

Ulrich Freyer  
Michael Silverberg



# Medientechnik

Basiswissen, Konzepte, Verfahren, Anwendungen



2., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER





### **Blieben 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](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Ulrich Freyer/Michael Silverberg

# Medientechnik

Basiswissen, Konzepte, Verfahren, Anwendungen

2., überarbeitete und erweiterte Auflage

HANSER

## Die Autoren:

Ulrich Freyer, Analyst für Medientechnik

Prof. Dr. Michael Silverberg, TH Köln



MIX  
Papier aus verantwortungsvollen Quellen  
FSC® C083411

Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind 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 – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelbild: © shutterstock.com/Chaikom, Andrei\_Diachenko und Microgen

Satz: Eberl & Koesel Studio, Altusried-Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47025-5

E-Book-ISBN 978-3-446-47221-1

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>XI</b>
<b>TEIL I Grundlagen</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Funktion der Medientechnik</b> .....	<b>3</b>
<b>2 Medientechnische Begriffe</b> .....	<b>7</b>
<b>3 Signale und Pegel</b> .....	<b>13</b>
3.1 Signalbeschreibung im Zeitbereich .....	13
3.2 Signalbeschreibung im Frequenzbereich .....	18
3.3 Die Fouriertransformation und ihre Anwendungen .....	20
3.4 Pegel und ihre Anwendungen .....	24
<b>4 Referenzmodell für offene Kommunikationssysteme</b> .....	<b>33</b>
4.1 Anforderungen .....	33
4.2 Schichten und Protokolle .....	34
4.3 Verbindungsstrukturen .....	39
<b>5 Prinzip der Signalübertragung</b> .....	<b>41</b>
5.1 Grundlagen .....	41
5.2 Übertragungskanal und Störabstand .....	43
5.3 Tore und ihre Parameter .....	47

<b>6</b>	<b>Speicherung von Signalen</b> .....	<b>53</b>
6.1	Einführung .....	53
6.2	Magnetische Signalspeicherung .....	55
6.3	Optische Signalspeicherung .....	57
6.4	Elektrische Signalspeicherung .....	63
<b>7</b>	<b>Qualitätsparameter der Signalübertragung</b> .....	<b>67</b>
7.1	Amplitudengang .....	67
7.2	Verzerrungen .....	69
7.3	Störabstand .....	72
7.4	Abtastung .....	78
7.5	Anpassung .....	83
<b>8</b>	<b>Merkmale der Signalübertragung</b> .....	<b>87</b>
8.1	Übertragungswege .....	87
8.1.1	Einführung .....	87
8.1.2	Leitungsgebundene Übertragung mit elektrischen Leitungen .....	88
8.1.3	Leitungsgebundene Übertragung mit optischen Leitungen .....	93
8.1.4	Funkübertragung .....	99
8.1.5	Portable Signalspeicher .....	104
8.2	Betriebsarten .....	105
8.3	Nutzungsverfahren .....	107
<b>9</b>	<b>Funktionseinheiten in Übertragungssystemen</b> .....	<b>111</b>
9.1	Einführung .....	111
9.2	Verstärker .....	112
9.3	Sender .....	113
9.4	Empfänger .....	114
9.5	Filter und Weichen .....	114
9.6	Umsetzer .....	116
9.6.1	Einführung .....	116
9.6.2	Analog-Digital-Umsetzer .....	117
9.6.3	Digital-Analog-Umsetzer .....	119

9.6.4	Elektro-optische und opto-elektrische Umsetzer .....	119
9.6.5	Sonstige Umsetzer .....	121
9.7	Netzwerkkomponenten .....	122
<b>10</b>	<b>Schnittstellen und Protokolle .....</b>	<b>127</b>
10.1	Grundlagen .....	127
10.2	Hardware-Schnittstellen .....	130
10.3	Software-Schnittstellen .....	134
10.4	Protokolle .....	135
<b>11</b>	<b>Standardisierung .....</b>	<b>139</b>
11.1	Standards und ihre Aspekte .....	139
11.2	Varianten der Standards .....	140
<b>12</b>	<b>Netze .....</b>	<b>143</b>
12.1	Einführung .....	143
12.2	Begriffe .....	145
12.3	Betriebsvarianten .....	147
12.4	Kriterien bei Netzen .....	148
12.5	Strukturen von Leitungsnetzen .....	149
12.6	Hybride Leitungsnetze .....	152
12.7	Passive optische Netze (PON) .....	154
12.8	Struktur von Funknetzen .....	156
<b>13</b>	<b>Verfahren der Medientechnik .....</b>	<b>159</b>
13.1	Übertragung .....	159
13.2	Codierung/Decodierung .....	160
13.2.1	Grundlagen .....	160
13.2.2	Leitungscodierung .....	161
13.2.3	Quellencodierung .....	164
13.2.4	Kanalcodierung .....	174
13.3	Modulation .....	179
13.3.1	Grundlagen .....	179
13.3.2	Analoges Modulationssignal/sinusförmiges Trägersignal .....	181

13.3.3	Analoges Modulationssignal/pulsförmiges Trägersignal . . . . .	189
13.3.4	Digitale Modulation im Basisband . . . . .	191
13.3.5	Digitales Modulationssignal/sinusförmiges Trägersignal . . . . .	195
13.4	Multiplexierung/Demultiplexierung . . . . .	218
13.5	Einzelzugriff/Vielfachzugriff . . . . .	225
13.6	Mehr-Antennen-Systeme . . . . .	229
13.7	Zugangsberechtigung . . . . .	232
<b>14</b>	<b>Audiovision in der Medientechnik . . . . .</b>	<b>239</b>
<b>15</b>	<b>Daten in der Medientechnik . . . . .</b>	<b>243</b>
<b>TEIL II</b>	<b>Anwendungen . . . . .</b>	<b>247</b>
<b>16</b>	<b>Hörfunk (Radio) . . . . .</b>	<b>249</b>
16.1	Einführung . . . . .	249
16.2	Analoger terrestrischer Hörfunk UKW . . . . .	250
16.3	Digitaler terrestrischer Hörfunk DAB . . . . .	258
16.4	Hörfunk im Kabel . . . . .	267
16.5	Hörfunk über Satellit . . . . .	269
16.6	Internetradio . . . . .	270
16.7	Podcast . . . . .	271
16.8	Audiotheken . . . . .	272
<b>17</b>	<b>Fernsehen (TV) . . . . .</b>	<b>275</b>
17.1	Grundlagen digitaler Fernsehsysteme . . . . .	275
17.2	DVB-Übertragungsstandard für Satellit, Kabel und Terrestrik . . . . .	292
17.3	IPTV . . . . .	305
17.4	Ultra-HDTV (UHD) . . . . .	308
17.5	HbbTV [hybrid broadcast broadband television] . . . . .	312
17.6	DVB-I (Digital Video Broadcasting-Internet) . . . . .	316
<b>18</b>	<b>Mobilfunk . . . . .</b>	<b>319</b>
<b>19</b>	<b>Internet . . . . .</b>	<b>331</b>

