

Ulrich Freyer

# Nachrichten- Übertragungstechnik

Eine Einführung für die Informations-,  
Kommunikations- und Medientechnik



8., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER



Freyer  
**Nachrichten-Übertragungstechnik**



**Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!**

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

plus-j9ppg-azptd

**[plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de)**



**Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Der Hanser Computerbuch-Newsletter informiert Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der IT. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

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



Ulrich Freyer

# **Nachrichten-Übertragungstechnik**

Eine Einführung für die Informations-,  
Kommunikations- und Medientechnik

8., vollständig überarbeitete Auflage

HANSER

Über den Autor:

Ulrich Freyer, Analyst für Medientechnik

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter.



Print-ISBN: 978-3-446-47584-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-47889-3

Alle in diesem Werk enthaltenen Informationen, Verfahren und Darstellungen wurden zum Zeitpunkt der Veröffentlichung nach bestem Wissen zusammengestellt. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Werk enthaltenen Informationen für Autor:innen, Herausgeber:innen und Verlag mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor:innen, Herausgeber:innen 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:innen, Herausgeber:innen 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 also 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.

Die endgültige Entscheidung über die Eignung der Informationen für die vorgesehene Verwendung in einer bestimmten Anwendung liegt in der alleinigen Verantwortung des Nutzers.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Werkes, oder Teilen daraus, vorbehalten. Wir behalten uns auch eine Nutzung des Werks für Zwecke des Text- und Data Mining nach § 44b UrhG ausdrücklich vor. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 UrhG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2024 Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München

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

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Eberl & Koesel Studio GmbH, Kempten

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

Titelmotiv: © Suwin / shutterstock

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Druck: CPI Books GmbH, Leck

Printed in Germany

# Vorwort

Die Informations-, Kommunikations- und Medientechnik hat sich in den letzten Jahren stetig weiterentwickelt. Es handelt sich dabei um eine konsequente Evolution bei den Verfahren, den Technologien, der Frequenznutzung und dem Software-Einsatz. Daraus resultieren höherwertigere kennzeichnende Merkmale für die meisten Systeme und Anwendungen.

Inzwischen ist auch der Übergang von der analogen in die digitale Welt fast vollständig abgeschlossen, was eine erhebliche Steigerung der Leistungsfähigkeit für die Nachrichten-Übertragungstechnik bedeutet. Deshalb lässt sich eine große Zahl neuer Dienste realisieren. Das gilt für alle Übertragungsmedien.

Während früher die Frequenz-Bandbreite das Maß aller Dinge war, ist es nun die üblicherweise als Datenrate oder Bitrate bezeichnete Datenübertragungsgeschwindigkeit. Neben dieser spielen zunehmend auch die Laufzeiten der Signale eine wichtige Rolle, weil sie deren verzögerte Übertragung bewirken und damit Echtzeitübertragung verhindern.

Ein großer Teil der Übertragung von Signalen in der Informations-, Kommunikations- und Medientechnik erfolgt auf Basis des Internet-Protokolls (IP). Dieses international vereinbarte Regelwerk wurde zwar primär für das Internet entwickelt, hat sich aber inzwischen auf allen Ebenen der digitalen Welt etabliert.

In dieser neuen Auflage der „Nachrichten-Übertragungstechnik“ wurde das seit Jahren bewährte Konzept der inhaltlichen Strukturierung beibehalten, jedoch um die aktuellen Entwicklungen in allen Bereichen erweitert. Damit ist der Nutzer des Buches „up to date“ hinsichtlich des fachlichen Wissensstandes.

Die einzelnen Themen der Nachrichten-Übertragungstechnik werden aus physikalischer und mathematischer Sicht betrachtet. Dabei stehen an erster Stelle die Begriffsbestimmungen und die Erklärungen von Funktionen, aber ebenso die technischen Spezifikationen. Tabellen und Bilder bieten außerdem relevante Übersichten, um auf einfache Weise Zusammenhänge erkennen und Vergleiche anstellen zu können.

Auch in dieser Auflage sind die bei der Informations-, Kommunikations- und Medientechnik verwendeten englischen Ausdrücken in eckigen Klammern angegeben, außerdem übliche Kunstworte (Akronyme) und Abkürzungen. Eine hilfreiche Ergänzung zu den Texten, Tabellen und Bildern stellen zahlreiche Beispiele dar. Zu den einzelnen Abschnitten stehen Aufgaben samt Lösungen auf *plus.hanser-fachbuch.de* zur Verfügung. Den Zugangscodes finden Sie auf der ersten Seite des Buchs.

Dieses Buch ist für das Studium, aber ebenso zum Lernen, Lesen und Nachschlagen bestens geeignet und stellt deshalb eine sinnvolle Investition dar.

