

Stefan Weinzierl (Hrsg.)

Handbuch der Audiotechnik

Stefan Weinzierl (Hrsg.)

Handbuch der Audiotechnik

Professor Dr. Stefan Weinzierl
Technische Universität Berlin
Fachgebiet Audiokommunikation
Einsteinufer 17c
10587 Berlin
stefan.weinzierl@tu-berlin.de

ISBN 978-3-540-34300-4

e-ISBN 978-3-540-34301-1

DOI 10.1007/978-3-540-34301-1

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.

© 2008 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-
sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung
in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine
Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Gren-
zen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom
9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig.
Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Buch
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. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften
oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann
der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt
sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der
jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Arnold & Domnick Verlagsproduktion, Leipzig
Herstellung: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Einbandgestaltung: WMXDesign, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

9 8 7 6 5 4 3 2 1

springer.com

Vorwort

Die Audiotechnik ist ein spezifisches Anwendungsfeld für Techniken, Verfahren und Zusammenhänge, die in verschiedenen Fachdisziplinen wie der Akustik, der Nachrichtentechnik, der Elektronik und der digitalen Signalverarbeitung beheimatet sind. Da sich die Anforderungen an Audio-Systeme in erster Linie aus den Eigenschaften der Klangerzeuger einerseits und der auditiven Wahrnehmung andererseits ableiten, spielen auch Erkenntnisse der Psychologie sowie technisch-künstlerische Konzepte im Bereich der Klangregie und der Musikproduktion eine wichtige Rolle.

Das vorliegende Handbuch soll einen Überblick über die wesentlichen Bestandteile einer Audioübertragungskette geben, die von der Klangerzeugung bis zum Hörer reicht. Es wendet sich an Tonmeister, Toningenieure und Tontechniker, an Entwickler ebenso wie an Anwender im Bereich der audiovisuellen Medientechnik, des Rundfunks und des Films. Anregungen zur Auswahl der behandelten Inhalte ergaben sich aus der langjährigen Tätigkeit des Herausgebers im Bereich der Musikproduktion und in der Lehre für Studierende in den Fächern Tonmeister, Kommunikationswissenschaft und Medienkommunikation an der Universität der Künste und der Technischen Universität Berlin.

Aus der Komplexität einer Audioübertragungskette (Abb. 1.1) ergibt sich zwangsläufig eine große Bandbreite von Themen. Sie reichen von akustischen und systemtheoretischen Grundlagen (Kap. 1) über die Eigenschaften der auditiven Wahrnehmung (Kap. 2 und 3), die Akustik musikalischer Klangerzeuger (Kap. 4), die Raumakustik von großen (Kap. 5) und kleinen (Kap. 6) Aufnahme- und Abhörräumen bis hin zu elektroakustischen Wandlern (Kap. 7 und 8) und den zugehörigen Aufnahme- und Wiedergabeverfahren (Kap. 10 und 11). Der elektroakustischen Beschallung von Live-Darbietungen ist ein eigener Abschnitt gewidmet (Kap. 9), ebenso der großen Vielfalt an Audio-Dateiformaten (Kap. 12), über die sich heute der Bezug von im Prinzip multimedialen Datenspeichern zum Audibereich definiert. Die Behandlung von Audibearbeitungsverfahren ist ein Paradefall für die Überschneidung von künstlerischen, technischen und wahrnehmungsspezifischen Aspekten (Kap. 13).

Seit etwa 30 Jahren wird die Audiotechnik immer stärker von der Digitaltechnik beherrscht (Kap. 14), von digitalen Verfahren der Signalverarbeitung (Kap. 15), der Kodierung (Kap. 16), den ständig weiterentwickelten Verfahren der Analog/Digital-Wandlung und der Prozessorarchitektur (Kap. 17). Probleme der Anschluss technik (Kap. 18), der drahtlosen Übertragung (Kap. 19), der Leitungsführung (Kap. 20) und der Messtechnik (Kap. 21) betreffen dagegen die analoge und die digitale Domäne gleichermaßen.

Die Integration von Ton, Bild und Schrift sowie die zunehmende Medienkonvergenz kann leicht den Blick verstellen für die Tatsache, dass sich unter der multimedialen Oberfläche hochspezialisierte, „monomediale“ Systeme von zunehmender Komplexität verbergen. Hier soll das Handbuch eine Lücke schließen zwischen praxisorientierten Ratgebern auf der einen und der wissenschaftlichen Forschungsliteratur auf der anderen Seite.

Anregungen, Kritik oder Fragen an die Autoren des Handbuchs sind, auch im Hinblick auf zukünftige Überarbeitungen, ausdrücklich erwünscht. Sie können auf der Seite <http://www.ak.tu-berlin.de/audiotechnik> in einem Forum geäußert und auch kommentiert werden.

Mein Respekt gilt dem Fachwissen und der fruchtbaren Zusammenarbeit mit den 22 Autoren des Handbuchs, die sich neben ihrer beruflichen Tätigkeit der zeitraubenden Aufgabe gewidmet haben, ihre Fachgebiete in umfassender und gleichzeitig komprimierter Form darzustellen. Mein Dank gilt dem Vertrauen, der Geduld und der guten Kooperation mit dem Springer Verlag in Person von Herrn Thomas Lehnert und Frau Sabine Hellwig. Ein besonderer Dank gilt den studentischen Mitarbeitern des Fachgebiets Audiokommunikation Robert Feldbinder, Julia Havenstein, Holger Kirchhoff, Martin Offik und Zora Schärer für die engagierte Mitwirkung bei der Literaturrecherche, der Textkorrektur und der Anfertigung von Abbildungen.

Berlin, im Juli 2007
Stefan Weinzierl

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen	1
	Stefan Weinzierl	
2	Hören – Psychoakustik – Audiologie	41
	Wolfgang Ellermeier und Jürgen Hellbrück	
3	Räumliches Hören	87
	Jens Blauert und Jonas Braasch	
4	Musikalische Akustik	123
	Jürgen Meyer	
5	Raumakustik	181
	Wolfgang Ahnert und Hanns-Peter Tennhardt	
6	Studioakustik	267
	Peter Maier	
7	Mikrofone	313
	Martin Schneider	
8	Lautsprecher	421
	Anselm Goertz	
9	Beschallungstechnik, Beschaltungsplanung und Simulation	491
	Wolfgang Ahnert und Anselm Goertz	
10	Aufnahmeverfahren	551
	Stefan Weinzierl	
11	Wiedergabeverfahren	609
	Karl M. Slavik und Stefan Weinzierl	
12	Dateiformate für Audio	687
	Karl Petermichl	

13	Audiobearbeitung	719
	Hans-Joachim Maempel, Stefan Weinzierl, Peter Kaminski	
14	Digitale Audiotechnik: Grundlagen	785
	Alexander Lerch und Stefan Weinzierl	
15	Digitale Signalverarbeitung, Filter und Effekte	813
	Udo Zölzer	
16	Bitratenreduktion	849
	Alexander Lerch	
17	Wandler, Prozessoren, Systemarchitektur	885
	Martin Werwein und Matthias Schick	
18	Anschlusstechnik, Interfaces, Vernetzung	945
	Karl M. Slavik	
19	Drahtlose Audioübertragung	1035
	Wolfgang Niehoff	
20	Schirmung und Erdung, EMV	1073
	Günter Rosen	
21	Messtechnik	1087
	Sven Müller	
	Autorenverzeichnis	1171
	Anhang: Institutionen, Verbände, Publikationen, Standards	1177
	Index	1185

Kapitel 1

Grundlagen

Stefan Weinzierl

1.1	Audioübertragung	1
1.2	Audiosignale und -systeme	5
1.2.1	Kontinuierliche und diskrete Signale	5
1.2.2	Zeitsignale und spektrale Darstellung	6
1.2.3	Signalformen und Mittelwerte	9
1.2.4	Systeme und Systemeigenschaften	13
1.2.5	Impulsantwort	16
1.2.6	Übertragungsfunktion	16
1.3	Schall und Schallfeldgrößen	18
1.3.1	Schalldruck und Schallschnelle	20
1.3.2	Feldimpedanz und Kennimpedanz	21
1.3.3	Schallgeschwindigkeit	22
1.3.4	Frequenz und Wellenlänge	23
1.3.5	Schallenergie	24
1.3.6	Schallleistung und Wirkungsgrad	25
1.3.7	Schallintensität	26
1.4	Pegel	28
1.5	Idealisierte Schallfelder	32
1.5.1	Ebene Welle	33
1.5.2	Kugelwelle	34
1.5.3	Nahfeld und Fernfeld	35
	Normen und Standards	39
	Literatur	39

1.1 Audioübertragung

Jede Form der auditiven Kommunikation durchläuft eine Übertragungskette. Im einfachsten Fall besteht sie aus einer Schallquelle, der Luft als akustischem Medium und einem Hörer. Bereits hier beeinflussen die Eigenschaften der Quelle, des Mediums, des umgebenden Raums und des Empfängers das Verständnis der übermittelten Nachricht auf charakteristische Weise. Jeder Musiker und jeder Schauspieler kann

bestätigen, wie stark seine „Botschaft“ etwa von den Eigenschaften des Aufführungsraums beeinflusst wird. Selbst in dieser Alltagssituation wird die Kommunikation also durch ein Audiosystem vermittelt und durch dessen Eigenschaften spezifisch geprägt, erst recht natürlich bei der Übertragung durch technische, elektronische Medien.

