



SAUR

Michael Dickreiter

Handbuch der Tonstudioteknik

Band 1

Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung,
Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik,
Klanggestaltung

Herausgegeben von der
Schule für Rundfunktechnik

5., völlig neubearbeitete und ergänzte Auflage

K·G·Saur
München·New York·London·Oxford·Paris 1987

Herausgeber:
Schule für Rundfunktechnik.
Aus- und Fortbildungsinstitut der
deutschen Rundfunk- und Fernseh-Anstalten
Wallensteinstr. 121, 8500 Nürnberg 80

Für die in diesem Buch enthaltenen Angaben
wird keine Gewähr hinsichtlich der Freiheit
von gewerblichen Schutzrechten
(Patente, Gebrauchsmuster, Warenzeichen) übernommen.
Auch die in diesem Buch wiedergegebenen Gebrauchsnamen,
Handelsnamen und Warenbezeichnungen
dürfen nicht als frei zur allgemeinen Benutzung
im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung betrachtet werden.
Die Verletzung dieser Rechte
ist im Rahmen der geltenden Gesetze strafbar
und verpflichtet zu Schadenersatz.

in Vorbereitung
Handbuch der Tonstudioteknik Bd.2 / ET: Anfang 1990

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Handbuch der Tonstudioteknik / hrsg. von d. Schule
für Rundfunktechnik. Michael Dickreiter. – München ;
New York ; London ; Oxford ; Paris : Saur
ISBN 3-598-10588-6

NE: Dickreiter, Michael: Schule für
Rundfunktechnik (Nürnberg)

Bd. 1. Raumakustik, Schallquellen, Schallwahrnehmung,
Schallwandler, Beschallungstechnik, Aufnahmetechnik,
Klanggestaltung. - 5., völlig Neubearb.

u. erg. Aufl. – 1987
ISBN 3-598-10589-4

©1987 by K. G. Saur Verlag KG, München
Alle Rechte vorbehalten - All Rights strictly Reserved.
Jede Art der Vervielfältigung ohne Erlaubnis
des Verlages ist unzulässig
Druck: grafik + druck, München
Binden: Thomas-Buchbinderei GmbH, Augsburg
Printed in the Federal Republic of Germany

ISBN 3-598-10588-6 (Gesamt)
ISBN 3-598-10589-4 (Band 1)

Vorwort

Die 5. Auflage des Handbuchs der Tonstudioteknik ist eine vollständige Neubearbeitung.

Die 1. Auflage erschien 1973 bis 1977 in mehreren Folgen als Loseblattausgabe für den rundfunkinternen Gebrauch. Bereits die 2. Auflage wurde durch den Verlag K.G. Saur auch Interessenten außerhalb der Rundfunkanstalten zugänglich gemacht. Bald war eine 3. und 4. Auflage nötig, letztere in mehreren Nachdrucken. Die anhaltende Nachfrage und die Entwicklung der Tonstudioteknik waren jetzt Veranlassung, das Handbuch gründlich zu überarbeiten. Das führte zu einer Aufteilung in 2 Bände, um bei zukünftigen Neuauflagen für Änderungen flexibler zu sein und um unterschiedlichen Leser-Interessen besser zu entsprechen.

Band 1 enthält mit Raumakustik, Akustik der Schallquellen, Schallwahrnehmung, Schallwandlern, Beschallung, Aufnahmetechnik und Geräten zur Klanggestaltung die Grundlagen der Tontechnik, bei denen technische Neuerungen geringere Veränderungen bedeuten. Diese Grundlagen wurden neu geordnet und ausführlicher dargestellt. Auf technische Details, die oft nach kurzer Zeit nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen, wurde in diesem Band weitgehend verzichtet.

Der Schwerpunkt von Band 2 liegt auf den Geräten der Tonstudioteknik: Regieanlagen, Aufzeichnungsgeräte u. a. und der Betriebstechnik. Band 2 enthält außerdem ein Verzeichnis der Symbole und ein Glossar der englischen Bezeichnungen.

Die Zielsetzung ist gegenüber der ersten Auflage unverändert: Das Handbuch ist eine detaillierte Gesamtdarstellung der Tonstudioteknik, die dem Anfänger und dem Erfahrenen schnell notwendige Informationen zur Verfügung stellen soll. Die Fakten sind systematisch geordnet; das Buch ist kein Lehrbuch und verzichtet deshalb weitgehend auf mathematische Ableitungen.

Wir danken allen Mitarbeitern an diesem Handbuch und allen, die uns Hinweise für die Überarbeitung gaben. Manfred Dittmar und Rolf Nusser haben dankenswerterweise die Durchsicht der Druckfahnen übernommen.

Nürnberg, im Februar 1986
SCHULE FÜR RUNDfunkTECHNIK

Inhalt

1. Akustik	1
<i>1.1 Schallfeld</i>	2
1.1.1 Schallausbreitung in der Luft	2
Kugelwelle und ebene Welle	6
Schalldruck, Schallschnelle und Schallkennimpedanz	6
Schalldruckpegel	8
Schalleistung und Schallintensität	9
1.1.2 Einflüsse auf die Schallausbreitung in einem Raum	11
Schallreflexion	11
Schallreflexion an ebenen Flächen, 11 – Schallreflexion an gekrümmten Flächen, 13	
Schallbeugung	15
Einfluß der Wellenlänge auf die Schallreflexion und die Schallbeugung	16
Schallbrechung	17
Schallabsorption	17
Höhenabsorber, 19 – Mittenabsorber, 21 – Tiefenabsorber, 22	
Schalldämmung	23
<i>1.2 Raumakustik</i>	25
1.2.1 Der zeitliche Aufbau des Schallfeldes	25
1.2.2 Begriffe der Hörakustik	27
1.2.3 Direktschall und erste Reflexionen	27
Deutlichkeitsgrad, Klarheitsmaß	29
1.2.4 Hall	30
Nachhallzeit	31
Anfangsnachhall, 33 – Nachhalldauer, 33 – Optimale Nachhallzeit, 34 – Frequenzgang der Nachhallzeit, 34	
Anhall	35
Hallradius	36
Akustik der Aufnahmestudios und Regieräume	38
Störgeräuschpegel, 39 – Raumakustik von Aufnahmestudios, 40 – Veränderbare Nachhallzeit, 42 – Akustik von Regieräumen, 43 – Akustik im Übertragungswagen und in kleinen Abhörräumen, 43 – Akustik der Konzertsäle, Opernhäuser und Kirchen, 44	
Größen und Einheiten	47
Normen	47
Empfehlungen und Richtlinien	48
Literatur	49

2. Schallquellen	53
2.1 <i>Schallformen</i>	53
2.1.1 Schwingungen	54
Einfache Schwingungen	54
Überlagerung von Schwingungen	56
Analyse von Schwingungen	57
Analyseverfahren, 60	
2.2 <i>Menschliche Stimme</i>	61
2.2.1 Akustische Eigenschaften	61
Sprachspektrum	63
Sprachschallpegel	65
Singstimme	65
2.2.2 Richtcharakteristik	66
2.2.3 Sprachverständlichkeit	68
2.3 <i>Musikinstrumente</i>	69
2.3.1 Akustische Eigenschaften	69
Einschwingen	69
Quasistationärer Klangabschnitt	72
Teiltonaufbau, 73 – Formanten, 74 – Geräuschkomponenten, 75	
Ausklingvorgang	75
Musikalische Dynamik	76
Stimmung der Instrumente	78
2.3.2 Instrumente und ihre Eigenschaften	79
Streichinstrumente	79
Violine, 82 – Viola, 83 – Violoncello, 83 – Kontrabaß 83	
Holzblasinstrumente	84
Flöte, 84 – Oboe, Englisch Horn, 85 – Klarinette, 85 – Saxophon, 86 – Fagott, 86	
Blechblasinstrumente	86
Horn, 87 – Trompete, 87 – Posaune, 88 – Tuba, 88	
Klavier und Cembalo	88
Orgel	89
Keyboards	89
Clavinet, 90 – Mellotron, 90 – E-Piano, 90 – Stringsynthesizer, 90 – Elektronische Orgeln, 90 – Synthesizer, 91	
Gitarren	94
Schlaginstrumente	96
2.3.3 Richtcharakteristiken	97
Streichinstrumente	98
Violine und Viola, 99 – Violoncello, 99 – Kontrabaß, 100	
Holzblasinstrumente	100
Blechblasinstrumente	101

Normen und Empfehlungen	103
Literatur	104
3. Schallwahrnehmung	107
3.1 <i>Das Gehör und seine Funktion</i>	107
3.2 <i>Schallereignis und Hörereignis</i>	108
3.3 <i>Eigenschaften der Wahrnehmung</i>	110
3.3.1 Lautstärkepegel und Lautheit	110
3.3.2 Anpassung und Verdeckung	113
3.3.3 Tonhöhe	114
3.3.4 Verzerrungen	114
3.3.5 Rauigkeit und Schärfe	115
3.3.6 Subjektive Tondauer	116
3.3.7 Hörbarkeit von Phasenänderungen	116
3.4 <i>Räumliches Hören natürlicher Schallquellen</i>	117
3.4.1 Wahrnehmung der Richtung	118
Horizontale Ebene	118
Interaurale Zeitdifferenzen, 118 – Interaurale Pegeldifferenzen, 119 – Zusammenwirken von interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen, 120 – Lokalisationsunschärfe, 120	
Medianebene	121
3.4.2 Wahrnehmung der Entfernung	122
Im-Kopf-Lokalisation	123
3.5 <i>Räumliches Hören bei elektroakustischer Wiedergabe</i>	124
3.5.1 Lautsprecherwiedergabe	124
Stereohörfäche	126
Phantomschallquellen bei Pegeldifferenzen	127
Phantomschallquellen bei Zeitdifferenzen	127
Phantomschallquellen beim Zusammenwirken von Pegel- und Zeitdifferenzen	129
3.5.2 Kopfhörerwiedergabe	130
Entzerrung der Kopfhörer	132
Wiedergabe von Kunstkopfaufnahmen	134
3.5.3 Theorien zur Lokalisation von Phantomschallquellen	134
Summenlokalisierung	135
Assoziationsmodell	136
Normen	138
Literatur	140

4. Schallwandler und Beschallungstechnik	143
4.1 <i>Prinzipien und Einteilung der Wandler</i>	143
4.2 <i>Mikrofone</i>	146
4.2.1 <i>Eigenschaften von Mikrofonen</i>	147
Übertragungsfaktor und Übertragungsmaß, Empfindlichkeit	147
Übertragungsbereich	148
Frequenzkurve	148
Direktfeld- und Diffusfeldfrequenzgang, 148 – Frequenzgang bei Nah-	
besprechung von Gradientenempfängern, 151	
Störpegel	153
Grenzschalldruck, Aussteuerungsgrenze	157
Nennabschlußimpedanz, Nennimpedanz	157
Richtwirkung und ihre Frequenzabhängigkeit	157
Vergleich der verschiedenen Richtcharakteristiken für den praktischen Ein-	
satz, 159 – Druckempfänger, 162 – Prinzip des Druckgradientenempfän-	
gers, 164 – Druckgradientenempfänger mit Achterrichtcharakteristik, 166 –	
Druckgradientenempfänger mit Nierenrichtcharakteristik, 167 –	
Druckgradientenempfänger mit Hyper- und Supernierenrichtcharak-	
teristiken, 170 – Interferenzempfänger mit Keulencharakteristik,	
171 – Torus-Richtcharakteristik, 173	
Wind- und Poppstörungen	173
4.2.2 <i>Bauformen von Mikrofonen</i>	173
Kohlemikrofone	173
Kondensatormikrofone	174
Mikrofon-Vorverstärker, 175 – Spannungsversorgung der Kondensator-	
mikrofone, 176 – Druckempfänger mit Kugelrichtcharakteristik, 179 –	
Druckgradientenempfänger mit Nieren- und Achterrichtcharakteri-	
stik, 180 – Kondensatormikrofone mit umschaltbarer Richtcharakteri-	
stik, 181 – Koinzidenzmikrofone, 184 – Lavalier-Ansteckmikrofone, 186 –	
Grenzflächenmikrofone, 187 – Körperschallmikrofone, 189	
Dynamische Mikrofone	189
Tauchspulmikrofone, 190 – Bändchenmikrofone, 192	
4.2.3 <i>Mikrofonständer</i>	193
4.2.4 <i>Einrichtungen für drahtlose Mikrofone</i>	194
Zugelassene Frequenzbereiche	195
Sender	197
Wellenausbreitung	199
Empfänger	200
Empfangsantennen, 200	
Diversity-Betrieb	202
Kompanderverfahren für drahtlose Mikrofone	204

4.3 <i>Lautsprecher</i>	205
4.3.1 Bauformen von Lautsprechern	205
Dynamischer Lautsprecher	205
Konuslautsprecher, 205 – Kalottenlautsprecher, 207	
Elektrostatische Lautsprecher	208
Akustischer Kurzschluß und Lautsprecherboxen	209
4.3.2 Eigenschaften von Regielautsprechern	211
Frequenzgang	211
Ortsanpassung, 212	
Nichtlineare Verzerrungen	213
Richtcharakteristik	214
Aufstellung von Regielautsprechern	215
Bezugsregielautsprecher	216
4.4 <i>Kopfhörer</i>	220
4.4.1 Eigenschaften von Kopfhörern	221
Frequenzgang	221
4.4.2 Bauformen von Kopfhörern	224
4.4.3 Einrichtungen für drahtlose Kopfhörer	225
Übertragungsverfahren	225
Modulationsverfahren, 227 – Raumausleuchtung mit Infrarotlicht, 228 – Störungen der Infrarot-Übertragung, 229	
4.5 <i>Beschallung</i>	230
4.5.1 Einspielung	231
Aufstellung der Lautsprecher	231
Schallzeilen	233
Leistungsbedarf	235
Anschluß der Lautsprecherboxen	236
Aktive Lautsprecherboxen, 236 – Passive Lautsprecherboxen in nieder- ohmiger Schaltung, 237 – Passive Lautsprecherboxen in 100-Volt- Technik, 238	
4.5.2 Verstärkung von Schallquellen	240
Rückkopplung	240
Heraufsetzen der Rückkopplungsgrenze, 240	
Verzögerung der Lautsprechersignale	242
Bühnenbeschallung	243
Freiluftveranstaltungen	244
Stereofone Beschallungsanlagen	244
4.5.3 Verstärkung von Schallquellen bei gleichzeitiger Aufnahme	245
Normen	245
Literatur	246

