

St.-Prof. Klaus Beuth/Prof. Dr.-Ing. Stephan Breide/
Prof. Dr. Christian-Friedrich Lüders/
Dr.-Ing. habil. Günter Kurz/Dipl.-Ing. Richard Hanebuth

Nachrichten- technik

**5., vollständig überarbeitete und
aktualisierte Auflage**

Vogel Communications Group

Vorwort zur 5. Auflage

Die Nachrichtentechnik gehört zu den Fachgebieten mit hohen wirtschaftlichen Zuwachsraten und internationaler Bedeutung. Für die durch hohe Spezialisierung geprägten und immer arbeitsteiligeren Herstellungsprozesse der Industrie hat der Datenaustausch große Bedeutung. Darüber hinaus entwickelte sich das gesellschaftliche Zusammenleben immer stärker in Richtung einer Informationsgesellschaft, in der ein schneller Nachrichten- und Informationsaustausch selbstverständlich geworden ist und an dem immer mehr Menschen teilhaben wollen. Die Optimierung der technischen Kommunikationsprozesse und der damit verbundenen Technik ist daher von großer Wichtigkeit und setzt umfangreiche Kenntnisse voraus.

Die Nachrichtentechnik – häufig auch bezeichnet als Informations- und Kommunikationstechnik – baut auf einer Vielzahl grundlegender Erkenntnisse auf, die oft theoretisch und schwer verständlich dargestellt werden. Die Autoren haben es sich daher zur Aufgabe gemacht, die wesentlichen Grundlagen und ausgewählte Anwendungsgebiete anschaulich vorzustellen und das Hilfsmittel der Mathematik nur dort einzusetzen, wo es unumgänglich ist und der tieferen Erkenntnis dient.

Neben den grundlegenden Theorien werden wichtige Anwendungsbereiche der Nachrichtentechnik praxisgerecht und leicht verständlich dargestellt und an Beispielen erläutert. Dieses ist zum einen der Bereich der Telekommunikation und Vermittlungstechnik mit den Anwendungsgebieten der leitungsgebundenen oder drahtlosen Telefonie und Datenübertragung sowie vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten, andererseits der große Anwendungsbereich von Rundfunk und Fernsehen mit der Technik der Aufnahme, Übertragung, Speicherung und Wiedergabe. Berücksichtigt wird dabei die inzwischen vielfach vollzogene Umstellung der Verbreitungswege von analogen Strecken auf eine digitale Übertragung über Satellit, Kabel und terrestrische Wege sowie die derzeitige Einführung des Hochzeilenfernsehens HDTV. Nicht nur im Heimbereich spielt dabei die Speicherung von Audio- und Videosignalen eine große Rolle. Auf die Verfahren der analogen und digitalen Magnetaufzeichnung wird daher genauso eingegangen wie auf die optischen Speichermedien CD, DVD und BD, so dass sich auch Nichttechniker einen guten Überblick erarbeiten können.

Der Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik hat in den vergangenen Jahren durch eine Vielzahl technologischer Fortschritte mit zahlreichen Umbrüchen und Neuerungen eine sehr dynamische Entwicklung erfahren. So hat sich seit dem Erscheinen der letzten Ausgabe dieses Buches vor etwa sieben Jahren im Bereich Mobilfunk die 4. Generation (LTE) etabliert, die 3. Generation (UMTS) wurde abgeschaltet und eine neue Generation (5G) befindet sich im Aufbau. An der 6. Generation wird bereits gearbeitet. Ebenso hat das Audio- und Videostreaming signifikant an Bedeutung gewonnen, neue Methoden der Datenreduktion und der digitalen Übertragung von Audio- und Videodaten wurden entwickelt und eingeführt. Auch im Bereich der Speichertechniken waren entscheidende Neuerungen zu verzeichnen.

Dementsprechend wurden in der vorliegenden 5. Auflage einige Kapitel grundlegend überarbeitet und Teilkapitel neu eingefügt. Eingeflossen sind dabei die Erfahrungen der Autoren aus verschiedenen Lehrveranstaltungen an der Fachhoch-

schule Südwestfalen und aus der Mitarbeit an verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsprojekten.

Die wesentlichen Neuerungen betreffen u.a. die folgenden Themengebiete:

- Mobilfunksysteme (LTE/4G, 5G, WLAN, Bluetooth, ZigBee)
- optische Speichermedien der 4. Generation (Ultra HD Blu-Ray Disc)
- neuere Festspeichersysteme auf Basis von SD-Karten
- neue Verfahren der DSL-Technik (nicht ISDN-kompatible Verfahren)
- Aktualisierung der Verfahren zur Datenratenreduktion von Bewegtbildern
- Aktualisierung der Schnittstellentechnik nach HDMI
- digitale AV-Übertragung im HDBaseT-Standard
- Grundlagen des Audio- und Videostreaming

Das Buch ist sowohl als unterrichtsbegleitendes Lernmittel als auch zum Selbststudium geeignet. Lernziel-Tests mit Fragen und Aufgaben am Ende eines jeden Kapitels geben Auskunft über den Lernerfolg und den erreichten Grad des Verstehens.

Studierende elektrotechnischer und verwandter Fachrichtungen, in der Praxis stehende Ingenieure, Techniker und Meister sowie interessierte Nichttechniker können das Buch mit Erfolg für einen praxisbezogenen Einstieg in die modernen Verfahren der Nachrichtentechnik nutzen.

Der Vogel Communications Group sei für die gute Zusammenarbeit und die sorgfältige Ausführung des Druckes sowie die große Geduld bei der Erstellung der Neuauflage sehr gedankt. Ein weiterer Dank gilt unseren Familien, die diese Erstellung verkraften mussten.

