray disc 68, 147, 353
 B-Netz 386
 Bodenwelle 134
 body 187, 367
 Boltzmann-Konstante 78
 bounded application 348
 bouquet association table 333
 BPSK 248
 Brechungsindex 101
 Brechzahl 101
 Breitband 73
 Breitbandantenne 120
 Breitbandanwendung 390
 Breitbandkabelnetz 337
 Breitband-Verstärker 154
 Breitbild 310, 351
 Bridge 46, 167, 360
 Broadband 345
 Broadcast 186, 345
 Browser 369, 348
 Brumm-Modulation 413
 Brutto-Bandbreitenausnutzung 335
 Brutto-Bitrate 218, 220
 BS 383, 388
 B-Signal 311, 315
 B-Sync 314, 325
 BT 319
 Bündelfehler 215
 Burst 322
 burst error 215
 Burstfehler 215, 219
 Busnetz 189
 Busstruktur 357
 Bussystem 325
 Byte 26
- C**
- CA 151, 278, 334
 cable modem termination system 391
 CAI 170
 CAM 281
 card reader 282
 carrier power 227
 carrier reduction 229
 carrier sense multiple access with collision detection 273, 357
 carrier suppression 229
 carrier-to-noise ratio 80, 412
 CAT 333
 Cat. 5 97
 Cat. 6 97
 Cat. 6 A 97
 Cat. 7 97
 Cat. 7 A 97
 CD 65, 147
 CDM 266
 CDMA 271, 388
 CD-R 66
 CD-ROM 66
 CD-RW 66
 CE 348
 CE-HTML 348
 cell 187
 channel 47
 channel capacity 51
 channel coding 214
 chatten 370
 Chipkarte 151, 281
 Chrominanz 204, 208
 Chrominanzsignal 317
 Chrominanzteil 323

- C/I 80
CI 281
CI+ 281
CICAM 281
Cinch 171
Client 168
closed systems interconnection 40
closed user group 188
Cluster 383, 392
CMTS 391
C/N 246, 249
C-Netz 386
CNR 412
coarse WDM 195
Code 198
code division multiple access 271
code division multiplex 266
coded orthogonal frequency division multiplex 258
Codemultiplex 266
Coder 197
Coderate 218
Codewort 198, 255
Codierung 197, 253
COFDM 258, 339
COFDM-Demodulator 305
COFDM-Verfahren 303
common air interface 170
common interface 281
common interface conditional access module 281
common interface plus 281
compact disc 65, 147
conditional access 151, 278, 334
conditional access module 281
conditional access table 333
Connected-TV 346
consumer electronics 348
content 278
control word 280
conversion time 160
converter 158
cordless telephone 381
crosstalking 76
crosstalking attenuation figure 76
CSI 40
C-Signal 317
CSMA/CD 273, 357
CT 381
CUG 188
Cursortaste 347
CW 280
CWDM 195
- D**
- D1-Netz 386
D2-Netz 386
DA 96
DAB 300
DAB+ 306
DAB-Basisbandsignal 303
DAB-Datendienst 305
DAB-Frequenzblock 304
DAB-Multiplexsignal 301
DABplus 306
DAB-Rahmenstruktur 303
DAC 58, 158
Dämpfung 32, 38
Dämpfungsbelag 94
Dämpfungsfaktor 32
Dämpfungsmaß 94
Dämpfungsverzerrungen 74
Darstellungsprotokoll 44
Darstellungsschicht 43
data circuit terminating equipment 356
data compression 204
data frame 337
data link layer 42, 166
data over cable service interface specification 338, 393
data reduction 203
data terminal equipment 355
Daten 12
Datendecoder 305
Datenempfänger 355
Datenendeinrichtung 355
Datenkabel 97, 358
Datenkanal 377
Datenkommunikation 355
Datenkompression 204
Datenpaket 357
Datenquelle 355
Datenrahmen 337
Datenreduktion 50, 203
Datenreduktionsverfahren 400
Datensender 355
Datensenke 355
Datensicherung 366
Datenübertragungseinrichtung 356
DAU 58, 158, 162, 325
dB 30

- dBd 122
 dBi 122
 dBm 34
 dB(mW) 34
 dB(V) 34
 dBV 34
 dB(W) 34
 dBW 34
 dB(μ V) 34
 dB μ V 34
 DCE 356
 DCT 211, 212
 DCT-Koeffizient 211
 Decoder 197
 Decodierung 197
 decryption 279
 DECT 381
 dedicated services network 191
 DEE 355
 Deemphasis 294
 definierter Abschluss 55
 dekadische Logarithmus 30
 Deltamodulation 256
 Demodulation 221, 289, 334
 Demodulator 221
 Demultiplexer 262
 Demultiplexierung 262
 DEMUX 262
 dense WDM 195
 descrambling 279
 Dezibel 30
 Dezimeterwellen 139
 dichter Wellenlängenmultiplex 195
 Dienste 18, 278
 Diensteanbieter 18
 dienste-dediziertes Netz 374
 Dienstebene 374
 dienste-integrierendes digitales Fernmeldenetz 377
 dienste-integrierendes Netz 191, 374
 Dienstenutzer 18
 dienstespezifisches Netz 191
 Dienstgüte 344
 differential puls code modulation 255
 Differenzmethode 206
 Differenz-Pulscodemodulation 255
 Differenzsignal 295
 Digital-Analog-Umsetzer 58, 158, 162, 325
 digital audio broadcasting 300
 digitale Amplitudensmodulation 246
 digitaler Dienst 40
 digitale Fernvermittlungsstelle 376
 digitale Frequenzmodulation 247
 digital enhanced cordless telecommunications 381
 digitale Ortsvermittlungsstelle 376
 digitales Antennenfernsehen 342
 digitales Fernsehen 328
 digitales Signal 22
 digitale Signalverarbeitung 325
 digitales Kabelfernsehen 338
 digitales Satellitenfernsehen 336
 digitale Teilnehmer-Anschlussleitung 344, 379
 digitales Trägersignal 240
 Digital Radio 300
 digital radio mondiale 306
 digital rights management 151
 digital subscriber line 344, 379, 393
 digital subscriber line access multiplexer 393
 digital-to-analog converter 58, 158
 digital versatile disc 67, 147
 digital video broadcasting 328
 digital visual interface 171
 DIN EN 183
 DIN IEC 183
 DIN ISO 183
 DIN-Norm 181
 Diplexer 319
 Dipol 112, 118
 Direktor 126
 diskrete Cosinus-Transformation 211, 212
 distortion 74
 distortion attenuation figure 75
 distortion factor 75
 distribution 186
 distribution network 195
 Diversitätscodierung 276
 DIVF 376
 DIVO 376
 D-Kanal 377, 379
 DLS 306
 DM 256
 DOCSIS 338
 DOCSIS-Standard 393
 Doppelader 96
 Doppel-Super 292
 double sideband amplitude modulation 228
 Downlink 143, 380, 389, 398
 Download 369
 Downstream 193

