

Praktische Akustik

Band 2 · Raum- und Bauakustik

von Dipl. Phys. GÜNTHER HARTMANN
Dozent an der
Ingenieurschule der Freien Hansestadt Bremen

Mit 83 Abbildungen und 9 Tabellen

R. Oldenbourg Verlag München - Wien 1968



Der im gleichen Verlag erschienene Band 1 trägt den Titel:
"G. Hartmann, Praktische Akustik, Einführung"

INHALT

Vorwort	9
Teil A: Raumakustik	11
1. Einleitung	11
2. Allgemeine Beziehungen zwischen der Akustik eines Raumes und seinem Verwendungszweck	13
3. Physikalische Grundlagen der Akustik	15
4. Die Ausbreitung der Schallwellen in einem Raum und ihre Wirkung auf den Hörer	17
5. Von den hörpsychologischen und physikalischen Eigenschaften des direkten Schallanteiles	20
6. Die Verteilung der Zuhörerplätze und die Postierung der Schallquelle	23
7. Von den hörpsychologischen Eigenschaften einzelner Schall- rückwürfe	36
8. Schallrückwürfe an großen, ebenen Flächen	43
9. Schallrückwürfe an großen, gekrümmten Raumbegrenzungen ..	48
10. Der Einfluß der Abmessungen einer Reflexionsfläche auf die Eigenschaften des zurückgeworfenen Schalles	55
11. Schallrückwürfe an großen, aber tiefgegliederten Oberflächen, Schalldiffusität	59
12. Gestaltung von Wand- und Deckenflächen zur Lenkung der er- sten Schallrückwürfe in Räumen mit rechteckigem Grund- und Aufriß	63
13. Lenkung der ersten Schallrückwürfe bei sonstigen Raumformen	71
14. Das Auffinden von Reflexionsflächen störender Schallrückwür- fe, Maßnahmen zur Beseitigung der Störwirkung	78
15. Der Nachhall und die Nachhallzeit	90

© 1968 R. Oldenbourg Verlag, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlags ist es auch nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

Druck: Graph. Anstalt E. Wartelsteiner, Garching - Hochbrück
Printed in Germany

16. Die optimalen Nachhallzeiten für einen Raum	94
17. Die Verknüpfung der Nachhallzeiten mit den Raumeigenschaften	103
18. Die Anwendung der Sabineschen Formel in der Praxis	109
19. Die Wirkungsweise von Raumbegrenzungen als Schallschlucker	118
20. Raumakustische Regeln aus den Erfahrungen mit vorhandenen Räumen	127
21. Methodische Gestaltung eines Saales nach den Regeln der Raumakustik, als Beispiel der Entwurf einer Aula	132
22. Minderung der Lautstärke von Geräuschen innerhalb eines Raumes durch Schallschlucker	141
23. Die Praxis der Lautstärkeminderung durch Schallschlucker, das Großraumbüro	148
 Teil B: Bauakustik	 153
24. Die Übertragung von Schall über die Bauteile eines Gebäudes	153
25. Das mittlere Luftschalldämmmaß \bar{R} und das Luftschallschutzmaß LSM	158
26. Die Luftschalldämmung einschaliger Wände und Decken	166
27. Der Einfluß der Wandelastizität auf die Luftschalldämmung, biegeeweiche und biegesteife Schalen	172
28. Die Luftschalldämmung zweischaliger Wände	180
a) die 2-schalige Wand aus 2 biegeweichen Schalen	182
b) die biegesteife Schale mit biegeweicher Vorsatzschale	185
c) die 2-schalige Wand aus 2 biegesteifen Schalen	188
29. Die Luftschalldämmung von Türen und Fenstern	190
30. Das Trittschallschutz-Maß TSM und das Verbesserungs-Maß des Trittschallschutzes VM	195
31. Trittschall-mindernde Deckenauflagen	201
32. Der Luft- und Trittschallschutz von Decken	210
33. Schutz vor Geräuschen haustechnischer und anderer technischer Einrichtungen, Schallübertragung durch Lüftungsschächte	218

34. Maßnahmen zu einem verbesserten und zu einem hohen Schallschutz	223
35. Wo werden Ansprüche an den Schallschutz gestellt?	226
Zusammenhänge in Stichworten und Formeln	233
Sachverzeichnis	241

Vorwort

Über das Thema dieses Bandes erschien das erste Buch im Jahre 1800. Es war von einem Herrn Rohde verfaßt und trug den Titel: "Theorie der Schallverbreitung für Baukünstler". Man könnte diesen Titel heute nicht mehr verwenden, nicht nur weil die Bezeichnung "Baukünstler" leicht ironisch aufgefaßt würde, auch das Wort "Schallverbreitung", obwohl gerade hier sehr treffend, ist aus unserem Wortschatz verschwunden.

Erstaunlich ist jedoch das Erscheinungsjahr dieses Werkes, es beweist, daß in der Fachliteratur seit mehr als 150 Jahren über die akustischen Erscheinungen unter dem Dach eines Gebäudes geschrieben wird. Angesichts dieser Tatsache muß man sich fragen, wie es kommt, daß dieses Gebiet den Fachleuten, die es hauptsächlich angeht, also Architekten und Baumeistern, so fremd geblieben ist.

Sicher gibt es dafür eine ganze Reihe von Gründen. Ein nicht unwesentlicher Grund ist ohne Zweifel darin zu suchen, daß bisher ein geeignetes Lehrbuch gefehlt hat. Ein Lehrbuch, in dem nicht nur der Stoff methodisch aufgebaut ist, sondern das auch - ohne deswegen ungenau zu werden - die physikalischen Vorkenntnisse seiner Leser berücksichtigt.

Mit diesem 2. Band "Raum- und Bauakustik" in der Reihe der praktischen Akustik habe ich versucht, diese Lücke zu schließen. Der Leser, der sich ein tieferes Verständnis für akustische Probleme aneignen möchte, sollte zunächst den ersten Band durcharbeiten. Doch ist der zweite Band in sich geschlossen, so daß man ihn ohne den ersten Band benutzen kann.

In der schon durch den Titel vorgezeichneten Reihenfolge wird im ersten Teil dieses Bandes die Raumakustik abgehandelt. Derjenige Teil der Akustik also, der darüber Aufschluß geben soll, was man unter der "guten Akustik" eines Raumes zu verstehen hat und wie man sie ihm geben kann. Die Regeln und Methoden dazu werden aus den akustischen Grundlagen sowie aus den Erfahrungen mit vorhandenen Räumen entwickelt und durch Beispiele ergänzt.

Der zweite Teil behandelt die Bauakustik. Hier geht es um die Übertragung des Schalles über die Bauteile eines Gebäudes. Es wird gezeigt,

wie man diese Schallübertragung möglichst niedrig halten kann und in vielen Fällen auch halten muß. Die einschlägige Normung, insbesondere das Normblatt DIN 4109 (Schallschutz im Hochbau) habe ich dabei weitgehend berücksichtigt.

Dem Verlag danke ich für sein Bemühen um das Zustandekommen dieses Werkes.

Bremen, im Sommer 1967

Günter Hardmann

Teil A: Raumakustik

Ja, mach nur einen Plan
Sei nur ein großes Licht!
Und mach dann noch'n zweiten Plan
gehn tun sie beide nicht.
Denn für dieses Leben
Ist der Mensch nicht schlecht genug.
Doch sein höh'res Streben
Ist ein schöner Zug.

(B. Brecht, Die Dreigroschenoper)

1. Einleitung

Das Wort "Raumakustik" schafft gewöhnlich die Vorstellung von der Atmosphäre eines Konzertsaaes. Aufmerksame Besucher von Konzerten sind es wohl zuerst gewesen, denen bewußt wurde, daß ein Konzert in einem Saal in der Regel sehr viel besser klingt als im Freien. In freier Umgebung hört sich die Musik eines Orchesters farblos und trocken an, nur in einem Saal können seine Stimmen zum Klingen kommen, wenngleich es auch je nach den akustischen Eigenschaften eines Saales große Unterschiede geben kann.

Die Entdeckung, daß die ästhetische Wirkung einer Musikaufführung in einem Konzertsaal mit guten akustischen Eigenschaften wesentlich erhöht wird, hat die Raumakustik begründet. Wenn auch heute noch die raumakustische Gestaltung eines Konzertsaaes zu den reizvollsten Aufgaben gehört, die Architekten und Akustiker zu lösen haben, so hat sich das Anwendungsgebiet der Raumakustik doch wesentlich erweitert. Denn daß die Wirkung einer Schallquelle auf den Hörer nicht von der Schallquelle allein abhängt, sondern die akustischen Eigenschaften des Raumes von großem Einfluß darauf sind, gilt nicht nur für den Konzertsaal, sondern für jeden von Wänden und Decken begrenzten Raum. Der Wert eines Raumes wird nicht nur durch sein Aussehen bestimmt, immer kommt hinzu, wie weit seine akustischen Eigenschaften seinem Verwendungszweck gerecht werden.

Die akustischen Eigenschaften eines Saales werden häufig dadurch charakterisiert, daß man von ihm sagt, er hat eine gute- oder schlechte-Akustik. Diese Art der Einstufung ist leicht irreführend, denn eine gute oder schlechte Akustik ist keine absolute Eigenschaft, die einem Raum zugesprochen werden kann. Ein Saal z. B., der für die Aufführung von Sinfoniekonzerten eine gute Akustik hat, ist für die Verwendung als Sprechtheater wegen dieser Akustik nicht besonders gut geeignet. Würde ein Saal gleicher Größe etwa als Speisesaal dienen, so müßten seine akustischen Eigenschaften wieder ganz anders beschaffen sein.

Die Konsequenz, die sich hieraus ergibt, besteht darin, daß die akustische Gestaltung eines Raumes 2 Teilaspekte umfaßt, nämlich:

1. Welche akustischen Eigenschaften soll ein Raum bezogen auf seinen Verwendungszweck haben;
2. wie kann der Raum praktisch gestaltet werden, damit er diese Eigenschaften erhält.

Der 1. Aspekt bezieht sich auf die Zuordnung raumakustischer Kriterien zu psychologischen, hörpsychologischen oder musikästhetischen Empfindungen. Hier wird das Gebiet der Naturwissenschaft überschritten; die Aussagen über subjektive Empfindungen mit ihren Unsicherheiten bilden den Maßstab. Die Regeln, die daraus abgeleitet werden, können deshalb nicht den gleichen Grad an Exaktheit beanspruchen wie Naturgesetze, sie lassen immer einen gewissen Spielraum offen.

Beim 2. Aspekt handelt es sich um die physikalisch-technischen Methoden, die entwickelt wurden, um die Akustik eines Raumes zu regulieren. Obwohl diesen Methoden bekannte physikalische Gesetze zu Grunde liegen, kann das akustische Verhalten eines Raumes nicht in allen Einzelheiten im Voraus geplant werden.

Alle Raumbegrenzungen werfen die auftreffenden Schallwellen mehr oder weniger stark in den Raum zurück. An jedem Punkt im Raum überlagern sich deshalb Schallanteile, die mit unterschiedlichen Stärken aus den verschiedensten Richtungen kommen. Das daraus resultierende Schallfeld ist so verwickelt, daß es sich nicht in allen Feinheiten verfolgen läßt. Deshalb können Regeln und Methoden zur akustischen Gestaltung von Räumen nur aufgestellt werden, wenn die naturgegebene Vielfalt der Vorgänge durch Näherungen vereinfacht und auf das Wesentliche beschränkt wird.

Da die Zuordnung von subjektiven Empfindungen zu den exakten physikalischen Größen des Schalles einen gewissen Spielraum zuläßt, reichen die danach entwickelten Ergebnisse für den Normalfall vollkommen aus. Nur wenn sehr hohe Anforderungen an die Akustik eines Raumes gestellt werden wie z. B. bei einem Konzertsaal, kann es angebracht sein, einen geplanten Entwurf durch Modellversuche abzusichern.

Gelegentlich besteht noch Unklarheit über die Abgrenzung der Raumakustik gegen die Bauakustik. Im Rahmen der angewandten Akustik fallen in das Gebiet der Raumakustik alle Schallerscheinungen, die sich innerhalb eines Raumes abspielen. Die Zielsetzung der Bauakustik besteht hingegen darin, das Eindringen von Geräuschen in einen Raum zu verhindern, sie umfaßt also den Schallschutz durch Schalldämmung.

2. Allgemeine Beziehungen zwischen der Akustik eines Raumes und seinem Verwendungszweck

Jeder Architekt findet es selbstverständlich, daß die Raumakustik bei der Gestaltung eines Konzert- oder Theatersaales eine wesentliche, wenn nicht entscheidende Rolle spielt. Auch bei der Einrichtung eines Klassenraumes oder einer Aula gilt es fast schon als Selbstverständlichkeit, daß dabei die Akustik berücksichtigt werden muß. Dagegen wird noch häufig übersehen, daß die Akustik einer Werkhalle, eines Schreibmaschinenraumes, überhaupt jeden Arbeitsraumes die Arbeitsbedingungen und die Arbeitsleistung der darin tätigen Menschen erheblich beeinflusst. Damit ist der Anwendungsbereich raumakustischer Maßnahmen aber nicht erschöpft, die Gäste in einem Restaurant, in einer Gaststätte oder in einem Kaffee empfinden - meist unbewußt - den Aufenthalt sehr viel angenehmer, wenn die Akustik des Raumes seinem Verwendungszweck entspricht.

Die Frage also, bei welchen Räumen geprüft werden muß, ob raumakustische Maßnahmen zu treffen sind, läßt sich einfach beantworten: bei jedem Raum, wobei die allerdings große Zahl der kleinen Wohn- und Arbeitsräume bis zu einem Volumen von ca 50 m³ im Normalfall ausgeschlossen werden kann. Bei Räumen, die etwas größer sind, also ein Volumen von etwa 50 m³ bis 150 m³ haben, wird die Prüfung in vielen Fällen ergeben, daß besondere raumakustische Maßnahmen nicht erforderlich sind. Aber schon bei einem mit wenigen Möbeln ausgestatteten größeren Büroraum z. B. können durch raumakustische Maßnahmen, die keinen großen Aufwand erfordern, die Arbeitsbedingungen erheblich verbessert werden.

Bei allen Räumen mit einem Volumen über 150 m³ gehört zur Ausgestaltung immer auch die Raumakustik. In der Regel müssen zu ihrer Regulierung spezielle Maßnahmen getroffen werden, nur in Ausnahmefällen können sie sich bei diesen Raumgrößen als nicht notwendig erweisen.

Nach den Anforderungen, die an die raumakustischen Eigenschaften gestellt werden, lassen sich zwei Kategorien von Räumen unterscheiden. Die erste Kategorie umfaßt alle Räume, in denen Musik aufgeführt oder Sprache vorgetragen wird, dazu gehören hauptsächlich:

- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| 1. Klassenräume | 6. Theater für Oper und |
| 2. Hörsäle, Vortragssäle | Schauspiele |
| 3. Kinosäle | 7. Große Opernhäuser |
| 4. Aulen, Gemeindesäle | 8. Konzertsäle |
| 5. Schauspieltheater | 9. Kirchenräume |

Die Akustik dieser Räume muß auf jeden Einzelfall zugeschnitten werden, und die Hauptaufgabe der praktischen Raumakustik besteht darin, Regeln und Methoden für die raumakustische Gestaltung solcher Räume zu entwickeln.

Alle übrigen Räume fallen in die zweite Kategorie. In diesen Räumen sollen raumakustische Maßnahmen dazu beitragen, daß die Personen, die sich darin aufhalten, durch Arbeitslärm, fremde Unterhaltungen und sonstige Geräusche möglichst wenig gestört werden. Hierdurch ist der Zweck, den die Akustik des Raumes erfüllen soll, eindeutig festgelegt. Leichter als bei der ersten Kategorie ist deshalb zu übersehen, welche akustischen Eigenschaften ein solcher Raum erhalten muß und durch welche Methoden sie verwirklicht werden können.

Räume, die zu dieser zweiten Kategorie gehören, sind:

- | | |
|--|--------------------|
| 1. Mechanische Werkstätten | 8. Turnhallen |
| 2. Maschinensäle | 9. Hallenbäder |
| 3. Büroräume | 10. Eingangshallen |
| 4. Schreibmaschinensäle | 11. Korridore |
| 5. Laboratoriumsräume | 12. Treppenhäuser |
| 6. Gästeräume in Gaststätten, Restaurants, Kaffees | 13. Warteräume |
| 7. Verkaufsräume | 14. Bahnhofshallen |

Die Einordnung eines Raumes in eine der beiden Kategorien bildet den Ausgangspunkt für seine akustische Gestaltung.

Die Regeln dazu werden für die Räume der ersten Kategorie in den Kapiteln 4 bis 21 aufgestellt.

Von den Räumen der zweiten Kategorie handeln die Kapitel 22 und 23.

3. Physikalische Grundlagen der Akustik

Wenn wir von der Akustik eines Raumes sprechen, so wollen wir damit eine besondere Raumeigenschaft bezeichnen, die durch das Zusammenspiel verwickelter, aber ganz natürlicher physikalischer Vorgänge zustande kommt. Man sollte meinen, daß es ganz überflüssig ist, dies zu betonen. Doch es gibt auch heute noch Leute, die von geheimnisvollen oder gar überirdischen Einflüssen raunen. So soll sich die Akustik eines Raumes verbessern - oder verschlechtern, die Richtung ist meist nicht sicher auszumachen - durch Erdstrahlen, zerbrochene Weinflaschen unter der Bühne, aufgespannte Bindfäden und ähnliches mehr.

Solche abstrusen Vorstellungen lassen sich nur durch völliges Fehlen physikalischer Kenntnisse erklären. Vor diesem Hintergrund aber sieht man leichter ein, daß man keine Raumakustik betreiben kann, ohne die zugehörigen physikalischen Grundlagen zu kennen. Sie sind im Band 1^{*)} ausführlich dargestellt; fassen wir das Wesentliche hier noch einmal kurz zusammen.

Wenn in unserer Umgebung eine Schallquelle in Tätigkeit tritt, gelangt das Schallereignis, von der Luft übertragen, an unser Gehör und setzt den Gehörmechanismus in Gang. Den physikalischen Ablauf dieses Vorganges können wir folgendermaßen erklären:

Eine Schallquelle, die erregt wird, versetzt die Luftmoleküle in ihrer unmittelbaren Umgebung in Bewegungen um ihre Ruhelage und erzeugt so in diesem Bereich schnelle Schwankungen des Luftdruckes um seinen Normalwert.

Durch Übertragen ihrer Bewegungen auf benachbarte Moleküle breiten sich die Luftdruckschwankungen wellenartig nach allen Richtungen aus. Schalldruckwellen, meist einfacher Schallwellen genannt, verhalten sich ähnlich wie Wellen an der Oberfläche von Wasser, die ein Erreger erzeugt hat.

Die den Ort des Schallempfanges passierenden Schalldruckwellen setzen das Trommelfell des Ohres - oder die Membran eines Mikrofons - in Bewegung; dadurch wird der Empfang des Schallereignisses eingeleitet.

^{*)} G. Hartmann, Praktische Akustik, Band 1, Einführung, R. Oldenbourg Verlag München und Wien

Nach einem Gesetz von Georg Simon Ohm empfindet das Gehör nur bei einer sinus-förmigen Schwankung des Luftdruckes einen reinen Ton im Sinne der Physik. Jeden Schallvorgang, der von einer natürlichen Schallquelle ausgeht, zerlegt das Gehör in eine Reihe solcher reinen Töne, die man die Teiltöne des Schallvorganges nennt.

Die Eigenschaften eines reinen Tones sind durch zwei Größen festgelegt: durch die maximale Druckabweichung vom Normaldruck und durch die Frequenz, das ist die Anzahl der vollen Schwankungsperioden je Sekunde. Diese beiden Größen können wir mit der Gehörempfindung verbinden, da die maximale Druckabweichung den Lautstärkeindruck, die Frequenz die Tonhöhenempfindung vermittelt.

Schallwellen breiten sich in einem Raum mit einer Geschwindigkeit von ca 340 m/s aus. Eine Teiltonfrequenz f hat eine Schallwellenlänge λ zur Folge, die mit der Schallgeschwindigkeit c_L durch die Beziehung $f\lambda = c_L$ verknüpft ist.

Entsprechend dem Frequenzbereich des Hörschalles von 16 Hz bis 16 000 Hz liegen die Schallwellenlängen in der Luft zwischen 20 m und 2 cm. Zum Kammerton a^1 , dessen Frequenz 440 Hz beträgt, gehört eine Wellenlänge von 77 cm.

Wir wollen als physikalische Größe, die den Lautstärkeindruck bei Sprache, Musik oder Geräuschen hervorbringt, nicht den Schalldruck benutzen, sondern die Intensität. Mit diesem Ausdruck ist nicht nur die Vorstellung von der Stärke einer Erregung verbunden, die physikalische Definition dieses Begriffes macht ihn für die Anwendung in der Raum- und Bauakustik besonders geeignet.

Unter Intensität versteht man in der Physik die durch eine Flächeneinheit je Sekunde hindurchströmende Schallenergie am Ort eines Schallempfängers. Die Dimension ist demnach eine Leistung pro Fläche, als Einheiten benutzt man gewöhnlich Watt/cm^2 oder Watt/m^2 . Es ist in der Akustik jedoch nicht üblich, die Intensität eines Schallereignisses durch den absoluten Wert anzugeben, sondern man hat dafür eine relative Skala geschaffen, nach der eine Intensität durch einen Schallpegel L ausgedrückt wird.

Als Bezugsgröße des Schallpegels ist die sehr kleine Intensität $I_{HS} = 10^{-16} \text{ W/cm}^2 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ eingeführt, sie stimmt fast mit der Intensität der Hörschwelle bei 1000 Hz überein. Die Intensität I , die ein Schallereignis hervorruft, wird dann durch folgende Rechenregel in einen Schallpegel L umgeformt:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_{HS}} \text{ in dB (dezi Bel)}.$$

Hinter den Zahlenwert eines Schallpegels wird als Einheit dB (Abkürzung für dezi Bel) gesetzt, dies ist jedoch keine echte Einheit, der Schallpegel ist dimensionslos, sondern nur eine Kennzeichnung der Rechenvorschrift.

Die Skala der Schallpegelheiten reicht von 0 dB bis 120 dB, bei extrem lauten Geräuschen auch bis 130 dB. In der Praxis kann man in vielen Fällen den Schallpegel eines Schallereignisses mit guter Näherung der Lautstärke in phon gleichsetzen.

4. Die Ausbreitung der Schallwellen in einem Raum und ihre Wirkung auf den Hörer

Kurze Zeit nach dem Verlassen der Schallquelle treffen die Schallwellen auf Raumbegrenzungen. Der Begriff "Raumbegrenzung" ist dabei ganz allgemein zu verstehen, darunter fallen sowohl Decken, Wände und Fußböden wie Einrichtungsgegenstände aller Art und Personen, kurzum alles, was den Luftraum begrenzt.

Jede Raumbegrenzung stört die Ausbreitung einer Schallwelle; wie sie dabei verändert wird, hängt im einzelnen von der Form, Größe und dem Material der Raumbegrenzung ab. Zwei ihrer Eigenschaften werden immer davon betroffen: ihre Richtung und ihre Intensität.

In vielen Fällen wird die Richtung nach dem bekannten Reflexionsgesetz - Einfallswinkel gleich Reflexionswinkel - geändert. Aber dies Gesetz gilt nur so lange, wie die Dimensionen der Raumbegrenzungen groß gegen die Schallwellenlängen sind, also hauptsächlich bei Wänden und Decken. Bei vielen Gegenständen im Raum ist diese Bedingung nicht erfüllt, so haben z.B. Stühle, Pfeiler, Personen u.v.a. Teildimensionen, die in der gleichen Größe wie häufig vorkommende Schallwellenlängen liegen oder noch kleiner sind.

Für diese Fälle stimmt das Reflexionsgesetz nicht mehr, es entstehen sehr verwickelte Wellenbilder, die in der Physik unter dem Begriff "Beugung" zusammengefaßt werden. Die Ablenkung von Schallwellen durch Beugung kann man praktisch nur durch Versuche an Modellen aufdecken.

Alle Schallanteile, die von den Raumbegrenzungen durch Reflexion oder Beugung abgelenkt werden und in den Raum zurückfluten, pflegt man als Schallrückwürfe zu bezeichnen.

Bei jedem Auftreffen auf eine Raumbegrenzung nimmt die Energie der Schallwellen ab, der Schall wird "geschluckt", wie es meist genannt wird. Physikalisch gesehen wird dabei ein Teil der Schallenergie hauptsächlich in Wärme umgewandelt. Der Prozentsatz, der von der gesamten Energie geschluckt wird, kann in weiten Grenzen variieren, er hängt von besonderen Eigenschaften der Raumbegrenzung ab.

Ohne im einzelnen zu wissen, wieviel Schallenergie die Raumbegrenzungen schlucken und wie sie die Richtungen der einfallenden Schallwellen ändern, können wir den prinzipiellen Ablauf einer Schallerregung in einem Raum folgendermaßen beschreiben:

Schallwellen, die von der Schallquelle ausgehen, breiten sich nach allen Richtungen aus. Da man nicht alle Richtungen gleichzeitig übersehen kann, greifen wir einige beliebige heraus und verfolgen, ausgehend von der Schallquelle, den Weg dieser Ausschnitte (Bild 1).

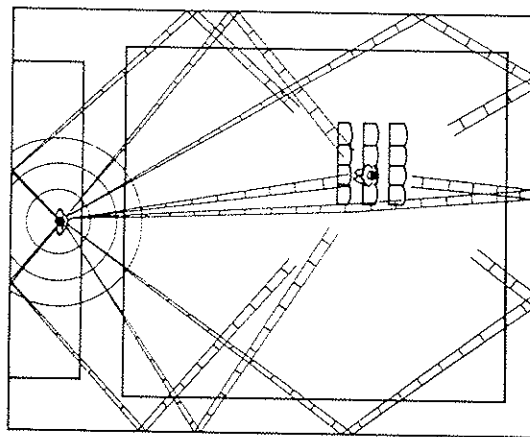
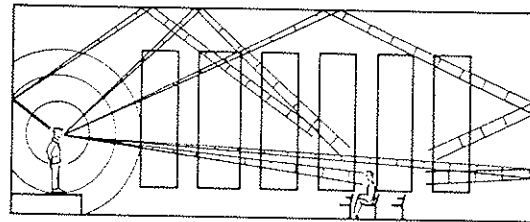


Bild 1.
Wege, auf denen die Schallwellen in einem Raum von der Schallquelle zum Hörer gelangen

Die Schallwellenstrahlen treffen sehr bald auf Raumbegrenzungen, verlieren dabei einen Teil ihrer Energie und werden abgelenkt, stoßen nach

kurzer Zeit auf die nächste Begrenzung, geben einen weiteren Teil an Energie ab und ändern wieder die Richtung u. s. f. So durchlaufen sie mit wechselnden Richtungen den Raum und verlieren bei jedem Richtungswechsel Energie. Theoretisch läuft dieser Vorgang bis ins Unendliche weiter, praktisch sinkt jedoch ihre Energie schnell unter die Wahrnehmbarkeitsgrenze.

Alle übrigen Schallwellenstrahlen verhalten sich im Prinzip ebenso, nur ihre Wege sind anders.

Aus diesem Geschehen bildet sich der Höreindruck, den ein Hörer von der Schallquelle im Raum erhält. Zuerst empfängt er den "direkten Schall", das ist der Schallwellenanteil, der auf dem kürzesten Wege, der gradlinigen Verbindung zwischen Schallquelle und Hörer, zu ihm gelangt. Dann folgen nacheinander immer weitere Anteile, die nach mehr oder weniger häufigen Umlenkungen als Schallrückwürfe das Gehör des Hörers erreichen. Je länger der Weg ist, den eine Schallwelle bis dahin zurückgelegt hat, desto später erreicht sie das Gehör und desto mehr hat ihre Intensität (im Normalfall) abgenommen.

Die akustische Wirkung eines Raumes tritt also dadurch in Erscheinung, daß ein Schallereignis den Hörer nicht nur einmal auf dem direkten Wege erreicht, sondern es wird daran anschließend viele Male wiederholt. Die Wiederholungen durch die Schallrückwürfe folgen mit abnehmender Stärke so dicht aufeinander, daß sie gewöhnlich einzeln nicht wahrgenommen werden können.

Die Akustik eines Raumes hängt nun davon ab, mit welcher Stärke die Wiederholungen eintreffen, wie sie zeitlich aufeinander folgen, und aus welcher Richtung sie kommen. Wenn die Beziehungen zwischen der akustischen Wirkung dieses Vorganges und den Eigenschaften eines Raumes bekannt sind, kann jede raumakustische Aufgabe gelöst werden. Um dahin zu kommen, müssen wir versuchen, den Ablauf der Schalleinwirkung auf den Hörer so zu modifizieren, daß das Wesentliche daran erfaßbar wird.

Beim Anhören eines einzelnen Schallereignisses in einem Raum empfinden wir das aufeinanderfolgende Eintreffen der einzelnen Schallwellenanteile im Normalfall als einen kontinuierlichen Vorgang. Es hat sich aber gezeigt, daß man drei Phasen gegeneinander abgrenzen kann:

1. Das Eintreffen des direkten Schallwellenanteiles bei einem Hörer;
2. die ersten nach dem Direktschall eintreffenden Schallrückwürfe;
3. alle folgenden Schallrückwürfe zusammengekommen, nach ihrer subjektiven Wirkung mit "Nachhall" bezeichnet.

Jede dieser Phasen hat für den Schalleindruck eine eigene Bedeutung, die sich mit der geometrischen Struktur des Raumes und der Beschaffenheit seiner Oberflächen in Verbindung bringen läßt. Damit ist der Weg vorgezeichnet, den wir bei der Lösung raumakustischer Aufgaben gehen können.

5. Von den hörpsychologischen und physikalischen Eigenschaften des direkten Schallanteiles

Der direkte Schallanteil nimmt den kürzesten, den gradlinigen Weg von der Schallquelle zum Hörer, seine Ausbreitung ist deshalb durch Wände und Decke des Raumes noch nicht beeinflusst. So zeigt er im Freien wie in einem Raum die gleichen physikalischen Eigenschaften, und um ihn möglichst gut auszunutzen, gelten für ein Freilufttheater die gleichen Regeln wie für einen Konzertsaal oder einen Hörsaal.

Im Rahmen der Gesamtwirkung, die ein Schallereignis auf einen Zuhörer in einem Raum hervorruft, hat der direkte Schall eine maßgebende hörpsychologische Bedeutung, er ist:

1. allein bestimmend dafür, daß der im Gehör hervorgerufene Richtungseindruck mit der Richtung übereinstimmt, in der die Schallquelle zu sehen ist;
2. mitbestimmend für den Lautstärkeindruck;
3. mitbestimmend für die Deutlichkeit und Verständlichkeit von Sprache und Musik.

Es ist eine tägliche Erfahrung, daß wir beim Hören nicht nur den Inhalt eines Schallereignisses aufnehmen, sondern meistens auch die Richtung empfinden, aus der er kommt. Die Fähigkeit hat der Gehörsinn dadurch erhalten, daß es zwei Ohren sind, die den Schall aufnehmen. Jedes Ohr empfängt eine Schallwelle, wenn sie nicht genau von vorn oder hinten kommt, unter etwas verschiedenen Bedingungen, daraus entsteht der Richtungseindruck.

Wenn von einem Schallereignis mehrere Anteile nacheinander auf das Gehör einwirken, so wird der Richtungseindruck in der Regel von dem zuerst eintreffenden Anteil, also dem direkten Schall, bestimmt. Ist dieser aber gegenüber anderen zu schwach, empfängt das Gehör entweder einen anderen Richtungseindruck oder gar keinen mehr.

Für den Lautstärkeindruck und die Deutlichkeit und Verständlichkeit spielt der direkte Schall eine wesentliche Rolle, aber die gleich nach ihm eintreffenden Anteile wie auch der Nachhall sind ebenfalls daran beteiligt.

Die physikalischen Eigenschaften des direkten Schalles kommen seiner hörpsychologischen Bedeutung keineswegs besonders entgegen. Von einer Schallquelle im Freien etwa, von der wir fast nur den direkten Schall wahrnehmen, wissen wir, daß sie schnell leiser wird, wenn wir uns von ihr entfernen.

Wie die Schallintensität - und damit Schallpegel und Lautstärke - mit der Entfernung abnimmt, hängt sehr wesentlich von den Strahlungseigenschaften der Schallquelle ab.

Nur wenn es sich um eine Schallquelle handelt, die die Schallenergie gleichmäßig nach allen Richtungen abstrahlt, können wir durch eine einfache Überlegung erkennen, wie die Intensität und der Schallpegel mit der Entfernung sinken.

Wir denken uns um eine solche Schallquelle eine kleine Kugel mit dem Radius r_0 und eine zweite größere mit dem Radius r gelegt (Bild 2).

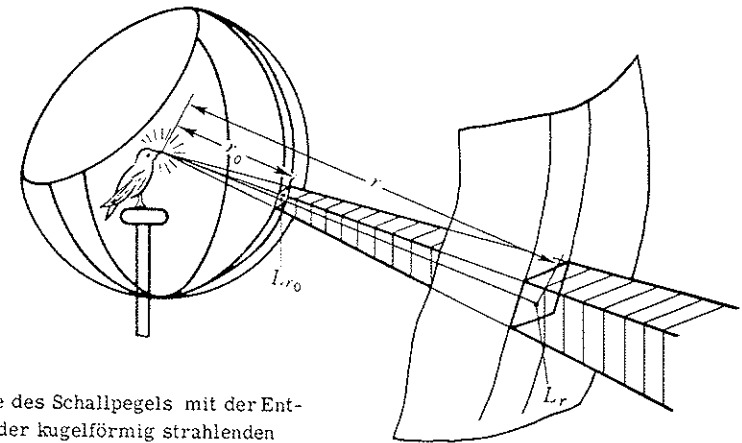


Bild 2.
Die Abnahme des Schallpegels mit der Entfernung von der kugelförmig strahlenden Schallquelle

Die von der Schallquelle gelieferte Schallenergie strömt nacheinander durch beide Kugeloberflächen. Bezeichnen wir die in einer Sekunde von der Schallquelle ausgestrahlte Schallenergie als die Schalleistung P , so wird auf der Kugeloberfläche mit dem Radius r_0 die Intensität

$$I_{r_0} = \frac{P}{4\pi r_0^2} \text{ und auf der Kugeloberfläche mit dem Radius } r \text{ die Intensität}$$

$$I_r = \frac{P}{4\pi r^2} \text{ erzeugt.}$$

Auf Grund dieser Beziehungen können wir angeben, wieviel niedriger der Schallpegel L_r im Abstand r als der Schallpegel L_{r_0} im Abstand r_0 von der Schallquelle liegt. Diese Schallpegeldifferenz beträgt:

$$\begin{aligned} L_r - L_{r_0} &= 10 \lg \frac{P}{4\pi r^2} - 10 \lg \frac{P}{4\pi r_0^2} = 10 \lg \frac{r_0^2}{r^2} \\ &= -10 \lg \frac{r^2}{r_0^2} = -20 \lg \frac{r}{r_0} \text{ dB} \approx -20 \lg \frac{r}{r_0} \text{ in phon.} \end{aligned}$$

Die gleichmäßig nach allen Richtungen strahlende Schallquelle ist ein Idealfall; alle natürlichen Schallquellen weichen davon mehr oder weniger stark ab. Das wirkt sich darin aus, daß die Lautstärkeabnahme von der Richtung abhängt. In den Richtungen mit bevorzugter Energieabstrahlung nimmt die Lautstärke langsamer ab, in den übrigen mit abgeschwächter Energieabstrahlung dagegen schneller als bei der gleichmäßig strahlenden Schallquelle.