Köln, im Juni 2024

*Ulrich Freyer*

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>V</b>
<b>Inhalt</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Ausgangslage</b> .....	<b>1</b>
<b>Teil I Grundlagen der Übertragungstechnik</b>	
<b>2 Pegel</b> .....	<b>7</b>
2.1 Arten .....	7
2.2 Anwendungen .....	12
<b>3 Signale und Frequenzen</b> .....	<b>15</b>
3.1 Zeitfunktion und Frequenzfunktion .....	15
3.2 Analoge und digitale Signale .....	20
3.3 NutzsSignale und Störsignale .....	24
3.4 Signalanalyse und Signalsynthese .....	30
3.5 Dämpfung und Verstärkung .....	34
3.6 Kopplungsarten .....	36
<b>4 Licht und Farbe</b> .....	<b>39</b>
4.1 Farbspektrum .....	39
4.2 Farbdarstellung .....	41
4.3 Anwendungen .....	43

<b>5</b>	<b>Eintore und Mehrfore</b> .....	<b>45</b>
5.1	Begriffsbestimmungen .....	45
5.2	Arten .....	46
5.3	Kenngößen .....	47
5.4	Anwendungen .....	49
<b>6</b>	<b>Anpassung und Fehlanpassung</b> .....	<b>51</b>
6.1	Wirkungsmechanismus .....	51
6.2	Bewertungsgrößen .....	53
6.3	Rauschanpassung .....	56
<b>7</b>	<b>Kommunikation</b> .....	<b>57</b>
7.1	Kommunikationsarten .....	57
7.2	Kommunikationsverfahren .....	58
7.3	Übertragungsmodi .....	60
7.4	Referenzmodell .....	62
7.5	Kommunikationsstruktur .....	65
<b>8</b>	<b>Elektromagnetische Wellen</b> .....	<b>69</b>
8.1	Schwingung und Welle .....	69
8.2	Elektromagnetisches Feld .....	74
8.3	Frequenz- und Wellenbereiche .....	78
8.4	Wellenausbreitung .....	80
<b>9</b>	<b>Elektromagnetische Verträglichkeit</b> .....	<b>89</b>
9.1	Begriffsbestimmung .....	89
9.2	Störstrahlung .....	90
9.3	Störfestigkeit .....	91
<b>10</b>	<b>Frequenzmanagement</b> .....	<b>95</b>
10.1	Frequenzbedarfe .....	95
10.2	Frequenzuteilungen .....	96
10.3	Zuständigkeiten .....	97
<b>11</b>	<b>Standardisierung</b> .....	<b>99</b>
11.1	Aufgabenstellung .....	99
11.2	Varianten der Standards .....	100
11.3	Zuständigkeiten .....	101

**Teil II Signalübertragung und Signalspeicherung**

<b>12</b>	<b>Übertragungskriterien</b> .....	<b>107</b>
12.1	Übertragungssystem .....	107
12.2	Übertragungskonzept .....	108
12.3	Übertragungskanal .....	110
12.4	Übertragungsparameter .....	110
<b>13</b>	<b>Netze und Dienste</b> .....	<b>113</b>
13.1	Funktionskonzepte .....	113
13.2	Netzarten .....	116
13.3	Bewertungskriterien von Netzen .....	118
13.4	Strukturen von Leitungsnetzen .....	119
13.5	Hybride Leitungsnetze .....	122
13.6	Passive optische Netze (PON) .....	123
13.7	Struktur von Funknetzen .....	126
13.8	Dienste .....	128
<b>14</b>	<b>Schnittstellen und Protokolle</b> .....	<b>131</b>
14.1	Grundlagen .....	131
14.2	Hardware-Schnittstellen .....	133
14.3	Software-Schnittstellen .....	139
14.4	Protokolle .....	140
<b>15</b>	<b>Signalsicherheit</b> .....	<b>143</b>
15.1	Aufgabenstellung .....	143
15.2	Zugangsverfahren .....	144
15.3	Realisierung .....	147
<b>16</b>	<b>Speicherverfahren</b> .....	<b>149</b>
16.1	Grundlagen .....	149
16.2	Magnetische Signalspeicherung .....	151
16.3	Optische Signalspeicherung .....	153
16.4	Elektrische Signalspeicherung .....	157