- DPCM 255
 Draillänge 96
 DRAM 71
 dreidimensionales Bild 351
 dreidimensionales Fernsehen 351
 Dreifachverteiler 157
 Dreitor 54
 Drillingsantenne 127
 dritte Mobilfunkgeneration 388
 DRM 151, 306
 DRM+ 308
 DRM plus 308
 DS 193
 DSB-AM 229
 DSL 344, 379, 393
 DSLAM 393
 DSL-Modem 393
 DSL-Router 394
 DSL-Splitter 394
 DTE 355
 Dual-Slope-Verfahren 161
 DÜE 356
 Dunkelsteuerung 353
 Durchgangs-Vermittlungsstelle 376
 Durchlassbereich 157
 Durchlassdämpfung 157
 Durchschaltevermittlung 187
 DVB 328
 DVB-C 337
 DVB-C2 338
 DVB-S 335
 DVB-S2 336
 DVB-T 339
 DVB-T2 342
 DVD 67, 147
 DVI 171
 DVSt 376
 DWDM 195
 dynamischer RAM 71
- E**
- E1-Netz 386
 E2-Netz 386
 EBU 184
 Echtzeit 151, 366
 Echtzeitanwendung 397
 Echtzeitübertragung 370
 ECM 280
 EDGE 388
 EDTV 330
- EEPROM 71
 Effektivwert 26
 EFuSt 143
 EG 182
 einbuchen 385
 eindeutige Zeichenerkennung 249
 Einfügedämpfung 158
 Eingangsimpedanz 125
 Eingangspegel 52
 Eingangsrahmenbreite 216
 Eingangsspannung 55
 Eingangsstrom 55
 Eingangswiderstand 55
 einheitliche Protokollarchitektur 363
 einkanalige Übertragung 294
 Einkoppelverluste 105
 Einleiterkabel 96
 Einlesegeschwindigkeit 58, 70, 148
 einlesen 14, 58
 einloggen 385
 Einmoden-LWL 106
 Ein-Rampen-Verfahren 160
 Einseitenband-Amplitudenmodulation 229
 Ein-Spur-Verfahren 60
 Einstrahlungsfestigkeit 407
 Eintakt-Diodenmodulator 241
 Eintor 53
 Ein-Träger-Verfahren 220
 Einzelkanalträger 270
 EIT 333
 Eklipseschutz 146
 electrically erasable programmable read-only memory 71
 electronic programme guide 334
 elektrische Feldkonstante 115
 elektrische Länge 91
 elektrische Leitung 89
 elektrisches Speicherverfahren 69
 elektrische Messtechnik 408
 elektrisches Feld 402
 elektrische Spannung 28
 elektrische Wirkleistung 28
 elektromagnetische Aussendung 404
 elektromagnetische Beeinflussbarkeit 405
 elektromagnetische Verträglichkeit 97, 402
 elektromagnetisches Feld 113, 402
 elektromagnetische Wellen 28
 elektronische Empfangsquittung 272
 elektronische Induktivität 237
 elektronische Kapazität 237
 elektronischer Programmführer 334

- elektrooptische Umsetzer 164
 Elektrosensibilität 407
 Elektrosmog 403
 Elementarentscheidung 24
 Elementarmagnet 59
 Elevationswinkel 123
 EMA 404
 E-Mail 368
 EMB 405
 embedded CA 281
 EMM 280
 Empfang 118
 empfangende Bodenstation 141
 Empfänger 47, 155, 285
 Empfangsantenne 119, 274
 Empfangsdiversität 276, 343
 Empfindlichkeit 293
 EMV 97, 402
 EN 182
 Encoder 197
 encryption 279
 Ende-zu-Ende-Protokoll 177
 Endgeräte 15, 148
 Endgeräte-Adapter 377
 Endstufenmodulation 286
 end-to-end-protocol 177
 Energieversorgung 145
 enhanced data rate for GSM evolution 388
 enhanced other networks 300
 entgeltfreier Dienst 151
 entgeltpflichtiger Dienst 151
 entitlement control message 280
 entitlement management message 280
 entlogarithmieren 31
 Entscheidungsbereich 413
 Entschlüsselung 279
 Entstörelement 404
 Entstörungsschaltung 406
 Entwürfelung 279
 EON 300
 EPG 334
 EPROM 71
 erasable programmable read-only memory 71
 Erdefunkstelle 143
 Erdkrümmung 138
 Erdnetz 128
 Erhebungswinkel 123
 error correction 214
 error detection 214
 error protection 50, 214
 Ersatzschaltplan 54, 92
 erster Tonträger 319
 ES 182
 ESB-AM 229
 Ethernet 357, 358
 ETSI-Guide 182
 ETSI-Standard 182
 Europäische Rundfunkunion 184
 Europäisches Standardisierungsgremium 180
 European Broadcasting Union 184
 European Standard 182
 event information table 333
 extended definition television 330
 externes CA 281
 eye pattern 84
- F**
- fading 135, 258
 Faktor 32
 Faltdipol 125
 Faltung 216
 Faltungscode 216
 Faltungscodierung 216, 305
 Faradeyscher Käfig 405
 Farbart 316
 Farbartsignal 318
 Farbdifferenzsignal 208, 318
 Farbe 204, 208
 Farbfernsehen 317
 farbiges Rauschen 79
 Farbkreis 317
 Farbsättigung 316
 Farbsynchronsignal 322
 Farbtaste 347
 Farbton 316
 Farbträger 320
 Farbträgerfrequenz 322
 Farbträgergenerator 323
 Farbträgerregenerierung 323
 Farbzeiger 317
 Fast Ethernet 358
 fast information channel 302
 FBAS-Signal 318
 FDD 150, 388, 390
 FDM 264
 FDMA 270, 386
 FEC 214, 258, 303, 343
 feed system 130
 Fehlanpassung 85, 95
 Fehlererkennung 201, 214
 Fehlerkorrektur 201, 214

- Fehlerschutz 50, 65, 213, 214, 220
Fehlerschutzverfahren 258
Feldgröße 29
Feldlinie 112
Feldwellenwiderstand 115
Fernbedienung 347
Fernempfangszone 134, 136
Fernfeld 114
Fernkopierer 382
Fernmeldenetz 372
Fernnetzebene 376
Fernsehen 309
Fernsehsignal-Zeile 327
Fernsprechen 372
Fernzone 134
Festkörperspeicher 69
Festnetz 373
Festplatte 62
Festplattenrekorder 62
fibre optic 101
fibre to the building 192
fibre to the curb 192
fibre to the device 192
fibre to the home 192
FIC 302
figure 36
file transfer protocol 366, 369
Filter 156
Filterung 406
firewall 371
Flachantenne 131
Flachbildschirm 326, 353
Flachkabel 98
Flankendiskriminator 237
Flankensteilheit 156
flash converter 161
Flash-Speicher 71
Flatrate 152, 399
flat screen 353
Flimmereffekt 312
flüchtiger Halbleiterspeicher 70
Flugfunk 141
Flüssigkeitskühlung 288
FM 222, 233, 284, 319
FM-Signal 234
Fokussierung 130
footprint 144
Fortpflanzungsgeschwindigkeit 110
Forum 370
forward channel 380
forward error correction 214, 258
Fotodiode 164
Fotosensor 65
Fourier-Analyse 240
four state differential phase shift keying 304
frame 187, 356
free service 18, 151
freie Dienste 18
Freileitung 96
Freiraumdämpfungsmaß 133
Freiraum-Feldwellenwiderstand 115
Freischaltung 385
frequency converter 165
frequency division duplex 150, 388, 390
frequency division multiple access 270
frequency division multiplex 264
frequency hopping 387
frequency interleaving 219
frequency shift keying 247, 382
Frequenz 22, 222
Frequenzduplex 388
Frequenzfunktion 26
Frequenzhub 233
Frequenz-Interleaving 219
Frequenzkonstanz 287
Frequenzmodulation 222, 233, 284, 319
Frequenzmultiplex 264
Frequenzsprungverfahren 387
Frequenzstandards 287
Frequenzteilung 287
Frequenzumsetzer 165
Frequenzumtastung 247, 382
frequenzversetzte Übertragung 196
Frequenzvervielfachung 287
Frequenzweiche 157
Fresnel-Zone 139
Front-End-Software 369
FS 159
F-Signal 318
FSK 247
FSK-Signal 248
FT 320
FTP 366, 369
FTP-Server 369
FTTB 192
FTTC 192
FTTD 192
FTTH 192
FTTX 192
FuFSt 383
Full-HD 332

Full HD 3D 353
 full scale 159
 Funkempfänger 90, 155
 Funkfeststation 383
 funkgestütztes Netz 383
 Funknetz 16
 Funkprognose 137
 Funksender 90, 155
 Funkstelle 141
 Funkübertragung 28, 89, 90, 108
 Funkvermittlungsstelle 383
 Funkverträglichkeit 403
 Funkzelle 383
 Fußpunktwiderstand 119
 FuVSt 383

G

gain 31
 Ganzwellendipol 120
 Gateway 46, 168, 360
 Gauß-Kanal 341
 GBG 188
 geführte Übertragung 89
 Gegenbetrieb 149
 Gegentakt-Diodenmodulator 241
 general packet radio system 388
 Generatorpolynom 217
 geostationärer Satellit 142
 geosynchroner Satellit 142
 Geradeausempfänger 289
 Geräusch 81
 Geräuschabstand 81
 Gesamtrahmen 335
 geschlossene Benutzergruppe 188, 371
 geschlossener Dipol 125
 geschlossener Schwingkreis 111
 geschlossenes Netz 344
 gespreiztes Spektrum 266
 gestockte Antenne 127
 geteilter Bildschirm 349
 GF 358
 Gigabit Ethernet 358
 Glasfaseranschlusseinheit 193
 Glasfaserleitung 89, 101
 Glasfaser 358
 Gleichlauf 150, 290, 313
 Gleichwellennetz 260, 307, 340
 global system for mobile communications 386
 GPRS 388