Die Schallintensität nimmt nicht nur deswegen ab, weil sich die Schallenergie auf alle Richtungen des Raumes verteilt, hinzu kommt, daß ein Teil der Schallenergie durch Absorption verloren geht, d.h., er setzt sich durch Reibungseffekte in Wärme um.

Normalerweise kann die Energie des direkten Schalles nur durch Absorption in der Luft vermindert werden, der dadurch verursachte Intensitätsverlust ist gering und kann in der Praxis meist vernachlässigt werden; erst bei höheren Frequenzen, etwa oberhalb 5 kHz, fällt er etwas ins Gewicht.

Der direkte Schallwellenausschnitt aber, der flach über den Köpfen von Zuhörern hinwegläuft, verliert Energie durch die Absorptionswirkung der Zuhörer. Zuhörer und Gestühl stellen Raumbegrenzungen dar, deren Abmessungen in Größenordnungen liegen, bei der sie Schallwellen durch Beugungseffekte ablenken. Durch abgelenkte Schallwellen gelangt Schallenergie in den Zwischenraum der Zuhörerreihen, die dort größtenteils absorbiert und damit der Energie des Direktschalles entzogen wird. Dieser Absorptionseffekt wirkt sich hauptsächlich im Frequenzgebiet von 100 Hz bis 500 Hz aus und vermindert die Intensitäten der Schallanteile in diesen Bereich. Dies macht sich dadurch bemerkbar,

daß im Direktschall, der von Sprechern, Sängern oder Musikinstrumenten ausgeht, die Grundtöne tiefer und mittlerer Tonlagen geschwächt werden.

6. Die Verteilung der Zuhörerplätze und die Postierung der Schallquelle

Kurz zusammengefaßt nimmt die Intensität des direkten Schalles mit der Entfernung von der Schallquelle ab, außerdem wird ihre Größe von der Richtwirkung der Schallquelle und der Zuhörerabsorption beeinflusst. Auf die Praxis angewandt folgt daraus: die Intensität, mit der der direkte Schall bei einem Zuhörer ankommt, hängt davon ab, wie Zuhörer und Schallquelle einander zugeordnet sind.

Von dieser Zuordnung hängt es aber ebenfalls ab, wie die Schallquelle vom Zuhörer zu sehen ist. Daraus läßt sich eine erste Regel ableiten, die besagt: die Zuhörer empfangen den direkten Schall immer dann gut, wenn sie die Vorderseite der Schallquelle gut sehen können.

Damit werden wir auf die erste Frage gelenkt, die sich bei der Planung eines Saales stellt: wie ist die Zahl der meist vorgeschriebenen Zuhörerplätze am besten zu verteilen, und wie sollte die Schallquelle postiert werden?

Um hierfür Regeln aufzustellen, dürfen wir nicht nur vom direkten Schall allein ausgehen. Denn damit die weiter hinten sitzenden Zuhörer die Schallquelle noch gut hören können, muß der schwächer werdende Direktschall durch die unmittelbar danach eintreffenden Schallrückwürfe so weit als möglich verstärkt werden. Nur dadurch können die in den mittleren und hinteren Reihen sitzenden Zuhörer noch alles gut aufnehmen, was die Schallquelle ausstrahlt.

Bei zunehmender Entfernung von der Schallquelle aber nimmt nicht nur die Intensität des Direktschalles ab, auch die Intensität der ersten Schallrückwürfe wird schwächer. Die Folge davon ist, daß Zuhörer, die sehr weit von der Schallquelle entfernt sitzen müssen, einen Sprecher nur noch schlecht oder gar nicht mehr verstehen können, und bei Musik erhalten sie nur bei lauten Stellen einen deutlichen Klangeindruck.

Aus diesen Zusammenhängen können wir für die Anordnung der Zuhörerplätze und damit auch für die Grundrißgestaltung einen wichtigen

Schluß ziehen. Damit die hinteren Sitzreihen nicht unnötig weit von der Schallquelle entfernt sind, sollte ein Saal im Verhältnis zur Breiten nicht zu lang werden. Als Faustregel kann gelten, daß bei Sälen mit einem Raumvolumen über 500 m^3 das Verhältnis von Breite zu Länge nicht ungünstiger als etwa $2 : 3$ sein sollte. Nur bei sehr kleinen Sälen und reinen Konzertsälen kann dies Verhältnis auf $1 : 2$ erweitert werden.

Leider findet man gelegentlich neuere Säle, die im Verhältnis zur Breite zu lang geraten sind. Daß aber der Abstand zwischen Schallquelle und Zuhörern möglichst klein gehalten werden sollte, ist keineswegs eine neue Erkenntnis. Sehen wir uns daraufhin Beispiele von guten Sälen an, die zu ganz verschiedenen Zeiten gebaut wurden, so finden wir diese Regel immer berücksichtigt.

Beginnen wir mit dem Theatro olympico in Vicenza (Bild 3), einem der ersten geschlossenen Theater, die gebaut wurden. Hier fällt besonders auf, daß die Sitzreihen in - zur Bühne geöffneten - Halbkreisen angeordnet sind. Hier hat sich der Erbauer, Palladio, offenbar von der Tradition der griechischen und römischen Amphitheater leiten lassen. Denn bei diesen Freilufttheatern wird der direkte Schall nicht durch Schall-

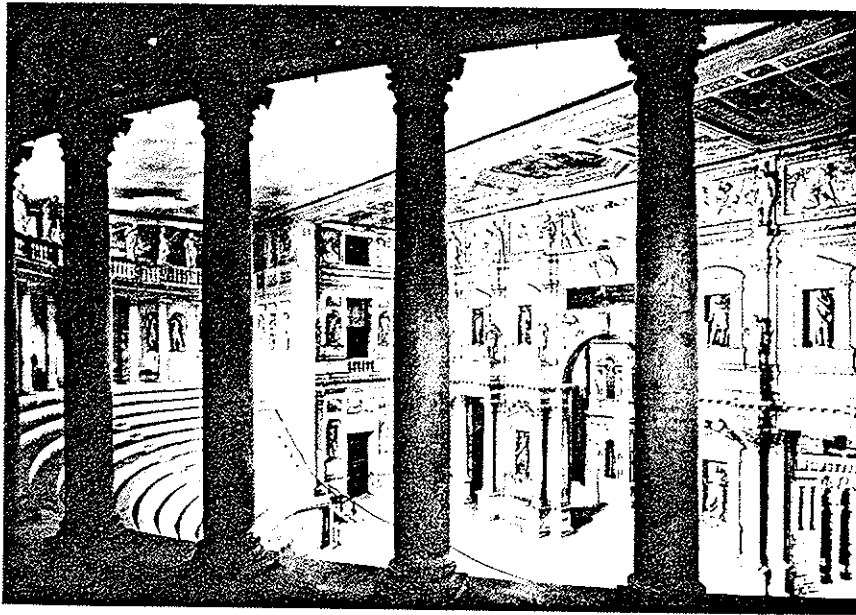


Bild 3. Das "Theatro olympico" in Vicenza, erbaut von Palladio, begonnen 1584, 3000 Plätze (Foto: Vajenti)

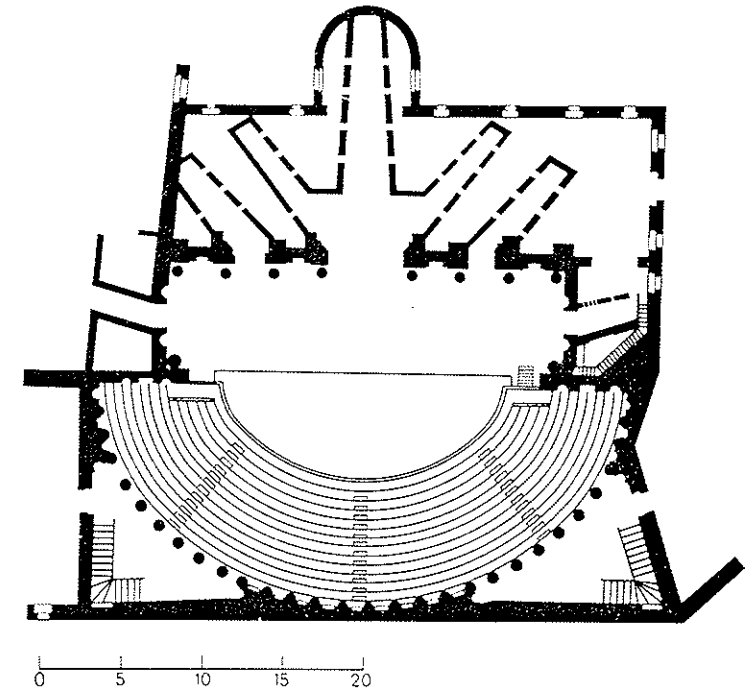


Bild 3a. Das "Theatro olympico" in Vicenza, Grundriß

rückwürfe verstärkt, und unter dieser Voraussetzung kann es keine günstigere Verteilung der Zuhörerplätze geben. Von der schallverstärkenden Wirkung der Wände und der Decke eines Saales wußte man damals noch nichts.

Im 18. Jahrhundert waren die italienischen Baumeister mit der Idee des Raumtheaters soweit vertraut, daß sie nach neuen Gestaltungsmöglichkeiten suchten. Dabei entwickelten sie ein Prinzip, das bei den meisten Theaterbauten des 18. und 19. Jahrhunderts anzutreffen ist. Da viele der damals gebauten Theater und Opernhäuser auch heute noch benutzt werden, dürfte ihr Innenaufbau allgemein bekannt sein.

Als typisches Beispiel aus dieser Zeitperiode ist in Bild 4 Grund- und Aufriß der "Mailänder Skala" (erbaut 1778) dargestellt.

Zwei Merkmale zeichnen alle diese Theater aus, die auch bei der Mailänder Skala ins Auge fallen: der Grundriß hat die Form eines Hufeisens, dessen offene Seite durch die Bühne abgeschlossen wird, und um die Saalrückwand herum laufen in verschiedenen Höhen übereinander die Ränge.

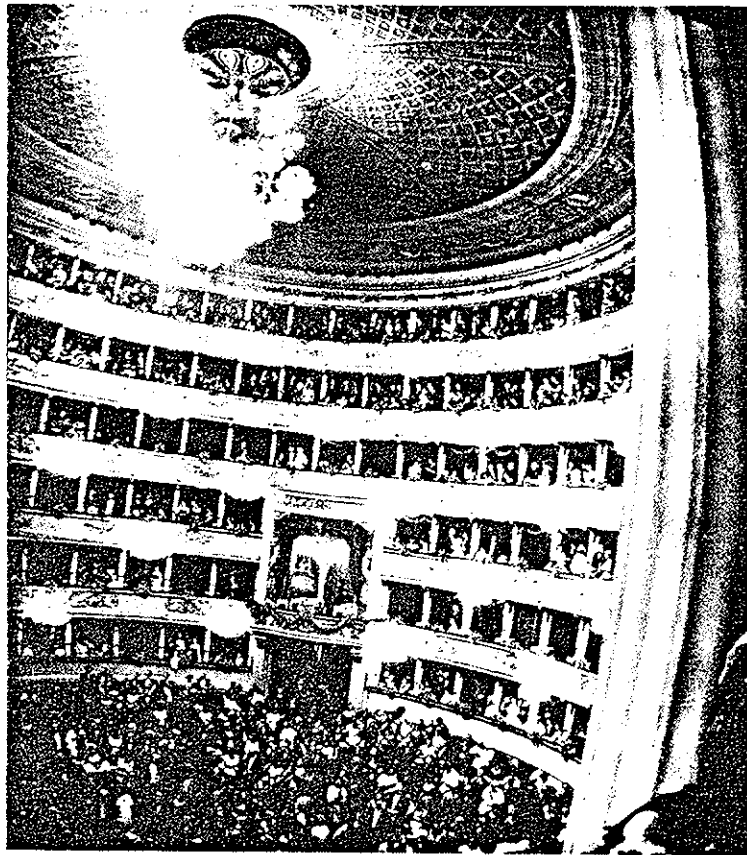


Bild 4. Die "Mailänder Skala", erbaut von Piermarini, begonnen 1787, 2135 Plätze
(Foto: Mailänder Skala)

Sicher läßt es sich nicht mehr genau feststellen, welche Überlegungen zu dieser Bauform geführt haben. Wahrscheinlich ist man hauptsächlich von dem Gedanken ausgegangen, wie möglichst allen Besuchern eine gute Sicht zur Bühne verschafft werden kann. Diesen Zweck erfüllend diese älteren Säle auch sehr gut, und ohne sich wohl darüber im klaren zu sein, haben ihre Erbauer damit erreicht, daß die Zuhörer gut mit direktem Schall versorgt werden.

Daß wir diese Theater von unserer heutigen Warte, auch wenn wir von ihrer Architektur absehen, trotzdem nicht mehr als vollkommene Lösung bezeichnen können, hat mit dem direkten Schall nichts zu tun, sondern hängt mit der Lenkung der Schallrückwürfe zusammen. Hier zeigen sich denn auch ihre Schwächen, besonders der größeren Theater.

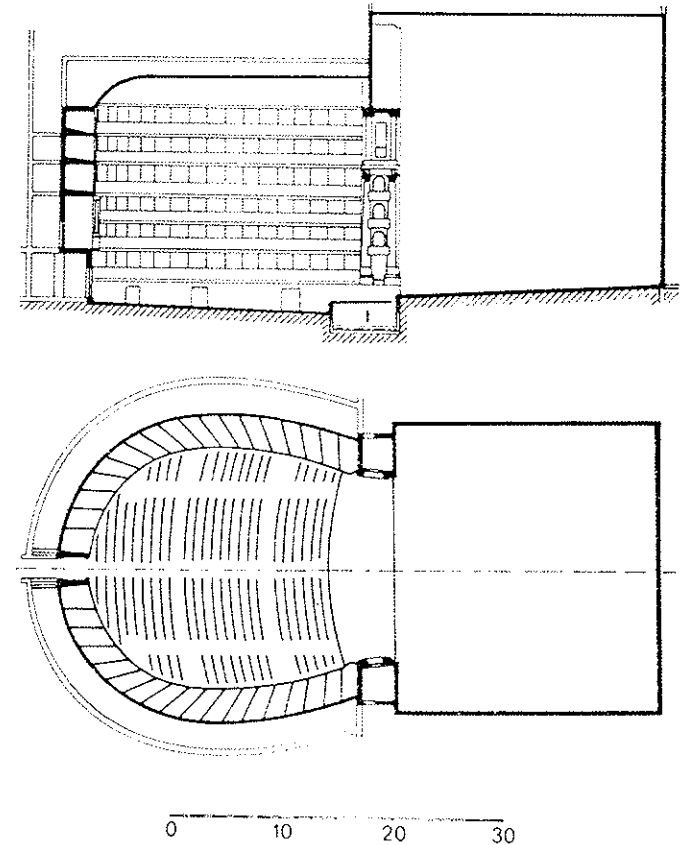


Bild 4a. Die "Mailänder Skala". Schnitt und Grundriß

So wird z. B. der Mailänder Skala eine gute Akustik nachgerühmt, es ist aber auch bekannt, daß sich darin nur Sänger mit großem Stimmvolumen durchsetzen können.

Beispielhaft an den älteren Theatern ist heute noch, wie es ihre Erbauer verstanden haben, eine große Anzahl von Zuhörerplätzen - die Mailänder Skala z. B. hat 2135 Plätze - durch einen gut proportionierten Grundriß und durch die Einrichtung der Ränge so unterzubringen, daß kein Zuhörer unnötig weit von der Schallquelle entfernt sitzen muß. Beide Konstruktionsprinzipien finden wir auch bei modernen Theatern und Opernhäusern wieder, wenn auch im Gewande einer modernen Architektur. In dem Bild 5 ist als Beispiel das Opernhaus der Stadt Köln dargestellt.

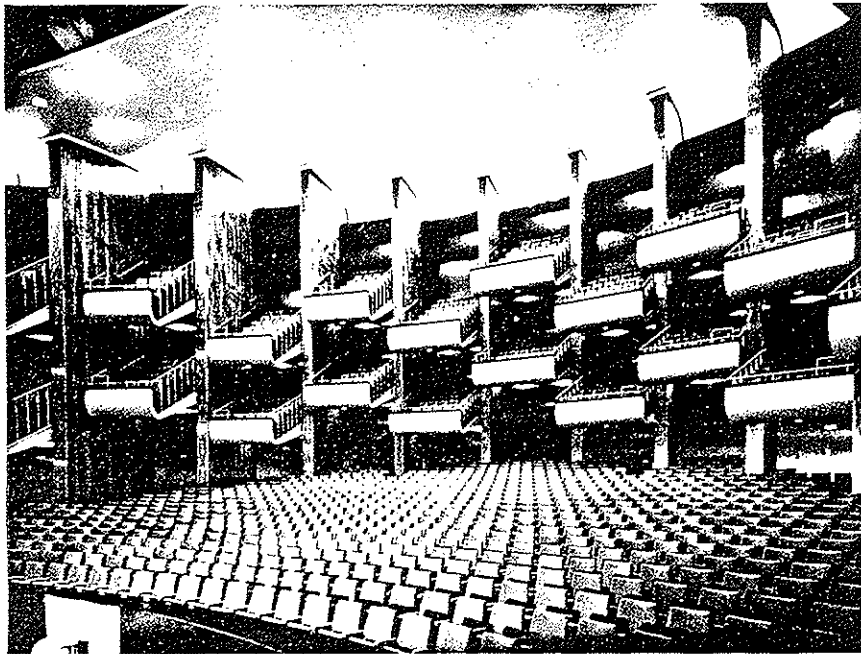


Bild 5. Opernhaus der Stadt Köln, Architekt Dr. Riphahn, 1957, 1400 Plätze (Foto: Hartzenbusch)

Ränge oder Balkone kann der Architekt nur bei großen Theaterbauten vorsehen, meist muß er sich darauf beschränken, die Zuhörerplätze in einer Ebene unterzubringen. Damit bleibt ihm nur die Möglichkeit, den Grundriß so weit als möglich einer günstigen Sitzverteilung anzupassen. Hierbei bleibt aber immer noch ein großer Spielraum offen, denn die Regel, daß das Verhältnis von Breite zu Länge nicht ungünstiger als etwa 2 : 3 sein sollte, bezeichnet nur eine obere Grenze. Viel eher wird der Architekt in seiner Gestaltungsfreiheit durch Forderungen eingeschränkt, die mit der Akustik nichts zu tun haben.

Als Musterbeispiel für eine zweckmäßige Anordnung der Sitzreihen und eine dem entsprechende Gestaltung des Grundrisses zeigt Bild 6 den Grundriß eines Gemeindesaales der Stadt Biel (Farel-Saal, erbaut 1957). Dieser Saal enthält 330 Sitzplätze, es wird darin Chorgesang, Orgelmusik und gesprochenes Wort vorgetragen.

Im Grundriß ist dieser Saal etwas breiter als lang, Form und Anordnung der Sitzreihen erinnern an das in Bild 3 dargestellte alte Theatro

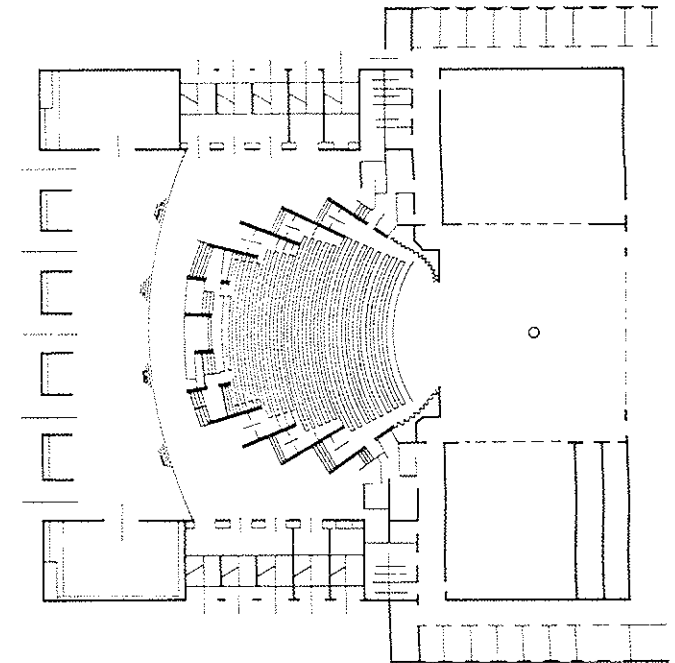
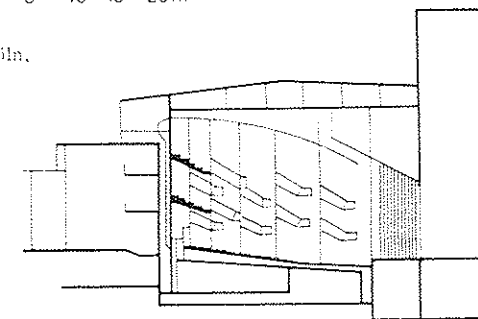


Bild 5a.
Opernhaus der Stadt Köln,
Grundriß und Schnitt



olympico. Nur ist hier der Halbkreisbogen einer Sitzreihe durch Geradenstücke angenähert, und die ungünstigen Plätze in den beiden äußeren Randzonen sind weggelassen.

Dieses Prinzip der Sitzreihenordnung kann auf verschiedene Weise variiert werden, sowohl durch verschieden starkes Abwinkeln der Seitenteile, oder auch indem man die aus Geradenstücken zusammengesetzten Sitzreihen wieder durch einen Kreisbogen wie bei dem Theatro

olympico in Bild 3 ersetzt, aber mit einem größeren Krümmungsradius anlegt, dessen Krümmungsmittelpunkt hinter der Schallquelle liegt.

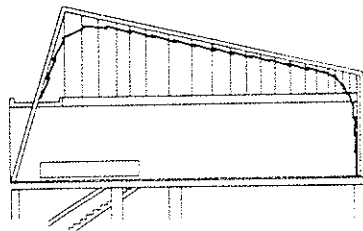
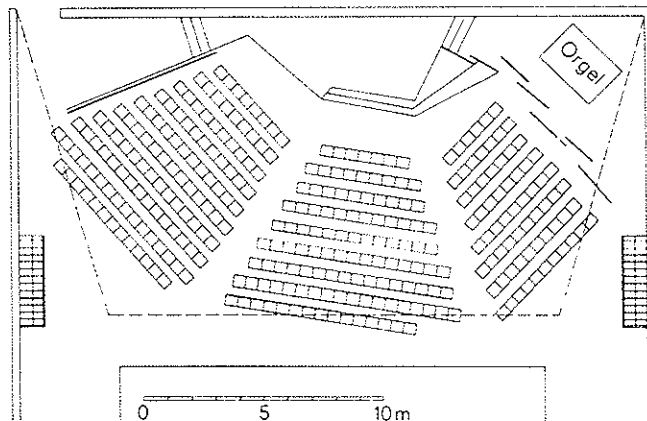
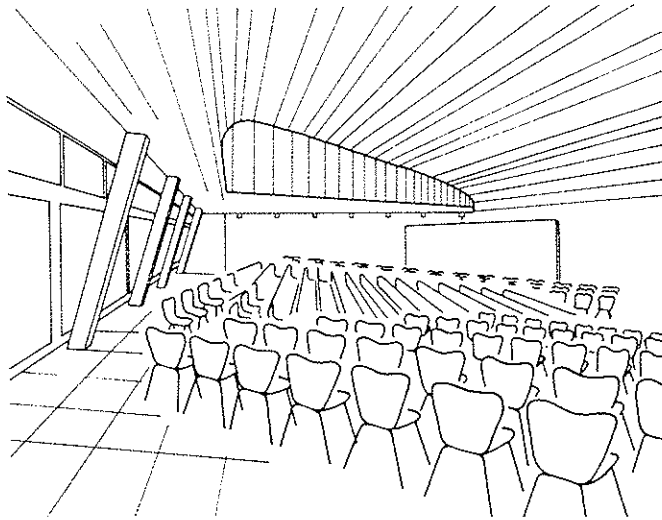


Bild 6.
Gemeindesaal der Stadt Biel,
Architekt M. Schlup, 1957,
330 Plätze

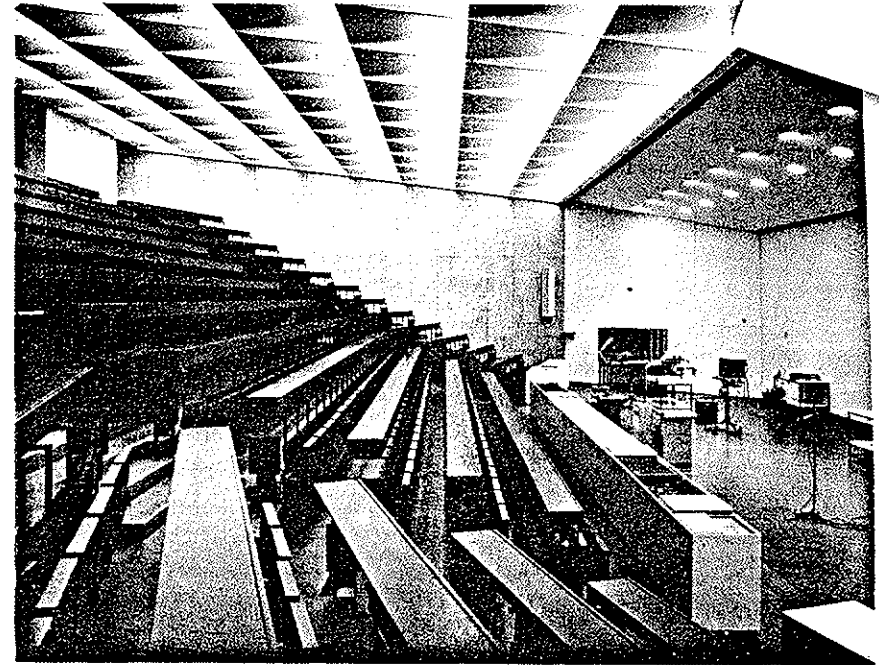


Bild 7. Großer Physik-Hörsaal der Technischen Hochschule Braunschweig, Architekt Prof. Kraemer, 1955, 550 Plätze (Foto: Heidersberger)

Als weiteren beispielhaften Entwurf zeigt Bild 7 den großen Physik-Hörsaal der Technischen Hochschule Braunschweig. Vorbildlich sind auch hier die Grundrisse des Saales und der Sitzreihenfläche proportioniert und die Sitzreihen angelegt. Die Sitzreihenfläche ist jedoch nicht eben, sondern sie steigt - wie bei vielen Hörsälen - nach hinten an. Dies Prinzip, schon bei den alten Amphitheatern angewandt, führt uns zu weiteren Möglichkeiten, den Direktschall besser auszunutzen.

Bei einer größeren Anzahl von Sitzreihen, die hintereinander liegen, werden die Zuhörer in den hinteren Sitzreihen in Bezug auf den direkten Schall nicht nur durch den größeren Abstand von der Schallquelle benachteiligt, sondern infolge der Absorption durch die vor ihnen sitzenden Zuhörer wird seine Intensität zusätzlich vermindert. Die Frage ist, wie kann dieser ungünstigen Beeinflussung des direkten Schalles begegnet werden?

Die Schallabsorption durch die Zuhörer beeinträchtigt hauptsächlich denjenigen Schallwellenausschnitt, der flach über ihre Köpfe hinwegstreift. Werden Zuhörerplätze und Schallquelle so einander zugeordnet, daß die

Zuhörer nicht diesen Ausschnitt, sondern steiler einfallende Schallwellenanteile erhalten, spüren sie die Folgen dieses Absorptionseffektes nicht mehr oder nur noch wenig.

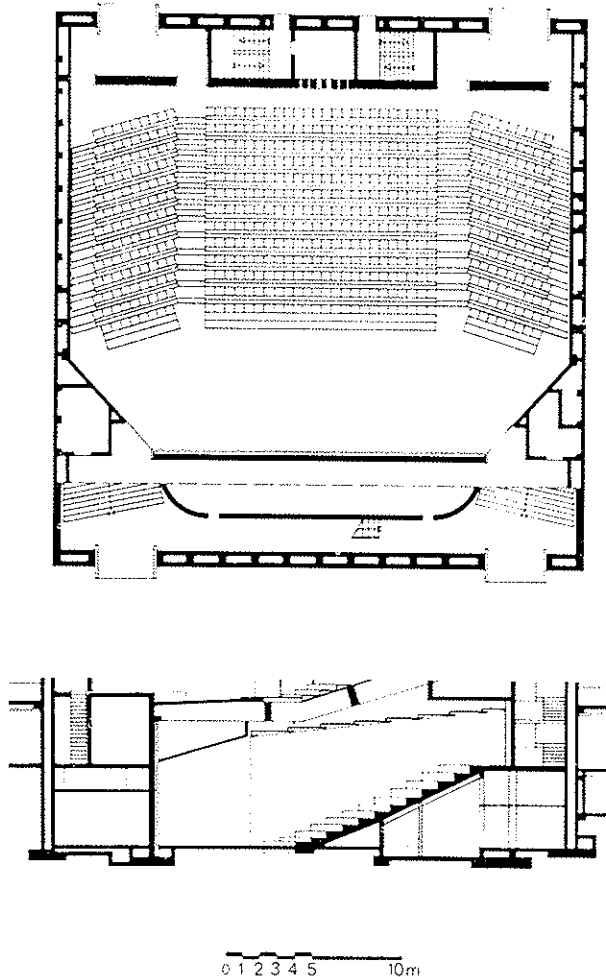


Bild 7a. Großer Physik-Hörsaal der Technischen Hochschule Braunschweig, Grundriß und Schnitt

Es gibt zwei Möglichkeiten dies zu erreichen, die sowohl einzeln als auch gemeinsam angewandt werden können, nämlich

1. durch ein Ansteigen der Sitzreihen nach hinten,
2. durch Anheben der Schallquelle.

Wenn in einem Saal die Sitzreihen nach hinten ansteigen, so meistens deshalb, damit die in der Mitte und hinten sitzenden Personen besser sehen können. Deshalb findet man diese Anordnung in vielen Hörsälen, in denen neben dem Vortrag Experimente vorgeführt werden; in modernen Theater- und Konzertsälen wird ebenfalls davon Gebrauch gemacht. Auch hier finden wir wieder die Regel bestätigt, daß die Zuhörer den direkten Schall am besten empfangen, wenn sie die Schallquelle gut sehen können.

Für die Praxis entsteht daraus die Frage, wie stark sollten die Sitzreihen ansteigen, damit der direkte Schall die Zuhörer möglichst ungehindert erreicht.

Diese Frage läßt sich nicht ganz exakt beantworten. Mit zunehmender Sitzreihentiefe nimmt die Intensität des direkten Schalles ab, deshalb werden die Zuhörer um so mehr benachteiligt, je weiter hinten sie sitzen. Danach dürften die Zuhörerreihen nicht gleichmäßig ansteigen, sondern die Steigung sollte bei Null beginnen und mit zunehmender Sitzreihentiefe anwachsen. Bei einer sehr tiefen Sitzreihenfläche ist diese Tendenz auch anzustreben.

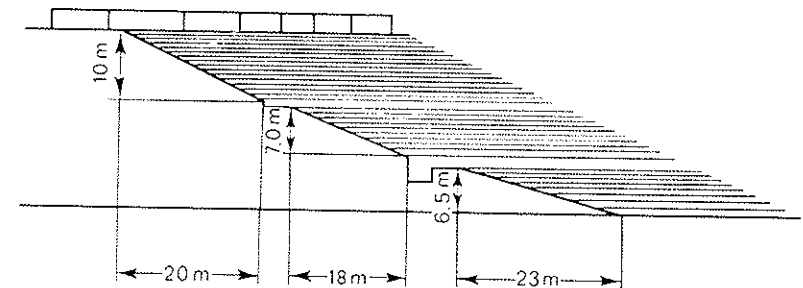


Bild 8. Ansteigende Sitzreihen bei einem großen Freilichttheater (Große Freilichtbühne bei Berlin)

Wie dies in der Praxis ausgeführt werden kann, ist in Bild 8 am Beispiel der großen Freilichtbühne bei Berlin dargestellt. Das kurvenförmige Anwachsen der Steigung ist durch Geradenstücke angenähert. Bis zu einer Sitzreihentiefe von 25 m beträgt der Anstieg 25 %, das entspricht einem Erhebungswinkel von etwa 15° , bei dem sich daran anschließenden Stück bis zu 50 m erhöht sich der Anstieg auf 40 % und der Erhebungswinkel auf 22° , von da an wächst der Anstieg auf 50 % entsprechend einem Erhebungswinkel von 27° .

Solche große Sitzreihentiefen gehören zu den Ausnahmefällen, man findet sie in Hallen für Großveranstaltungen und bei großen Freilufttheatern. Bei kleineren Sitzreihentiefen wie z. B. in Hörsälen genügt es meist, wenn die Sitzreihen ungebrochen gradlinig ansteigen. Das Steigungsmaß kann dabei, wie im ersten Bereich des Bildes 8 ca 25% betragen, als Faustregel kann man sich merken, daß es kaum zu groß ausfallen kann.

