

Volker Smyrek



Tontechnik

für Veranstaltungstechniker

in Ausbildung und Praxis

3. Auflage

HIRZEL

SMYREK – TONTECHNIK

Tontechnik

für Veranstaltungstechniker
in Ausbildung und Praxis

von Dr. Volker Smyrek

3., korrigierte Auflage
mit 703 Abbildungen, 74 Tabellen
und 152 Übungsaufgaben



S. Hirzel Verlag

Die in diesem Werk aufgeführten Formeln, (technischen) Daten und Hinweise beruhen größtenteils auf Herstellerangaben und wurden sorgfältig geprüft. Dennoch können Autor und Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit der Angaben übernehmen.

Bibliografische Informationen der Deutschen Nationalbibliothek

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

3., korrigierte Auflage 2016

ISBN: 978-3-7776-2499-0 (Print)

ISBN: 978-3-7776-2566-9 (E-Book, PDF)

Ein Markenzeichen kann markenrechtlich geschützt sein, auch wenn ein Hinweis auf etwa bestehende Schutzrechte fehlt. Patentrechtliche Einschränkungen sind zu beachten.

Jede Verwertung des Werkes außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzung, Nachdruck, Mikroverfilmung oder vergleichbare Verfahren sowie für die Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen.

© 2016 S. Hirzel Verlag

Birkenwaldstraße 44, 70191 Stuttgart

www.hirzel.de

Printed in Germany

Umschlaggestaltung: deblik, Berlin

Umschlagsabbildung: Marek Kosmal/fotolia

Druck und Bindung: Kösel, Krugzell

Vorwort zur 3. Auflage

Inzwischen unterrichte ich nicht nur Auszubildende, sondern auch Studenten, und natürlich verwende ich hierzu meine Bücher. Manchmal merkt man erst während des Unterrichts, dass der Unterrichtsstoff didaktisch optimiert und einzelne Aspekte ausführlicher erklärt werden sollten. Ich freue mich daher in diesem Zusammenhang auf Rückmeldungen von Schülern, Studenten und Auszubildenden sowie von deren Lehrern, Professoren und Ausbildern. Ein Lehrbuch kann im Grunde nie wirklich endgültig fertig gestellt werden, da es immer einzelne Aspekte gibt, auf die näher eingegangen werden kann. Oder es gibt neue technische Entwicklungen, die eine Umgestaltung bzw. Anpassung des Unterrichtsstoffes notwendig machen.

Neben etlichen Korrekturen gibt es seit der zweiten Auflage von „Tontechnik für Veranstaltungstechniker“ folgende Änderungen bzw. Erweiterungen:

- Gemäß den Anforderungen der entsprechenden DIN sind jetzt sämtliche Formelzeichen kursiv und Einheiten ohne eckige Klammern geschrieben. Die Schaltsymbole für die Induktivität, die Diode und die Erde bzw. die Masse wurden ebenfalls den aktuellen Normen angepasst.
- In Kapitel 1 „Der Schall“ wird auf Wunsch einiger Leser näher auf die Schallgeschwindigkeit eingegangen.
- In Kapitel 9 „Mikrofone“ wird das Zustandekommen des Nahbesprechungseffekts jetzt ausführlich erläutert.
- Das Kapitel 22 „Videotechnik“ wurde umstrukturiert und um den Themenbereich „Bildschirme“ erweitert. Die Projektionstechnik findet sich jetzt wesentlich ausführlicher im Band „Lichttechnik und Energieversorgung für Veranstaltungstechniker“.

Danksagungen

Vielen Dank an die Gastautoren:

Georg Hell, Kai Harada, Nik Reiff, Sabrina Zaiser, Sven Raff, Tim Kersebohm, Tobias von Brockdorf und Tobias Mancinella.

Für Tipps und fachliche Ratschläge:

Eberhard Sengpiel, Christian Scholl, Diana Kruse, Dieter Schöpf, Heiko Schulz, Jan Hofmann, Jürgen Meyer, Manuel Menig, Michael Ebner, Michel Weber und Uli Kunst.

Danke an folgende Firmen und Institutionen:

Apollo Theater Stuttgart, Beyerdynamic, Hochschule der Medien, Schoeps Mikrofone, Studio & Consulting. Und natürlich ein großes Dankeschön an den S. Hirzel Verlag!

Vorwort zur 1. Auflage

Wie ist dieses Handbuch strukturiert?

Zuerst werden die Grundlagen behandelt, um anschließend auf einzelne Teilbereiche tiefer einzugehen. Die Reihenfolge der Kapitel und zum Teil auch die Inhalte innerhalb der Kapitel bauen also aufeinander auf. Am Ende jedes Kapitels finden sich Übungsaufgaben, die Fragen orientieren sich am Niveau schriftlicher Abschlussarbeiten von Veranstaltungstechnikern. Einige Fragen gehen darüber hinaus, und es gibt auch ein paar Aufgaben, die zur eigenen Recherche auffordern. Die Lösungen stehen im Anhang. Für ein Selbststudium ist weiterführende Fachliteratur am Ende der Kapitel aufgeführt.

Welche Inhalte werden vermittelt?

Im Rahmenlehrplan für den Ausbildungsberuf Fachkraft für Veranstaltungstechnik ist für das erste Lehrjahr der Themenblock „physikalische und physiologische Grundlagen der Akustik“ vorgesehen. Da sich dieses Buch am Lehrplan orientiert, liegt es also nahe, mit der Akustik anzufangen (Kapitel 1 bis 3) und dann das Gehör zu erklären, bzw. die Aspekte des Lärmschutzes (Kapitel 4 und 5).

In Kapitel 6 folgen die Grundlagen der Elektronik, welche übrigens in der Form, wie sie hier präsentiert werden, nicht ausdrücklich im Lehrplan erwähnt sind. Sie sind aber für das weitere Verständnis der Funktion tontechnischer Geräte unbedingt notwendig. Im Lehrplan werden alle „strombezogenen“ Themen den Lernfeldern Energieversorgung und Beleuchtungsanlagen zugeordnet; daher wird in diesem Buch in Kapitel 7 nur kurz darauf eingegangen.

Nachdem mit Kapitel 8 „Der Pegel“ alle akustischen und elektronischen Grundlagen abgehakt sind, kann die Didaktik dem Signalfluss einer Beschallungsanlage folgen (Mikrofon – Leitung bzw. drahtlose Tonübertragung – Mischpult – Verstärker – Lautsprecher; Kapitel 9 bis 18), um dann die bis hierher vorgestellten Komponenten quasi in eine Beschallungsanlage zu integrieren (Kapitel 19). Danach folgen noch Kommunikationsanlagen (Kapitel 20).

Der Begriff „Medientechnik“ in Kapitel 21 umfasst zum einen analoge und digitale Tonaufzeichnungsmedien und zum anderen die Netzwerktechnik. Darüber hinaus folgen Grundlagen zur Videotechnik in Kapitel 22.

Die Reihenfolge der Kapitel folgt einer logischen Struktur und damit nicht ganz der Reihenfolge, wie die Themen im Rahmenlehrplan aufgelistet sind. Am Anfang jedes Kapitels steht daher, zu welchem Lehrjahr die Themen gehören.

Wie tief gehend ist die Informationsvermittlung?