Gradientenprofil 106
 grafisches Symbol 346
 Graph 20
 Grenzfrequenz 72
 Grenzwert 408
 grober Wellenlängenmultiplex 195
 Größtwert 22
 Grün 317
 Grundfarbe 208, 316
 Grundfarbensignal 322
 Grundfunktion 375
 Grüngenerator 352
 Gruppenlaufzeit 75
 GSM 386
 GSM 900 386
 GSM 1800 386
 guard interval 258, 339

H

H.264 330
 Halbbild 312, 331
 Halbduplexbetrieb 149
 Halbleiterspeicher 69
 Halbspuraufzeichnung 60
 Halbwellendipol 120
 Halteschaltung 81
 Handhabung 59
 handover 385
 Handschlag-Prozedur 382
 Handschlagverfahren 170
 handshake procedure 170, 382
 Handy 383
 Hardwareschnittstelle 169
 harmonized standard 182
 Hauptkeule 122
 Hausverteilanlage 391
 HbbTV 348
 HD 68, 384
 HDB-3-Format 203
 HDMI 171
 HDMI 1.4 354
 HD-Radio 308
 HDTV 68, 330
 HE AAC 307
 headend 195
 header 187, 356, 362, 367
 Heimatdatei 384
 Heimnetz 195
 Helligkeit 204, 208, 316
 Helligkeitssignal 318

HF 28
 HFC-Netz 191
 high definition 68
 high definition multimedia interface 171
 high definition television 68, 330
 high density bipolar of order 3 203
 highpass 156
 high speed circuit switched data 388
 high speed downlink packet access 389
 high speed uplink packet access 389
 Hinkanal 380
 Hinleiter 98
 hintere Schwarzsulter 322
 HLR 384
 hochauflösendes Fernsehen 68
 Hochfrequenz 28
 Hochpass 156
 Höchstfrequenz 28
 höchswertiges Bit 199
 höherwertige Frequenzumtastung 247
 Hohlleiter 99
 hold circuit 81
 home location register 384
 home network 195
 homogene Leitung 92
 Hörfunk 283
 Horizontal-Endstufe 325
 horizontaler Öffnungswinkel 124
 horizontale Polarisation 124, 269
 Horizontal-Richtcharakteristik 122
 hot spot 360
 HSCDS 388
 HSDPA 389
 HSUPA 389
 H-Sync 314, 325
 HTML 348, 369
 HTTP 366
 Hub 166, 359
 Hüllkurve 223
 Hüllkurvendetektor 232, 242
 hybrid 346
 hybrid broadcast broadband television 348
 hybrides Leitungsnetz 192
 hybrides Fernsehen 346
 hybrid fibre coax 191
 Hybridnetz 16
 Hybrid-TV 346, 350
 Hyperlink 369
 hypertext markup language 348, 369
 hypertext transfer protocol 366, 369

I

IAB 367
 IAE 377
 IANA 368
 I-Bild 212
 IBOC 308
 icon 346
 IDFT 258
 IEEE 184
 IEEE 802.11 361
 IESG 367
 IETF 367
 IF 289
 I-Komponente 231, 250
 iLNB 397
 image frequency 291
 Impulsdauer 23
 Impuls 23
 Impulsfolge 23
 Impulspause 23
 Impulsreflektometer 409
 Impulstrennstufe 325
 IMUX 145
 in-band on channel 308
 independent sideband 230
 Individualkommunikation 345
 Induktionsprinzip 59
 Induktivitätsbelag 93
 Industriestandard 184
 Information 11
 Informationsträger 57, 90
 Inhalt 278
 inhaltespezifisches Signal 281
 INIC 365, 368
 inkohärente Demodulation 231
 Innenleiter 98
 Innenwiderstand 54, 85
 innerer Fehlerschutz 336
 innere Rauschquelle 77
 Inphase-Komponente 231, 250
 input multiplexer 145
 Institute of Electrical and Electronics Engineers 184
 integrated services digital network 377
 integrated services network 191
 integriertes CA 281
 Intensitätsmodulation 164
 interactive low noise block converter 397
 interaktiver LNB 397
 Interaktivität 348

- interconnected networks 362
 interface 19, 169
 Interferenz 80
 Interferenzzone 135, 136
 Interleaving 219
 intermediate frequency 289
 Intermodulationsprodukt 155
 Internationale Fernmeldeunion 178
 internationales Fernsprechnetz 377
 internationale Standardisierungsorganisation 40
 internationales Standardisierungsgremium 180
 International Standardisation Organisation 40
 International Telecommunication Union 178
 Internet 362
 Internetadresse 351, 365
 Internetanwendung 346
 Internet Architecture Board 367
 Internet Assigned Number Authority 368
 Internet Engineering Steering Group 367
 Internet Engineering Task Force 367
 Internetfernsehen 370
 Internet-Kommunikationsmodell 364
 Internet Network Information Center 365, 368
 internet protocol 362, 363
 Internet Protokoll 344
 Internetradio 370
 Internet Society 367
 Internettelefonie 370
 Internet Television 344
 Intersymbol-Interferenz 258
 Intranet 371
 inverse diskrete Fourier-Transformation 258
 inverse standing wave ratio 86
 Inversionsschicht 139
 Investitionskosten 399
 Ionosphäre 132
 IP 344, 362, 363
 IP-Adresse 362, 364
 IP-Telefonie 366, 390
 IPTV 344, 394
 IPv4-Adresse 364
 IPv6-Adresse 364
 Irrelevanz 205
 Irrelevanzreduktion 206
 ISB 230
 ISDN 377
 ISDN-Anschluseinheit 377
 ISDN-Basisanschluss 377
 ISDN-Basisnetzabschluss 377
 ISDN-S₀ 172
 ISI 258
 ISM-Band 361
 ISO 40
 ISOC 367
 isotrope Strahler 116
 ITU 178
- J**
- Jitter 84, 413
- K**
- Kabelinternet 393
 Kabelmodem 391
 Kabeltelefonie 393
 Kabelverzweiger 192, 395
 Kanal 47
 Kanalbandbreite 284
 Kanalbündelung 338
 Kanalcodierung 214, 334
 Kanaldecodierung 305, 334
 Kanal 284
 Kanalkapazität 51
 Kanal-Modell 341
 Kanalraster 284
 Kanalwähler 322
 Kapazitätsbelag 93
 Kapazitätsdiode 236, 288
 Kartenleser 282
 Karussell-Prinzip 327
 Kategorie 5 97
 Kategorie 6 97
 Kategorie 6 A 97
 Kategorie 7 97
 Kategorie 7 A 97
 Kategorie 358
 kbps 25
 Kehrlage 225
 Kerbfilter 157
 Kern-Mantel-Grenzfläche 102
 kinetische Energie 108
 Klirrdämpfungsmaß 75
 Klirrfaktor 75
 koaxiale Leitung 358
 Koaxialkabel 98
 Koaxkabel 98
 kohärente Demodulation 232
 Kollision 357
 Kollisionserkennung 273
 Kommunikation 11