Wie schon bei der 4. Auflage finden Sie zusätzliche Themen (z.B. Analoge Rundfunktechnik, UMTS-Mobilfunk) und die Lösungen zu den Lernzieltests in unserem Onlineservice InfoClick unter www.vogel-fachbuch.de/infoclick. Die Dateien können Sie über den im Buch befindlichen Zugangscodes freischalten. Fordern Sie den Code für Ihr E-Book unter info@vogel-fachbuch.de an.

Meschede, April 2023

Stephan Breide
Christian Lüders

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 5. Auflage	5
1 Grundlegende Begriffe der Nachrichtentechnik	17
1.1 Einordnung der Nachrichtentechnik	17
1.2 Hierarchische Strukturierung von Kommunikationsabläufen	21
1.2.1 Beispiel für die Gliederung des Kommunikationsprozesses ...	21
1.2.2 Die Aufgaben der OSI-Schichten	22
1.2.3 Dienste, Protokolle und Datenfluss im OSI-Modell	26
1.3 Signale und Systeme	28
1.3.1 Beschreibung von Signalen	28
1.3.2 Rauschleistung	35
1.3.3 Allgemeine Eigenschaften von Übertragungssystemen	36
1.3.4 Pegel und Dezibel-Rechnung	41
1.4 Lernziel-Test	45
2 Elektronische Netzwerke	47
2.1 Netzwerke als Bestandteil von Nachrichtensystemen	47
2.2 Zweipole	48
2.3 Vierpole	51
2.3.1 Vierpolersatzdarstellungen	52
2.3.2 Betriebsparameter	54
2.3.3 Übertragungsfunktion	55
2.4 Filterschaltungen	56
2.4.1 Filterarten und -kenngrößen	57
2.4.2 RC-Filter	61
2.4.3 LC-Filter	63
2.4.4 Mechanische Filter	66
2.4.5 Oberflächenwellen-Filter	69
2.4.6 Abtastfilter	70
2.4.7 Digitale Filter	71
2.5 Mehrtore	78
2.6 Lernziel-Test	79
3 Verstärkung und Schwingungserzeugung	81
3.1 Operationsverstärker	82
3.1.1 Anforderungen an einen universellen Verstärker	82
3.1.2 Aufbau eines Operationsverstärkers	82
3.1.3 Eigenschaften von Operationsverstärkern	84
3.1.4 Beschaltung von Operationsverstärkern	87
3.2 Leistungsverstärker	89
3.2.1 Arbeitspunkt bei Leistungsverstärkern	89
3.2.2 Eintaktschaltungen	89
3.2.3 Gegentaktschaltungen	91
3.2.4 Sendeverstärker	92
3.2.5 Schaltverstärker der Klasse D	93

3.3	Rückkopplung	95
3.3.1	Prinzip	95
3.3.2	Gegenkopplungsschaltungen	97
3.3.3	Eigenschaften gegengekoppelter Schaltungen	99
3.4	Spezielle Schaltungen der Nachrichtentechnik	102
3.5	Schwingungserzeugung	105
3.5.1	Grundlagen	105
3.5.2	Oszillatorgrundschaltungen	107
3.5.3	Oszillatoreigenschaften	112
3.5.4	Funktionsgeneratoren	114
3.5.5	Digitale Oszillatoren	116
3.6	Lernziel-Test	120
4	Leitungen für die Nachrichtenübertragung	121
4.1	Wellen auf leitfähigen Kabeln	121
4.2	Wellenkenngrößen der Leitung	125
4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge	125
4.2.2	Wellenkenngrößen von verlustfreien Leitungen	126
4.2.3	Wellenkenngrößen von Leitungen mit geringen Verlusten ...	127
4.3	Leistungsabschluss und Reflexionen	129
4.4	Leitungen als Bauelemente der Hochfrequenztechnik	133
4.5	Wellenleiter	134
4.6	Lichtwellenleiter	135
4.6.1	LWL-Übertragungskanal	136
4.6.2	Optische Eigenschaften von Glasfasern	136
4.6.3	Aufbau von Lichtwellenleitern	138
4.7	Kabelsysteme in der Kommunikationstechnik	140
4.7.1	Kabel mit symmetrischen Leitungen	141
4.7.2	Koaxialkabel	146
4.7.3	Glasfaserkabel	148
4.8	Lernziel-Test	152
5	Elektroakustik	153
5.1	Allgemeines	153
5.2	Messgrößen des Schalls	154
5.3	Schallempfindung durch das Ohr	156
5.4	Raumakustik	161
5.4.1	Reflexion und Absorption	161
5.4.2	Anhall und Nachhall	161
5.5	Technik der Schallübertragung	163
5.5.1	Allgemeine Anforderungen	163
5.5.2	Audio-Übertragungssysteme	164
5.6	Elektroakustische Wandler	166
5.6.1	Schallaufnehmer, Mikrofone	166
5.6.2	Schallstrahler	172
5.6.3	Erregersysteme für Lautsprecher und Kopfhörer	174
5.6.4	Schallführung	175
5.6.5	Lautsprecherkombinationen	177