<b>20</b>	<b>Lokale Datenkommunikation</b>	<b>345</b>
20.1	Leitungsgebundene Netze	345
20.2	Funkgestützte Netze	351
<b>21</b>	<b>Triple Play</b>	<b>359</b>
21.1	Triple Play über das Breitbandkabelnetz	359
21.2	Triple Play über das Telefonnetz	361
21.3	Triple Play über Satellit	365
21.4	Auswahlkriterien	367
21.5	Quadruple Play	367
<b>22</b>	<b>Telefonie</b>	<b>369</b>
22.1	Festnetz-Telefonie	369
22.2	Mobilfunk-Telefonie	373
22.3	Kabel-Telefonie	374
22.4	Satelliten-Telefonie	374
<b>23</b>	<b>Smart Home</b>	<b>377</b>
23.1	Aufgabenstellung von Smart Home	377
23.2	Infrastruktur der Heimnetze	379
23.3	Leistungsmerkmale von Heimnetzen	381
23.4	Realisierung von Smart Home	383
<b>24</b>	<b>Elektronische Dienste</b>	<b>385</b>
24.1	Einführung	385
24.2	Elektronischer Geldverkehr	385
24.3	Elektronische Verwaltung	389
24.4	Elektronisches Gesundheitswesen	391
<b>25</b>	<b>Perspektiven</b>	<b>395</b>
	<b>Literatur</b>	<b>397</b>
	<b>Index</b>	<b>399</b>



# Vorwort

Medien dienen 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. Es handelt sich dabei entweder um den Empfang oder Austausch von Informationen oder um Unterhaltung.

In diesem Buch werden Kenntnisse über die unterschiedlichen Aspekte der Medientechnik anschaulich vermittelt. Am Anfang stehen die informationstechnischen 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 spezifische 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. Dazu gehören unter anderem Radio, Fernsehen, Mobilfunk, Internet, lokale Datenkommunikation und Telefonie. Bei jeder dieser Varianten ist die Orientierung an den Nutzer der jeweiligen Kommunikation gegeben.

Neben den vorstehend aufgezeigten Komplexen werden auch die Themen Schnittstellen, Protokolle, Standardisierung, Triple Play und Smart Home in vergleichbarer Weise behandelt, was ein abgerundetes Bild des Themenbereichs bewirkt.

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

April 2022

*Ulrich Freyer und Michael Silverberg*



# TEIL I

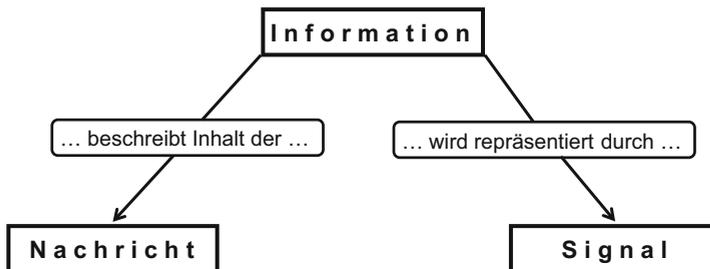
## Grundlagen



# 1

## Funktion der Medientechnik

Bei der Medientechnik handelt es sich um die Nutzung elektrischer, optischer oder magnetischer Größen für die Kommunikation von Informationen. Diese beschreiben einerseits den Inhalt der damit verbundenen Nachrichten, während sie andererseits durch physikalische Größen als Signale repräsentiert werden, die somit das Transportmittel für die Informationen darstellen (Bild 1.1). Als Beispiel sei eine gesprochene Information betrachtet. Bei ihr liegt eine Nachricht vor, die durch ein Schalldrucksignal repräsentiert wird.



**Bild 1.1**  
Grundbegriffe der Medientechnik



Informationen beschreiben den Inhalt von Nachrichten und werden durch physikalische Größen als Signale repräsentiert. Bei diesen kann Zeitabhängigkeit oder Frequenzabhängigkeit gegeben sein.

Der Austausch von Informationen zwischen zwei oder mehr Stellen wird als Kommunikation bezeichnet. Dabei muss für jedes Signal der Informationsgehalt bekannt sein, um die Eindeutigkeit der Kommunikation zu gewährleisten. Bei einer gesprochenen Information ist es deshalb beispielsweise erforderlich, dass die zuhörende Person die verwendete Sprache beherrscht.



Kommunikation ist der Austausch von Informationen mithilfe von Signalen.

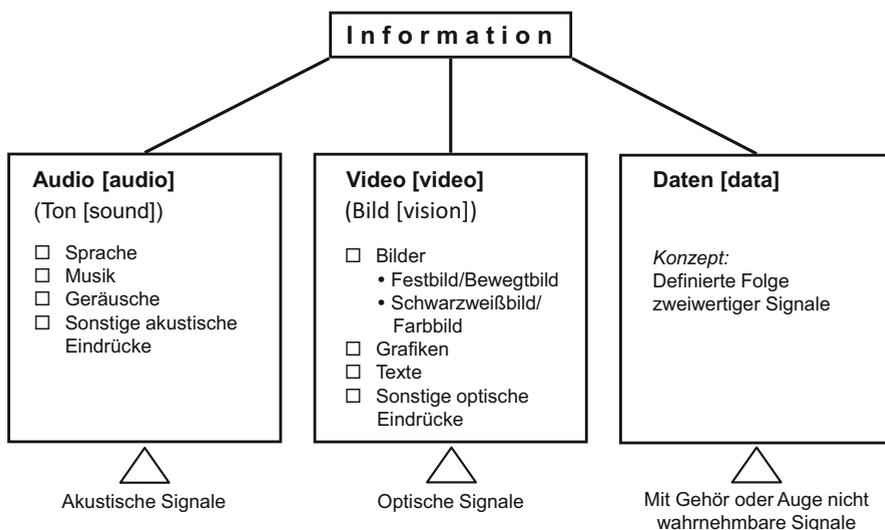
In den meisten Fällen sollen Informationen als Nachrichten über größere bis sehr große Entfernungen übertragen werden. Daraus erklärt sich die Bezeichnung Telekommunikation, in Kurzform TK oder auch Tk. Die Vorsilbe „tele“ stammt aus der griechischen Sprache und steht für das Wort „fern“.



Telekommunikation = Kommunikation über beliebige Entfernungen.

Bei den Informationen sind bezogen auf die Wahrnehmbarkeit Audio, Video und Daten zu unterscheiden (Bild 1.2):

- **Audio** [audio], auch 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.
- **Video** [video], auch als Bild [vision] bezeichnet, umfasst alle mit dem menschlichen Auge wahrnehmbaren Informationen, also optische Signale. Dazu gehören Bilder, Grafiken, Texte und alle sonstigen optischen Eindrücke. Die Bilder können feststehend oder bewegt sein, wobei schwarzweiße oder farbige Darstellung möglich ist.
- **Daten** [data] umfasst alle Informationen, die weder mit dem menschlichen Gehör, noch mit dem menschlichen Auge unmittelbar wahrnehmbar sind.