- Kommunikationsprotokoll 44
 Kommunikationsschicht 43
 Kommunikationssystem 16, 37
 Komparator 238
 Kompatibilität 295, 306, 317, 344
 Kompensation 407
 komprimiertes Format 369
 Konstantspannungsquelle 54
 Konstantstromquelle 54, 162
 Konstellationsdiagramm 249, 412
 Konstellationspunkt 413
 Kontrollbit 216
 Konvergenz 362
 Kopfstelle 195
 Kopfteil 187, 356, 362, 367
 Koppelfeld 187, 372
 Kreisfrequenz 22
 Kreuzdipol 126
 kritische Frequenz 100
 Kugelkoordinate 113
 Kugelstrahler 116
 Kündigungsfrist 399
 Kunststofffaserleitung 89, 101
 Kurzschluss 55
 Kurzschlussstrom 54
 Kurzwellen 137
 Kurzwellenbereich 283
 KVz 192, 395
 KW 283
- L**
- L 295
 Lagekorrektur 146
 Lageenergie 108
 LAN 348, 356, 357
 längenabhängige Dämpfung 52
 Längspuraufzeichnung 60
 Längstwelle 136
 Langwelle 136
 Langwellenbereich 283
 Laserdiode 164
 Laser 63, 65
 Latenzzeit 166
 Laufzeit 135
 Laufzeitverzerrung 74
 layer 40
 L-Band 305
 LDPC 336, 338, 343
 LDTV 330
 least significant bit 199
 Lebensdauer 146
 Leckstelle 83
 LED 164
 Leerlauf 55
 Leerlaufspannung 54
 Leistungsanpassung 86
 Leistungs-Dämpfungsfaktor 33
 Leistungs-Dämpfungsmaß 37
 Leistungs-Dämpfungspegel 33
 Leistungsflussdichte 116
 Leistunggröße 29
 Leistungspegel 30
 Leistungsverstärkerstufe 227
 Leistungs-Verstärkungsfaktor 32
 Leistungs-Verstärkungsmaß 36
 Leistungs-Verstärkungspegel 32
 Leitungscodierung 201
 Leitungsempfänger 155
 leitungsgebundene Übertragung 28
 Leitungsgleichung 93
 Leitungskonstante 92
 Leitungsnetz 16
 Leitungssender 155
 Leitungsübertragung 89
 Leitungsvermittlung 187
 Leitwertbelag 93
 Leseeinrichtung 382
 level 30, 329
 LFD 116
 Lichtdetektor 164
 Lichtgeschwindigkeit 110
 Lichtmischung 316
 Lichtstrom 414
 Lichtwellenleiter 89, 101, 266, 358
 lifetime 146
 light emitting diode 164
 lineare Polarisation 269
 lineare Quantisierung 254
 lineare Verzerrung 74
 Linearitätsfehler 159
 line interlacing 312, 313, 331
 line switching 187
 local area network 348, 356
 login 385
 logischer Ring 272
 logout 385
 lokales Datennetz 348, 356, 357
 long term evolution 390
 loop antenna 129
 Löschkopf 60
 low definition television 330

- lower sideband 224
lowest usable frequency 137
lowpass 156
LRC 215
LSB 199, 224
LTE 390
LUF 137
Luftkühlung 288
Luftschnittstelle 170
Luftspaltbreite 60
Luminanz 204, 208
Luminanzsignal 317
Luminanzteil 323
Lumineszenz-Dioden 164
LW 283
LWL 89, 266, 358
LWL-Verbindungsstelle 104
- M**
- Magnetband-Videokassette 146
magnetische Feldkonstante 115
magnetisches Speicherverfahren 59
magnetisches Feld 402
Magnetkopf 60
Mailbox 368
main service channel 302
main system controller 388
Makroblock 211
MAN 356
Manchester-Format 202
Mark 201
Maschennetz 190
Maschine-Maschine-Kommunikation 12, 355
masking pattern adapted universal subband
 integrated coding and multiplexing 207, 300
Maß 36
Massenkommunikation 345
Massenkommunikationsmittel 283
matching 85
materielle Übertragung 57
Maximalwert 22
maximum usable frequency 137
Maxwellsche Gleichungen 113
Mbps 25
MCI 302
MCPC 270
mean power 228
mechanische Codierung 378
mechanische Länge 91
Medienkonverter 45
- Mediennutzung 372
Mehr-Dienste-Fähigkeit 178
Mehr-Ebenen-Antenne 127
Mehrfachmodulation 260
Mehrfachnutzung 52, 261
Mehrfachreflexion 134, 137
Mehrfachrufnummer 379
Mehrfachspeisung 397
Mehrfachzugriff 269
Mehrfrequenznetz 260
Mehrfrequenzwahl-Verfahren 375
Mehrkanalträger 270
Mehrleiterkabel 98
Mehrmoden-Lichtwellenleiter 106
Mehrmoden-LWL 106
Mehr-Träger-Signal 257
Mehr-Träger-Verfahren 220, 300, 303, 339
Mehr-Wege-Empfang 258, 339
memory stick 70
Mensch-Maschine-Kommunikation 12
Mensch-Maschine-Schnittstellen 169
Mensch-Mensch-Kommunikation 12
MER 412
Messaufbau 408
Messempfänger 412
Messfehler 408
Messgerät 408
Messtechnik 408
Messverfahren 404, 408
Meterwellen 138
metropolitan area network 356
MFN 260
MFV 375
Millimeterwellen 140
MIME 367
MIMO 274
MIMO-Gesamtkanal 275
Mischer 166
Mischstufe 289
mismachting 85
MISO 276
Mithörschwelle 206, 300
Mittelwellen 136
Mittelwellenbereich 283
mittlere Leistung 228
mixer 166
Mobilfunk 383
Mobil(funk)netz 373
Mobilität 400
Mobilstation 383
Mobilteil 381

- Mobiltelefon 383
Mode 100, 103
Modem 382
Modendispersion 103
Modulation 220, 334
modulation error rate 412
Modulationsfehlerverhältnis 277
Modulationsgrad 223
Modulationsindex 234
Modulationssignal 220
Modulator 220, 221
moduliertes Signal 220
Mono 295
monochromatisches Licht 103
Monoempfänger 296
Monofonie 294
Monomode-LWL 106
Monomode-Stufenprofil-LWL 105, 107
Monopol 128
most significant bit 199
MOT 306
Motion Picture Experts Group 206
MP 3 207
MPEG 206
MPEG-1 Layer 1 207
MPEG-1 Layer 2 207
MPEG-1 Layer 3 207
MPEG-2 209, 328
MPEG-2-Transportstrom 328
MPEG-2-TS 328
MPEG-2-Videocodierung 211
MPEG-4 213, 306, 330
MPEG-4 AAC 207
MS 383
MSB 199
MSC 302, 388
MSN 379
MUF 137
multi carrier system 220
Multicast 186
multi channel per carrier 270
multifeed 397
multi frequency network 260
Multifunktionsgerät 382
Multimode-Gradientenprofil-LWL 105, 106, 107
Multimode-LWL 106
Multimode-Stufenprofil-LWL 105, 106, 107
multiple access 52, 269
multiple subscriber number 379
multiplex configuration information 302
Multiplexer 262
Multiplexsignal 242
Multiplexverfahren 261
multipurpose internet mail extension 367
Multiscreen 401
MUSICAM 207, 300
MUSICAM-Coder 300
MUSICAM-Decoder 300, 305
MUX 262
MW 283
- N**
- NA 102, 105
Nachführung 146
Nachleuchtdauer 312
Nachricht 11
Nachrichtenmenge 48
Nachrichtenquader 49
Nachtrabant 314
Nahbereichsdatennetz 356
Nahempfangszone 134
Nahfeld 114
Nahzone 134
narrow band 73
nationales Standardisierungsgremium 180
natürliche Lage 196
Nebenkeule 122
Nebenzipfel 122
Negativmodulation 313
Netto-Bandbreitenausnutzung 335
Netto-Bitrate 218, 220, 338, 340, 341, 343
network 16, 17, 278
network administration 177
network information table 333
network layer 42
network maintenance 177
network nod 372
network operation 177
network operator 189
network termination 394
network termination basic access 377
Netz 16
Netzabschluss 394
Netzbetreiber 189
Netz 278
Netzebene 391
Netzhierarchie 190
Netzknoten 17, 367, 372
Netzkonfiguration 177
Netzmanagement 362