Eine gewerbliche Ausbildung und damit auch der Ausbildungsberuf zur Fachkraft für Veranstaltungstechnik ist prinzipiell für Schulabgänger sämtlicher Schularten möglich. Die Unternehmen legen bei der Einstellung allerdings einen klaren Fokus auf Bewerber wenigstens mit Realschulabschluss, und an deren Vorbildung orientiert sich auch die Vermittlung von Wissen in diesem Buch. Gute Kenntnisse in Mathematik, Physik und Musik der Mittelstufe sind Voraussetzungen, um die Zusammenhänge der Elektroakustik verstehen zu können.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 3. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	VI
1 Der Schall	1
1.1 Schallausbreitung	1
1.2 Schwingung	7
1.2.1 Sinusschwingung	7
1.2.2 Überlagerung von Schwingungen (Interferenz)	9
1.3 Grafische Darstellung von Audiosignalen	10
1.4 Tonhöhe und Intervalle	12
1.4.1 Wahrnehmung der Tonhöhe	12
1.4.2 Musikalische Intervalle	12
1.4.3 Intervalle in der Ton- und Messtechnik	14
1.5 Ton, Klang, Geräusch und Lärm	15
1.6 Obertöne und Klangfarbe	16
1.7 Formanten	18
1.8 Übungsaufgaben	20
2 Schallkenngrößen	21
2.1 Schalldruck p und Schalldruckpegel L_p	21
2.2 Auslenkung ξ der Luftmoleküle	24
2.3 Schallschnelle v	24
2.4 Schallkennimpedanz Z	25
2.5 Schallintensität I	26
2.6 Schallleistung P und Schallenergie W	27
2.7 Übungsaufgaben	30
3 Grundlagen der Akustik	31
3.1 Akustische Phänomene	31
3.1.1 Reflexion	31
3.1.2 Streuung	33
3.1.3 Beugung und Abschattung	33
3.1.4 Stehende Wellen	34
3.1.5 Kammfiltereffekt	34
3.1.6 Dopplereffekt	35
3.1.7 Absorption von Schall	36
3.2 Nachhall	39
3.2.1 Raumimpulsantwort	39

3.2.2	Anregung bei Dauerschall.....	40
3.2.3	Nachhallzeit RT_{60}	41
3.2.4	Deutlichkeitsmaß C_{50} und Klarheitsmaß C_{80}	45
3.3	Direktschall und Reflexionen (Hallradius).....	46
3.4	Übungsaufgaben.....	50
4	Das menschliche Gehör.....	51
4.1	Anatomie des Gehörs.....	51
4.2	Wahrnehmung durch das Gehör.....	54
4.2.1	Lautstärkewahrnehmung.....	54
4.2.2	Räumliches Hören.....	56
4.2.3	Verdeckungseffekte.....	57
4.2.4	Schallwahrnehmung bei elektroakustischer Wiedergabe.....	59
4.3	Hörschäden.....	62
4.4	Übungsaufgaben.....	65
5	Lärmschutz.....	67
5.1	Schutz der Mitarbeiter (LärmVibrationsArbSchV).....	67
5.1.1	Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung.....	67
5.1.2	Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen.....	68
5.1.3	Gehörschutzmittel.....	71
5.1.4	Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung (G20 Lärm).....	73
5.1.5	Lärmminderungsprogramm.....	73
5.2	Schutz des Publikums (DIN 15 905-5).....	74
5.2.1	Richtwerte.....	74
5.2.2	Maßnahmen.....	74
5.2.3	Zeitbewertung bei Messungen.....	76
5.3	Schutz der Anwohner (TA Lärm).....	77
5.4	Übungsaufgaben.....	78
6	Grundlagen der Elektronik.....	79
6.1	Grundbegriffe.....	79
6.2	Passive Filter.....	87
6.3	Diode und Transistor.....	92
6.3.1	Diode.....	93
6.3.2	Gleichrichterschaltungen.....	94
6.3.3	Transistor.....	96
6.3.4	Verstärker in Emitterschaltung.....	100
6.3.5	Anforderungen an Spannungsverstärker.....	101
6.3.6	Gegenkopplung bei Verstärkerschaltungen.....	103
6.4	Operationsverstärker.....	104

6.5	Modulation	107
6.5.1	Amplitudenmodulation (AM)	108
6.5.2	Frequenzmodulation (FM)	110
6.6	Übungsaufgaben	112
7	Stromversorgung	113
7.1	Netzstrom	113
7.2	Netzteile	116
7.2.1	Ungeregelte Netzteile	117
7.2.2	Stabilisierte Netzteile (Analoge Stabilisierung)	117
7.2.3	Getaktete Netzteile (Schaltnetzteile)	118
7.3	Batterien und Akkus	119
7.3.1	Technische Parameter	119
7.3.2	Eigenschaften verschiedener Batterietypen	121
7.3.3	Eigenschaften verschiedener Akkutypen	122
7.3.4	Kenndaten von Akkus	123
7.3.5	Laden von Akkus	124
7.4	Übungsaufgaben	125
8	Der Pegel	127
8.1	Was ist ein Logarithmus?	127
8.2	Relative Pegel	129
8.3	Absolute Pegel	131
8.4	Aussteuerung	133
8.5	Rechnen mit Pegeln	135
8.6	Übungsaufgaben	138
9	Mikrofone	139
9.1	Mikrofon-Wandlerprinzipien	139
9.1.1	Kohlemikrofon	139
9.1.2	Dynamische Mikrofone	140
9.1.3	Kondensatormikrofon	142
9.1.4	Piezoelektrischer Wandler	144
9.2	Empfängerprinzipien und Richtcharakteristiken	145
9.2.1	Druckempfänger	146
9.2.2	Druckgradientenempfänger	147
9.2.3	Interferenzempfänger	150
9.2.4	Mikrofone mit veränderbarer Richtcharakteristik	152
9.3	Technische Daten von Mikrofonen	153
9.4	Bauarten	156
9.4.1	Kleinmembranmikrofone	156

9.4.2	Großmembranmikrofone	157
9.4.3	Miniaturmikrofone	158
9.4.4	Grenzflächenmikrofon	158
9.4.5	Digitale Mikrofone	160
9.4.6	Messmikrofone	161
9.5	Übungsaufgaben	164
10	Verfahren zur Mikrofonierung	165
10.1	Einzelmikrofonierung	165
10.1.1	Schlagzeug	165
10.1.2	Percussion / Schlagwerk	169
10.1.3	Gitarre	170
10.1.4	Bass	171
10.1.5	Keyboards	173
10.1.6	Flügel und Klavier	173
10.1.7	Bläser	175
10.1.8	Streicher	176
10.1.9	Gesang und Sprache	178
10.2	Stereo-Aufnahmeverfahren	180
10.2.1	Pegel- bzw. Koinzidenzstereofonie ΔL	180
10.2.2	Laufzeitstereofonie Δt	183
10.2.3	Gemischte Aufnahmeverfahren	184
10.2.4	Mikrofonierung mit Trennkörper	185
10.3	Surround-Aufnahmeverfahren	187
10.4	Stützmikrofone	192
10.5	Übungsaufgaben	194
11	Anpassung und Audioleitungen	195
11.1	Anpassung	195
11.2	Audioleitungen	197
11.2.1	Leitungsbeläge	197
11.2.2	Lautsprecherkabel	199
11.2.3	NF-Kabel	203
11.2.4	HF-Kabel	211
11.2.5	Handhabung von Kabeln	214
11.3	Übungsaufgaben	216
12	Drahtlose Tonübertragung	217
12.1	Mikroport-Technik	217
12.1.1	Sendefrequenzen	217
12.1.2	Signalweg einer UHF-Mikroportanlage	220

12.1.3	Modulation bei Mikroports	220
12.1.4	Intermodulation und Frequenzplanung	221
12.1.5	Sender	223
12.1.6	Antennen.....	225
12.1.7	Empfänger	232
12.1.8	Diversity-Verfahren	232
12.1.9	Digitale Mikroports.....	234
12.2	Infrarot-Technik.....	234
12.2.1	Signalweg einer IR-Anlage.....	235
12.2.2	IR-Modulation	235
12.2.3	Probleme bei der IR-Übertragung	236
12.2.4	Anlagenteile der IR-Technik.....	236
12.3	Übungsaufgaben	239
13	Digitale Audiosignale	241
13.1	Zahlensysteme	241
13.2	Pulsmodulation (PCM).....	243
13.3	Pulsweitenmodulation (PWM).....	250
13.4	Leitungskodierung	251
13.5	Maßnahmen zur Verhinderung von Datenverlust	253
13.6	Digitale Audioprotokolle	255
13.7	Synchronisation	260
13.8	Übungsaufgaben	266
14	MIDI.....	267
14.1	Physikalische MIDI-Schnittstelle	267
14.2	MIDI-Daten	269
14.3	MIDI-Signalverteilung.....	273
14.4	MIDI über USB und FireWire	276
14.5	Übungsaufgaben	277
15	Mischpulte.....	279
15.1	Bauweisen.....	279
15.2	Einsatzgebiete	279
15.3	Signalfluss eines analogen Beschallungspultes.....	285
15.3.1	Mono-Eingangskanal	285
15.3.2	Gruppen und Matrix	293
15.3.3	Aux-Master	294
15.3.4	Kopfhörerverstärker und Oszillator	295
15.3.5	Central Control Module (CCM).....	296
15.4	Digitale Mischpulte.....	297