**Bild 1.2** Arten der Information

Bei jeder medientechnischen 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 deshalb folgende Konstellationen unterscheiden:

- **Mensch-Mensch-Kommunikation**

Informationsübertragung von Mensch zu Mensch mithilfe einer technischen Einrichtung.

Beispiel: Telefon

- **Mensch-Maschine-Kommunikation**

Eingabe von Informationen durch einen Menschen in eine technische Einrichtung und Ausgabe der Informationen durch eine technische Einrichtung.

Beispiel: Recherche im Internet

- **Maschine-Mensch-Kommunikation**

Eingabe von Informationen durch eine technische Einrichtung und Ausgabe der Informationen an einen Menschen durch eine technische Einrichtung.

Beispiel: elektronischer Programmführer

- **Maschine-Maschine-Kommunikation**

Informationsübertragung zwischen technischen Einrichtungen ohne Beteiligung von Menschen.

Beispiel: Computernetze

Die vorstehend aufgezeigte Kommunikation erfolgt entweder **unidirektional** (also von einer Stelle zu einer oder mehreren anderen Stellen) oder **bidirektional** (also gleichzeitig oder wechselweise in beiden Richtungen zwischen zwei Stellen).

Medientechnik bedeutet in der Praxis die Übertragung, Speicherung und gegebenenfalls Verarbeitung von Signalen. Dabei spielten bisher **elektrische Signale** die wichtigste Rolle, inzwischen hat allerdings die Bedeutung **optischer Signale** signifikant zugenommen.



# 2

## Medientechnische Begriffe

In diesem Kapitel werden grundlegende Begriffe der Medientechnik behandelt.

**Übertragung** [transmission] bedeutet einen Transportvorgang für Signale von einer Stelle a zu einer Stelle b, was als Punkt-zu-Punkt-Verbindung [point to point connection] bezeichnet wird. Dabei spielt die Entfernung zwischen den betroffenen Stellen, also die Länge des Übertragungsweges, keine Rolle.



Signalübertragung = Transport von Signalen zwischen beliebig voneinander entfernten Stellen

Der Anfang jeder Übertragung ist durch eine Quelle [source] gekennzeichnet, die das zu übertragende Signal bereitstellt. Nach der Übertragung erfolgt der Abschluss durch eine Senke [sink], die das übertragene Signal für weitere Maßnahmen bereitstellt.



Die Übertragung von Signalen erfolgt stets von einer Quelle zu einer Senke.

Für die Übertragung von Signalen bedarf es stets einer technischen Einrichtung mit je einem Eingang und Ausgang für das Signal und definierten Leistungsmerkmalen. Sie wird als Übertragungssystem bezeichnet und kann beliebige Komplexität aufweisen.



Übertragungssysteme realisieren den Transport von Signalen.

Die **Speicherung** [storage] von Signalen bedeutet deren Zwischenlagerung mit dem Ziel einer späteren Übertragung oder Verarbeitung. 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 der beiden Stellen

a und b besteht bei Speicherung nicht mehr. Diese zeitliche Entkopplung kennzeichnet den Unterschied zwischen Online-Betrieb und 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 zwei Schritte zu unterscheiden:

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

Unabhängig von der verwendeten Technologie gilt bei jeder Speicherung, dass dadurch keine Veränderung der gespeicherten Signale erfolgt.

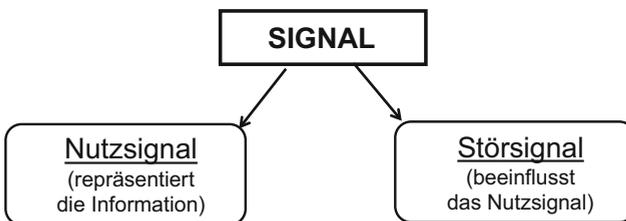


Signalspeicherung = Zwischenlagerung von Signalen und ermöglicht deren zeitversetzte Übertragung und Verarbeitung.



Signalspeicherung ermöglicht den Übergang von online zu offline.

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



**Bild 2.1**  
Signale



Das Verhältnis zwischen Nutzsingale und Störsingale darf vorgegebene Werte nicht überschreiten.

Einen wichtigen Teil stellt in der Medientechnik die durch Signalübertragung bewirkte Kommunikation dar. Die daran beteiligten Personen werden üblicherweise als **Nutzer** [user] oder Teilnehmer [Tln] bezeichnet, während für die zur Durchführung der Kommunikation erforderlichen technischen Einrichtungen der Begriff **Endgeräte** [terminal] gilt.



Endgeräte ermöglichen die Durchführung der Kommunikation.

Bei der Übertragung von Signalen ist eine Bewertung der Qualität nur dann möglich, wenn die gesamte Übertragungskette von der Einspeisung des Signals bis zu deren Wiedergabe im verwendeten Endgerät berücksichtigt wird. Es gilt dafür die Bezeichnung Ende-zu-Ende-Betrachtung.



Für die Bewertung der Übertragungsqualität ist stets eine Ende-zu-Ende-Betrachtung erforderlich.

Die meisten Kommunikationssysteme sind für mehrere Nutzer bzw. Maschinen ausgelegt. Damit ein Kommunikationssystem diesen gleichzeitig zur Verfügung stehen kann, bedarf es entsprechender technischer Einrichtungen, um die gewünschte Kommunikation zu ermöglichen. Dafür gilt die Bezeichnung Netz [network].



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

In Netzen sind folgende Funktionsgruppen unterscheidbar:

- Übertragungswege,
- Übertragungseinrichtungen,
- Verteileinrichtungen/Vermittlungsstellen,
- 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] mithilfe elektromagnetischer Wellen erfolgt.



**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

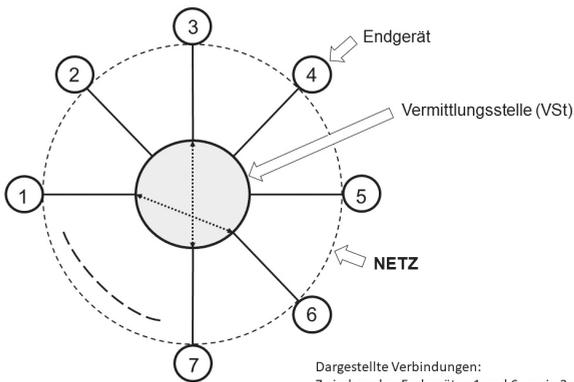
kompensieren. Typische Effekte sind dabei die Dämpfung des Signals und das Auftreten von Verzerrungen.

Verteileinrichtungen und Vermittlungsstellen 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.



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 Endgeräten von Nutzern vorgesehen. Dafür werden im Netz **Vermittlungsstellen** benötigt, die als Netzknoten [network nod] den gezielten Aufbau der gewünschten Verbindung sicherstellen (Bild 2.2).