In der Audiotechnik werden Techniken und Verfahren behandelt, wie sie bei der Aufnahme, Übertragung, Speicherung und Wiedergabe von Audiosignalen eingesetzt werden, d.h. von Signalen mit Frequenzanteilen zwischen etwa 16 Hz und 20 kHz, die am Ende der Übertragungskette ein hörbares Schallereignis produzieren. Die Bandbreite des Audiobereichs ist hierbei nur unscharf abgegrenzt. Während am unteren Ende des Spektrums körperlich empfundene Vibrationen im Bereich zwischen 15 und 20 Hz allmählich in eine Tonhöhenempfindung übergehen (Guttman u. Julesz 1963, Buck 1980), weist die Hörschwelle oberhalb von 15 kHz starke intersubjektive Unterschiede auf, und eine Frequenz von 20 kHz dürfte für die meisten Leser dieses Handbuchs bereits altersbedingt außerhalb des Hörfelds liegen.

Besonders komplex ist die Audioübertragungskette im Bereich der Musikproduktion (Abb. 1.1). Dort umfasst sie die Aufnahme und Bearbeitung von Musiksignalen, deren logische und elektrische Kodierung, die Speicherung auf diversen physischen Tonträgern und Datenformaten, deren mehrfache auditive Kontrolle bei den einzelnen Bearbeitungsschritten Aufnahme, Mischung und Mastering und schließlich die Wiedergabe beim Rezipienten über ein großes Spektrum elektroakustischer Wandlertypen und Wiedergabeverfahren.

Der Aufbau dieser Audioübertragungskette, an dem sich auch die Systematik des vorliegenden Handbuchs orientiert, ist das Ergebnis einer etwa 150-jährigen medientechnischen Entwicklung. Für den Umgang mit dem in dieser Zeit gewachsenen, kulturellen Erbe an Audioproduktionen und historisch gewachsenen Bearbeitungsprozessen, sowie für die Arbeit mit historischen Tonträgern selbst, etwa wenn diese archiviert, wiedergegeben oder restauriert werden sollen, ist zumindest ein grober Überblick über die technologische Evolution hilfreich. An manchen Stellen erschien dem Herausgeber daher auch in einem technischen Handbuch ein kurzer Abriss historischer Techniken und Verfahren sinnvoll. Abb. 1.2 gibt zunächst einen Gesamtüberblick über wesentliche Innovationen in der Geschichte der Audiotechnik.

Die Einführung digitaler Übertragungstechniken, die im Bereich der Audiotechnik seit Ende der 1970er Jahre zu beobachten ist, hat inzwischen alle Bereiche der Übertragungskette erreicht. Lediglich der letzte Schritt, die Schallübertragung zum Hörer, wird wohl für immer „analog“ bleiben. Die Digitalisierung, die einen grundlegenden Wandel der technischen, künstlerischen, wirtschaftlichen, rechtlichen und gesellschaftlichen Bedingungen von audiovisuellen Medien ausgelöst hat, hat unter anderem zu einer fortschreitenden Miniaturisierung der Übertragungssysteme geführt. So beinhaltet jedes Mobiltelefon heute eine hochintegrierte Kette aus elektroakustischen Wandlern, Kodierungsverfahren, digitaler Audiosignalverarbeitung und Drahtlostechnik, die nur noch von einem Team aus spezialisierten Entwicklern zu überblicken ist (Abb. 1.3).

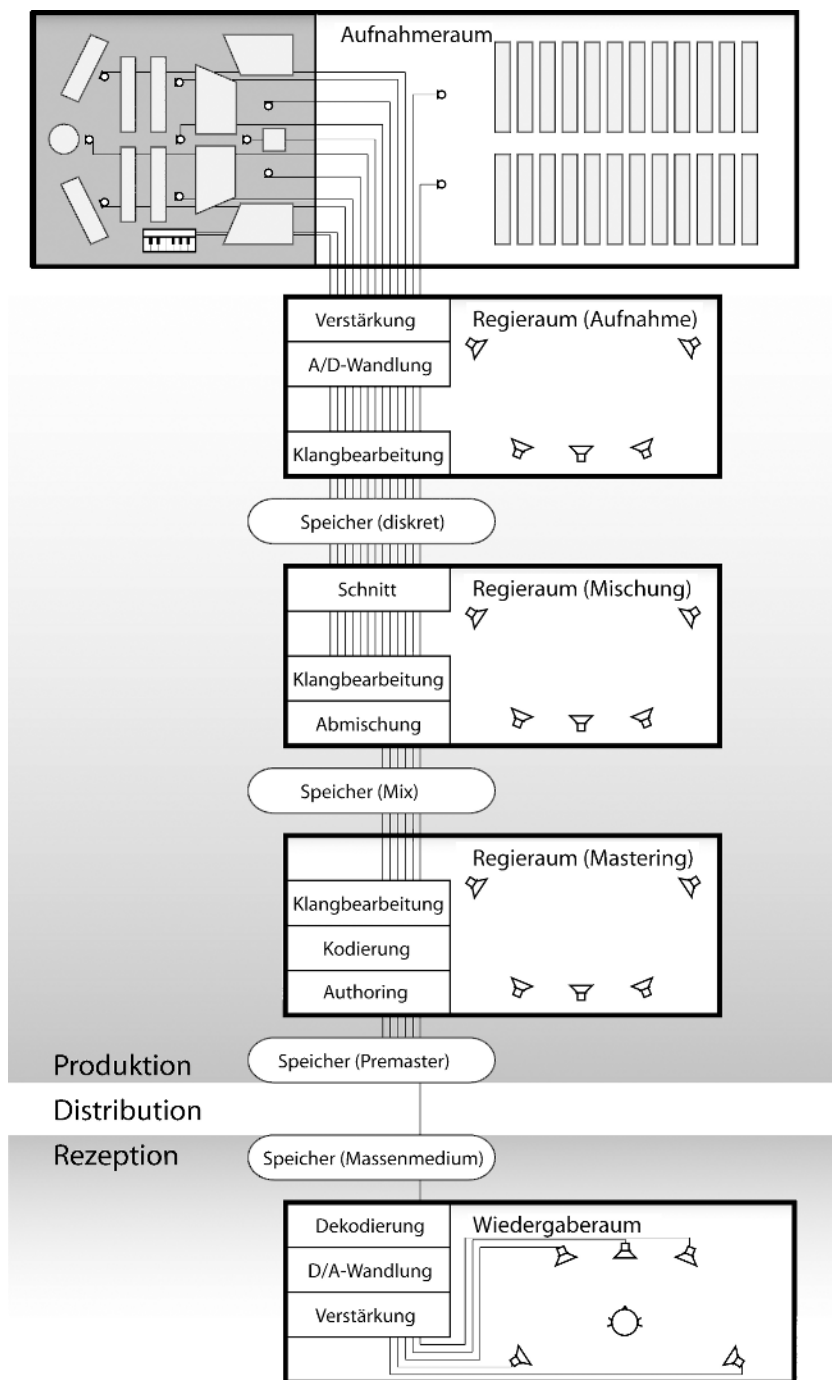


Abb 1.1 Audioübertragungskette im Bereich der Musikproduktion

Wandler		Aufnahme- und Wiedergabeverfahren	Tonträger, Formate und Medien
1860	Kontaktmikrofon (Philipp Reis 1861)		1860
1870	Kohlemikrofon (David Edward Hughes 1878)	Phonographie (Thomas Alva Edison 1877)	Telefon (Alexander Graham Bell 1876) Wachsylinder (Thomas Alva Edison 1877)
1880			Grammophonplatte (Emil Berliner 1887)
1890			
1900			
1910	Kondensatormikrofon (Edward Christopher Went 1917)		
1920			Rundfunk (In Deutschland 1923)
1930	Elektrodynamischer Konuslautsprecher (Edward Kellogg & Chester Rice, Western Electric 1925)	Elektrische Aufnahme und Wiedergabe (1925)	Tonfilm (1927)
			Magnetband (AEG/BASF 1935)
			Fernsehen (Sender Paul Nipkow 1935)
1940			Vinylplatte (1948)
1950		Stereofonie (1954)	
	Drahtlos-Mikrofon (Sennheiser 1957)		
1960	Elektret-Mikrofon (Sessler u. West 1962)		Stereofoner Rundfunk (USA 1961, BRD/DDR 1963)
	Transistor- Kondensatormikrofon (Sennheiser 1962)	Quadrofonie (1968)	Compact Cassette (1965)
1970		Kunstkopfstereofonie (Kürer/Plenge/Wilkens 1969)	
		Dolby Stereo (1976)	
		Ambisonics (Gerzon 1978)	
1980			Audio CD (1982)
			Internet (TCP/IP 1982)
			Audio Interchange File Format (AIFF, 1985)
			DAT (1987)
1990		Digitales Kino (Dolby Digital, DTS, SDDS 1991-94)	MiniDisc (1991)
		Wellenfeldsynthese (Berkhout/DeVries 1992)	
		5.1-Stereofonie (ITU-R BS. 997, 1993)	mp3 (.mp3-Extension, Winplay3 1995)
			DVD (1997)
			Digitaler Hörfunk (DAB Sachsen-Anhalt 1999)
2000	Kondensatormikrofon mit integriertem A/D-Wandler (Neumann Solution-D, 2003)		Digitales Fernsehen (DVB-T Berlin 2002)

Abb. 1.2 Zeittafel zur Geschichte der Audiotechnik

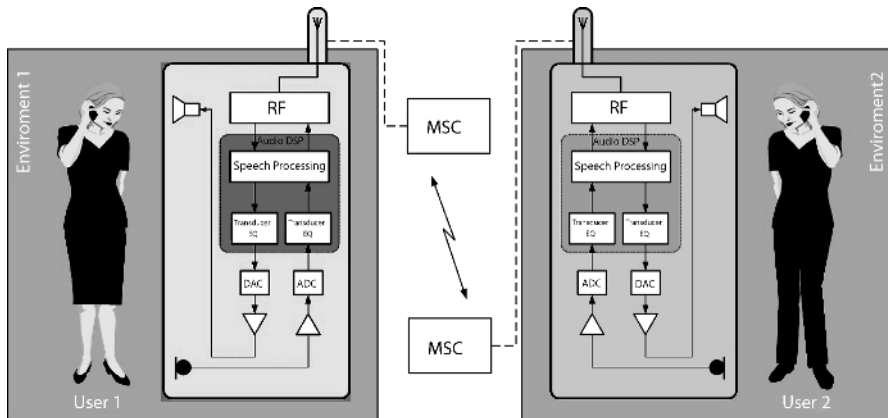


Abb. 1.3 Mobiltelefone als hochintegrierte Realisierungen einer komplexen Audiübertragungskette (Abb.: N. Zacharov/Nokia Corporation)