In Räumen, in denen nicht nur die Sitzreihen ansteigen, sondern auch die Schallquelle angehoben werden kann, erfüllt schon ein kleineres Steigungsmaß den vorgesehenen Zweck. Solange die Steigung den Wert von 10% dabei nicht übersteigt, brauchen die sonst in öffentlichen Sälen vorgeschriebenen Sicherheitsvorkehrungen wie Stufenbeleuchtung usw. noch nicht vorgesehen werden.

Eines der ältesten Beispiele für ein Anheben der Schallquelle stellt die Kanzel in der Kirche dar. Würde die Predigt nicht von der hochliegenden Kanzel aus gehalten, wäre sie von vielen Kirchenbesuchern nur schlecht oder gar nicht zu verstehen. Denn fast alle Kirchen haben einen zu langen Nachhall; hierdurch wird, wie wir noch sehen werden, die Sprachverständlichkeit wesentlich beeinträchtigt. Ein ungeschwächter direkter Schallanteil kann sie merklich verbessern.

Andere praktische Möglichkeiten, um den Standort der Schallquelle zu erhöhen, werden ebenfalls seit langem angewandt, es sind dies: das Podium für den Sprecher, das Orchester oder die Bühne des Theaters.

Wieviel die Schallquelle im einzelnen angehoben werden darf, wird praktisch davon bestimmt, wie weit den Zuhörern in den ersten Reihen zugemutet werden kann, ihren Kopf nach hinten zu neigen, um sie zu sehen.

Von dem Einfluß, den die Richtwirkung einer Schallquelle auf die Gestaltung eines Raumes nehmen kann, haben wir bisher noch nicht gesprochen. Nun sind die Richtungseigenschaften der natürlichen Schallquellen alle verschieden voneinander, bei jeder einzelnen hängen sie außerdem von der Frequenz ab. Hinzu kommt, daß wir es nicht mit feststehenden Schallquellen zu tun haben, allein durch die Bewegung seines Kopfes verändert ein Sprecher oder Sänger ständig die Lage seiner Richtcharakteristik im Raum.

Um die Richtwirkung zu berücksichtigen, dürfen wir also nur von einer Durchschnittscharakteristik ausgehen. Diese können wir, wie folgt beschreiben: ein Musiker oder Sprecher strahlt die größte Schallintensi-

tät, von seinem Standpunkt aus betrachtet, nach vorn ab, nach beiden Seiten nimmt sie ab und hinter ihm ist sie am kleinsten.

Hieraus können wir als Nutzanwendung ableiten, daß die Entfernung von der Schallquelle zu einem der beiden Außenplätze in der ersten Sitzreihe kleiner ausfallen muß als die Entfernung von der Schallquelle zu dem Sitzplatz in der Mitte der letzten Sitzreihe. Um auch hier eine Faustregel anzugeben, so sollte das Verhältnis der zuerst genannten Entfernung e_1 (Bild 9) zur zweiten e_2 die Grenze von 2 : 3 nicht überschreiten. Dazu wird aber kaum ein Architekt so leicht in Versuchung kommen, denn wenn das Verhältnis der Entfernung e_1 zur Entfernung e_2 ansteigt, wird der Blickwinkel, unter dem die Personen auf den Außenplätzen der

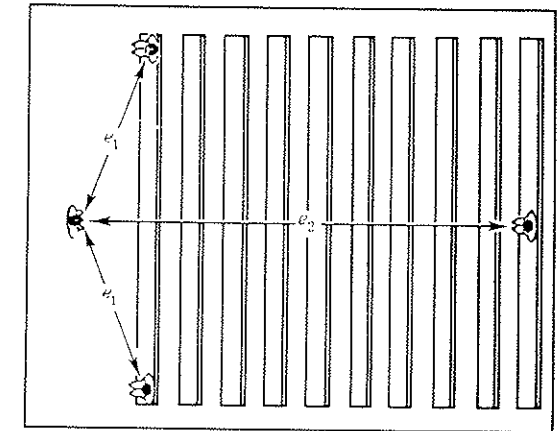


Bild 9.
Berücksichtigung der durchschnittlichen Richtcharakteristik einer Schallquelle bei der Sitzreihenordnung. Das Verhältnis von $e_1:e_2$ sollte nicht größer als 2 : 3 sein

ersten Sitzreihen die Schallquelle sehen, ständig ungünstiger. Auch hier gilt also wieder die Regel, daß die Zuhörer dann den direkten Schall gut empfangen, wenn sie die Vorderseite der Schallquelle gut sehen können.

7. Von den hörpsychologischen Eigenschaften einzelner Schallrückwürfe

Wenn wir mit einem Partner auf einem freien geräuscharmen Platz sprechen und bei verschiedenen Abständen die Sprachverständigung prüfen, können wir uns einen Eindruck verschaffen, wie die Intensität des Direktschalles mit der Entfernung abnimmt. In 1 m Abstand voneinander kann man sich gut verstehen. Schon in etwa 5 m Abstand aber fällt es schwer, jedes Wort mühelos aufzunehmen, wenn der Partner nicht langsamer und lauter spricht, und 10 m voneinander entfernt versteht man sich nur noch schwer, wenn Lautstärke und Tempo eines normalen Unterhaltungsgespräches beibehalten werden.

Bei gleichen Versuchen in verschiedenen Räumen zeigt sich dagegen, daß der Partner in 5 m Abstand fast ebenso gut zu verstehen ist wie in einem Meter Abstand. Ist der Raum groß genug, kann man meistens noch in weit mehr als 10 m Abstand jedes Wort sicher aufnehmen, ohne daß er lauter und langsamer sprechen muß. Hierbei gibt es allerdings von Raum zu Raum Unterschiede.

Aus diesen Erfahrungen müssen wir schließen, daß die Schallrückwürfe eines Schallereignisses, die nach dem Direktschall bei einem Hörer eintreffen, den Lautstärkeindruck wesentlich vergrößern können. Denn nur so ist es zu erklären, daß die Verständlichkeit in einem Raum meist weit weniger schnell mit der Entfernung von der Schallquelle abnimmt als im Freien.

Wenn auch die Schallrückwürfe die Lautstärke eines Schallereignisses vergrößern, die Verständlichkeit eines Sprechers oder die Klarheit und Durchsichtigkeit von Musik wird dadurch nicht in jedem Fall verbessert. So kann man es erleben, daß die Sprachverständlichkeit etwa in der Mitte eines Saales schlechter ist als hinten. In manchen Theatern sind bestimmte Platzgruppen dafür bekannt, wo "die Akustik schlecht ist", wie die Leute sagen. Sehr hallige Räume, wie z. B. große Kirchenschiffe, zeichnen sich durch eine besonders schlechte Sprachverständlichkeit aus.

Womit hängt es zusammen, daß es Schallrückwürfe gibt, die eine nützliche Wirkung ausüben und andere mit schädlicher Wirkung?

Wenn ein Schallrückwurf bei einem Hörer eintrifft, unterscheidet er sich im allgemeinen durch drei Eigenschaften vom Direktschall.

1. Infolge seines längeren Weges trifft er später als der Direktschall ein; diesen Zeitunterschied nennt man die Laufzeitdifferenz.
2. Seine Intensität weicht von der des Direktschalles ab, denn er entstammt einem anderen Schallwellenausschnitt als der Direktschall, hat einen längeren Weg zurückgelegt und kann bei jedem Rückwurf mehr oder weniger Energie durch Schallschluckung verloren haben.
3. Der Hörer empfängt ihn aus einer anderen Richtung als den Direktschall.

Die Erscheinung des Echos stellt ein Beispiel für den Fall dar, daß die Laufzeitdifferenz sehr groß ist, und die Intensität des Schallrückwurfes, des Echos also, von der des Direktschalles nicht sehr stark abweicht.

Nun kann man mit Echos ganz lustige Spiele treiben; Mark Twain hat die Geschichte von einem Mann erzählt, der sich eine ganze Echosammlung angelegt hat. Ein deutlich wahrnehmbares Echo aber stört die Verständlichkeit eines natürlichen Schallereignisses ganz erheblich.

In Räumen aller Art, auch in großen Sälen, kommt es nur selten vor, daß ein Schallrückwurf als Echo hervortritt, doch es ist auch nicht zu erwarten, daß die Verständlichkeit erst dann herabgesetzt wird, wenn ein deutliches Echo zu hören ist. Wir müssen vielmehr annehmen, daß die schädliche Wirkung eines Schallrückwurfes schon früher einsetzen kann.

Für die praktische Raumakustik ist es von wesentlicher Bedeutung zu wissen, durch welche Merkmale sich nützliche Schallrückwürfe von schädlichen unterscheiden. Denn einerseits sind nützliche Schallrückwürfe unbedingt erforderlich, um die rasch abnehmende Intensität des Direktschalles so weit als möglich auszugleichen, andererseits muß die Entwicklung schädlicher Schallrückwürfe verhindert werden.

Wie die Zuhörer das Zusammenwirken von Direktschall und Schallrückwürfen empfinden, kann man durch Versuche feststellen. Mit welchen Methoden werden in der modernen Akustik solche Fragen angegangen?

Wir wollen an dieser Stelle etwas näher darauf eingehen. Dann werden nicht nur die Ergebnisse solcher Untersuchungen verständlicher, wir erhalten dabei auch einen Begriff von den Anwendungsmöglichkeiten, die elektroakustische Geräte bieten. Denn in der modernen Raumakustik

gibt es nicht gerade selten Fälle, wo man ohne elektroakustische Hilfsmittel nicht auskommt.

Bei dem Problem, das hier zu lösen ist, stellt man zuerst eine Tonbandaufnahme von einem Sprecher her, der in einer Umgebung spricht, die frei von Schallrückwürfen ist. Man geht dazu in einen "schalltoten Raum", in dem Wände, Decke und Fußboden so ausgekleidet sind, daß sie die einfallende Schallenergie nahezu vollständig schlucken und dadurch die Ausbildung von Schallrückwürfen verhindern.

Die Bandaufnahme, die so entstanden ist, wird von einem Tonbandgerät abgespielt, dessen Lautsprecher wieder in einem schalltoten Raum aufgestellt ist. Ein Zuhörer empfindet die Wiedergabe der Bandaufnahme über diesen Lautsprecher ebenso, als wenn er nur den Direktschall des Sprechers aufnehmen würde.

Diese Anlage wird nun in besonderer Weise erweitert. Neben den einen Lautsprecher wird ein zweiter gesetzt. Dieser wird aber nicht vom Tonbandgerät direkt gesteuert, sondern in den Zuleitungsweg zu diesem Lautsprecher ist ein Magnetbandgerät geschaltet, das die Wiedergabe der Bandaufnahme verzögert (Bild 10). Mit anderen Worten heißt das,

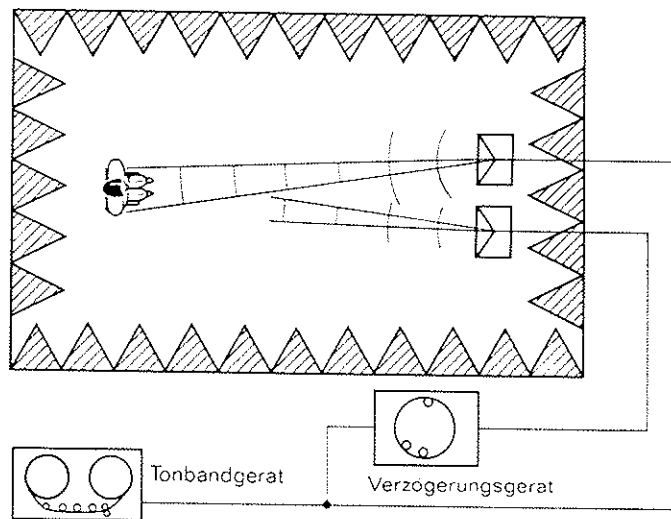


Bild 10. Wiedergabe einer Tonbandaufnahme über einen direkt angeschlossenen Lautsprecher und einen zweiten mit künstlicher Verzögerung als Nachbildung eines einzelnen Schallrückwurfes in einem reflexionsfreien (schalltoten) Raum

zwischen der Wiedergabe des ersten und zweiten Lautsprechers entsteht eine Laufzeitdifferenz. Ein Zuhörer muß deshalb die verzögerte Wiedergabe des zweiten Lautsprechers ebenso empfinden wie einen Schallrückwurf.

Ein solcher künstlich erzeugter Schallrückwurf bietet gegenüber einem natürlichen den Vorteil, daß man die Laufzeitdifferenz und die Lautstärke gegenüber dem ersten Lautsprecher leicht verändern kann.

Nun haben wir es in einem gewöhnlichen Raum nicht mit einem einzigen Schallrückwurf zu tun, sondern mit einer sehr großen Zahl. Insofern liefert diese Anordnung kein wirklichkeitsgetreues Abbild von der akustischen Wirkung eines Raumes. Trotzdem können wir aus den Ergebnissen, die man mit dieser einfachen Versuchsanordnung erhält, praktische Nutzenanwendungen für die Raumakustik gewinnen.

Wir können davon ausgehen, daß sich der stärkste Schallrückwurf, der in einem normalen Raum nach dem Direktschall eintrifft, in der Wirkung auf einen Zuhörer nicht wesentlich von der eines einzigen Schallrückwurfes unterscheidet. In der Reihenfolge des Eintreffens ist häufig der erste Schallrückwurf auch der stärkste, weil er den kürzesten Weg zurückgelegt hat. Wenn dieser jedoch einem Schallwellenausschnitt entstammt, den die Schallquelle besonderes schwach ausstrahlt, oder seine Intensität ist durch Schallschluckung geschwächt worden, kann es der zweite oder dritte, in seltenen Fällen auch ein späterer sein.

Für die übrigen Schallrückwürfe, die zusammen den Nachhall ausmachen, lassen sich aus dieser Methode keine ins einzelne gehende Rückschlüsse gewinnen, doch die Versuchsergebnisse geben Aufschluß über eine prinzipielle Voraussetzung für den Nachhall.

Kommen wir nun zu dem Ergebnis selbst. Seine Tendenz kann man schon ohne Versuche abschätzen. Wenn nämlich ein Schallrückwurf nicht stören soll, ist anzunehmen, daß seine Intensität gegenüber dem Direktschall um so mehr herabgesetzt werden muß, je größer die Laufzeitdifferenz wird. Das Versuchsergebnis, das in Bild 11 dargestellt ist, bestätigt diese Annahme.

Auf der Abszissenachse des Diagramms ist die Laufzeitdifferenz zwischen den beiden Lautsprechern eingetragen. Die Unterteilung der Zeitachse in ms (1 Milli-Sekunde = 1 ms = 1/1000 Sekunde) zeigt, in welcher Größenordnung sich die Laufzeitdifferenzen bewegen. Auf der Ordinatenachse ist der Intensitätsunterschied des zweiten Lautsprechers gegenüber dem ersten abzulesen, und zwar als Differenz ihrer Schall-

pegel, der etwa dem Lautstärkenunterschied in phon gleichgesetzt werden kann.

Die eingetragene Kurve gibt das Versuchsergebnis wieder. Ihr Verlauf zeigt, wie die Intensität des Schallrückwurfes mit zunehmender Laufzeitdifferenz abnehmen muß, damit er nicht stört.

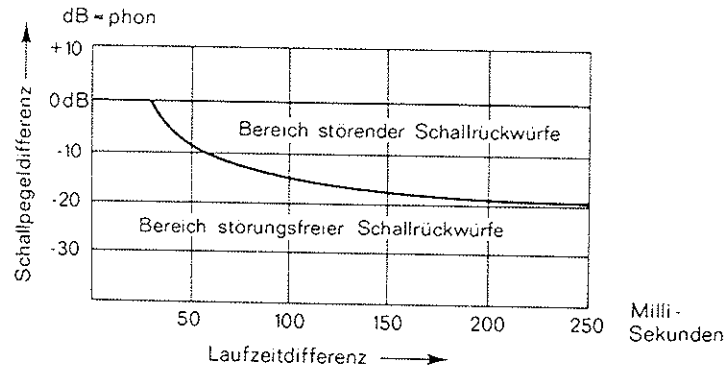


Bild 11. Grenze zwischen einem nicht störenden und störenden einzelnen Schallrückwurf mit wachsender Laufzeitdifferenz (nach unveröffentlichten Messungen von Ing. H. Lüdeke, Bremen)

Betrachten wir zuerst den Bereich kleiner Laufzeitdifferenzen, so fällt auf, daß die Kurve erst bei 30 ms einzusetzen beginnt, der Kurvenpunkt liegt an dieser Stelle auf der 0-dB-Linie, d.h. ein Schallrückwurf mit dieser Laufzeitdifferenz kann ebenso stark sein wie der Direktschall, ohne zu stören. Bei etwas anders angelegten Versuchen, hat sich gezeigt, daß die Intensität des Schallrückwurfes bei Laufzeitdifferenzen zwischen 10 ms und 30 ms sogar etwas größer sein darf als die des Direktschalles, ohne daß ein Hörer sein Vorhandensein bemerkt.

Oberhalb von 30 ms Laufzeitdifferenz beginnt die Kurve rasch abzufallen, bei ca 200 ms geht sie dann allmählich in einen fast horizontalen Verlauf über. Damit wissen wir nun, wie die Trennungslinie zwischen einem nicht störenden und einem störenden Schallrückwurf verläuft. Für die Raumakustik lassen sich daraus die folgenden Nutzanwendungen ziehen:

1. Nur Schallrückwürfe mit Laufzeitdifferenzen bis etwa 50 ms können zu einer wirksamen Verstärkung des Direktschalles beitragen. Denn bei Schallrückwürfen mit größeren Laufzeitdifferenzen, die nicht stören sollen, müssen deren Intensitäten gegenüber dem Direktschall

erheblich schwächer werden, deshalb können sie die Lautstärke nicht nennenswert erhöhen.

2. Da wir nun angeben können, wann ein Schallrückwurf stört, können wir untersuchen, wann solche Störungen in einem Saal zu befürchten sind und wie sie vermieden werden können.
3. Wenn ein einziger Schallrückwurf auch eine andere subjektive Wirkung hervorruft als die vielen aufeinanderfolgenden, die wir als Nachhall empfinden, so liefert das Ergebnis dieser Versuche doch eine wesentliche Voraussetzung für den Effekt des Nachhalls. Denn bei den nacheinander eintreffenden Schallrückwürfen des Nachhalls handelt es sich um Schallrückwürfe mit zunehmenden Laufzeitdifferenzen. Wie wir später noch sehen werden, können dabei die letzten, die eintreffen, Werte von einigen Sekunden erreichen. Daß auch Schallrückwürfe mit so großen Laufzeitdifferenzen nicht zu stören brauchen, wenn nur ihre Intensität gegenüber dem Direktschall genügend klein bleibt, zeigt der Verlauf der Kurve, die im letzten Teil in eine fast horizontale Gerade übergeht. Mehr Erkenntnis für die subjektive Wirkung des Nachhalls ist daraus nicht zu gewinnen.

Dem Versuchsergebnis, das wir hier ausgewertet haben, liegen Urteile über subjektive Empfindungen zu Grunde. Kein Mensch aber empfindet eine Wahrnehmung durch die Sinne ganz genau so wie ein anderer. Deshalb sind die Meßpunkte, aus denen die Kurve des Bildes 11 entstanden ist, durch Ausmitteln mehrerer Einzelmessungen gebildet worden. Dies darf man bei praktischen Anwendungen nicht vergessen, es kann durchaus Zuhörer geben, die einen Schallrückwurf schon als störend empfinden, wenn er als Meßpunkt unter der Kurve des Bildes 11 zu liegen käme, andere Zuhörer wiederum empfinden Schallrückwürfe mit über der Kurve liegenden Meßpunkten noch nicht als störend.

Abgesehen von der natürlichen Streuung von Person zu Person hängt das Urteil über die subjektive Wirkung eines Schallrückwurfes von dem Tempo der Sprache oder der Musik ab. Wenn schnell gesprochen wird, setzt die Störwirkung früher ein als bei langsamem Tempo, entsprechendes gilt auch für Musik. Normalerweise kann man diesen Unterschied nicht berücksichtigen, denn in den meisten Räumen, in denen akustische Darbietungen stattfinden, kommt jedes Tempo vor. Höchstens in Kirchenräumen ist die Tendenz des Tempos bei Sprache und Musik gleichmäßig in den Bereich langsamer Tonfolgen verschoben, so daß sich darin geringe Überschreitungen der Grenzkurve weniger stark auswirken.

Ganz außer acht gelassen haben wir bisher die Frage, inwieweit die Störfähigkeit eines Schallrückwurfes auch von der Richtung abhängt, aus

der ein Hörer ihn empfängt. Nun hat sich bei Versuchen gezeigt, daß die subjektive Wirkung eines Schallrückwurfes sehr wohl davon beeinflußt wird, aber der Einfluß ist nicht so groß, daß wir im Rahmen der praktischen Raumakustik darauf eingehen müßten.

Wodurch sich die Störwirkung schädlicher Schallrückwürfe bemerkbar macht und in welchem Maße die nützlichen zur Lautstärkeerhöhung beitragen, diese Fragen haben wir noch nicht behandelt.

Ein schädlicher Schallrückwurf fängt im Übergangsbereich dadurch zu stören an, daß die Zuhörer nicht mehr jedes Wort eines Sprechers mühelos verstehen können, und bei Musik klingen schnelle Passagen etwas unsauber. Wird die Intensität des Schallrückwurfes gesteigert, so verstärkt sich diese Tendenz, bis schließlich ein Echo deutlich hörbar wird.

Die Lautstärkeerhöhung, die durch nützliche Schallrückwürfe hervorgerufen wird, ist in erster Näherung ebenso groß als wenn jeder Schallrückwurf durch eine Schallquelle gleicher Lautstärke ersetzt würde, die den Schall gleichzeitig mit der tatsächlichen Schallquelle aussendet. Wir werden im nächsten Kapitel sehen, daß sich der Gedanke, als Ursache von Schallrückwürfen scheinbare Schallquellen anzunehmen, noch weiter führen läßt.

Daß die nützlichen Schallrückwürfe später als der Direktschall beim Hörer eintreffen, ist für den Effekt der Lautstärkeerhöhung keineswegs von Nachteil. Wie Versuche gezeigt haben, empfinden wir durch eine zweite Schallquelle eine etwas größere Lautstärkeerhöhung, wenn sie gegenüber der ersten verzögert wird, als wenn sie den Schall gleichzeitig mit ihr aussendet.

Dieses auf den ersten Blick merkwürdige Ergebnis erklärt sich durch die Trägheit des Gehörs, das beim Einsetzen eines Schallsignals noch nicht voll aufnahmebereit ist. Wird das Schallsignal gleich danach - etwa durch einen nützlichen Schallrückwurf - wiederholt, hat das Gehör eine größere Aufnahmebereitschaft erreicht, so daß wir es deutlicher und klarer wahrnehmen.

Das verzögerte Eintreffen eines Schallrückwurfes bringt noch einen weiteren Vorteil mit sich. Der Eindruck für die Richtung, aus der ein Hörer die Schallquelle hört, geht dadurch nicht verloren, er wird nur abgeschwächt.

Eine negative Auswirkung dieses Effektes kann man gelegentlich in Vortragssälen feststellen, in denen die Lautstärke durch eine Lautsprecheranlage vergrößert werden soll und die Lautsprecher falsch aufgebaut

sind. Ist der Abstand eines Lautsprechers zu einem Hörer kleiner als der Abstand des Sprechers zu diesem Hörer und der Lautsprecher nicht verzögert, so trifft der Lautsprecherschall früher bei ihm ein als der Direktschall des Sprechers. Für den Hörer kommt der Schall dann vom Lautsprecher und nicht aus der Richtung, in der er den Sprecher sieht.

8. Schallrückwürfe an großen, ebenen Flächen

Ein Schallrückwurf bildet sich beim Auftreffen einer Schallwelle auf eine Raumbegrenzung. Seine Eigenschaften nach dem Verlassen der Raumbegrenzung hängen hauptsächlich von ihrer geometrischen Form und Größe, ihrer Oberflächenbeschaffenheit und der Wellenlänge λ der Schallwelle ab.

Wir wollen zuerst den einfachsten Fall behandeln, daß eine Schallwelle auf eine ebene und überall dichte Fläche auftrifft, deren Abmessungen groß gegen die Wellenlänge der Schallwelle sind. Mit guter Annäherung haben wir diesen Fall in der Praxis bei glatten ebenen Wänden und Decken vorliegen. Beim Auftreffen auf eine solche Fläche verhält sich ein schmaler Schallwellenausschnitt ebenso wie ein Lichtstrahl, der auf einen Spiegel auftrifft: er wird nach dem Reflexionsgesetz reflektiert.

Das Reflexionsgesetz besagt zweierlei:

1. der Winkel, den der einfallende Strahl mit der Senkrechten im Auftreffpunkt der reflektierenden Fläche bildet, ist ebenso groß wie der Winkel des reflektierten Strahles mit dieser Senkrechten. Einfacher ausgedrückt: Einfallswinkel = Ausfallswinkel (Bild 12).
2. Einfallender Strahl, Flächensenkrechte und reflektierter Strahl liegen in einer Ebene.

Wenn wir das Reflexionsgesetz auf Schallwellen anwenden, die unmittelbar von einer Schallquelle Q kommen und auf eine große ebene Fläche auftreffen, so ergibt sich, daß sich die reflektierten Strahlen durch eine besondere Eigenschaft auszeichnen. Wenn man nämlich die reflektierten Strahlen nach hinten verlängert, so treffen sie sich alle in einem Punkt Q (Bild 12). Diesen Punkt können wir - in Analogie zudem Bild der Lichtquelle vor einem Spiegel - als Spiegelbild der Schallquelle ansehen. Die reflektierten Schallwellen verhalten sich so, als ob sie alle von dieser Spiegelbildquelle kämen. Wie aus der Konstruktion des

Bildes 12 zu erkennen ist, liegt das Spiegelbild der Schallquelle scheinbar ebenso weit hinter der reflektierenden Fläche wie die Schallquelle selbst vor ihr, ihre Lage ist also leicht zu bestimmen.

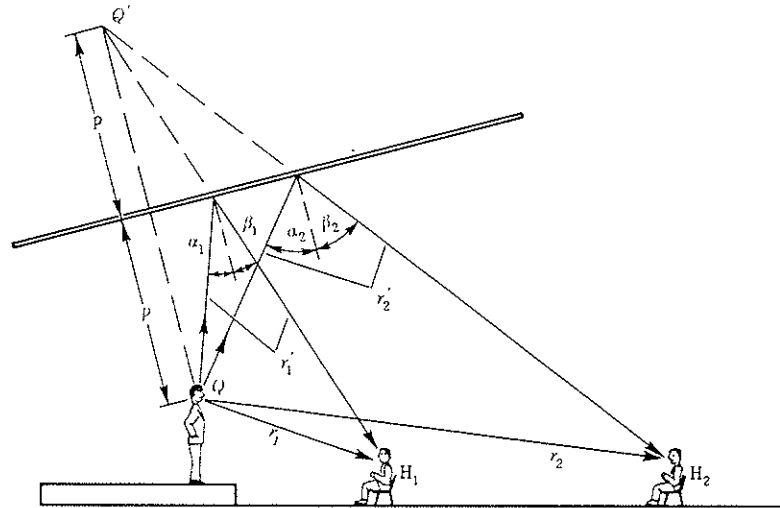


Bild 12. Das Reflexionsgesetz: Einfallswinkel α = Ausfallswinkel β . Schallquelle Q, Spiegelbildquelle Q', Hörer H

Die Vorstellung, als Ursache des Reflexionsschalles die Spiegelbildquelle anzusehen, gibt nicht nur ein anschauliches Bild von dessen Wirkungsweise, sie bringt auch praktische Vorteile mit sich:

1. Man kann den Weg eines Schallstrahles, der von der Schallquelle über eine Decken- oder Wandreflexion zu einem Hörer führt, sehr schnell konstruieren.
2. Der Weg eines reflektierten Schallstrahles von der Schallquelle zum Hörer ist ebenso groß wie der Abstand des Hörers zur Spiegelbildquelle.

Um die Wirkung des reflektierten Schalles auf den Hörer beurteilen zu können, benötigen wir die Laufzeitdifferenz, also den Zeitunterschied zwischen dem Eintreffen des direkten und reflektierten Schalles und den Intensitätsunterschied zwischen beiden als Schallpegeldifferenz.

Die Laufzeitdifferenz können wir aus dem Unterschied der Wege beider Schallanteile und der Schallgeschwindigkeit ausrechnen, es ist:

$$\Delta t = \frac{r' - r}{c_L} \cdot 1000 \text{ in ms}$$

Hierin bedeuten:

Δt = Laufzeitdifferenz in ms (Milli-Sekunden)

r = Weg des direkten Schalles in m

r' = Weg des reflektierten Schalles in m

c_L = Schallgeschwindigkeit in Luft = 340 m/s.

Durch die Einführung der Spiegelbildquelle kann die Wegdifferenz sehr einfach ermittelt werden, sie ist gleich der Differenz der Abstände Hörer - Schallquelle und Hörer - Spiegelbildquelle (Bild 12).

Die Schallpegeldifferenz können wir nicht ohne weiteres ausrechnen, sie hängt nicht nur von den Wegen r und r' beider Schallanteile ab, sondern außerdem von den Strahlungseigenschaften der Schallquelle und dem Schluckgrad der reflektierenden Fläche. Die Strahlungseigenschaften der Schallquellen, mit denen wir es zu tun haben, sind nicht nur von Schallquelle zu Schallquelle verschieden, sie ändern sich bei jeder auch noch mit der Frequenz, und die Schallschluckeigenschaften der Fläche können in weiten Grenzen variieren. Alle diese Einflüsse kann man nicht von vornherein erfassen. Wir schalten sie zunächst ganz aus und nehmen an, daß die Schallquelle den Schall gleichmäßig nach allen Richtungen ausstrahlt und die reflektierende Fläche keine Schallenergie schluckt.

Unter diesen Voraussetzungen ist die Schallpegeldifferenz zwischen dem Direktschall und dem Reflexionsschall ebenso groß wie die zwischen zwei Punkten, deren Abstände von der Schallquelle r und r' betragen. Dafür ist im 4. Kapitel eine Formel angegeben, aus der sich hierfür ergibt:

$$\Delta L = 20 \lg \frac{r'}{r} \text{ dB} = -20 \lg \frac{r}{r'} \text{ dB}$$

Um diesen Betrag ΔL liegt der Pegel des Reflexionsschalles unter dem des Direktschalles.

Wegen der besonderen Bedeutung dieser Zusammenhänge wollen wir ein kleines Beispiel dazu rechnen. In Bild 13 ist eine Saaldecke im Längsschnitt dargestellt, die aus zwei gegeneinander abgewinkelten ebenen Flächenstücken besteht. Für 2 Zuhörerplätze H_1 und H_2 sollen Laufzeit- und Schallpegeldifferenzen zwischen dem Direktschall und dem Reflexionsschall beider Flächenstücke a und b ermittelt werden.

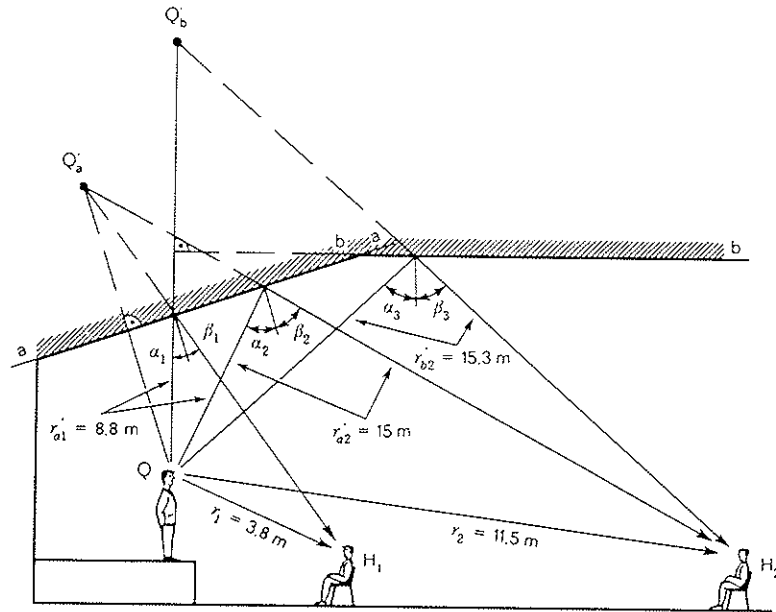


Bild 13. Zur Ermittlung der Laufzeit- und Schallpegeldifferenzen von Schallrückwürfen an ebenen Flächen

Wir konstruieren zuerst die Spiegelbildquellen Q'_a und Q'_b beider Flächen und tragen dann die Wege des direkten und reflektierten Schalles für beide Hörer ein.

Die Längen der Wege des Direktschalles und des Reflexionsschalles der Fläche a zum Hörer H_1 erhalten wir durch Ausmessen:

$$QH_1 = r_1 = 3,8 \text{ m} \quad Q'_a H_1 = r_{a1} = 8,8 \text{ m}.$$

daraus folgt

$$\Delta t_{a1} = \frac{r_{a1} - r_1}{c_L} \cdot 1000 = \frac{5}{340} \cdot 1000 = 14,7 \text{ ms}$$

$$\Delta L_{a1} = -20 \lg \frac{r_{a1}}{r_1} = -20 \lg \frac{8,8}{3,8} = -7,2 \text{ dB}.$$

Für den Hörer H_2 und die gleiche Reflexionsfläche ergibt sich:

$$QH_2 = 11,5 \text{ m} \quad Q'_a H_2 = r_{a2} = 15,0 \text{ m};$$

daraus folgt:

$$\Delta t_{a2} = 10,3 \text{ ms}$$

$$\Delta L_{a2} = -2,0 \text{ dB}.$$

Ebenso verfahren wir, um die entsprechenden Werte für den Reflexionsschall der Fläche b zu ermitteln. Der Leser sollte es selber versuchen, hier die Ergebnisse:

$$\Delta t_{b2} = 11,2 \text{ ms} \quad \Delta L_{b2} = -2,4 \text{ dB}$$

Welchen praktischen Nutzen bringen diese Ergebnisse?