### Teil III Komponenten

<b>17</b>	<b>Verstärker</b> .....	<b>163</b>
17.1	Funktionsprinzip .....	163
17.2	Kenngrößen .....	163
17.3	Arten .....	165
<b>18</b>	<b>Sender</b> .....	<b>167</b>
18.1	Funktionsprinzip .....	167
18.2	Kenngrößen .....	167
18.3	Arten .....	168
<b>19</b>	<b>Empfänger</b> .....	<b>169</b>
19.1	Funktionsprinzip .....	169
19.2	Kenngrößen .....	169
19.3	Arten .....	170
<b>20</b>	<b>Elektrische Leitungen</b> .....	<b>171</b>
20.1	Grundlagen .....	171
20.2	Kenngrößen .....	172
20.3	Arten .....	175
20.4	Leitung als Übertragungskanal .....	180
20.5	Leitung als Bauelement .....	182
<b>21</b>	<b>Optische Leitungen</b> .....	<b>185</b>
21.1	Grundlagen .....	185
21.2	Kenngrößen .....	189
21.3	Arten .....	191
<b>22</b>	<b>Antennen</b> .....	<b>195</b>
22.1	Grundlagen .....	195
22.2	Kenngrößen .....	196
22.3	Ausführungsformen .....	203
22.4	Mehr-Antennensysteme .....	209
<b>23</b>	<b>Umsetzer und Wandler</b> .....	<b>211</b>
23.1	Analog-Digital-Umsetzer .....	211
23.2	Digital-Analog-Umsetzer .....	215
23.3	Optoelektrische Umsetzer .....	217

23.4	Elektrooptische Umsetzer .....	222
23.5	Frequenzumsetzer .....	225
23.6	Umsetzer für LWL-Systeme .....	226
23.7	Wandler für den Audibereich .....	227
23.7.1	Grundlagen .....	227
23.7.2	Mikrofone als Aufnahmeeinheiten .....	232
23.7.3	Lautsprecher und Hörer als Wiedergabeeinheiten .....	237
<b>24</b>	<b>Filter und Weichen .....</b>	<b>243</b>
24.1	Filter .....	243
24.2	Weichen .....	245
<b>25</b>	<b>Koppler .....</b>	<b>247</b>
25.1	Elektrische Koppler .....	247
25.2	Optokoppler .....	248
<b>26</b>	<b>Sensoren .....</b>	<b>251</b>
<b>27</b>	<b>Netzwerkkomponenten .....</b>	<b>253</b>
<b>28</b>	<b>Sonstige .....</b>	<b>257</b>

#### Teil IV Varianten der Signalaufbereitung

<b>29</b>	<b>Modulation und Demodulation .....</b>	<b>261</b>
29.1	Analoges Trägersignal/analoges Modulationssignal .....	263
29.1.1	Amplitudenmodulation (AM) .....	264
29.1.2	Frequenzmodulation (FM) .....	273
29.1.3	Phasenmodulation (PM) .....	279
29.2	Analoges Trägersignal/digitales Modulationssignal .....	280
29.2.1	Amplitudenumtastung (ASK) .....	282
29.2.2	Frequenzumtastung (FSK) .....	282
29.2.3	Phasenumtastung (PSK) .....	283
29.2.4	Amplituden-Phasen-Umtastung (QAM) .....	286
29.3	Digitales Trägersignal/analoges Modulationssignal .....	288
29.3.1	Pulsamplitudenmodulation (PAM) .....	288
29.3.2	Pulsfrequenzmodulation (PFM) .....	290

29.3.3 Pulsphasenmodulation (PPM) .....	290
29.3.4 Pulsdauermodulation (PDM) .....	291
29.4 Digitale Modulation und Demodulation im Basisband .....	293
29.4.1 Pulscodemodulation (PCM) .....	293
29.4.2 PCM-Varianten .....	296
29.5 Mehr-Träger-Verfahren OFDM .....	297
<b>30 Codierung und Decodierung .....</b>	<b>303</b>
30.1 Grundlagen .....	303
30.2 Leitungscodierung .....	307
30.3 Quellencodierung .....	310
30.4 Kanalcodierung .....	319
<b>31 Multiplexierung und Demultiplexierung .....</b>	<b>325</b>
31.1 Zeitmultiplex (TDM) .....	326
31.2 Frequenzmultiplex (FDM) .....	328
31.3 Codemultiplex (CDM) .....	331
31.4 Raummultiplex (SDM) .....	332
31.5 Polarisationsmultiplex (PDM) .....	333
<b>32 Zugriffsverfahren .....</b>	<b>335</b>
32.1 Einzelzugriff .....	335
32.2 Vielfachzugriff .....	337

## Teil V Systeme und Anwendungen

<b>33 Hörfunk (Radio) .....</b>	<b>343</b>
33.1 Analoger terrestrischer Hörfunk UKW .....	344
33.2 Digitaler terrestrischer Hörfunk DAB+ .....	352
33.3 Hörfunk über Kabelnetze .....	359
33.4 Hörfunk über Satellit .....	360
33.5 Internetradio .....	361
33.6 Podcast .....	362
33.7 Audiotheken .....	364