- Netzsegment 168
 Netztopologie 367
 Netzverfügbarkeit 377
 Netzverwaltung 177
 Netzwartung 177
 Netzwerkkomponente 166
 Newsgroup 370
 Next Generation Network 401
 NF 28
 NGN 401
 nicht flüchtiger Halbleiterspeicher 70
 nichtlineare Kennlinie 226
 nicht-lineare Quantisierung 254
 nichtlineare Verzerrung 75
 nichtthermische Wirkung 407
 Niederfrequenz 28
 niedrigstwertiges Bit 199
 NIT 333
 NK 372
 noise 77
 noise figure 36, 80
 non linear distortion 75
 non programme associated data 301
 non return to zero 201
 non-volatile semiconductor memory 70
 Normalfrequenz 287
 Normalpapier 382
 Norm 179
 notch filter 157
 NPAD 301
 NRZ-Format 201
 NT 394
 NTBA 377
 Nullmeridian 143
 Nullsymbol 302
 numerische Apertur 102, 105
 Nur-Lese-Speicher 66, 68
 Nutzer 15, 18, 372
 Nutzerschnittstelle 169
 nutzerspezifisches Signal 281
 Nutzinformation 177
 Nutzlast 187, 367
 Nutzsignal 15, 48
 Nutzsignal-Störsignal-Abstand 77
 Nutzungsentgelt 399
 Nyquistflanke 323
- O**
- obere Grenzfrequenz 72
 oberes Seitenband 224
- OFDM 257, 303, 390
 offenes Kommunikationssystem 40
 offene Kommunikation 45
 offenes System 178
 offener Dipol 125
 offener Schwingkreis 111
 offener Standard 183
 öffentliches Netz 188
 Offline 150
 Offline-Betrieb 57
 Öffnungswinkel 123
 Offset-Antenne 130
 Offsetfehler 159
 Offset-Parabolantenne 130
 Ohrempfindlichkeitskurve 205
 OK-Taste 347
 OLT 193
 OMUX 145
 on demand service 18, 152
 Online 150
 Online-Betrieb 57
 ONU 193
 open systems interconnection 40
 operation mode 148
 optical line terminal 193
 optical network unit 193
 optical time division reflectometer 415
 optische Leistung 20, 29
 optische Leitfähigkeit 101
 optische Dämpfungsmessung 415
 optische Glasfaserabschlusseinheit 193
 optische Leitung 89
 optische Platte 63
 optische Messtechnik 408
 optischer Splitter 193
 optoelektrischer Umsetzer 164
 Orbitposition 143
 Ordinate 20
 orthogonal 144
 orthogonaler Frequenzmultiplex 257
 orthogonales System 352
 orthogonal frequency division multiplex 257, 303, 390
 Orthogonalität 257
 Ortskurve 119
 Ortsnetzebene 376
 OSB 224
 oscilloscope 409
 OSI 40
 OSI-Referenzmodell 40
 Oszillator 289

Oszilloskop 409
OTDR 415
output multiplexer 145
Overlay-Netz 191
oversampling 82

P

Paar 96
packet 187, 356
packet error rate 412
packet switching 188
PAD 301
Paket 187, 356
paketorientierte Übertragung 390
Paketvermittlung 188
PAL 322
PAL-Schalter 324
PAM 241
PAN 356
Parabolantenne 130
Paraboloid 130
Parabolspiegel 130
parallele Übertragung 170
Parallel-Resonanzkreis 110, 288
Parallelumsetzer 161, 163
Parameter 55, 179
passive Filter 157
passive optical network 193
passives optisches Netz 193
passives Eintor 54
passives Zweitor 56
PAT 333
pay load 187, 367
pay service 18, 151
P-Bild 212
PCM 252, 263
PCM 30 263
PDM 268
PDMA 272
peak envelope power 227
Pegel 30, 32
Pegeldiagramm 37, 38
Pegelplan 37, 38
PEL 208
PEP 227
PER 412
Perigäum 142
Periodendauer 22
Permeabilitätszahl 91, 406
Permittivitätszahl 91, 99

personal area network 356
personal identification number 151, 280, 385
persönliche Identifizierungsnummer 385
PFD 116
PFM 242
phase alternating line 322
phase distortion 74
phase frequency response 27
phase-locked loop 238
Phasenbelag 94
Phasendiskriminator 238
Phasenfehler 324
Phasen-Frequenzgang 27, 154
Phasengang 27
Phasenhub 239
Phasenlaufzeit 75
Phasenmaß 94
Phasenmodulation 222, 239
phasenmoduliertes Signal 239
Phasenregelkreis 238
Phasenumtastung 248, 297
Phasenverschiebungswinkel 22
Phasenverzerrung 74
Phasenwechsel 322
Phasenwinkel 22, 222
phase shift keying 248
physical layer 41, 166, 361
Physical Layer Pipe 343
physikalische Schicht 361
picture element 208, 309, 310
Pilot 296
Pilotfrequenz 296
PIN 151, 280, 385
Ping-Pong-Verfahren 150
Piraterie 280
Pit 63
Pitstruktur 64
pixel 309
Planarantenne 131
Plattenspeicher 62
player 147
PLL 238
PLL-Schaltung 239
PLP 343
PM 222, 239
PM-Signal 240
PMT 333
PMXA 379
Podcasting 371
POF 89, 101, 358
point-to-multipoint connection 186

- point-to-point connection 186
 Polarisation 124
 polarisation division multiple access 272
 polarisation division multiplex 268
 Polarisationsdiversität 276
 Polarisationssentkopplung 124
 Polarisationsfilter-Brille 352
 Polarisationsmultiplex 268
 polarisiertes Licht 352
 Polymerfaser 358
 polymer optical fibre 89, 101
 PON 193
 Portabilität 59, 62
 portabler Festplattenspeicher 147
 portabler Signalspeicher 89, 146
 Portal 369
 potenzielle Energie 108
 power 28
 power flux density 116
 PPM 243
 Prädiktion 212
 Prädiktor 255
 Preemphasis 293
 Preis-Leistungs-Verhältnis 59
 Prepaid-Version 152
 presentation layer 43
 Primärmultiplexanschluss 379
 primary rate multiplex access 379
 Priorität 358
 private network 188
 privates Netz 188
 procedure 176
 Produktdetektor 232
 profile 329
 programmable read-only memory 71
 programmbezogene Anwendung 348
 programme associated data 301
 programme association table 333
 programme map table 333
 programme service name 299
 Programm-Multiplexer 328, 332
 programmunabhängige Anwendung 348
 PROM 71
 proprietäre Schnittstelle 171
 protocol 19, 176
 protocol stack 45, 177
 Protokoll 19, 39, 44, 176
 Protokollarchitektur 177
 Protokollstapel 45, 177
 Protokollumsetzung 168
 provider 398
- Prozedur 19, 176
 Prüfbit 216
 PS 299
 PS/2 172
 PSK 248, 297
 psychoakustischer Effekt 206
 psychoakustisches Modell 207, 300
 psychooptische Redundanz 210
 psycho-visual redundancy 210
 public network 188
 public standard 183
 Pull-Dienst 151
 pull service 18, 151
 Puls 23
 Pulsamplitudenmodulation 241
 Pulsbreitenmodulation 243
 Pulscodemodulation 252, 263
 Pulsdauermodulation 243
 pulse code modulation 252
 pulse width modulation 243
 Pulsfrequenz 23
 Pulsfrequenzmodulation 242
 Pulslagmodulation 243
 Pulslängenmodulation 243
 Pulsmodulation 221
 Pulphasenmodulation 243
 punktierter Faltungscode 217
 Punktierung 217
 Punkt-zu-Mehrpunkt 371
 Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung 186
 Punkt-zu-Punkt-Verbindung 14, 186, 345, 366,
 370, 372, 388
 Push-Dienst 151
 push service 18, 151
 PWM 243
- Q**
- QAM 230, 250, 320
 QAM-Signal 231
 Q-Komponente 231, 250
 QoS 344
 QPSK 248
 Quadrant 20
 quadratische Kennlinie 226
 Quadratur-Amplitudenmodulation 230, 250, 320
 quadrature amplitude modulation 230, 250
 quadrature phase shift keying 248
 Quadratur-Komponente 231, 250
 quality of service 344
 Quarz-Oszillatator 287

quasioptisches Verhalten 138
 Quelle 47
 quellencodiertes Signal 205
 Quellencodierung 203, 328, 334
 Quellendecodierung 334
 Quellensignal 203