1.2 Audiosignale und -systeme

1.2.1 Kontinuierliche und diskrete Signale

Signale sind mathematische Funktionen oder Zahlenfolgen, die sich verändernde Größen beschreiben und dadurch Information repräsentieren. Beispiele aus dem Audibereich sind der Spannungsverlauf eines Mikrofons über der Zeit oder die Zahlenwerte, die ein Analog/Digital-Wandler nach der Abtastung dieses Signals generiert (Abb. 1.4). Bei Audiosignalen steht die horizontal aufgetragene, unabhängige Variable meist für einen Zeitverlauf, während die vertikal aufgetragene, abhängige Variable für einen Schalldruck oder eine elektrische Spannung stehen kann. Wenn beide Variablen beliebig fein abgestufte Werte annehmen können, spricht man von zeitkontinuierlichen bzw. wertekontinuierlichen Signalen, ansonsten von zeitdiskreten bzw. wertediskreten Signalen. Zeit- und wertekontinuierliche Signale nennt man *analog*, zeit- und wertediskrete Signale *digital*.

In Computern und digitalen Signalprozessoren können nur digitale Signale verarbeitet werden, da eine Darstellung von unendlich fein abgestuften Werten in einem binären System, das intern nur die Zustände 0 und 1 kennt, unendlich viel Speicherplatz und unendlich hohe Rechenleistung benötigen würde. Die Auflösung kann allerdings auch bei digitalen Signalen (wie bei der natürlich ebenfalls computergenerierten Abb. 1.4 links) so hoch sein, dass sie dem Betrachter quasi analog erscheint. Da auch bei analogen Systemen die Anzahl der unterscheidbaren Zustände durch das Auftreten von Störsignalen (Rauschen) beschränkt ist, ist die *verwertbare* Auflösung von digitalen Systemen heute meist höher als bei analogen Systemen.

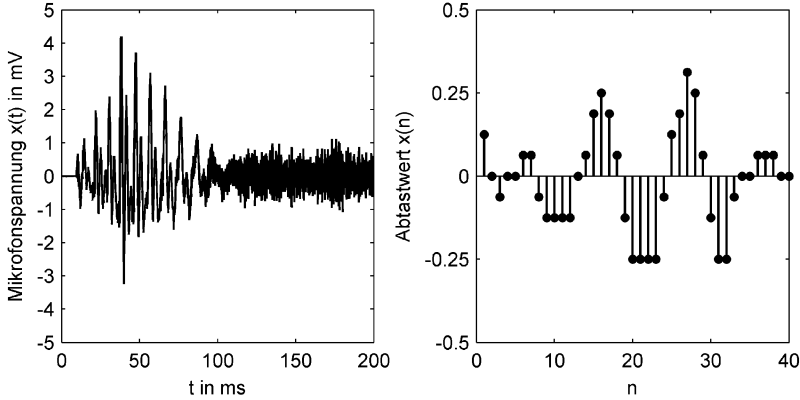


Abb. 1.4 Zwei Audiosignale: Zeit- und wertekontinuierliches Sprachsignal des Wortes „ich“ (links), aus der Analog/Digital-Wandlung eines Ausschnitts von 1 ms Dauer hervorgegangenes, zeit- und wertediskretes Signal, dargestellt als Zahlenfolge von Werten $x(n)$ über dem Index n (rechts)

1.2.2 Zeitsignale und spektrale Darstellung

Audiosignale lassen sich im Zeitbereich und im Frequenzbereich beschreiben. Während sich das Signal in der Zeitdarstellung als (diskrete oder kontinuierliche) Aneinanderreihung von Zuständen zu einzelnen Zeitpunkten t ergibt, kann man das Spektrum als Gewichtungsfunktion lesen, mit der harmonische Verläufe, d. h. sinusförmige, reine Töne mit der Frequenz f bzw. ω überlagert werden, um in ihrer Summe wiederum das Zeitsignal zu ergeben. Mathematisch erfolgt die Abbildung eines Zeitsignals $x(t)$ auf das zugehörige Spektrum $X(\omega)$ durch die Fouriertransformation (Analysegleichung)

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.1)$$

Sie verwandelt den Zeitverlauf einer physikalischen Größe $x(t)$ (Schalldruck, elektrische Spannung) in eine spektrale Darstellung $X(\omega)$, die den Anteil von harmonischen Schwingungen mit der Frequenz ω am Gesamtsignal angibt.

Die inverse Fouriertransformation (Synthese Gleichung)

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (1.2)$$

beschreibt die Abbildung, nach der sich Zeitsignale durch eine Überlagerung von komplexen, mit der Funktion $X(\omega)$ gewichteten Exponentialsignalen, d. h. sinus- und cosinusförmigen Schwingungen, zusammensetzen lassen.

Die Fouriertransformation für zeitdiskrete Signale lautet

$$X(\Omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j\Omega n} \quad (1.3)$$

Sie verwandelt eine zeitliche Abfolge von Zahlenwerten $x(n)$ in eine spektrale Darstellung $X(\Omega)$, aus der sich die Anteile von Periodizitäten mit der Frequenz Ω innerhalb des Signals ablesen lassen. Auch hier lässt sich die Abbildung umkehren und es gilt

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{2\pi} X(\Omega) e^{j\Omega n} d\Omega \quad (1.4)$$

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass es Signale gibt, für die das Integral in (1.1) nicht lösbar ist bzw. für die die Summe in (1.3) nicht konvergiert, die somit keine Fouriertransformierte besitzen (Unbehauen 2002, Girod et al. 2005). Vor allem bei der Transformation digitaler Abtastwerte hat man es jedoch stets mit in der Zeit und in der Amplitude begrenzten Signalen zu tun, für die diese Einschränkung keine Rolle spielt.

Die Periodizität von Signalen kann entweder durch die Frequenz f oder die Kreisfrequenz ω ausgedrückt werden. Die Frequenz f steht bei periodischen Signalen für die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde, die Kreisfrequenz ω steht für den pro Sekunde zurückgelegten Kreiswinkel Φ im Bogenmaß. Da sich eine sinusförmige Schwingung als ein längs einer Zeitachse projizierter, „abgewickelter“ Kreisumlauf darstellen lässt, entspricht ein voller Durchlauf einem Kreiswinkel von 2π .

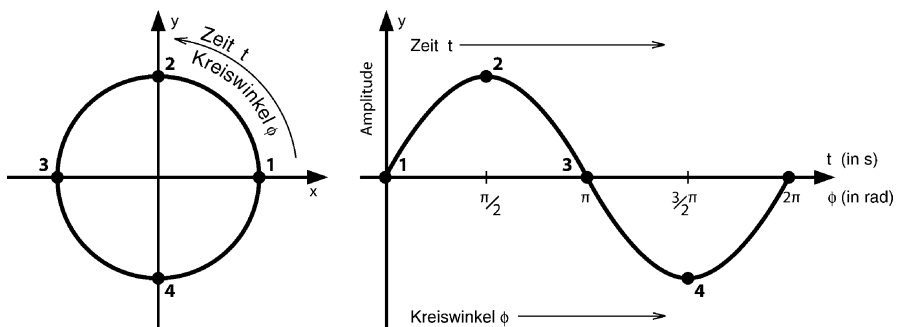


Abb. 1.5 Kreisumlauf und Sinusfunktion – Frequenz und Kreisfrequenz

Somit ist

$$\omega = 2\pi f \quad (1.5)$$

Die Einheit für die Frequenz f ist 1 Hertz (Hz) = s^{-1} , die Einheit der Kreisfrequenz ω mit $[\omega] = s^{-1}$ darf, um Verwechslungen vorzubeugen, nicht in Hz angegeben werden.

Solange bei zeitdiskreten Wertefolgen der zeitliche Abstand zwischen zwei Werten nicht bekannt ist, kann auch die Frequenz zunächst nur auf die Abtastfrequenz f_s bezogen werden, die aus dem zeitlichen Abstand zweier Abtastwerte resultiert. Die Frequenz zeitdiskreter Zahlenfolgen wird daher durch die *normierte Kreisfrequenz* Ω charakterisiert. Sie gibt den von Abtastwert zu Abtastwert zurückgelegten Kreiswinkel an. Erst wenn die Abtastfrequenz f_s bekannt ist und damit die Zeitdifferenz $T = 1/f_s$ zwischen zwei Abtastwerten, kann der Index n durch einen Zeitpunkt t und die dimensionslose normierte Kreisfrequenz Ω über den Zusammenhang

$$\Omega = 2\pi \frac{f}{f_s} \quad (1.6)$$

durch eine Frequenz f in Hz ersetzt werden.

Die Fouriertransformation ist eine eindeutige Abbildung, d. h. zu einem Signal $x(t)$ gehört genau ein Spektrum $X(\omega)$. Beide Darstellungen haben somit den gleichen Informationsgehalt. Die subjektive Klangempfindung, die mit einem Audiosignal verbunden ist, lässt sich jedoch mit einem Spektrum häufig besser beschreiben als mit der Zeitdarstellung. So ließe sich zwar die Tonhöhe, deren Empfindung beim Hörer durch zeitperiodische Signale ausgelöst wird, durch Bestimmung der Periodendauer auch im Zeitsignal erkennen. Die Klangfarbe jedoch, die jeder natürlichen Klangerzeugung zukommt, lässt sich einfacher im Spektrum des Klangs ablesen, wo neben der Grundfrequenz eine Reihe von Harmonischen oder Obertönen bei ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz auftritt, deren Amplituden relativ zur Grundperiode für den Klang charakteristisch sind. Bei der Zählung der Harmonischen wird der Grundton als 1. Harmonische mitgezählt, bei der Zählung der Obertöne nicht, d. h. der 1. Oberton entspricht der 2. Harmonischen. Geräuschhafte Klänge weisen im Spektrum auch nichtharmonische Signalanteile auf, die zwischen den einzelnen Obertönen liegen.