5. Aufnahmetechnik	249
5.1 <i>Pegel</i>	249
5.1.1 Relativer und absoluter Spannungspegel	250
Funkhausnormpegel	251
5.1.2 Andere Pegelangaben	252
5.1.3 Rechnen mit Pegeln	253
Verstärkung und Dämpfung im Pegelmaß	253
Überlagerung von Spannungen	254
Pegeldiagramme	255
5.2 <i>Aussteuerung</i>	255
5.2.1 Eigenschaften des Aussteuerungsmessers	256
Aussteuerung bei digitaler Tonsignalverarbeitung	259
5.2.2 Aussteuerung bei der Sendung	262
Richtlinien für die Aussteuerung im Hörrundfunk	264
Richtlinien für die Aussteuerung im Fernsehrundfunk	265
Probleme der Kompatibilität bei Ansagen	266
5.2.3 Aussteuerung bei der Produktion	267
Dynamik	267
Programmdynamik, 270	
5.3 <i>Übertragungsverfahren</i>	273
5.3.1 Monofonie	274
5.3.2 Stereofonie	275
Aufnahmetechnik	275
Kopfbezogene Stereofonie	276
Praktische Anwendung, 280	
Raumbezogene Stereofonie	279
Kompatibilität	280
Vielkanaltechnik	282
5.4 <i>Wort- und Musikproduktionen</i>	282
5.4.1 Wortproduktionen	282
5.4.2 Musikproduktionen	284
5.5 <i>Stereoaufnahme-technik</i>	285
5.5.1 Übersicht über die Aufnahme- und Mikrofonverfahren raumbezogener Stereofonie	286
5.5.2 Gesichtspunkte für die Anwendung der einzelnen Verfahren	288
5.5.3 Intensitätsstereofonie	289
XY-Mikrofonverfahren	289
MS-Mikrofonverfahren	291
Äquivalente Richtcharakteristik-Kombinationen der XY- und MS-Mikrofontechnik	292
Praktischer Einsatz von Stereomikrofonen	294

Aufnahmebereich, 294 – Einschränkung der Äquivalenzen, 295 – Ausrichtung des Stereomikrofons, 297 – Einsatz mehrerer Stereomikrofone, 300 – Einsatz von Monostützmikrofonen, 304 – Raumbezogene Stützmikrofone, 305	
Einzelmikrofonverfahren	307
Überwachung der Stereosignale bei Intensitätsstereofonie	309
Korrelationsgradmesser, 310 – Stereosichtgerät, 312 – Abhöreinheit, 314	
5.5.4 Laufzeitstereofonie	316
Praktischer Einsatz der Laufzeitstereofonie	317
Mikrofontyp, 318 – Grenzflächenmikrofone, 319 – Abstand zur Schallquelle, 320 – Mikrofonbasis, 320 – Abbildung der Schallquellen auf der Stereobasis, 322	
5.5.5 Die Verfahren der gemischten Stereofonie	323
ORTF-Mikrofonverfahren, 327 – OSS-Scheibe, 328 – Kunstkopf als Stereomikrofon, 329 – Kugelmikrofone mit großer Basis, 331	
5.5.6 Sprachaufnahmen	332
Abhörlautstärke bei der Aufnahme	332
Interviews und Reportagen	332
Gesprächsrunden	333
Störungen bei Sprachaufnahmen	334
5.5.7 Klangästhetische Gesichtspunkte bei Aufnahmen von Musik	335
Verteilung der Schallquellen auf der Stereobasis	336
Breite und Tiefenstaffelung, 337 – Historische Entwicklung, 338	
5.5.8 Mikrofonaufstellungen bei Fernsehaufnahmen	339
Fernsehspiele	339
Unterhaltung und Show	341
Dokumentation, Feature und Aktualitäten	342
5.5.9 Mehrspurtechnik	343
Anwendung	343
Verfahren bei der Aufnahme	343
Mehrspurgeräte	345
Playbackverfahren	346
Normen	348
Richtlinien	348
Literatur	349
6. Geräte zur Klanggestaltung	351
6.1 <i>Beeinflussung des Frequenzgangs</i>	351
6.1.1 Frequenzgang und Typen von Entzerrern	352
Parametrische Entzerrer	354
Tiefenentzerrer, 354 – Höhenentzerrer, 356 – Kombinierte Tiefen- und Höhenentzerrer, 357 – Präsenz- und Absenzfilter, 359 – Spezialfilter, 361	
Grafische Entzerrer	362

Dynamische Entzerrer	364
Filter-Begrenzer, 000 – Programmgesteuertes Rauschfilter, 364	
6.2 <i>Effektgeräte</i>	367
6.2.1 Phasing und Flanging	367
6.2.2 Harmonizer und Zeitkompressor/-expander	368
6.2.3 Vocoder	370
6.2.4 Aphex Aural Exciter	371
6.3 <i>Beeinflussung der Abbildungsrichtung</i>	372
6.3.1 Panorama-Potentiometer (Pan-Pot)	373
6.3.2 Richtungsmischer	376
6.3.3 Pseudostereofonie	379
6.3.4 Monofonisierung	380
90°-Filter	380
6.4 <i>Beeinflussung des Raumeindrucks</i>	382
6.4.1 Erzeugung künstlichen Raumschalls	383
Raummikrofone	384
Hallraum	385
Hallplatte	386
Hallfolie	387
Hallfeder	388
Digitale Hallgeräte	391
6.4.2 Verzögerungsgeräte	395
Anwendungen der Verzögerungsgeräte	396
Anwendungen in der Aufnahmetechnik und Beschallungstechnik, 396, – Anwendungen bei Effekten der Aufnahmetechnik, 398	
6.5 <i>Regelverstärker</i>	399
6.5.1 Statisches Verhalten	399
6.5.2 Dynamisches Verhalten	401
Stereokopplung	403
6.5.3 Begrenzer	405
Statisches Verhalten	405
Filter im Regelkreis, 406	
Dynamisches Verhalten	408
6.5.4 Kompressor und Expander	410
Statisches Verhalten	410
Dynamisches Verhalten	413
6.5.5 Noise Gate und Effektregelverstärker	415
Normen	416
Literatur	417
 Sachregister	 419

1. Akustik

Akustik ist die Wissenschaft vom Schall. Schall sind mechanische Schwingungen und Wellen eines elastischen Mediums. Das Medium kann z.B. Luft (Luftschall), Wasser (Wasserschall) oder ein Festkörper (Körperschall) sein. Dem Ohr wird Schall durch das Medium Luft übermittelt. Liegen diese Schallwellen im Hörbereich, haben sie also Frequenzen zwischen etwa 16 Hz und 16 kHz, so spricht man von Hörschall, liegen ihre Frequenzen unter 16 Hz, spricht man von Infraschall, liegen sie über 16 kHz, von Ultraschall. Bei Frequenzen über 10^9 Hz spricht man von Hyperschall.

Je nach seiner Form unterscheidet man hauptsächlich folgende Arten eines Schallsignals (Grundbegriffe DIN 1320, Formelzeichen DIN 1322, Zeitabhängige Größen DIN 5488):

(Reiner) Ton: Sinusförmige Schallschwingung im Hörbereich. Die in der Musik übliche Bestimmung des Begriffes „Ton“ weicht von der in der Akustik üblichen ab; in der Musik wird das Schallereignis, das einer einzelnen Note entspricht, Ton genannt. In der Terminologie der Akustik handelt es sich dabei um einen Klang, der zusätzlich Geräuschanteile enthält.

Tongemisch: Aus Tönen beliebiger Frequenzen zusammengesetzter Schall.

Klang: Hörschall, der aus Grund- und Obertönen besteht.

Einfacher Klang oder harmonischer Klang: Hörschall, der aus einer Reihe von Teiltönen, deren Frequenzen ganzzahlige Vielfache einer Grundfrequenz sind, besteht, der also nur aus dem Grundton und den dazugehörigen Obertönen zusammengesetzt ist.

Mehrfacher Klang oder Klanggemisch: Hörschall, der aus mehreren einfachen Klängen besteht.

Schallimpuls: Einmaliges Schallereignis von kurzer Dauer.

Tonimpuls: Ton von kurzer Dauer.

Rauschen: Schallsignal statistischer Natur, bei dem nur ein kontinuierliches Intensitätsspektrum angegeben werden kann.

Weißes Rauschen: Weißes Rauschen ist aus sehr vielen, sehr dicht nebeneinander liegenden Sinusschwingungen zusammengesetzt. Diese Teilschwingungen haben gleiche Amplituden; ihre Phasen sind statistisch gleichmäßig unabhängig voneinander verteilt. Die Teiltondichte pro Hz Bandbreite ist konstant. Weißes Rauschen ist also ein Rauschen, dessen spektrale Intensitätsdichte in dem interessierenden Frequenzbereich konstant ist. Spektrale Intensitätsdichte ist der Quotient aus Schallin-

tensität und der dazugehörigen (schmalen) absoluten Frequenzbandbreite. Der interessierende Frequenzbereich ist meist 20 Hz bis 20000 Hz.

Rosa Rauschen: Beim Rosa Rauschen nimmt die Amplitude pro Frequenzverdopplung um den Faktor 0,7 ab, der Pegel also um 3 dB. Es handelt sich um ein Rauschen, dessen spektrale Intensitätsdichte umgekehrt proportional der Frequenz ist. Beim Weißen Rauschen bleibt die Intensität in einem absoluten Frequenzband konstant (z.B. in einem Band von 100 Hz Breite), bei Rosa Rauschen bleibt sie in einem relativen Frequenzband, also einem konstanten Intervall konstant (z.B. in einem Terzbereich).

Geräusch: Schallsignal, das oft ein nicht zweckbestimmtes Schallereignis darstellt und meistens Anteile von Rauschen, Ton- und Klanggemischen enthält.

Im folgenden wird hauptsächlich Luft-Hörschall berücksichtigt, da durch ihn üblicherweise Schallereignisse an die Ohren gelangen und als Hörereignisse bewußt werden bzw. vom Mikrofon aufgenommen werden.

1.1 Schallfeld

Wenn eine Schallquelle das sie umgebende Medium (z.B. Luft) zum Mitschwingen anregt, so entsteht um die Schallquelle eine sich ausbreitende Schallwelle, ein Schallfeld. Ohne Medium, also im Vakuum, wird kein Schallfeld erzeugt. Jede Schallwelle ist verbunden mit räumlichen und zeitlichen Schwankungen von Dichte und Druck des Mediums sowie mit Schwankungen der Geschwindigkeit der um ihre Ruhelage schwingenden Teilchen. Im „freien Schallfeld“ kann sich der Schall völlig ungehindert ausbreiten, er trifft nicht auf Hindernisse; er erreicht den Hörer oder das Mikrofon nur auf direktem Wege, daher auch Direktschall genannt. Im „diffusen Schallfeld“ wird der Schall vielfach an den Wänden und Gegenständen eines Raumes reflektiert, gebeugt, zerstreut oder gebündelt; im diffusen Schallfeld sind praktisch sehr viele verschiedene freie Schallfelder statistisch einander überlagert. Die Schallenergie ist im diffusen Schallfeld im Gegensatz zum freien Schallfeld im Idealfall gleichmäßig über den ganzen Raum verteilt, eine Vorzugsrichtung der Schallausbreitung gibt es nicht. Zur Beschreibung eines Schallfeldes ist die Angabe der Orts- und Zeitabhängigkeit zweier Schallfeldgrößen notwendig; in der Praxis werden meist Druck und Schnelle (Bewegungsgeschwindigkeit der Teilchen) gewählt. [1.1], [1.2], [1.3], [1.4], [1.5], [1.6], [1.7].

1.1.1 Schallausbreitung in der Luft

Die Schallquelle bringt in ihrer unmittelbaren Umgebung die Luftteilchen zum Schwingen; diese übertragen bei Zusammenstößen die Schwingungen weiter auf die ihnen benachbarten Teilchen usw., so daß sich die Schwingung der Schallquelle als Schallwelle über das Medium ausbreitet. Dabei schwingen die Teilchen um ihre Gleichgewichtslage herum in der Ausbreitungsrichtung der Welle (Longitudinal-

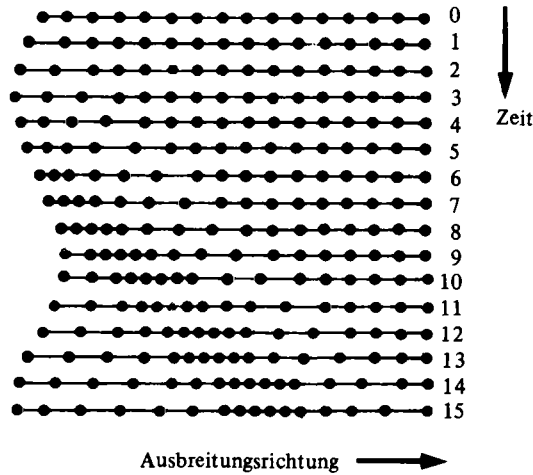


Abb. 1/1. Schematische Darstellung der Ausbreitung einer Schallwelle in Luft in 15 aufeinanderfolgenden Zeitpunkten.

welle). Sie ändern dabei periodisch ihre Bewegungsgeschwindigkeit und ihre Bewegungsrichtung. Durch ihre Auslenkung aus der Gleichgewichtslage (Schallausschlag) verursachen sie periodisch Dichteschwankungen, also Verdichtungen und Verdünnungen und damit Druckschwankungen. *Abb. 1/1* macht anhand der Auslenkung der Luftteilchen die Ausbreitung einer Schallwelle anschaulich.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwelle in Luft wird als Schallgeschwindigkeit c bezeichnet. Sie hängt von der Temperatur ab, was sich z.B. in der Stimmung der Blasinstrumente und der Orgel auswirkt. Bei 10 °C beträgt die Schallgeschwindigkeit etwa 338 m/s , pro 1 °C nimmt sie um $0,6\text{ m/s}$ zu und beträgt demnach bei 20 °C etwa 344 m/s und bei 30 °C etwa 350 m/s . Einen vernachlässigbaren Einfluß auf die Schallgeschwindigkeit haben der stationäre Luftdruck, die Feuchtigkeit und der Gehalt an Kohlendioxyd unter den in der Praxis auftretenden Bedingungen.