In dem Beispiel liegen alle Laufzeitdifferenzen unter 30 ms, also in einem unkritischen Bereich. Daraus allein können wir schon schließen, daß wir es mit nützlichen Schallrückwürfen zu tun haben, ohne die Schallpegeldifferenzen zu kennen. Diese erhalten erst dann eine Bedeutung, wenn die Laufzeitdifferenzen auf größere Werte ansteigen. Dann kann man mit Hilfe der ausgerechneten Schallpegeldifferenzen und in Verbindung mit dem Diagramm des Bildes 11 entscheiden, ob es sich um nützliche oder schädliche Schallrückwürfe handelt. Hierauf werden wir später noch zurückkommen.

Mit dem, was wir bisher kennengelernt haben, ist der Nutzen, den die Einführung der Spiegelbildquellen bei Reflexionen an ebenen Decken bringt, noch keineswegs erschöpft. Nach der ersten Reflexion trifft ein Schallwellenstrahl sehr bald auf eine nächste Raumbegrenzung, und das ist in einem Raum sehr häufig, wieder eine ebene Fläche. Dabei zeigt sich, daß der Schall an der zweiten Fläche so reflektiert wird, als ob er von einer Schallquelle herkommt, die als Spiegelbildquelle der ersten Schallquelle entsteht (Bild 14).

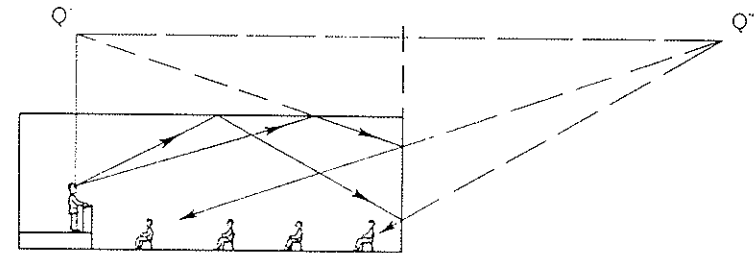


Bild 14. Die zweite Reflexion an einer ebenen Fläche, scheinbar vom Spiegelbild Q'' der ersten Spiegelbildquelle Q' kommend.

Eine Spiegelbildquelle kann also wieder Spiegelbildquellen erzeugen. Sie hat, was diese Eigenschaft angeht, nicht nur einen fiktiven Charakter. Auch der Weg, den ein Schallstrahl nach der zweiten Reflexion von der Schallquelle bis zum Hörer zurückgelegt hat, ist ebenso groß wie der Abstand des Hörers von der zweiten Spiegelbildquelle.

Was für die zweite Reflexion gilt, setzt sich bei den folgenden fort. Übertragen wir diese Zusammenhänge auf Decke und Wände eines Raumes, so erhalten wir, wenn es sich dabei um ebene Flächen handelt, ein anschauliches Bild von der Wirkung, die durch sie entsteht, wenn eine Schallquelle in Tätigkeit tritt.

Durch ein Modell können wir die Vorstellungskraft unterstützen, wenn wir uns an die Stelle der Schallquelle eine Lichtquelle gesetzt und Wände und Decke als ebene Spiegel denken. Die unzähligen Spiegelbilder der Lichtquelle entsprechen den Spiegelbildern der Schallquelle in einem Raum mit gut reflektierenden ebenen Wand- und Deckenflächen.

9. Schallrückwürfe an großen, gekrümmten Raumbegrenzungen

Wir können das Reflexionsgesetz auch bei großen gekrümmten Raumbegrenzungen anwenden, deren Ausdehnungen und Krümmungsradien größer als die Wellenlängen der Schallwellen sind, die auf sie auftreffen.

Von welchem Krümmungsradius an dies Gesetz zu Ergebnissen führt, die von der Wirklichkeit nicht allzusehr abweichen, läßt sich nicht ganz genau festlegen. Wenn wir uns aber auf eine untere Frequenzgrenze von etwa 150 Hz beziehen, zu der eine Wellenlänge von 2,3 m gehört, können wir in der Praxis Abmessungen und einen Krümmungsradius von etwa 3 m als untere Grenze ansehen.

Gekrümmte Raumbegrenzungen, die diese Bedingungen erfüllen, können als Wand- oder Deckenflächen nach außen oder nach innen gewölbt sein.

In vielen Fällen handelt es sich bei den Wölbungen um Zylinder- oder Kugelflächen; wir wollen sie deshalb etwas eingehender behandeln, auch lassen sich anders gekrümmte Flächen meist in guter Annäherung ebenso behandeln.

Beginnen wir damit, die Schallreflexionen an einer nach außen gewölbten Zylinderfläche zu untersuchen, wie sie z. B. als Saalrückwand vorkommt (Bild 15).

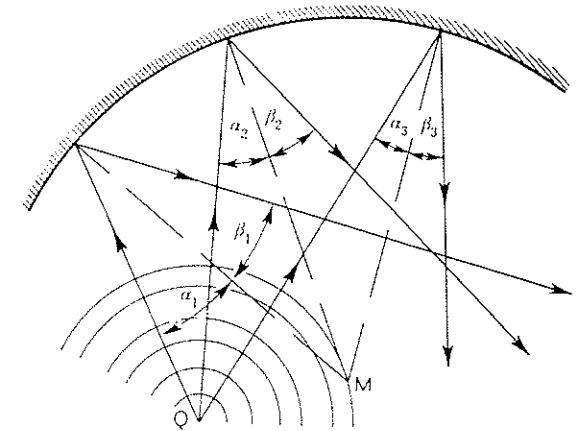


Bild 15.
Konstruktion der Schallrückwürfe an einer großen, nach außen gewölbten Raumbegrenzung mit kreisförmigem Schnitt

Um die Richtungen der reflektierten Schallstrahlen zu erhalten, müßten wir die Flächensenkrechte im Auftreffpunkt eines Schallstrahles als Senkrechte zur Tangentialfläche konstruieren. Bei jeder kreisförmigen Begrenzung stimmt diese aber mit der Verbindungsgeraden des Punktes zum Kreismittelpunkt überein. Damit können wir für jeden Flächenpunkt zu einem einfallenden Strahl den reflektierten Strahl angeben.

Nach dieser Methode sind in Bild 15 mehrere reflektierte Schallstrahlen konstruiert. Wie man sieht, wird das auseinander laufende Strahlenbündel, das von der Schallquelle kommt, durch die Reflexion so gebündelt, daß sich die reflektierten Strahlen fast in einem Punkt schneiden.

Infolge der Schallkonzentration wächst die Intensität des Reflexionsschalles in der Umgebung des Schnittpunktes stark an; sie kann in einer Zone um den Schnittpunkt herum die Intensität des Direktschalles erreichen und übersteigen. Dies bedeutet aber, wenn diese Zone in einem Bereich von Zuhörerplätzen liegt, in der die Laufzeitdifferenzen zwischen Direktschall und Reflexionsschall über 30 ms hinausgehen, werden die Zuhörer erheblich gestört.

In Bild 16 sind die Schnittpunkte des Reflexionsschalles für verschieden große Krümmungsradien konstruiert worden. Sie liegen, wie aus diesem Bild zu erkennen ist, zwischen dem Scheitel S der Wölbung

und dem Krümmungsmittelpunkt M , solange der Krümmungsradius den Abstand zwischen Schallquelle und Scheitel nicht übersteigt.

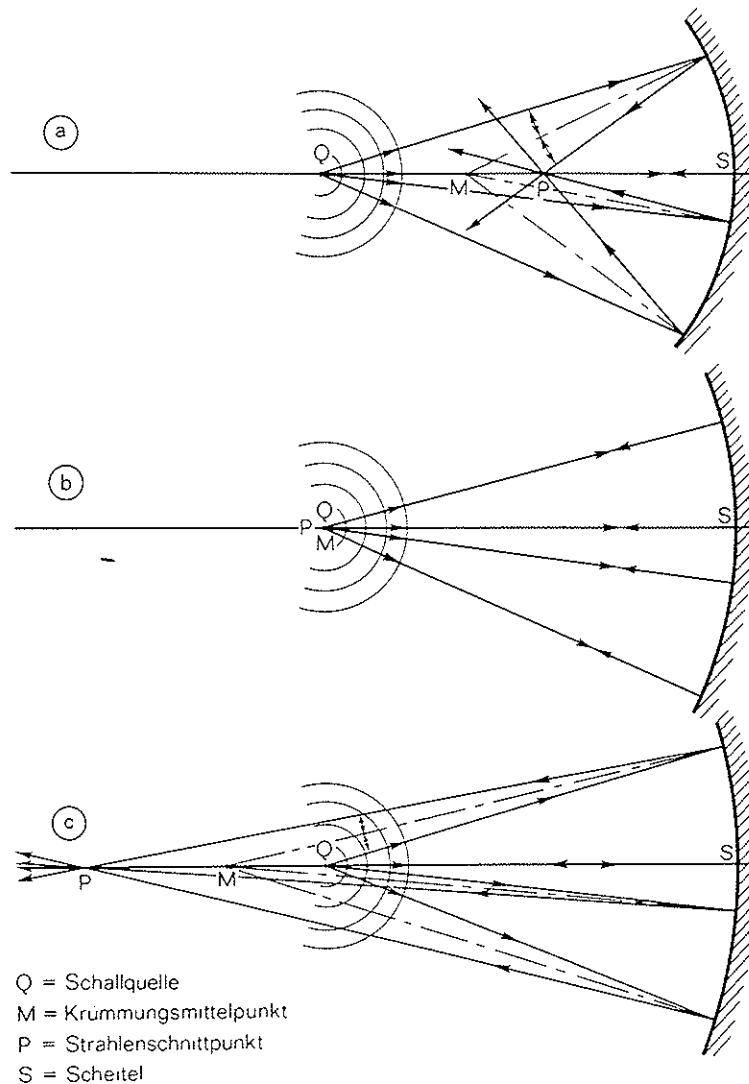


Bild 16. Schallkonzentration bei einer nach außen gewölbten Saalrückwand, bei verschiedenen Krümmungsradien

Bei einer zylinderförmig gekrümmten Saalrückwand, deren Krümmungsradius in diesen Bereich fällt, muß mit einer Störung derjenigen Zuhö-

rer gerechnet werden, die auf den Plätzen in der Nähe des Schnittpunktes sitzen. Der Bereich braucht nicht genauer abgegrenzt zu werden, denn die Störung erfaßt immer mehrere Zuhörerplätze und muß deshalb beseitigt werden.

Zu diesem Zweck wird die Reflexionsfläche mit Schallschluckmaterial ausgekleidet. Dazu muß ein Schluckmaterial verwendet werden, das sehr gute Schallschluckeigenschaften besitzt, damit die Intensität des Reflexionsschalles genügend stark herabgesetzt wird. Im Gebiet mittlerer und höherer Frequenzen muß der Wert des Schluckgrades α bei 1 liegen, erst unterhalb etwa 200 Hz können die Werte abfallen.

Der Reflexionsschall stört auch dann noch, wenn der Krümmungsmittelpunkt mit der Schallquelle zusammenfällt oder in geringem Abstand hinter ihr liegt. Dann werden die ersten Platzreihen und vor allem die Person oder die Personen gestört, die den Schall erzeugen und die Störung mindestens ebenso empfinden wie die Zuhörer.

Erst wenn der Krümmungsradius im Verhältnis zum Abstand Schallquelle - Scheitel der Wölbung genügend groß geworden ist, nähert sich die gekrümmte Wand in ihrer Wirkung einer ebenen. Das beginnt etwa dann, wenn der Krümmungsradius den doppelten Abstand zwischen Schallquelle und dem Scheitel der Wölbung übersteigt.

Nach außen gewölbte Raumbegrenzungen gibt es nicht nur als Rückwand hinter den Zuhörerreihen, sondern auch als Saaldecken. Am häufigsten findet man sie als zylinderförmig gewölbte Decke mit einer Zylinderachse in Längsrichtung des Saales und als kugelförmig gewölbte Decke, meist als Kuppel ausgebildet.

Die nach außen gewölbten Decken bündeln ebenfalls die von der Schallquelle kommenden Schallwellen, so daß sich die Strahlen nach der Reflexion schneiden. Bei der zylinderförmigen Decke liegen Schnittpunkte hintereinander auf einer Geraden, bei der kugelförmigen konzentrieren sie sich fast um einen Punkt im Raum. Wie diese Bündelung entsteht, zeigt Bild 17, bei dem die Schallstrahlen als Projektionen auf einen Saalquerschnitt dargestellt sind.

In der Umgebung der Strahlenschnittpunkte besteht wieder die Gefahr, daß der Reflexionsschall stört, wenn die Laufzeitdifferenz zum Direkt-schall entsprechend groß ist. Will man solche Störungen vermeiden, muß entweder der Strahlenschnittpunkt genügend hoch über den Köpfen der Zuhörer liegen, oder ein scheinbarer Schnittpunkt genügend tief unter ihnen, denn mit der Entfernung vom Strahlenschnittpunkt nimmt die Intensität des Reflexionsschalles ab.

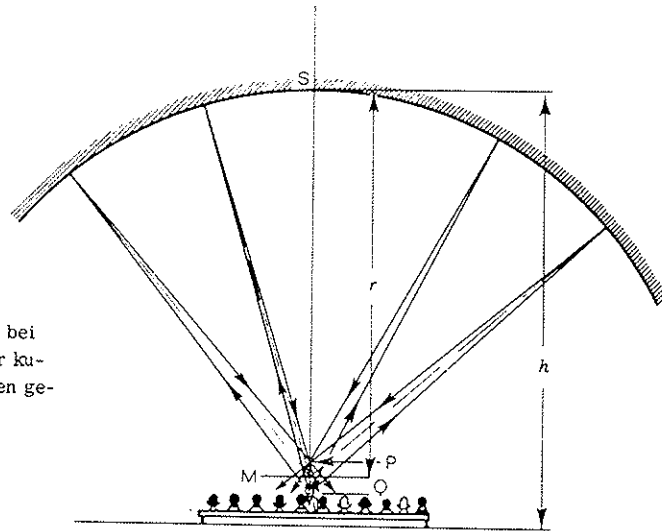


Bild 17.
Schallkonzentration bei
zylinderförmig oder ku-
gelförmig nach außen ge-
wölbter Decke

Schneiden sich die Schallstrahlen in der Nähe der Zuhörerköpfe, kann eine Störung durch den Reflexionsschall nur verhindert werden, wenn seine Intensität durch Schallschluckung bei der Reflexion so stark geschwächt wird, daß sie unter die Störgrenze sinkt.

Bei welchen Decken liegt nun der Strahlenschnittpunkt genügend hoch oder genügend tief, so daß die Intensität des Reflexionsschalles durch die Schallkonzentration nicht mehr oder noch nicht nennenswert erhöht wird?

Für den ersten Fall können wir als Regel festhalten, daß sich die Strahlen dann genügend hoch über den Köpfen der Zuhörer schneiden, wenn der Krümmungsmittelpunkt der Deckenwölbung um die Hälfte der Scheitelhöhe h und mehr über dem Boden des Saales liegt (Bild 17). Dabei ist vorausgesetzt, daß die Standorte von Schallquelle und Zuhörern nicht besonders über den Boden des Saales hinausgehoben sind.

Im zweiten Fall sollte der Krümmungsmittelpunkt der Deckenwölbung ebenso weit unter dem Saalboden liegen als die Scheitelhöhe h der Deckenwölbung über dem Saalboden beträgt.

Bei Anwendung dieser beiden Regeln müssen wir jedoch bedenken, daß der Reflexionsschall, den die Zuhörer aufnehmen, nur auf etwa die gleiche Intensität gesunken ist als wenn er von einer ebenen Decke in der Höhe h des Scheitels reflektiert würde. Sehr hohe glatte Decken müssen gegebenenfalls trotzdem mit Schallschluckmaterial ausgeklei-

det werden, weil mit großen Deckenhöhen auch große Laufzeitdifferenzen zwischen Direktschall und Reflexionsschall verbunden sind und die Intensität des Reflexionsschalles aus diesem Grunde herabgesetzt werden muß.

Wie wir gesehen haben, ist mit allen nach außen gewölbten Begrenzungsflächen die Gefahr brennpunktähnlicher Schallkonzentrationen verbunden. So könnten wir dies Thema mit dem Ratschlag beschließen, nach außen gewölbte glatte Decken und Wände nur dann zu verwenden, wenn es sich aus anderen Gründen nicht vermeiden läßt. In diesem Zusammenhang aber wird immer noch ein Gedanke vorgebracht, auf den wir kurz eingehen müssen.

Die Begrenzungsfläche hinter und über der Schallquelle könnte doch als großer Parabolspiegel angelegt werden. Mit der Schallquelle im Brennpunkt würde dann der Schall so günstig wie auf keine andere Weise in den Zuschauerraum reflektiert werden. So gut dieser Gedanke auf den ersten Blick zu sein scheint, seine Ausführung bringt so große Nachteile mit sich, daß er keine praktische Bedeutung erlangt hat.

Die Nachteile erklären sich daraus, daß sich eine einzelne Person als Schallquelle nicht im Brennpunkt fixieren läßt und die Musiker eines Orchesters nicht darauf konzentrieren werden können. Die Folge davon ist, daß die Intensität des Reflexionsschalles im Zuschauerraum sehr stark schwankt. Das ist aber nicht der einzige Fehler dieser Anordnung, die Schallwellen der Geräusche, die die Zuhörer erzeugen, werden durch die parabolförmige Fläche im Bereich der Schallquelle so konzentriert, daß Sprecher oder Musiker dadurch sehr gestört werden können.

Größere, nach innen gewölbte Wand- oder Deckenflächen kommen in der Praxis seltener vor, obgleich sie den Schall in einem für die Raumakustik günstigen Sinne reflektieren. Der Öffnungswinkel eines einfallenden Strahlenbündels wird durch die Reflexion vergrößert, infolgedessen verteilt sich die Schallenergie auf einen größeren Raum, und das bedeutet, daß dadurch die Intensität des Reflexionsschalles geschwächt wird. Er kann deshalb bei größeren Laufzeitdifferenzen nicht so leicht stören, als wenn die reflektierende Fläche eben oder nach außen gewölbt ist.

In Bild 18 ist am Beispiel einer zylinder- oder kugelförmig nach innen gewölbten Fläche dargestellt, wie ihre schallzerstreuende Wirkung zustande kommt. Die Strahlen des reflektierten Schalles erhält man auch hier durch konsequente Anwendung des Reflexionsgesetzes.

Bild 18.
Schallzerstreuende Wirkung
einer nach innen gewölbten
Wand- oder Deckenfläche

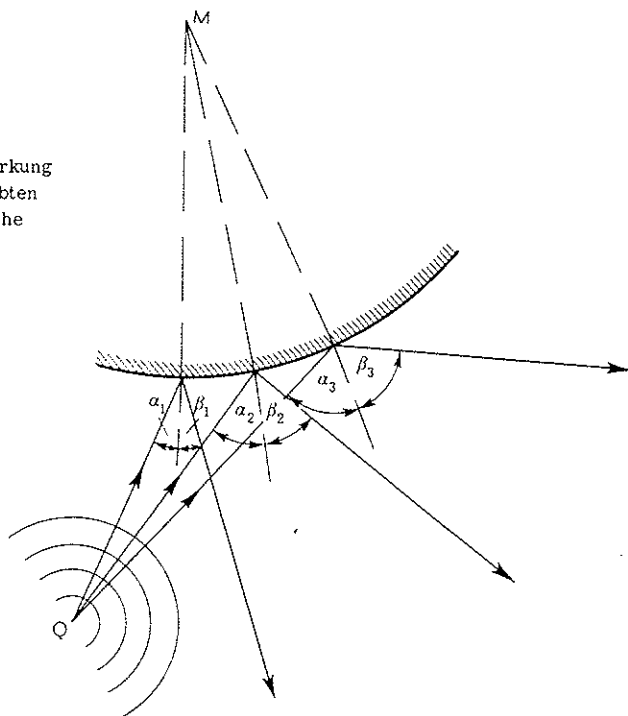
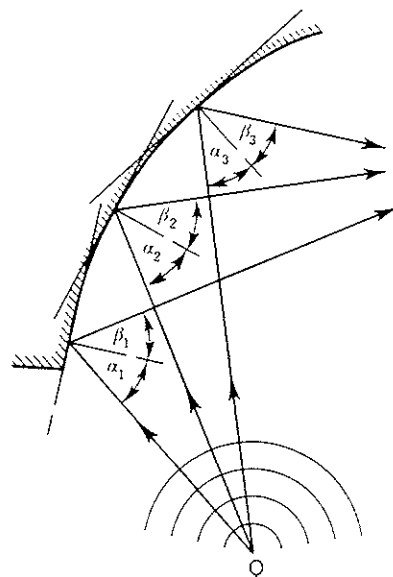


Bild 19.
Konstruktion der Schallreflexion an ge-
krümmten Flächen mit nicht-kreisförmig-
em Schnitt



Da alle nach innen gewölbte Wand- oder Deckenflächen die Gefahr störender Schallrückwürfe mildern, sollte der Architekt sie als Gestaltungsmöglichkeit stärker berücksichtigen als es bisher geschehen ist.

In allen Beispielen haben wir die Strahlen des Reflexionsschalles an kreisförmigen Begrenzungslinien konstruiert. Bei gewölbten Flächen mit anderen Schnittkurven können wir genau so verfahren, nur ist die Flächensenkrechte nicht so einfach zu finden. In solchen Fällen empfiehlt es sich, erst die Tangente im Auftreffpunkt zu konstruieren und darauf dann die Senkrechte zu errichten (Bild 19).

10. Der Einfluß der Abmessungen einer Reflexionsfläche auf die Eigenschaften des zurückgeworfenen Schalles

Bei den Schallrückwürfen, die wir bisher untersucht haben, sind wir davon ausgegangen, daß sie durch Reflexion an den Raumbegrenzungen entstehen. Das Reflexionsgesetz aber beschreibt das Zustandekommen eines Schallrückwurfes keinesfalls für jede Art von Raumbegrenzung. Die Abweichungen werden um so größer, je kleiner die Raumbegrenzungen sind, genauer gesagt, ihre Abmessungen in die Nähe der Schallwellenlängen rücken, ebenso groß als diese oder kleiner sind.

In den beiden vorhergehenden Kapiteln haben wir vorausgesetzt, daß die Ausdehnungen der Raumbegrenzungen groß gegen die Wellenlängen der Schallwellen sind. Wir brauchen uns aber nur daran zu erinnern, daß Schallwellenlängen beachtliche Größen erreichen können, dann wird sofort klar, daß diese Voraussetzung häufig nicht erfüllt ist.

Die Schallwellenlänge ist der Frequenz eines Tones umgekehrt proportional zugeordnet, und je tiefer ein Ton ist, um so größer ist seine Wellenlänge. Zu dem tiefsten noch hörbaren Ton von 16 Hz gehört eine Wellenlänge von fast 22 m. Zwar kommen so tiefe Töne nur selten vor, aber auch Töne im Frequenzbereich um 100 Hz, die schon viel häufiger auftreten, breiten sich durch Wellenlängen in der Größenordnung von immerhin 3,5 m aus. Zu dem Kammerton a' , der mit einer Frequenz von 440 Hz in der Tonhöhereinstufung der Musik etwa in der Mitte zwischen tiefen und hohen Tönen liegt, gehört noch eine Wellenlänge von 0,77 m. In den meisten Räumen sind es nur Wände, Decke und Fußboden, deren Abmessungen diese Werte erreichen und überschreiten. Erst bei einer

Frequenz von 1000 Hz, in der Musik ein sehr hoher Ton, ist mit einer Wellenlänge von 0,34 m ein Gebiet erreicht, in der die Abmessungen vieler anderer Raumbegrenzungen in gleicher Größenordnung liegen oder größer sind.

Bei Tönen mit Frequenzen über 1000 Hz, die bei Musik und Sprache hauptsächlich als Obertöne die Klangfarbe hervorbringen, setzt sich diese Tendenz fort; ein 15000 Hz-Ton hat nur noch eine Wellenlänge von etwa 2,2 cm.

Dieser Überblick zeigt, daß das Verhältnis von Schallwellenlängen zu den Abmessungen von Raumbegrenzungen sehr verschiedenartig ausfallen kann. Besonders verwickelt werden die Verhältnisse dadurch, daß die Abmessungen ein- und derselben Raumbegrenzung für Töne niedriger Frequenzen klein sein können, für Töne hoher Frequenzen dagegen groß. Welche Folgen damit verbunden sind, können wir uns leicht klar machen.

Der Schall einer natürlichen Schallquelle breitet sich, entsprechend seiner Teiltonzusammensetzung, durch ein Gemisch von Wellenlängen sehr verschiedener Größe aus. Werden die Teiltöne durch eine kleine Reflexionsfläche je nach ihrer Wellenlänge verschiedenartig zurückgeworfen, so ändert sich insgesamt der Klangcharakter des zurückgeworfenen Schalles gegenüber dem einfallenden Schall, d. h. der direkte Schall kann nur mehr oder weniger unvollkommen verstärkt werden.

Solange wir das Reflexionsgesetz anwenden können, wird der Schall von den Raumbegrenzungen ebenso zurückgeworfen, wie wenn sie als Spiegel das Licht zurückwerfen würden. Wie aber werden Schallwellen abgelenkt, deren Wellenlängen nicht mehr klein gegen die Abmessungen der Raumbegrenzung sind?

Obwohl diese Voraussetzung in der Praxis sehr häufig erfüllt ist, sind die Veränderungen der Schallwellen nach dem Auftreffen im allgemeinen so verwickelt, daß man sie nicht durch einfache Gesetze erfassen kann. Auch die Physiker beherrschen exakt nur einige einfach gelagerte Fälle mit großem mathematischen Aufwand.

Wenn es nicht gelingt, eine allgemeine theoretische Lösung dieses Problems anzugeben, so bleibt immer noch der Weg des Experimentes offen. Dafür gibt es auch hier Möglichkeiten. Den geringsten Aufwand für diesen Zweck erfordern Versuche mit Wasserwellen in einer Wellenwanne, in der das Verhalten der Wasserwellen nach dem Auftreffen auf Schnittmodelle von Raumbegrenzungen beobachtet wird, die in das Wasser hineingesetzt sind.

Bei einer Wassertiefe von 1 cm entstehen Wasserwellen mit einer Wellenlänge von etwa 2 cm, wenn man zur Erregung der Wellen Wassertropfen ins Wasser fallen läßt. Danach kann die Größe des Schnittmodells bestimmt werden, das in gleichem Verhältnis zur Wellenlänge des Wassers stehen muß, als die Raumbegrenzung selbst zur Wellenlänge des Luftschalles, bei der man das Verhalten der Schallwellen wissen möchte. Ein Modell erlaubt also nur, das Verhalten der Wellen für ein bestimmtes Verhältnis von Wellenlänge zur Größe der Raumbegrenzung zu beobachten. Will man es bei mehreren Verhältnissen studieren, muß man dementsprechend mehrere Modelle verschiedener Größe anfertigen.

Die Analogie zwischen dem Verhalten der Wasserwellen und dem der Schallwellen ist insofern unvollkommen, als die Wasserwellen sich nur in einer Ebene ausbreiten, die Schallwellen dagegen im Raum. Trotzdem läßt das Verhalten der Wasserwellen in sehr vielen Fällen und mit einiger Übung die für die Raumakustik wesentlichen Erscheinungen recht gut erkennen. Zwar gibt es auch noch andere Verfahren, die jedoch sehr viel aufwendiger sind und auf die wir deshalb nicht eingehen wollen.

Wenn es auch keine einfachen Gesetze gibt, die das Verhalten von Schallwellen beschreiben, wenn sie auf relativ kleine Raumbegrenzungen auftreffen, so lassen sich doch die wesentlichen Erscheinungen wenigstens grob skizzieren. Daraus erhalten wir schon verschiedene Hinweise für Anwendungen in der Raumakustik.

Wenn ein Schallereignis auf eine ebene Fläche auftrifft, deren Länge und Breite nicht mehr groß gegen alle darin enthaltenen Schallwellenlängen sind, so wird nur der Schallanteil vollständig nach dem Reflexionsgesetz abgelenkt, dessen Wellenlängen kleiner als Länge und Breite der Fläche sind. Bei dem Schallanteil mit Wellenlängen in der Größenordnung dieser Abmessungen wird der Reflexionsschall schwächer, weil ein Teil dieser Schallwellen die Fläche gewissermaßen umgeht und sich hinter ihr weiter ausbreitet. Diese Erscheinung nennt man Beugung. Mit zunehmender Wellenlänge verstärkt sich diese Tendenz, und wenn Länge oder Breite der Fläche klein gegen die Schallwellenlänge geworden sind, wird praktisch kein Schall mehr reflektiert, die Schallwellen setzen ihre Ausbreitung nahezu ungestört hinter der Fläche fort (Bild 20).

Für die Praxis können wir daraus als Regel ableiten, daß eine Fläche, die den Schall natürlicher Schallquellen reflektieren soll, genügend breit und lang sein muß, damit sie ihren Zweck ausreichend erfüllt. Die Min-

destgröße von Länge und Breite hängt von der größten Schallwellenlänge ab, die noch gut reflektiert werden soll. Welche größte Schallwellenlänge aber soll man zu Grunde legen?

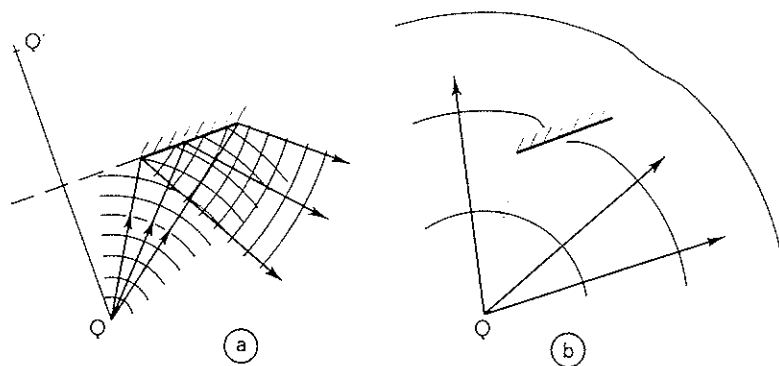


Bild 20. Schallwellen beim Auftreffen auf eine kleine Reflexionsfläche,
a) Schallanteile mit kurzen Wellenlängen, d.h. hohen Frequenzen, werden reflektiert,
b) Schallanteile mit großen Wellenlängen, also tiefen Frequenzen, werden gebeugt

Die größte Wellenlänge des Hörschalles beträgt fast 22 m, und dieses Maß übersteigt schon die Abmessungen der Wände und der Decke vieler kleinerer Säle. Davon können wir also nicht ausgehen. Aber Wellenlängen in dieser Größenordnung kommen nicht nur selten vor, bei so großen Wellenlängen kann die Intensität der direkten Schallwelle durch umgelenkte Schallanteile auch kaum beeinflusst werden. Es bilden sich vielmehr durch Reflexion an den Wänden, an Decke und Fußboden eines Saales sogenannte stehende Wellen, d.h. es gibt in einem Saal Standorte, wo man Teiltöne mit so tiefen Frequenzen gut hören kann, und andere, wo man sie kaum oder gar nicht hört.

Um einen Anhaltspunkt für die größte Wellenlänge zu finden, bei der Direktschall durch Reflexionsschall verstärkt werden soll und kann, gehen wir besser davon aus, ob es sich bei dem Schall vorwiegend um Musik oder um Sprache handelt.

Der Direktschall von Sprache wird durch Reflexionsschall ausreichend verstärkt, wenn die Reflexionsfläche die Schallanteile oberhalb 200 Hz reflektiert. Zu dieser Frequenz gehört eine Wellenlänge von 1,70 m. Da-

mit die Fläche bei dieser Frequenz genügend Schallenergie reflektiert, müssen ihre Länge und Breite größer als diese Wellenlänge sein, als untere Grenze können wir etwa 3 m ansehen.

Die Musik enthält in der Regel mehr und stärkere Teiltöne mit niedrigen Frequenzen als die Sprache, deshalb müssen die Mindestabmessungen einer reflektierenden Fläche auch größer sein als die für Sprache. Als untere Grenze für Länge und Breite können dafür etwa 4 bis 5 m gelten.

11. Schallrückwürfe an großen, aber tiefgegliederten Oberflächen, Schalldiffusität

Nicht nur die Größe einer Raumbegrenzung, sondern auch die Beschaffenheit ihrer Oberfläche kann die Eigenschaften der Schallrückwürfe beeinflussen. So kann sie durch Schallschluckung der einfallenden Schallwelle einen mehr oder weniger großen Teil der Energie entziehen und dadurch den zurückgeworfenen Schallanteil schwächen. Hierauf wollen wir an dieser Stelle nicht eingehen, wir wollen hier vielmehr die Wirkung von Oberflächen behandeln, die durch vor- und zurückspringende Flächenteile eine unregelmäßige Oberfläche erhalten haben.

Vom Licht wissen wir, daß eine Oberfläche sehr glatt sein muß, wenn sie als Spiegel das Licht zurückwerfen soll. Schon durch geringe Unebenheiten einer Oberfläche wird ein einfallendes Lichtbündel nicht in eine einzige Richtung, sondern in viele andere Richtungen umgelenkt. Man spricht dann von diffuser Reflexion. Fast alle natürlichen Oberflächen reflektieren das Licht diffus; um die glatten Oberflächen von Spiegeln herzustellen, müssen besondere Techniken angewandt werden.

Nun wird kein Architekt auf den Gedanken kommen, die Wirkung der Lichtquellen in einem Saal dadurch zu unterstützen, daß er die Wandoberflächen mit Spiegeln bedecken läßt. Spiegelnde Wandoberflächen werden - wie in einem Spiegelsaal - nur angebracht, um besondere Effekte zu erzielen. Um das Licht, das die Lichtquellen ausstrahlen, möglichst gut auszunutzen, müssen die Wandoberflächen zwar möglichst hell gehalten werden, was bedeutet, daß sie das einfallende Licht gut reflektieren, aber sie sollen es diffus reflektieren. Nur dadurch erhält der Raum eine annähernd gleichmäßig verteilte Helligkeit.

Erst in den letzten Jahren ist klar geworden, daß auch die Schallenergie möglichst gleichmäßig in einem Saal verteilt werden sollte. Die Durchsichtigkeit und Klarheit des Klangbildes wird davon wesentlich mitbestimmt. Aber Oberflächen mit kleinen Unebenheiten, die das Licht diffus reflektieren, werfen den einfallenden Schall wie eine glatte Spiegelfläche zurück. Das hängt wieder mit den relativ großen Wellenlängen der Schallwellen zusammen. Eine Oberfläche wirft die einfallenden Schallwellen erst dann diffus zurück, wenn sich Länge, Breite und Tiefe der vor- und zurückspringenden Flächenteile in der Größenordnung der Schallwellenlängen bewegen. Hierdurch erklärt sich, daß eine Oberfläche mit kleinen Unebenheiten für Schallwellen wie eine glatte Fläche wirkt.