8.2.2	Modified Monitoring State Code MMS43 – Leitungscode ...	254
8.3	Digitale Modulationsverfahren	255
8.3.1	Allgemeines	255
8.3.2	Digitale Frequenzmodulation	257
8.3.3	Digitale Phasen- und Amplitudenmodulation	258
8.3.4	Spreiztechnik	262
8.3.5	Frequency Hopping	266
8.3.6	Orthogonal Frequency Division Multiplex – OFDM	266
8.4	Fehlerschutzverfahren für die digitale Übertragung	270
8.4.1	Grundlagen des Fehlerschutzes	270
8.4.2	Block Codes	272
8.4.3	Faltungscodes	277
8.4.4	Interleaving	278
8.5	Dynamische Auswahl des Übertragungsverfahrens	279
8.6	ARQ-Verfahren	281
8.6.1	Send-and-Wait-Protokoll	281
8.6.2	Selektives ARQ-Verfahren	283
8.6.3	Fensterverfahren	284
8.6.4	Hybride ARQ-Verfahren	285
8.7	Lernziel-Test	287
9	Multiplexverfahren in der Übertragungstechnik	289
9.1	Übersicht zu den Multiplexverfahren	289
9.2	Raummultiplex	289
9.3	Frequenzmultiplex	291
9.4	Wellenlängenmultiplex	293
9.5	Orthogonales Frequenzmultiplex	295
9.6	Zeitmultiplex	295
9.6.1	Synchrones Zeitmultiplex-Verfahren	295
9.6.2	Asynchrones Zeitmultiplex-Verfahren	298
9.7	Codemultiplex	299
9.8	Polarisationsmultiplex	303
9.9	Multiple Input Multiple Output (MIMO)	304
9.10	Kombination von Multiplexverfahren	310
9.11	Duplex-Verfahren	311
9.12	Lernziel-Test	312
10	Analoger Hör- und Fernschrundfunk	315
10.1	Analoger terrestrischer Hörrundfunk	315
10.1.1	Hörrundfunkempfänger	316
10.1.2	Stereo-Hörrundfunk	322
10.1.3	Übertragung von Zusatzinformationen	324
10.2	Zusammenfassung	328
10.3	Analoge Fernsehsystemtechnik	328
10.3.1	Grundlagen	329
10.3.2	Normen für Schwarzweiß-Fernsehsignale	332
10.3.3	Signaldarstellung im Basisband	333
10.3.4	Synchronisationssignale	337

12.5.3	Standbildcodierung nach JPEG 2000	403
12.5.4	Bewegtbildcodierung nach MPEG.....	405
12.5.5	Bewegtbildcodierung für HDTV	410
12.5.6	Bewegtbildcodierung nach H.265 (HEVC)	413
12.5.7	Bewegtbildcodierung nach H.266 (VVC).....	417
12.6	Zusammenfassung	419
12.7	Lernziel-Test	420
13	Übertragungssysteme für den digitalen Hör- und Fernseh Rundfunk	423
13.1	ADR – Astra Digital Radio	424
13.2	DAB-System	425
13.2.1	DAB – Digital Audio Broadcasting	425
13.2.2	DAB+	430
13.2.3	DMB – Digital Multimedia Broadcasting.....	430
13.3	DRM – Digital Radio Mondial	430
13.4	DVB-System der 1. Generation	433
13.4.1	DVB-S-Satellitenübertragung nach DVB.....	436
13.4.2	DVB-C – Kabel-TV-Übertragung nach DVB	439
13.4.3	DVB-T – Terrestrische Übertragung nach DVB	442
13.5	DVB-System der 2. Generation	443
13.5.1	DVB-S2 und DVB-S2X – Satellitenübertragung nach DVB ...	444
13.5.2	DVB-C2 – Kabel-TV-Übertragung nach DVB	447
13.5.3	DVB-T2 – Terrestrische Übertragung nach DVB	450
13.6	Rundfunkübertragung im Internet	452
13.7	Zusammenfassung	453
13.8	Lernziel-Test	454
14	Aufzeichnungstechnik für Ton-, Bild- und	
	Datensignale	455
14.1	Grundlagen der magnetischen Aufzeichnung	455
14.2	Analoge magnetische Audio- und Videoaufzeichnung	456
14.3	Digitale Magnetaufzeichnung	457
14.3.1	Digitale magnetische Audioaufzeichnung	458
14.3.2	Digitale magnetische Videoaufzeichnung	460
14.3.3	Magnetische Aufzeichnung von Datensignalen	468
14.4	Bandlose Aufzeichnungstechniken für Audio- und Videosignale ...	468
14.5	Zusammenfassung	471
14.6	Lernziel-Test	472
15	Multimediale Speichersysteme	473
15.1	Compact-Disc-System	473
15.1.1	Mechanischer Aufbau der CD	473
15.1.2	Datenorganisation und Codierung	475
15.1.3	CD-Standards	479
15.1.4	Compact-Disc-Wiedergabegeräte	481
15.1.5	Herstellung der CD	487
15.2	DVD-Systemfamilie	490
15.2.1	DVD-Basistypen	491