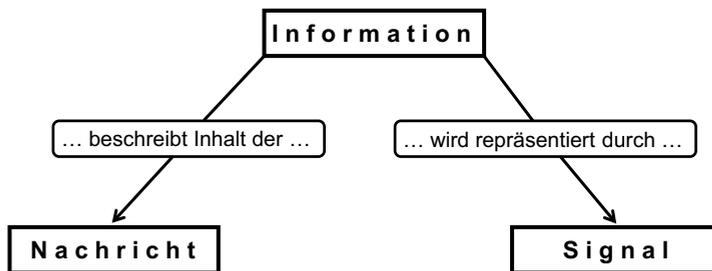
<b>34</b>	<b>Fernsehen (TV)</b> .....	<b>365</b>
34.1	Grundlagen des digitalen Fernsehens .....	365
34.2	DVB-Übertragung auf Basis der Broadcast-Standards .....	372
34.3	DVB-Übertragung auf Basis des Internet-Protokolls (IP) .....	378
34.4	HbbTV .....	386
34.5	DVB-I .....	390
34.6	Mediatheken .....	393
<b>35</b>	<b>Internet</b> .....	<b>395</b>
35.1	Funktionskonzept .....	395
35.2	Organisationsstruktur .....	399
35.3	Dienste und Anwendungen .....	400
35.4	Betriebsvarianten .....	401
<b>36</b>	<b>Mobile Breitbandkommunikation (Mobilfunk)</b> .....	<b>405</b>
36.1	Funktionskonzept .....	405
36.2	Entwicklung der Leistungsmerkmale .....	407
36.3	Standardisierung durch 3GPP .....	408
36.4	Netzarchitekturen und Betrieb .....	409
36.5	Perspektive 6G .....	417
<b>37</b>	<b>Stationäre Breitbandkommunikation</b> .....	<b>419</b>
37.1	Netzebenen und Leitungstechnologien .....	419
37.2	Breitbandkommunikation über das Telefonnetz .....	420
37.3	Breitbandkommunikation über Breitbandkabelnetze .....	423
37.4	Breitbandkommunikation über Glasfasernetze .....	426
<b>38</b>	<b>Lokale Datenkommunikation</b> .....	<b>429</b>
38.1	LAN .....	429
38.2	WLAN .....	433
38.3	Bluetooth .....	438
38.4	DECT .....	439
<b>39</b>	<b>Telefonie</b> .....	<b>441</b>
39.1	Stationäre Telefonie .....	441
39.2	Mobile Telefonie .....	445
39.3	Kabeltelefonie .....	445
39.4	Satellitentelefonie .....	446

<b>40</b>	<b>Satellitenkommunikation</b> .....	<b>447</b>
40.1	Funktionsprinzip .....	447
40.2	Übertragungssystem .....	449
40.3	Kenngrößen .....	452
40.4	Anwendungen .....	454
<b>41</b>	<b>Smart Home</b> .....	<b>457</b>
41.1	Zielvorstellung .....	457
41.2	Heimvernetzung .....	459
41.3	Anwendungen .....	463
<b>42</b>	<b>Ortung und Navigation</b> .....	<b>465</b>
42.1	Funktionsprinzip .....	465
42.2	Systeme und Kenngrößen .....	467
<b>43</b>	<b>Weitere Systeme und Anwendungen</b> .....	<b>475</b>
43.1	Elektronischer Geldverkehr .....	475
43.2	Elektronische Verwaltung .....	476
43.3	Elektronisches Gesundheitswesen .....	478
<b>44</b>	<b>Perspektiven</b> .....	<b>481</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>483</b>
	<b>Index</b> .....	<b>485</b>

# 1

## Ausgangslage

Die Nachrichten-Übertragungstechnik nutzt elektrische, optische und magnetische Größen für die Übertragung, Bearbeitung (z. B. Wandlung) und Speicherung von Informationen. Diese beschreiben einerseits die Inhalte der damit verbundenen Nachrichten, während sie andererseits durch physikalische Größen als Signale repräsentiert werden, die als Transportmittel für die Informationen dienen (Bild 1.1). Als Beispiel sei eine gesprochene Information betrachtet. Bei ihr ist die Nachricht ein Schalldrucksignal.



**Bild 1.1** Grundbegriffe der Medientechnik



**Informationen** beschreiben den Inhalt von Nachrichten und werden durch physikalische Größen als Signale repräsentiert.

Der Austausch von Informationen zwischen zwei und mehr Stellen wird als Kommunikation bezeichnet. Dabei muss für jedes Signal der Informationsgehalt bekannt sein, um die Eindeutigkeit der Kommunikation zu gewährleisten. Deshalb ist es zum Beispiel bei gesprochenen Informationen erforderlich, dass die angesprochene Person die verwendete Sprache beherrscht.