Die Fouriertransformation nach (1.1) und (1.3) liefert zunächst eine komplexwertige Funktion $X(\omega)$ oder $X(\Omega)$, deren Werte sich in einem zweiten Schritt in einen Betrag und einen Phasenwinkel aufspalten lassen. Das Betragsspektrum (auch Amplitudengang) gibt dabei Auskunft über den Anteil bestimmter Frequenzen im Audiosignal, das Phasenspektrum (Phasengang) zeigt die Phasenlage dieser Komponenten relativ zum (willkürlich gewählten) Zeitnullpunkt (Abb. 1.6). Während man im Zeitverlauf in Abb. 1.6 nicht viel mehr als den periodischen, sinusähnlichen Verlauf erkennt, wird im Spektrum neben dem Grundton eine Folge von Obertönen sichtbar, außerdem rauschhafte Anteile, die hauptsächlich durch das Anblasgeräusch der Flöte bedingt sind. Die im Phasenspektrum sichtbare, chaotische Phasenlage der einzelnen Spektralanteile zueinander ist für den unmittelbaren Klangeindruck weitgehend unerheblich, allerdings kann die Änderung der Phasenlage durch ein Übertragungssystem sehr wohl eine Rolle spielen, da die Überlagerung von Signalen mit unterschiedlicher Phasenlage Klangverfärbungen durch frequenzabhängige Auslösungen oder Verstärkungen hervorrufen kann.

Wenn sich der Zeitverlauf eines Signals durch eine Funktion $x(t)$ analytisch angeben lässt, kann das Spektrum nach (1.1) tatsächlich analytisch berechnet werden.

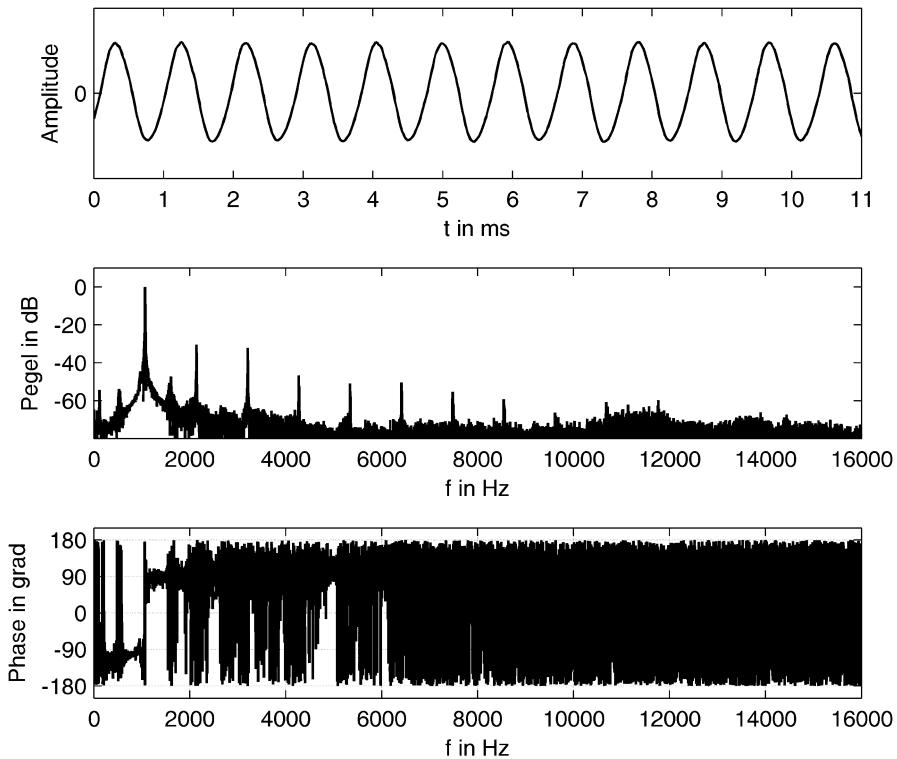


Abb. 1.6 Ton einer Querflöte (c''' entsprechend einem Grundton von etwa 1060 Hz): Zeitverlauf (oben), Betragsspektrum (Mitte) und Phasenspektrum (unten)

Da reale Musik- oder Sprachsignale jedoch keiner mathematischen Funktion folgen, überlässt man dies in der Praxis meist einem Computer, der abgetastete Zeitverläufe mit Hilfe eines FFT-Algorithmus, der nichts anderes als eine effiziente Realisierung von (1.3) darstellt, in spektrale Koeffizienten verwandelt (s. Kap. 15 und messtechnische Grundlagen in Kap. 21).

1.2.3 Signalformen und Mittelwerte

1.2.3.1 Deterministische Signale

Deterministische Signale sind in ihrem Zeitverlauf durch eine mathematische Funktion $x(t)$ gegeben. Beispiele sind *Sinussignale* der Form

$$x(t) = \hat{x} \sin \omega_0 t \quad (1.7)$$

mit dem Scheitelwert $\hat{x}$ und einer singulären spektralen Komponente bei der Frequenz ω_0 .

Sägezahnsignale besitzen ein Spektrum, in dem alle harmonischen Vielfachen der Grundfrequenz ω_0 vertreten sind. *Rechtecksignale* enthalten im Spektrum nur ungeradzahlig Vielfache der Grundfrequenz, ebenso wie *Dreiecksignale*. Während die Amplitude der Harmonischen bei Rechteck- und Sägezahnsignalen umgekehrt proportional zur ihrer Ordnung abnimmt (entsprechend 6 dB/Oktave), fällt sie bei Dreiecksignalen umgekehrt proportional zum Quadrat der Ordnung ab (entsprechend 12 dB/Oktave).

Deterministische Signale wie die in Abb. 1.7 gezeigten lassen sich in reiner Form nur durch einen analogen oder digitalen Generator erzeugen. Natürliche Audiosignale weisen jedoch häufig gewisse Ähnlichkeiten mit diesen Zeitsignalen, und damit auch mit ihren spektralen Eigenheiten auf. So produziert die Querflöte in Abb. 1.6 ein weitgehend sinusförmiges Signal, in dem harmonische Vielfache nur mit relativ geringem Anteil von mehr als 30 dB unter der Grundfrequenz vertreten sind. Das von Streichinstrumenten (Violine, Violoncello) oder Doppelrohrblattinstrumenten (Oboe, Fagott) erzeugte Schallsignal weist dagegen aufgrund des sägezahnartigen Schwingungsverlaufs der Saite bzw. des Rohrblatts einen größeren Oberton Gehalt auf (s. Kap. 4). Die zur Übertragung digitaler Zahlenfolgen eingesetzten elektrischen Signale haben einen weitgehend rechteckförmigen Verlauf, dessen idealtypische Form allerdings nur in einem Kanal mit hoher Bandbreite dargestellt werden kann, in dem auch alle Harmonischen verlustfrei übertragen werden.

Wenn die Amplitude von Wechselgrößen durch einen Einzahlwert beschrieben werden soll, kann entweder der Scheitelwert (Spitzenwert) $\hat{x}$ oder ein Mittelwert angegeben werden. Von Bedeutung sind der *arithmetische Mittelwert* $\bar{x}$ mit

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt, \quad (1.8)$$

der *Gleichrichtwert* $\bar{x}$ als arithmetisches Mittel über den Betrag der Wechselgröße mit

$$|\bar{x}| = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} |x(t)| dt \quad (1.9)$$

und der *Effektivwert* x_{eff} als quadratisches Mittel mit

$$x_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt} \quad (1.10)$$

Während der arithmetische Mittelwert für reine Wechselgrößen ohne Gleichanteil gleich Null ist, hat vor allem der Effektivwert eine wichtige Bedeutung, da er ein Maß für die Leistung der Wechselgröße ist. Die Signalleistung von elektrischen und

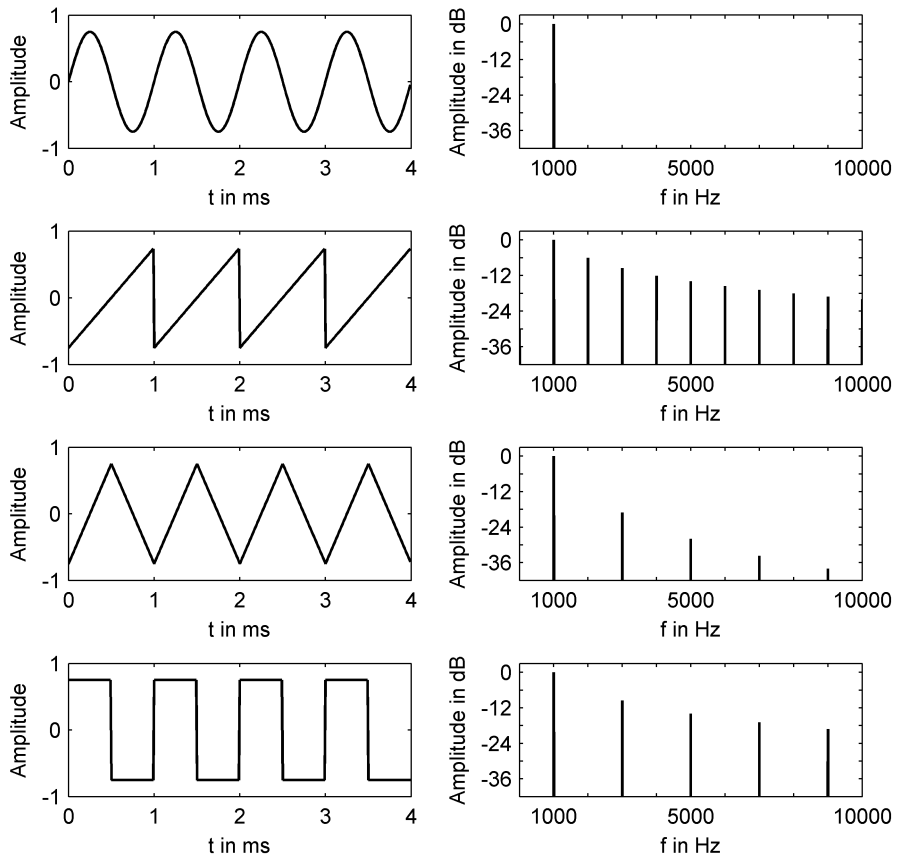


Abb. 1.7 Zeitverlauf und Betragsspektrum für einige deterministische, periodische Signale (Sinus-, Sägezahn-, Dreieck- und Rechtecksignal)