15.2.2	DVD – Datenorganisation und Codierung	494
15.2.3	DVD-Anwendungen – DVD-Video, DVD-Audio und DVD-ROM	495
15.2.4	Herstellung der DVD und SACD	502
15.3	BD (Blu-ray) und HD-DVD	504
15.4	Ultra HD Blu-ray Disc	507
15.5	Speicherkarten	508
15.6	Zusammenfassung	511
15.7	Lernziel-Test	513
16	Wiedergabe- und Empfängertechnik	515
16.1	Wiedergabetechniken	515
16.1.1	Katodenstrahlröhren – CRT (Cathode Ray Tube)	516
16.1.2	Rasterorientierte Flachbildschirme	517
16.1.3	Plasmabildschirme	518
16.1.4	Flüssigkristallanzeige – LCD (Liquid Crystal Display) ..	519
16.1.5	Mikrospiegeltechnik – DLP (Digital Light Processing)	520
16.1.6	LED- und OLED-Bildschirme	522
16.1.7	Farb- und Kontrastdarstellung	524
16.2	Analoge Empfängertechnik	527
16.3	Digitale Signalverarbeitung im Empfänger	528
16.3.1	Qualitätsverbesserung im TV-Empfänger	528
16.3.2	Digitale Empfangstechnik	529
16.4	Analoge und digitale Schnittstellen für SDTV und HDTV	532
16.4.1	Analoge Schnittstellen	532
16.4.2	Digitale Schnittstellen	533
16.4.3	Digitale AV-Übertragung über CAT-Kabel	536
16.4.4	Endgerätebezeichnungen im HDTV-Umfeld	538
16.5	Zusammenfassung	540
16.6	Lernziel-Test	541
17	Leitungsvermittelte Kommunikationsnetze	543
17.1	Entwicklung und Vorbetrachtung	543
17.2	Analoger Fernsprechkanal	545
17.2.1	Grundlagen der Fernsprechtechnik	545
17.2.2	Kenngrößen des analogen Fernsprechkanal	545
17.3	Analoge Fernsprechübertragungstechnik	548
17.3.1	Grundlegender Aufbau	548
17.3.2	Übertragung im Basisband	549
17.3.3	Trägerfrequente Übertragung der Fernsprechsignale	550
17.4	Digitale Fernsprechübertragungssysteme	554
17.4.1	Übertragungsverfahren im ISDN	554
17.4.2	Übertragungsverfahren auf der S_0 -Schnittstelle	554
17.4.3	Übertragungsverfahren auf der U_{K0} -Schnittstelle	558
17.4.4	Übertragungsverfahren bei Primärmultiplexanschlüssen	558
17.5	Grundlagen der Vermittlungstechnik	559
17.5.1	Vorbetrachtung	559
17.5.2	Geografische Zuordnung der Teilnehmer zu einer	

	Vermittlungseinheit	560
17.5.3	Identifikation der Teilnehmer	561
17.5.4	Konzentration, Richtungs Auswahl und Expansion	564
17.5.5	Die Steuerung des Verbindungsaufbaus	566
17.5.6	Wahlverfahren zum Verbindungsaufbau	568
17.6	Elektromechanische Vermittlungssysteme	571
17.7	Digitale Vermittlungssysteme	573
17.7.1	Grundprinzip digitaler Vermittlung	574
17.7.2	Funktionsprinzip einer digitalen Raumstufe	575
17.7.3	Funktionsprinzip einer digitalen Zeitstufe	577
17.7.4	Baugruppen einer digitalen Vermittlung	580
17.7.5	Verbindungsaufbau über eine digitale Vermittlungseinheit ...	584
17.8	Struktur der nationalen Vermittlungstechnik	586
17.9	Mehrfachausnutzung der Teilnehmeranschlussleitung	592
17.9.1	Grundlagen der 2-Draht-DSL-Technik	593
17.9.2	2-Draht-DSL-Systeme	597
17.10	Zusammenfassung	601
17.11	Lernziel-Test	602
18	Paketvermittelte Kommunikationssysteme und Computernetzwerke	605
18.1	Allgemeine Grundlagen	605
18.2	Zugriffverfahren	607
18.2.1	ALOHA-Verfahren	608
18.2.2	Carrier Sense Multiple Access – CSMA	610
18.2.3	Token Passing	613
18.2.4	Polling	614
18.2.5	Reservierungsverfahren	615
18.3	Standards für lokale Computernetze	615
18.3.1	Überblick über die Standards der Familie IEEE 802	615
18.3.2	IEEE 802.3 – Ethernet	616
18.3.3	IEEE 802.4 – Token Bus	624
18.3.4	IEEE 802.5 – Token Ring	626
18.4	Paketorientierte Übertragung im Weitverkehr	628
18.4.1	Grundlagen der Paketvermittlung	629
18.4.2	Wegefindung im Netz – Paket-Routing	632
18.5	Kommunikation im Internet	633
18.5.1	Historische Entwicklung	633
18.5.2	TCP/IP-Kommunikationsmodell	635
18.5.3	Aufgaben und Protokolle der Internet-Schicht	636
18.5.4	Aufgaben und Protokolle der Transportschicht	647
18.5.5	Aufgaben und Protokolle der TCP/IP-Anwendungsschicht ...	652
18.5.6	Sprachübertragung über die Internet-Protokolle: Voice over IP	656
18.5.7	Audio- und Video-Streaming	662
18.6	Zusammenfassung	666
18.7	Lernziel-Test	667
19	Mobilfunksysteme	669