**Kommunikation** ist der Austausch von Informationen mithilfe von Signalen.

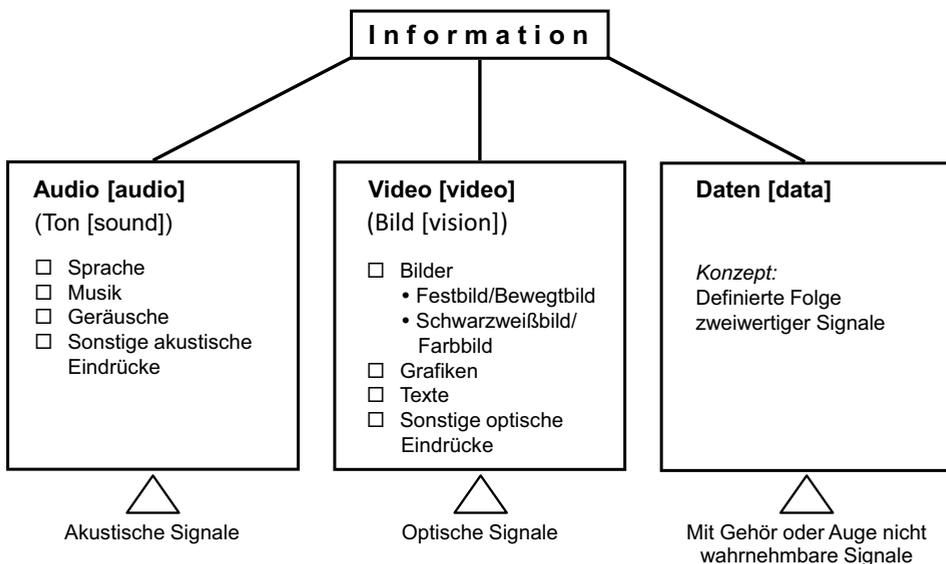
In den meisten Fällen sollen Informationen als Nachrichten über unterschiedliche Entfernungen übertragen werden. Daraus erklärt sich die Bezeichnung Telekommunikation (Tk oder auch TK). Die Vorsilbe „tele“ stammt aus der griechischen Sprache und steht für das Wort „fern“.



**Telekommunikation** = technische Kommunikation über beliebige Entfernungen

Bei den Informationen lassen sich bezogen auf ihre Wahrnehmbarkeit folgende Arten unterscheiden (Bild 1.2):

- **Audio** [audio], auch als Ton [sound] bezeichnet, umfasst alle mit dem Gehör wahrnehmbaren akustischen Signale. Dazu gehören Sprache, Musik, Geräusche und alle sonstigen Höreindrücke.
- **Video** [video], auch als Bild [vision] bezeichnet, umfasst alle mit dem Auge wahrnehmbaren optischen Signale. Dazu gehören Bilder, Grafiken, Texte und alle sonstigen Seheindrücke. Die Bilder können feststehend oder bewegt sein, wobei schwarz-weiße oder farbige Darstellung möglich ist.
- **Daten** [data] sind alle Informationen, die weder mit dem Gehör noch mit dem Auge unmittelbar wahrgenommen werden können. In der Regel handelt es sich um zweiwertige Signale.



**Bild 1.2** Arten der Information

Bei jeder technischen Kommunikation sind Menschen und/oder technische Einrichtungen beteiligt. Dafür gelten üblicherweise folgende Bezeichnungen:

- Mensch → Nutzer [*user*] oder Teilnehmer (Tln)
- Technische Einrichtung → Maschine

Es lassen sich deshalb folgende Konstellationen unterscheiden:

- **Mensch-Mensch-Kommunikation**

Informationsübertragung von Mensch zu Mensch mithilfe einer technischen Einrichtung.

Beispiel: Telefongespräch

- **Mensch-Maschine-Kommunikation**

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

Beispiel: Informationssuche im Internet mithilfe eines Notebooks

- **Maschine-Mensch-Kommunikation**

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

Beispiel: elektronischer Programmführer bei TV-Geräten

- **Maschine-Maschine-Kommunikation (M2M)**

Informationsübertragung zwischen technischen Einrichtungen ohne Beteiligung von Menschen.

Beispiel: Computernetze

Die vorstehend aufgezeigte Kommunikation erfolgt entweder **unidirektional** (also einseitig gerichtet von einer Stelle zu einer oder mehreren anderen Stellen) oder **bidirektional** (also gleichzeitig oder wechselseitig in beiden Richtungen zwischen zwei Stellen). Die sendende Stelle wird als **Quelle** Q [*source*] bezeichnet, bei der empfangenden Stelle ist es **Senke** S [*sink*].

Bei der Übertragung von Daten haben sich auch die Begriffe Server und Client eingebürgert. Der **Server** ist als technische Dienstleistungseinrichtung zu verstehen, die Informationen bereitstellt, während der **Client** (= Nutzer) als technische Einrichtung die von einem Server bereitgestellten Informationen aufnimmt und nutzt.



Bei der im Rahmen der Kommunikation erforderlichen Übertragung von Signalen sollen diese möglichst unverändert bleiben.