Wenn sich eine Schwingung in einem Medium als Welle ausbreitet, treten zu einem bestimmten Zeitpunkt in jeweils gleichen Abständen in der Ausbreitungsrichtung immer wieder dieselben Schwingungszustände (Phasen) auf, z.B. die größte Bewegungsgeschwindigkeit oder die größte Dichte der Luftmoleküle. Diesen Abstand bezeichnet man als Wellenlänge λ (siehe *Abb. 1/2*). Betrachtet man z.B. den Schalldruckverlauf an einer Stelle im zeitlichen Ablauf, so kann dasselbe Schwingungsbild beobachtet werden wie bei der Betrachtung entlang einer Welle in einem Zeitpunkt. Beim Zeitbild der Schwingung ergibt sich aus dem zeitlichen Abstand zweier gleicher Schwingungszustände die Dauer einer Schwingungsbewegung als Periodendauer T . Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde heißt Frequenz f .

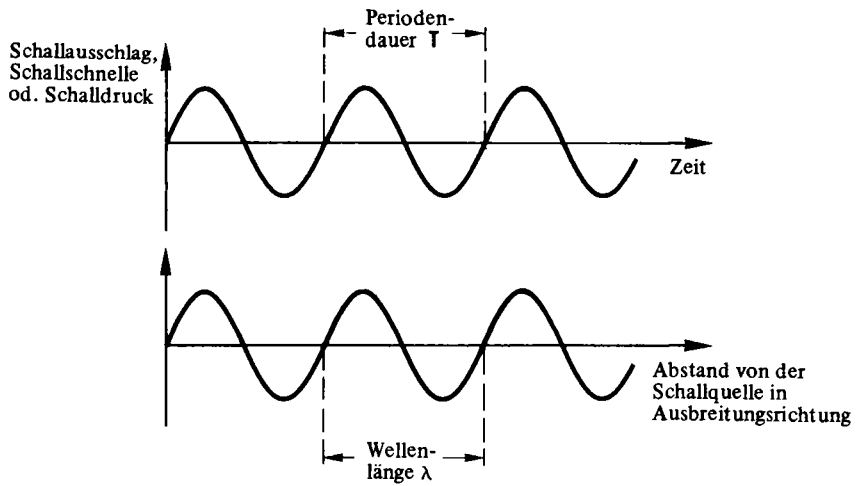


Abb. 1/2. Periodendauer und Wellenlänge einer Schwingung.

$$f = \frac{1}{T}$$

f = Frequenz [Hz]
 T = Periodendauer [s]

Zwischen Schallgeschwindigkeit c , Wellenlänge λ und Frequenz f eines Tones besteht folgende Beziehung:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

c = Schallgeschwindigkeit [m/s]
 f = Frequenz [Hz]
 λ = Wellenlänge [m]

Tab. 1/1 gibt für einige Frequenzen die Wellenlänge an.

Tab. 1/1. Frequenz und Wellenlänge in Luft.

Frequenz	Wellenlänge
16 Hz	21,2 m
20 Hz	17 m
100 Hz	3,4 m
1 000 Hz	34 cm
10 000 Hz	3,4 cm
16 000 Hz	2,1 cm
20 000 Hz	1,7 cm

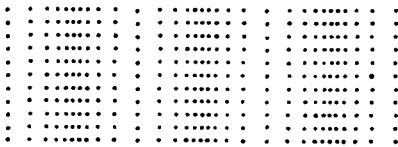
Die Zeit, die eine Schallwelle benötigt, um eine bestimmte Strecke zurückzulegen, wird als Laufzeit t bezeichnet. Sie errechnet sich aus der Beziehung:

$$t = \frac{l}{c}$$

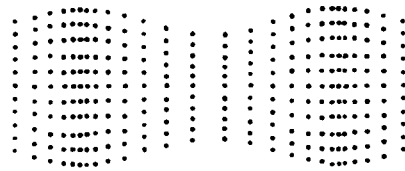
t = Laufzeit [s]
 l = Weg, den die Schallwelle zurücklegt [m]
 c = Schallgeschwindigkeit [m/s]
 = 344 m/s bei 20 °C

Für 34 m ist die Laufzeit also 0,1 s = 100 ms, für 1 m rund 3 ms.

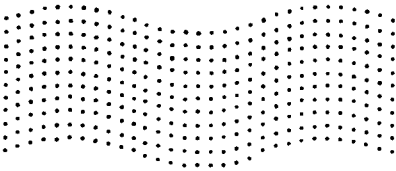
Während die Luftteilchen einer Schallwelle stets in der Ausbreitungsrichtung dieser Welle schwingen, also Longitudinalschwingungen sind, gibt es bei Festkörpern bzw. Flüssigkeiten neben der Longitudinalwelle, die hier als Dichtewelle auftritt, mehrere andere Wellenformen: Oberflächenwelle, Biegewelle, Torsionswelle, Transversal- oder Schubwelle und Dehnwelle (*Abb. 1/3*). Die Schallgeschwindigkeit in Festkörpern ist im allgemeinen wesentlich höher als in Luft, sie liegt bei einigen tausend m/s, und damit ist auch die Wellenlänge wesentlich größer als in Luft.



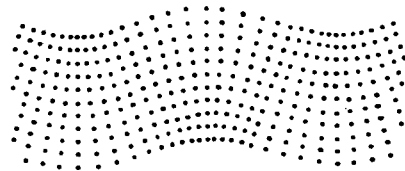
Longitudinal- oder Dichtewelle



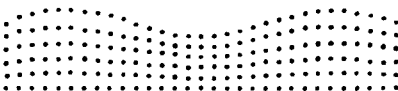
Dehnwelle



Transversal- oder Schubwelle



Biegewelle



Oberflächenwelle

Abb. 1/3. Wellenformen in Festkörpern.

Kugelwelle und ebene Welle

Da die Ausbreitung der Schallwelle in Luft geradlinig nach allen Richtungen erfolgt, liegen die Punkte gleicher Phasen, d.h. gleicher Verdichtung oder Verdünnung, auf konzentrischen Kugelflächen um eine allseitig gleichmäßig abstrahlende punkt- oder kugelförmige Schallquelle. Mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle nähern sich die Flächenelemente dieser Kugelflächen immer mehr ebenen Flächenelementen, die Kugelwelle nimmt mit wachsender Entfernung zur Schallquelle allmählich die Eigenschaften einer ebenen Welle an. Bei Kugelwellen sind alle Schallfeldgrößen auf Kugelschalen um die Schallquelle konstant, während sie bei ebenen Wellen in Ebenen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung konstant sind (Abb. 1/4).

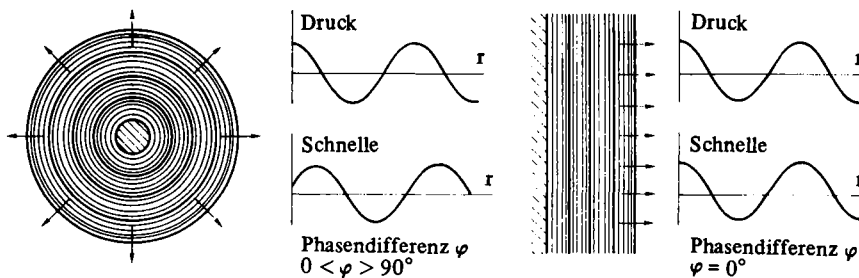


Abb. 1/4. Kugelwelle und ebene Welle.

In der ebenen Welle sind Druck und Schnelle, Schnelle ist die Geschwindigkeit der Teilchenbewegung, immer in Phase. Wo also der Druck seinen größten Wert erreicht, ist auch die Bewegungsgeschwindigkeit der Teilchen am größten. In der Kugelwelle sind Druck und Schnelle in Abhängigkeit von der Frequenz und dem Abstand zur Schallquelle gegeneinander phasenverschoben (siehe unten).

Schalldruck, Schallschnelle und Schallkennimpedanz

Der Schalldruck ist der durch die Schallschwingung hervorgerufene Wechseldruck. Die Druckschwankungen der Schallwelle überlagern sich dem atmosphärischen Gleichdruck. Akustische Berechnungen werden häufig mit dem Schalldruck durchgeführt, da er durch eine einzige Zahlenangabe definiert (skalare Größe) und somit mathematisch relativ einfach zu verwenden ist. Der Schalldruck wird in Pascal oder Newton/m² (1 Pa = 1 N/m²), früher bevorzugt μbar (1 μbar = 0,1 Pa), angegeben. Die im Hörschall üblicherweise vorkommenden Schalldruckwerte liegen zwischen p_0 , dem geringsten bei 1000 Hz wahrnehmbaren Schalldruck von $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, und dem Schalldruck der Schmerzgrenze von etwa $1,5 \cdot 10^2$ Pa. Ein mäßig lauter Ton hat einen Schalldruck von etwa $0,1 \text{ Pa} = 1 \mu\text{bar}$. Der normale atmosphärische Luftdruck beträgt etwa 1000 Hektopascal = 1 bar; der durchschnittliche Schalldruck ist damit nur 1 Millionstel des Atmosphärendrucks.

Die Schallschnelle ist die Wechselgeschwindigkeit eines schwingenden Teilchens. Man benutzt den Ausdruck „Schnelle“ statt „Geschwindigkeit“, um Verwechslungen mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit zu vermeiden. Die Schallschnelle der Teilchen, die in einer Schallwelle schwingen, ist sehr gering. Sie beträgt z.B. bei einem Schalldruck von 0,1 Pa in Luft nur 0,25 mm/s.

Schalldruck und Schallschnelle werden meist als Effektivwert angegeben. Der Effektivwert oder quadratische Mittelwert einer Wechselgröße ist die Wurzel aus dem zeitlichen Mittelwert des Quadrats des Drucks bzw. der Schnelle. Bei sinusförmigen Schwingungen ist der Effektivwert gleich dem Spitzenwert/ $\sqrt{2}$, also etwa das 0,7fache des Spitzenwerts. Bei anderen Schwingungsformen nimmt der Effektivwert andere Werte an.

Schalldruck p und Schallschnelle v haben im Fernfeld einer Schallquelle, also im annähernd ebenen Schallfeld, einen analogen Verlauf; sie sind bei gleichbleibender Amplitude der Frequenz f direkt und dem Abstand von der Schallquelle r umgekehrt proportional, bei konstanter Schalleistung und somit annähernd konstanter Lautstärke sind Schalldruck und Schallschnelle nur der Entfernung umgekehrt proportional; für die Augenblickswerte gilt:

$$p \sim \frac{f}{r} \cdot \sin 2\pi \left(ft - \frac{r}{\lambda} \right)$$

$$v \sim \frac{f}{r} \cdot \sin 2\pi \left(ft - \frac{r}{\lambda} \right)$$

$$p \sim v$$

p	= Schalldruck [N/m ²]
f	= Frequenz [Hz]
r	= Abstand von der Schallquelle [m]
t	= Zeit [s]
λ	= Wellenlänge [m]
v	= Schallschnelle [m/s]

Während sich der Wert des Schalldrucks im Nahfeld der Schallquelle wie im Fernfeld verhält, steigt die Schallschnelle im Nahfeld u. U. ganz erheblich stärker an; das ist bei Schnelle-Empfängern zu beachten, es trifft aber auch bei Druckgradientenempfängern zu (Nahbesprechungseffekt):

$$v \sim \frac{f}{r} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda}{2\pi r} \right)^2} \cdot \sin \left[2\pi \left(ft - \frac{r}{\lambda} \right) + \varphi \right]$$

$$\text{mit } \text{tg}\varphi = \frac{\lambda}{2\pi r}$$

v	= Schallschnelle [m/s]
f	= Frequenz [Hz]
r	= Abstand von der Schallquelle [m]
λ	= Wellenlänge [m]
t	= Zeit [s]

Der Schnelleanstieg an einem bestimmten Punkt im Nahfeld ist von der Frequenz abhängig: je tiefer die Frequenz, um so stärker ist der Anstieg, der durch Schnelle-

wandler und auch Druckgradientenmikrofone als Anhebung tiefer Frequenzen wirksam werden kann, sofern er nicht elektrisch ausgeglichen wird. Weiterhin ist bei gegebener Frequenz der Druckgradienten- bzw. der Schnelleanstieg vom Abstand zur Schallquelle abhängig. Tab. 1/2 gibt für verschiedene Frequenzen an, bei welchem „kritischen Abstand“ von der Schallquelle eine Pegelerhöhung um 3 dB gegenüber hohen Frequenzen eintritt.

Tab. 1/2. Kritische Schallquellenabstände für verschiedene Frequenzen bzw. Töne.