**Bild 2.2**  
Vermittlung



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

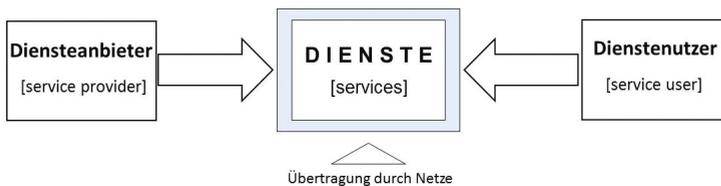
Der Sinn und Zweck von Netzen ist deren Nutzung für die Kommunikation, also dem Austausch von Informationen. Dafür gibt es vielfältige Arten, jeweils gekennzeichnet durch bestimmte Eigenschaften. Es gilt als Oberbegriff die Bezeichnung **Dienste** [service] mit folgender Definition:



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 Diensten sind die Erbringer von Diensten als Diensteanbieter [service provider] und die Nutzer [user] als Anwender von Diensten zu unterscheiden (Bild 2.3).



**Bild 2.3** Dienste

Eine für den Nutzer wichtige Eigenschaft von Diensten stellt die Zugriffsmöglichkeit dar. Der Zugang zu Diensten kann kostenlos oder entgeltspflichtig, 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] → entgeltspflichtig

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.



**Verteildienst** („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 meist in 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

Wird eine Anwendung der Medientechnik über ein Netz oder sonstige technische Funktionseinheit bewirkt, dann gilt die Bezeichnung Online(-Betrieb). Erfolgt dagegen deren Nutzung mithilfe einer autarken technischen Einrichtung, dann liegt Offline(-Betrieb) vor.



Online-Anwendungen erfordern stets externe Einrichtungen, während Offline-Anwendungen autark arbeiten.

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  $P_{\text{opt}}$ , weil es keine optische Spannung gibt.

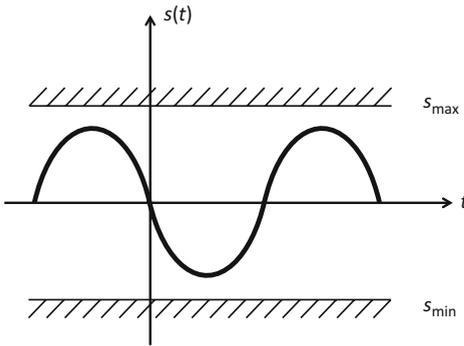
### ■ 3.1 Signalbeschreibung im Zeitbereich

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

Bei einer Zeitfunktion gilt stets folgende Form der Darstellung:

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

In der Signaltheorie wird mit der Darstellung  $s(t)$  gearbeitet. Soll explizit ausgedrückt werden, dass es sich um die Darstellung eine Spannung handelt, verwendet man  $u(t)$ . 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 (reelle Zahl) auftreten.



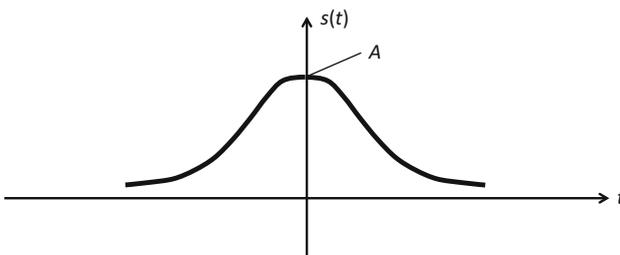
**Bild 3.1**  
Zeitfunktion mit Wertebereich

Bild 3.1 zeigt eine Zeitfunktion, bei der für jede Zeit  $t$  ein Signalwert existiert. Eine solche Funktion wird als zeitkontinuierlich und wertekontinuierlich bezeichnet. Im Folgenden sollen weitere wichtige Signale dieser Klasse (zeitkontinuierlich und wertekontinuierlich) dargestellt werden. Diese Signale stellen wichtige Kurvenverläufe zur Beschreibung von analoger und digitaler Signalverarbeitung dar. Bezüglich ihrer Charakteristik in zeitlicher Richtung können sie in die folgenden Klassen unterteilt werden:

- zeitlich begrenzt,
- zeitlich unbegrenzt und aperiodisch,
- zeitlich unbegrenzt und periodisch.

Der **Gauß-Impuls** stellt ein zeitkontinuierliches und wertekontinuierliches Signal dar. Der Verlauf ist in zeitlicher Richtung unbegrenzt und aperiodisch (Bild 3.2). Der Gauß-Impuls wird u. a. zur mathematischen Beschreibung der Intensitätsverteilungen in der Optik verwendet. Die mathematische Darstellung des Zeitsignals lautet:

$$s(t) = A \cdot e^{-\alpha \cdot t^2} \quad (3.1)$$



**Bild 3.2**  
Gauß-Impuls

Sinus- und cosinusförmige Schwingungen stellen zeitkontinuierliche und wertekontinuierliche Signalverläufe dar. Die Verläufe sind in zeitlicher Richtung unbegrenzt und periodisch (Bild 3.3). Ihre Kurvenformen sind gleich, jedoch liegt eine Phasenverschiebung von 90 Grad vor. Diese Signalformen werden zur mathematischen Beschreibung von Modulation und Demodulation verwendet. Die mathematische Darstellung des Zeitsignals lautet für das **Sinus-Signal**:

$$s(t) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t - \varphi) \quad (3.2)$$

Mit der Euler-Relation:

$$e^{jx} = \cos(x) + j \cdot \sin(x) \quad (3.3)$$

kann das Sinus-Signal wie folgt dargestellt werden:

$$s(t) = -\frac{j}{2} \cdot A \cdot e^{j2\pi \cdot f_0 \cdot t - \varphi} + \frac{j}{2} \cdot A \cdot e^{-j2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi} \quad (3.4)$$

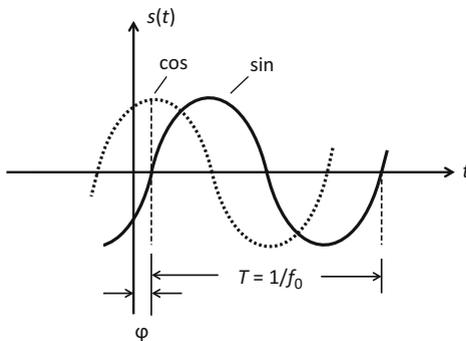
Diese Darstellung hat den Vorteil, dass im Zusammenhang mit der Fouriertransformation das Spektrum relativ einfach berechnet werden kann.