R

R 295
 radio 283
 radio data system 297
 Radio-Daten-System 297
 radio horizon 138
 Radiohorizont 138
 radio link 139
 radio node controller 388
 Rahmen 187, 356
 Rahmenantenne 129
 RAM 70
 random access memory 70
 ratio 35
 Raumdiversität 276
 Raumklangverfahren 354, 400
 räumliche Redundanz 210
 Raummultiplex 268
 Raumwelle 134
 Rauschen 77
 Rauschleistung 78
 Rauschleistungspegel 78
 Rauschmaß 36, 80
 Rauschzahl 80, 154
 Rayleigh-Kanal 341
 RDS 297
 RDS-Coder 298
 RDS-Daten 298
 RDS-Decoder 298
 RDS-Standard 298
 read-only memory 66, 70
 realtime 151
 realtime control protocol 366
 realtime transfer protocol 366
 receiver 47, 155, 285
 reception 118
 rechteckförmiger Verlauf 23
 rechteckförmige Zeitfunktion 23
 rechtwinkliges Koordinatensystem 20
 „red button“-Funktion 349
 Redundanz 198, 205
 Redundanzreduktion 206
 reduziertes Farbdifferenzsignal 318

Reed-Solomon-Code 335
 Referenzkabel 415
 Referenzmodell 40
 reflection coefficient 86
 Reflektor 126
 Reflexion 101, 138
 Reflexionsfaktor 86, 95
 Reflexionsschicht 134
 Regellage 196, 225
 Regional-Vermittlungsstell 376
 relativer Pegel 31
 RELP 387
 Repeater 46, 166, 360
 requests for comments 367
 residual excited linear prediction 387
 Resonanzfrequenz 118
 Ressource-Block 390
 Restseitenband-Amplitudenmodulation 230, 319
 Restträger 229
 return channel 380
 return loss 86
 return to zero 201
 Reziprozitätsgesetz 119
 RFC 367
 Rice-Kanal 341
 Richtantenne 126
 Richtdiagramm 123
 Richtfunk 139
 Richtstrahl-Charakteristik 122
 Richtungsbetrieb 148
 Richtungstaste 347
 Richtungswinkel 123
 ringförmige Spur 62
 Ringnetz 190
 ripple 73, 157
 RJ-11 172
 RJ-45 172
 RNC 388
 „roll-off“-Faktor 412
 ROM 70, 71
 Rot 317
 Rotationsellipsoid 139
 Rotfilter 352
 Router 46, 167, 359, 360, 362
 Routing 363
 Routingprotokoll 167
 Routing-Prozedur 367
 Routingtabelle 167
 RS (204, 188) 335
 RS-232 173
 RSB-AM 230, 319

- RS-Code 335
 RST 333
 RTCP 366
 RTP 366
 Rückflussdämpfung 86, 87
 Rückkanal 380
 rücklaufendes Signal 87
 rücklaufende Welle 95
 Rückleiter 98
 Rückwärtsfehlerkorrektur 215
 Rückwärtsregelung 292
 Rufeinheit 375
 Ruhehörschwelle 205
 Rumpfteil 187, 367
 Rundstrahl-Charakteristik 122
 running status table 333
 RVSt 376
 RZ-AMI-Format 202
 RZ-Format 201
- S**
- S₀-Bus 377
 Sägezahn-Umsetzverfahren 160
 sampling 81
 Satellit 141
 Satellitenempfangsanlage 143
 Satellitenempfangseinrichtung 143
 Satellitenfunkübertragung 141
 Satellitenmodem 397
 Sat-Modem 397
 SBR 307
 SC 302
 SCART 173
 SCART-Anschluss 326
 scatter 140
 SC-FDMA 390
 Schallquelle 294
 Schallwellenfeld 400
 schaltungstechnische Funktionseinheit 153
 Scheitelwert 26
 Schicht 40
 Schichtenmodell 363
 Schirmdämpfungsmaß 82, 99, 405, 406
 Schirmung 82, 97
 Schirmungsmaß 82
 Schlaglänge 96
 Schlüsselwort 280
 Schmalband 73
 Schmalband-Verstärker 154
 Schnittstelle 19, 169
 Schnittstellenbedingung 40
 Schnittstellenbeschreibung 169
 Schnittstellendefinition 19
 schnurloses Telefon 381
 Schrägpuraufzeichnung 60
 Schreibeinrichtung 382
 Schreib-Lese-Speicher 67, 68
 Schutzabstand 264
 Schutzintervall 258, 339
 Schwarzpegel 313
 Schwarzschulter 314
 Schwarzweiß-Fernsehen 317
 Schwingung 108, 109
 Schwingungsmodulation 221
 Schwund 135
 SCPC 270
 scrambling 279
 screening 97
 SDM 268
 SDMA 271
 SDRAM 71
 SDT 333
 SDTV 330
 Sechspol 54
 sechszehnwertige APSK 261
 Sehwinkel 310
 Seitenband 224
 Seitenbandleistung 228
 Seitenfrequenz 224, 234
 Seitenschwingung 235
 selbstabschirmendes Kabel 99
 semiconductor memory 69
 Semiduplexbetrieb 149
 Sendeantenne 119, 274
 Sendeberechtigung 272
 Sendediode 164
 Sendediversität 276
 sendende Bodenstation 141
 Sender 47, 118, 155, 285
 Senderabstand 340, 343
 Senke 47
 sensitivity 293
 serielle Übertragung 170
 Serienumsetzer 162
 Server 168, 359
 Server-Client-Kommunikation 168
 Servern 357
 service 18, 278
 service description table 333
 service information 302

- Service-Information 333
service provider 18
service user 18
Servosystem 65
session initiation protocol 390
session layer 43
SFN 260, 307, 340
shared medium 345
shielded twisted pair 97
shielding 97
shift keying 245
short message service 389
Shutter-Brille 352
SI 302
Sicherung 40
Sicherungsprotokoll 44
Sicherungsschicht 42
sichtbares Licht 316
Siedekühlung 288
Signalausgabe 14, 58
Signal 11
Signaleingabe 14, 58
Signalisierung 372
Signalisierungsdaten 387
Signal-Rausch-Abstand 79, 249, 412
Signalschutz 282
Signalspeicherung 14, 57
signal-to-noise ratio 35, 79, 412
Signalübertragung 14
Signalverarbeitung 15
SIM 151
SIM-Karte 280, 385
SIMO 276
simple mail transfer protocol 366
Simplexbetrieb 148, 326
single carrier - frequency division multiplex
 access 390
single carrier system 220
single channel per carrier 270
single frequency network 260, 307, 340
single sideband amplitude modulation 229
sinusförmiger Verlauf 22
sinusförmige Zeitfunktion 22
SIP 390
Skalierbarkeit 213, 329
S-Kanal 379
Smartcard 151, 279, 281
Smartphone 400
Smart-TV 346
SMS 280, 389
SMTP 366
S/N 79
SNR 35, 79, 412
Softwareschnittstelle 176
Solarzelle 145
solid state memory 69
Sonnenfleckenmaximum 137
Sonnenfleckenminimum 137
Sonnenfleckenzahl 137
Sony/Philips digital interface 174
source coding 203
space 201
space division multiple access 271
space division multiplex 268
Spannungs-Dämpfungsfaktor 33
Spannungs-Dämpfungsmaß 37
Spannungs-Dämpfungspegel 33
Spannungs-Frequenz-Umsetzer 160
spannungsgesteuerte Kapazität 236
spannungsgesteuerter Oszillator 238
Spannungspegel 30
Spannungs-Verstärkungsfaktor 32
Spannungs-Verstärkungsmaß 36
Spannungs-Verstärkungspegel 32
spatial redundancy 210
SPDIF 174
Special Report 182
spectral band replication 307
spectral efficiency 246
spectrum analyser 410
Speicherkapazität 58, 62
Speicherkarte 147
Speichermedium 57
Speicherstift 70
Speichertiefe 216
Speicherung 14, 57
Speisesystem 130
spektrale Effizienz 88, 246, 274
Spektrallinie 27, 73, 321
Spektrum-Analysator 410
Sperrbereich 157
Spiegelfrequenz 291
Spiegelfrequenzfestigkeit 291
Spieler 147
Spitzenleistung 227
Spitzenwertgleichrichter 232
split screen 349
Sprachbox 385
Sprachdienst 374
Sprachverständlichkeit 374
Sprecheinheit 375
spread spectrum 266