Frequenz	musikal. Ton	kritischer Abstand
16,25 Hz	C''	6,4 m
32,50 Hz	C'	3,2 m
65 Hz	C	1,6 m
130 Hz	c	0,8 m
260 Hz	c'	0,4 m
520 Hz	c''	0,2 m

Der Quotient aus Schalldruck und Schallschnelle ist in der ebenen Welle stets und an jedem Raumpunkt konstant, er wird als Schallkennimpedanz bezeichnet, früher als Schallwellenwiderstand.

$$\frac{p}{v} = Z_0$$

p = Schalldruck [Pa]

v = Schallschnelle [m/s]

Z_0 = Schallkennimpedanz der ebenen Welle [Ns/m³]

Die Schallkennimpedanz der ebenen Welle Z_0 errechnet sich aus der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c :

$$Z_0 = \rho \cdot c$$

Z_0 = Schallkennimpedanz der ebenen Welle [Ns/m³]

ρ = Dichte [kg/m³]

c = Schallgeschwindigkeit [m/s]

Bei Normaldruck und 20 °C ist die Schallkennimpedanz der Luft $Z_0 = 408$ Ns/m³.

Im Nahfeld einer Schallquelle, d.h. in einer Kugelwelle, ist die Schallkennimpedanz nicht mehr überall konstant, die in diesem Fall als spezifische Schallkennimpedanz bezeichnete Größe ist eine komplexe Größe mit Wirk- und Blindanteil.

Schalldruckpegel

Um die auftretenden großen Unterschiede des Schalldrucks besser erfassen zu können, verwendet man im allgemeinen zur Kennzeichnung des Schalldrucks den absoluten Schalldruckpegel L_p , auch kurz einfach Schallpegel genannt. Der Schallpegel entspricht zudem besser dem menschlichen Lautstärkeempfinden. Der Schallpegel ist das 20fache logarithmierte Verhältnis des Schalldrucks zu einem vereinbarten Bezugsschalldruck p_0 . Maßeinheit ist das dB (DIN 5493).

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0}$$

L_p = absoluter Schalldruckpegel [dB]

p = Schalldruck [Pa]

p_0 = Bezugsschalldruck $2 \cdot 10^{-5}$ Pa ($= 2 \cdot 10^{-4}$ μ bar)

p_0 ist ein genormter Bezugsschalldruck (DIN 45 630), der etwa der Hörschwelle entspricht. Die Hörschwelle liegt für 1000 Hz bei 4 dB, für 2000 Hz bei -4 dB; die Schmerzgrenze ist für 1000 Hz bei 130 dB, für 2000 bei 120 dB. Der Bereich mittlerer Lautstärke entspricht einem Schallpegel von ungefähr 70–80 dB.

Verwendet man als Bezugsschalldruck einen beliebigen, frei gewählten Druck, so handelt es sich um den „relativen Schalldruckpegel“. Da das Gehör den Schalldruck in Abhängigkeit von der Frequenz unterschiedlich bewertet, hat man für Messungen den „bewerteten Schallpegel“ eingeführt, der entsprechend den Eigenschaften des Gehörs insbesondere der Frequenzen zwischen 500 und 5000 Hz bei der Messung berücksichtigt. Je nach der Lautstärke wird dabei eines der drei genormten Filter nach DIN IEC 651 (ersetzt DIN 45 633) entsprechend den Bewertungskurven A, B oder C der Messung zugrunde gelegt (Abb. 1/5).

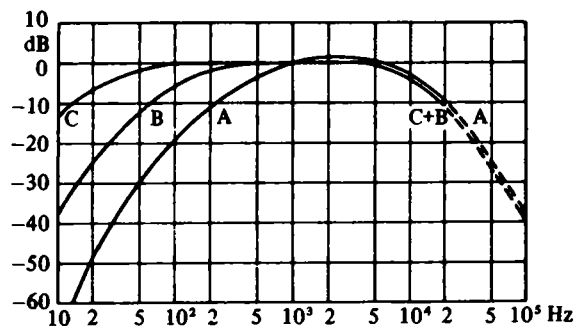


Abb. 1/5. Bewertungskurven zur Messung des bewerteten Schallpegels.

Ein Maß für die empfundene Lautstärke ist der bewertete Schallpegel nur in erster Näherung. Besser beschreiben der Lautstärkepegel und die Lautheit das Schallstärkeempfinden des Menschen (siehe Kap. 3.3.1).

Schalleistung und Schallintensität

Während die mathematische Beschreibung des Schallfeldes am einfachsten mit Hilfe des Schalldrucks oder Schalldruckpegels erfolgt, verwendet man zur Beschreibung der Schallquelle in erster Linie die Energiegrößen Schalleistung und – wie auch zur Beschreibung des Energiegehalts eines Schallfeldes – die Schallintensität.

Die Schallintensität I ist die Schalleistung, die durch eine Flächeneinheit, die senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Schallwelle steht, hindurchströmt. Die Einheit

ist also W/m^2 . Die Schallintensität I einer ebenen Welle ist gleich dem Produkt aus effektivem Schalldruck und effektiver Schallschnelle:

$$I = p_{\text{eff}} \cdot v_{\text{eff}}$$

oder unter Verwendung der Schallkennimpedanz Z_0

$$I = \frac{p_{\text{eff}}^2}{Z_0}$$

- I = Schallintensität [W/m^2]
- p_{eff} = effektiver Schalldruck [Pa]
- v_{eff} = effektive Schallschnelle [m/s]
- Z_0 = Schallkennimpedanz [Ns/m^3]

Für Normalbedingungen im Raum gilt also

$$I = \frac{1}{408} p_{\text{eff}}^2$$

Die gesamte Schalleistung einer Schallquelle ergibt sich als Summe aller Schallintensitäten, die auf Flächenelementen, die zur Ausbreitungsrichtung senkrecht stehen, rund um die Schallquelle ermittelt werden. Diese Flächenelemente liegen auf der Oberfläche einer Kugel, in deren Mittelpunkt die Schallquelle strahlt. Damit ergibt sich im freien Schallfeld für die Schallintensität im Abstand r von einer kugelförmig nach allen Seiten gleichmäßig abstrahlenden Schallquelle in Abhängigkeit von der Schalleistung P die Beziehung:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}$$

- I = Schallintensität [W/m^2]
im Abstand r von der Schallquelle
- r = Abstand von der Schallquelle [m]
- P = Schalleistung [W]

Die akustische Leistung der Schallquellen ist – gemessen an Größenordnungen von mechanischen und Wärmeleistungen – gering (Tab. 1/3).

Tab. 1/3. Schalleistungen einiger Schallquellen (Größenordnungen).

Schallquelle	Schalleistung P [Watt]
Unterhaltungssprache	$10^{-6} \dots 10^{-5}$
Menschliche Stimme (Höchstwert)	$10^{-3} \dots 10^{-2}$
Geige (fortissimo)	10^{-3}
Klarinette, Horn (fortissimo)	$5 - 10^{-2}$
Klavier (fortissimo)	$2 - 10^{-1}$
Trompete (fortissimo)	$3 - 10^{-1}$
Orgel, Pauke (fortissimo)	10
Orchester (75 Musiker)	70
Alarmsirene	1000
Raketen	bis 10^8

So wie der Schalldruck auch im dB-Maß als Schalldruckpegel L_p angegeben wird, so kann auch die Schalleistung als Schalleistungspegel L_p und die Schallintensität als Schallintensitätspegel L_i in dB angegeben werden. Als Bezugswert ist für die Schalleistung $1 \text{ pW} = 10^{-12} \text{ Watt}$, für die Schallintensität $1 \text{ pW/m}^2 = 10^{-12}$ gebräuchlich (DIN 1320)

1.1.2 Einflüsse auf die Schallausbreitung in einem Raum

Das freie Schallfeld existiert praktisch nur in eigens dafür hergerichteten sog. „schalltoten Räumen“, angenähert auch z.B. über einer schneebedeckten Fläche. In Räumen stellen sich der ungehinderten, geradlinigen Schallausbreitung Hindernisse (Wände, Gegenstände im Raum usw.) entgegen, die die Schallausbreitung beeinflussen:

1. Totale oder teilweise Reflexion der Schallwelle bewirkt eine Änderung der Ausbreitungsrichtung entweder im gesamten Frequenzbereich oder nur im Bereich höherer Frequenzen (Einfluß der Wellenlänge) sowie Schallbündelung und Schallzerstreuung.
2. Beugung der Schallwelle bewirkt eine Änderung der geradlinigen Ausbreitungsrichtung besonders im Bereich der tieferen Frequenzen oder ein Umgehen von Hindernissen (Einfluß der Wellenlänge).
3. Totale oder teilweise Absorption der Schallwelle bewirkt, daß der Schallwelle Energie entzogen wird, wodurch sie vernichtet oder geschwächt wird, in der Regel ist die Absorption frequenzabhängig (Einfluß der Wellenlänge).

Schallreflexion

Für die Betrachtung der Schallreflexion eignet sich die Darstellung der Schallausbreitung als Schallstrahl analog der Lichtausbreitung. Es gelten dabei die aus der Optik bekannten Gesetze der Reflexion an ebenen Spiegeln bzw. an Streu- und Hohlspiegeln. Bedingung für die Gültigkeit der Gesetze ist, daß die reflektierende Fläche groß gegen die Wellenlänge der reflektierten Schallwelle ist, d.h. eine Ausdehnung von wenigstens einigen Wellenlängen besitzt [1.4, 1.7, Bd. 1].

Schallreflexion an ebenen Flächen

Trifft ein Schallstrahl auf eine hinreichend große ebene Fläche (*Abb. 1/6*), so wird er unter demselben Winkel (α' in *Abb. 1/6*) reflektiert, unter dem er auf die Wand trifft (α). Einfallender und reflektierter Strahl liegen dabei in einer Ebene. Durch entsprechende Ausrichtung der reflektierenden Fläche kann der Schallstrahl in jede beliebige, gewünschte Richtung gelenkt werden, was bei der raumakustischen Gestaltung Anwendung findet.

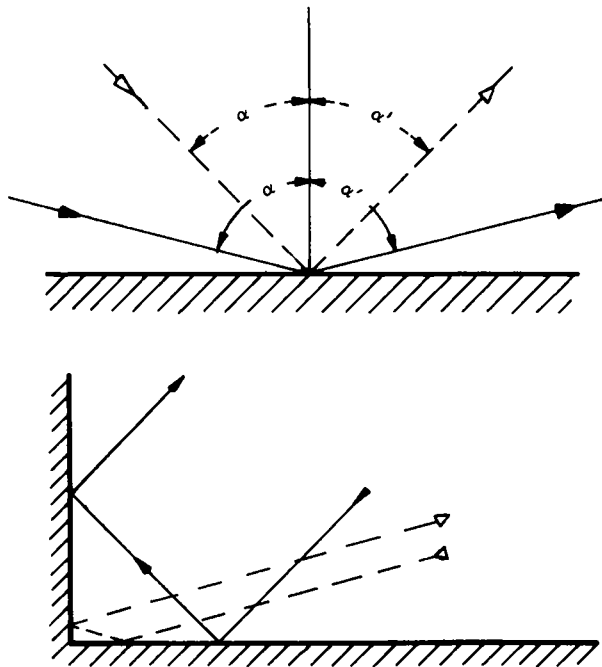


Abb. 1/6. Schallreflexion an einer ebenen Fläche und an einer rechteckigen Ecke (je zwei Beispiele).

Trifft ein Schallstrahl auf eine rechteckige Ecke, so wird er zweimal so reflektiert, daß er parallel zum einfallenden Strahl zurückkehrt (Abb. 1/6).

Zwischen parallelen, reflektierenden Wänden kann es zu „stehenden Wellen“ kommen: Eine senkrecht auftreffende Schallwelle wird hier immer wieder mit ihrer eigenen Reflexion überlagert. Dadurch können sich an gewissen Punkten die Schallwellen ganz oder teilweise gegenseitig auslöschen, an anderen verstärken. Im Gegensatz zur fortschreitenden Welle gibt es also ortsfeste Auslöschungen, die bei Aufnahmen – z.B. bei tiefen Orgeltönen – und bei Messungen stören können. Bedingung für das Zustandekommen stehender Wellen ist, daß der Wandabstand gleich der halben Wellenlänge oder einem ganzzahligen Vielfachen davon ist. Abb. 1/7 zeigt die Druckverteilung in stehenden Wellen; bei vollständiger Reflexion – wie in Abb. 1/7 – ist der Schall in den Druckknoten ausgelöscht, in den Druckbäuchen verdoppelt. Eine stehende Welle kann bei einem bestimmten Wandabstand also immer nur für eine Frequenz und deren harmonische Obertöne auftreten. Ferner entsteht eine stehende Welle nur bei einem Dauerton. In der Praxis treten stehende Wellen als Raumresonanzen besonders in kleineren Räumen auf; sie kennzeichnen neben den wenig verzögerten Reflexionen die typische „Wohnzimmerakustik“. Bei der Aufnahme können solche Resonanzen durch oft nur geringfügiges Verschieben des Mikrofons unschädlich gemacht werden.

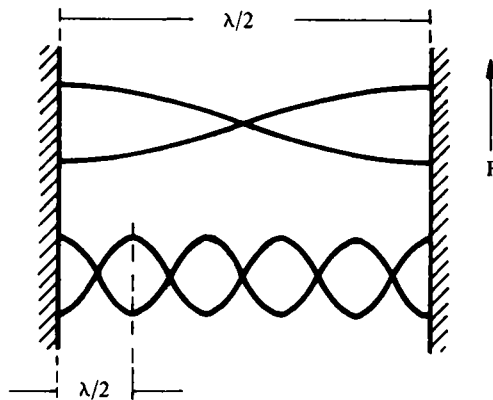


Abb. 1/7. Druckverteilung in stehenden Wellen zwischen zwei parallelen Wänden.

Bei impulsartigem Schall entsteht zwischen parallelen Wänden ein Flatterecho, da das Signal dauernd hin und her reflektiert wird. Bei größerem Wandabstand ist dabei die schnelle Abfolge einzelner Echos wahrnehmbar, bei kleinerem Wandabstand ($<$ etwa 8 m) wird die Abfolge der Echos so rasch, daß ein sog. „Klangecho“ entsteht: Der Schallimpuls erhält eine Art Nachhall, der indes nur eine bestimmte Tonhöhe hat, die vom Wandabstand und dem Standort des Hörers abhängt [1.7].