Für das **Cosinus-Signal** lautet die Darstellung im Zeitbereich:

$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t - \varphi) \quad (3.5)$$

Mit Euler folgt:

$$s(t) = \frac{1}{2} \cdot A \cdot e^{j2\pi \cdot f_0 \cdot t - \varphi} + \frac{1}{2} \cdot A \cdot e^{-j2\pi \cdot f_0 \cdot t + \varphi} \quad (3.6)$$

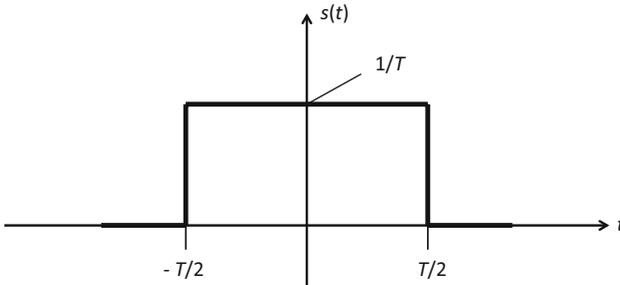


**Bild 3.3**

Sinus- und cosinusförmige Signalverläufe

Der Rechteck-Impuls ist ebenfalls zeitkontinuierlich und wertekontinuierlich. Der Verlauf ist in zeitlicher Richtung begrenzt (Bild 3.4). Der Rechteck-Impuls stellt eine wichtige Signalform zur Beschreibung von Sample & Hold-Vorgängen (z.B. beim D/A-Wandler) dar. Die mathematische Definition des Rechteck-Impulses ist entlang der Zeitachse abschnittsweise definiert:

$$\square_T(t) = \begin{cases} \frac{1}{T}; & -\frac{1}{2T} < t < \frac{1}{2T} \\ 0; & |t| > \frac{1}{2T} \\ \frac{1}{2T}; & t = \pm \frac{1}{2T} \end{cases} \quad (3.7)$$

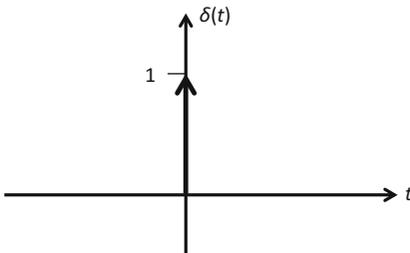


**Bild 3.4**  
Rechteckimpuls

Der **Dirac-Impuls** ist keine Funktion im eigentlichen Sinne, sondern eine Singularität bzw. Distribution. Die mathematische Definition der Amplitude erfolgt über einen Grenzwertübergang. Dazu kann zum Beispiel der Rechteck-Impuls herangezogen werden:

$$\delta(t) = \lim_{T \rightarrow 0} \square_T(t) \quad (3.8)$$

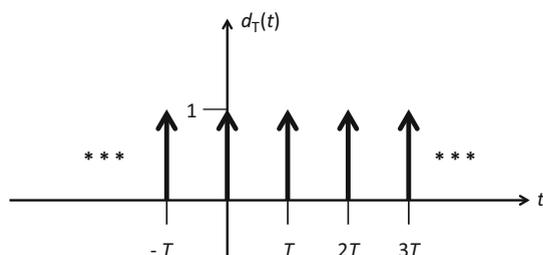
Der Dirac-Impuls gehört zur Klasse der zeitdiskreten Signale. Wegen der unendlich hohen Amplitude kann ein Dirac-Impuls in technischen Systemen nicht realisiert werden. Er eignet sich aber gut zur systemtheoretischen Beschreibung der idealen Abtastung, da mit ihm ein singulärer Amplitudenwert herausgefiltert werden kann (Siebeigenschaft). Der Pfeil in Bild 3.5 soll andeuten, dass die Amplitude unendlich ist. Die 1 auf der  $y$ -Achse stellt den Gewichtungsfaktor dar, in diesem Fall mit einer 1.



**Bild 3.5**  
Dirac-Impuls

Der **Dirac-Kamm** stellt die Aneinanderreihung von unendlich vielen Dirac-Impulsen mit einem konstanten Abstand in zeitlicher Richtung dar (Bild 3.6). Seine Darstellung im Zeitbereich lautet:

$$d_T(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i \cdot T) \quad (3.9)$$



**Bild 3.6**  
Dirac-Kamm

Der Dirac-Kamm wird zur Beschreibung der idealen Abtastung benötigt. Multipliziert man im Zeitbereich ein zeitkontinuierliches Signal mit einem Dirac-Kamm, so wird das kontinuierliche Signal in zeitlicher Richtung diskretisiert. Dieses ist die mathematische Darstellung des Abtasttheorems im Zeitbereich.

Bezüglich der Repräsentation des Signalverlaufes entlang der  $t$ -Achse können Zeitfunktionen in zeitkontinuierlich und zeitdiskret eingeteilt werden. Bei zeitkontinuierlichen Signalverläufen existiert zu jedem Zeitpunkt  $t$  ein Signalwert, bei zeitdiskreten Signalverläufen nur an definierten Stellen auf der  $t$ -Achse.

In Richtung des Signalwertes kann die Unterteilung in wertekontinuierlich und wertediskret getroffen werden. Bei wertekontinuierlichen Signalen kann jeder reelle Wert (im Bereich minimal zu maximal) auftreten. Bei wertediskreten Signalen können nur gewisse Amplituden eingenommen werden.

Auf diese Weise kann die folgende Klasseneinteilung vorgenommen werden:

- zeitkontinuierlich/wertekontinuierlich
  - Gauß-Impuls,
  - Rechteckimpuls,
  - Sinus/Cosinus-Schwingung;
- zeitkontinuierlich/wertediskret
  - Ausgangssignal eines D/A-Wandlers (Sample & Hold);
- zeitdiskret/wertekontinuierlich
  - Signal nach der Abtastung in einem A/D-Wandler,
  - Dirac-Impuls,
  - Dirac-Kamm;

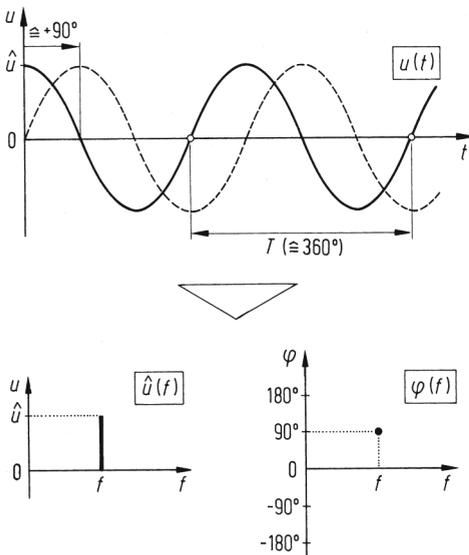
- zeitdiskret/wertediskret
  - Signal nach Abtastung und Quantisierung in einem A/D-Wandler.

Die bis hierhin dargestellten Signale lassen sich zusätzlich noch in Energiesignale und in Leistungssignale unterteilen. Sinus, Cosinus und der Dirac-Kamm sind Leistungssignale, da sie an einem ohmschen Widerstand eine konstante Leistung umsetzen. Die anderen dargestellten Signale sind Energiesignale, da sie eine endliche Energie erzeugen.