15.5	Mischpultautomation	304
15.6	Übungsaufgaben	309
16	Klangbearbeitung	311
16.1	Dynamikbeeinflussung	311
16.1.1	Definition der Dynamik	311
16.1.2	Regelverstärker	313
16.1.3	Spezielle Regelverstärker	316
16.2	Filter (Equalizer)	318
16.2.1	Analoge Filter	319
16.2.2	Digitale Filter	323
16.3	Effektgeräte	325
16.3.1	Echo	325
16.3.2	Hall	327
16.3.3	Weitere Effekte	330
16.4	Wie ist ein musikalischer Mix aufgebaut?	338
16.5	Übungsaufgaben	342
17	Frequenzweichen, Controller und Leistungsverstärker	343
17.1	Frequenzweichen	343
17.2	Controller	345
17.3	Leistungsverstärker	347
17.3.1	Technische Daten von Verstärkern	348
17.3.2	Clipping bei Endstufen	351
17.3.3	Stereo, Parallel Mono und Bridged Mono	352
17.4	100 V-Anlagen	353
17.5	Übungsaufgaben	355
18	Lautsprecher	357
18.1	Lautsprecher-Wandlerprinzipien	357
18.1.1	Elektrodynamische Lautsprecher	357
18.1.2	Elektrostatistische Lautsprecher	362
18.1.3	Piezoelektrische Lautsprecher	363
18.2	Lautsprecherboxen	364
18.2.1	Akustischer Kurzschluss und unendliche Schallwand	364
18.2.2	Geschlossenes Gehäuse	365
18.2.3	Bassreflex-Box	366
18.2.4	Bandpass-Gehäuse	367
18.2.5	Transmissionline-Gehäuse	367
18.2.6	Hörner	368
18.2.7	Kriterien zur Beurteilung von Lautsprecherboxen	371

18.3	Anordnung und Kombination von Lautsprecherboxen	377
18.4	Linienstrahler (Line Arrays)	380
18.5	Übungsaufgaben	387
19	Beschallungsanlagen	389
19.1	Konzepte für Beschallungsanlagen	389
19.2	Konzertbeschallung	391
19.3	Theaterbeschallung	399
19.4	Einmessen von Beschallungsanlagen	406
19.4.1	Testsignale	406
19.4.2	Elektrisches Einmessen	409
19.4.3	Akustisches Einmessen	409
19.4.4	Subjektive Kontrolle	412
19.5	Installations- und Beschallungspläne	413
19.5.1	Bühnenanweisungen	413
19.5.2	Beschallungspläne	416
19.5.3	Signalflusspläne nach dem USITT Sound Graphic Standard	423
19.6	Übungsaufgaben	428
20	Kommunikationsanlagen (Intercom)	429
20.1	Kabelgebundene Systeme	429
20.1.1	Analoge Partylines	429
20.1.2	Digitale Kommunikationssysteme	434
20.2	Drahtlose Systeme	436
20.2.1	Simplex-Funk	436
20.2.2	Duplex-Funk	436
20.2.3	Digitaler Duplex-Funk	437
20.3	Übungsaufgaben	440
21	Medientechnik	441
21.1	Magnetbandaufzeichnung	441
21.1.1	Analoge Tonbandtechnik	441
21.1.2	Digitale Magnetbandaufzeichnung	449
21.2	Digitale Audioaufnahmen am Computer	452
21.2.1	Soundkarten	452
21.2.2	Speichermedien für Audio- und Videodateien	453
21.2.3	Audiodateien	459
21.2.4	Software zur Audibearbeitung	461
21.3	Anschluss an Netze	464
21.3.1	Netz-Topologien	464
21.3.2	OSI-Schichtenmodell	467

21.3.3	Ethernet	468
21.3.4	Audionetze	470
21.4	Übungsaufgaben	476
22	Videotechnik	477
22.1	Videokamera	477
22.1.1	Optisches System	477
22.1.2	Bildwandler	481
22.1.3	Kameraelektronik	488
22.2	Videosignale	493
22.2.1	BAS-Signal	493
22.2.2	Farbsignale	496
22.2.3	Digitale Videosignale	499
22.3	Videosignalverteilung	503
22.4	Videoaufzeichnung	505
22.5	Bildmischer	507
22.6	Bildschirme	511
22.6.1	CRT-Monitor	511
22.6.2	LCD-/TFT-Monitor	513
22.6.3	Plasmamonitor	515
22.6.4	LED-Monitor	516
22.6.5	Vor- und Nachteile der vorgestellten Display-Technologien	518
22.7	Übungsaufgaben	519
Anhang	521
	Ausbildungsinhalte im Bereich Tontechnik laut Rahmenlehrplan	521
	Lösungen zu den Übungsaufgaben	524
	Englische Fachbegriffe der Akustik und Tontechnik	551
	Abkürzungen	555
	Formelsammlung	559
Literatur und Quellen	565
Abbildungsquellen	571
Sachregister	573

1 Der Schall



Im ersten Kapitel geht es um die Schallausbreitung in der Luft und die Grundlagen zur periodischen Schwingung. Einordnung dieser Themen im Rahmenlehrplan: „Physikalische und physiologische Grundlagen der Akustik“ im ersten Lehrjahr.

1.1 Schallausbreitung

Schall ist physiologisch betrachtet eine Reizung des Gehörs und damit eine Hörempfindung. Physikalisch ist damit die Ausbreitung lokaler Druckschwankungen in elastischen Medien und die kollektive Schwingung von Teilchen gemeint. Ohne Medium (Gas, Flüssigkeit oder Festkörper) gibt es keinen Schall. Demnach wird im luftleeren Raum, dem Vakuum, kein Schall übertragen.

Wie entsteht eine Schallwelle?

Schallwellen können durch verschiedene Schallquellen in Form von schwingenden Saiten, Stäben, Zungen, Membranen, Platten oder Luftsäulen verursacht werden.

Beispiel: Eine Akustikgitarre als Schallquelle

Die Saiten der Gitarre bewegen sich nach dem Anzupfen hin und her, sie schwingen. Die Schwingungen der Saiten werden über den Steg an einen Resonanzkörper, den Gitarrenkorpus, weitergeleitet. Die Holzdecke des Korpus kann als eine Art Platte oder Membran gesehen werden, welche die Schallschwingungen durch die relativ große Fläche verstärkt und an die Luft überträgt (Abb. 1.1). Die periodischen Auslenkungen der angeregten Luftmoleküle breiten sich dann als Schallwelle aus.

Schall in der Luft ...

...breitet sich als Longitudinalwelle aus, damit entspricht die Schwingungsrichtung der Moleküle der Ausbreitungsrichtung der Welle (Abb. 1.2).

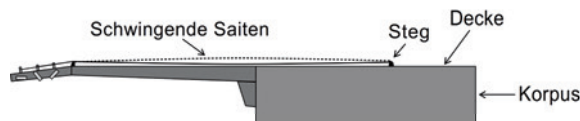


Abb. 1.1: Gitarre als Schallerzeuger.

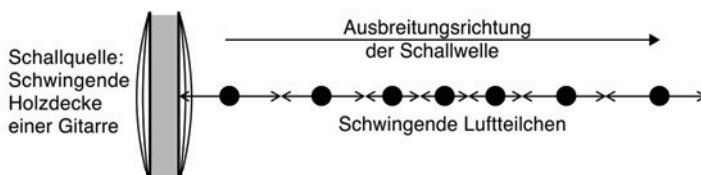


Abb. 1.2: Longitudinalwelle.