Schallreflexion an gekrümmten Flächen

Trifft eine Schallwelle auf eine nach innen gewölbte (konkave) Fläche, so müssen – je nach dem Abstand zwischen Schallquelle und reflektierender Hohlfläche – vier verschiedene Fälle unterschieden werden:

1. Der Abstand Schallquelle–reflektierende Fläche ist größer als der halbe Krümmungsradius $r/2$ der Fläche, jedoch kleiner als r : Der gesamte reflektierte Schall wird in einem Punkt, der außerhalb des Krümmungsradius liegt, gesammelt (*Abb. 1/8*).

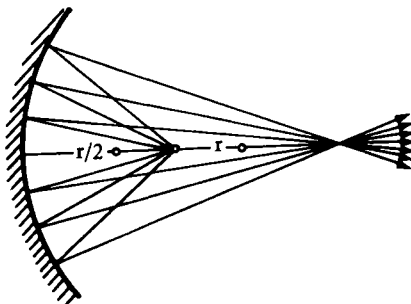


Abb. 1/8. Schallreflexion an einer gekrümmten Fläche, Abstand Schallquelle–reflektierende Fläche größer als der halbe Krümmungsradius $r/2$.

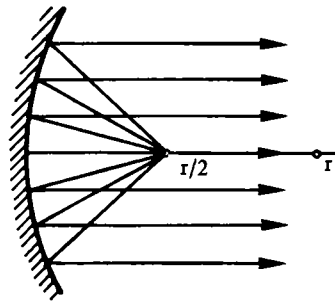


Abb. 1/9. Schallreflexion an einer gekrümmten Fläche, Abstand Schallquelle–reflektierende Fläche gleich dem halben Krümmungsradius $r/2$.

2. Der Abstand Schallquelle–reflektierende Fläche ist gleich dem halben Krümmungsradius $r/2$ der Fläche: Die auseinanderlaufenden Schallstrahlen verlaufen nach der Reflexion parallel (Abb. 1/9).
3. Der Abstand Schallquelle–reflektierende Fläche ist kleiner als der halbe Krümmungsradius $r/2$ der reflektierenden Fläche: Die Schallstrahlen streben nach der Reflexion auseinander, die Anordnung zerstreut den Schall (Abb. 1/10).
4. Der Abstand Schallquelle–reflektierende Fläche ist größer als der Krümmungsradius r : Auch in diesem Fall ergibt sich eine zerstreue Wirkung (Abb. 1/11), die sogar noch stärker ist.

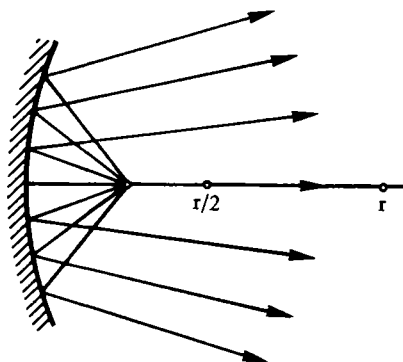


Abb. 1/10. Schallreflexion an einer gekrümmten Fläche, Abstand Schallquelle–reflektierende Fläche kleiner als der halbe Krümmungsradius $r/2$.

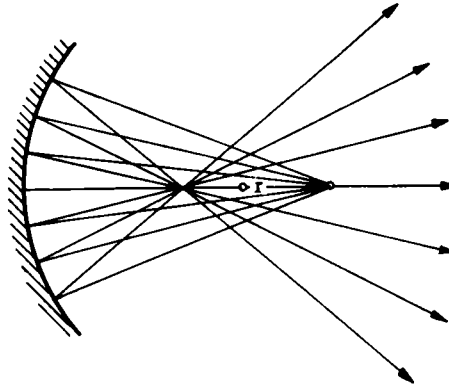


Abb. 1/11. Schallreflexion an einer gekrümmten Fläche, Abstand Schallquelle–reflektierende Fläche größer als der Krümmungsradius r .

Solche gewölbten Flächen sind vor allem die Gewölbe alter Kirchen und anderer historischer Gebäude. Es ist in jedem einzelnen Fall zu prüfen, inwieweit ein Gewölbe schallzerstreuende oder schallsammelnde Wirkung hat. Nach außen gewölbte (konvexe) Flächen haben unabhängig vom Abstand Schallquelle–Wand bzw. Hörer zerstreue Wirkung.

Die Fokussierung einer Schallwelle kann bei Darbietungen und Aufnahmen zu einer unerwünschten Heraushebung einzelner Schallquellen aus einem größeren Schallkörper führen, die besonders auch deshalb als störend empfunden wird, weil die Schallquelle im Gewölbe zu sein scheint. Demgegenüber erhöht die Schallzerstreuung die im allgemeinen erwünschte Diffusität eines Raums und führt damit zu einer gleichmäßigeren Raumerfüllung durch den Schall.

Schallbeugung

Ist die Ausdehnung eines Gegenstandes, auf den eine sinusförmige Schallwelle bei ihrer Ausbreitung trifft, in der Größenordnung der Wellenlänge des Schalls oder kleiner, so wird dieses Hindernis von der Schallwelle so umgangen, als ob es nicht vorhanden wäre (*Abb. 1/12*). Da die Wellenlänge des Hörschalls zwischen etwa 20 m und 2 cm liegt, wird es im allgemeinen in einer aus vielen Teilfrequenzen zusammengesetzten Schallwelle relativ tieffrequente Anteile geben, die um das Hindernis herum gebeugt werden; höherfrequente Anteile hingegen werden von dem Hindernis reflektiert, gelangen also nicht hinter das Hindernis, wo ein Schallschatten entsteht. Damit wird ein komplex zusammengesetzter Klang durch ein Hindernis, das sich zwischen Schallquelle und Hörer befindet, klanglich dumpfer (lineare Verzerrung). An einer Kante wird eine Schallwelle in den Schallschatten hineingebeugt, und zwar um so stärker, je tiefer die Frequenz ist.

Einfluß der Wellenlänge auf die Schallreflexion und die Schallbeugung

Um den Schall reflektieren zu können, muß eine Fläche mindestens einen Durchmesser haben, der mehreren Wellenlängen der zu reflektierenden Schallwelle entspricht. Ist die Ausdehnung geringer, so wird der Schall um das Hindernis herumgebeugt. Selbst wenn der Durchmesser des Hindernisses doppelt so groß wie die Wellenlänge ist, wird der Schall noch fast vollständig herumgebeugt. Erst bei fünffacher Ausdehnung erscheint ein deutlicher Schallschatten. *Abb. 1/12* zeigt an einigen Beispielen die Schallschattenbildung.

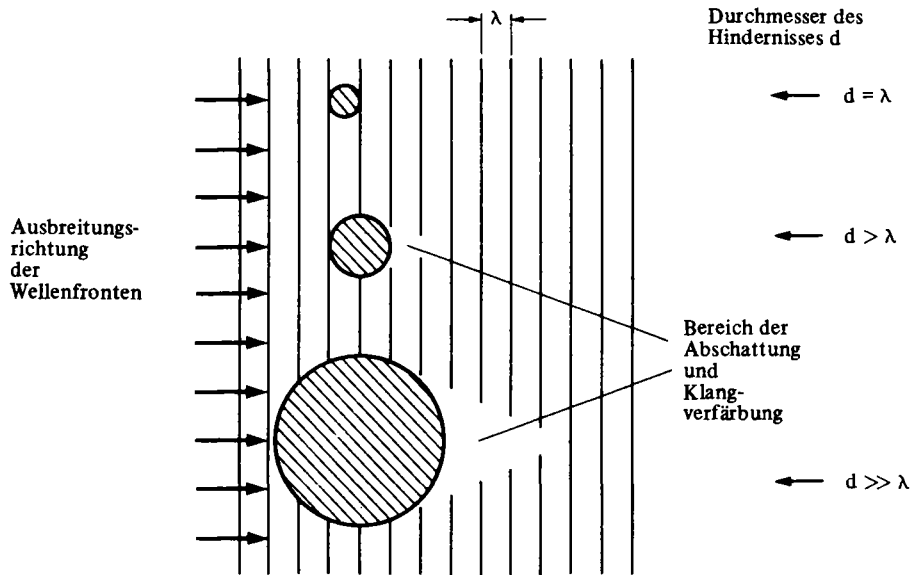


Abb. 1/12. Schallbeugung an einem Zylinder für verschiedene Verhältnisse von Wellenlänge λ zu Zylinderdurchmesser d .

Wenn eine Schallwelle nicht mehr um das Hindernis herumgebeugt wird, wirkt das Hindernis als Reflektor. Die Bedingungen für das Zustandekommen einer vollständigen Reflexion hängen von verschiedenen Faktoren ab: Der Wirkungsbereich eines Reflektors reicht zu um so tieferen Frequenzen hinab, je größer die reflektierende Fläche ist, weiterhin je kleiner ihr Abstand zur Schallquelle ist, je kleiner ihr Abstand zum Hörer ist und je steiler die Schallwelle auf den Reflektor trifft [1.2], [1.9]. Für die tiefste noch reflektierte Frequenz f_u gilt:

$$f_u = \frac{2c}{(d \cdot \cos\alpha)^2} \cdot \frac{a_1 \cdot a_2}{a_1 + a_2}$$

f_u = tiefste noch reflektierte
Frequenz [Hz]

c = Schallgeschwindigkeit
[m/s]

- d = Durchmesser des Reflektors [m]
 α = Einfallswinkel des Schallstrahls [°]
 a_1 = Entfernung Reflektor – Schallquelle [m]
 a_2 = Entfernung Reflektor – Hörer [m]

Schallbrechung

Unter Brechung versteht man die Richtungsänderung des Schallstrahls beim Übergang zu einem Medium mit anderer Schallgeschwindigkeit. Die Brechung ist in der Raumakustik nur für die Schallabsorption von Bedeutung. Im Freien, wo der Schall weit größere Strecken zurücklegen kann, kommt es aber durch Temperaturunterschiede einzelner Luftschichten zu Brechungserscheinungen, da die Schallgeschwindigkeit von der Temperatur abhängt. Liegt eine wärmere Luftschicht über einer kälteren (Inversion), so wird der Schall zur Erde hin geleitet, es können sog. Überreichweiten des Schalls entstehen (Föhnwetterlage oder am frühen Morgen, wenn die Sonne erst die oberen Luftschichten erwärmt hat); bei umgekehrter Schichtung (Normalfall) wird der Schall von der Erde weg nach oben gebeugt, der akustische Horizont liegt deshalb höher als der optische.

Schallabsorption

Bereits bei der Schallausbreitung in Luft, besonders aber beim Auftreffen auf Hindernisse wird dem Schall durch Absorption Energie entzogen. [1.7, Bd. 1], [1.10], [1.11], [1.12], [1.13]

Als Maß für die Absorption wird der Absorptionsgrad α angegeben. Er ist eine Zahl zwischen 1 (totale Absorption) und 0 (keine Absorption, totale Reflexion); er kann auch in % angegeben werden. Der Absorptionsgrad α ist gleich dem Verhältnis von absorbierte Energie zu auftreffender Energie; bei der absorbierten Energie ist die durch die Wand hindurchgehende Energie eingeschlossen. Das Verhältnis der Schalleistungen oder Schallintensitäten führt zu demselben Ergebnis. Die Bestimmung des Absorptionsgrades erfolgt im Hallraum (DIN 52 212) oder in einem Rohr (DIN 52 215). Absorptionsgradwerte über 1 findet man gelegentlich angegeben, sie sind unter praxisnahen Bedingungen bestimmt und tragen der Tatsache Rechnung, daß die wirksame Fläche eines Absorbers etwas größer ist als seine geometrische Fläche. Die Gesamtabsorption einer Wand oder eines Raumes, das sog. Absorptionsvermögen A , ergibt sich als Produkt von Absorptionsgrad α und der absorbierenden Fläche S . A ist also gleich der äquivalenten Absorptionsfläche mit $\alpha = 1$, auch „Fläche offenes Fenster“ genannt.

$$A = \alpha \cdot S$$

A	=	Absorptionsvermögen [m ²]
α	=	Absorptionsgrad [dimensionslos]
S	=	absorbierende Fläche [m ²]

Bei unterschiedlichen Materialien mit verschiedenen Absorptionsgraden ergibt sich A als Summe der Teilabsorptionsvermögen:

$$A = \alpha_1 \cdot S_1 + \alpha_2 \cdot S_2 + \dots$$

Eine wesentliche Eigenschaft eines Absorbers ist die Frequenzabhängigkeit seines Absorptionsgrades, die sich einerseits aus den Materialeigenschaften, andererseits aus der konstruktiven Anordnung (Wandabstand, Abdeckung usw.) ergibt. Man unterscheidet im Hinblick auf die spektrale Wirksamkeit Höhenabsorber, Tiefenabsorber und Mittenabsorber.

Die wichtigsten Funktionsprinzipien der Schallabsorption sind:

Reibung durch Luftbewegung in Poren: Durch die Bewegung der schwingenden Luftteilchen in offenporigen Materialien (Faserstoffen, offenporige Schäume) wird Schallenergie durch Reibung entzogen und in Wärmeenergie umgewandelt. Die Absorption ist bei höheren Frequenzen in einem relativ breiten Frequenzbereich wirksam.

Reibung von durch Resonanz verstärkter Luftbewegung in Helmholtzresonatoren: Die Luftbewegung wird im „Hals“ der Hohlraumresonatoren durch Resonanz verstärkt; dadurch wird die Reibung und damit die Absorption vergrößert. Diese Absorber sind in einem relativ schmalen Frequenzband um die Resonanzfrequenz wirksam.

Anregung von Platten zum Mitschwingen: Dem Schallfeld wird dadurch Energie entzogen, daß Platten, die verglichen mit Luft ein sehr hohes spezifisches Gewicht haben, zum Mitschwingen angeregt werden, in ihrer Bewegung aber durch federnde Unterlagen und innere Reibung gedämpft werden. Die Absorption ist schmalbandig, kann aber durch Kombination verschiedener Elemente breitbandig gemacht werden.