- Spreizfrequenzsignal 266
 Spreizsignal 266, 271
 Spreizung 266
 Spurführung 65
 SR 182
 SRAM 71
 SSB-AM 229
 S-Signal 313, 315
 SSN 137
 Stabantennen 128
 städtisches/regionales Datennetz 356
 Standard 179
 standard definition television 330
 standardisierte Schnittstelle 171
 Standardisierung 179
 standing wave ratio 86, 87
 Station 357
 statisches RAM 71
 statistical redundancy 210
 statistische Redundanz 210
 stehende Wellen 87, 95
 Stehwellenverhältnis 87
 Stellenbewertung 162
 Stellenwertigkeit 199
 Stereo 295
 Stereo-Coder 296
 Stereo-Decoder 296
 Stereoempfänger 296
 Stereofonie 294
 Stereo-Multiplexsignal 296
 Stereoskopie 351
 Sternnetz 189, 278
 Sternnetz-Struktur 359
 Steuersender 287
 Störabstand 35, 48, 49, 50, 77, 154, 246, 254, 277
 Störabstrahlung 97
 Störaussendung 404
 Störeinstrahlung 97
 Störemission 403
 Störempfänger 403
 Störempfindlichkeit 403
 Störfeldstärke 404
 Störfestigkeit 59, 285, 403
 Störimmission 403
 Störkanal 403
 Störleistung 404
 Störquelle 403
 Störsender 403
 Störsenke 403
 Störsignal 15, 48
 Störsignalunterdrückung 407
 Störstrahlungsleistung 404
 STP 97
 Strahlungsdiagramm 122
 Strahlungsdichte 116
 Strahlungsleistung 116
 Strahlungsquelle 116
 Stratosphäre 132
 streaming 370
 Streamingverfahren 345
 Streustrahlung 140
 strukturierte Verkabelung 359
 Stufenprofil 106
 Stufenumsetzer 160, 162
 Subband-Codierung 205
 subscriber identification module 151, 385
 subscriber interface module 280
 subscriber line 372
 subscriber management system 280
 Substitutionsmethode 415
 Subwoofer 400
 sukzessive Approximation 160
 Summensignal 295
 sun spot number 137
 Super 289
 Superheterodynemempfänger 289
 surround sound 354
 S-Video 174
 switch 166
 switching 186
 SWR 86, 87
 Symbol 215
 Symboldauer 258, 340
 symbol error 215
 Symbolfehler 215
 Symmetrische Zweidrahtleitung 96
 Synchrongeradmodulator 232, 233
 synchroner Betrieb 150
 Synchronisation 353
 synchronisation channel 302
 Synchronität 150, 263
 synchronous dynamic random access memory 71
 Synchronsignal 313, 314, 315, 325
 Syntax 39

T

- TA 299, 377
 Tablet-PC 400
 TAE 174, 378

- TAE-F 378
TAE-F-Stecker 381
TAE-N 378
Taktfrequenz 250
Taktgenerator 325
Taktsignal 150, 201
TAL 192, 345, 372, 376
Tastenwahltelefon 375
Tastgrad 23
Tastverhältnis 23
TCP 365
T-DAB 305
TDD 150, 390
TDM 262
TDMA 269, 386
TDMA-Rahmen 387
TDT 333
Technical Report 182
Technical Specification 182
Teilbandverfahren 300
Teilbild 351
Teilnehmer 15, 148, 372
Teilnehmer-Anschlussseinheit 174
Teilnehmer-Anschlussleitung 192, 345, 372, 376
Teilnehmerschaltung 376
Teilnehmer-Vermittlungsstelle 373, 376
Teilnetz 190, 392
Teilvermaschung 190
Telefaxgerät 382
Telefon 375
Telefonapparat 375
Telefonie 372
Telekommunikationskabel 97
television 309
temporal redundancy 210
terminal 15, 148
terminal adapter 377
TF-Technik 265
thermisches Rauschen 77
thermische Wirkung 407
Thermopapier 382
Tiefpass 156
time & data table 333
time division duplex 150, 390
time division multiple access 269
time division multiplex 262
time frequency slicing 343
time interleaving 219
time slot 269
TK-Kabel 97
Tln 15, 148, 372
TMC 299, 305
Token 272
Token-Ring 272
Token-Ring-Verfahren 272
Tonfrequenzsignal 375
Tonsender 319
Tonträger 319
Totalreflexion 102
Tote Zone 134
TP 299, 358
TPEG 306
TR 182
tracking 146
traffic announcement identification 299
traffic message channel 299
traffic programme identification 299
Trägerabsenkung 229
Trägerfrequenz 284
Trägerfrequenztechnik 265
Träger-Interferenz-Abstand 80
Trägerleistung 227, 285
Träger-Rausch-Abstand 80, 246, 335, 412
Trägerrückgewinnung 232
Trägersignal 196, 220
Trägerunterdrückung 229
Transcoder 165
transmission 279
transmission channel 47
transmission control protocol 365
transmitter 47, 155, 285
Transmodulator 165
transparente Übertragung 362
Transponder 145
Transponderbandbreite 335
transport layer 42
Transport-Multiplex 301
Transport-Multiplexer 303, 332
Transport-MUX 303
transportorientiertes Protokoll 44
Transportprotokoll 44, 362, 363
Transportrahmen 335
Transportschicht 42
Transportsteuerung 39
Transportstrom 332
Triggerung 325
Triple Play 391
Troposcatter 140
Troposphäre 132

TS 182, 332, 376
 TT1 319
 TT2 319
 Tuner 322
 tuning 288
 TV 309
 TVSt 373, 376
 Twinaxkabel 358
 twisted pair 358

U

Überabtastung 82
 Übergabepunkt 195
 Überlagerungsempfänger 289
 Übermodulation 224, 318
 Überreichweite 139
 Übersichtsschaltplan 53
 Übersprechdämpfungsmaß 76
 übersprechen 76
 Übersteuerung 156
 Übertragung 14, 47, 279, 374
 Übertragungsebene 373
 Übertragungseinrichtung 16
 Übertragungsfaktor 56
 Übertragungsfehler 198
 Übertragungsgeschwindigkeit 25, 76
 Übertragungskanal 47, 355
 Übertragungskapazität 399
 Übertragungsmaß 56, 94
 Übertragungsmedium 28, 39
 Übertragungsprotokoll 44
 Übertragungsschicht 41
 Übertragungssystem 47
 Übertragungsweg 16
 Übertragungszeit 49
 UDP 366
 UKW 283
 Ultrakurzwellenbereich 283
 umlaufender Satellit 142
 Umsetzer 158
 Umsetzerkennlinie 158
 Umtastung 245
 UMTS 388
 UMTS-Funkvermittlungsstelle 388
 UMTS radio access network 388
 UMTS terrestrial radio access network 388
 unbounded application 348
 ungeführte Übertragung 90
 ungleichmäßige Stufung 159
 Unicast 186

Unicast-Betrieb 345
 Unicode 201
 unidirektional 13
 unidirektionaler Betrieb 148
 unipolares PAM-Signal 241
 universal mobile communications system 388
 universal resource locator 351, 369
 universal serial bus 175
 universelle Teilnehmernummer 401
 unshielded twisted pair 97
 unsymmetrischer Internetzugang 399
 untere Grenzfrequenz 72
 unteres Seitenband 224
 Unterhaltungselektronik 348
 Uplink 143, 380, 389, 390, 399
 upper sideband 224
 Upstream 193
 URAN 388
 Urheberrecht 151
 URL 351, 369
 US 193
 usability 152
 USB 175, 224
 USB-Stick 70, 148
 user 15, 18
 user datagram protocol 366
 U-Signal 318
 UTP 97
 UTRAN 388

V

Varicap-Diode 236
 VCO 238
 VDE-Bestimmung 181
 VDE-Vorschriftenwerk 181
 VDSL 380
 Verarbeitung 15
 Verarbeitungsprotokoll 44
 Verarbeitungsschicht 43
 Verbandsstandard 184
 Verbindungsabbau 374
 Verbindungsaufbau 187, 374
 verbindungslose Datenübermittlung 363
 verbindungslose Datenübertragung 366
 verbindungslose Vermittlung 187
 verbindungsorientierte Datenübertragung 366
 verbindungsorientierte Vermittlung 187
 Verbindungssteuerung 177
 Verbindungsstruktur 45