**I**

**Grundlagen der  
Übertragungs-  
technik**



# 2

## Pegel

Physikalische Größen können unterschiedliche Werte aufweisen, von sehr klein bis sehr groß. Häufig ist dabei nicht der absolute Wert einer Größe von Interesse, sondern das Verhältnis von zwei gleichartigen Größen oder der Bezug auf einen Referenzwert. Das führt zu einem dimensionslosen Ausdruck, der allerdings vielstellig sein kann. Um dieses zu vermeiden, wird für das Größenverhältnis der dekadische Logarithmus ( $\lg$ ) verwendet. Dafür gilt die Bezeichnung **Pegel** [*level*] und der Großbuchstabe  $L$  als Formelzeichen.



Der **Pegel  $L$**  ist das logarithmierte Verhältnis von zwei gleichartigen physikalischen Größen.

### 2.1 Arten

Signale sind bekanntlich Verläufe physikalischer Größen. In der Informations- und Kommunikationstechnik spielen dabei die **elektrische Spannung  $U$**  und die **elektrische Wirkleistung  $P$**  eine wesentliche Rolle. Die Angabe eines Spannungswertes erfolgt als Vielfaches der Einheit Volt (V), beim Leistungswert ist es die Einheit Watt (W). Dabei kann es sich um ganze Zahlen, aber auch um beliebig gebrochene Zahlen handeln. Bei der Spannung ist zur Angabe der Polarität zusätzlich auch das Minuszeichen möglich.

Bei Systemen mit Glasfaserleitungen treten funktionsbedingt nur optische Größen auf, von denen aus messtechnischen Gründen nur die Leistung von Bedeutung ist. Es besteht deshalb stets der Bedarf, zwischen der **elektrischen Leistung  $P_{el}$**  und der **optischen Leistung  $P_{opt}$**  zu unterscheiden.

Physikalische Größen, die der elektrischen Wirkleistung proportional sind, werden als **Leistungsgrößen** bezeichnet. Dazu gehören:

- Energie, Arbeit  $P$  (Einheit: J)
- Leistungs(fluss)dichte  $P/A$  (Einheit:  $W/m^2$ )
- Energiedichte  $W/A$  (Einheit:  $J/m^2$ )

Beschreiben physikalische Größen den Zustand eines elektrischen, magnetischen oder sonstigen Feldes, dann liegen **Feldgrößen** vor. Dazu gehören:

- elektrische Spannung  $U$  (Einheit: V)
- elektrische Stromstärke  $I$  (Einheit: A)
- elektrische Feldstärke  $E$  (Einheit: V/m)
- magnetische Feldstärke  $H$  (Einheit: A/m)
- Kraft  $F$  (Einheit: N)
- Schalldruck  $p$  (Einheit: Pa)

Da Pegelangaben per Definition keine Dimension aufweisen, wurde die Pseudoeinheit Bel (B) als Kennzeichnung festgelegt. In der Praxis hat sich allerdings **Dezibel (dB)** durchgesetzt, also das Zehntel-Bel, weil damit auch große Wertverhältnisse mit überschaubaren Zahlen angegeben werden können. Es gilt:

$$1 \text{ dB} = \frac{1}{10} \text{ B} \Leftrightarrow 1 \text{ B} = 10 \text{ dB} \quad (2.1)$$

Der Leistungspegel weist damit folgende Form auf:

$$L_P = 10 \cdot \lg \frac{P_a}{P_b} \text{ dB} \quad (2.2)$$

Mithilfe der Leistungsformel  $P = U^2/R$  ergibt sich unter der Voraussetzung  $R_a = R_b = R$  für den Spannungspegel folgende Form:

$$L_U = 20 \cdot \lg \frac{U_a}{U_b} \text{ dB} \quad (2.3)$$



Angaben in Dezibel (dB) ermöglichen die Erfassung beliebiger Wertverhältnisse physikalischer Größen mit überschaubaren Zahlen (Bild 2.1).

Durch Entlogarithmieren kann von jedem Pegelwert das Verhältnis der Leistungen und Spannungen einfach ermittelt werden. Grundsätzlich gilt:

$$y = \lg x \Leftrightarrow x = 10 \cdot y \quad (2.4)$$

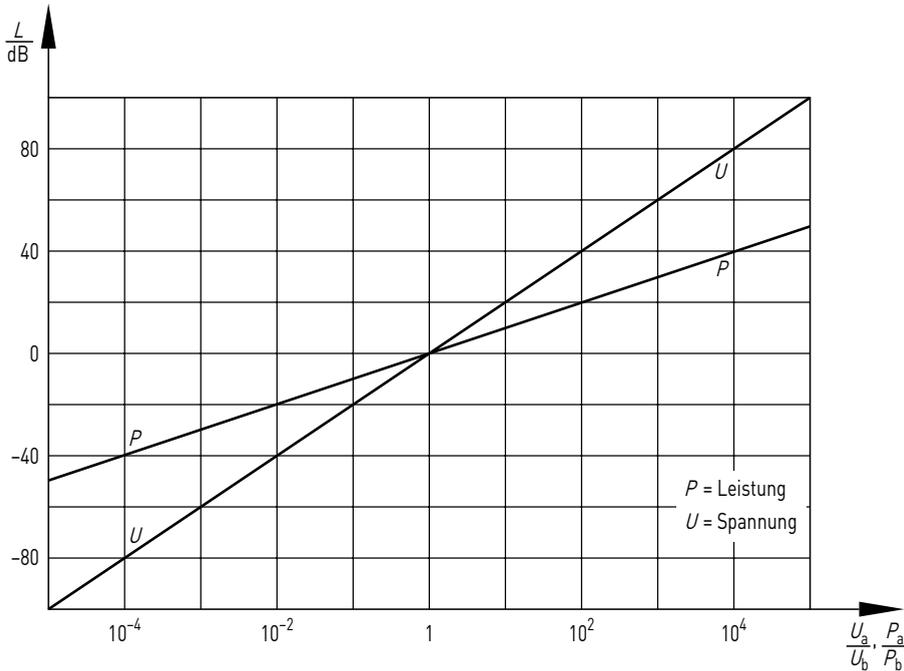


Bild 2.1 Pegel für Leistung und Spannung

Daraus folgt:

$$\frac{P_a}{P_b} = 10^{\frac{L_P}{10 \text{ dB}}} \quad (2.5)$$

$$\frac{U_a}{U_b} = 10^{\frac{L_U}{20 \text{ dB}}} \quad (2.6)$$

Die bisherigen Betrachtungen der Pegel bezogen sich auf beliebige Stellen in einem Übertragungssystem. In der Praxis ist jedoch der Bezug auf definierte Stellen typisch. Dazu zählen die Eingänge und Ausgänge von Geräten, Baugruppen und sonstigen Funktionseinheiten. Der Eingang wird dabei durch den Index 1 und der Ausgang durch den Index 2 gekennzeichnet. Es handelt sich dann um **relative Pegel**. Dabei kann der Bezug auf den Eingang (Index 1) oder den Ausgang (Index 2) erfolgen. Es sind deshalb folgende Pegelangaben möglich:

$$L_{P(1/2)} = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{P_2} \text{ dB} \quad (2.7)$$

und

$$L_{P(2/1)} = 10 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} \text{ dB} \quad (2.8)$$

Beide Pegelangaben weisen gleiche Zahlenwerte, jedoch unterschiedliche Vorzeichen auf.

$$L_{P(1/2)} = -L_{P(2/1)} \quad (2.9)$$

$$L_{P(2/1)} = -L_{P(1/2)} \quad (2.10)$$

Bisher wurde an allen Stellen der gleiche Widerstandswert vorausgesetzt, was allerdings nicht immer der Fall ist. Liegt für  $U_1$  der Widerstand  $R_1$  vor und für  $U_2$  der Widerstand  $R_2$ , dann lässt sich die Auswirkung der unterschiedlichen Widerstände wie folgt berechnen:

$$L_P = L_U + 10 \cdot \lg \frac{R_2}{R_1} \text{ dB} \quad (2.11)$$

Daraus ergibt sich folgende Erkenntnis: Wenn  $R_1 = R_2$ , dann  $L_P = L_U$ .

Bei Pegelangaben können auch festgelegte Werte als Bezugsgrößen verwendet werden. Es handelt sich dann um **absolute Pegel**.

Wird für den allgemeinen Fall für den Bezugswert der Index „abs“ verwendet, dann gelten folgende Beziehungen:

Absoluter Leistungspegel

$$(L_P)_{\text{abs}} = 10 \cdot \lg \frac{P}{P_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (2.12)$$

Absoluter Spannungspegel

$$(L_U)_{\text{abs}} = 20 \cdot \lg \frac{U}{U_{\text{ref}}} \text{ dB} \quad (2.13)$$

Diese Kennzeichnung kann entfallen, wenn nach dem dB-Zeichen die Einheit der Referenzgröße in Klammern angegeben ist. Von dieser genormten Form wird allerdings häufig abgewichen und ein direktes Anhängsel an das dB-Zeichen verwendet.



### Beispiel 2.1

Varianten der Angabe des absoluten Leistungspegels mit 1 W als Referenzwert

$$(L_P)_{\text{abs}} = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ W}} \text{ dB}$$

$$L_P = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ W}} \text{ dB (W)}$$

$$L_P = 10 \cdot \lg \frac{P}{1 \text{ W}} \text{ dBW}$$

Grundsätzlich ist für den absoluten Pegel jeder Wert als Referenz möglich, in der Praxis sind jedoch nur bestimmte Werte 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  $\mu$ V
  - genormte Angabe: dB( $\mu$ V)
  - häufig verwendete Angabe: dB $\mu$ V
- absoluter Spannungspegel, bezogen auf 1 V
  - genormte Angabe: dB(V)
  - häufig verwendete Angabe: dBV

In Tabelle 2.1 ist eine Auswahl für die Nachrichten-Übertragungstechnik wichtiger absoluter Pegel und die Berechnung der Werte durch Entlogarithmierung zusammengestellt.