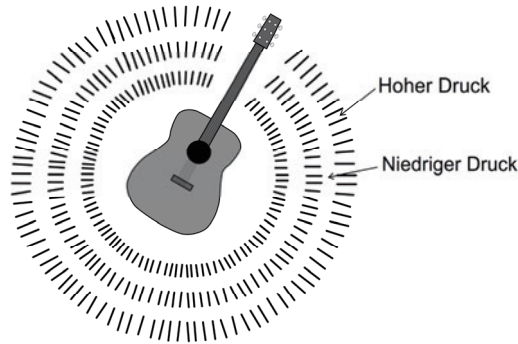


Abb. 1.3: Verdünnungs- und Verdichtungsfronten bei Schallausbreitung in Luft.

Bei Transversalwellen ist die Schwingungsrichtung dagegen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, zum Beispiel bei elektromagnetischen Wellen. Weiterhin gibt es Dehn- und Biegewellen in Festkörpern.

Die Ausbreitung von Schall erfolgt in einem elastischen Medium wie Luft in Form von Verdünnungs- und Verdichtungsfronten (Abb. 1.3):

Verdünnungsfront = niedriger Druck (unkomprimierte Luft).

Verdichtungsfront = hoher Druck (komprimierte Luft).

Nahfeld und Fernfeld

Im Nahfeld um eine Schallquelle breitet sich der Schall in Form einer Kugelwelle aus, solange die Wellenlänge größer ist als der Schallerzeuger. (Die Definition der Wellenlänge folgt in Kapitel 1.2.1) Im Fernfeld, also in größerer Entfernung zur Schallquelle, entsprechen die Schallwellen immer mehr einer ebenen Welle wie in Abb.1.4 skizziert.

Im Nahfeld und Fernfeld gelten jeweils andere Gesetzmäßigkeiten für den Schalldruck und die Schallschnelle. (Mehr dazu in Kap. 2.)

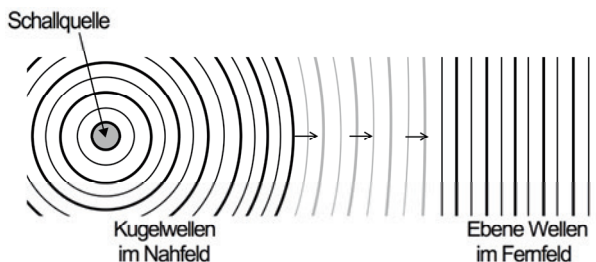


Abb. 1.4: Kugelwellen und ebene Wellen.

Die Schallgeschwindigkeit c ...

... ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Anregung von Teilchen, also von Molekülen oder Atomen, in einem Medium ausbreitet. Da über die Schallgeschwindigkeit einige Irrtümer verbreitet sind, soll hier etwas genauer darauf eingegangen werden.

Die Schallgeschwindigkeit in Luft lässt sich wie folgt berechnen:

$$c_0 = \sqrt{\frac{p_0 \cdot \kappa}{\rho}} \quad (\text{Formel 1.1})$$

c_0 : Schallgeschwindigkeit in m/s bei 0 °C

p_0 : mittlerer statischer Luftdruck in Pa

ρ : mittlere Dichte der Luft in kg/m³

κ : Adiabatenexponent

Luftdruck und Dichte sind physikalische Größen, die per Messung bestimmt werden können, aber was hat es mit dem Adiabatenexponenten κ auf sich? Nach Pierre-Simon Laplace (1749–1827) ist der Wärmefluss von einem komprimierten zu einem unkomprimierten Bereich in einem Gas, also auch der Luft, vernachlässigbar, solange die Wellenlänge (s. Kap. 1.2.1) groß im Vergleich zur mittleren freien Weglänge der Teilchenbewegung ist. Es findet dann fast kein Wärmetausch statt, und man spricht von einer *adiabatischen* Zustandsänderung. Erst wenn sich die Wellenlänge der mittleren freien Wegstrecke nähert, tritt eine deutliche Absorption des Schalls auf – doch die Wellenlängen sind dann so klein, dass der Schall außerhalb des für Menschen hörbaren Bereichs liegt. Auch Siméon Denis Poisson (1781–1840) kannte diesen Zusammenhang und leitete zudem einige Gesetzmäßigkeiten aus dem *idealen Gasgesetz* ab. Das ideale Gasgesetz lautet folgendermaßen:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (\text{Formel 1.2})$$

p : Druck in Pa

V : Volumen in m³

n : Stoffmenge in mol

R : Universelle Gaskonstante $R \approx 8,314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$

T : Temperatur in K

Poisson erkannte folgende Zusammenhänge:

$$p \cdot V^\kappa = \text{konstant} \quad (\text{Formel 1.3})$$

$$T \cdot V^{\kappa-1} = \text{konstant} \quad (\text{Formel 1.4})$$

$$p^{1-\kappa} \cdot T^\kappa = \text{konstant} \quad (\text{Formel 1.5})$$

Hier taucht also zum ersten Mal der Adiabatenexponent κ auf, der letztlich so definiert ist:

$$\kappa = c_p \cdot c_v \quad (\text{Formel 1.6})$$

c_p : molare Wärmekapazität in J bei konstantem Druck

c_v : molare Wärmekapazität in J bei konstantem Volumen

Berechnung der Schallgeschwindigkeit in Luft in Abhängigkeit von der Temperatur

Der atmosphärische Normaldruck p_0 hat einen Wert von 101 325 Pa. Bei einer Temperatur von 0 °C beträgt die Dichte der Luft $\rho = 1,293 \text{ kg/m}^3$. Der Adiabatenexponent der Luft hat bei gleich bleibender Temperatur einen Wert von 1,402. Daraus folgt unter Zuhilfenahme von Formel 1.1:

$$c_0 = \sqrt{\frac{p_0 \cdot \kappa}{\rho}} = \sqrt{\frac{101\,325 \text{ Pa} \cdot 1,402}{1,293 \text{ kg/m}^3}} = 331,5 \text{ m/s bei } 0 \text{ °C}$$

Um die Schallgeschwindigkeit c auch für andere Temperaturen T zu berechnen, kann folgende Formel herangezogen werden:

$$c = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{M}} \quad (\text{Formel 1.7})$$

Einheit m/s

κ : Adiabatenexponent; für Luft $\kappa = 1,402$

R : Universelle Gaskonstante $R \approx 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$

M : Molare Masse; für Luft $M = 2,87 \cdot 10^{-2} \text{ kg/mol}$

T : Absolute Temperatur in Kelvin; Bezugswert für die Temperatur ist der absolute Nullpunkt bei 0 Kelvin = -273,15 °C; hier sind die Moleküle und Atome bewegungslos.

Die genannten Werte in diese Formel einsetzen und zusammenfassen:

$$c = \sqrt{\frac{1,402 \cdot 8,314 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)} \cdot T}{2,87 \cdot 10^{-2} \text{ kg/mol}}}$$

$$c = 20,15 \cdot \sqrt{T} \quad (\text{Formel 1.8})$$

Einheit m/s

T : Temperatur in Kelvin

Obwohl sich die Schallgeschwindigkeit, wie in Formel 1.8 gesehen, proportional zur Wurzel aus der Temperatur ändert, wird oft eine etwas vereinfachte Formel mit linearem Temperaturfaktor verwendet, die für einen weiten Temperaturbereich hinreichend genaue Werte liefert:

$$c = c_0 + 0,6 \cdot T \quad (\text{Formel 1.9})$$

Einheit m/s

c_0 : Referenzwert = 331,5 m/s (Schallgeschwindigkeit bei 0 °C)

0,6 : Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit ($\pm 1 \text{ °C} \approx \pm 0,6 \text{ m/s}$)

T : Temperatur in Grad Celsius

Bei der durchschnittlichen Raumtemperatur von 20 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit nach dieser Formel 343,5 m/s. Dass bei höherer Temperatur die Ausbreitungsgeschwindigkeit größer ist, liegt darin begründet, dass bei gleichem Druck, also gleicher elastischer Kraft, die Dichte der wärmeren Luft und somit die zu bewegende Masse geringer ist als bei kälterer Luft. Diese Zusammenhänge gelten zunächst für trockene Luft. Die Schallgeschwindigkeit ändert sich aber auch mit der relativen Luftfeuchtigkeit.