19.1	Allgemeine Übersicht	669
19.1.1	Einsatzgebiete	669
19.1.2	Generationen von Mobilfunksystemen	669
19.1.3	Öffentliche Mobilfunknetze in Deutschland und ihre Frequenzbänder	671
19.1.4	Weitere wichtige Funksysteme	672
19.1.5	Die besonderen Herausforderungen bei Mobilfunksystemen	673
19.1.6	Das zellulare Prinzip und die Wiederverwendung von Frequenzen.....	675
19.1.7	Versorgungsplanung – Größe von Funkzellen	677
19.2	Das GSM-System	681
19.2.1	Dienste und Anwendungen	681
19.2.2	Funkkanäle im GSM-System	683
19.2.3	Steuerungskanäle bei GSM	685
19.2.4	Systemarchitektur	687
19.2.5	Prozeduren vor dem Verbindungsaufbau	690
19.2.6	Verbindungsaufbau	692
19.2.7	Prozeduren zur Verbindungssteuerung	694
19.3	Long Term Evolution LTE	695
19.3.1	Dienste und Anwendungen	696
19.3.2	Frequenzbereiche	697
19.3.3	Übertragungstechnik	698
19.3.4	Konfiguration physikalischer Kanäle und Ressourcen- zuteilung.....	701
19.3.5	Systemarchitektur	704
19.3.6	Kommunikationsprotokolle in 4G/LTE und das Konzept des Bearers	708
19.3.7	Wichtige Prozeduren in einem LTE-Netz	711
19.4	Die 5. Generation Mobilfunk – 5G	715
19.4.1	Anwendungsbereiche von 5G	716
19.4.2	5G-Frequenzbereiche	719
19.4.3	Übertragungstechnik, Massive MIMO und Beamforming ...	719
19.4.4	Systemarchitektur und Network Slicing	722
19.5	Wireless Local Area Networks (WLAN)	727
19.5.1	Anwendungen und Netzstrukturen	727
19.5.2	Übersicht über den Standard	729
19.5.3	Zugriffsverfahren	730
19.5.4	Übertragungsverfahren bei Wireless LANs.....	733
19.6	Bluetooth	738
19.6.1	Überblick über den Bluetooth-Standard und seine Anwendungen	738
19.6.2	Übertragungstechnik	739
19.6.3	Netzstrukturen	741
19.7	ZigBee	742
19.8	Lernziel-Test	745
	Literaturverzeichnis	749
	Stichwortverzeichnis	753

2 Elektronische Netzwerke

2.1 Netzwerke als Bestandteil von Nachrichtensystemen

Das Schema einer Nachrichtenübertragung wurde schon in Bild 1.3 vorgestellt. Ein derartiges Nachrichtensystem kann aus mehreren Komponenten bestehen. Die Komponenten selbst enthalten elektrische Schaltungen und Bauelemente, die man auch als *Netzwerke* bezeichnet.

Definition

Ein Netzwerk ist eine aus Bauelementen aufgebaute elektrische Schaltung.



Zur Analyse und Erläuterung der Funktion ist die Unterteilung größerer Komponenten in Einzelnetzwerke unerlässlich. In diesem Kapitel werden in der Nachrichtentechnik wichtige Netzwerke und ihr Verhalten vorgestellt. Da Netzwerke Bestandteile eines Systems sein können, gelten die in Abschnitt 1.3 definierten Begriffe auch für Netzwerke. So werden aktive und passive sowie lineare und nichtlineare Netzwerke unterschieden. Nachfolgend werden passive lineare Netzwerke betrachtet, die in der Nachrichtentechnik vor allem wegen ihres frequenzabhängigen Verhaltens eingesetzt werden.

Netzwerke können unter anderem auch nach der Zahl ihrer Anschlüsse eingeteilt werden. Praktisch von Interesse sind Zweipole, Vierpole und Mehrpole (Bild 2.1). Ein Zweipol (Eintor) ist das einfachste Netzwerk überhaupt. Bei ihm liegen Ein- und Ausgang an den gleichen Klemmen (Bild 2.1a).

Der Vierpol (Zweitor) ist das wichtigste Netzwerk in der Praxis. Ein- und Ausgang sind voneinander getrennt (Bild 2.1b). Die äußere Beschaltung des Vierpols legt dann die Richtung der Signalübertragung fest. Häufig sind Zweitore keine «echten» Vierpole, sondern Dreipole, bei denen ein Pol gemeinsam für Ein- und Ausgang genutzt wird.

Unabhängig von ihrem inneren Aufbau sind Mehrpole dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Ein- und Ausgangsklemmenpaare vorhanden sind (Bild 2.1c). Solche Schaltungen spielen in der Nachrichtentechnik ebenfalls eine Rolle, da dadurch z.B. verschiedene Teilnehmer von einer Nachrichtenquelle gleichzeitig versorgt werden können.

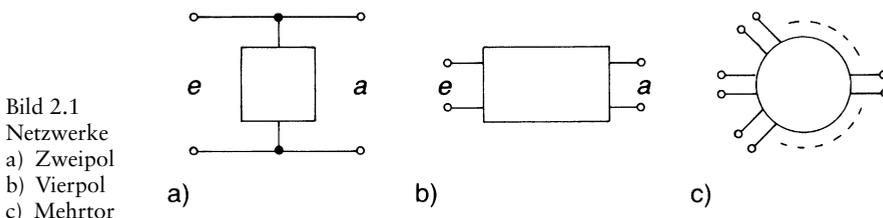


Bild 2.1
Netzwerke
a) Zweipol
b) Vierpol
c) Mehrtor

Nach einer kurzen Beschreibung von Zweipolen in Abschnitt 2.2 werden vor allem allgemeine Vierpole und ihre Eigenschaften dargestellt. Daran schließen sich Betrachtungen über Filterschaltungen und ihre technischen Realisierungen an (Ab-

schnitt 2.4) – ein Hauptanwendungsgebiet passiver linearer Vierpole in der Nachrichtentechnik.

2.2 Zweipole

Da Ein- und Ausgang bei einem Zweipol nach Bild 2.1a an den gleichen Klemmen liegen, kann eine Übertragungsfunktion H nicht angegeben werden. Die elektrischen Eigenschaften eines Zweipols lassen sich aber eindeutig durch seinen resultierenden Gesamtwiderstand \underline{Z} (er kann komplexwertig sein, deshalb die Kennzeichnung durch den Strich, und von der Frequenz abhängen) beschreiben. Man nennt diese frequenzabhängige Widerstandsfunktion auch *Zweipolfunktion*.