akustischen Größen ist stets proportional zum Quadrat der Feldgrößen (Strom, Spannung, Schalldruck, Schallschnelle). Somit gibt der Effektivwert als quadratischer Mittelwert (root mean square, RMS) den leistungsäquivalenten Gleichwert einer Feldgröße an: Die Gleichspannung U_{eff} transportiert dieselbe elektrische Leistung wie die Wechselspannung $U(t)$.

Das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert, der sog. *Scheitelfaktor* C (*crest factor*), mit

$$C = \frac{\hat{x}}{x_{\text{eff}}} \quad (1.11)$$

sowie der *Formfaktor* F (*form factor*) als Verhältnis von Effektivwert zu Gleichrichtwert mit

$$F = \frac{x_{\text{eff}}}{|\hat{x}|} \quad (1.12)$$

charakterisieren die Streuung der Amplitude um ihre Mittelwerte, unabhängig von der absoluten Amplitude des Signals. Insbesondere bei der Anzeige von Audiosignalen durch Aussteuerungsmessgeräte spielt dies eine Rolle, da hier meist ein Effektivwert angezeigt wird, sodass nur bei Kenntnis des Scheitelfaktors auf die tatsächlichen Spitzenwerte des Signals rückgeschlossen werden kann. Die Werte von C und F für die Signale aus Abb. 1.7 enthält Tabelle 1.1

Tabelle 1.1 Scheitelfaktor und Formfaktor für einige deterministische, periodische Signale

Signal	Scheitelfaktor	Formfaktor
Sinus	1,41	1,11
Dreieck	1,73	1,15
Sägezahn	1,73	1,15
Rechteck	1	1

1.2.3.2 Stochastische Signale

Stochastische Signale folgen einem zeitlichen Verlauf, der durch Zufallsprozesse generiert oder maßgeblich beeinflusst wird. Ihr Zeitverlauf lässt sich somit nicht durch eine mathematische Funktion, sondern lediglich durch zeitliche oder spektrale Mittelwerte beschreiben. Beispiele sind Rauschsignale, die häufig durch ihre mittlere spektrale Energieverteilung charakterisiert werden. Dazu gehört *weißes Rauschen* mit einer konstanten Signalleistung pro Frequenzbandbreite. *Rosa Rauschen* weist eine konstante Signalleistung pro Frequenzintervall f_2/f_1 auf, dies korrespondiert mit einer Abnahme der spektralen Energieverteilung $\sim 1/f$ entsprechend einer Abnahme von 3 dB pro Oktave. *Rotes Rauschen* (auch: braunes Rauschen) weist eine Abnahme der spektralen Energieverteilung $\sim 1/f^2$ entsprechend 6 dB pro Oktave auf. Rauschsignale gleicher spektraler Färbung können unterschiedliche Scheitelfaktoren aufweisen, von 1 (für Rechtecksignale mit stochastisch verteilter Periodendauer) bis zu sehr hohen Werten.

Sprache und Musik werden – auch wenn sie abschnittsweise Ähnlichkeit mit deterministischen Signalen haben können (s. Abb. 1.6) – in der Signaltheorie als stochastische Signale betrachtet, da sich ihr Verlauf nicht mathematisch vorhersagen lässt. Wie Rauschsignale können sie dabei sehr unterschiedliche Scheitelfaktoren aufweisen. Sprache besitzt typischerweise Scheitelfaktoren von 4 bis 10, Musik mit großer Dynamik auch höhere Werte.

Rosa Rauschen wird gerne als Referenzsignal, etwa zum Einmessen von Lautsprechersystemen verwendet, da es eine breitbandige Anregung bildet und gleichzeitig den auch bei Sprache und Musik im statistischen Mittel zu beobachtenden

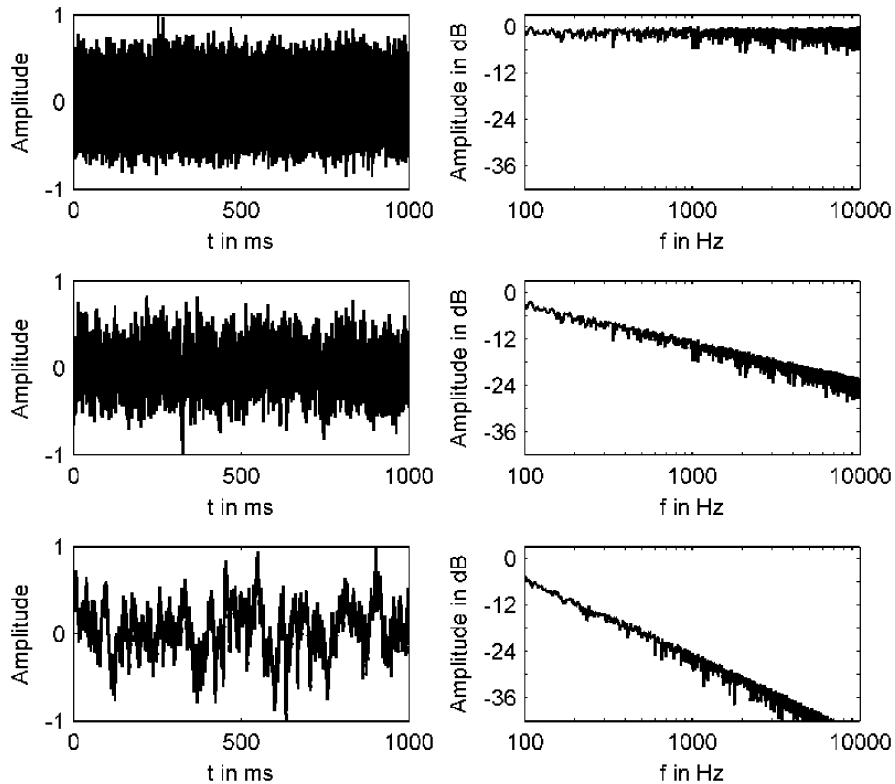


Abb. 1.8 Zeitverlauf und Leistungsdichtespektrum für unterschiedlich gefärbte Rauschsignale: Weißes Rauschen (oben), rosa Rauschen (Mitte) und rotes Rauschen (unten)

Abfall der spektralen Energieverteilung oberhalb von 1 bis 2 kHz nachbildet (Abb. 1.9). Die Verwendung von weißem Rauschen würde das System (hier insbesondere den Hochtöner) mit einer in der Praxis nicht auftretenden, hochfrequenten Signalleistung belasten.

1.2.4 Systeme und Systemeigenschaften

Als *Systeme* bezeichnet man Übertrager, die ein Eingangssignal $x(t)$ auf ein Ausgangssignal $y(t)$ abbilden.

$$y(t) = L\{x(t)\} \quad (1.13)$$

Zwei Beispiele für Systeme aus dem Bereich der Audiotechnik sind in Abb. 1.10 skizziert.

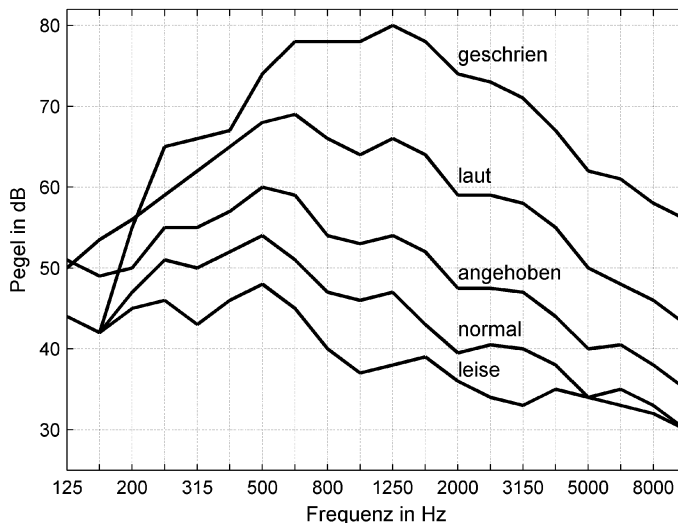


Abb. 1.9 Mittlerer Schalldruckpegel für einen männlichen Sprecher und verschiedene Sprachintensitäten in 1 m Entfernung (nach Fletcher 1961)

Beispiel 1

Als System kann die akustische Übertragungsstrecke eines Raums betrachtet werden, die einen Schalldruckverlauf am Punkt A in einen Schalldruckverlauf am Punkt B verwandelt. Die Wirkung des Systems besteht im Wesentlichen aus einer Zeitverschiebung durch die akustische Laufzeit von A nach B, aus einer frequenzabhängigen Dämpfung des Eingangssignals durch die Absorption beim Durchgang durch das Medium und schließlich aus einer Addition von Schallrückwürfen an den Wänden des Raums und dem daraus resultierenden Nachhall. Diese Wirkungen, die sich exemplarisch an der Impulsantwort im Zeitbereich und an der Übertragungsfunktion im Frequenzbereich ablesen lassen (Abb. 1.11), verändern das Eingangssignal $x(t)$ auf spezifische Weise (vgl. Kap. 5 Raumakustik).