- Verdampfungskühlung 288
 Verdeckungseffekt 205, 300
 verdrillte Zweidrahtleitung 358
 Verdrillung 96
 Verkehrsfunk 299
 Verkehrsfunkdurchsage 299
 Verkehrsfunkmeldung 299
 Verkehrskanal 387
 Verkürzungsfaktor 91
 verlustfreie Leitung 93
 Vermittlung 39, 186, 372
 Vermittlungsebene 373
 Vermittlungseinrichtung 17, 187
 Vermittlungsprotokoll 44
 Vermittlungsschicht 42
 Vermittlungsstelle 372, 375
 Verschlüsselung 151, 278, 279
 Verseilung 98
 Verstärker 154
 Verstärkung 31, 38
 Verstärkungsfaktor 32
 Verstärkungsfehler 159
 Verteildienst 18, 152, 345
 Verteileinrichtung 17
 Verteiler 157
 Verteilnetz 195
 Verteilung 14, 186
 Vertikal-Endstufe 325
 vertikaler Öffnungswinkel 124
 vertikale Polarisation 124, 269
 Vertikal-Richtcharakteristik 122
 Vertikalstrahler 128
 Vertragslaufzeit 399
 Verwirrungszone 135
 Verwürfelung 279
 Verzerrung 74
 vestigial sideband amplitude modulation 230
 VGA 175
 VHF-Band III 304
 Video 12
 Videocodierung 206, 208, 330
 video coding 206
 video graphics adapter 175
 Videokassette 61
 Videoprojektor 353
 Videoprozessor 325
 Video-Streaming 366
 Videotext 326
 Videotext-Daten 328
 Videotext-Decoder 328
 Videotext-Seite 326
 Videotext-Tafel 326
 Videotext-Zeile 327
 Vielfachnutzung 261
 Vielfachzugriff 52, 269
 Vielfachzugriff im Codemultiplex 271
 Vielfachzugriff im Frequenzmultiplex 270
 Vielfachzugriff im Polarisationsmultiplex 272
 Vielfachzugriff im Raummultiplex 271
 Vielfachzugriff im Zeitmultiplex 269
 vielwertiges Signal 22
 Vierlingsantenne 127
 Vierpol 53
 Vierpolparameter 55
 Vier-Spur-Verfahren 60
 Viertelpuraufzeichnung 60
 vierte Mobilfunkgeneration 390
 vierwertige Differenz-Phasenumtastung 303
 vierwertige Phasenumtastung 248
 virtuelles Universalnetz 401
 virtuelle Verbindung 188
 visitors location register 384
 Viterbi-Decoder 305
 VLR 384
 voice over internet protocol 366, 370, 390
 VoIP 366, 370, 390
 volatile semiconductor memory 70
 Vollbild 331
 Vollduplexbetrieb 149, 372
 Vollspuraufzeichnung 60
 Vollvermaschung 190
 Vollwellendipol 120
 voltage 28
 voltage controlled oscillator 238
 Vorhersagewert 255
 vorlaufendes Signal 87
 vorlaufende Welle 95
 Vor-Rück-Verhältnis 123
 Vorstrom 165
 Vorstufenmodulation 286
 Vortrabant 314
 Vorwärtsfehlerkorrektur 214, 303, 343
 Vorwärts-Fehlerkorrektur 258
 Vorwärtskanal 380
 Vorwärtsregelung 292
 VRC 215
 VSB-AM 230
 V-Signal 318
 VSt 372, 375
 VT 326

W

Wägeverfahren 160
 Wähleinheit 375
 Wählsignal 375
 Wählvorgang 375
 WAN 356
 Wandlungszeit 160
 Wärmerauschen 77
 wavelength division multiplex 194, 266
 WDM 194, 266
 Webradio 370
 Web-TV 370
 Wechselbetrieb 149
 Wechselfestplatte 147
 weißes Rauschen 79
 Weißpegel 313
 Weitbereichsdatennetz 356
 Weitverkehrs-Vermittlungsstelle 376
 Welle 108, 109
 Wellenlänge 110
 Wellenlängenmultiplex 194, 266
 Wellenleitung 90
 Wellenwiderstand 93
 Welligkeit 73
 Welligkeitsfaktor 86, 87
 Wertebereich 21
 wertediskret 21
 Werteintervall 21, 252
 wertekontinuierlich 21
 Wertequantisierung 252, 253
 wide area network 356
 wide band 73
 Widerstandsanpassung 86, 87
 Widerstandsbelag 92
 Widerstandrauschen 77
 wide screen 310, 351
 Wiedergabe 60
 Wiedergabegerät 147
 Winkelmodulation 222
 wireless local area network 348, 360
 Wirkungsgrad 288
 WLAN 348, 350, 360
 WLAN-Fähigkeit 360
 WLAN-Router 360
 Wobbelmessplatz 409
 World Wide Web 369
 WVSt 376
 WWW 369
 WWW-Server 369

X

x-Achse 20

Y

y-Achse 20
 Yagi-Antenne 126
 Y-Signal 317

Z

Zähldiskriminator 239
 Zeichen 215
 Zeigerdarstellung 226
 Zeilenablenkung 325
 Zeilenfrequenz 311
 Zeilenrücklauf 313, 315
 Zeilensprungverfahren 312, 313, 331
 Zeilensynchronsignal 314
 Zeilenwechsel 314
 Zeitbereichsreflektometer 415
 zeitdiskret 21
 Zeitfunktion 20
 Zeit-Interleaving 219
 Zeitintervall 21, 252
 zeitkontinuierlich 21
 zeitliche Redundanz 210
 Zeitmultiplex 262
 Zeitquantisierung 252, 253
 Zeitraster 81
 Zeitschlitz 263, 269, 387
 Zeit-und-Frequenzscheiben-Verfahren 343
 Zellbündel 383
 Zelle 187
 zellulares Netz 383
 zellulares Funknetz 388
 Zentimeterwellen 140
 zentrale Systemsteuerung 388
 zentralgespeiste Parabolantenne 130
 ZF 145, 289
 Zifferntaste 347
 zip 369
 zirkulare Polarisierung 124, 268
 ZSB-AM 228
 Zufallsgenerator 273, 358
 Zugangsnetz 195
 Zugriff 62, 151
 Zugriffsgeschwindigkeit 69
 Zugriffsverfahren 58
 Zusatzinformation 283, 326

- Zustand 0 201
Zustand 1 201
Zweidrahtleitung 97
Zwei-Ebenen-Antenne 127
Zweifachverteiler 157
zweikanalige Übertragung 294
Zweikanalton 309, 319
Zweileiterkabel 96
Zweipol 53
Zwei-Rampen-Verfahren 161
Zweiseitenband-AM 284
Zweiseitenband-Amplitudenmodulation 228
Zwei-Spur-Verfahren 60

Ulrich Freyer

Medientechnik

Dieses Buch bietet für Studierende der Medientechnik und verwandter Studiengänge einen direkten Einstieg in die Nachrichtentechnik als Grundlage der Medientechnik. Dabei geht es im Prinzip um die vielfältigen Möglichkeiten der Übertragung und Speicherung von Audio- und Videosignalen, also von Ton und Bild. Das Buch behandelt neben den Verfahren für Übertragung und Speicherung von Nachrichten auch die realisierten Systeme und stellt somit den theoretischen Ansatz der Praxis gegenüber.

Außerdem werden die Funktionalitäten und Zusammenhänge eingehend beschrieben und wichtige Fachbegriffe näher erläutert. Zahlreiche Beispiele und Übungen dienen dem besseren Verständnis und veranschaulichen den Lesestoff.

Das Buch richtet sich an Studierende der Medientechnik und verwandter Studiengänge, ist aber ebenso für das Selbststudium und als kompaktes Nachschlagewerk geeignet.

Aus dem Inhalt:

Signale und Pegel; OSI-Schichtenmodell; Übertragung; Speicherung; Geräte und Komponenten; Schnittstellen und Protokolle; Netze; Verfahren; Anwendungen: Hörfunk, Fernsehen, Telefonie, Datennetze, Internet

Der Autor:

Ulrich Freyer war technischer Leiter bei der Landesanstalt für Medien in Düsseldorf, er ist Analyst für Medientechnik und hält Lehrveranstaltungen zum Thema. Er ist Autor zahlreicher Fachbücher.

HANSER

www.hanser-fachbuch.de

€ 29,99 [D] | € 30,90 [A]

ISBN 978-3-446-42915-4



9 783446 429154