**Tabelle 2.1** 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 $\mu$ 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 $\mu$ V/m	$L_E = 20 \cdot \lg \frac{E}{1 \mu\text{V/m}} \text{ dB}\mu\text{V/m}$	$E = 10^{\frac{L_E}{20 \text{ dB}\mu\text{V/m}}} \mu\text{V/m}$

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.

## 2.2 Anwendungen

Neben reinen Pegelangaben sind häufig auch die Unterschiede zwischen zwei Pegelwerten von Interesse. Beziehen sich diese Differenzen auf denselben Ort, dann gilt die Bezeichnung **Abstand** [*ratio*] (Bild 2.2). Mathematisch handelt es sich dabei um den Betrag der Differenz von zwei auf denselben Ort bezogene Pegelwerte.

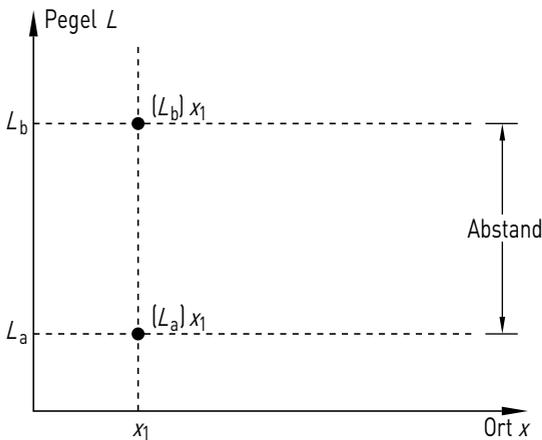


Bild 2.2 Pegeldifferenz „Abstand“

Beziehen sich die Pegelwerte dagegen auf unterschiedliche Orte, dann gilt die Bezeichnung **Maß** [*figure*] (Bild 2.3). Mathematisch handelt es sich dabei um den Betrag der Differenz von zwei auf unterschiedliche Orte bezogene Pegelwerte.

Bei Übertragungssystemen handelt es sich stets um Kettenschaltungen beliebiger Funktionseinheiten, die jeweils zwischen dem Pegel am Eingang und Ausgang durch Verstärkung oder Dämpfung definierte Änderungen bewirken. Die Pegelsituation innerhalb des Systems lässt sich überschaubar als Graph in einem rechtwinkligen Koordinatensystem als Verlauf des Pegels  $L$  in Abhängigkeit vom Ort darstellen. Diese Funktion  $L = f(x)$  wird als **Pegelplan** bezeichnet. Auf der x-Achse (Abzisse) ist dabei der Ort  $x$  abgetragen, während es sich auf der y-Achse (Ordinate) um den Pegelwert handelt. Der Graph startet mit dem Eingangspegel und endet mit dem Ausgangspegel des Systems (Bild 2.4).

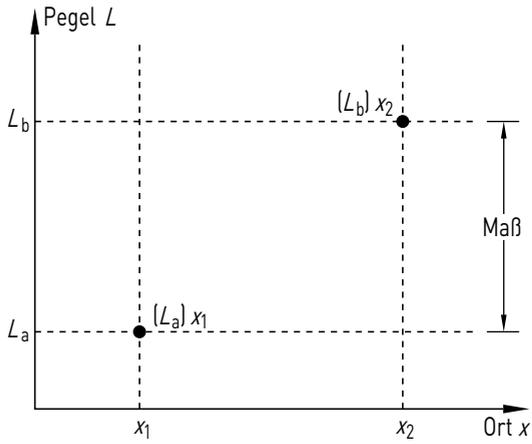


Bild 2.3 Pegeldifferenz „Maß“

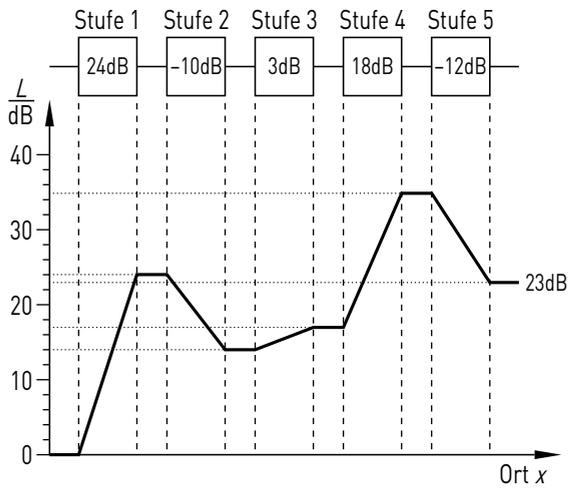


Bild 2.4 Beispiel für Pegelplan