Damit eine Oberfläche, etwa die Wand eines Saales, auftreffende Schallwellen diffus zurückwirft, müssen die Dimensionen der Unebenheiten in der Größenordnung von mehreren Dezimetern liegen. Je größer und tiefer die Unebenheiten sind, um so weiter reicht die Diffusität in das Gebiet größerer Schallwellenlängen.

Ältere Säle haben, oft unbeabsichtigt, eine gute Diffusität dadurch erhalten, daß Saalwände und Decken durch ornamentale Verzierungen und Figuren aufgelöst wurden. Von diesen Möglichkeiten kann der Architekt von heute kaum Gebrauch machen, so daß man nach anderen Wegen suchen muß. In Bild 21 sind einige Beispiele angegeben, wie diffus zurückwerfende Oberflächen geschaffen werden können. Die Einsicht aber, daß nicht nur das Licht, sondern auch die Schallwellen möglichst diffus von Wänden und Decke zurückgeworfen werden sollten, ist noch nicht so sehr verbreitet, als daß man viele praktische Ausführungsbeispiele anführen könnte. Solche finden sich bis jetzt fast nur in Funkhäusern; Bild 22 zeigt den großen Sendesaal des Funkhauses Hannover.

Bis zu einem gewissen Grade diffus wirkende Oberflächen kann man auch dadurch schaffen, daß den Schall gut zurückwerfende Flächenteile mit solchen wechseln, die den Schall stark schlucken. Die schallschluckenden Flächenteile wirken für den Schall fast so wie zurückspringende Flächenstücke. Von dieser Möglichkeit kann man aber nur in begrenztem Umfang Gebrauch machen, denn die schallschluckenden Flächenteile entziehen dem einfallenden Schall Energie; dadurch kann nicht nur die Intensität nützlicher Schallrückwürfe geschwächt, auch der Nachhall kann, wie wir noch sehen werden, in ungünstigem Sinne beeinflusst werden.

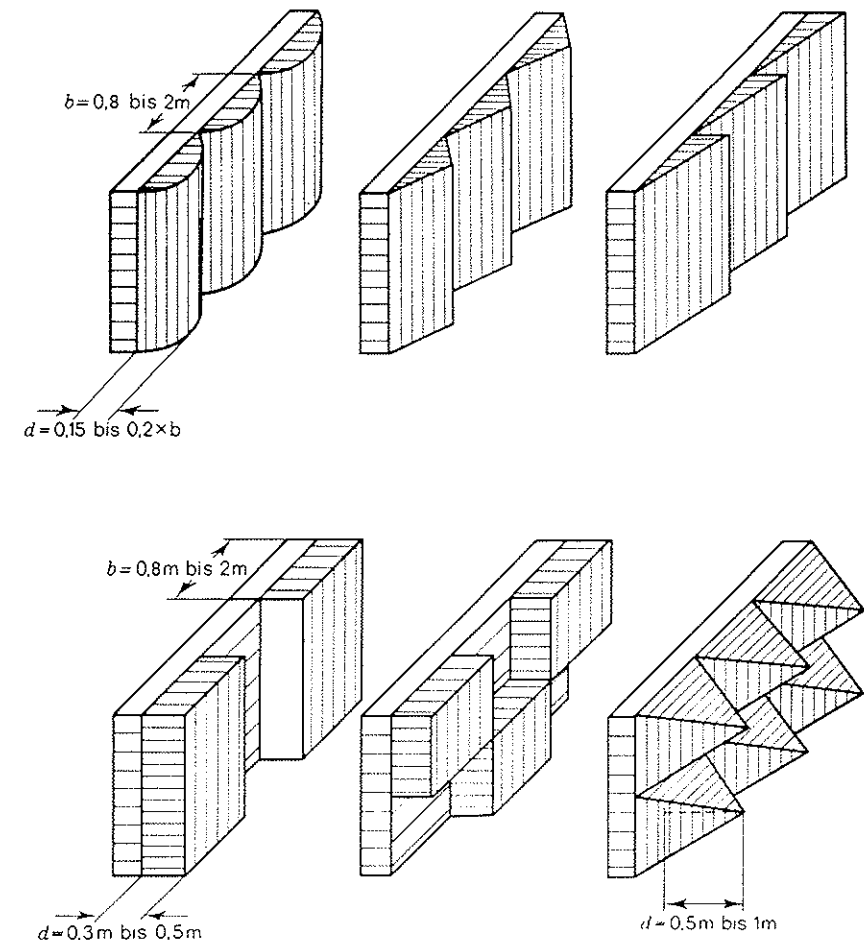


Bild 21. Beispiele für diffus reflektierende Oberflächen. Die verschiedenen Oberflächenformen können auch miteinander wechseln

Diffuse Schallrückwürfe, wodurch sie auch erzeugt werden, verbessern nicht nur die Klangwirkung der natürlichen Schallquellen in einem Raum. Durch die stärkere Streuung der Schallenergie wird die Störwirkung von Schallrückwürfen mit größeren Laufzeitdifferenzen herabgesetzt, in vielen Fällen so weit, daß sie nicht mehr stören. Das gilt sowohl für Schallrückwürfe von aufgelösten ebenen wie gewölbten Wand- oder Deckenflächen. Das beste Beispiel hierfür liefern die älteren Theater und Opernhäuser mit hufeisenförmigem Grundriß. Die Rückwand dieser Sä-

le ist nach außen stark gewölbt, so daß störende Schallrückwürfe zu erwarten wären. Doch ihre Oberfläche wird durch die nebeneinander und übereinander liegenden Logen so weitgehend aufgelöst, daß der einfallende Schall diffus zurückgeworfen wird und sein Intensität unter die Störgrenze sinkt.

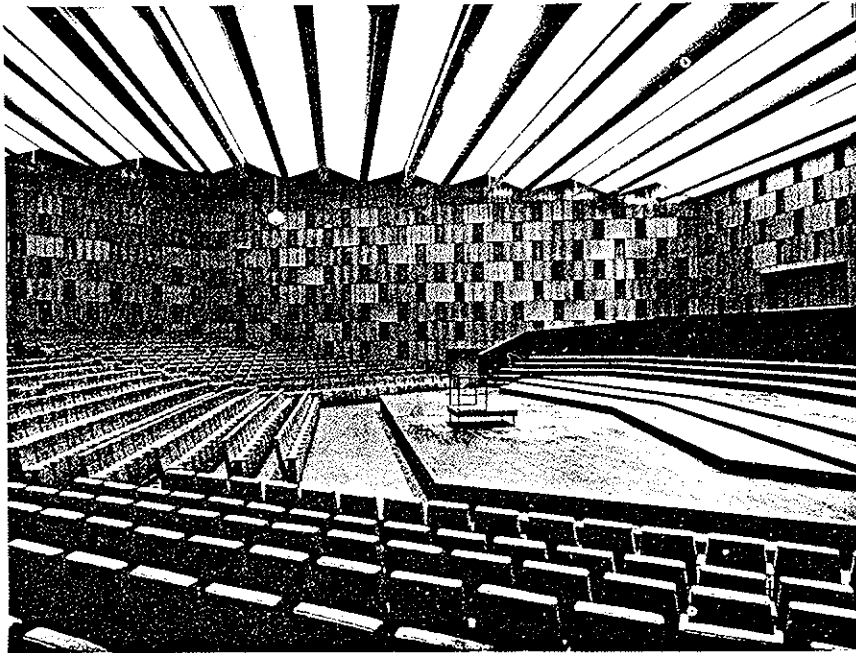


Bild 22. Großer Sendesaal des Funkhauses Hannover mit diffus reflektierenden Wandflächen (Architekten: Prof. Kraemer, Dipl.Ing. Lichtenhahn, Prof. Oesterlen) (Foto: Heidersberger)

Auf das Verhalten der Schallwellen beim Auftreffen auf andere Arten von Raumbegrenzungen wollen wir nicht weiter eingehen. Sehr oft lassen sich die Erscheinungen, die wir hier behandelt haben, mit ausreichender Näherung auf andere ähnlich liegende Fälle übertragen. Ist dies nicht möglich, muß man, falls es notwendig erscheint, das Verhalten der Schallwellen durch Modellversuche etwa an Wasserwellen ermitteln.

12. Gestaltung von Wand- und Deckenflächen zur Lenkung der ersten Schallrückwürfe in Räumen mit rechteckigem Grund- und Aufriß

Wir haben gesehen, daß die ersten Schallrückwürfe ausgenutzt werden müssen, um die rasch abnehmende Intensität des Direktschalles für die mittleren und hinteren Sitzreihen zu verstärken. Wie kann diese Aufgabe in der Praxis am besten gelöst werden, d.h. wie können Raumbegrenzungen angeordnet und ihre Größe, Form und Oberfläche beschaffen sein, damit die Zuhörer erste Schallrückwürfe mit großen Intensitäten bei kurzen Laufzeitdifferenzen erhalten?

Wir wollen dies zuerst am einfachsten Beispiel zeigen, ein Fall, der in der Praxis zudem auch am häufigsten vorkommt: bei dem Raum mit rechteckigem Grund-, Längs- und Aufriß. Schallquelle und Zuhörer sind darin in der Regel so platziert, wie es das Bild 23 zeigt. Wir wollen davon ausgehen, daß zur Lenkung der ersten Schallrückwürfe keine, eigens diesem Zweck dienenden, Flächenelemente eingebaut werden können, so daß nur Wände und Decke dafür in Frage kommen.

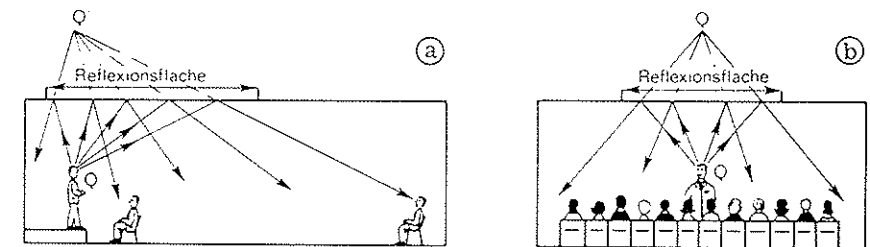


Bild 23. Die Decke als Reflexionsfläche

Prüfen wir die Decke und die vier Wände auf ihre Brauchbarkeit für die Lenkung der ersten Schallrückwürfe, so zeichnet sich die Decke im Normalfall durch besondere Vorzüge gegenüber den Wänden aus:

1. Sie hat meist die größte Flächenausdehnung, ihre Reflexionswirkung reicht deshalb am weitesten in das Gebiet tiefer Teiltöne.

2. Der von ihr reflektierte Schall entstammt einem Sektor, in dem die meisten natürlichen Schallquellen die Schallenergie mit großer Intensität ausstrahlen.
3. Die Laufzeitdifferenzen erreichen keine großen Werte, falls die Decke nicht sehr hoch ist.
4. Der von ihr reflektierte Schall fällt, falls die Decke nicht sehr niedrig ist, unter einem so großen Neigungswinkel gegen die Horizontale ein, daß seine Intensität nicht durch Zuhörerabsorption geschwächt wird.

Keine der vier Wände hat vergleichbare Vorteile aufzuweisen, damit gewinnen wir die besonders wichtige Regel:

- ⋮ Zur Lenkung der ersten Schallrückwürfe ist im Normal-
- ⋮ fall keine Raumbegrenzung besser geeignet als die Decke!

Gegen die Anwendung dieser Regel wird leider sehr häufig verstoßen, immer wieder findet man Decken in Klassenräumen und Sälen, die mehr oder weniger vollständig mit Schallschluckelementen bedeckt sind und die dadurch ihre Reflexionsfähigkeit größtenteils eingebüßt haben.

In einem solchen Saal kommen meist schon nach den ersten Veranstaltungen die Klagen, daß ein Sprecher spätestens von Saalmitte an kaum noch zu verstehen ist, selbst wenn er laut spricht. Um diesem Übelstand abzuhelpen, wird alsbald eine Lautsprecheranlage mit Lautsprechern in der Mitte und im hinteren Teil des Saales installiert. Die Hörer in diesen Bereichen hören den Sprecher dann nur noch im Lautsprecher. Damit geht der Kontakt zwischen Sprecher und Hörer vollkommen verloren. Solche Fälle zeigen besonders eindrucksvoll, welche Bedeutung der Deckenreflexion zukommt.

Der von der Schallquelle ausgehende Schallanteil, der die Decke erreicht, wird nur zu einem Teil in den Bereich des Saales reflektiert, den die Zuhörer einnehmen. Dies zeigen die Bilder 23a und b, in der die ersten Deckenreflexionen als Projektionen auf den Längsschnitt und den Querschnitt eines Saales dargestellt sind. Dieser Teil darf auf keinen Fall mit schallschluckenden Elementen bedeckt werden, es sei denn, die Decke ist sehr hoch, so daß der Reflexionsschall infolge zu großer Laufzeitdifferenzen stört. Bei welcher Deckenhöhe eine solche Gefährdung besteht, werden wir noch untersuchen, bei Deckenhöhen unter 12 m ist aber kaum damit zu rechnen.

Ein weiterer Teil der Decke lenkt den Reflexionsschall in den Bereich des Saales, der von der Schallquelle eingenommen wird. Nun könnte man meinen, daß die Schallquelle selbst keine zusätzliche Schallverstär-

kung durch Reflexionsschall benötigt. Aber von Ausnahmefällen abgesehen wird das, was wir der Kürze halber immer Schallquelle nennen, unmittelbar von Menschen in Tätigkeit gesetzt.

Schon ein einzelner Sprecher verspürt einen deutlichen Unterschied, ob sein Gehör die eigenen Sprachlaute mit stärkerem oder schwächerem Reflexionsschall aufnimmt. Bei fehlendem oder schwachem Reflexionsschall wird die eigene Stimme fast nur durch Knochenleitung auf das Gehör übertragen, sie wirkt dann trocken, dürr und unnatürlich leise. Unbewußt versucht der Sprecher der Stimme durch lauterer Sprechen einen volleren Klang zu geben, dadurch wird aber sein Klangeindruck nicht wesentlich verbessert. Er hat das Gefühl, als ob sein Stimmvolumen eingeengt ist, und unter solchen Voraussetzungen strengt das Sprechen schon nach kurzer Zeit sehr an.

Anders dagegen, wenn die eigene Stimme auch über genügend nützlichen Reflexionsschall an das Gehör dringt. Wer die Möglichkeit hat zu vergleichen, merkt erst, wie das Sprechen dann spürbar leichter fällt. Der Sprecher kann sich dadurch mehr auf den Inhalt seiner Worte konzentrieren und mit seinen Zuhörern einen besseren Kontakt herstellen. Auch über längere Zeiten strengt ihn das Sprechen nicht sonderlich an.

Noch mehr Bedeutung kommt dem nützlichen Reflexionsschall für Schallquellen zu, bei denen an der Schallerzeugung eine größere Anzahl von Personen mitwirken, wie bei einem Orchester oder einem Chor. Musiker oder Sänger kommen in einem größeren Klangkörper nur dann zu einem künstlerisch wirkungsvollen Zusammenspiel, wenn sie ein genügend ausgewogenes Klangbild erhalten. Gegenüber den Zuhörern erleidet die Balance der Orchester- oder Gesangstimmen für einen Mitwirkenden immer eine unnatürliche Verschiebung, jeder hört seine eigene Stimme und die seiner Nachbarn lauter als es einem natürlichen Klangbild entspricht. Nur durch einen genügend starken Anteil an nützlichem Reflexionsschall können die Lautstärkeverschiebungen der Stimmen innerhalb eines Klangkörpers, der sich über eine größere Fläche ausdehnt, bis zu einem gewissen Grade ausgeglichen werden.

Der Teil der Saaldecke, von dem Zuhörer und Schallquelle den ersten Reflexionsschall erhalten, wird durch die Reflexionspunkte abgegrenzt, die den Reflexionsschall zu den Rändern der von Zuhörern und Schallquelle eingenommenen Plätzen lenken (Bild 23). Es bleiben also außerhalb dieser Reflexionspunkte noch Randstreifen übrig, die zur Lenkung der ersten Deckenreflexion nicht ausgenutzt werden können. Diese Deckenränder können, falls erforderlich, mit Schallschluckern bedeckt

werden. Zu berücksichtigen ist dabei nur, daß die Wirkung von Schallschluckern über ihren geometrischen Rand hinausreicht, so daß ein ca 30 bis 50 cm breiter Streifen außerhalb der Reflexionsfläche noch von ihnen freigehalten werden muß.

Wie weit die erste Deckenreflexion die Lautstärke auf allen Plätzen erhöht, hängt nicht nur von einer genügend großen Reflexionsfläche ab, auch die Höhe der Decke über dem Fußboden spielt dabei eine Rolle. Ist sie sehr niedrig, fällt der Reflexionsschall auf den hinteren Plätzen so flach ein, daß schon die vor einem Hörer sitzenden Personen einen Teil seiner Energie absorbieren. Ist sie dagegen sehr hoch, muß der Reflexionsschall einen vergleichsweise langen Weg zurücklegen, bis er bei den Zuhörern ankommt, und bis dahin hat mehr als nötig seine Intensität ab- und seine Laufzeitdifferenz zugenommen.

Wie hoch aber sollte die Decke sein? Bei gleicher Deckenhöhe wird der Winkel gegen die Horizontale, unter dem der Reflexionsschall bei den hinteren Sitzreihen eintrifft, umso kleiner, je länger der Saal ist. Die untere der beiden Grenzen, zwischen denen die Deckenhöhe liegen sollte, muß also der Länge des Saales zugeordnet werden. Als Regel können wir festhalten, daß die Deckenhöhe den dritten Teil der Länge des Saales nicht unterschreiten sollte.

Mit der Länge des Saales wachsen aber auch die Wege des Reflexionsschalles, die durch eine große Deckenhöhe nicht unnötig weiter verlängert werden sollten. Wir können - jedenfalls für den einfachen Rechteckraum - auch die obere Grenze zur Länge des Saales in Beziehung setzen. Die Höhe einer Saaldecke sollte die Hälfte der Saallänge nicht überschreiten. Diese Regel kann natürlich nicht auf Theater- oder Konzertsäle mit Rängen oder Balkonen angewandt werden, da müssen relativ größere Deckenhöhen in Kauf genommen werden.

In den meisten Fällen sind die Decken einfacher Rechteckräume als ebene Flächen angelegt, so erfordern sie den geringsten Aufwand. Diese Decken können den Schall nicht diffus reflektieren, dazu müßte ihre Oberfläche durch akustisch wirksame Unebenheiten aufgelöst werden. Meist macht sich die fehlende Diffusität der Decke nicht störend bemerkbar. Das liegt daran, daß der größte Teil der ihr gegenüber liegenden Fläche von den Zuhörern besetzt ist, die als starke Schallschlucker wirken. Störende Schallrückwürfe durch mehrfache Reflexionen zwischen Decke und Fußboden - auch Flatterechos genannt - können sich auch bei glatter Decke nicht entwickeln, sofern der Saal besetzt ist; trotzdem ist die diffus reflektierende Decke der glatten vorzuziehen.

Wie weit eignen sich nun die vier Saalwände zur Lenkung von nützlichen ersten Schallrückwürfen? Beginnen wir mit der Wand, die in der Regel für diesen Zweck nicht herangezogen werden kann, das ist die Saalrückwand hinter den Zuhörern. Sie ist von der Schallquelle am weitesten entfernt, und bis der Schall auf die Rückwand auftrifft, ist zu der entfernungsbedingten Intensitätsabnahme eine weitere Minderung durch die Absorptionswirkung der Zuhörer hinzugekommen. Trotzdem könnte die erste Reflexion im Bereich der hinteren Sitzreihen noch zur Lautstärkerhöhung des Direktschalles beitragen. Aber bei Sälen, deren Rückwand etwa 15 m und mehr von der Schallquelle entfernt ist, besteht die Gefahr, daß störende Schallrückwürfe entstehen, wenn die Rückwand einen Teil der Deckenreflexion in den Saal zurückwirft oder die Decke einen Teil der ersten Rückwandreflexion in den Saal lenkt. Die Spiegelbildquellen dieser beiden Reflexionen fallen übrigens zusammen, wenn Wand und Decke senkrecht aufeinander stehen (Bild 24). Bei sehr tiefen Sälen kann auch die erste Reflexion der Saalrückwand stören.

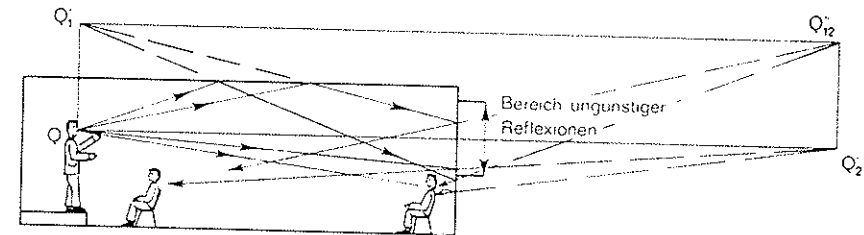


Bild 24. Die Rückwand als Reflexionsfläche

Die Störfähigkeit dieser Schallrückwürfe kann beseitigt werden, wenn ihnen durch Schallschluckung soviel Energie entzogen wird, daß ihre Intensitäten unter die Störgrenze sinken. Praktisch bedeutet dies, daß der obere Teil der Saalrückwand, der die störenden Reflexionen zurückwirft, mit Schallschluckelementen bedeckt werden muß (Bild 24).

Mit den störenden Reflexionen werden dadurch aber auch diejenigen geschwächt, die für die hinteren Sitzreihen nützlich sind und die deshalb die Lautstärke der normalerweise am weitesten von der Schallquelle entfernten Plätze nicht mehr erhöhen können. Nun gibt es eine Möglichkeit, die störenden Reflexionen zu vermeiden und gleichzeitig die nützlichen für die hinteren Reihen zu erhalten, indem man die Rückwand

oder ihren oberen Teil mit der oberen Kante nach vorne neigt (Bild 25). Dann gelangt auch der Anteil der ersten Reflexion in den hinteren Teil. Von dieser Möglichkeit ist bisher in der Praxis nur selten Gebrauch gemacht worden, ob aus gestalterischen Gründen oder aus Unkenntnis läßt sich nicht feststellen.

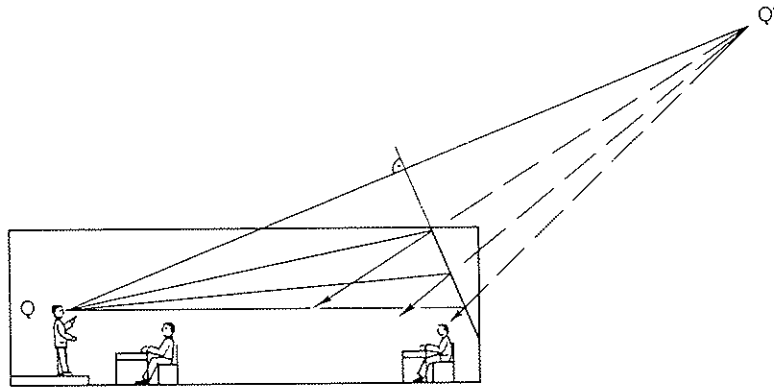


Bild 25. Nützliche Schallrückwürfe einer mit der Oberkante nach vorne geneigten Rückwand, empfehlenswert z. B. bei größeren Klassenräumen

Als nächstes wollen wir sehen, wie weit die Stirnwand des Saales im Rücken der Schallquelle imstande ist, nützliche erste Reflexionen in den Saal zu lenken. Obgleich diese Wand der Schallquelle am nächsten steht, ist sie als Reflexionsfläche von vornherein dadurch benachteiligt, als die meisten natürlichen Schallquellen den Schall nach hinten nur mit geringer Intensität ausstrahlen.

Verfolgen wir nun die Ausbreitung der ersten Reflexion (Bild 26), so ergibt sich, daß deren Laufzeitdifferenzen fast nur davon abhängen, wie weit die Schallquelle von der Stirnwand entfernt ist. Bleibt dieser Ab-

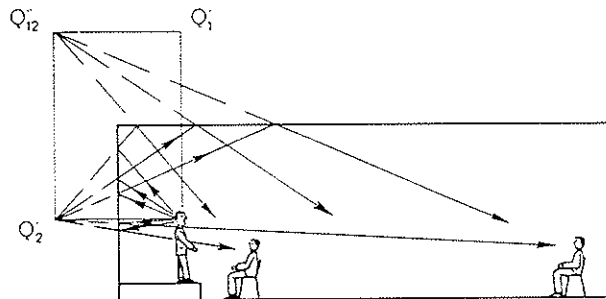


Bild 26.
Die Stirnwand als
Reflexionsfläche

stand unter der Grenze von etwa 10 m, ist eine Störwirkung wegen zu großer Laufzeitdifferenzen nicht zu befürchten.

Die erste Reflexion könnte also zur Lautstärkeerhöhung beitragen, aber sie fällt bei den Zuhörern unter einem noch kleineren Erhebungswinkel ein als der Direktschall, und bis sie weiter hinten sitzende Zuhörer erreicht hat, ist ihre Intensität durch die Absorption der davor sitzenden Zuhörer meist so gemindert worden, daß die Lautstärke davon nicht mehr erhöht wird. Bei einer Schallquelle mit großer Ausdehnung, wie einem Chor oder Orchester, kommt hinzu, daß ein Teil der ersten Reflexion auf dem Weg von der Schallquelle zur Stirnwand und zurück in den Saal von den Mitwirkenden und ihren Instrumenten absorbiert wird. Für den Fall schließlich, daß die Schallquelle auf einer Bühne vor Kulissen steht, fehlt auf ihrer Rückseite praktisch eine wirksame Reflexionsfläche.

Zusammengenommen geben erste Schallrückwürfe der Stirnwand kaum einen Nutzen her. Einen etwas günstigeren Effekt können die zweiten Reflexionen über Stirnwand und Decke bringen (Bild 26). Aber auch ihr Nutzeffekt wird dadurch beeinträchtigt, da die meisten Schallquellen in den Sektor, aus dem diese Reflexionen kommen, nur mit schwacher Intensität strahlen. Bei sehr großen Sälen können sie infolge großer Laufzeitdifferenzen stören; die Oberfläche der Stirnwand muß dann so gestaltet werden, daß die Intensität dieser Schallrückwürfe genügend herabgesetzt wird.

Nach Stirn- und Rückwand müssen wir nun die beiden Seitenwände prüfen, ob sie sich als Flächen für nützliche erste Reflexionen eignen. Ihre Flächenausdehnungen reichen meist aus, um bis zu genügend tieffrequenten Schallanteilen hinunter zu reflektieren. Weiter kommt ihren ersten Reflexionen zustatten, daß die meisten Schallquellen den Schall nach den Seiten mit relativ großer Intensität ausstrahlen, auch die Laufzeitdifferenzen erreichen im Normalfall keine kritischen Werte.

Danach wären die ersten Reflexionen nützlich, also müßten die Seitenwände als gut reflektierende Flächen ausgebildet werden. Aber bei gegenüberliegenden Flächen, die gut reflektieren, entstehen störende Schallrückwürfe durch mehrfache Reflexionen (Flutterechos).

Diese störenden Flutterechos können sich hauptsächlich an den vorderen Hälften der beiden Seitenwände bilden (Bild 27). Ihre Störwirkung kann behoben werden, wenn ihre Intensitäten durch schallschluckende Seitenwände herabgesetzt werden. Die Schluckfähigkeit der Wände braucht für diesen Zweck nicht sehr groß zu sein, denn jeder reflektier-

ten Schallwelle wird auf dem Wege von einer Seitenwand zur gegenüberliegenden durch Zuhörerabsorption ebenfalls ein Teil der Energie entzogen.

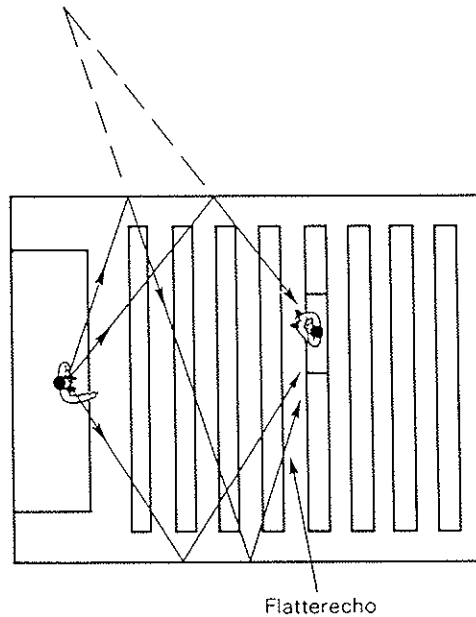


Bild 27.
Die Seitenwände als Reflexionsflächen. Gefahr von Flatterechos bei glatten und gut reflektierenden Oberflächen

Es gibt aber eine bessere Methode, störende Flatterechos zu vermeiden, indem man nämlich die Oberflächen der Seitenwände so ausbildet, daß sie die einfallenden Schallwellen diffus reflektieren (Bild 21). Flatterechos können sich nur zwischen glatten, spiegelartig reflektierenden Flächen entwickeln. Durch diffuse Reflexionen wird die Energie des Reflexionsschalles gestreut und auf viele Richtungen verteilt, so daß keine Richtung durch eine besonders große Intensität hervorsticht. Damit ist die Voraussetzung beseitigt, unter der sich Flatterechos entwickeln.

Wir sehen, auch die Seitenwände sind zur Lenkung erster Reflexionen nicht besonders gut geeignet. Aber wie bei keiner anderen Wand- oder Deckenfläche bringt es einen so großen Vorteil, wenn ihre Oberflächen als diffuse Reflektoren ausgebildet werden. Dadurch werden nicht nur störende Flatterechos vermieden, der Saal erhält gleichzeitig die Schalldiffusität, die zu den Merkmalen einer guten Akustik gehört.

Die Seitenwände reflektieren den einfallenden Schall diffus, wenn ihre Oberfläche entweder durch eine starke Gliederung aufgelöst oder Schallschlucker auf den glatten Oberflächen verteilt angebracht werden, wie

es im letzten Kapitel beschrieben steht. Bei Anwendung der zuletzt genannten Methode wird aber gleichzeitig der Nachhall des Saales verkürzt, doch dies später. Nicht immer, jedoch in vielen Fällen erweist sich die Verkürzung des Nachhalls aber als notwendig. So kann mit der Gestaltung diffus reflektierender Seitenwände die Regulierung des Nachhalls verbunden werden.

13. Lenkung der ersten Schallrückwürfe bei sonstigen Raumformen

Im letzten Kapitel haben wir gesehen, wie Decke und Wände in einem Raum mit rechteckigem Grund- und Aufriß gestaltet werden sollen, damit der Direktschall durch nützliche erste Schallrückwürfe unterstützt wird. Wenn wir die einzelnen Regeln, die sich dabei ergeben haben, zusammenfassend überblicken, so schält sich dabei ein Prinzip heraus, das sich auf jede andere Raumform übertragen läßt. Wir können es durch folgende Punkte umreißen:

1. Ein Teil der Fläche, die den Saal nach oben abschließt, muß so angelegt sein, daß der von ihr zuerst reflektierte Schall möglichst ungeschwächt und mit möglichst kurzer Laufzeitdifferenz Zuhörer und an der Schallerzeugung Mitwirkende erreicht.
2. Die Fläche, die den Saal nach hinten begrenzt, ist in der Regel zur Lenkung nützlicher Schallrückwürfe ungeeignet, vielmehr besteht die Gefahr, daß die sich an ihr bildenden ersten und zweiten Reflexionen infolge zu großer Laufzeitdifferenzen stören. Dies muß, gegebenenfalls durch Anbringen von Schallschluckern, vermieden werden. Nur wenn die Rückwand mit der Oberkante nach vorn geneigt werden kann, lenkt sie nützliche Reflexionen in die hinteren Sitzreihen.
3. Die Stirnwand bietet ebenfalls keine günstigen Voraussetzungen zur Lenkung erster nützlicher Schallrückwürfe. Die meisten Schallquellen strahlen nach hinten nur mit schwacher Intensität, und die ersten Reflexionen durchlaufen Wege, auf denen Mitwirkende und Zuhörer noch einen großen Teil der schon schwachen Energie absorbieren. Höchstens die zweiten Reflexionen, die davon nicht betroffen werden, können noch einen gewissen Nutzen bringen. Doch bei großen Sälen stören diese wegen zu großer Laufzeitdifferenzen.

4. Zwischen seitlichen Begrenzungen mit glatten, gut reflektierenden Oberflächen entwickeln sich störende Flatterechos. Deshalb sind auch sie nicht ohne weiteres zur Lenkung erster nützlicher Schallrückwürfe geeignet. Durch tiefere Gliederung der Oberflächen oder Anbringen verteilter Schallschlucker sollten die seitlichen Begrenzungen als diffus reflektierende Flächen angelegt werden. Dadurch werden nicht nur die störenden Flatterechos vermieden, der Saalerhält gleichzeitig die zu einer guten Akustik erforderliche Diffusität, außerdem können die Seitenwände durch entsprechende Bemessung der schallschluckenden Flächenteile zur Regulierung des Nachhalls mitbenutzt werden.

Aus diesen Punkten können wir eine grundlegende Entwurfsregel ableiten:

- ⋮ Die generelle Formgebung der oberen Raumbegrenzung ist an die gezielte Lenkung der ersten Schallrückwürfe gebunden, die der Wände hingegen können nahezu frei von solchen Bindungen entwickelt werden.

Danach stellt sich nun die Frage: nach welchen Richtlinien können wir die Form der oberen Raumbegrenzung gestalten, damit ihre ersten Schallrückwürfe einen möglichst großen Nutzeffekt bringen.