Schallgeschwindigkeit und Luftfeuchtigkeit

Mit der Luftfeuchtigkeit ändert sich die Dichte ρ ; es gilt folgender Zusammenhang:

$$\rho = \left(\frac{p_d}{R_d \cdot T} \right) + \left(\frac{p_v}{R_v \cdot T} \right) \quad (\text{Formel 1.10})$$

ρ : Dichte der Luft in kg/m^3

p_d : Druck bei 0 % relativer Luftfeuchte (= trockene Luft) in Pa

R_d : Gaskonstante für trockene Luft $R_d \approx 287,05 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

p_v : Druck von Wasserdampf in Pa

R_v : Gaskonstante für vollständig mit Wasserdampf gesättigte Luft $R_v \approx 461,495 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

T : Temperatur in Kelvin

Für beliebige relative Luftfeuchtigkeiten müssen also jeweils die Gaskonstante und der Druck bekannt sein. Und hier fängt es an, wirklich kompliziert zu werden! Als Beispiel sollen daher nur einige berechnete Werte für die Schallgeschwindigkeit c in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit bei 20 °C aufgeführt werden:

c bei 20 % Luftfeuchtigkeit = 343,8 m/s

c bei 50 % Luftfeuchtigkeit = 344,3 m/s

c bei 80 % Luftfeuchtigkeit = 344,5 m/s

Prinzipiell beeinflusst die Luftfeuchtigkeit die Schallgeschwindigkeit also nur gering und ist meist vernachlässigbar, der Einfluss der Temperatur ist wesentlich stärker. Unter Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit wie auch der Luftfeuchtigkeit wird für weitere Berechnungen in diesem Buch dennoch ein mittlerer Wert von $c = 344 \text{ m/s}$ verwendet.

Bisher haben wir nur die Schallgeschwindigkeit in Luft betrachtet. Bei Festkörpern ist die Schallgeschwindigkeit abhängig von den Materialkennwerten des Mediums, durch das sich die Wellen bewegen, wie zum Beispiel der chemischen Zusammensetzung, der Dichte und dem Elastizitätskoeffizienten – darauf soll hier aber nicht näher eingegangen werden. Tab. 1.1 zeigt daher nur einige Beispiele für Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien.

Tab. 1.1: Schallgeschwindigkeit in verschiedenen Medien.

Material	Schallgeschwindigkeit c
Kautschuk	70 m/s
Luft, 20 °C	344 m/s
Blei	1200 m/s
Wasser, 20 °C	1484 m/s
Eis, -10 °C	3200 m/s
Holz, weich	3340 m/s
Holz, hart	4700 m/s
Glas	5300 m/s
Diamant	18 000 m/s

Laufzeit des Schalls

Die Laufzeit des Schalls lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Laufzeit } t = \frac{\text{Abstand zur Schallquelle } s}{\text{Schallgeschwindigkeit } c} \quad (\text{Formel 1.11})$$

Einheit s

Beispiel: Der Abstand zu einer Schallquelle beträgt 30 m. Wie lange braucht der Schall für diese Distanz?

Lösung:

$$t = \frac{s}{c} = \frac{30 \text{ m}}{344 \text{ m/s}} = 0,087 \text{ s bzw. } 87 \text{ ms}$$

Wettereinflüsse

Nimmt die Lufttemperatur wie bei einer Inversionswetterlage mit der Höhe zu, dann werden die Schallwellen zur Erde zurück gekrümmt. Dabei kann der Schall sehr weite Distanzen zurücklegen, so dass unter Umständen Ereignisse hörbar werden, die nicht im Sichtfeld liegen. Dies wird als Phänomen der verlängerten Schallausbreitung bezeichnet (Abb. 1.5).

Der gegenteilige Effekt tritt ein, wenn mit der Höhe die Lufttemperatur abnimmt. Hier werden die Schallwellen von der Erde weg gekrümmt. Auch nahe Schallquellen sind dann im Schallschatten unhörbar (Abb. 1.6).

In Windrichtung wird der Schall zur Erde hin gekrümmt. Gegen den Wind entsteht dagegen eine Schattenzone, in welcher der Schall vom Boden weg gekrümmt wird (Abb. 1.7).

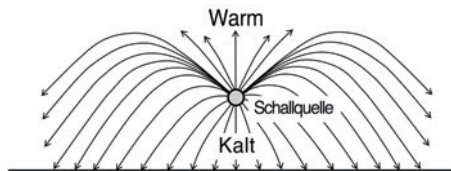


Abb. 1.5: Schallausbreitung bei einer Inversionswetterlage.

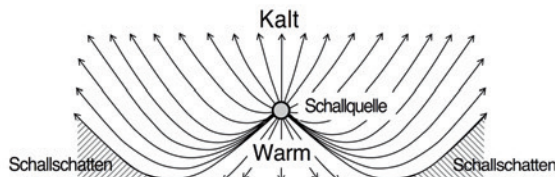


Abb. 1.6: Schallausbreitung bei mit der Höhe abnehmender Temperatur.

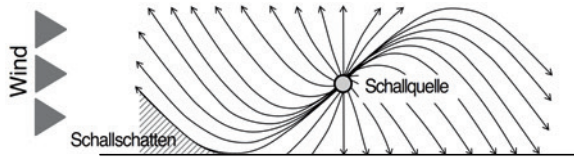


Abb. 1.7: Schallausbreitung bei Wind.

Noch einmal zurück zur Luftfeuchtigkeit. Wie oben gesehen, beeinflusst diese die Schallgeschwindigkeit nur gering, doch sie hat einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Dämpfung hoher Frequenzen – die so genannte Dissipation. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 20 % und einer Distanz zur Schallquelle von 100 Metern werden Schallanteile mit einer Frequenz (s. Kap. 1.2.1) von 10 kHz um etwa -28 Dezibel (dB, s. Kap. 8) bedämpft, bei 50 % Luftfeuchtigkeit sind es etwa -16 dB und bei 80 % Luftfeuchtigkeit etwa -10 dB. Mit zunehmender Luftfeuchtigkeit lässt demnach die Dämpfung nach, der Klang wird höhenlastiger.

1.2 Schwingung

Allgemein wird ein Vorgang, der in regelmäßigen Zeitabschnitten immer wieder den gleichen Zustand erreicht, als periodische Schwingung bezeichnet. Ein anschauliches Beispiel dafür lieferte Hermann von Helmholtz (1821–1894) in seiner Veröffentlichung „Die Lehre von den Tonempfindungen“: An einer Stimmgabel befestigte er einen Stift, die Stimmgabel wurde angeschlagen und ein Blatt Papier darunter hergezogen. Die aufgezeichnete Wellenlinie war das direkte Abbild der periodischen Schwingung der Stimmgabel (Abb. 1.8).

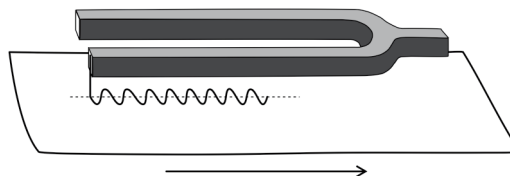


Abb. 1.8: Stimmgabel als Beispiel für eine periodische Schwingung.

1.2.1 Sinusschwingung

Eine periodische Schwingung lässt sich mathematisch aus einer Kreisbewegung ableiten (Abb. 1.9). Ein Punkt auf einer Kreisbahn bewegt sich gegen den Uhrzeigersinn und legt in einer bestimmten Zeit eine bestimmte Strecke zurück. Wird diese Bewegung auf ein Amplituden-Zeit-Diagramm übertragen, dann wird ersichtlich, dass ein Umlauf auf der Kreisbahn einer Periode bzw. der Wellenlänge λ der Schwingung entspricht. Da die Startposition in diesem Fall bei $\varphi = 0^\circ$ liegt, spricht man von einer Sinusschwingung. Liegt die Startposition bei $\varphi = 90^\circ$, handelt es sich um eine Kosinusschwingung. In beiden Fällen entspricht der Radius der Kreisbahn der Amplitude A der Schwingung.