## ■ 3.2 Signalbeschreibung im Frequenzbereich

Während bei der Zeitfunktion Signalwert und Zeit einander zugeordnet sind, ist es bei der **Frequenzfunktion** (Spektrum) 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 3.7). Da bei sinusförmiger Spannung zwischen dem Scheitelwert (Amplitude) und dem Effektivwert eine feste Verkopplung besteht, unterscheiden sich die Ergebnisse nur durch einen konstanten Faktor.

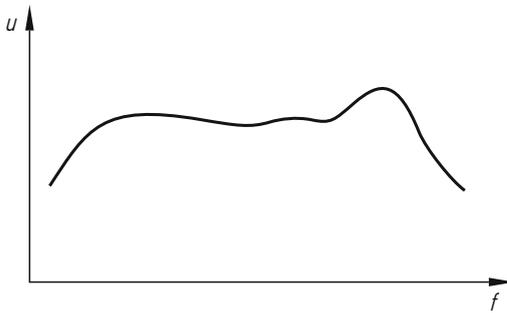


**Bild 3.7**  
Übergang zwischen Zeit- und  
Frequenzfunktion

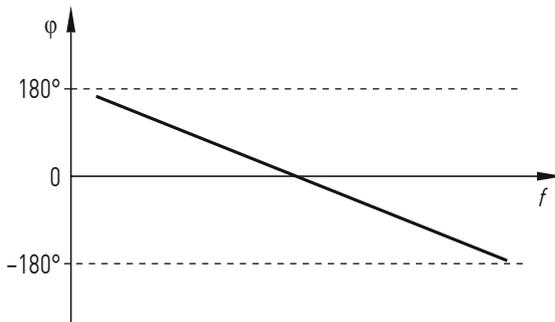
Bei der Frequenzabhängigkeit des Phasenwinkels ist stets ein Referenzwert erforderlich. Dabei stellt die Größe des Phasenwinkels ein Maß für die Signallaufzeit dar.

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

- **Amplituden-Frequenzgang** [amplitude frequency response] (auch als Amplitudengang bezeichnet). Die Amplitude wird in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt (Bild 3.8).
- **Phasen-Frequenzgang** [phase frequency response] (auch als Phasengang bezeichnet). Die Phase wird in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt (Bild 3.9).



**Bild 3.8**  
Amplituden-Frequenzgang

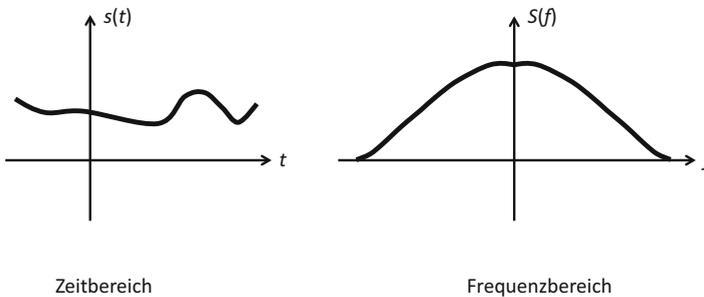


**Bild 3.9**  
Phasen-Frequenzgang

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.

### ■ 3.3 Die Fouriertransformation und ihre Anwendungen

Eine (reelle) Signalamplitude kann in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt werden. Das ist dann eine Beschreibung im **Zeitbereich**. Daneben kann das gleiche Signal auch mit einer konjugiert komplexen Amplitude in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt werden. Das ist dann eine Beschreibung im **Frequenzbereich**. Beide Darstellungen sind gleichwertig und „stellen die gleiche Münze von der jeweils anderen Seite dar“ (Bild 3.10). In Abschnitt 3.2 wurden diese Zusammenhänge einführend beleuchtet. Manchmal ist es einfacher, ein Systemverhalten im Zeitbereich darzustellen und manchmal ist die Beschreibung im Frequenzbereich leichter. Daher müssen wir beide Darstellungen verwenden.



**Bild 3.10**  
Darstellung von  
Zeitbereich und  
Frequenzbereich

Die **Fouriertransformation** FT überführt ein Signal vom Zeitbereich in den Frequenzbereich. Sie bildet also das zugehörige Spektrum  $S(f)$  des Zeitsignals  $s(t)$ .

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-j2\pi f t} \cdot dt \quad (3.10)$$

Die **Fourierücktransformation** (inverse Fouriertransformation) IFT überführt ein Spektrum in das dazu korrespondierende Zeitsignal.

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) \cdot e^{j2\pi f t} \cdot df \quad (3.11)$$

In Formel 3.10 und Formel 3.11 treten negative Frequenzen auf, die es in realen Systemen nicht gibt. Dieses liegt daran, dass reelle Zeitfunktionen angenommen werden. Das Spektrum  $S(f)$  ist daher konjugiert komplex. Beide Transformationen sind bijektiv. Zu einem bestimmten Zeitsignal  $s(t)$  gibt es nur ein Spektrum  $S(f)$  und umgekehrt! Das bedeutet:  **$s(t)$  korrespondiert mit  $S(f)$** . Der Korrespondenzpfeil in Formel 3.12 stellt diesen Sachverhalt in kompakter Form dar.

$$s(t) \Leftrightarrow S(f) \quad (3.12)$$

Oftmals muss das Fourierspektrum nicht explizit berechnet werden, sondern kann auf bekannte Spektren zurückgeführt werden. Hierzu stellen die Theoreme der Fouriertransformation eine wertvolle Hilfe dar. Es sind hier nur die Theoreme aufgelistet, die in diesem Zusammenhang gebraucht werden. Alle Theoreme sind mathematisch relativ einfach beweisbar.

### Linearität

Wenn ein Signal im Zeitbereich als gewichtete Summe von Einzelsignalen dargestellt werden kann, dann ist das Spektrum dieses Signals ebenfalls die gewichtete Summe der Spektren der Einzelsignale.

$$\sum_{i=1}^n a_i \cdot s_i(t) \cdot \sum_{i=1}^n a_i \cdot S_i(f) \quad (3.13)$$

### Verschiebung im Zeitbereich

Wird ein Zeitsignal auf der  $t$ -Achse verschoben, so entsteht das gleiche Spektrum wie bei dem nicht verschobenen Signal, aber mit der zusätzlichen Multiplikation mit einer komplexen  $e$ -Funktion im Frequenzbereich.

$$s(t-t_0) \Leftrightarrow S(f) \cdot e^{-j2\pi f t_0} \quad (3.14)$$

### Verschiebung im Frequenzbereich

Die Multiplikation eines Zeitsignals mit einer komplexen  $e$ -Funktion wird zur Darstellung von Modulationen benötigt. Sie führt auf eine Verschiebung im Frequenzbereich.

$$s(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t} \Leftrightarrow S(f-f_0) \quad (3.15)$$