Um hierüber Klarheit zu bekommen, gehen wir am besten von der ebenen Decke aus und sehen, wodurch ihre Eigenschaften verbessert werden können. Einen großen Teil der Schallenergie, den der vordere Deckenteil von der Schallquelle erhält, wird von ihr den vorderen Sitzreihen zugeleitet. Die mittleren und hinteren Sitzreihen erhalten einen vergleichsweise viel geringeren Anteil an Energie der ersten Reflexion, obwohl gerade sie einen größeren Anteil benötigten. Die Reflexionsfläche über der Schallquelle sollte deshalb eine solche Form erhalten, daß die Schallerzeuger noch gut mit ersten Reflexionen versorgt werden, ein möglichst großer Teil an Schallenergie aber in den Bereich der mittleren und hinteren Sitzreihen geleitet wird, d.h. ein Teil der vorderen Deckenhälfte muß eine von vorn nach hinten ansteigende Tendenz erhalten. Bei größeren Deckenhöhen muß außerdem die Reflexionsfläche über der Schallquelle niedriger gehalten werden als etwa die Deckenhöhe in Saalmitte beträgt. Das hängt damit zusammen, daß bei größeren Deckenhöhen über der Schallquelle die ersten Deckenreflexionen besonders in den vorderen Sitzreihen mit relativ großen Laufzeitdifferenzen eintreffen. Die Hörer in den vorderen Sitzreihen benötigen zur Schallverstärkung zwar keine besonders starken Anteile aus ersten Reflexionen, doch über die Laufzeitdifferenz zwischen dem Eintreffen des Direkt-

schalles und der ersten Reflexion erhalten wir einen akustischen Eindruck von dem Abstand der entsprechenden Reflexionsfläche. Daraus bildet sich eine gefühlsmäßige Vorstellung von der Größe des Saales.

Wenn deshalb in einem Saal die ersten Reflexionen bei einer Anzahl von Hörern mit relativ großen Laufzeitdifferenzen eintreffen, so empfinden sie ein im Sinne des Wortes "distanziertes" Klangbild, oder anders ausgedrückt, es fehlt dem Klangbild an Intimität oder Präsenz. Um diese Eigenschaften zu erhalten, sollten die Laufzeitdifferenzen der ersten Reflexionen, und das sind in der Hauptsache die der Decke, einen Wert von 20 bis 25 ms nicht überschreiten.

Die Verbesserungen gegenüber der ebenen Decke können entweder durch eine entsprechende Formgebung der Decke verwirklicht werden, oder es werden für diesen Zweck besondere Reflektoren unter die Decke gehängt. Für beide Methoden gibt es Ausführungsbeispiele, von denen einige in Bild 28 dargestellt sind.

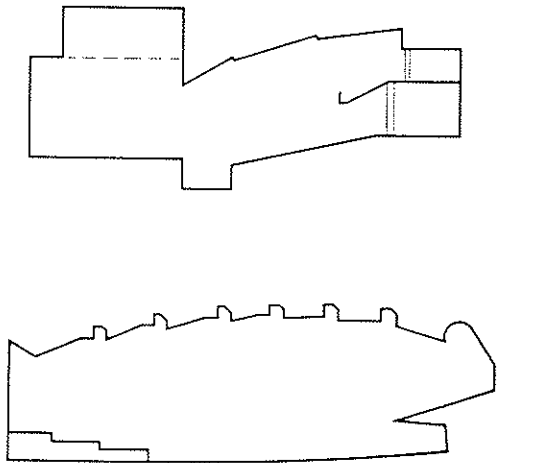
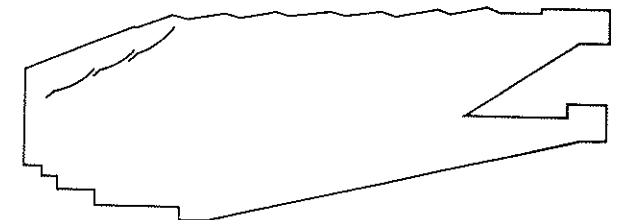


Bild 28.
Beispiele für die Gestaltung der oberen Raumbegrenzung bei großen Sälen



Eine Reflexionsfläche über der Schallquelle, die durch unter die Decke gehängte Reflektoren gebildet wird, läßt sich auch nachträglich anbringen. Wenn solche Reflektoren aber nicht vorgesehen waren, ist es gewöhnlich nicht einfach, eine zweckgerechte Form zu finden, die sich in das architektonische Bild des Saales einfügt.

In den letzten Jahren hat man dieses Problem verschiedentlich mit Hilfe der sogenannten "Wolken" (engl.: clouds) gelöst. Das sind neben- und hintereinandergehängte und leicht nach unten gewölbte Platten, die zusammen genommen den Reflektor bilden (Bild 29). Sie eignen sich nicht nur zum nachträglichen Einbau, sondern können auch von vornherein als Reflektoren vorgesehen werden. Zu beachten ist dabei, daß die Platten nicht zu klein geraten und ihre Masse pro m^2 Plattenfläche wenigstens den Wert von 20 kg/m^2 erreicht, denn sonst reflektieren sie im tieffrequenten Bereich nicht mehr genügend stark.

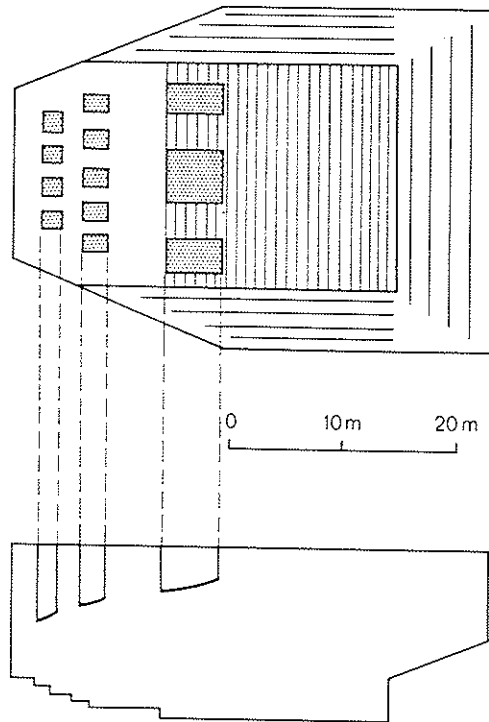


Bild 29.
Auflösung eines Deckenreflektors in mehrere kleine Reflexionsflächen (clouds)

Durch eine zweckentsprechende Gestaltung der Deckenform kann auch im hinteren Deckenteil der Nutzeffekt der ersten Deckenreflexionen gegenüber der ebenen Decke erhöht werden. Bei einer ebenen Decke lenkt

nur ein kleiner Abschnitt der hinteren Deckenhälfte einen vergleichsweise geringen Bruchteil der ersten Reflexionen in den Bereich der hinteren Sitzreihen. Die ersten Reflexionen des sich daran anschließenden Abschnitts erreichen die Zuhörer nicht mehr direkt.

Dies nun kann dadurch geändert werden, daß die hintere Deckenhälfte in zur Längsachse senkrechte Streifen unterteilt wird, die gegen die Horizontale so weit geneigt sind, daß ihre ersten Reflexionen in den Bereich der mittleren und hinteren Sitzreihen gelenkt werden. Eine leichte Wölbung dieser Streifen nach unten oder nach oben fördert nicht nur die Diffusität ohne praktisch den Nutzeffekt zu beeinträchtigen, der Architekt erhält dadurch auch einen Gestaltungsspielraum. Praktische Ausführungsbeispiele hierzu zeigt ebenfalls Bild 28.

Wie schon gesagt eignen sich im allgemeinen die Wände eines Saales nicht zur gezielten Lenkung von ersten Schallrückwürfen, sie können also nach denselben Regeln gestaltet werden, die wir im vorigen Kapitel für Säle mit rechteckigem Grundriß entwickelt haben. Wir müssen uns nun fragen, wie diese Regeln verwirklicht und dabei möglichst mit anderen Forderungen verbunden werden können.

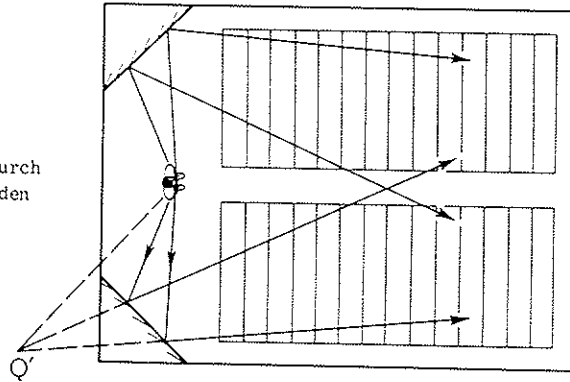
Beginnen wir mit der Saalrückwand; besondere Maßnahmen zu ihrer Gestaltung erübrigen sich, wenn die Sitzreihen nach hinten ansteigen. Durch die Zuhörer wird dann derjenige Schallanteil geschluckt, der sonst die Rückwand erreicht, so daß störende Schallrückwürfe über die Saalrückwand nicht erst entstehen können, ein weiterer Nutzen ansteigender Sitzreihen. In größeren Sälen mit Rängen oder Balkonen verhindern die dort sitzenden Zuhörer durch ihre Absorptionswirkung das Entstehen störender Schallrückwürfe an der Rückwand.

So gibt die Gestaltung der Saalrückwand keine besonderen Probleme auf. Nur wenn die eben beschriebenen Voraussetzungen fehlen, muß die Bildung störender Schallrückwürfe durch entsprechende Maßnahmen verhindert werden. Große Sorgfalt erfordern in dieser Beziehung glatte, nach außen gewölbte Rückwände, wie es schon in dem Kapitel über "Schallrückwürfe an großen gekrümmten Flächen" beschrieben wurde.

Die Stirnwand braucht zur Regelung der Akustik eines Saales im allgemeinen keine besonderen Aufgaben zu erfüllen. In einem Konzertsaal sollte sie als Wand hinter einem Orchester etwas schallschluckend ausgebildet sein, sonst verstärkt sie durch Reflexionsschall hauptsächlich die in ihrer Nähe stehenden Orchesterstimmen, und dazu gehören die schon von Natur aus lautstarken Blechbläser, die dadurch leicht die Streicher und Holzbläser überdecken können.

Wenn auch die ebene Stirnwand zur Lenkung erster Schallrückwürfe im Normalfall wenig geeignet ist, so kann sie durch eine besondere Maßnahme für diesen Zweck noch nutzbar gemacht werden, dadurch nämlich, daß sie an den Seiten abgewinkelt wird (Bild 30). Derart seitlich angelegte Reflexionsflächen tragen dazu bei, die auf den Seitenplätzen sitzenden Zuhörer - vor allem in relativ breiten Sälen - besser mit Schallanteilen aus ersten Reflexionen zu versorgen. Ihre Ausrichtung wird danach festgelegt, daß ihre erste Reflexionen die mittleren und hinteren Zuhörerplätze erreichen.

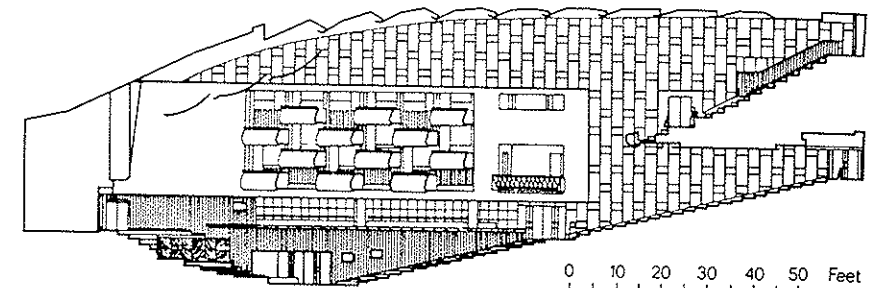
Bild 30.
Nützliche Schallrückwürfe durch Anwinkeln der Stirnwand an den Seiten



Die Seitenwände sollen den einfallenden Schall möglichst diffus reflektieren; um diese Bedingung zu erfüllen, bietet sich in großen Theater- und Konzertsälen ein naheliegender Lösungsweg an: die Oberflächen der Wände werden durch Seitenbalkone aufgelöst. So ausgebildete Seitenwände findet man in mehreren neueren Theater- und Konzertsälen. In einigen anderen Sälen haben die Seitenwände durch sägezahnartige Gliederung diffus reflektierende Oberflächen erhalten. Im übrigen können in jedem Fall die Methoden praktiziert werden, die in dem Kapitel 11 beschrieben stehen, das näheres über diffuse Reflexionsflächen enthält.

Praktisch unmöglich ist es, die Seitenwände akustisch wirkungsvoll zu gestalten, wenn große Teile ihrer Flächen als durchgehende Fensterflächen angelegt sind. Wenn ein Saal, wie z. B. eine Aula oder ein Hörsaal, natürliches Licht erhalten soll, muß die Fensterfläche in eine Anzahl verhältnismäßig schmaler Einzelfenster aufgeteilt werden. Durch den Wechsel von zurückliegenden Fenstern mit genügend weit vorspringenden Wandstreifen zwischen ihnen entstehen ohne besonderen Aufwand diffus reflektierende Seitenwände.

Am Schluß dieses Kapitels wollen wir an einem Musterbeispiel demonstrieren, welches Bild ein großer moderner Konzertsaal bietet, der nach den akustischen Regeln entworfen wurde, wie wir sie hier abgehandelt haben. Dieses Musterbeispiel gibt die Londoner Royal Festival Hall, dargestellt in Bild 31. Die raumakustische Gestaltung dieses Konzert-



Längsschnitt

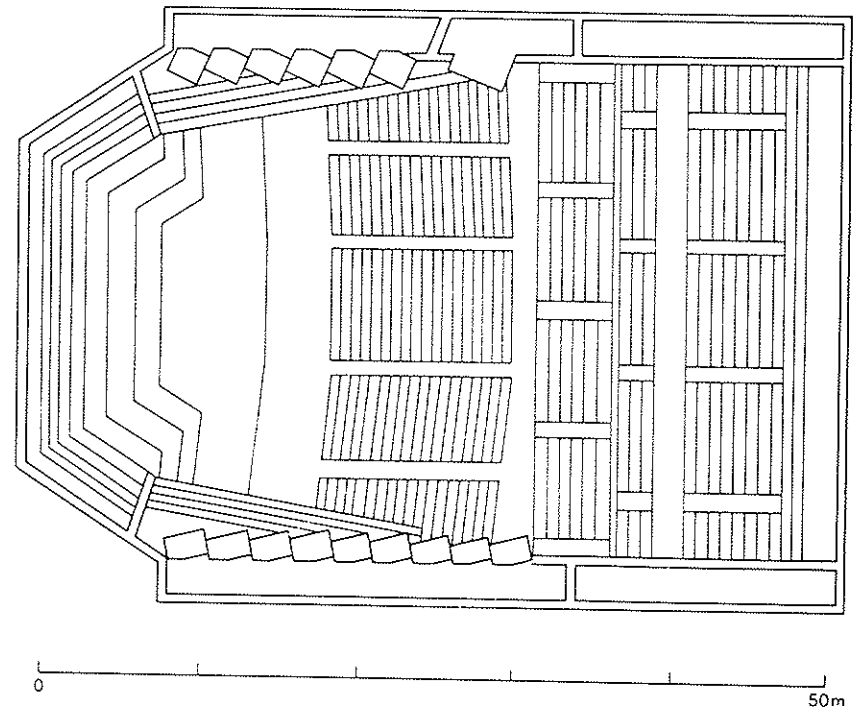


Bild 31. Die "Royal Festival Hall" in London, Architekten Matthew und Martin, 1951, 3000 Plätze Längsschnitt und Grundriß

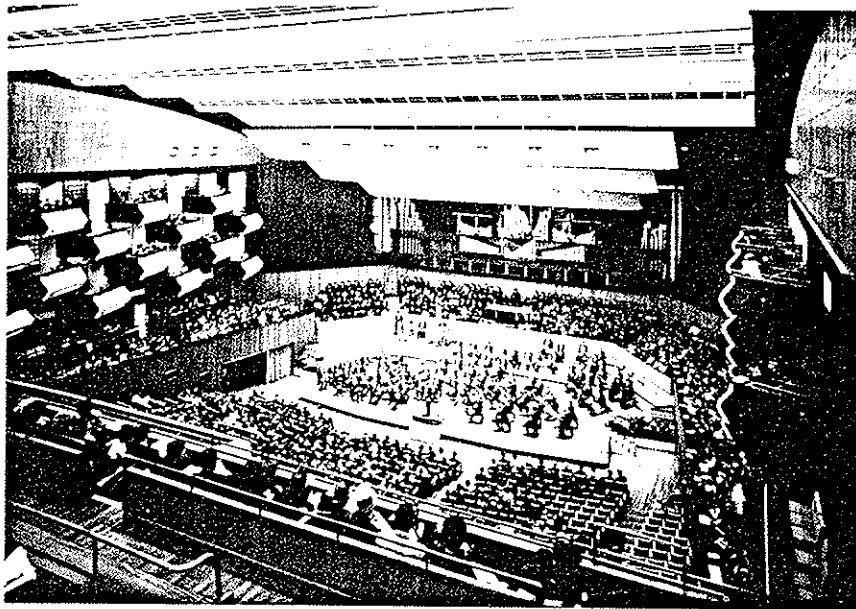


Bild 31a. Die "Royal Festival Hall" in London (Foto: Greater London Council)

saales gilt mit Recht als vorbildlich und beispielhaft, die Klangqualität der Musik wird auf fast allen Zuhörerplätzen gut beurteilt. Beim Betrachten des Grundrisses und des Längsschnittes wird der Leser selbst entdecken, wie und wodurch es die Erbauer verstanden haben, die verschiedenen raumakustischen Forderungen zu einem eindrucksvollen architektonischen Entwurf zusammenzufügen.

14. Das Auffinden von Reflexionsflächen störender Schallrückwürfe, Maßnahmen zur Beseitigung der Störwirkung

Gelegentlich haben wir in den letzten Kapiteln vorgegriffen und bestimmte Teile von Wand- und Deckenflächen bezeichnet, an denen sich leicht störende Schallrückwürfe bilden können, so etwa an Teilflächen der Rückwand oder der Decke. Diese Vorgriffe ließen sich nicht vermeiden, um das jeweilige Thema abgerundet darstellen zu können. Weshalb dieser

oder jener Teil einer Raumbegrenzung störende Schallrückwürfe verursachen kann, haben wir dabei nur angedeutet, jedoch nicht angegeben, wie man solche Flächenteile methodisch ermitteln kann.

Diese Fragen sollen in diesem Kapitel behandelt werden; wir werden dann auch Aufschluß darüber erhalten, um wieviel die Intensität eines Schallrückwurfes durch Schallschluckung an der Reflexionsfläche herabgesetzt werden muß, damit er unter die Störgrenze sinkt.

Zur Lösung dieser Aufgaben wird in der Literatur - auch in der neueren - eine Regel angegeben, die schon ziemlich alt ist, sie besagt: eine Reflexionsfläche verursacht einen störenden Schallrückwurf, wenn es Zuhörerplätze gibt, auf denen die Laufzeitdifferenz zwischen dem von ihr reflektierten Schall und dem Direktschall einen Wert von 50 ms erreicht oder übersteigt. Die Laufzeitdifferenz von 50 ms entsteht bei einer Wegdifferenz zwischen dem Reflexionsschall und dem Direktschall von 17 m. An einigen Stellen wird darauf hingewiesen, daß auch Schallrückwürfe mit Laufzeitdifferenzen von 40 ms an schon stören können, d.h. bei einer Wegdifferenz von 14 m an.

Aus dem Kapitel "Von den hörpsychologischen Eigenschaften einzelner Schallrückwürfe" wissen wir aber, daß Schallrückwürfe mit Laufzeitdifferenzen von 40 ms oder 50 ms und mehr keineswegs zu stören brauchen. Schließlich enthält jeder Nachhallvorgang eine große Anzahl solcher Schallrückwürfe, und ohne Nachhall gibt es in keinem Saal eine gute Akustik.

In dem eben erwähnten Kapitel steht vielmehr, daß ein Schallrückwurf mit über 30 ms Laufzeitdifferenz zwar stören kann, aber nur dann, wenn seine Intensität im Verhältnis zum Direktschall einen bestimmten Grenzwert überschreitet. Diesen Grenzwert findet man für jede beliebige Laufzeitdifferenz durch den entsprechenden Punkt auf der Kurve im Diagramm Bild 11.

Eine Methode zur Bestimmung störender Schallrückwürfe kann also nicht allein auf der Größe der Laufzeitdifferenz basieren, das Intensitätsverhältnis von Schallrückwurf und Direktschall muß dabei einbezogen werden. Die Grundlage dafür liefert das Diagramm Bild 11, das deshalb in diesem Kapitel als Bild 32 noch einmal wiedergegeben ist.

Die Laufzeitdifferenz zwischen dem Schallrückwurf und dem Direktschall ergibt sich allein aus dem Unterschied ihrer beiden Wege. Dagegen können wir die Intensitätsdifferenz zwischen ihnen nur dann ausrechnen, wenn wir die Schallquellen als kugelförmige Strahler ansehen, das hatten wir in dem Kapitel "Schallrückwürfe an großen ebenen Flächen"

schon ausführlich begründet. Da alle natürlichen Schallquellen von einem kugelförmigen Strahler mehr oder weniger stark abweichen, müssen auch die errechneten Ergebnisse von der Wirklichkeit abweichen. Es hat sich aber gezeigt, daß diese Rechenwerte trotzdem brauchbare Resultate liefern. Da sich die Strahlungseigenschaften der natürlichen Schallquellen nicht gesetzmäßig erfassen lassen, ist auch kein anderer Lösungsweg gangbar.

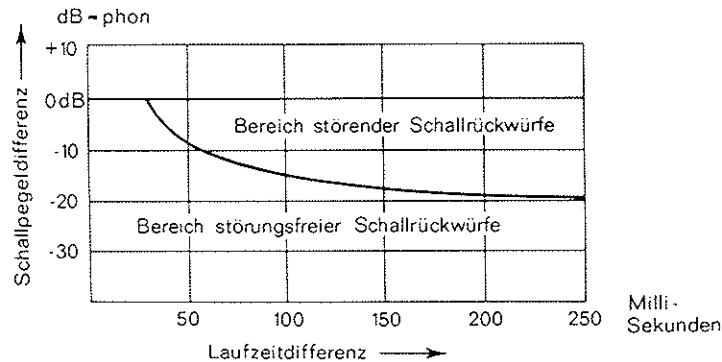


Bild 32. Grenze zwischen einem nicht störenden und störenden einzelnen Schallrückwurf mit wachsender Laufzeitdifferenz (Wiederholung von Bild 11)

In dem gleichen Kapitel hatten wir schon an Beispielen gezeigt, wie man die Laufzeitdifferenz und den Intensitätsunterschied als Schallpegeldifferenz ermittelt. In Verbindung mit dem Diagramm des Bildes 32 besitzen wir damit alle Voraussetzungen, die Bereiche störender Schallrückwürfe aufzufinden und deren Reflexionsflächen zu ermitteln.

Wir wollen die Methode auf einen besonders einfach gelagerten Fall aufbauen. In einer Distanz von a m von einer Schallquelle Q steht eine Reflexionsfläche. Auf der Senkrechten zu ihr liegt sowohl die Schallquelle als auch der Zuhörerplatz H . Der Standort des Zuhörerplatzes soll auf der Flächensenkrechten verändert werden können, wir bezeichnen deshalb seinen Abstand von der Reflexionsfläche mit x (Bild 33).

Wir können diese Anordnung ohne weiteres auf die Praxis übertragen, wenn wir die Reflexionsfläche als Saalrückwand betrachten. Mit einer Schallquelle in der Mitte vor den Sitzreihen und denjenigen Zuhörern, die auf den Mittelpätzen sitzen, haben wir dieselben Verhältnisse vorliegen.

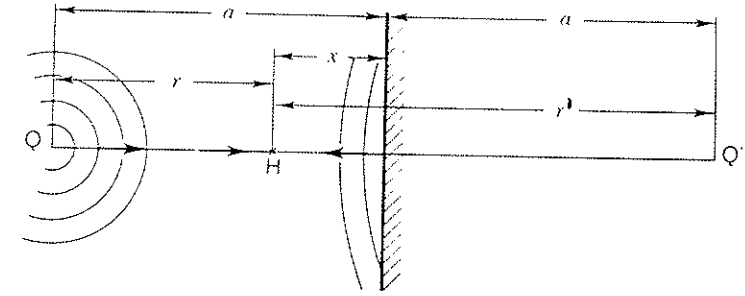


Bild 33. Zusammenwirken von Direktschall und einem Schallrückwurf bei veränderlichem Hörerstandort H . Die Reflexionsfläche steht senkrecht auf der Verlängerung der Verbindungsgeraden von der Schallquelle Q zum Hörer H

Wir bezeichnen weiter den Weg des direkten Schalles mit r den des Reflexionsschalles mit r' . Diesen letzteren können wir als Abstand des Zuhörers von der Spiegelbildquelle S' leichter darstellen als den tatsächlich zurückgelegten Weg. Mit diesen Bezeichnungen erhalten wir nun für die Laufzeitdifferenz:

$$\Delta t = \frac{r' - r}{c_L}$$

und für den Intensitätsunterschied als Schallpegeldifferenz:

$$L = 20 \lg \frac{r}{r'} = -20 \lg \frac{r'}{r} \text{ in dB}$$

Der Schallrückwurf stört in Bereichen mit Laufzeitdifferenzen über 30 ms, in denen die negative Abweichung der Schallpegeldifferenz gleich oder kleiner ausfällt als die Abweichung des entsprechenden Kurvenpunktes von der 0-dB Linie im Diagramm des Bildes 32 beträgt. Damit wir die Beziehung zwischen der Laufzeitdifferenz und der kritischen Schallpegeldifferenz herstellen können, ersetzen wir in den Formeln für Laufzeitdifferenz und Schallpegeldifferenz die Größen r und r' durch a und x . Wie aus der Darstellung des Bildes 33 abzulesen ist, gilt für die skizzierte Anordnung:

$$r = a - x$$

$$r' = a + x.$$

Dies in die beiden Formeln eingesetzt ergibt:

$$\Delta t = \frac{(a+x) - (a-x)}{c_L} = \frac{2 \cdot x}{c_L}$$

$$L = 20 \lg \frac{a+x}{a-x} \text{ in dB.}$$

Nach diesen Umformungen zeigt sich, daß die Laufzeitdifferenz nur von der Entfernung x des Zuhörerstandortes von der Reflexionsfläche abhängt, die Schallpegeldifferenz dagegen außerdem von dem Abstand a der Schallquelle von der Reflexionsfläche. Dadurch sind Laufzeitdifferenz und Schallpegeldifferenz nicht ohne weiteres in Verbindung zu bringen. Um dies Problem möglichst einfach zu lösen, benutzen wir eine graphische Methode.

Für einen festen Abstand a der Schallquelle von der Reflexionsfläche läßt sich die Schallpegeldifferenz in Abhängigkeit von der Entfernung x des Zuhörers von der Reflexionsfläche durch eine Kurve darstellen. Ermitteln wir die entsprechenden Kurven für eine Anzahl verschiedener fester Abstände a , so erhalten wir eine Kurvenschar, wie sie in dem Diagramm des Bildes 34 dargestellt ist. Für einen bestimmten Abstand a können wir die Schallpegeldifferenz für jedes x ablesen, z.B. erhalten wir für $a = 30$ m bei $x = 4$ m eine Schallpegeldifferenz von $-2,4$ dB, bei $x = 10$ m eine Schallpegeldifferenz von $-6,1$ dB, bei $x = 20$ m eine Schallpegeldifferenz von -14 dB usw.

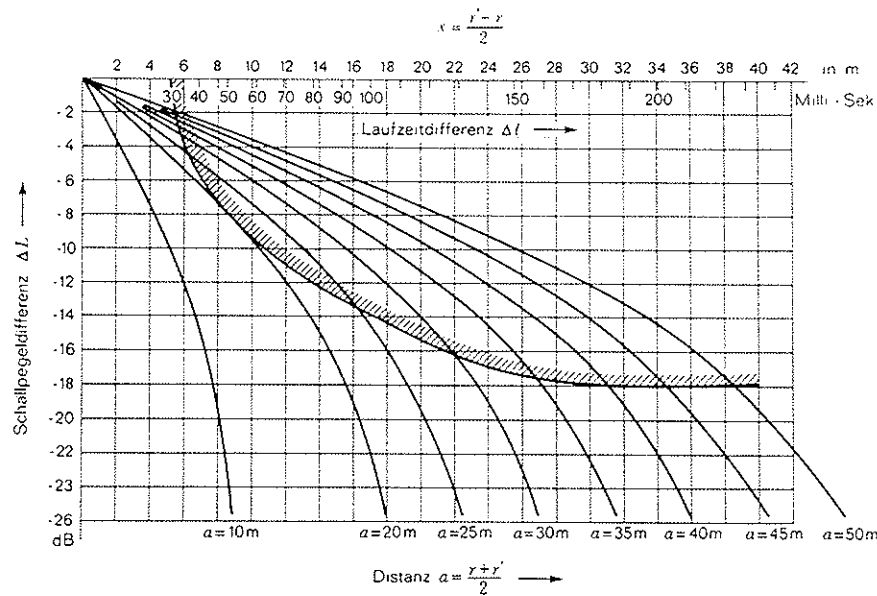


Bild 34. Kurvenschar zur Prüfung kritischer Schallrückwürfe auf eine mögliche Störwirkung

Bei Abständen a , die zwischen den Werten der aufgetragenen Kurven liegen, muß man interpolieren.

Da die x -Werte unmittelbar mit den Laufzeitdifferenzen verknüpft sind, kann die x -Achse auch in Laufzeitdifferenzen unterteilt werden. Diese Teilung ist in Bild 34 unter den x -Einheiten abgetragen.

Mit Hilfe dieses Diagrammes können wir bei einer Anordnung in der skizzierten Art für jeden Zuhörerstandort Laufzeitdifferenz und Schallpegeldifferenz erhalten und dann in Verbindung mit dem Diagramm des Bildes 32 entscheiden, ob der Schallrückwurf stört oder nicht. Um das Überwechseln von einem Diagramm in das andere zu vermeiden, kann man die Kurve des Bildes 32 in das Diagramm des Bildes 34 übertragen, wie es hier auch geschehen ist. Oberhalb dieser Kurve liegen die Zuhörerstandorte, auf denen die Schallrückwürfe stören, in den darunter liegenden Bereichen stören sie nicht, sondern tragen zur Lautstärkeerhöhung bei.

Das Diagramm des Bildes 34 ist für eine ganz spezielle Anordnung der Reflexionsfläche entwickelt worden. Wir werden gleich sehen, daß man es aber auch für jede anders liegende ebene Reflexionsfläche verwenden kann. Zuvor wollen wir es an dem Beispiel erläutern, auf das es sich praktisch ohne weiteres anwenden läßt, nämlich auf die ebene Rückwand eines Saales und deren erste Reflexion.

Ein bemerkenswertes Ergebnis läßt das Diagramm für diesen Fall sofort erkennen: erst wenn die Rückwand 20 m und mehr von der Schallquelle entfernt ist, beginnen ihre ersten Reflexionen zu stören. Denn bei Abständen a unter 20 m wird die Kurve der kritischen Schallpegeldifferenzen nicht geschnitten.

Bei näherem Hinsehen zeigt sich noch etwas sehr interessantes. Die Kurve für $a = 20$ m schneidet die Kurve der kritischen Schallpegeldifferenz zuerst und in einem Bereich von 50 ms Laufzeitdifferenz. Die ältere Regel, von der wir am Anfang dieses Kapitels sprachen, könnte hierdurch eine Erklärung finden. Sie basiert offenbar auf der Feststellung, daß bei der kürzesten Distanz zwischen Schallquelle und Reflexionsfläche, bei der die erste Reflexion stört, die Störung auf den Plätzen hörbar wird, auf denen die Laufzeitdifferenz 50 ms beträgt. Daraus hat man dann wahrscheinlich geschlossen, daß Schallrückwürfe bei Laufzeitdifferenzen von 50 ms an stören.

Für Störungen, die bei kürzeren Laufzeitdifferenzen beobachtet wurden, fand man keine rechte Erklärung. Zu einer gewissen Verwirrung hat sicher die Tatsache beigetragen, daß sich die Störgrenze nach kurzen

Laufzeitdifferenzen hin verschiebt, wenn die Distanz zwischen Schallquelle und Reflexionsfläche zunimmt. Dieser Knäuel entwirrt sich, wenn man von der ortsabhängigen Laufzeitdifferenz als alleinigem Kriterium abgeht und die Schallpegeldifferenz einbezieht, so wie es hier durchgeführt wurde.

Bei Distanzen a von Schallquelle zu Rückwand, die über 20 m hinausgehen, stören ungeschwächte erste Reflexionen in einem Abschnitt, dessen Grenzen wir dem Diagramm des Bildes 34 entnehmen können. Beispielsweise beginnt bei einem Abstand $a = 30$ m die Störwirkung bei $x = 5,5$ m und endet bei $x = 22$ m. Das gilt natürlich nur unter der Voraussetzung, daß die Rückwand den einfallenden Schall vollständig reflektiert.

Wenn die Oberfläche der Rückwand einen Teil der einfallenden Schallenergie schluckt, werden die Intensitäten des Reflexionsschalles dadurch geschwächt. Da die Intensität des Direktschalles davon nicht beeinflusst wird, vergrößern sich infolgedessen die Intensitätsunterschiede und damit die negativen Beträge der Schallpegeldifferenzen. Es gilt dann in dem Diagramm des Bildes 34 nicht mehr die Kurve, die zu der betreffenden Distanz a gehört, sondern eine andere. Diese neue Kurve können wir erhalten, wenn wir die für die Distanz a eingetragene Kurve soweit nach unten verschieben wie die Schallpegeldifferenz zugenommen hat.

Kann die eingetragene Kurve soweit nach unten verschoben werden, daß die neue Kurve den Störbereich nicht mehr durchläuft, ist die Störwirkung des Schallrückwurfes beseitigt. Dazu wäre bei einer Distanz von $a = 30$ m z. B. eine Verschiebung von wenigstens 3,6 dB nötig.

In Bild 35 kann man das Maß, um das die Schallpegeldifferenz vergrößert werden muß, für die Distanzen a von 20 m bis 50 m ablesen.

Im Hinblick auf die Praxis stellt sich nun die Frage, wie die Eigenschaften eines Schluckmaterials beschaffen sein müssen, durch das - nach Anbringen auf der Reflexionsfläche - der Schallrückwurf unter die Störgrenze sinkt. Sie werden durch den Schluckgrad α erfaßt. Hierunter versteht man das Verhältnis der vom Schluckmaterial geschluckten Intensität zur Intensität der einfallenden Schallwelle:

$$\alpha = \frac{I_a}{I_e}$$

I_e = Intensität der einfallenden Welle

I_a = geschluckte Intensität.