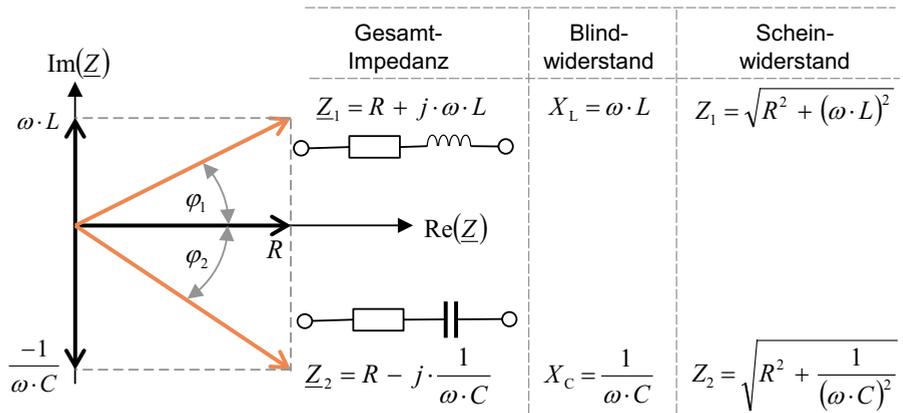


Bild 2.2 Zeiger-Diagramm und komplexwertige Impedanzen für Reihenschaltungen aus einem ohmschen und einem induktiven bzw. kapazitiven Widerstand

Am Beispiel der Reihenschaltung von Kondensator C und ohmschem Widerstand R soll gezeigt werden, wie man die Zweipolfunktion bestimmt. Aus dem Zeigerdiagramm der beiden in Reihe liegenden Widerstände R und X_C in Bild 2.2 ergibt sich für den Betrag des Gesamtwiderstandes

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \quad (\text{Gl. 2.1})$$

und für den Phasenwinkel

$$\tan \varphi = -\frac{X_C}{R} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Der negative Wert von φ ist durch die übliche Zählweise von Winkeln entgegengesetzt dem Uhrzeigersinn zu erklären.

Für den kapazitiven Widerstand des Zweipols gilt:

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

(Gl. 2.3)

Daraus resultiert die in Bild 2.3 qualitativ dargestellte Abhängigkeit der Zweipolfunktion von der (Kreis-) Frequenz. Man beachte die asymptotischen Näherungen für die Extrema der Frequenz.

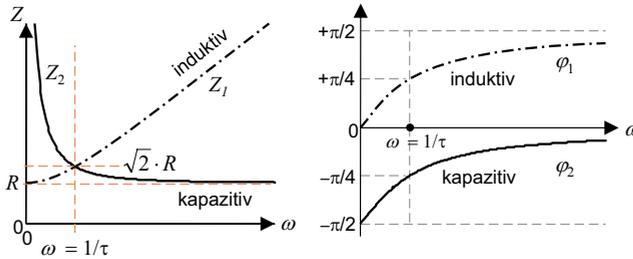


Bild 2.3 Frequenzabhängige Zweipolfunktionen für die Impedanzen aus Bild 2.2

a) Betrag b) Phase

Definition



Die Zweipolfunktion beschreibt das frequenzabhängige Verhalten des Zweipols mit Hilfe seines komplexen Widerstandes.

Reihenschwingkreis	Allgemeine Resonator-Kenngrößen	Parallelschwingkreis	
	Resonanzkreisfrequenz $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$ Kennwiderstand $Z_K = \sqrt{\frac{L}{C}}$ Doppelverstimmung $v = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}$		
komplexe Impedanz $\underline{Z}_R = R_R + j \cdot \omega \cdot L - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}$ $\underline{Z}_R = R_R + j \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} \left(\omega \cdot \sqrt{L \cdot C} - \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{L \cdot C}} \right)$ $\underline{Z}_R = R_R + j \cdot Z_K \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$ $\underline{Z}_R = R_R \left(1 + j \cdot \frac{Z_K}{R_R} \cdot v \right) = R_R (1 + j \cdot Q_R \cdot v)$ $\text{Güte } Q_R = \frac{Z_K}{R_R} = \frac{\omega_0 \cdot L}{R_R} = \frac{1}{R_R \cdot \omega_0 \cdot C}$		komplexe Admittanz $\underline{Y}_P = \frac{1}{R_P} + j \cdot \omega \cdot C - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot L}$ $\underline{Y}_P = \frac{1}{R_P} + j \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \left(\omega \cdot \sqrt{L \cdot C} - \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{L \cdot C}} \right)$ $\underline{Y}_P = \frac{1}{R_P} + j \cdot \frac{1}{Z_K} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)$ $\underline{Y}_P = \frac{1}{R_P} \left(1 + j \cdot \frac{R_P}{Z_K} \cdot v \right) = \frac{1}{R_P} (1 + j \cdot Q_P \cdot v)$ $\text{Güte } Q_P = \frac{R_P}{Z_K} = R_P \cdot \omega_0 \cdot C = \frac{R_P}{\omega_0 \cdot L}$	

Bild 2.4 Reihen- und Parallelschwingkreis als Zweipole mit ihren Kenngrößen

Da der Widerstand Z aber Quotient aus Spannung U und Strom I ist, wird auch gleichzeitig das frequenzabhängige Verhalten dieser Größen miterfasst.