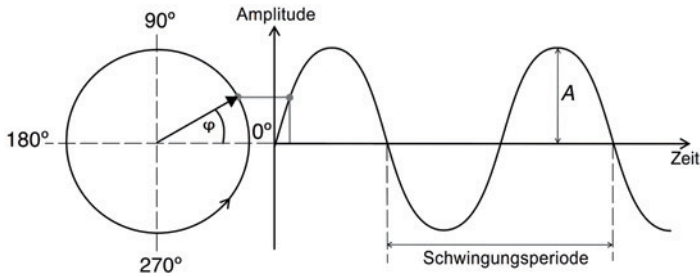


Abb. 1.9: Konstruktion der Sinusschwingung aus einer Kreisbahn.

Amplitude A : Die stärkste Auslenkung der Schwingung. Wird auch Scheitelwert genannt.

Phase φ : Bestimmter, wiederkehrender „Punkt“ im Ablauf einer Schwingung. Wird als Phasenwinkel in Grad ($^{\circ}$) angegeben.

Schwingungsperiode: Eine positive und eine negative Halbwelle einer Sinusschwingung ergeben zusammen eine Schwingungsperiode. Die Zeit, die zum Durchlaufen einer Periode benötigt wird, ist die Periodendauer T ; sie wird in Sekunden angegeben.

Frequenz f

Die Frequenz f gibt die Anzahl der Schwingungsperioden an, die in einer Sekunde durchlaufen werden.

$$\text{Frequenz } f = \frac{1}{\text{Periodendauer } T} \quad (\text{Formel 1.12})$$

Festlegung der Einheit: Die Schwingungen pro Sekunde erhalten die Einheit Hz, zu Ehren von Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894).

$$1 \text{ Hz} = \frac{1 \text{ Schwingung}}{1 \text{ Sekunde}}$$

Frequenz und Tonhöhe

Eine hohe Frequenz entspricht einem hohen Ton, eine niedrige Frequenz einem tiefen Ton. Für uns Menschen relevant ist der hörbare Schall zwischen dem tiefsten Ton mit einer Frequenz von ca. 20 Hz und dem höchsten Ton mit ca. 20 000 Hz (= 20 kHz). Für Menschen unhörbar ist Infraschall unterhalb von 20 Hz, diesen hören zum Beispiel Elefanten oder Wale, und Ultraschall oberhalb von 20 kHz, erzeugt von Hundepfeifen oder durch das „Echolot“ der Fledermäuse.

Wellenlänge λ

Berechnung von λ bei der Schallausbreitung in Luft:

$$\text{Wellenlänge } \lambda = \frac{\text{Schallgeschwindigkeit } c}{\text{Frequenz } f} \quad (\text{Formel 1.13})$$

Einheit m

1.2.2 Überlagerung von Schwingungen (Interferenz)

Einzelne Schwingungen können sich überlagern, und es kommt zur Bildung von Kombinationsschwingungen, die auch Interferenzen genannt werden. In Abb. 1.10 ist eine konstruktive Interferenz von zwei kohärenten Sinusschwingungen mit gleicher Frequenz und Phase (Phasendifferenz = 0°) dargestellt. Bei der konstruktiven Interferenz addieren sich die Amplituden; das resultierende Ausgangssignal weist damit eine größere Amplitude auf. Haben die beiden Ausgangssignale die gleiche Amplitude, so ergibt sich bei der Summierung eine Pegelerhöhung um +6 dB. (Die Erklärung dafür findet sich in Kap. 8.5.)

Abb. 1.11 zeigt die Summierung zweier kohärenter Sinusschwingungen mit gleicher Amplitude, aber entgegengesetzter Phase (Phasendifferenz = 180°). Es kommt hier zu einer destruktiven Interferenz, damit löschen sich die Signale gegenseitig komplett aus. Sind die Amplituden der Quellsignale nicht genau gleich groß, kommt es dagegen nur zu einer Bedämpfung des Ausgangssignals.

Kohärenz (lat.: cohaerere = Zusammenhängen).

Die Kohärenz beschreibt die Ähnlichkeit zweier Signale im Zeitbereich. Man spricht von *kohärenten Signalen*, wenn die Frequenzen eine feste Phasenbeziehung haben.

Bei *nicht kohärenten Signalen* ändert sich dagegen die Frequenz und damit auch die Phase ständig und unregelmäßig.

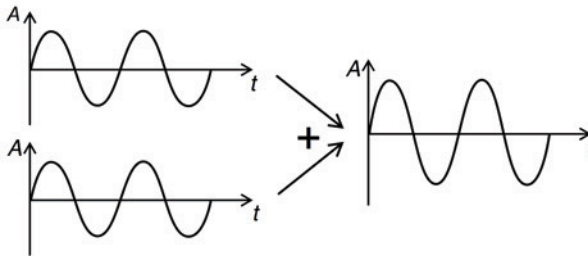


Abb. 1.10: Überlagerung von zwei Sinusschwingungen mit gleicher Phase.

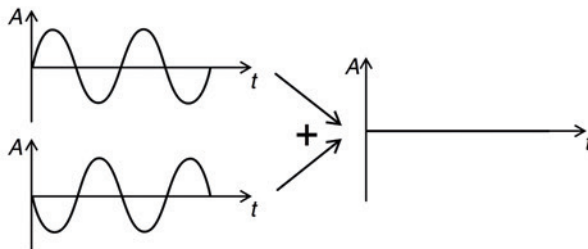


Abb. 1.11: Überlagerung mit entgegengesetzter Phase.

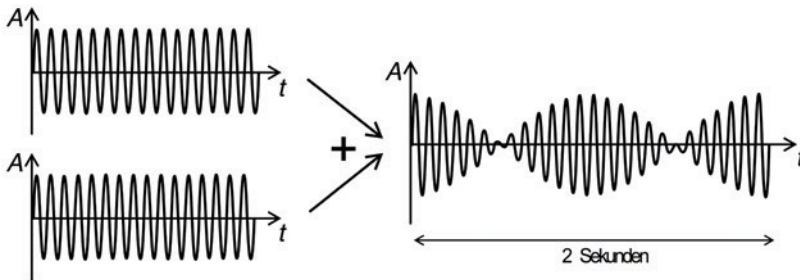


Abb. 1.12: Schwebung mit einer Periode von 1 Hz.

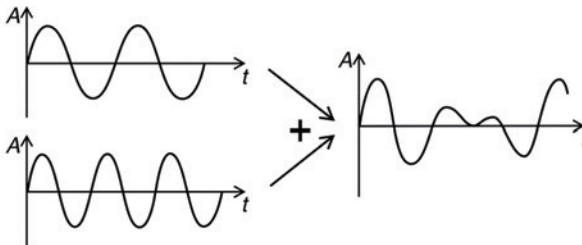


Abb. 1.13: Überlagerung von 440 Hz und 600 Hz.

Weichen die Frequenzen von zwei Schwingungen nur geringfügig, also wenige Hertz voneinander ab, so kommt es zu einer Schwebung (Abb.1.12). Beim Stimmen von Musikinstrumenten nach Gehör ist die Schwebung sehr nützlich. Ein gespielter Ton auf dem Instrument wird dabei mit einem Referenzton verglichen, erzeugt von einer Stimmgabel oder Stimmpfeife. Nähern sich die Frequenzen der beiden Töne, so ist die Schwebung deutlich als periodische Lautstärkeschwankung zu hören.

Wird der Frequenzunterschied allerdings größer, mehr als ca. 10 bis 20 Schwebungen in der Sekunde, so ist eine zunehmende Rauigkeit im Klang wahrzunehmen, welche den unangenehmen Eindruck einer Dissonanz hervorruft. Bei zwei Schwingungen mit Frequenzen, die weit auseinander liegen, entsteht schließlich bei der Überlagerung ein neuer Klang mit einem komplexen Schwingungsmuster wie in Abb. 1.13 skizziert.