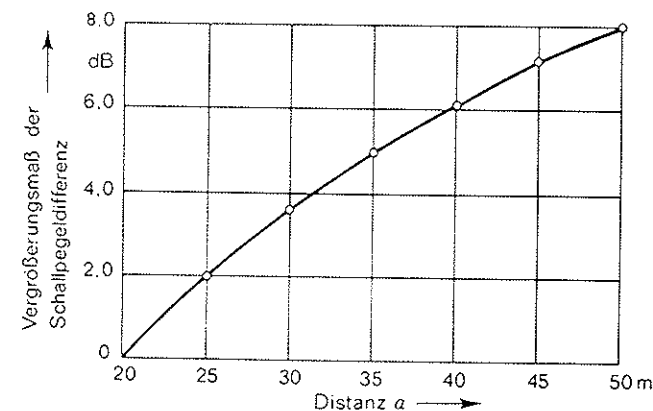


Bild 35. Das Maß, um das die Schallpegeldifferenz zwischen dem Direktschall und einem Schallrückwurf vergrößert werden muß, um die Störwirkung eines kritischen Schallrückwurfes zu beseitigen

Die Intensität der reflektierten Welle besteht aus der Differenz zwischen eingefallener und geschluckter Intensität:

$$I_r = I_e - I_a = I_e - \alpha I_e = I_e (1 - \alpha)$$

I_r = Intensität der reflektierten Welle.

Aus diesen Beziehungen können wir die Verbindung zwischen dem Schluckgrad α und der Vergrößerung der Schallpegeldifferenz herstellen, die durch ein Schluckmaterial mit diesem Schluckgrad erzielt wird:

$$\Delta L_a = 10 \lg \frac{I_r}{I_e} = -10 \lg \frac{I_e}{I_r} = -10 \lg \frac{1}{1 - \alpha}$$

Dieser funktionale Zusammenhang ist in Bild 36 graphisch dargestellt. In unserem Beispiel mit $a = 30$ m, bei dem die Schallpegeldifferenz um 3,6 dB vergrößert werden müßte, wäre - wie man ablesen kann - ein Schluckgrad von $\alpha = 0,55$ erforderlich.

Damit können wir für eine Anordnung, wie sie in Bild 33 angegeben ist, die Bereiche störender Rückwürfe eingrenzen und den Schluckgrad für ein Schluckmaterial ausrechnen, durch das die Störwirkung beseitigt wird. Wie wir jetzt zeigen wollen, läßt sich die Methode, die wir dabei benutzt haben, auf jede andere Anordnung übertragen.

In Bild 37 ist eine Reflexionsfläche eingezeichnet, die eine ganz allgemeine Lage zu der Schallquelle Q und zum Hörer H hat. Wenn die Reflexionsfläche vollständig reflektiert, können wir uns den Reflexions-

Bild 36.
Zur Ermittlung des Schluckgrades α der Schallschluckfläche, durch die ein störender Schallrückwurf unter die Störgrenze gesenkt wird

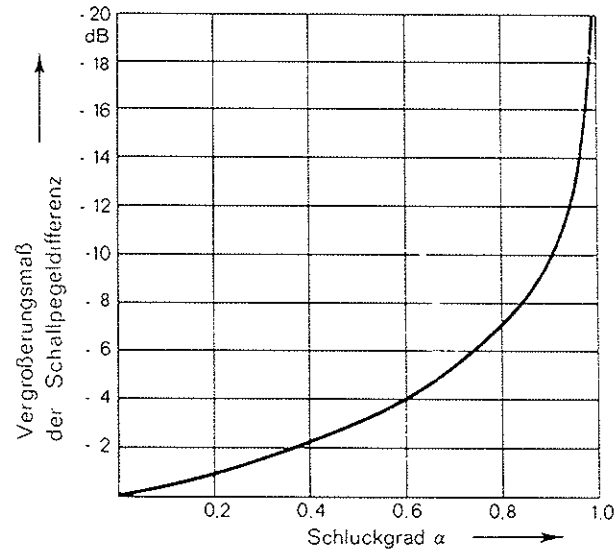
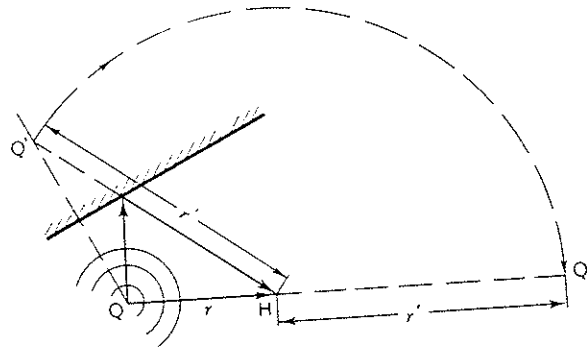


Bild 37.
Zur Prüfung der Störwirkung eines kritischen Schallrückwurfes bei beliebiger Lage der Reflexionsfläche



schall in Bezug auf Laufzeit- und Schallpegeldifferenz auch von einer Schallquelle Q^* erzeugt denken, die auf der Verlängerung der Verbindungsgeraden von Q nach H liegt und von H den Abstand r' hat. Damit aber haben wir im Prinzip die gleichen Verhältnisse vorliegen, von denen wir in Bild 33 ausgegangen sind.

In der Praxis braucht man diese Konstruktion nicht auszuführen, es genügt, den Weg des direkten Schalles r und den des Reflexionsschalles r' von der Schallquelle zum Hörer auszumessen. Daraus können die

Größen α und x leicht ausgerechnet werden, es ist:

$$\alpha = \frac{r + r'}{2}$$

$$x = \frac{r' - r}{2}$$

Die Verbindung, die zwischen r und x über α besteht, vereinfacht die praktische Anwendung. Sie lautet:

$$r = \alpha - x.$$

Der weitere Rechengang verläuft wie bei der beschriebenen Anordnung.

Bei der Auswahl eines Schluckmaterials, durch das die Intensität eines Schallrückwurfes unter die Störgrenze gesenkt werden soll, ist zu beachten, daß dieses den errechneten Schluckgrad α unter dem Winkel erreichen muß, unter dem die Schallwelle auf die Reflexionsfläche trifft.

Die Schluckgradwerte, die man gewöhnlich angegeben findet, stellen Mittelwerte über alle Einfallrichtungen dar. In der Regel nimmt der Schluckgrad zu, wenn sich der Winkel vergrößert, den die einfallende Schallwelle mit der Flächensenkrechten bildet. Das heißt aber, bei kleinen Einfallswinkeln ist der Schluckgrad kleiner als der angegebene Mittelwert anzeigt. In solchen Fällen muß man ein Schluckmaterial verwenden, dessen mittlerer Schluckgrad höher liegt als ihn die Rechnung ergeben hat.

Wenn wir bei einem Saal nun nach dieser Methode vorgehen, um störende Schallrückwürfe zu vermeiden, so scheint damit eine Sysiphusarbeit verbunden zu sein. Denn das Verfahren muß streng genommen auf jeden Zuhörerplatz für jede kritische Reflexionsfläche durchgeführt werden. Erschwerend kommt hinzu, daß aus den Grundriß- und Aufrißdarstellungen nicht die Wege des direkten Schalles und der Schallrückwürfe abgemessen werden können, sondern nur deren Projektionen.

Da aber die Methode selbst schon Näherungen enthält, würde eine strenge Anwendung zu diesen Voraussetzungen nicht passen. Deshalb können in der Praxis die exakten Längen der Schallwege gewöhnlich durch diejenigen Projektionen ersetzt werden, die den wahren Längen am nächsten kommen, das bringt schon wesentliche Vereinfachungen.

Beim Anwenden der Methode besteht der erste Schritt darin, die Distanzen $\alpha = \frac{r + r'}{2}$ für evtl. kritische erste Schallrückwürfe auf verschie-

denen Zuhörerplätzen zu ermitteln. Damit kann in vielen Fällen die gesamte Untersuchung schon abgeschlossen werden. Denn bei allen Distanzen a , die unter 20 m liegen, stören die Schallrückwürfe nicht. Bei denen, die über 20 m hinausgehen, und es Zuhörerplätze gibt, auf denen die Laufzeitdifferenz über 30 ms ansteigt, kann die Störwirkung beseitigt werden, wenn die Reflexionsfläche mit Schallschluckmaterial bedeckt wird, dessen Schluckgrad aus Bild 35/36 zu ermitteln ist. Kann ein Material mit hohem Schluckgrad verwendet werden, erübrigt es sich, den Rechenwert des erforderlichen Schluckgrades zu bestimmen.

Nur wenn der Teil der Reflexionsfläche genauer abgegrenzt werden muß, der einen störenden Schallrückwurf umlenkt, muß man noch den nächsten Schritt ausführen und mit Hilfe des Bildes 34 den Bereich der Zuhörerplätze ermitteln, in dem der Schallrückwurf stört.

An dem folgenden Beispiel wollen wir die Methode und ihre Handhabung erproben. In Bild 38 ist der Längsschnitt eines 28 m langen und 10 m hohen Saales dargestellt. Wir wollen den Schallrückwurf untersuchen, der nach Reflexion über Decke und Rückwand in den Bereich der Zuhörer gelangt.

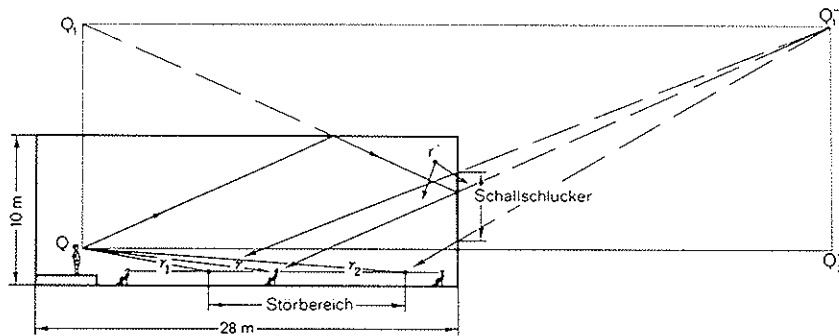


Bild 38. Beispiel für die Ermittlung der Störwirkung eines über Decke und Rückwand zurückgeworfenen Schallanteiles

Wenn wir, um die Distanzen a zu bestimmen, die Wege des direkten Schalles und der Schallrückwürfe ins Auge fassen, so sehen wir, daß sich ihre Summe nur wenig ändert, wenn wir die Zuhörerplätze von vorn nach hinten durchgehen. Die Wege der Schallrückwürfe erhalten wir dabei am einfachsten als Abstände der Spiegelbildquelle Q von den Zuhörerplätzen.

Die Summe beider Wege ergibt einen Wert von etwa 55 m. Demnach beträgt die Distanz $a = 27,5$ m, sie überschreitet damit die kritische Grenze von 20 m, d.h. es besteht die Möglichkeit, daß in dem Saal Platzgruppen gibt, auf denen dieser Schallrückwurf stört, wenn seine Intensität nicht gesenkt wird. Wie man aus dem Bild 35 ablesen kann, muß die Intensität eines Schallrückwurfes bei einer Distanz von $a = 27,5$ m um etwa 3 dB gesenkt werden. Dies kann durch ein Schluckmaterial erreicht werden, das auf der Rückwand angebracht wird und wie sich aus Bild 36 ergibt, einen Schluckgrad von 0,5 erreichen muß, und zwar bei Einfallswinkeln um 25° .

Als nächstes können wir an Hand des Bildes 34 feststellen, daß der Störbereich bei einer Distanz von 27,5 m zwischen den Werten $x_1 = 6$ m und $x_2 = 19$ m liegt. Diese Werte rechnen wir um in Abstände von der Schallquelle mittels der Beziehung $r = a - x$, dabei erhalten wir:

$$r_1 = 27,5 \text{ m} - 6 \text{ m} = 21,5 \text{ m} \text{ und } r_2 = 27,5 \text{ m} - 19 \text{ m} = 8,5 \text{ m}.$$

Zwischen diesen beiden Grenzwerten liegen die Zuhörerplätze, auf denen die Schallrückwürfe stören würden, wenn Decke und Rückwand sie vollständig reflektieren. Diejenigen Strahlen des Reflexionsschalles, die die Grenzen treffen, umranden auf der Rückwand den Teil, der mit Schallschluckplatten bedeckt werden muß. Damit sind alle Voraussetzungen geschaffen, um den Störeffekt des Schallrückwurfes zu verhindern.

Nach dem gleichen Muster wie an diesem Beispiel gezeigt kann man auch bei anderen kritischen Schallrückwürfen vorgehen. Obgleich das Verfahren nur für ebene Reflexionsflächen entwickelt wurde, kann man es bis zu einem gewissen Grade auch auf gewölbte Raumbegrenzungen anwenden. Hinsichtlich der Laufzeitdifferenzen besteht kein Unterschied zu ebenen Flächen, wohl aber was die Schallpegeldifferenzen angeht. Bei schwach gewölbten Flächen sind in dieser Beziehung noch keine größere Abweichungen zu erwarten. Dagegen treten bei starken Wölbungen große Unterschiede in Erscheinung; was in solchen Fällen zu tun ist, hatten wir in dem Kapitel über "Schallrückwürfe an großen gekrümmten Flächen" schon behandelt.

15. Der Nachhall und die Nachhallzeit

Ein Schallereignis, das die Zuhörer in einem Raum zuerst mit dem Direktschall erreicht, dann von den ersten Schallrückwürfen verstärkt wird, klingt mit dem Nachhall aus. Wohl jeder Leser hat den Effekt des Nachhalles schon wahrgenommen, etwa in einem großen Kirchenschiff oder in einer Bahnhofshalle, d.h. in Räumen, in denen der Nachhall außergewöhnlich stark ausgeprägt ist. In normalen Räumen tritt sein Vorhandensein nicht so deutlich hervor, in jedem Falle aber nimmt er wesentlichen Einfluß auf die Klangwirkung von Musik und Sprache.

Bevor wir die Klangwirkung des Nachhalles und seine Abhängigkeit von den Raumeigenschaften behandeln können, müssen wir uns darüber klar sein, wie man ihn eindeutig charakterisiert.

Der Nachhall besteht aus den Schallrückwürfen, die nach dem Direktschall und den ersten Schallrückwürfen in immer dichter Folge, in der Regel aber mit abnehmender Intensität bei den Hörern eintreffen. Ganz streng kann man sie nicht gegen die ersten Schallrückwürfe abgrenzen. Da aber die Schallrückwürfe, die innerhalb der ersten 50 ms bei den Hörern eintreffen, in erster Linie zur Erhöhung der Lautstärke beitragen, unterscheiden sie sich dadurch vom eigentlichen Nachhall. Nach dieser Unterscheidung beginnt der Nachhall etwa 50 ms nach dem Eintreffen des Direktschalles einzusetzen.

Mit Hilfe elektroakustischer Geräte kann man die Intensität dieser Schallrückwürfe als Schallpegelgrößen aufzeichnen, und zwar sowieso nach dem Verstummen einer Schallquelle aufeinander folgen. Auf dem Registrierpapier eines "Schallpegelschreibers" ist aber nicht jeder einzelne Schallrückwurf als Punkt festgehalten, sondern der Schreiber liefert gleich die Verbindung dieser Punkte zu einer durchlaufenden Kurve, was auch dem Höreindruck entspricht.

Wie die Erfahrung zeigt, stellt die Kurve, die man so erhält, im Normalfall entweder eine fallende Gerade dar oder sie läßt sich gut dadurch annähern (Bild 39). Bei einem Raum mit geringem Nachhall fällt diese Gerade steil ab, dagegen neigt sie sich bei einem Raum mit großem Nachhall viel weniger gegen die Horizontale.

Die Neigung der Nachhallgeraden kann also dazu dienen, den Nachhall eines Raumes zu charakterisieren. Man drückt ihr Gefälle in der Raumakustik auf besondere Art durch die "Nachhallzeit" aus.

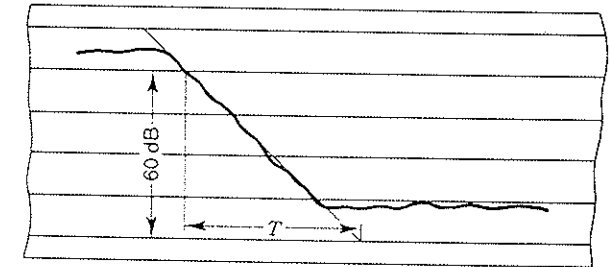


Bild 39.
Aufzeichnung des
Nachhalles auf dem
Registrierpapier ei-
nes Pegelschreibers

Unter dieser Nachhallzeit T versteht man die Zeitdauer, in der die Nachhallgeraden, von einem beliebigen Anfangspunkt ausgehend, um genau 60 dB Schallpegelheiten gefallen ist (Bild 39).

Die so definierte Nachhallzeit ist von dem amerikanischen Akustiker Sabine (1868 - 1919) in die Raumakustik eingeführt worden, man spricht deshalb auch von der Sabineschen Nachhallzeit.

Laut Definition ist der Höhenabschnitt der fallenden Nachhallgeraden, auf den sich die Nachhallzeit bezieht, mit 60 dB Schallpegelheiten festgelegt, deshalb hängt die Nachhallzeit in der Tat nur von der Neigung der Nachhallgeraden ab. Man darf sie daher nicht mit der Zeitdauer verwechseln, in der das Nachklingen eines Schallereignisses in einem Raum zu hören ist. Diese Zeit hängt nicht nur von den Nachhalleigenschaften des Raumes ab, sondern auch von der Stärke der Schallquelle und der Höhe des Störgeräusches, in welches das Nachklingen untergeht. Man unterscheidet sie deshalb von der Nachhallzeit durch das Wort Nachhalldauer.

Zur Messung der Nachhallzeit wird die eben beschriebene Methode angewandt. Als Schallquelle benutzt man entweder eine Pistole, mit der durch Platzpatronen Knallgeräusche erzeugt werden, oder man strahlt über den Lautsprecher eines Geräuscherzeugers Rauschgeräusche in den Raum, die momentan abgeschaltet werden können. In jedem dieser Geräusche sind alle Frequenzen des hörbaren Frequenzgebietes enthalten.

Die Nachhalleigenschaften eines Raumes ändern sich, wenn auch meist nicht sehr stark, mit der Frequenz, anders ausgedrückt mit der Tonhöhe eines Schallereignisses. Dies bedeutet, daß auch die Nachhallzeit

von der Frequenz abhängt. Wenn der Nachhall eines Raumes nur durch einen einzigen Wert für die Nachhallzeit angegeben wird, wie man häufig liest oder hört, so bezieht sich dieser Wert gewöhnlich auf die Nachhallzeit im Frequenzbereich von 500 Hz, also in der Nähe des Kamertones a, dessen Frequenz 440 Hz beträgt. Diese Nachhallzeit allein gibt aber nur einen unvollständigen Einblick in die Nachhalleigenschaften eines Raumes.

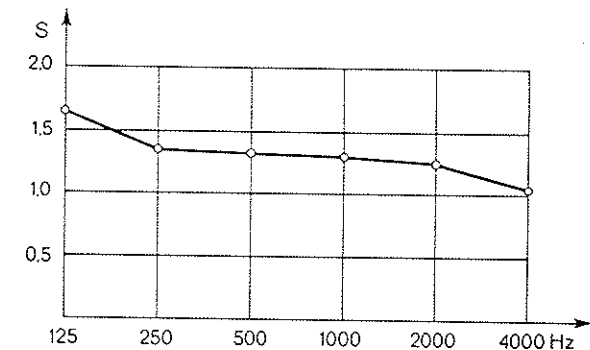
Die Abhängigkeit des Nachhalls von der Frequenz wird durch mehrere Nachhallzeitwerte in aufeinander folgenden Frequenzbändern erfaßt. Die Bandbreite dieser Frequenzbänder beträgt gewöhnlich eine Oktave, d. h. Anfangs- und Endfrequenz jedes Bandes stehen in einem Zahlenverhältnis von 1 : 2 (Näheres siehe Band 1).

Beim Messen der Nachhallzeit registriert der Schallpegelschreiber also nicht das Abklingen des gesamten Geräusches. Zwischen dem Mikrofon mit seinem Verstärker und dem Schallpegelschreiber ist ein elektrisches Filter geschaltet, das jeweils nur den Geräuschanteil einer Oktave durchläßt. Die Nachhallzeit, die aus einer Aufzeichnung hervorgeht, gilt also nur für den Oktavbereich, den das Filter durchgelassen hat. Die Lage der Oktave in der Frequenzskala wird durch ihre "Mittenfrequenz" bezeichnet, darunter versteht man den geometrischen Mittelwert aus der Anfang- und Endfrequenz der Oktave. Diese etwas ungewöhnliche Art der Kennzeichnung erklärt sich mit dem allgemein üblichen Brauch, die Frequenzen des hörbaren Gebietes auf einer logarithmisch geteilten Skala darzustellen. Die Oktave, auf einer solchen Skala abgemessen, ist überall gleich lang, in welchem Frequenzgebiet sie auch liegt. Die Frequenz, die in der Mitte des Längenabschnittes liegt, der eine Oktave ausmacht, heißt Mittenfrequenz. Wegen der logarithmischen Teilung der Skala geht sie nicht aus dem arithmetischen, sondern aus dem geometrischen Mittel der beiden Grenzfrequenzen hervor.

In der Praxis werden die Nachhallzeiten nicht in allen Oktaven des hörbaren Frequenzgebietes gemessen, sondern nur in dem Bereich von etwa 100 Hz bis etwa 5000 Hz. Dieser Frequenzbereich umfaßt ungefähr 6 Oktaven. Nachhallzeitkurven außerhalb dieses Bereiches sind nicht mehr sicher auszuwerten, unter 100 Hz verlaufen sie gewöhnlich so ungleichmäßig, daß man sie kaum noch durch eine Gerade annähern kann; oberhalb 6000 Hz wird der Verlauf in mit der Frequenz zunehmendem Maße von der Absorption der Luft beeinflusst, d. h. die Nachhallzeit hängt nicht mehr von den Eigenschaften des Raumes allein ab.

Die Auswertung einer Nachhallzeitmessung ist in Bild 40 dargestellt. Die einzelnen Nachhallzeiten sind über den Mittenfrequenzen aufgetragen, darüber hinaus sind auf der Frequenzachse die Grenzfrequenzen der Oktaven angegeben, die zu den einzelnen Mittenfrequenzen gehören.

Bild 40.
Ergebnis einer
Nachhallzeit-Mes-
sung in einem Dia-
gramm dargestellt



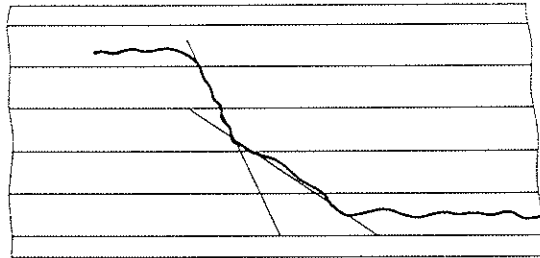
Wie schon gesagt fällt die Nachhallkurve nicht immer geradlinig ab, nicht selten pendelt sie abwärts. Da die Nachhallkurve aus einer Folge von Schallrückwürfen entsteht, gibt es genau genommen einen exakt geradlinigen Abfall auch nicht. Wenn dies der Fall zu sein scheint, dann sind nur die Schwankungen so gering, daß man sie nicht mehr erkennt, denn es ist nicht zu erwarten, daß die Intensität der Schallrückwürfe ganz gleichmäßig abnimmt.

Wie kommt es aber zu stärkeren Abweichungen vom geradlinigen Abfall? Das ist nur so zu erklären, daß die Schallrückwürfe, die den Nachhall ausmachen, an Zahl gering sind und in ungleichmäßigen Zeitabständen am Ort des Hörers oder des Mikrofons eintreffen. Einzelne Schallrückwürfe, die dicht aufeinander folgen, wechseln mit anderen, die weiter auseinander liegen. Dieses ungleichmäßige Aufeinanderfolgen einer geringen Zahl von Schallrückwürfen verursacht die Schwankungen der Nachhallkurve. Bei einer Nachhallkurve, die fast geradlinig abfällt, müssen wir annehmen, daß sie aus einer größeren Zahl von Schallrückwürfen entstanden ist und daß mit der größeren Zahl ein gleichmäßigeres Aufeinanderfolgen der Schallrückwürfe verbunden ist.

Ein Auffächern des Nachhalls auf eine möglichst große Zahl von Schallrückwürfen entwickelt sich aber dann, wenn der Schall von den Raumbegrenzungen diffus reflektiert wird. Der Verlauf der Nachhallkurve ermöglicht daher Rückschlüsse auf die Diffusität des Raumes. Je geradliniger die Nachhallkurve abfällt, um so besser ist die Raumdiffusität.

Gelegentlich kommt es vor, daß die Nachhallkurve nicht durch eine einzige Gerade angenähert werden kann, sondern nur durch zwei gegeneinander geknickte Geradenstücke (Bild 41). Dieser anomale Verlauf

Bild 41.
Beispiel für ein anomales Verhalten des Nachhalls, die Nachhallkurve kann nur durch zwei gegeneinander geknickte Geradenstücke angenähert werden



zeigt sich dann, wenn entweder von den vier Wänden des Raumes zwei gegenüberliegende den Schall gut reflektieren, die beiden anderen dagegen als gute Schallschlucker wirken, oder der Raum, in dem die Nachhallkurve aufgenommen wurde, ist durch eine große Öffnung mit einem zweiten Raum verbunden, dessen Nachhallzeit von der des ersten wesentlich abweicht.

Ein so gearteter Nachhall gibt eine unbefriedigende Klangwirkung, man sollte deshalb die Voraussetzungen vermeiden, die dazu führen.

16. Die optimalen Nachhallzeiten für einen Raum

Mit seinem Nachhall trägt ein Raum am stärksten zu dem Klangeindruck bei, den ein Vortrag von Musik oder Sprache bei den Zuhörern hervorruft, da durch ihn die Laute der Musik, des Gesanges oder der Sprache ausklingen. An Beispielen von Extremfällen können wir ermessen, wie sehr der Nachhall an der Klangwirkung beteiligt ist.

Mit dem einen Extremfall haben wir es zu tun, wenn ein Nachhall ganz oder fast ganz fehlt. Diesen Fall erleben wir bei einem Konzert im Freien, und wohl jeder Leser hat schon einmal die Gelegenheit gehabt, bei einem Freiluftkonzert zuzuhören. Die Musik klingt dann trocken und leblos und erweckt bei keinem der Zuhörer einen tieferen künstlerischen Eindruck.

Bei dem anderen Extrem handelt es sich um den Fall außerordentlich großen Nachhalls, eine Eigenschaft, durch die sich gewöhnlich die Innenräume großer Kirchen auszeichnen. An einem solchen Ort kann man am ehesten die Klangwirkung sehr großen Nachhalls erfahren, was wohl auch jeder Leser schon erlebt hat. Die Worte einer Ansprache - der Predigt etwa - sind nur schwer zu verstehen. Der lange Nachhall trägt den Wortlaut einer Silbe in die nächste hinein, jede nachfolgende Silbe wird so von der vorhergehenden gestört. Beim Spielen der Orgel gehen die aufeinanderfolgenden Klänge ebenso ineinander über. Das ist von den Komponisten bis zu einem gewissen Grade - unbewußt wohl - beabsichtigt gewesen. Bei zu langem Nachhall aber entartet das Klangbild der Musik in einen Geräuschbrei.

Zwischen diesen beiden Extremen müssen wir die optimale Nachhallzeit suchen. Um sie zu finden, haben sich die Akustiker bemüht, hierfür Regeln aufzustellen, seit die Bedeutung des Nachhalls erkannt worden ist. Die Bewertungsgrundlage aber bilden Urteile, die von Zuhörern über ihren Höreindruck abgegeben werden. Das erklärt wenigstens teilweise die etwas unterschiedlichen Angaben, die man über die günstigste Nachhallzeiten in der einschlägigen Literatur angegeben findet.

Die Wirkung des Nachhalls spricht das klangästhetische Empfinden der Zuhörer an. Oft schon hat man versucht, dies Empfinden genauer zu beschreiben, Begriffe wie Klangfülle und Klangvolumen gehören in den Bereich dieser Erklärungsversuche, sie befriedigen aber alle nicht. Der Grund ist ohne Zweifel darin zu suchen, daß klangästhetische Eindrücke - wie ästhetische Eindrücke überhaupt - sich nicht vollständig erfassen lassen.

Weil der Nachhall die Klangsönheit beeinflusst, steht das Suchen nach der optimalen Nachhallzeit meist in Verbindung mit Räumen, in denen musikalische Werke aufgeführt werden. Aber auch für Vortragssäle jeder Art gibt es optimale Nachhallzeiten. Wenn es in solchen Räumen auch nicht so sehr um die Klangsönheit geht, sondern in erster Linie um die Sprachverständlichkeit, so kann dies durch zu kurzen oder zu langen Nachhall wesentlich beeinträchtigt werden.

Wenn man für die optimalen Nachhallzeiten von Vortragssälen nur die Sprachverständlichkeit als Kriterium gelten läßt, geben Silbenverständlichkeitsprüfungen eindeutigen Aufschluß darüber. Diese Methode besteht darin, daß eine größere Anzahl von Silben in verschiedenen Räumen mit verschiedenen Nachhalleigenschaften mehreren Personen vorgesprochen werden. Durch das Verhältnis der von diesen Personen

richtig verstandenen Silben zur Gesamtzahl der gesprochenen entsteht ein Maß für die Sprachverständlichkeit.

Um die optimalen Nachhallzeiten für Räume zu erhalten, in denen nur Sprache vorgetragen wird, stützt man sich in der Praxis gewöhnlich auf die Ergebnisse, die auf Silbenverständlichkeitsprüfungen basieren.

Aus den Ergebnissen solcher Untersuchungen geht hervor, daß das Optimum nicht sehr schmal ist, denn in erster Linie sind es Direktschall und erste Schallrückwürfe, die vor dem Nachhall als Hintergrund ein deutliches und klares Klangbild hervorbringen. Des weiteren hat sich gezeigt, daß die optimalen Nachhallzeiten mit dem Raumvolumen ansteigen.

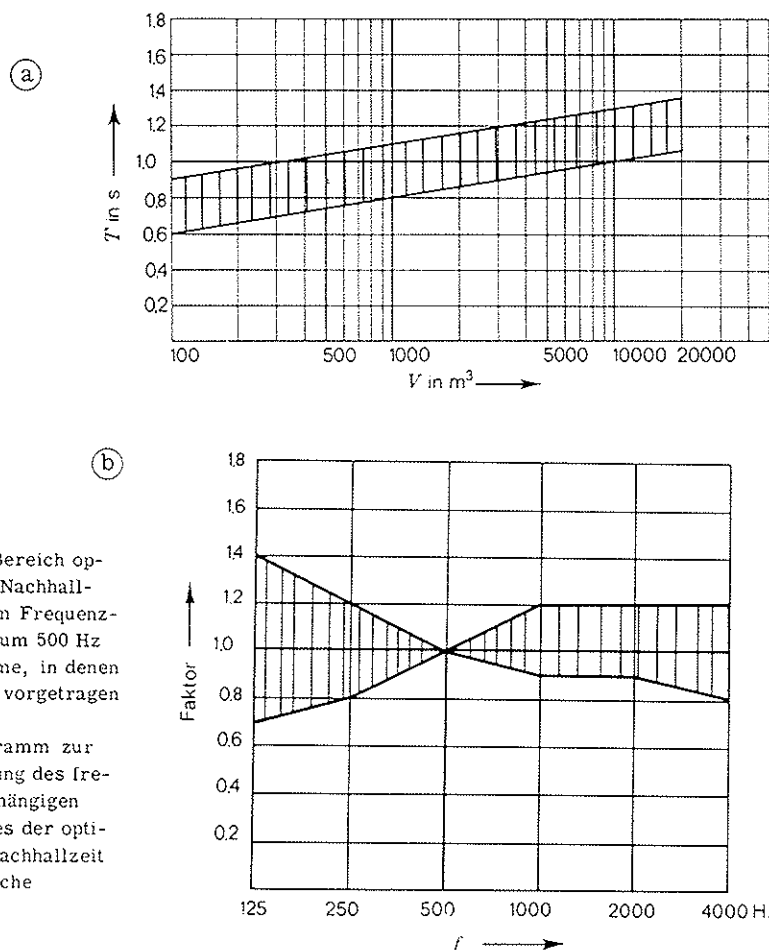


Bild 42.

a) Der Bereich optimaler Nachhallzeiten im Frequenzbereich um 500 Hz für Räume, in denen Sprache vorgetragen wird.

b) Diagramm zur Ermittlung des frequenzabhängigen Verlaufes der optimalen Nachhallzeit für Sprache

Das Diagramm von Bild 42a stellt die optimalen Nachhallzeiten im Frequenzgebiet um 500 Hz in Abhängigkeit vom Raumvolumen dar. Dem Raumvolumen ist dabei nicht eindeutig einer Nachhallzeit zugeordnet, sondern es sind zwei Grenzen angegeben, zwischen denen diese sich bewegen kann.

Die optimalen Nachhallzeiten im übrigen Frequenzgebiet bekommen wir, indem wir die aus Bild 42a gewonnene Nachhallzeit mit Zahlenfaktoren multiplizieren, die in Bild 42b in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt sind. Auch hierbei kann ein gewisser Spielraum zugelassen werden, deshalb sind für jede Frequenz zwei Grenzen angegeben, zwischen denen die Zahlenfaktoren liegen dürfen.

Um die optimalen Nachhallzeiten für Räume zu finden, in denen Werke der Musik aufgeführt werden, gibt es kein so objektives Kriterium wie für Sprache die Silbenverständlichkeit. Hierfür können nur Urteile über klangästhetische Empfindungen einen Maßstab abgeben, und diesbezügliche Urteile klaffen oft ziemlich weit auseinander. So erklärt es sich, daß ein umfangreiches Kapitel in der Geschichte der Raumakustik mit Untersuchungen ausgefüllt ist, die sich mit optimalen Nachhallzeiten für Räume befassen, in denen Musik gespielt wird. Da die Ergebnisse dieser Bemühungen innerhalb bestimmter Grenzen streuen, muß man zu dem Schluß kommen, daß man einem Raum für Musik keine eindeutigen optimalen Nachhallzeiten zuordnen kann. Das heißt keineswegs, daß die Nachhallzeiten beliebig groß sein dürften, sondern als optimal kann - wie bei Sprache auch - ein Wertebereich gelten, der sich zwischen bestimmten Grenzen abstecken läßt. Dieser Wertebereich steigt mit dem Raumvolumen an, darin stimmen die Untersuchungen im wesentlichen überein.