Beispiel 2

Ein Dynamikkompressor ist ebenfalls ein System im Sinne von (1.13), das ein elektrisches Signal an seinem Eingang auf ein elektrisches Signal an seinem Ausgang abbildet. Die Wirkung des Systems besteht aus einer Verstärkung des Eingangssignals, die oberhalb eines Schwellwerts (threshold) am Eingang in eine um die sog. Ratio geringere Verstärkung übergeht. Der Übergang zwischen den beiden Verstärkungsfaktoren geschieht innerhalb von durch Attack und Release gesetzten Zeitfenstern (s. Kap. 13).

Eine für die mathematische Beschreibung ebenso wie für die technische Realisierung wesentliche Eigenschaft ist die *Linearität* und die *Zeitinvarianz* von Systemen. Linear sind Systeme dann, wenn eine Skalierung (Verstärkung/Abschwächung) des Eingangs und eine Überlagerung verschiedener Eingangssignale zu einer ebenso skalierten Überlagerung der jeweiligen Ausgangssignale führt, d. h.

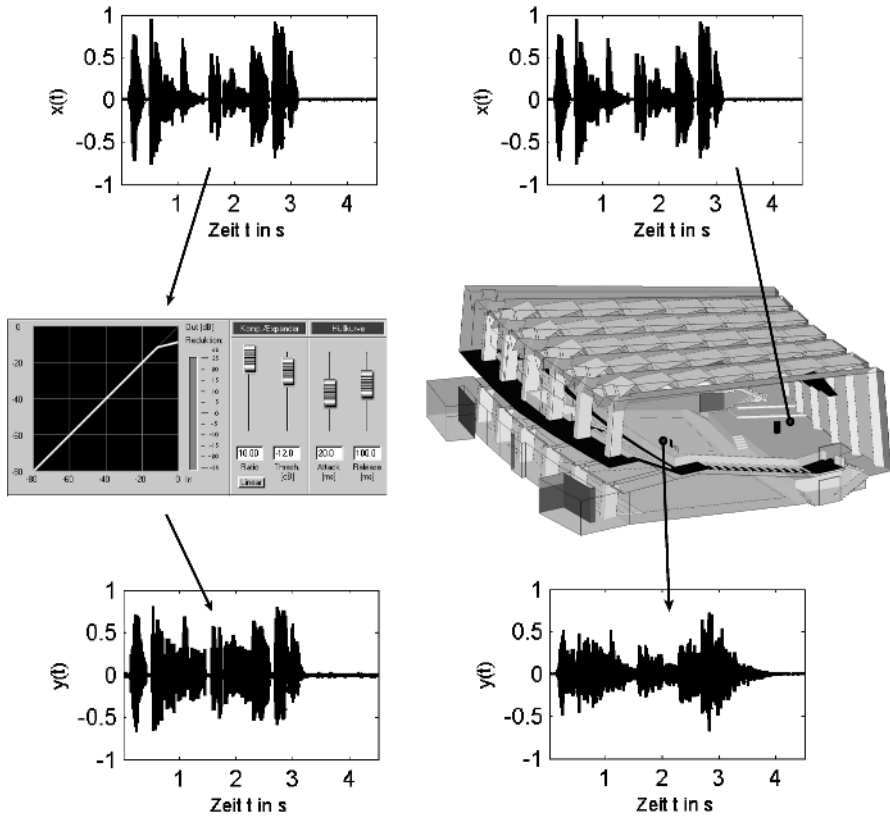


Abb. 1.10 Zwei Beispiele für Systeme in der Audiotechnik. Links: Ein Kompressor als nicht-lineare Abbildung eines elektrischen Signals am Eingang auf ein elektrisches Signal am Ausgang. Rechts: Ein raumakustisches System als näherungsweise lineare und zeitinvariante Abbildung eines Schalldruckverlaufs am Ort der Quellen auf einen Schalldruckverlauf am Ort des Empfängers

$$L \{ a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t) \} = a_1 L \{ x_1(t) \} + a_2 L \{ x_2(t) \} \quad (1.14)$$

Akustische Systeme sind in der Regel, außer bei sehr hohen Schallamplituden, lineare Systeme. In Beispiel 1 führt ein doppelt so lautes Anregungssignal am Ort A zu einem doppelt so lauten Signal am Ort B. Der Kompressor aus Beispiel 2 dagegen, der oberhalb einer gewissen Signalamplitude mit einer geringeren Verstärkung reagiert, ist ein nichtlineares System.

Zeitinvariant sind Systeme dann, wenn sie zu unterschiedlichen Zeiten gleich reagieren, d.h. wenn eine Zeitverschiebung am Eingang ein zeitverschobenes, ansonsten aber unverändertes Signal am Ausgang produziert:

$$y(t - \tau) = L \{ x(t - \tau) \} \quad (1.15)$$

Akustische Systeme sind in erster Näherung meist zeitinvariant, solange man nicht Faktoren wie eine tageszeitabhängige Veränderung der Raumtemperatur und die dadurch bedingte Veränderung der Schallgeschwindigkeit (Abb. 1.13) oder veränderliche Luftströmungen im Raum berücksichtigt.

Linearität und Zeitinvarianz sind deshalb von grundlegender Bedeutung, da sich Systeme mit diesen Eigenschaften vollständig durch ihre Impulsantwort $h(t)$ und durch ihre Übertragungsfunktion $H(\omega)$ beschreiben lassen. Systeme, die entweder nichtlinear oder zeitvariant sind, können nur mit erheblich höherem Aufwand in ihrer Wirkung charakterisiert werden (Unbehauen 1998).

1.2.5 Impulsantwort

Weiß man, wie ein System auf eine Anregung durch einen infinitesimal kurzen Impuls $\delta(t)$ reagiert, d. h. kennt man die Impulsantwort $h(t)$ des Systems mit

$$h(t) = L\{\delta(t)\} \quad (1.16)$$

so lässt sich die Wirkung des Systems als Faltung des Eingangssignals mit der Impulsantwort beschreiben:

$$y(t) = L\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (1.17)$$

Das auf der rechten Seite von (1.17) stehende Faltungsintegral war bis zur Einführung der Digitaltechnik eine rein abstrakte Form der Beschreibung von linearen und zeitinvarianten Systemen. Inzwischen sind jedoch digitale Algorithmen, die das Ergebnis einer Faltungsoperation praktisch ohne Zeitverzögerung (Latenz) zur Verfügung stellen (Gardner 1995), auf modernen Prozessoren auch in Echtzeit lauffähig. So bieten zahlreiche Audioworkstations heute eingebettete Faltungsprogramme an oder können Faltungsprogramme als Plug-in einbinden. Dabei besteht häufig die Möglichkeit, auf ein breites Angebot von Impulsantworten etwa zur Nachhallerzeugung zuzugreifen (s. Kap. 13.3) oder Impulsantworten von Systemen durch eine geeignete Messtechnik (s. Kap. 21) sogar selbst aufzunehmen, um die Wirkung des Systems anschließend durch Faltung zu simulieren.

1.2.6 Übertragungsfunktion

Transformiert man die Gleichung (1.17) mit Hilfe der Fouriertransformation nach (1.1) in den Frequenzbereich, so erhält man

$$Y(\omega) = H(\omega) \cdot X(\omega) \quad (1.18)$$

Dabei sind $X(\omega)$ und $Y(\omega)$ die Fourier-Transformierten, d. h. die Spektren von $x(t)$ und $y(t)$. $H(\omega)$ ist die Fourier-Transformierte der Impulsantwort $h(t)$, d. h.

$$H(\omega) = F \{h(t)\} \quad (1.19)$$

und wird als Übertragungsfunktion bezeichnet. Die Wirkung eines Systems lässt sich somit im Zeitbereich als Faltung des Eingangssignals $x(t)$ mit der Impulsantwort des Systems beschreiben oder im Frequenzbereich durch Multiplikation des Eingangsspektrums $X(\omega)$ mit der Übertragungsfunktion $H(\omega)$. Beide Darstellungen sind gleichwertig: So wie jedem Signal $x(t)$ eineindeutig ein Spektrum $X(\omega)$ zugeordnet ist, ist der Impulsantwort $h(t)$ eineindeutig eine Übertragungsfunktion $H(\omega)$ zugeordnet. Ebenso wie $X(\omega)$ ist auch die Übertragungsfunktion $H(\omega)$ eine komplexe Funktion mit dem Betrag $|H(\omega)|$ und dem Phasenwinkel $\angle H(\omega)$, wobei gilt

$$|H(\omega)| = \sqrt{\operatorname{Re}^2 \{H(\omega)\} + \operatorname{Im}^2 \{H(\omega)\}} \quad (1.20)$$

$$\angle H(\omega) = \arctan \left(\frac{\operatorname{Im} \{H(\omega)\}}{\operatorname{Re} \{H(\omega)\}} \right) \quad (1.21)$$

Die Formel für den Phasenwinkel gilt nur im Intervall $[-\pi; \pi]$ und für $\operatorname{Re}\{H(\omega)\} > 0$. Letzteres lässt sich aber jederzeit durch Erweitern mit (-1) erreichen.

Während das Betragsspektrum angibt, um welchen Faktor bestimmte Frequenzanteile durch das System verstärkt oder abgeschwächt werden, gibt das Phasenspektrum an, um welchen Phasenwinkel die jeweiligen Frequenzanteile am Ausgang verschoben auftreten.