1.3 Grafische Darstellung von Audiosignalen

Audiosignale können auf verschiedene Weisen grafisch dargestellt werden:

1. In einem Amplituden-Zeit-Diagramm wie in den vorigen Abbildungen und in Abb. 1.14 wird die Wellenform eines Audiosignals sichtbar.
2. Durch ein mathematisches Verfahren, das sich Fourier-Transformation nennt, kann ein Abschnitt im Zeitbereich in den Frequenzbereich umgerechnet werden. (Dies geht zurück auf Jean Baptiste Joseph Fourier, 1768–1830.) Das Ergebnis ist ein diskretes Kurzzeitspektrum, wie es in Abb.1.15 zu sehen ist. In real gemessenen Spektren erscheint eine Sinusschwingung nicht wie hier als Strich, sondern ist etwas breiter dargestellt. Das liegt daran, dass bei der Frequenzanalyse Filter einer bestimmten Breite benutzt werden.

3. Ein Wasserfalldiagramm wie in Abb. 1.16 ist schließlich die dreidimensionale Darstellung eines Frequenzspektrums über die Zeit. Es werden hier mehrere diskrete Kurzzeitspektren hintereinander aufgezeichnet.

Frequenzspektren und Wasserfalldiagramme mit einer linearen Einteilung der Achsen für die Amplitude und die Frequenz sind oft weniger sinnvoll. Übersichtlicher und kompakter ist dagegen die logarithmische Darstellung. Für die Amplitude steht die Einheit Dezibel (dB) und für die Frequenz die Einheit Hertz (Hz).

Auf den Logarithmus und das Dezibel wird näher in Kap. 8 eingegangen; in diesem Buch werden beide Darstellungsarten, die lineare und die logarithmische, benutzt. Es ist also immer auf die Achsenbeschriftung zu achten!

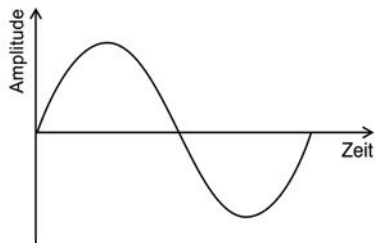


Abb. 1.14: Amplituden-Zeit-Diagramm (Wellenform einer Sinusschwingung).



Abb. 1.15: Amplituden-Frequenz-Diagramm (Spektrum einer Sinusschwingung).

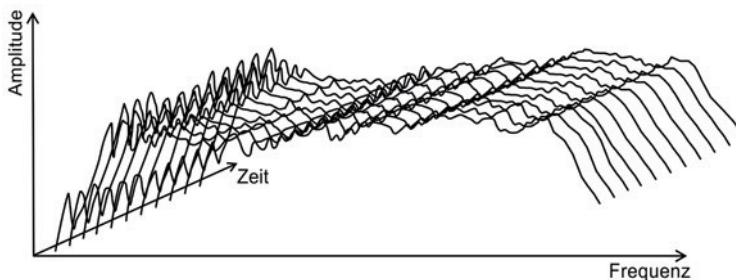


Abb. 1.16: Wasserfalldiagramm (Rauschen als Testsignal über eine Beschallungsanlage).

1.4 Tonhöhe und Intervalle

Wie schon erwähnt, bestimmt die Frequenz einer hörbaren Schwingung dessen Tonhöhe. Die Tonhöhenempfindung ist mit der Physiologie des Gehörs und der auditiven Wahrnehmung verbunden. (Näheres zu diesem Thema findet sich in Kap. 4.)

1.4.1 Wahrnehmung der Tonhöhe

Bei einem Hörtest werden nacheinander zwei Sinustöne mit unterschiedlicher Frequenz bzw. Tonhöhe wiedergegeben. Die Probanden sollen den Tonhöhenabstand abschätzen.

- Erste Hörprobe: Sinuston mit 100 Hz, anschließend ein Sinuston mit 200 Hz $\rightarrow \Delta f = 100$ Hz.
- Zweite Hörprobe: Sinuston mit 1000 Hz, danach mit 1100 Hz $\rightarrow \Delta f = 100$ Hz.

Der Tonhöhenabstand im ersten Versuch erscheint den Probanden größer als bei der zweiten Hörprobe, obwohl in beiden Fällen Δf mit 100 Hz gleich ist. Erklärung für diese Wahrnehmung: Der Mensch empfindet die Tonhöhe in Verhältnissen. Nur gleiche Tonhöhenverhältnisse werden auch gleich bewertet.

1.4.2 Musikalische Intervalle

Ein Intervall ist der Tonhöhenabstand zwischen zwei Tönen. Intervalle haben eine musikalische Bezeichnung, können aber auch als Zahlenverhältnis der Schwingungen bzw. Frequenzen angegeben werden. Eine Frequenzverdoppelung (Schwingungsverhältnis $s = 2 : 1$, wie bei der ersten Hörprobe) trägt als musikalisches Intervall die Bezeichnung „Oktave“. Das kleinste notierbare Intervall ist in der westlichen Musik der Halbtonschritt, der auch kleine Sekunde genannt wird. Eine Oktave wird in 12 Halbtonschritte unterteilt. Es gibt verschiedene Skalen (Tonleitern) zur Stimmung von Musikinstrumenten, die unterschiedliche Schwingungsverhältnisse für den Halbtonschritt und die anderen Intervalle innerhalb einer Oktave definieren: Die pythagoräische, die natürliche und die wohltemperierte Skala.

Bei der pythagoräischen und der natürlichen Skala wird zwar die musikalische Reinheit der Intervalle angestrebt, dennoch treten jeweils bei gewissen Intervallen Konsonanzen und Dissonanzen im Klang auf. In Tab. 1.2 sind die Intervalle und Schwingungsverhältnisse der beiden Skalen gegenübergestellt.

Bei der wohltemperierten Stimmung, die heutzutage eher üblich ist, wird auf die musikalische Reinheit der Intervalle verzichtet und als Kompromisslösung die Oktave in 12 gleiche Halbtonschritte unterteilt. Die Frequenz bzw. das Schwingungsverhältnis s soll sich also auf 12 Halbtonschritte verteilt verdoppeln, mathematisch gilt demnach: $s^{12} = 2$. Das Schwingungsverhältnis eines Halbtonschriffs lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$s_{\text{Halbton}} = \sqrt[12]{2} : 1 \approx 1,0595 \quad (\text{Formel 1.14})$$

Dieses Ergebnis weicht von den in der Tabelle aufgeführten Verhältnissen von $16 : 15 \approx 1,0667$ und $256 : 243 \approx 1,0535$ etwas ab, diese geringfügige Abweichung nehmen die meisten Zuhörer aber nicht wahr. Der Vorteil der wohltemperierten Stimmung liegt darin, dass ein Tonartwechsel sehr einfach möglich ist, was bei den anderen Skalen nicht immer mit zufriedenstellenden Ergebnissen gelingt.

Tab. 1.2: Musikalische Intervalle.

Intervall	Halbtonschritte	Schwingungsverhältnisse der pythagoräischen Skala	Schwingungsverhältnisse der natürlichen Skala
Prime	0	1 : 1	1 : 1
Kleine Sekunde	1	256 : 243 *	16 : 15
Große Sekunde	2 (= Ganzton)	9 : 8	9 : 8
Kleine Terz	3	*	6 : 5
Große Terz	4	81 : 64	5 : 4
Quarte	5	4 : 3	4 : 3
Übermäßige Quarte	6	*	7 : 5
Quinte	7	3 : 2	3 : 2
Kleine Sexte	8	*	8 : 5
Große Sexte	9	27 : 16	5 : 3
Kleine Septime	10	*	7 : 4
Große Septime	11	243 : 128	15 : 8
Oktave	12	2 : 1	2 : 1

* Später eingefügte, zusätzliche Töne.
(Die schwarzen Tasten beim Klavier, wenn von der C-Dur-Tonleiter ausgegangen wird.)