Die Absorber müssen an der Decke und auf mindestens zwei zueinander senkrecht stehenden Wandflächen angeordnet werden und sollten anteilmäßig zur Größe der jeweiligen Raumbegrenzungsfläche verteilt werden. Der dabei auf den Boden entfallende Anteil der Absorber wird zusätzlich an der Decke angeordnet. Die genaue Lage der Absorber richtet sich danach, welche Flächenanteile für nützliche Schallreflexionen (z. B. Deckenspiegel in Konferenzräumen und Konzertsälen) benötigt werden bzw. wo schädliche Reflexionen unterdrückt werden müssen.

Die Absorption in Luft macht sich nur im Bereich hoher Frequenzen von etwa 5 kHz an bemerkbar und nimmt mit steigender Frequenz zu, wodurch die Nachhallzeit insbesondere größerer Räume bei hohen Frequenzen weitgehend durch die Luftabsorption bestimmt wird.

Höhenabsorber

Höhenabsorber absorbieren hauptsächlich im Bereich hoher Frequenzen. Meist handelt es sich dabei um sog. »poröse Absorber«, zu denen in erster Linie Faserstoffe zählen (Vorhänge, Teppiche, Polstermöbel, Platten aus Stein- und Glaswolle usw.). Bei diesen Absorbieren strömt die Luft bei ihrer Schwingungsbewegung in den zahlreichen Poren und Kanälen des Materials hin und her. Die dabei durch die Reibung erzeugte Wärmeenergie wird der Schallenergie entzogen.

Da die Absorptionswirkung eines Materials mit der Schallschnelle im Absorber ansteigt, ist ein Absorber dann am wirksamsten, wenn er sich im Bereich eines Schnellextrahums der Schallwelle befindet, in einem Schnellenullpunkt ist er praktisch nicht wirksam. Eine an einer harten Wand reflektierte Welle hat aber an der Reflexionsfläche einen Schnellenullpunkt, im Abstand von $\frac{1}{4}$ Wellenlänge von der Wand ein Schnellextrahum. Deshalb ist die Absorption zu tieferen Frequenzen hin um so wirksamer, je dicker die poröse Schicht ist oder/und je größer ihr Abstand zur Wand ist (Abb. 1/13).

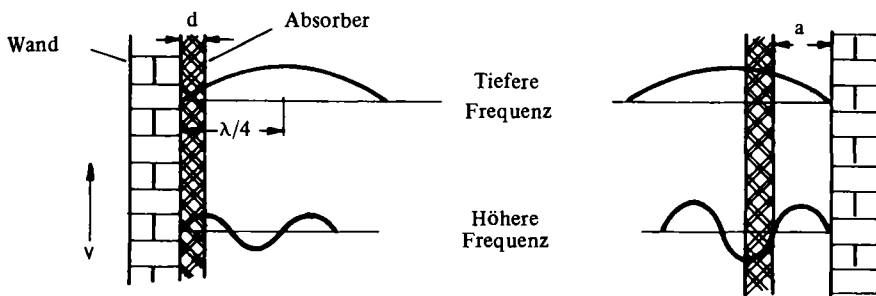


Abb. 1/13. Einfluß der Wellenlänge λ , der Absorptionsdicke d und des Abstandes Absorber-Wand a auf die Absorption.

Die Verbesserung der Absorption bei einem Lattenunterbau zeigt Abb. 1/14.

Oft haben Schallschlucker für hohe Frequenzen aus optischen und akustischen Gründen Abdeckungen aus Holz, Metall usw., die mit einer großen Zahl von Öffnungen versehen sind. Die Abdeckungen bewirken eine Ausdehnung der Absorption nach tieferen Frequenzen hin, während hohe Frequenzen etwas weniger gedämpft werden.

Ein universeller, bei Bedarf leicht anzubringender Höhenabsorber ist ein frei hängender Vorhang aus nicht zu leichtem Stoff. Der Vorhang absorbiert wirksam bei Wellenlängen, die kürzer als der vierfache Abstand Wand-Vorhang sind. Daraus läßt sich die Formel für die untere Grenzfrequenz f_u ableiten, oberhalb der die Absorption einsetzt; Falten ergeben einen gleichmäßigeren Frequenzgang der Absorption.

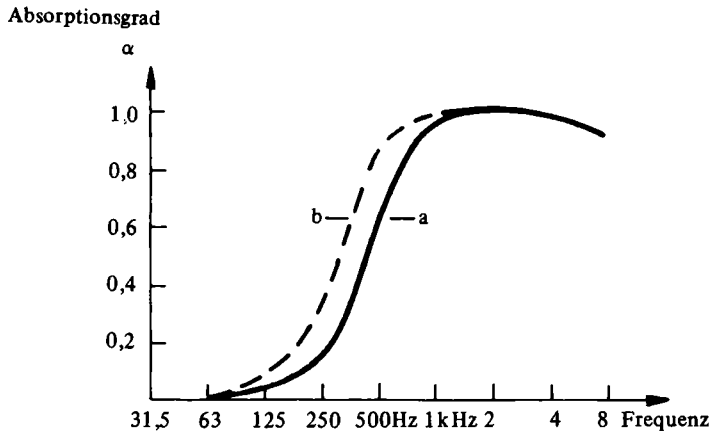


Abb. 1/14. Verlauf des Absorptionsgrades α handelsüblicher Akustikplatten.
 a. direkt auf die Wand gesetzt,
 b. auf Lattenrost, 2,2 cm vor der Wand befestigt.

$$f_u = \frac{8500}{d}$$

f_u = untere Grenzfrequenz [Hz]
 d = Abstand Wand – Vorhang [cm]

Tab. 1/3 nennt die Absorptionsgrade einiger Höhenabsorber.

Tab. 1/3. Absorptionsgrade verschiedener Materialien.

Material	Absorptionsgrade bei verschiedenen Frequenzen					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Beton, unverputzt	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Putz auf Mauerwerk	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Teppich, mittlere Dicke	0,05	0,08	0,20	0,30	0,35	0,40
Akustikplatte 2 cm dick, auf Wand aufgeklebt	0,05	0,15	0,55	0,90	1,0	1,0
Akustikplatte 2 cm dick, 2 cm Wandabstand	0,10	0,20	0,85	1,0	1,0	1,0
Vorhänge	0,05	0,10	0,25	0,30	0,40	0,50

Auch Publikum in einem Aufnahmeaal hat eine starke Absorptionswirkung. Damit kann es die Akustik eines Raums erheblich beeinflussen. Die Absorption wirkt bereits von 200 bis 500 Hz an aufwärts und erreicht für höhere Frequenzen Werte, die denen von Akustikplatten vergleichbar sind (Abb. 1/15). Bei einer Ausstattung mit

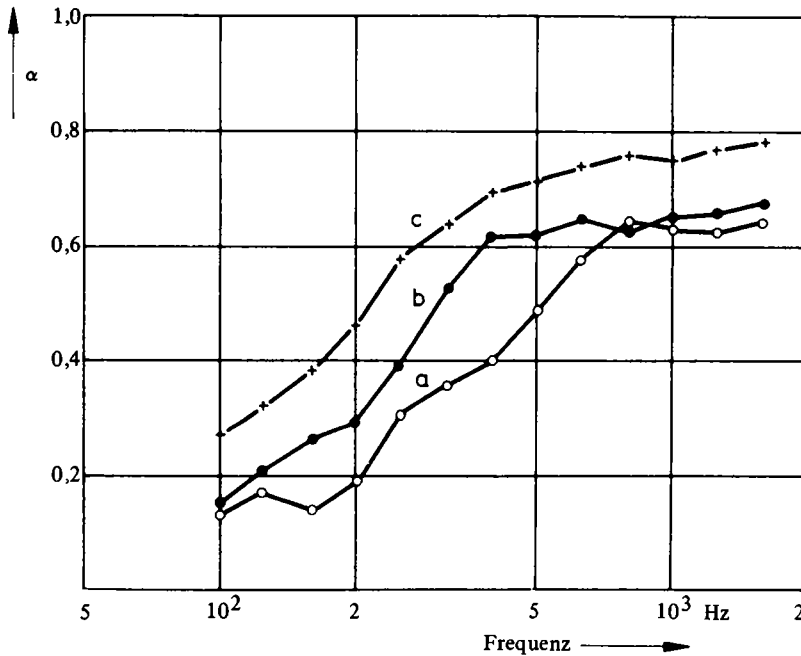


Abb. 1/15. Absorptionswirkung von Publikum

a) Personen auf Holzstühlen nach [1.15]; b) Polsterstühle ohne Personen; c) Polsterstühle mit Personen.

Polsterstühlen ist der Unterschied in der Akustik von besetztem und unbesetztem Saal nicht sehr groß, bei Verwendung von Holzstühlen oder Bänken hingegen kann sich die Akustik durch das Publikum grundlegend verändern; dies trifft insbesondere für Kirchen zu, vor allem, wenn sie relativ klein sind. [1.14], [1.15], [1.16]

In relativ unbedämpften Räumen mit viel Publikum bestimmt die Absorption des Publikums weitgehend die Nachhallzeit, so daß in solchen Räumen in erster Linie das Raumvolumen pro Hörer die Nachhallzeit ergibt. Bei 8–9 m³ pro Zuhörer wird sich eine Nachhallzeit von etwa 2 s ergeben, bei 6–7 m³ pro Hörer wird sie bei etwa 1,5 s liegen.

Mittenabsorber

Durch konstruktive Maßnahmen an Höhenabsorbern, wie vergrößerter Wandabstand, größere Schichtdicke und perforierte Abdeckung des Absorbers, wird ein

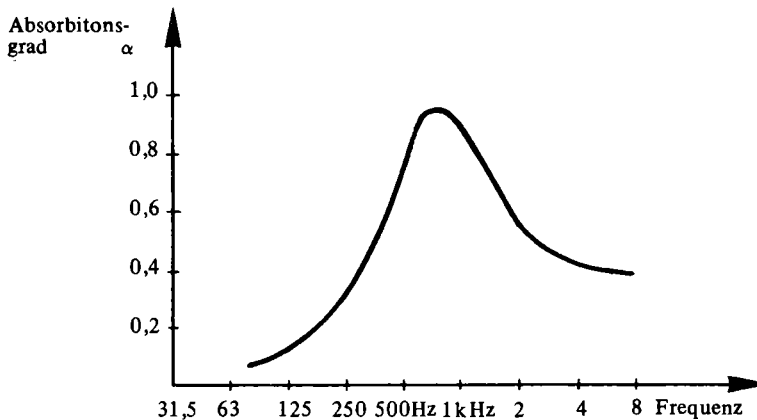


Abb. 1/16. Typischer Absorptionsverlauf eines Helmholtz-Mittensorbers.

Höhenabsorber auch im mittleren Frequenzbereich um 500 Hz wirksam. Seltener werden spezielle Mittensorber, sog. Lochabsorber, verwendet, gelochte oder geschlitzte Platten vor einem Hohlraum, dessen Begrenzungsflächen teilweise mit Fasermaterial belegt sein können. Man bezeichnet solche Konstruktionen als „Helmholtz-Resonatoren“, da sie als schwingungsfähiges, luftgefülltes Hohlraum-System mit einer Eigenfrequenz, bei der die Absorption am stärksten ist, wirken. Die Lage der Frequenz größter Absorption kann durch die Konstruktion gewählt werden. Abb. 1/16 zeigt den typischen Absorptionsverlauf eines Helmholtz-Mittensorbers. Helmholtz-Resonatoren wirken relativ schmalbandig; die Auskleidung des Hohlraums macht die Absorption breitbandiger.

Tiefenabsorber

Tiefenabsorber bestehen hauptsächlich aus Sperrholzplatten, die auf einem Lattenrahmen einigermaßen luftdicht vor eine Wand montiert werden. Der Zwischenraum zwischen Sperrholz und Wand wird mit schalldämpfenden Faserstoffen ausgefüllt. Die Schallwelle bringt die Holzplatte zum Schwingen, durch innere Reibung des Holzes und durch die Dämpfung der bewegten Luft im Fasermaterial wird dieser Schwingung Energie entzogen. Tiefenabsorber sind wie Mittensorber Resonanzsysteme, die Resonanzfrequenz nimmt mit zunehmendem Flächengewicht der schwingenden Platte (Masse/Fläche) und mit größer werdendem Wandabstand ab. Die Resonanzfrequenz wird zwischen etwa 70 und 300 Hz gelegt, je nach den jeweiligen raumakustischen Anforderungen (Abb. 1/17). Durch aufgesetzte Gewichte kann die Resonanzfrequenz verändert werden. So können etwa die Holzkassetten einer Decke unterschiedlich abgestimmt werden; damit kann die Gesamtabsorption auf einen breiten Frequenz-Bereich ausgedehnt werden. Bei entsprechender Dimensionierung können auch Helmholtz-Resonatoren als Tiefenabsorber verwendet werden.

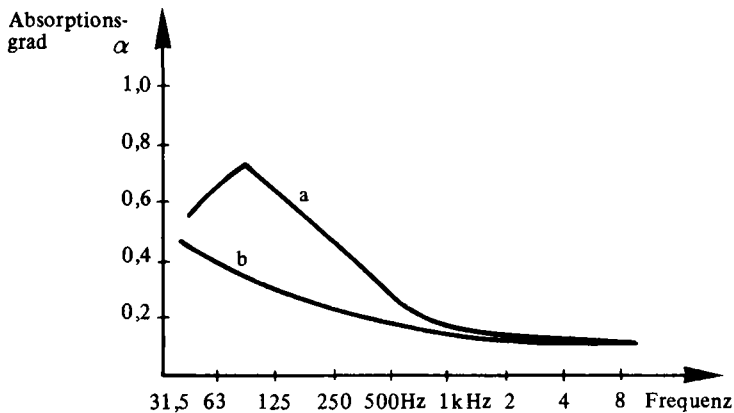


Abb. 1/17. Typischer Absorptionsverlauf eines Tiefenabsorbers, a) Plattenabsorber, b) nicht hinterpolsterte Platte.