### Faltung im Zeitbereich

Mit der Faltung im Zeitbereich kann das Systemverhalten von LTI-Systemen [linear time invariant] im Zeitbereich beschrieben werden. Formel 3.16 stellt die Definition der Faltung von zwei Signalen im Zeitbereich dar.

$$s_1(t) \cdot s_2(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(\tau) \cdot s_2(t-\tau) \cdot d\tau \quad (3.16)$$

Die Faltung im Zeitbereich führt auf eine Multiplikation im Frequenzbereich (Formel 3.17). Dieses Theorem ist besonders bei der Kaskadierung von Teilsystemen vorteilhaft, da im Frequenzbereich nur eine Mehrfachmultiplikation entsteht.

$$s_1(t) \cdot s_2(t) \Leftrightarrow S_1(f) \cdot S_2(f) \quad (3.17)$$

Besitzt ein lineares, zeitinvariantes Übertragungssystem (LTI-System) die Impulsantwort  $h(t)$ , so kann die Ausgangsfunktion  $g(t)$  des Systems als Faltung der Eingangsfunktion  $s(t)$  mit der Impulsantwort bestimmt werden (Formel 3.28). Die Impulsantwort  $h(t)$  ist die Antwort eines LTI-Systems auf einen Dirac-Impuls. Im Frequenzbereich ergibt sich  $G(f)$  als Multiplikation von  $S(f)$  mit  $H(f)$ .

### Faltung im Frequenzbereich

Die Fouriertransformation besitzt Symmetrieeigenschaften. Daher führt eine Faltung im Frequenzbereich auf eine Multiplikation im Zeitbereich (Formel 3.19). Diese Eigenschaft wird bei der Formulierung von endlich steilen Filterflanken bei der Datenübertragung genutzt.

Nachfolgend sind die bisher beschriebenen Signale (im Zeitbereich) mit ihren dazugehörigen Spektren dargestellt.

$$S_1(f) \cdot S_2(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(\tau) \cdot S_2(f - \tau) \cdot d\tau \quad (3.18)$$

$$S_1(f) \cdot S_2(f) \Leftrightarrow s_1(t) \cdot s_2(t) \quad (3.19)$$

### Gauß-Impuls

$$A \cdot e^{-\alpha t^2} \Leftrightarrow A \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \cdot e^{-\frac{\pi^2}{\alpha} f^2} \quad (3.20)$$

### Sinus-Schwingung

$$A \cdot \sin(2\pi \cdot f_0 \cdot t - \varphi) \Leftrightarrow -\frac{j}{2} \cdot A \cdot e^{-j\varphi} \cdot \delta(f - f_0) + \frac{j}{2} \cdot A \cdot e^{j\varphi} \cdot \delta(f + f_0) \quad (3.21)$$

### Cosinus-Schwingung

$$A \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot t - \varphi) \Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot A \cdot e^{-j\varphi} \cdot \delta(f - f_0) + \frac{1}{2} \cdot A \cdot e^{j\varphi} \cdot \delta(f + f_0) \quad (3.22)$$

### Rechteckimpuls

$$\square_T(t) \Leftrightarrow \text{si}\left(2\pi \cdot f \cdot \frac{T}{2}\right) \quad (3.23)$$

### Dirac-Impuls

$$\delta(t) \Leftrightarrow 1 \quad (3.24)$$

### Dirac-Kamm

$$d_T(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta(t - i \cdot T) \Leftrightarrow \frac{1}{T} \cdot D_1\left(\frac{f}{T}\right) = \frac{1}{T} \cdot \sum_{i=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{i}{T}\right) \quad (3.25)$$

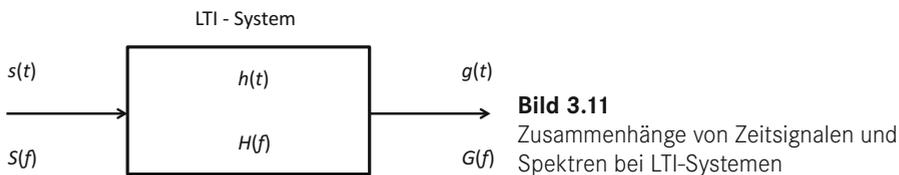
Bild 3.11 zeigt ein lineares, zeitinvariantes Übertragungssystem (LTI-System). Das System besitzt die Impulsantwort  $h(t)$ , das ist die Reaktion eines LTI-Systems auf einen Dirac-Impuls am Eingang. Wird die Impulsantwort  $h(t)$  in den Frequenzbereich transformiert (Fouriertransformation), so entsteht die Übertragungsfunktion  $H(f)$ . Die Übertragungsfunktion ist dabei eine konjugiert komplexe Funktion, da sie mit einem reellen Zeitsignal korrespondiert.  $H(f)$  kann alternativ in zwei reellen Funktionen dargestellt werden:

### Amplituden-Frequenzgang

$$A(f) = |H(f)| \quad (3.26)$$

### Phasen-Frequenzgang

$$\varphi(f) = \arctan \left[ \frac{\operatorname{Im}\{H(f)\}}{\operatorname{Re}\{H(f)\}} \right] \quad (3.27)$$



Die Darstellung des Ausgangssignals im Zeitbereich erfolgt über die Faltung von Eingangssignal (im Zeitbereich) und der Impulsantwort (Formel 3.28). Diese Berechnung ist oft schwierig und zeigt nicht wirklich die Eigenschaften des Systems. Daher arbeitet man in vielen Fällen mit dem Frequenzbereich. Hier entsteht das Spektrum des Ausgangssignals durch Multiplikation des Spektrums des Eingangssignals mit der Übertragungsfunktion (Formel 3.29). Besonders bei der Kaskadierung von Teilsystemen ist diese Berechnung von Vorteil, da sie auf die Multiplikation der Übertragungsfunktionen von Teilsystemen führt.

$$g(t) = s(t) \cdot h(t) \quad (3.28)$$

$$G(f) = S(f) \cdot H(f) \quad (3.29)$$

## ■ 3.4 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  $P_{\text{opt}}$ , 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  $P_{\text{el}}$  verwendet.

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.