Ein für die Nachrichtentechnik wichtiger Zweipol ist der *Schwingkreis*. Er besteht aus der Reihen- oder Parallelschaltung von Spule und Kondensator. Da diese technischen Bauelemente verlustbehaftet sind, ist ein ohmscher Widerstand in der Ersatzdarstellung zu berücksichtigen (Bild 2.4). Für den Parallelresonanzkreis ergibt sich der Betrag des Gesamtwiderstandes zu

$$Z = \frac{R_p}{\sqrt{1 + Q_p^2 \nu^2}} \quad (\text{Gl. 2.4})$$

wobei Q_p die Güte

$$Q_p = R_p \cdot \omega_0 \cdot C = \frac{R_p}{\omega_0 \cdot L} \quad (\text{Gl. 2.5})$$

und ν die Doppelverstimmung

$$\nu = \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \quad (\text{Gl. 2.6a})$$

des Resonators sind. Die Namensgebung rührt daher, dass ν die Abweichung von der Resonanzfrequenz beschreibt ($\nu = 0$ für $\omega = \omega_0$). Mit zunehmender Güte sinkt die (Band-)Breite $B = f_0/Q$ der Resonanzkurve – die Resonanz wird stärker ausgeprägt.

In Bild 2.5 sind der Betrag und der Phasenverlauf

$$\varphi = -\arctan(Q_p \cdot \nu) \quad (\text{Gl. 2.6b})$$

dargestellt. Es zeigt sich, dass die Zweipolfunktion des Parallelkreises bei Resonanz ein Widerstandsmaximum aufweist. Unterhalb der Resonanz ergibt sich ein induktives Verhalten (φ ist positiv), oberhalb ein kapazitives.

Der Parallelresonanzkreis hat große praktische Bedeutung als Filterschaltung. In Abschnitt 2.4 werden daher weitere Eigenschaften diskutiert. Zusammenschaltungen von Blindwiderständen (Spulen und Kondensatoren ohne Verluste) nennt man *Reaktanzzweipole*. Neben den beiden vorgestellten Resonanzkreisen sind auch Kombinationen von mehreren Blindwiderständen üblich. Damit lassen sich Zweipolfunktionen mit speziellem Verhalten erzeugen. Die Verluste der Bauteile dürfen jedoch nicht unbeachtet bleiben, da sie das reale Verhalten mitbestimmen. Anwendung finden diese Schaltungen in Filterbaugruppen.

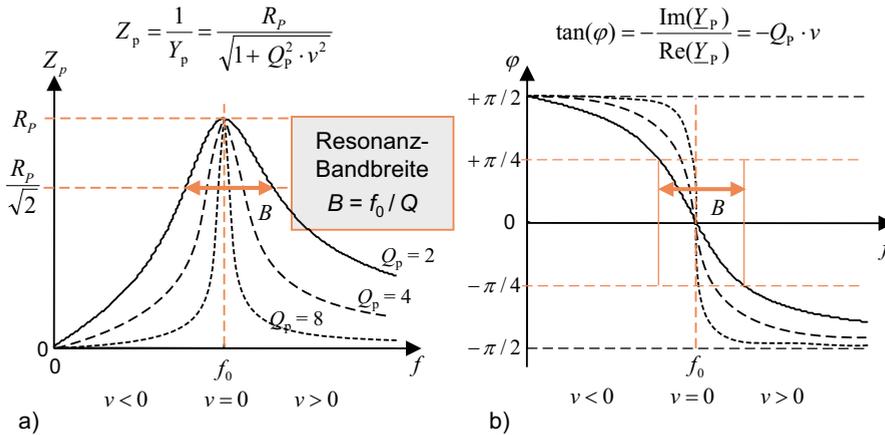


Bild 2.5 Frequenzabhängige Zweipolfunktionen für die Impedanzen aus Bild 2.2
 a) Betrag b) Phase

Auf eine weitere Gruppe von Zweipolen sei noch hingewiesen, die Ersatzzweipole für Quelle und Senke. Quelle und Senke einer Nachrichtenverbindung nach Bild 1.3 sind Zweipole (Eintore). Will man diese möglichst einfach darstellen, so muss die Quelle mindestens einen Generator und einen Innenwiderstand, die Senke mindestens den Lastwiderstand enthalten. Bild 2.6 zeigt mögliche Ersatzzweipole. Für die Analyse von Netzwerken sind solche Ersatzzweipole von großer praktischer Bedeutung. Wie die Elemente der Ersatzzweipole aus den tatsächlichen Quellen und Senken gewonnen werden, kann nur anhand spezieller Anordnungen gezeigt bzw. berechnet werden.

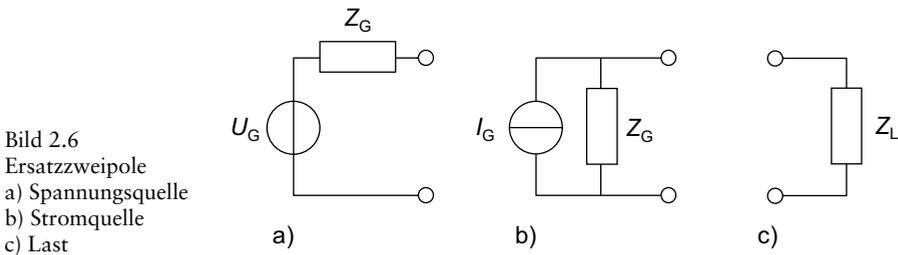


Bild 2.6 Ersatzzweipole
 a) Spannungsquelle
 b) Stromquelle
 c) Last

2.3 Vierpole

Die am häufigsten in der Nachrichtentechnik vorkommenden Systembestandteile sind Vierpole. Das können Leitungen, Filter, Verstärker, Umsetzer, Wandler u.a. sein. Vierpole bestehen aus den verschiedenen Schaltelementen, wie R, L, C, aber auch Transistoren, Dioden und Schaltern. Im Folgenden sollen zunächst passive lineare Vierpole aus konzentrierten Elementen betrachtet werden.