Bei Platten, die frei im Raum schwingen (aufgehängte Decken, Fenster, Türen), sinkt die Resonanzfrequenz wegen der fehlenden Federwirkung, die sonst durch das eingeschlossene Luftpolster entsteht, so tief ab, daß sich ein gleichmäßiger Verlauf der Absorptionskurve einstellt (*Abb. 1/17b*).

Besetzte oder unbesetzte Saalbestuhlung kann – je nach Konstruktion der Stuhllehnen – auch als Tiefenabsorber wirken, der bei etwa 130 bis 170 Hz eine Pegelabsenkung von 15–20 dB hervorruft (Abstand Schallquelle–Meßort etwa 20–25 m) [1.18, S. 171 ff.].

Schalldämmung

Mit Schalldämmung bezeichnet man die Fähigkeit von Baumaterialien, den Durchgang von Schall durch Wände und Decken eines Raumes zu hemmen. Ein Maß für die Schalldämmung ist das Schallisolationsmaß (DIN 1320) oder Schalldämm-Maß R (DIN 4109). Hierunter versteht man das in dB angegebene Verhältnis der auf eine Wand auftreffenden Schallintensität I_1 oder des Schalldrucks p_1 zur gesamten durchgelassenen Schallintensität I_2 bzw. zum gesamten durchgelassenen Schalldruck p_2 (DIN 52 210):

$$R = 10 \lg \frac{I_1}{I_2}$$

$$R = 20 \lg \frac{p_1}{p_2}$$

R = Schalldämm-Maß [dB]

I_1 = auf eine Wand auftreffende Schallintensität [W/m^2]

I_2 = gesamte durch die Wand durchgelassene Schallintensität [W/m^2]

p_1 = auf eine Wand auftreffender Schalldruck [Pa]

p_2 = gesamter durch eine Wand durchgelassener Schalldruck [Pa]

Die Schalldämm-Maße sind frequenzabhängig, sie steigen meist mit der Frequenz erheblich an. Um dennoch mit einer einzigen Zahl das Schalldämmverhalten von Wänden, Decken usw. angeben zu können, wird in DIN 4109 das Luftschallschutzmaß LSM definiert. Der Wert des LSM – angegeben in dB – gibt an, wie sich die gemessene Schalldämmung zu der in DIN 4109 angegebenen Bezugskurve im Mittel verhält. $LSM = 0$ dB bedeutet, daß die Schalldämmforderungen nach DIN 4109 erfüllt sind; Wände zwischen Wohnungen sollen $LSM \geq 0$ dB haben.

Das bewertete Schalldämm-Maß R_w ($w =$ weighted) bezeichnet ebenfalls mit einer Zahl das Schalldämmverhalten von Bauteilen: $R_w = 52 + LSM$ [dB].

Tab. 1/4. Schalldämm-Maße verschiedener Materialien.

Material, Dicke	Schalldämm-Maß in dB
Blocksteine, 25 cm	49–54
Kalksandstein, 12 cm (20 cm)	46–50 (50–55)
Beton, 12 cm (20 cm)	47–52 (53–59)
Gipsplatten, 6 cm (10 cm)	30–34 (36–40)
Holzspanplatten, 1 cm (4 cm)	17–20 (26–30)
Backsteinwand, 11 cm, verputzt	44–48
leichte Zimmertür	10–20
schalldämmende Spezialtür	30–40
doppelverglaste Fenster	20–30
schallhemmendes Spezialfenster	30–40

Gute Schalldämmung gegen Luftschall ergeben luftdichte, schwere und harte Materialien wie Stein und Holz. Das Schalldämm-Maß hängt in erster Linie von der Masse einer Trennwand ab. Aus diesem Grunde sind die meist sehr leichten Akustikplatten und andere Absorber schlechte Dämmstoffe. Eine wesentliche Verbesserung der Schalldämmung ergeben zweischalige Konstruktionen.

Körperschall, der durch das Mitschwingen von Konstruktionsteilen weitergeleitet wird, wird durch schallweiche, elastische Zwischenteile (Gummi, Kork) gedämpft. Eine häufig störende Form des Körperschalls ist der Trittschall. Er wird als Körperschall durch elastische Schichten bedämpft, also durch den sog. schwimmenden Estrich – eine harte Platte auf einer elastischen Schicht – und Teppichboden. Als Luftschall kann Trittschall z. B. durch abgehängte Decken vermindert werden.

Bei schräg einfallenden Schallwellen auf eine Wand tritt der sog. „Koinzidenzeffekt“ auf. Bei einer bestimmten Frequenz sinkt hierbei das Schalldämm-Maß stark ab, was sich wie eine Wandresonanz auswirkt [1.1, S. 377], [1.13, S. 207].

1.2 Raumakustik

Die Raumakustik befaßt sich mit den akustischen Erscheinungen in geschlossenen Räumen. [1.7], [1.9], [1.13], [1.18], [1.19], [1.20]

1.2.1 Der zeitliche Aufbau des Schallfeldes

Strahlt eine Schallquelle in einem Raum allseitig einen Schallimpuls ab, so wird dieser von den Raumbegrenzungsflächen und von den Gegenständen im Raum in Abhängigkeit vom Material und der geometrischen Form der Gegenstände reflektiert, absorbiert oder gebeugt; dabei kann der Schall auch zerstreut oder gebündelt werden. Dadurch treffen am Hörort nach dem Direktschall zunächst einige einzelne Reflexionen, die sog. „ersten Reflexionen“ ein, deren Verzögerung, Stärke und Einfallrichtung für das Hörereignis von Bedeutung sind. Die Folge der Reflexionen verdichtet sich rasch und bildet den Nachhall, der daher mit einer Verzögerung gegenüber dem Direktschall einsetzt (*Abb. 1/18*). Im allgemeinen ist die Dauer und Stärke des Nachhalls überall im Raum gleich. Die Gesamtheit des reflektierten Schalls stellt das im Idealfall gleichmäßig den Raum erfüllende „diffuse Schallfeld“ dar, das dadurch gekennzeichnet ist, daß es keine Vorzugsrichtung der Schallausbreitung enthält. Das diffuse Schallfeld baut sich um so schneller auf, je kleiner der Raum ist, d. h. je häufiger der Schall pro Zeiteinheit reflektiert und gebeugt wird. Wenn ein Raum viele Streukörper, Säulen usw. aufweist, bzw. Wände und Decke eines Raumes nicht eben, sondern strukturiert sind, ist die Gleichmäßigkeit des Diffusschallfeldes am größten [1.55]. Dabei müssen die streuenden Flächen und Körper in ihren Abmessungen groß gegenüber der Wellenlänge des zu reflektierenden Schalls sein. Eine z. B. in Form von Kassetten strukturierte Wand kann daher gleichzeitig für tiefe Frequenzen wie eine große, ebene Fläche wirken, während der Schall bei höheren Frequenzen diffus gestreut wird. Hohlfächen wirken stets schallsammelnd und beeinträchtigen die Diffusität des Schallfeldes.

Ein gleichmäßig über den Raum verteiltes, wirklich diffuses Schallfeld kann sich nur bei breitbandigem, impulshaltigem Schall (z. B. Sprache, Musik, Rauschen) aufbauen. Besteht dagegen der Schall aus sinusförmigen Dauertönen oder stationärem, schmalbandigem Rauschen, so bilden sich auch in schiefwinkligen Räumen, auch bei strukturierten Raumbegrenzungsflächen, stehende Wellen, deren Druckmaxima und -minima ortsfest an bestimmten Raumpunkten sind und beim Abschreiten des Raumes leicht zu lokalisieren sind. Solche stehenden Wellen treten besonders in kleineren Räumen und bei tiefen Frequenzen auf. Wenn sie bei der Aufnahme stören, kann oft durch eine kleine Verschiebung des Mikrofons aus dem Druckmaximum oder -minimum Abhilfe geschaffen werden.

Bei andauernden Schallsignalen, nicht nur bei Rauschen und Sinustönen z. B., sondern vielfach auch bei Musik, ergibt sich ein anderer zeitlicher Aufbau des diffusen Schallfeldes. Der Schalldruck steigt bei Einschalten einer Schallquelle im diffusen

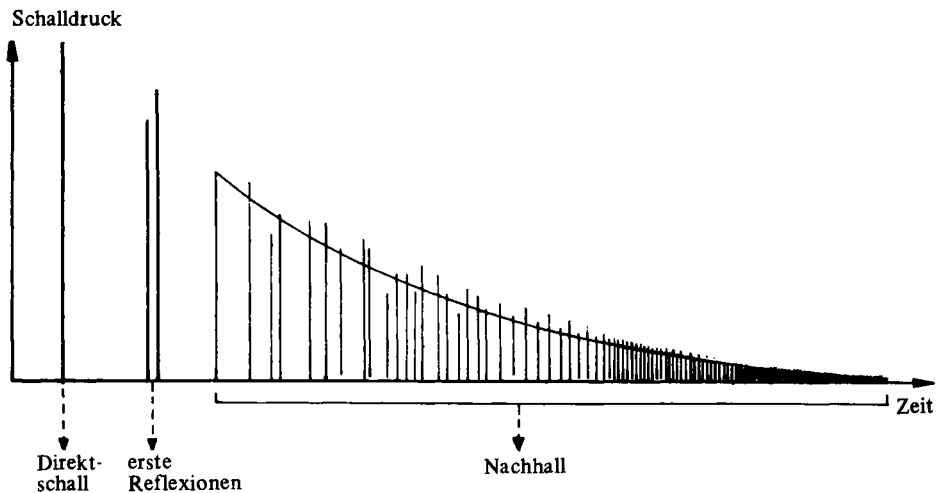


Abb. 1/18. Zeitliche Folge der Reflexionen in einem Raum bei Impulsschall.

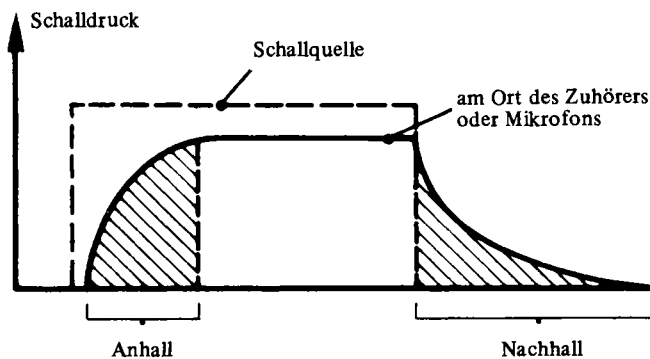


Abb. 1/19. Zeitlicher Auf- und Abbau des Schalldrucks im diffusen Schallfeld bei Dauerschall.

Feld erst auf seinen endgültigen Wert an und bildet damit den sog. Anhall, der einen Klangeinsatz weich oder hart wirken läßt; kurzer Anhall macht den Klangeinsatz prägnant bis hart, langer Anhall weich bis verschwommen. Nach Abschalten der Schallquelle schließt sich wie bei Impulsschall der abklingende Nachhall an (Abb. 1/19).

Zur akustischen Raumgestaltung gehören vor allem folgende Aufgaben: Gute Abstrahlungsmöglichkeit der Schallquelle, geeignete Lenkung und Verzögerung der ersten Reflexionen (siehe 1.2.3), optimale Gestaltung der Nachhallzeit und ihrer Frequenzabhängigkeit einschließlich der Realisierung einer guten Diffusität des Nachhalls, d.h. gleichmäßige Verteilung der Hallenergie (siehe 1.2.4).

1.2.2 Begriffe der Hörakustik

Für die subjektive Beschreibung der Hörakustik eines Raums werden die folgenden Begriffe verwendet [1.21], [1.22], [1.23], [1.24], [1.25], [1.57]:

Hörsamkeit eines Raums ist ganz allgemein die Eignung eines Raumes für bestimmte Schalldarbietungen. Gute Hörsamkeit eines Raums für Sprachdarbietungen besagt z. B., daß ohne Benutzung elektroakustischer Verstärkung eine gute Sprachverständlichkeit an allen Plätzen des Raums gewährleistet ist.

Durchsichtigkeit kennzeichnet bei Musikdarbietungen trotz überlagertem Raumschall als Zeitdurchsichtigkeit die Unterscheidbarkeit zeitlich aufeinanderfolgender Töne und als Registerdurchsichtigkeit die Unterscheidbarkeit gleichzeitig gespielter Instrumente oder Instrumentengruppen oder deren Register (Tonhöhenbereiche). Die Durchsichtigkeit bezeichnet also die Klarheit einer Musikdarbietung, sie ist vergleichbar der Wortverständlichkeit bei Sprachdarbietung. Schallreflexionen, die bei Musik bis spätestens 80 ms nach Beginn des Schallereignisses eintreffen, erhöhen die Durchsichtigkeit und die Empfindung der Räumlichkeit, spätere Reflexionen mindern die Durchsichtigkeit und erhöhen die Halligkeit. Für Sprache ist diese Zeitgrenze bei 50 ms anzusetzen.

Raumeindruck ist die Hörempfindung, die man in einem teilweise (Hof) oder ganz umschlossenen Raum beim Erklängen eines Schallereignisses von dem Raum hat. Der Raumeindruck hat mehrere Komponenten: 1. die Empfindung, im gleichen Raum wie die Schallquelle zu sein, nicht – wie z. B. bei Stereowiedergabe – durch ein Fenster in den Aufnahmerraum hineinzuhören, 2. die Empfindung von der Grö-

Tab. 1/5. Begriffe der Hörakustik.