Aus der Änderung des Phasenwinkels lässt sich die Zeitverschiebung berechnen, die ein Signal beim Durchgang durch das System erfährt. Da eine feste Zeitverschiebung bei doppelter Signalfrequenz auch einer doppelt so großen Phasenverschiebung entspricht, berechnet sich die Laufzeit im System stets als Quotient von Phasenverschiebung zu Signalfrequenz. Man unterscheidet zwischen der sog. *Phasenlaufzeit* $\tau_p(\omega)$ und der *Gruppenlaufzeit* $\tau_g(\omega)$ des Systems. Die Phasenlaufzeit $\tau_p(\omega)$ mit

$$\tau_p(\omega) = -\frac{\angle H(\omega)}{\omega} \quad (1.22)$$

entspricht der Zeit, um die ein sinusförmiges Signal am Ausgang des Systems verzögert erscheint. Die Gruppenlaufzeit $\tau_g(\omega)$ mit

$$\tau_g(\omega) = -\frac{d\angle H(\omega)}{d\omega} \quad (1.23)$$

entspricht der Zeit, um die eine Änderung der Hüllkurve eines sinusförmigen Trägersignals am Ausgang des Systems verzögert erscheint. Da die Information des Audiosignals, etwa Beginn und Ende eines Tons oder Modulationen seines Verlaufs, in der Hüllkurve kodiert sind und nicht in der Phasenlage der darunter liegenden Träger-

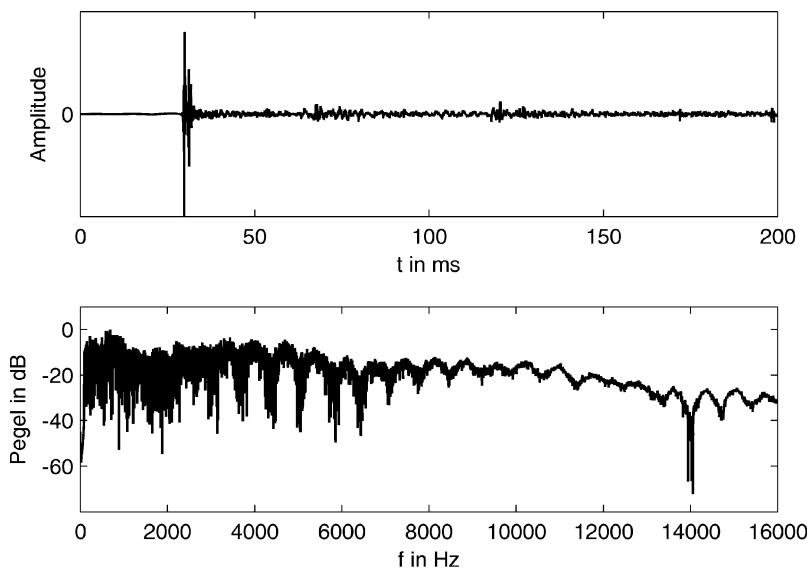


Abb. 1.11 Oben: Ausschnitt aus der Impulsantwort des Raums aus Abb. 1.10. Sichtbar ist die durch das System induzierte Laufzeit von 30 ms entsprechend einem Schallweg von 10 m, eine starke Reflexion nach wenigen ms (Bodenreflexion) sowie eine dichte Folge von Reflexionen von anderen Raumbegrenzungsflächen. Die Messung erfolgte mit einem Sinus-Sweep (s. Kap. 21 Messtechnik). Unten: Zugehörige Übertragungsfunktion (Betragsspektrum). Deutlich zu erkennen ist die Dämpfung hoher Frequenzen, die das Signal bei der akustischen Übertragung von A nach B erfährt.

schwingung, ist für den Höreindruck die Gruppenlaufzeit von größerer Bedeutung. Sie spielt z. B. bei der zeitlichen Überlagerung der Signalanteile von Mehrwege-Lautsprechern eine wichtige Rolle, bei denen die unterschiedlichen Signalwege (Tief-/Mittel-/Hochtöner) durch die Übertragungsfunktionen der Frequenzweiche und der Treiber mit unterschiedlichen Gruppenlaufzeiten behaftet sind und somit beim Hörer zu unterschiedlichen Zeitpunkten eintreffen (vgl. Kap. 8.3.1). Eine für alle Frequenzen konstante Laufzeit des Systems äußert sich in einem linearen Anstieg des Phasenfrequenzgangs. Solche Systeme werden daher als *linearphasig* bezeichnet. In diesem Fall sind Gruppenlaufzeit und Phasenlaufzeit identisch.

1.3 Schall und Schallfeldgrößen

Als Schall bezeichnet man Störungen eines mechanischen Gleichgewichts, welche sich als Schwingungen durch ein physikalisches Medium fortpflanzen. Im Gegensatz zum englischen Begriff *sound*, der auch für die auditive Wahrnehmung von akustischen Phänomenen steht, beschreibt *Schall* in der deutschsprachigen Terminologie zunächst nur den physikalischen Vorgang. Ein Beispiel für die Erzeugung und Ausbreitung eines Schallfelds zeigt Abb. 1.12. Ein bewegter Kolben, der für

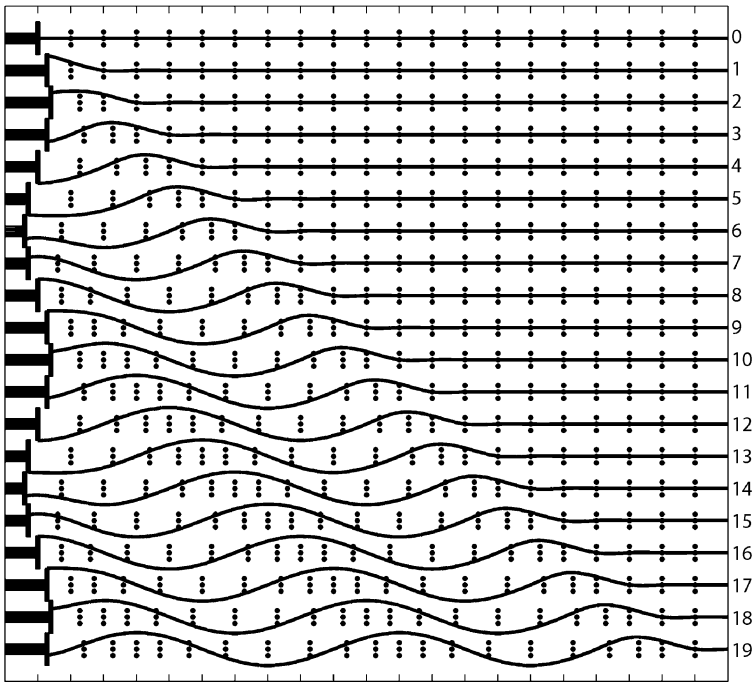


Abb. 1.12 Anregung und Ausbreitung einer ebenen Welle durch eine schwingende Oberfläche (dargestellt links als bewegter Kolben) für 20 aufeinanderfolgende Zeitpunkte. Skizziert ist die horizontale Auslenkung $\xi(t)$ von jeweils drei Molekülen um ihren Ruhezustand, sowie die dadurch bedingte, lokale Modulation der stationären Dichte ρ_0 und des stationären Luftdrucks p_0 als Kurve entlang der Ausbreitungsrichtung der Schallwelle.

eine Lautsprechermembran oder den schwingenden Resonanzboden eines Musikinstruments stehen kann, löst eine Kettenreaktion von elastischen Stößen jeweils benachbarter Luftmoleküle aus, die sich mit konstanter Geschwindigkeit ausbreitet und schließlich durch die mechanische Erregung unseres Trommelfells am Ende der Übertragungsstrecke und die dadurch ausgelösten Nervenimpulse eine Hörempfindung hervorruft.

Im Gegensatz zu Strömungsphänomenen findet im Schallfeld keine Bewegung des Mediums insgesamt statt, sondern nur eine Schwingung lokaler Volumenelemente um ihren Ruhezustand. Diese Schwingung breitet sich dann mit einer festen, von den Eigenschaften des Mediums abhängigen Geschwindigkeit c aus. Luftschall ist eine longitudinale *Kompressionswelle*, d. h. das Schallfeld bewirkt eine Verdünnung und Verdichtung des Mediums, die sich entlang der Ausbreitungsrichtung der Schwingung verändert, in Abb. 1.12 erkennbar als ortsabhängige Schwankung von Druck und Dichte um den atmosphärischen Ruhewert. In Festkörpern und Flüssigkeiten sind auch andere Ausbreitungsmechanismen möglich wie die *Torsionswelle* oder *Scherwelle*, bei der das Medium zwar elastisch verformt, aber nicht komprimiert wird, sowie die *Biegewelle* als Kombination von Kompressionswelle und Torsionswelle.

Zur Beschreibung von Schallfeldern wird in der Akustik eine Reihe von physikalischen Größen verwendet, deren Auswahl von den Eigenschaften des Schallfelds abhängt, die damit zum Ausdruck gebracht werden sollen.