Klangempfindung bei Intervallen

Einem einzelnen Intervall in einer Melodie kann eine gefühlsmäßige Bedeutung zugeschrieben werden. Beispielsweise steht die Prim für Monotonie (es gibt ja keine melodische Entwicklung), die Quarte setzt ein Ausrufezeichen (typische Fanfarenklänge in Historienfilmen), die kleine Sexte steht für Sehnsucht, die große Sexte ist dagegen lebensbejahend und weckt positive Gefühle. Die Oktave schließlich gilt als erhaben und vollendet. Bei der Komposition stehen neben der Melodik aber auch noch andere „Werkzeuge“ zur Verfügung: Harmonik, Rhythmus, Tempo und Instrumentierung.

Kammerton a'

Als Referenz für die Stimmung von Musikinstrumenten wurde international der Kammerton a' mit 440 Hz festgelegt. Man bezeichnet dies auch als die „Stuttgarter Stimmung“, nach einem Vorschlag von Johann Heinrich Scheibler (1777–1837) auf der Versammlung deutscher Naturforscher und Ärzte 1834 in Stuttgart.

Innerhalb eines Ensembles kann aber auch eine andere Grundschwingung für den Referenzton gewählt werden, zum Beispiel 442 Hz beim „Deutschen Kammerton“ für moderne Musik mit Saiteninstrumenten, die bei höherer Stimmung etwas präsenter klingen. Anfang des 19. Jahrhunderts war der Kammerton noch etwas tiefer angesetzt; die Frequenz betrug beispielsweise 437 Hz (Berliner Theater 1822). Soll Musik aus dieser Zeit aufgeführt werden, so kann auch heute noch auf diesen tieferen Referenzton zurückgegriffen werden.

1.4.3 Intervalle in der Ton- und Messtechnik

Oktave

Der Hörbereich des Menschen reicht von 20 Hz bis 20 kHz und umfasst damit 10 Oktaven. Um bei akustischen Messungen und bei der elektronischen Klangbeeinflussung durch Filter (s. Kap. 3.1.7, Kap. 3.2.3 und Kap. 16.2) vergleichbare Werte zu erhalten, wurden durch die DIN EN 61260 – Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven – die Mittenfrequenzen (s. Kap. 6.2) für Oktaven wie folgt festgelegt:

31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 16 kHz.

Große Terz

Die 10 Oktaven des Hörbereichs lassen sich in 30 große Terzen unterteilen (Tab. 1.3). Eine große Terz kann damit als 1/3 einer Oktave gesehen werden. Die Frequenz bzw. das Schwingungsverhältnis s verdoppelt sich somit auf drei Schritte verteilt, mathematisch gilt: $s^3 = 2$. Das Zahlenverhältnis für die große Terz beträgt nach dieser Definition also:

$$s_{\text{gro\ss e Terz}} = \sqrt[3]{2} : 1 \approx 1,2599 \quad (\text{Formel 1.15})$$

Tab. 1.3: Genormte Mittenfrequenzen für Terzen ausgehend von 20 Hz.

20 Hz	40 Hz	80 Hz	160 Hz	315 Hz	630 Hz	1,25 kHz	2,5 kHz	5 kHz	10 kHz
25 Hz	50 Hz	100 Hz	200 Hz	400 Hz	800 Hz	1,6 kHz	3,15 kHz	6,3 kHz	12,5 kHz
31,5 Hz	63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz	16 kHz
Die jeweiligen Oktavfrequenzen sind fett hervorgehoben.									

Halbtonschritt und Cent

Der Halbtonschritt als Basis für die Stimmung der Musikinstrumente kann noch feiner in Cent aufgelöst werden; er entspricht dann 100 Cent. Das Cent findet sich als Maßeinheit auf der Skala von Stimmgeräten (Abb. 1.17) oder auch als Parameter in elektronischen Geräten zur Klangbeeinflussung wie zum Beispiel dem Pitch Shifter oder dem Harmonizer (s. Kap. 16.3.3).

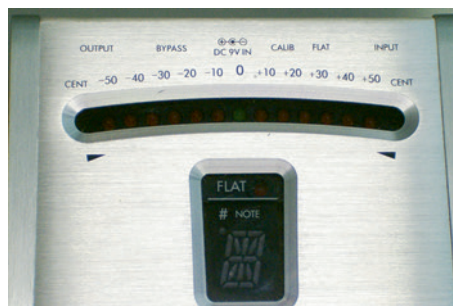


Abb. 1.17: Elektronisches Stimmgerät.

1.5 Ton, Klang, Geräusch und Lärm

Ein *reiner Ton* hat nur eine bestimmte Frequenz und wird auch Sinuston genannt. Reine Töne werden zum Beispiel bei Hörtests oder zum Einmessen elektroakustischer Anlagen benötigt (s. Kap. 19.4). Abb. 1.18 zeigt links die Wellenform (Amplituden-Zeit-Diagramm) und rechts das zugehörige Kurzzeitspektrum eines reinen Tones.

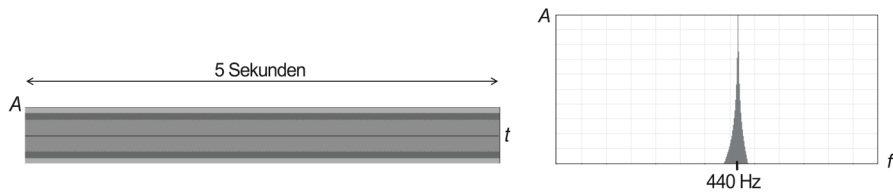


Abb. 1.18: Reiner Ton (Sinusschwingung mit 440 Hz).

Schallerzeuger wie zum Beispiel Musikinstrumente haben die Eigenschaft, dass sie nicht nur in einer einzigen Frequenz schwingen. Neben der tiefsten Frequenz, dem Grundton, treten auch Schwingungen mit höheren Frequenzen auf. Diese zusätzlichen Schwingungen nennt man Obertöne (s. Kap. 1.6). Ein *gewöhnlicher Ton* ist demnach ein Gemisch aus dem Grundton und dazugehörigen Obertönen (Abb. 1.19).

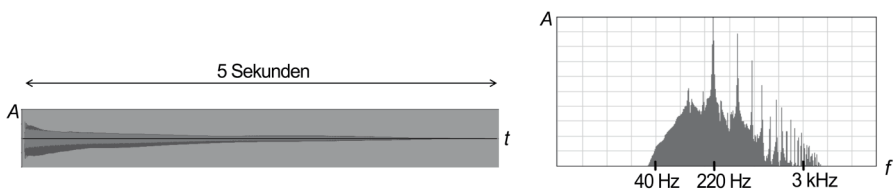


Abb. 1.19: Gewöhnlicher Ton (Note a = 220 Hz, gespielt auf einem E-Bass).

Beim *Klang* sind mehrere unterscheidbare Töne überlagert. Beispiel: Auf einem Instrument werden gleichzeitig zwei oder mehr Töne gespielt, es ertönt ein Akkord. Auch beim *Geräusch* werden mehrere Töne überlagert, nur lassen sich hier keine einzelnen Töne unterscheiden. Beispiele: Papierrascheln, Wasserrauschen oder ein synthetisch erzeugtes Rauschen als Testsignal (Abb. 1.20).

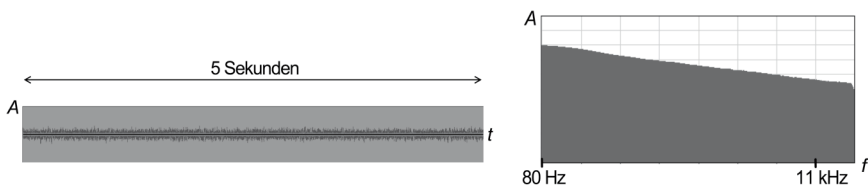


Abb. 1.20: Geräusch (hier als Testsignal ein Rosa Rauschen, s. Kap. 19.4.1).