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:

$$x_p = \frac{P_a}{P_b} \quad (3.30)$$

Vergleichbar gilt für die Spannung:

$$x_U = \frac{U_a}{U_b} \quad (3.31)$$

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

$$y_p = \lg \frac{P_a}{P_b} \quad (3.32)$$

$$y_U = \lg \frac{U_a}{U_b} \quad (3.33)$$

Als Formelzeichen für den Pegel wurde  $L$  festgelegt. 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:

$$1 \text{ dB} = \frac{1}{10} \text{ B} \Rightarrow 1 \text{ B} = 10 \text{ dB} \quad (3.34)$$

Damit ergibt sich für den Leistungspegel:

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P_a}{P_b} \text{ dB} \quad (3.35)$$

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

$$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P_a}{P_b} \text{ dB} = 10 \cdot \lg \frac{\frac{U_a^2}{R_a}}{\frac{U_b^2}{R_b}} \text{ dB} \quad (3.36)$$

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

$$R_a = R_b = R \quad (3.37)$$

Daraus folgt für den Spannungspegel:

$$L_U = 10 \cdot \lg \frac{U_a^2}{U_b^2} \text{ dB} = 10 \cdot 2 \cdot \lg \frac{U_a}{U_b} \text{ dB} \quad (3.38)$$

$$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U_a}{U_b} \quad (3.39)$$

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

$$y = \lg x \Leftrightarrow x = 10^y \quad (3.40)$$

Daraus folgt auf die Leistungen bezogen:

$$\frac{P_a}{P_b} = 10^{\frac{L_p}{10 \text{ dB}}} \quad (3.41)$$

Bezogen auf die Spannungen ergibt sich:

$$\frac{U_a}{U_b} = 10^{\frac{L_{\text{U}}}{20 \text{ dB}}} \quad (3.42)$$

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)

$$L_{\text{P}(1/2)} = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ dB} \quad (3.43)$$

Bezug auf den Eingang (Index 1)

$$L_{\text{P}(2/1)} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB} \quad (3.44)$$

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. 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:

### Verstärkung

$$P_2 > P_1 \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} > 1 \Rightarrow \lg \frac{P_2}{P_1} > 0 \Rightarrow L_{\text{P}} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} > 0 \quad (3.45)$$

### Dämpfung

$$P_2 < P_1 \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} < 1 \Rightarrow \lg \frac{P_2}{P_1} < 0 \Rightarrow L_{\text{P}} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} < 0 \quad (3.46)$$

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 Wir-

kungsrichtung 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.

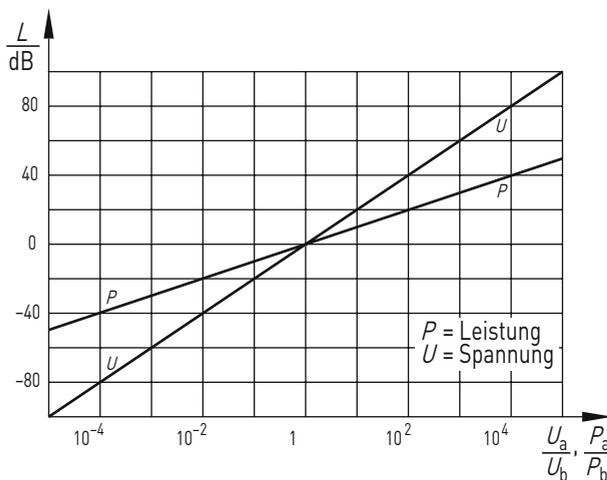
Das lineare Verhältnis der Leistungswerte bzw. Spannungswerte wird als **Verstärkungsfaktor** oder **Dämpfungsfaktor** bezeichnet.

In Tabelle 3.1 sind die möglichen Varianten der Faktoren und Pegel zusammengestellt.

**Tabelle 3.1** Faktoren und Pegel für Leistung und Spannung

$P_2 > P_1$	Leistungs- Verstärkungsfaktor	$V_P = \frac{P_2}{P_1}$	Leistungs- Verstärkungspegel	$L_{P(V)} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1}$ dB
$U_2 > U_1$	Spannungs- Verstärkungsfaktor	$V_U = \frac{U_2}{U_1}$	Spannungs- Verstärkungspegel	$L_{U(V)} = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1}$ dB
$P_2 < P_1$	Leistungs- Dämpfungsfaktor	$D_P = \frac{P_2}{P_1}$	Leistungs- Dämpfungspegel	$L_{P(A)} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1}$ dB
$U_2 < U_1$	Spannungs- Dämpfungsfaktor	$D_U = \frac{U_2}{U_1}$	Spannungs- Dämpfungspegel	$L_{U(A)} = 20 \cdot \lg \frac{U_2}{U_1}$ 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 ge-

geben. Bezogen auf den Widerstand  $R_1$  am Eingang und den Widerstand  $R_2$  am Ausgang lässt sich folgende Abhängigkeit ermitteln:

$$L_p = L_U + 10 \cdot \lg \frac{R_2}{R_1} \text{ dB} \quad (3.47)$$

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:

$$(L_p)_{\text{abs}} = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (3.48)$$

Der absolute Spannungspegel weist folgende Form auf:

$$(L_U)_{\text{abs}} = 20 \cdot \lg \frac{U}{U_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (3.49)$$

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  $\mu\text{V}$ 
  - genormte Angabe: dB( $\mu\text{V}$ ),
  - häufig verwendete Angabe: dB $\mu\text{V}$ ;
- absoluter Spannungspegel, bezogen auf 1 V
  - genormte Angabe: dB(V),
  - häufig verwendete Angabe: dBV.

In Tabelle 3.2 ist eine Auswahl für die Nachrichtentechnik wichtiger absoluter Pegel und ihre Entlogarithmierung zusammengestellt.

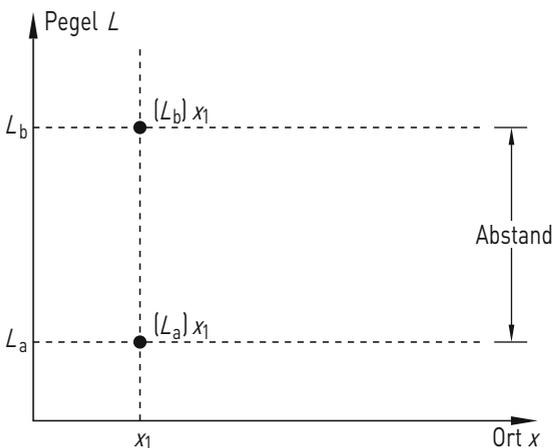
**Tabelle 3.2** Berechnung absoluter Pegel

Art des Pegels (absoluter Bezugswert)	Berechnung des Pegels	Berechnung des Wertes
Leistungspegel 1 mW	$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ mW}} \text{ dBm}$	$P = 10^{\frac{L_p}{10 \text{ dBm}}} \text{ mW}$
Leistungspegel 1 W	$L_p = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ W}} \text{ dBW}$	$P = 10^{\frac{L_p}{10 \text{ dBW}}} \text{ W}$
Spannungspegel 1 $\mu\text{V}$	$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U}{1 \mu\text{V}} \text{ dB}\mu\text{V}$	$U = 10^{\frac{L_U}{20 \text{ dB}\mu\text{V}}} \mu\text{V}$
Spannungspegel 1 V	$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U}{1 \text{ V}} \text{ dBV}$	$U = 10^{\frac{L_U}{20 \text{ dBV}}} \text{ V}$
Feldstärkepegel 1 $\mu\text{V/m}$	$L_E = 20 \cdot \lg \frac{E}{1 \mu\text{V/m}} \text{ dB}\mu\text{V/m}$	$E = 10^{\frac{L_E}{20 \text{ dB}\mu\text{V/m}}} \mu\text{V/m}$

Mithilfe 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.

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“