Begriff	Unterbegriffe	Kurzdefinition
Hörsamkeit	1. Sprachhörsamkeit 2. Musikhörsamkeit	Akustische Eignung eines Raums für Sprach- (1) bzw. Musikdarbietung (2)
Durchsichtigkeit	1. Registerdurchsichtigkeit 2. Zeitdurchsichtigkeit	Klarheit einer akustischen Darbietung durch Unterscheidbarkeit gleichzeitiger (1) bzw. aufeinanderfolgender Schallereignisse (2)
Raumeindruck	1. Einbezogenheit des Hörers 2. Raumgröße 3. Halligkeit 4. Räumlichkeit	Empfindung von Größe und Ausgestaltung eines Raumes

ße – insbesondere Breite und Tiefe – des Raums, 3. die Empfindung der Halligkeit, d. h. die Tatsache, daß außer dem Direktschall Diffusschall vorhanden ist, der nicht als Wiederholung des Direktschalls wahrgenommen wird, 4. die Empfindung der Räumlichkeit, d. h. die Wahrnehmung, daß der Raum eine größere Ausdehnung als die Schallquelle besitzt. Im Gegensatz zur Halligkeit ist das Echo eine Wiederholung eines Schallereignisses; es gibt dem Hörer über die Entfernung einer weiter entfernten Wand Auskunft. *Tab. 1/5* faßt die Begriffe der Hörakustik zusammen.

1.2.3 Direktschall und erste Reflexionen

Die ausreichende Versorgung der Hörer mit Direktschall ist eine Grundbedingung für gute Hörsamkeit in Räumen für Sprach- und Musikdarbietung. Optische Sichtverbindung ist noch keine ausreichende Bedingung für die notwendige Direktschallversorgung; der Anteil an Direktschall im Schallfeld muß denjenigen an Diffusschall übertreffen oder die ersten, wenig verzögerten Reflexionen müssen in ihrer Gesamtheit stark genug sein, um ein klares Klangbild vor dem Hintergrund des Diffusklangs zu zeichnen.

Die Stärke und Verzögerung der ersten Reflexionen beeinflusst das Hörereignis in verschiedener Weise [1.18], [1.27], [1.28], [1.29]. Alle Reflexionen erhöhen die Lautstärke des Direktschalls, die Deutlichkeit aber nur dann, wenn sie um weniger als 50 ms (entsprechend 17 m Umweg) verzögert sind. Frühe Reflexionen mit einer Verzögerung von 0,8 ms bis etwa 20 ms (entsprechend 0,3 m bis 7 m Umweg) verursachen bei der Tonaufnahme gleichzeitig eine unangenehme Klangfärbung, die durch Summierungen und Auslöschungen zwischen Direktschall und Reflexionen entsteht; sie stören also bei Tonaufnahmen und sind möglichst zu unterdrücken [1.34]. Dies betrifft Reflexionen mit einem Umweg von weniger als 7 m. Reflexionen mit einer Laufzeitdifferenz von 20 ms bis 50 ms (entsprechend 7 m bis 17 m Umweg) bestimmen die empfundene Raumgröße; ein Raum erscheint um so größer, je mehr die erste Reflexion verzögert ist, um so kleiner und enger, je früher sie eintrifft.

Außer der Verzögerung haben Richtung und Stärke der ersten Reflexionen erheblichen Einfluß: seitlich einfallender Schall wird deutlicher gehört und hat sich für das Hörereignis als günstiger erwiesen als vertikal oder von hinten einfallender Schall. Die Reflexionen an den Seitenwänden vergrößern die Räumlichkeit einer Darbietung, d. h. die Empfindung, daß z. B. ein Soloinstrument auf der Bühne für den Hörer akustisch nicht punktförmig, sondern ausgedehnt erscheint. Weniger wahrnehmbar sind Reflexionen, die aus derselben Richtung wie der Direktschall kommen. Der Pegel einer Reflexion darf bei Sprache bis zu 10 dB über dem des Direktschalls liegen, ohne daß sie die Ortung des Direktschalls stört [1.26], [1.31], [1.35]. Je größer die Verzögerung ist, um so eher werden die Reflexionen wahrgenommen. Deutliche Einzelreflexionen mit einer Verzögerung von mehr als 50 ms werden als störendes Echo wahrgenommen. Der Einfluß von ersten Reflexionen, d. h. ihr po-

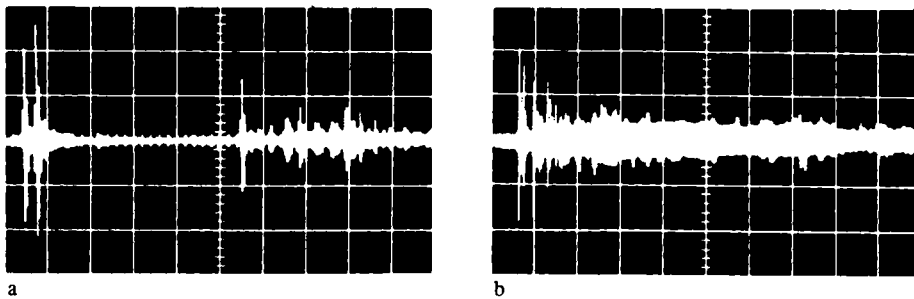


Abb. 1/20. Reflektogramme von Räumen unterschiedlicher Hörsamkeit, nach [1.5], a) schlechte Hörsamkeit durch starke Einzelreflexion nach Reflexionslücke, b) gute Hörsamkeit durch gleichmäßig abnehmende Reflexionsfolge ohne herausragende Einzelreflexionen. Das Zeitraster beträgt 10 ms.

sitiver oder negativer Beitrag zur Hörsamkeit bei Musikdarbietungen hängt in sehr starkem Maße von der Art der Musik ab [1.30], [1.32], [1.33], [1.36], [1.89].

Zur Beurteilung der Reflexionen in einem Raum werden sog. Reflektogramme aufgenommen, auch Echogramme oder Impulsantworten eines Raums genannt. Dabei wird der Schalldruck in Abhängigkeit von der Zeit nach einer Impulsanregung, z. B. durch einen Pistolenschuß, dargestellt. Störende Einzelreflexionen können so leicht identifiziert werden [1.37]. *Abb. 1/20* zeigt Reflektogramme eines Raumes mit guter (a) und eines Raumes mit schlechter Hörsamkeit (b).

Um die Sprachverständlichkeit bzw. die Durchsichtigkeit und den Raumeindruck bei Musikwiedergabe zu verbessern, werden die ersten Reflexionen nach den Gesetzen der Schallreflexion auf die Hörerplätze geleitet (siehe 1.1.2), wobei auch spezielle freihängende Reflektoren Verwendung finden. Wichtig für eine gute Verständigung der Musiker untereinander sind die Deckenreflexionen über dem Podium. [1.70], [1.71]

Deutlichkeitsgrad, Klarheitsmaß

In Zusammenhang mit der Bewertung des Reflektogramms eines Raums wurde von Thiele der Begriff der Deutlichkeit eingeführt. Die für die Hörsamkeit eines Raums wichtigen Reflexionen treffen innerhalb von 100 bis 200 ms nach dem Direktschall beim Hörer ein. Reflexionen mit einer Verzögerung bis 50 ms erhöhen dabei die Silbenverständlichkeit oder Deutlichkeit der Sprache. Setzt man die Schallenergie, die innerhalb dieser 50 ms eintrifft, zur gesamten eintreffenden Schallenergie ins Verhältnis, so erhält man die Definition der Deutlichkeit in Prozentwerten ausgedrückt. Hohe Deutlichkeit entspricht einer hohen Silbenverständlichkeit, Musik läßt sie aber trocken wirken. Zwischen der physikalisch definierten Deutlichkeit an einem Ort im Raum und der subjektiv erfaßten Durchsichtigkeit läßt sich kein enger Zusammenhang feststellen; deshalb sollte besser von „Deutlichkeitsgrad“ oder „50-ms-Energieanteil“ gesprochen werden. [1.5], [1.37].

Der Begriff des Anhalls (siehe 1.2.4) kommt zu einer vergleichbaren Definition bei der Betrachtung des Klangeinsatzes von Musik. Eine Deutlichkeit unter 50% entspricht demnach einem harten Klangeinsatz, von über 50% einem weichen.

Die Definition des Klarheitsmaßes nach Reichardt [1.58] verfolgt ähnliche Ziele wie der Deutlichkeitsgrad. Danach ist das Klarheitsmaß definiert als zehnfacher Logarithmus des Verhältnisses der bis 50 ms (Sprachklarheitsmaß, Deutlichkeitsmaß) bzw. 80 ms (Musikklarheitsmaß, Durchsichtigkeitsmaß) eintreffenden Schallenergie zur gesamten danach eintreffenden Schallenergie. Wenn die Werte positiv sind, ist die Deutlichkeit der Sprache bzw. die Durchsichtigkeit der Musik ausreichend.

1.2.4 Hall

Hall als Oberbegriff ist der gesamte diffuse Schall in einem Raum. Wird eine Schallquelle in einem Raum plötzlich eingeschaltet, so baut sich das diffuse Feld erst danach als Anhall auf, es begleitet dann das Schallereignis als Mithall und klingt nach Abschalten der Schallquelle als Nachhall ab. Dabei haben die verschiedenen Schallfeldgrößen einen unterschiedlichen Verlauf (Abb. 1/21). Die Lautstärkeempfindung entspricht weitgehend dem Schalldruckpegel.

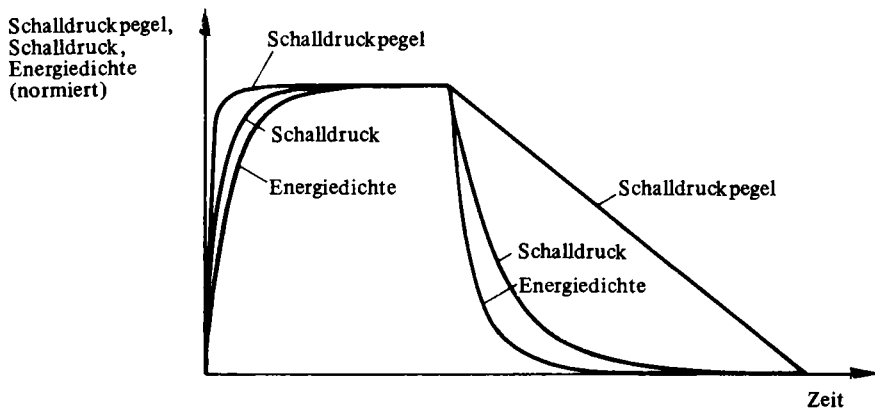


Abb. 1/21. Darstellung des Nachhalls für Schalldruckpegel, Schalldruck und Energiedichte.

Nachhall – die wichtigste Erscheinungsform des Halls – ist die Abnahme des Schallfeldes in einem Raum nach Abschalten der Schallquelle, d. h. das Abklingen des diffusen Schallfeldes, das im Idealfall unabhängig vom Ort und von der Richtung den Raum gleichmäßig erfüllt [1.7]; in der Hörakustik ist Nachhall das Leiserwerden des Hörereignisses nach Abschalten der Schallquelle. Je länger der Nachhall dauert, um so besser verteilt sich der Schall im allgemeinen auf alle Raumpunkte und auf alle Richtungen. Die Schallenergie nimmt dann exponentiell ab, der Schalldruckpegel li-

near. Die Abnahme der Schallenergie erfolgt um so schneller, je größer die Absorption der Raumbegrenzungen ist und je häufiger die Schallstrahlen reflektiert werden, d. h. also je kleiner ein Raum ist.

Die Energiedichte E des diffusen Schallfeldes hängt von dem Absorptionsvermögen A und der zugeführten Schalleistung P ab, steigt proportional mit der Nachhallzeit T und sinkt mit zunehmendem Raumvolumen V :

$$E = \frac{4P}{c \cdot A}$$

$$= \frac{P \cdot T}{13,8 V}$$

E = Energiedichte oder Schalldichte [$W \cdot s/m^3$]
 P = von der Schallquelle abgestrahlte Leistung [W]
 A = Absorptionsvermögen des Raumes [m^2]
 c = Schallgeschwindigkeit [m/s]
 T = Nachhallzeit [s]
 V = Volumen des Raumes [m^3]

Nachhallzeit

Nach dem Vorschlag des Akustikers Sabine (1868–1919) wird unter der Nachhallzeit T derjenige Zeitabschnitt – gemessen in s – verstanden, innerhalb dessen nach Abschalten einer Schallquelle die Schallenergie in einem Raum auf den millionsten Teil abfällt. Diesem Energieabfall entspricht ein Abfall des Schalldrucks auf $1/1000$ bzw. des Schalldruckpegels um 60 dB (Abb. 1/22).

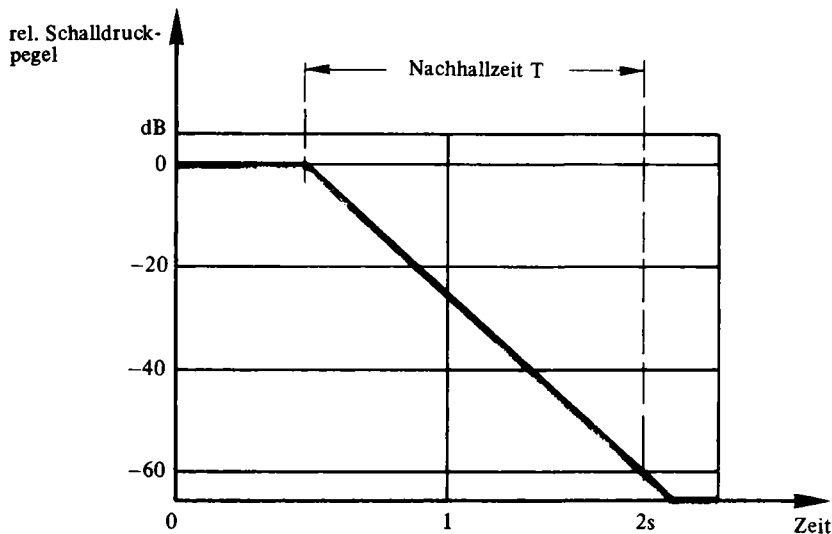


Abb. 1/22. Definition der Nachhallzeit durch den Abfall des Schalldruckpegels nach Abschalten der Schallquelle.