Merksatz

Die Systemeigenschaften von Vierpolen werden durch ihre Übertragungsfunktionen bestimmt.



Um eine Übertragungsfunktion nach Abschnitt 1.3 angeben zu können, muss der Vierpol bezüglich seiner Ein- und Ausgangsgrößen näher beschrieben werden. In Bild 2.7 ist ein Vierpol nach Bild 2.1b in einer Anwenderschaltung dargestellt. Dabei wurde die vor dem Vierpol befindliche Schaltung durch eine Ersatzspannungsquelle (Zweipol) und die an den Vierpol anschließende Schaltung durch einen Ersatzlast-Zweipol symbolisiert. Der Eingang wird mit 1, der Ausgang mit 2 bezeichnet. Strom und Spannung ergeben sich entsprechend. Der Ausgangsstrom I_2 fließt definitionsgemäß in den Vierpol hinein. In der Literatur ist auch die umgekehrte Stromrichtung zu finden, was bei der Angabe der Vierpolfunktionen bzw. dessen Vorzeichen zu beachten ist.

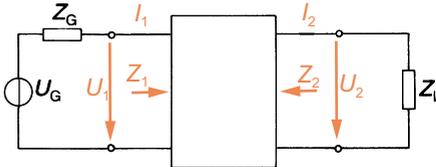


Bild 2.7
Beschalteter Vierpol

Neben Strom und Spannung sind auch die Widerstände Z_1 und Z_2 angegeben. Diese Widerstände sind aber keine Zweipolfunktionen, denn sie hängen auch von der Beschaltung des Vierpols ab. Eine der Zweipolfunktion adäquate Darstellung des Vierpols ist deshalb nicht möglich. Alle Größen können frequenzabhängig sein. Auf die Kennzeichnung durch Unterstreichen wird im Interesse der Übersichtlichkeit nachfolgend aber verzichtet.

2.3.1 Vierpolersatzdarstellungen

Zur Beschreibung eines Vierpols benutzt man so genannte *Vierpolparameter*, die aus vereinfachten Betrachtungen gewonnen werden. Bei den Widerstandsparametern bestimmt man die Ein- und Ausgangswiderstände aus speziellen Beschaltungen des Vierpols wie folgt:

- Eingangswiderstand Z_{11} bei Leerlauf am Ausgang ($I_2 = 0$),
- Rückwirkungswiderstand Z_{12} bei Leerlauf am Eingang ($I_1 = 0$),
- Übertragungswiderstand Z_{21} bei Leerlauf am Ausgang ($I_2 = 0$),
- Ausgangswiderstand Z_{22} bei Leerlauf am Eingang ($I_1 = 0$).

Der Vierpol wird damit durch die Gleichungen

$$U_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 \quad (\text{Gl. 2.7})$$

$$U_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 \quad (\text{Gl. 2.8})$$

beschrieben. In Bild 2.8 ist die Ersatzschaltung des so beschriebenen Vierpols zu sehen. Sie gilt unabhängig von der tatsächlichen Schaltung für lineare passive (und – wie in Kapitel 3 noch gezeigt wird – auch für aktive) Vierpole.

Die Vierpolparameter werden häufig durch Messung gewonnen, wobei die oben angegebenen Definitionen als Messvorschrift dienen.

Wie schon erläutert, entstehen Nachrichtenverbindungen durch Zusammenschalten von Systemelementen, also u.a. auch von Vierpolen. Die wohl verbreitetste Zusammenschaltung ist die *Kettenschaltung*. Bild 2.10 zeigt exemplarisch die Kettenschaltung zweier Vierpole, deren Berechnung jedoch relativ aufwendig ist.

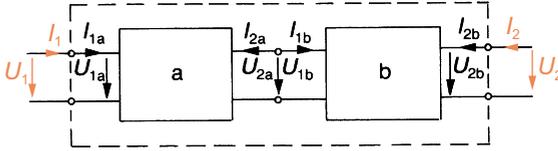


Bild 2.10
Kettenschaltung zweier
Vierpole

2.3.2 Betriebsparameter

Um das Verhalten des Vierpols in der Schaltung zu beschreiben, bedient man sich der Betriebsparameter (auch Übertragungsfaktoren genannt). Sie ergeben sich aus der jeweiligen Beschaltung des Vierpols.



Merksatz

Die Betriebsparameter bzw. die Übertragungsfunktion beschreiben das Verhalten eines Vierpols in der Schaltung mit Hilfe der Vierpolparameter.

Ausgangspunkt der Berechnung sind die in Bild 2.7 rot eingezeichneten Größen. Da in der Regel der Wert für U_G nicht bekannt ist, verwendet man die Verhältniswerte von Strom und Spannung an Ein- und Ausgang:

Spannungsverstärkung	$V_U = \frac{U_2}{U_1}$	(Gl. 2.10)
----------------------	-------------------------	------------

Stromverstärkung	$V_I = \frac{I_2}{I_1}$	(Gl. 2.11)
------------------	-------------------------	------------

Eingangswiderstand	$Z_1 = \frac{U_1}{I_1}$	(Gl. 2.12)
--------------------	-------------------------	------------

Ausgangswiderstand	$Z_2 = \frac{U_2}{I_2}$	(Gl. 2.13)
--------------------	-------------------------	------------