1.3.1 Schalldruck und Schallschnelle

Druck und Schnelle sind die üblichen Größen zur Beschreibung der orts- und zeitabhängigen Struktur des Schallfelds. Als *Schalldruck* p bezeichnet man die durch die lokale Verdichtung des Mediums, d. h. durch die Abweichung $\rho_{\sim}$ von der statischen Dichte ρ_0 bedingte Abweichung p vom statischen Luftdruck p_0 . Somit gilt

$$p_{\text{ges}} = p_0 + p \quad (1.24)$$

und

$$\rho_{\text{ges}} = \rho_0 + \rho_{\sim} \quad (1.25)$$

Wenn nicht speziell vermerkt, wird als Schalldruck stets der Effektivwert des Wechselschalldrucks bezeichnet (s. 1.10). Für harmonische, d. h. sinus- oder cosinusförmige Verläufe liegt der Effektivwert somit etwa um den Faktor 0,71 niedriger als der Spitzenwert (vgl. Tabelle 1.1). Bei hörbaren Schallvorgängen verändern sich Druck und Dichte im Medium so schnell, dass sich der durch die Verdichtung ausgelöste, lokale Temperaturanstieg nicht durch Wärmeleitung ausgleichen kann. Solche Zustandsänderungen nennt man *adiabatisch*, für sie gilt die adiabatische Zustandsgleichung:

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho_{\sim}}{\rho_0} \right)^{\kappa} \quad (1.26)$$

Für Luft und andere zweiatomige Gase beträgt der Adiabatenexponent $\kappa = 1,4$, für einatomige Gase ist $\kappa = 1,67$. Die Änderung des lokalen Drucks p ist also überproportional zur Änderung der lokalen Dichte $\rho_{\sim}$. Schalldruck, Schalldichte und Schalltemperatur verändern sich in ihrem orts- und zeitabhängigen Verlauf in einem Medium somit stets in analoger Weise. Der Schalldruck als feldbeschreibende Größe wird benutzt, weil er der Messung durch Mikrofone am leichtesten zugänglich ist. Auch das menschliche Gehör wirkt als Druckempfänger.

Verglichen mit den jeweiligen Ruhegrößen sind die Schallfeldgrößen p und $\rho_{\sim}$ sehr klein. Selbst am Platz des Dirigenten eines im *fortissimo* spielenden Symphonieorchesters beträgt der Schalldruck selten mehr als 2 Pa, verglichen mit einem statischen Luftdruck auf Meereshöhe von 101.325 Pa, auf den meisten Barometern noch in der veralteten Einheit als 1013 mbar angezeigt. Das menschliche Gehör ist also ein äußerst sensibler Druckempfänger und die in Abb. 1.12 skizzierte örtliche Auslenkung der Luftmoleküle um ihren Ruhepunkt ist in Wirklichkeit stark überzeichnet.

Als *Schallschnelle* v bezeichnet man die durch den lokalen Schallausschlag $\xi(t)$ bedingte Geschwindigkeit, mit der sich die Moleküle des Mediums um ihre Ruhelage bewegen.

$$\mathbf{v}(\mathbf{x},t) = \frac{\partial}{\partial t} \xi(\mathbf{x},t)$$

(1.27)

Im Gegensatz zum Schalldruck, der eine ungerichtete, skalare Feldgröße ist, ist die Schnelle eine vektorielle, gerichtete Größe. Ebenso wie beim Schalldruck tritt ein hörbares Schallereignis bereits bei sehr geringen Schallschnellen in der Größenordnung von $50 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$ auf. Tabelle 1.2 gibt eine Übersicht über Schalldrücke und Schallschnellen von einigen typischen Alltagsgeräuschen.

Tabelle 1.2 Schalldruck und Schallschnelle von Alltagsgeräuschen

Signal	Schalldruck	Schallschnelle
Formelzeichen	p	v
Einheit	$\text{Pa} = \text{Nm}^{-2}$	ms^{-1}
Hörschwelle bei 1 kHz	$2 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-8}$
Wald bei wenig Wind	$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Bibliothek	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Büro	$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-5}$
dicht befahrene Stadtstraße	$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-4}$
Presslufthammer, Sirene	2	$5 \cdot 10^{-3}$
Start von Düsenflugzeugen aus 200 m Entfernung	20	$5 \cdot 10^{-2}$
Schmerzgrenze	200	$5 \cdot 10^{-1}$

1.3.2 *Feldimpedanz und Kennimpedanz*

Der Quotient aus den komplexen Amplituden von Schalldruck p und Schallschnelle v wird als *Feldimpedanz* oder *spezifische Schallimpedanz* Z_s bezeichnet:

$$Z_s = \frac{p}{v}$$

(1.28)

Der Quotient aus den Amplituden von Schalldruck und Schallschnelle in einer ebenen, fortschreitenden Welle wird als *Kennimpedanz* oder *Wellenwiderstand* Z_0 bezeichnet. Während die Feldimpedanz von den Eigenschaften des Mediums ebenso wie von der Geometrie der Schallausbreitung abhängt und für jeden Punkt des Schallfelds unterschiedlich sein kann, hängt die Kennimpedanz nur von den Eigenschaften des Mediums ab (s. Abschn. 1.5.1). Der Begriff Impedanz verweist auf eine elektrische Analogie, indem – analog zur elektrischen Impedanz als Quotient

aus Spannung (Ursache) und Strom (Wirkung) – der Schalldruck als Ursache der Teilchenbewegung betrachtet wird und die Feldimpedanz als Widerstand, den das Medium der Bewegung seiner Moleküle entgegensetzt. Diese Analogie sollte allerdings nicht überstrapaziert werden, da man bei bestimmten akustischen Phänomenen, etwa bei der Schallabstrahlung schwingender Oberflächen ebenso die Schnelle als Ursache und den Druck als Wirkung auffassen kann. Die Anlehnung an die elektrischen Zusammenhänge ist allerdings insofern zutreffend, als dass sich Schalldruck und Schallschnelle nicht immer phasengleich verändern müssen, ähnlich wie Strom und Spannung bei kapazitiven und induktiven Widerständen einen Phasenversatz erleiden. Nur bei der ebenen, sich nur in eine Dimension ausbreitenden Welle wie in Abb. 1.12 sind Schalldruck und Schallschnelle in Phase. Bei anderen Schallfeldgeometrien wie der Kugelwelle ist die Feldimpedanz eine komplexe Größe, d.h. die Orte maximalen Drucks fallen nicht mit den Orten maximaler Schnelle zusammen (s. Abschn. 1.5).

1.3.3 Schallgeschwindigkeit

Die *Schallgeschwindigkeit* c in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, mit der sich eine Schallwelle ausbreitet, ist durch die Materialeigenschaften des Mediums gegeben. Für ideale Gase gilt

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M_{\text{mol}}}} \quad (1.29)$$

mit dem Adiabatenexponent κ , der allgemeinen Gaskonstante $R = 8,314 \text{ Nm}\cdot(\text{mol}\cdot\text{K})^{-1}$, der molaren Masse M_{mol} des Mediums (für Luft ist $M \approx 0,029 \text{ kg}\cdot\text{mol}^{-1}$) und der Temperatur T in K (Kelvin).

Luft verhält sich jedoch nur näherungsweise wie ein ideales Gas. Da sie aus einer Mischung von Gasen mit unterschiedlichem Adiabatenexponent κ besteht, hängt die Schallgeschwindigkeit in Luft auch von deren genauer Zusammensetzung ab (Luftfeuchtigkeit, CO_2 -Gehalt). Bei normalen atmosphärischen Bedingungen dominiert jedoch der Einfluss der Temperatur. (Abb. 1.13).

In der Nähe der üblichen Raumtemperatur ist die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit c annähernd linear und es gilt näherungsweise

$$c \approx 331,6 + 0,6 \cdot \theta \quad (1.30)$$

mit der Schallgeschwindigkeit in ms^{-1} und der Temperatur θ in $^{\circ}\text{C}$, bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 %. Die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit erklärt eine Reihe akustischer Alltagsphänomene. Dazu gehört der Anstieg der Tonhöhe von Blasinstrumenten oder Orgelpfeifen mit der Temperatur. Da die Schallwellenlänge des schwingenden Luftvolumens hier durch die Geometrie des Körpers vorgegeben ist, steigt die Frequenz der Schwingung, die über (1.31) mit der Wellenlänge

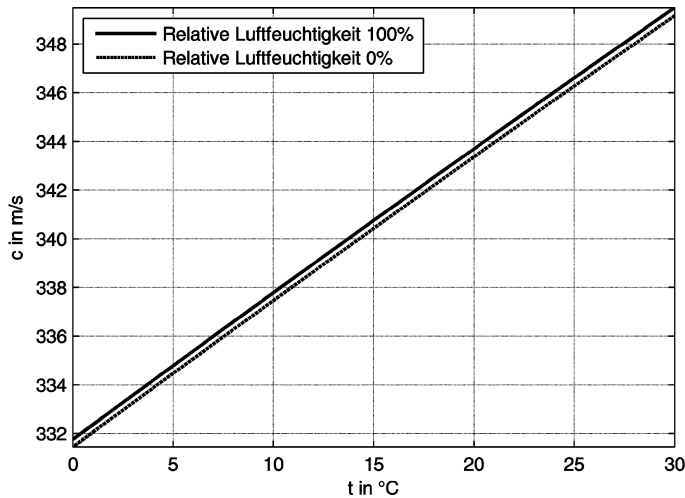


Abb. 1.13. Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Luftfeuchtigkeit (berechnet nach Cramer 1993)

verknüpft ist, gemäß (1.30) an, wenn sich das Instrument durch die Atemluft des Spielers oder durch eine veränderte Raumtemperatur erwärmt. Dadurch kann es zu Intona-tionsproblemen mit anderen Instrumenten kommen (s. Kap. 4.1.2). In Flüssigkeiten und Festkörpern, deren thermodynamische Eigenschaften nicht durch (1.29) beschrie-ben werden, breitet sich der Schall schneller aus als in Gasen (Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3 Einige Schallgeschwindigkeiten in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern bei $\theta = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Stoff	c in ms^{-1}
Wasserstoff	1309
Sauerstoff	326
Kohlendioxid	266
Luft	344
Wasser (dest.)	1492
Kupfer	3900
Eisen	5100

1.3.4 Frequenz und Wellenlänge

Schallwellen breiten sich mit einer festen, durch die thermodynamischen Bedin-gungen und die Materialeigenschaften des Mediums gegebenen Geschwindigkeit c aus. Daraus ergibt sich zwangsläufig ein umso kürzerer Abstand zwischen zwei Punkten gleichen Schalldrucks entlang der Ausbreitungsrichtung (Wellenlänge λ), je höher die Frequenz f der Schwingung ist. Es gilt