Wenn auch die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen streuen, so geben sie doch einen Rahmen ab, durch den die optimalen Nachhallzeiten eingefaßt werden können. Das führt zu dem in Bild 43a dargestellten Resultat, das die Zuordnung der optimalen Nachhallzeit im Frequenzgebiet um 500 Hz zum Raumvolumen wiedergibt. Will man die optimalen Nachhallzeiten für die übrigen Frequenzbereiche erhalten, so wird die Nachhallzeit bei 500 Hz mit Faktoren multipliziert, die aus Bild 43b abgelesen werden können.

Nicht ein bestimmter Wert einer optimalen Nachhallzeit, sondern die Auswahl aus einem Bereich von Werten überläßt uns für jeden Anwendungsfall der Qual einer Wahl. Denn ob die Nachhallzeiten für einen Raum an der oberen oder an der unteren Grenze des optimalen Bereiches liegen, wirkt sich auf das Klangbild der Musik durchaus hörbar

aus. Bei mehreren Räumen gleichen Volumens können jedem Raum - entsprechend seinem besonderen Verwendungszweck und seiner Architektur - andere Nachhallzeiten innerhalb des optimalen Bereiches angemessen sein.

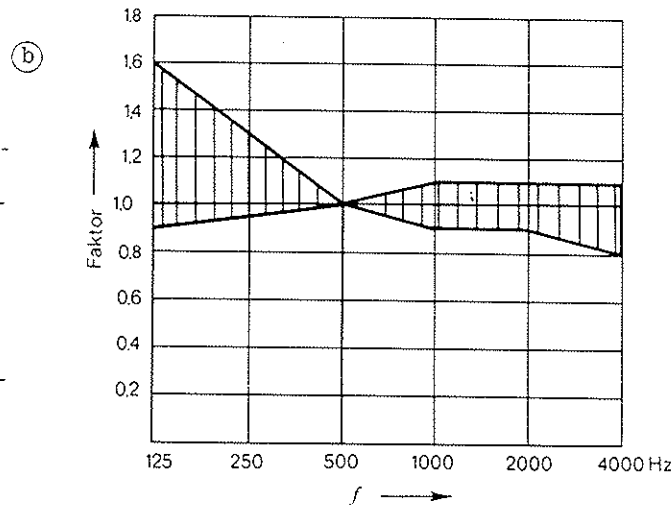
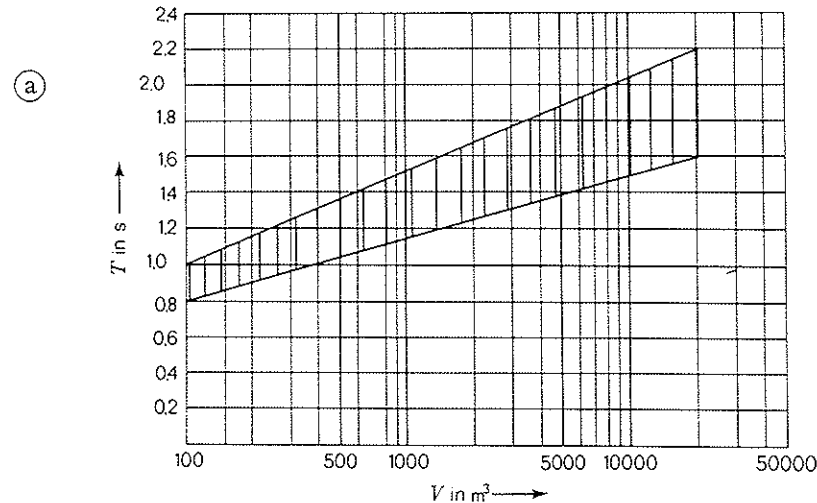


Bild 43.
a) Der Bereich optimaler Nachhallzeiten für den Frequenzbereich um 500 Hz in Räumen für Musikaufführungen.

b) Diagramm zur Ermittlung des frequenzabhängigen Verlaufes der optimalen Nachhallzeiten für Musik

Wie aber können wir die Nachhallzeiten finden, die einem Raum am besten gerecht werden? Ein fertiges Rezept gibt es dafür nicht, wir können uns die Entscheidung nur durch Orientierungshilfen erleichtern. Einige Anhaltspunkte liefert die Entwicklungsgeschichte der Musik.

Im Mittelalter beginnt sich die weltliche Musik von der geistlichen abzuheben. Während geistliche Musik nur in Kirchen aufgeführt wird, spielt man weltliche Musik meist in den relativ kleinen Musiksälen von Fürstenhäusern. Wir sehen, wie sich die raumakustischen Voraussetzungen deutlich voneinander unterscheiden.

Mit Kirchenräumen sind lange Nachhallzeiten verknüpft, dagegen tendieren die Nachhallzeiten kleiner Musiksäle immer nach niedrig liegenden Werten. Mit dem Aufkommen der Opernkunst entstehen in den Opernhäusern größere Säle für die Aufführung weltlicher Musik. Aber die großen alten Opernhäuser italienischen Ursprungs haben infolge ihrer dichten Besetzung und der Art ihrer Ausstattung auch relativ kurze Nachhallzeiten. Die weltliche Musik bis zum Ende der klassischen Periode ist also für Räume komponiert, deren Nachhallzeiten sich im Bereich niedriger Werte bewegen.

Erst in der romantischen Periode entdecken die Komponisten die Klangwirkung der weltlichen Musik in Räumen mit längeren Nachhallzeiten, möglicherweise angeregt durch die Aufführung von Instrumentalmusik in Kirchen. Ein bezeichnendes Beispiel dieser Entwicklung stellt das Bayreuther Festspielhaus dar, an dessen Gestaltung Richard Wagner bekanntlich mitgewirkt hat. Es unterscheidet sich von den älteren italienischen Opernhäusern akustisch durch die längeren Nachhallzeiten.

Wie die Musik Richard Wagners für Räume mit längeren Nachhallzeiten komponiert ist, gilt diese Tendenz allgemein für die Werke der romantischen und spätromantischen Epoche.

Die modernen Komponisten können sich nicht mehr an so feste Kategorien von Räumen anlehnen wie ihre Vorgänger. Deshalb ist noch nicht zu erkennen, ob der modernen Musik längere oder kürzere Nachhallzeiten gerecht werden oder ob für sie überhaupt eine allgemeine Tendenz vorherrscht.

Sehen wir von der modernen Musik ab, so gibt die Entwicklungsgeschichte der Musik wertvolle Hinweise für die anzustrebenden Nachhallzeiten. Doch das Problem, die richtigen Nachhallzeiten zu finden, ist damit nicht gelöst. Denn gewöhnlich werden Aufführungsräume für Musik nicht für die Aufführung von Werken bestimmter Stilepochen gebaut, in der Regel wird gefordert, daß Werke aller Stilepochen gespielt werden können. Das heißt mit anderen Worten, es müssen Kompromißlösungen gesucht werden, es sei denn, der Saal ist mit Vorrichtungen ausgerüstet, die es ermöglichen, die Nachhallzeiten innerhalb gewisser Grenzen zu verändern. Säle mit veränderbaren Nachhallzeiten sind bisher

erst wenig gebaut worden, hauptsächlich wohl wegen der damit verbundenen höheren Kosten. Doch es wäre zu begrüßen, wenn von dieser Möglichkeit mehr Gebrauch gemacht werden könnte.

Die Suche nach den besten Nachhallzeiten vor dem Hintergrund musikgeschichtlicher Entwicklungen ist als Orientierungshilfe auch aus einem anderen Grunde nicht unanfechtbar. Dabei bleibt nämlich außer acht, daß sich die Ansichten über Klangwirkungen, die der Nachhall hervorbringt, unabhängig von den Stilepochen in gewissen Grenzen auch mit der Zeit wandeln. Es gibt Beispiele von Sälen, die vor einigen Jahrzehnten gebaut wurden und deren Akustik - sprich Nachhall - heute anders beurteilt wird als kurz nach ihrer Fertigstellung. In welcher Richtung sich die Ansichten über die beste Klangwirkung ändern, ist nur schwer erkennbar. In der heutigen Zeit tendiert der allgemeine Publikumsgeschmack anscheinend zu Klangwirkungen mit längerem Nachhall.

Da in Fragen der Kunst der allgemeine Publikumsgeschmack wohl kaum als richtungweisend angesehen werden kann, bleibt kein anderer Weg, als daß wir uns selbst ein Urteil über die mit dem Nachhall verbundene Klangwirkung bilden.

Eine Möglichkeit dazu bietet das Anhören von Schallplatten über eine gute Abspielanlage. Man höre sich verschiedene Plattenaufnahmen ein- und desselben Werkes hintereinander an, dann hat man schon einen Eindruck von den Klangwirkungen verschieden langen Nachhalls. Denn jede Aufnahme stammt in der Regel aus einem anderen Raum mit anderen Nachhalleigenschaften. Auch wenn man die Nachhallzeiten der Räume nicht kennt, in denen das Werk jeweils aufgenommen wurde, so kann man davon ausgehen, daß sie für gewöhnlich im Bereich des Optimums gelegen haben.

Durch das Vergleichen der Aufnahmen miteinander kann man bald heraushören, welche aus einem Raum mit kürzeren und welche aus einem Raum mit mittleren oder längeren Nachhallzeiten stammt. Von da ist es nicht mehr schwer, sich ein eigenes Urteil über die Klangwirkungen der einzelnen Aufnahmen zu bilden. Hat ein Architekt auf diesem Wege sein klangästhetisches Empfinden geschult, kann er selbst entscheiden, ob kürzere, mittlere oder längere Nachhallzeiten die Akustik eines Saales mit seiner Architektur und seinem Verwendungszweck in Einklang bringen.

Wenn man sich bei der Planung eines Saales nach dieser Methode orientieren will, muß man sich natürlich die Aufnahmen eines solchen Werkes aussuchen, das in dem Saal auch gespielt werden könnte.

Nicht jeder hat die Gelegenheit, sich durch solche Schallplattentests selbst Hörbilder von den Klangwirkungen verschiedenen Nachhalls zu verschaffen. Als Ausweg bleibt dann noch, sich so gut es geht an Beschreibungen zu halten, in denen einige typische Merkmale bei relativ kurzen und relativ langen Nachhallzeiten aufgeführt sind. Für jeden Fall lassen sich günstige und ungünstige Merkmale anführen, wobei diese Attribute nicht immer stimmen müssen.

Bei einem Raum mit relativ kurzen Nachhallzeiten können als günstige Merkmale gelten: deutliches und klares Klangbild, auch bei schnellen Passagen heben sich die einzelnen Notenwerte noch gegeneinander ab, die Musizierenden werden als nahe bei empfunden, die allgemeine Atmosphäre wirkt intim.

Ungünstige Merkmale sind: Die Musik wirkt leicht trocken und farblos, Instrumente oder Gesangstimmen kommen nicht recht zum Klingen.

In einem Raum mit relativ langen Nachhallzeiten kann man im allgemeinen als günstige Merkmale für den Höreindruck anführen: das Klangbild hat mehr Glanz und Lebendigkeit, Musikinstrumente und Gesangstimmen entfalten sich zu einer größeren Klangfülle, im ganzen erhält die Musik einen festlicheren Charakter.

Ungünstige Merkmale sind: das Klangbild ist nicht mehr so durchsichtig und klar, die Notenwerte schneller Passagen werden nicht mehr deutlich aufgelöst (was vom Komponisten aber unbewußt beabsichtigt sein kann), die Musizierenden werden als weiter entfernt empfunden, für manche Werke erhält das Klangbild einen zu feierlichen und pathetischen Charakter.

Obgleich auch diese Beschreibungen nur ein grobes Bild von den Wirkungen verschiedener Nachhallzeiten vermitteln können, geben sie immer noch eine brauchbare Orientierungshilfe ab, wenn andere Anhaltspunkte fehlen.

Was wir bis hier über optimale Nachhallzeiten zusammengetragen haben, gilt für Räume, in denen entweder nur Sprache oder nur Musik vortragen wird. Aber nicht selten haben wir es mit Räumen zu tun, die sowohl für Sprache als auch für die Aufführung von Musik geeignet sein müssen. Das gilt z. B. für viele Theater und für die Aulen von Schulen.

In einem solchen Fall muß man sehen, daß die Nachhallzeiten für Sprache nicht zu lang und für Musik nicht zu kurz werden. Das heißt, die Nachhallzeiten müssen an der oberen Grenze der für Sprache optimalen Werte und an der unteren Grenze der für Musik liegen. Ob dabei die ei-

ne oder andere Richtung stärker betont werden kann, hängt davon ab, welcher Verwendungszweck überwiegen soll.

Gelegentlich kommt es vor, daß ein Raum nicht nur als Vortrags- und Musiksaal verwendet werden soll, sondern auch noch als Turnhalle (oder umgekehrt eine Turnhalle als Vortrags- und Musiksaal). Die optimalen Nachhallzeiten, die jede dieser Verwendungszwecke fordert - bei Turnhallen, über die wir noch nicht gesprochen haben, sollen sie sehr kurz sein - lassen sich nicht zu einem befriedigenden Kompromiß vereinigen. Von solchen Kombinationen sollte man deshalb einen Bauherrn immer abraten.

Die Innenräume von Kirchen und vergleichbare Andachtsräume können wir in Bezug auf optimale Nachhallzeiten nicht zur Gruppe der Räume zählen, in denen sowohl Musik als auch Sprache vorgetragen wird, zu der sie oberflächlich betrachtet gehören. Sakrale Handlungen erwecken einen tieferen Eindruck, wenn Worte und die Klänge der Musik von relativ langen Nachhallzeiten getragen werden.

Aber so wenig wie für Räume, in denen weltliche Musik gespielt wird, gibt es auch hier für Räume dieser Art ein exaktes Kriterium, aus dem optimale Nachhallzeiten erschlossen werden können. Wir müssen versuchen, aus dem Ablauf der religiösen Handlung vor dem Hintergrund der Kirchengeschichte, des Kirchenbaues und der Kirchenmusikgeschichte Anhaltspunkte zu gewinnen.

Ein Bereich optimaler Nachhallzeiten, der auf dieser Basis gewonnen werden kann, ist in Bild 44a und Bild 44b (nächste Seite) angegeben.

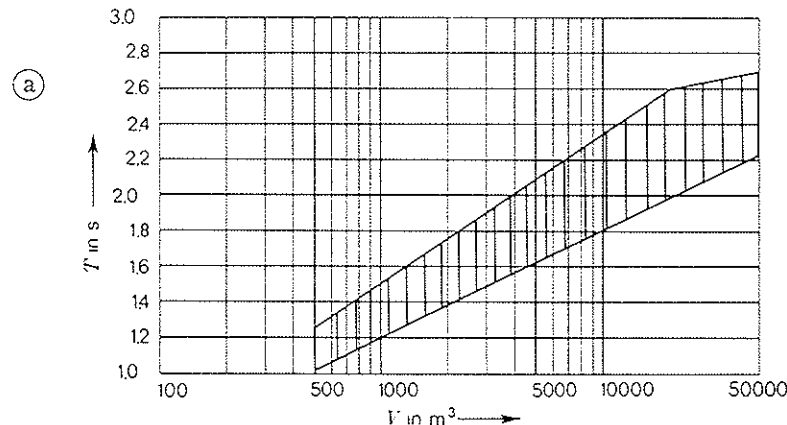


Bild 44. a) Der Bereich optimaler Nachhallzeiten für den Frequenzbereich um 500 Hz in Kirchenräumen

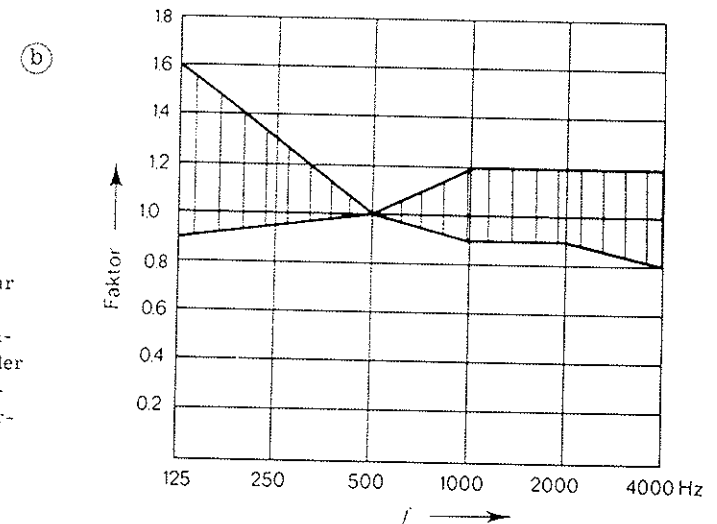


Bild 44.
b) Diagramm zur Ermittlung des frequenzabhängigen Verlaufes der optimalen Nachhallzeiten in Kirchenräumen

Welche Nachhallzeiten innerhalb des optimalen Bereiches einem Kirchenraum besonders gut angemessen sind, hängt in erster Linie davon ab, ob das Schwergewicht der Liturgie bei der Ansprache, der Predigt etwa, oder bei der Musik liegt. Im ersten Fall sollten die Nachhallzeiten möglichst nahe an der unteren Grenze der optimalen Werte liegen, um eine möglichst gute Sprachverständlichkeit zu erhalten. Bei Räumen mit Nachhallzeiten, die sich an der oberen Grenze des optimalen Bereiches bewegen, ist die Sprachverständlichkeit oft schon so gering, daß sie durch eine Lautsprecheranlage verbessert werden muß.

17. Die Verknüpfung der Nachhallzeiten mit den Raumeigenschaften

Wenn wir einem Raum seine optimalen Nachhallzeiten geben wollen, müssen wir wissen, welche seiner Eigenschaften den Wert der Nachhallzeit ausmachen. Wie Untersuchungen von verschiedenen Akustikern gezeigt haben, kann man eine einfache Zuordnung zwischen den Raumeigenschaften und der Nachhallzeit nur dann erhalten, wenn man davon ausgeht, daß die Intensität, die von den Schallrückwürfen eines Schallereignisses hervorgerufen wird, während des Nachhalls überall im Raum gleich groß ist.

Diese Bedingung wird in der Wirklichkeit nie ganz, meist aber mit ausreichender Annäherung erfüllt. Zwar durchfluten die Schallrückwürfe den ganzen Raum, aber in jedem Raumpunkt bildet sich die Gesamtintensität aus den momentanen Intensitäten der Schallrückwürfe. Da sich die Intensität jedes Schallrückwurfes im Raume ändert, schwankt auch die Gesamtintensität mehr oder weniger stark von Punkt zu Punkt im Raum.

Es ist wohl ohne weiteres einzusehen, daß sich die Intensitätsunterschiede im Raum besser ausgleichen, wenn die Schallwellen von den Raumbegrenzungen in möglichst viele Richtungen gestreut werden. Das heißt mit anderen Worten, je besser die Raumbegrenzungen den einfallenden Schall diffus zurückwerfen, desto mehr nähert sich ein Raum dem Idealzustand, für den man eine einfache Zuordnung zwischen der Nachhallzeit und den Eigenschaften des Raumes herstellen kann.

Wenn auch die Diffusität vieler Säle nicht so groß ist wie sie sein könnte und im Interesse einer guten Akustik sein sollte, führt sie doch meist an eine ausreichende Annäherung an den Idealzustand heran. Doch im Unterschied zu einem Idealraum können die Nachhallzeiten in einem realen Raum bei Messungen an verschiedenen Punkten etwas streuen.

Die Nachhallzeit kann zwar nur unter der Bedingung mit den Raumeigenschaften verknüpft werden, daß die Intensität des Nachhalls überall im Raum als gleich groß angenommen wird. Wodurch aber dieser Zustand - wenn auch nur annähernd - erreicht wird, spielt dabei keine Rolle. Daraus müssen wir schließen, daß die geometrische Gestalt des Raumes oder die geometrischen Formen der Oberflächen in die gesuchte Beziehung nicht eingehen.

Wenn nicht die geometrische Formgebung, so zeigt doch eine einfache Überlegung, daß die Größe des Raumes zur Nachhallzeit in Beziehung stehen muß. Denn je länger die Wege sind, die die Schallrückwürfe durchschnittlich zurücklegen, bis sie auf die nächste Raumbegrenzung auftreffen, um so langsamer klingt der Nachhall ab, d. h. um so größer ist die Nachhallzeit. Der einfachste Ansatz, der diese Tendenz formal ausdrückt, besteht darin, die Nachhallzeit dem Raumvolumen proportional zuzuordnen.

Die Oberflächen aller Raumbegrenzungen beeinflussen den Nachhall durch die Eigenschaft der Schallschluckung, durch die jede Raumbegrenzung den einfallenden Schallwellen einen mehr oder weniger großen Bruchteil an Schallenergie entzieht. Größtenteils wird dabei die einfallende Schallenergie in Wärme umgesetzt, einen Vorgang, den man in der Physik mit Absorption bezeichnet.

Die Schallschluckeigenschaften von Raumbegrenzungen hängen von der Beschaffenheit ihrer Oberflächen ab. In der Regel haben wir es in einem Raum mit sehr verschiedenartigen Oberflächenstrukturen zu tun, die den Schall deshalb verschieden stark geschwächt zurückwerfen. Da wir jedoch von der Voraussetzung ausgehen, daß die Gesamtintensität der Schallrückwürfe überall im Raum gleich groß ist, müssen wir annehmen, daß sich diese Unterschiede ausgleichen, so daß wir nur die Gesamtwirkung in Ansatz bringen können.

Die Summe der Schluckwirkungen aller Raumbegrenzungen faßt man durch den Begriff "Gesamtabsorption" A_0 zusammen. Wie man sie ermittelt, soll noch behandelt werden, zuvor wollen wir uns über den Einfluß klar werden, den sie auf die Nachhallzeit ausübt. Wir können ihn leicht abschätzen: je mehr Energie den Schallrückwürfen insgesamt entzogen wird, je größer also die Gesamtabsorption ist, um so rascher klingt der Nachhall ab, um so kürzer wird also die Nachhallzeit. Diese Tendenz können wir dadurch am einfachsten ausdrücken, daß wir die Nachhallzeit dem Kehrwert der Gesamtabsorption proportional setzen.

Mit dem Raumvolumen und der Gesamtabsorption haben wir schon alle Raumeigenschaften erfaßt, aus denen sich die Größe der Nachhallzeit bildet. Die Tendenzen, in der sie die Nachhallzeit beeinflussen, können wir aus den beiden Ansätzen zu einer Formel vereinigen, die dann lauten muß:

$$T = k \frac{V}{A_0}$$

Der Faktor k ist eine Proportionalitätskonstante.

Diese Formel ist zuerst von Sabine angegeben worden, man nennt sie ihm zu Ehren deshalb auch die "Sabinesche Formel". Sabine hat sie durch Probieren gefunden. Später konnte man ihre Richtigkeit auch theoretisch begründen, dabei erhielt man einen genauen Zahlenwert für die Proportionalitätskonstante.

Danach erhalten wir schließlich die Nachhallzeit in Sekunden, wenn das Volumen V in m^3 ausgedrückt und die Gesamtabsorption A_0 durch eine Fläche in m^2 angegeben wird, die den einfallenden Schall vollständig schlucken würde:

$$\text{Nachhallzeit } T = 0.163 \frac{V}{A_0} \text{ in s}$$

V = Raumvolumen in m^3

A_0 = Gesamtabsorption in m^2 .

Für das T in dieser Formel müssen die Werte der optimalen Nachhallzeiten eingesetzt werden, diese lassen sich erst ermitteln, wenn das Volumen des Raumes schon feststeht. Damit bleibt als einzige Raumeigenschaft die Gesamtabsorption, über die sie dem Raum gegeben werden können.

Mit Hilfe der Sabineschen Formel können wir die erforderlichen Gesamtabsorptionen leicht ausrechnen. Doch nicht nur zur Erleichterung der Rechenarbeit, wir erhalten auch einen anschaulicheren Begriff von der Zuordnung, die zwischen der Nachhallzeit und der Gesamtabsorption besteht, sobald wir den funktionalen Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen graphisch darstellen.

Wenn wir dabei nicht nach der üblichen Methode vorgehen und linear geteilte Skalen auf den Koordinatenachsen verwenden, sondern logarithmisch geteilte Skalen, wird der Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit und der Gesamtabsorption durch eine fallende Gerade wiedergegeben. Wird auf der Abszisse des Koordinatensystems die Gesamtabsorption und auf der Ordinate die Nachhallzeit abgetragen, so erhält man zwei Punkte der Geraden, indem man über zwei beliebigen Gesamtabsorptionen die zugehörigen Nachhallzeiten absetzt.

Als Beispiel ist in dem Koordinatensystem des Bildes 45 der funktionale Zusammenhang zwischen der Nachhallzeit und der Gesamtabsorption für ein Raumvolumen von 1000 m^3 eingezeichnet. Einen Punkt der gesuchten Geraden findet man, indem man die Gesamtabsorption A_0 beispielsweise gleich 100 m^2 setzt, dazu gehört eine Nachhallzeit von $1,63 \text{ s}$, für einen zweiten Punkt kann man etwa A_0 zu 1000 m^2 annehmen, die hierzu gehörende Nachhallzeit beträgt $0,163 \text{ s}$. Über die Gerade, die man durch Verbinden der beiden Punkte erhält, kann man nun für ein Raumvolumen von 1000 m^3 zu jeder Nachhallzeit die erforderliche Gesamtabsorption finden und umgekehrt.

Der Nutzen dieser graphischen Darstellung besteht nicht nur darin, daß man die zu einer beliebigen Nachhallzeit gehörende Gesamtabsorption einfach ablesen kann, es läßt sich auch noch mit einem Blick übersehen, wie sich die Nachhallzeit mit der Gesamtabsorption ändert.

Ein Raum mit wenigen Schallschluckern, ein noch nicht fertiggestellter Saal etwa mit kahlen Wänden, glatter Decke und ohne Einrichtung, hat eine entsprechend hohe Nachhallzeit. In einem solchen Raum braucht man nur wenige Schallschlucker hineinzubringen, dann sinkt seine Nachhallzeit schon merklich ab.

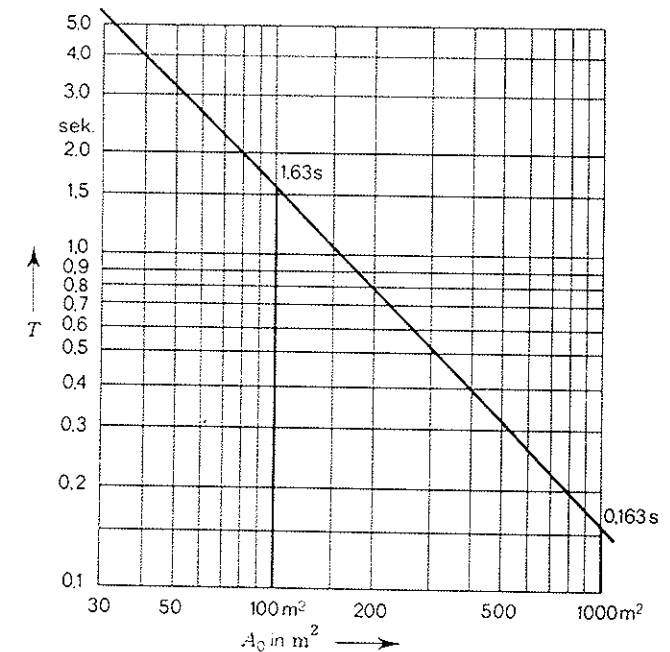


Bild 45. Graphische Darstellung der Zuordnung zwischen der Nachhallzeit T und der Gesamtabsorption A_0 eines Raumes mit einem Volumen von $V = 1000 \text{ m}^3$

Unser Raum mit einem Volumen von 1000 m^3 z. B. präsentiert sich bei einer Gesamtabsorption von 30 m^2 mit einer Nachhallzeit von ca. $5,5 \text{ s}$. Wird die Gesamtabsorption durch Hineinbringen einiger Schallschlucker um 10 m^2 auf 40 m^2 erhöht, sinkt die Nachhallzeit auf rund 4 s , d. h. um $1,5 \text{ s}$.

Hat der gleiche Raum aber schon eine Gesamtabsorption von 100 m^2 und wird diese ebenfalls um 10 m^2 auf 110 m^2 vergrößert, so verringert sich die Nachhallzeit nur von $1,63 \text{ s}$ auf $1,48 \text{ s}$, also um $0,15 \text{ s}$.

Wir können den Sachverhalt, der sich aus dieser Gegenüberstellung ergibt, ohne weiteres verallgemeinern und uns merken, daß die Nachhallzeit eines Raumes um so weniger von Änderungen der Gesamtabsorption beeinflusst wird, je kleiner ihr Wert ist.

Nachdem wir nun den Einfluß der Gesamtabsorption auf die Nachhallzeit kennengelernt und gesehen haben, daß man die Nachhallzeiten eines Raumes praktisch nur über diese Raumeigenschaft regulieren kann, müssen wir uns darüber klar werden, wie man sie ermittelt.

Sabine deutet den Begriff der Gesamtaborption anschaulich als eine Fläche, die jeden aus beliebiger Richtung einfallenden Schall schluckt, wie etwa die Fläche eines geöffneten Fensters. Diese Auffassung kann auch auf jeden einzelnen Raumbegrenzungs- teil mit einheitlicher Struktur angewandt werden.

Nach dieser Betrachtungsweise bezeichnet der Schluckgrad α des Materials einer Fläche einen Faktor, der mit der geometrischen Flächen- gröÙe multipliziert das vollständig schallschluckende Flächenstück an- gibt, das die gleiche Schluckwirkung hervorrufen würde. Dies so errech- nete Flächenstück wird mit "Absorption" A bezeichnet, dieses Wort erhält hier also eine ganz spezielle Bedeutung.

Die Absorption einer Fläche mit dem Schluckgrad α und der Fläche S in m^2 ist demnach:

$$A = \alpha S \text{ in } \text{m}^2.$$

In dem vorangegangenen 13. Kapitel war der Schluckgrad als das Ver- hältnis der absorbierten Intensität zur Intensität der einfallenden Welle definiert worden. So allgemein ausgedrückt gilt diese Definition auch für den Begriff des Schluckgrades, wie Sabine ihn auffaßt. Doch im 13. Kapitel bezog sich die Definition nur auf eine Schalleinfallsrichtung, während sich der Schluckgrad nach Sabine auf die Schluckwirkung über alle Einfallsrichtungen erstreckt. Beide Schluckgradgrößen lassen sich nicht exakt ineinander überführen. Bei den Schluckgradwerten, die für die Anwendung in der Praxis angegeben werden, ist fast immer der Schluckgrad im Sinne Sabines gemeint. Gelegentlich wird das noch da- durch gekennzeichnet, daß man das α mit dem Index "S" versieht, al- so α_S schreibt.

Die Absorptionen aller Teilflächen mit verschiedenen Oberflächenstruk- turen, aus denen die Wände, der Fußboden und die Decke eines Raumes bestehen, bilden einen Teil der Gesamtaborption des Raumes.

Für einige Arten von Raumbegrenzungen würde es Schwierigkeiten be- reiten, ihre Absorption als Produkt aus dem Schluckgrad und ihrer Oberfläche darzustellen. Das gilt in erster Linie für die Personen, die sich in dem Raum aufhalten, aber auch für Stühle, Tische und derglei- chen, kurzum für Schallschlucker, die stärker in den Raum hineinragen und in mehreren Einheiten auftreten.

Bei diesen Schallschluckern ist es vielfach zweckmäßiger, die Schluck- eigenschaft jeder Einheit durch ein vollständig schallschluckendes Flä- chenstück auszudrücken, das als einheitsbezogener Schluckgrad α' be- zeichnet wird.

Multiplizieren wir den Schluckgrad α' einer Einheit, die schon die Di- mension m^2 hat, mit der Zahl n dieser Einheiten, die der Raum enthält, dann erhalten wir deren Absorption:

$$A = \alpha' \cdot n \text{ in } \text{m}^2.$$

Die Absorptionen der verschiedenen Sorten von Einheiten zusammenge- zählt kommen zu der Summe der von Wand-, Decken- und Fußbodenflä- chen gebildeten Absorptionen hinzu, so daß wir schließlich für die Ge- samtaborption erhalten:

$$A_0 = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha'_1 n_1 + \alpha'_2 n_2 + \alpha'_3 n_3 + \dots \text{ in } \text{m}^2.$$

Wenn wir die Schluckgrade aller Raumbegrenzungen ken- nen, können wir nach dieser Formel die Gesamtaborption eines Raumes ausrechnen.

18. Die Anwendung der Sabineschen Formel in der Praxis

Die Sabinesche Formel ist so einfach gebaut, daß es auf den ersten Blick sehr leicht zu sein scheint, die Nachhallzeiten eines Raumes praktisch zu ermitteln. Sobald wir sie jedoch anwenden und Raumvolumen und Ge- samtaborption ausrechnen wollen, tauchen verschiedene Probleme auf.

Beim Ausrechnen des Raumvolumens stoßen wir sogleich auf die Frage, was als Raumvolumen anzusehen ist.

Wir können uns dazu merken: als Raumvolumen gilt der Luftraum des leeren Raumes, Unterzüge, Träger oder Pfeiler, die genau genommen den Luftraum verkleinern, werden nicht abgezogen.

In vielen größeren Sälen entstehen durch Logen oder Ränge kleine Teil- räume. Ihre Volumina werden nicht zum Volumen des Hauptraumes hin- zugeschlagen, sondern die Flächen, die sie mit dem Hauptraum verbind- en, gehen als schallschluckende Flächen in die Gesamtaborption ein.

Nach diesen Hinweisen zeichnet sich schon genügend ab, was wir prak- tisch unter dem Raumvolumen in der Sabineschen Formel zu verstehen haben. Bei kritischer Betrachtung der angegebenen Regeln können wir

noch den Schluß ziehen, daß es keinen Sinn hat, den Wert des Raumvolumens überaus genau zu bestimmen.

Beim Zusammenstellen der Gesamtaborption treten Unklarheiten und Schwierigkeiten auf, die wir nicht so leicht beseitigen können wie beim Raumvolumen. Hier steckt überhaupt eine Unsicherheit, welche die Vorausberechnung der Nachhallzeit mit Hilfe der Sabineschen Formel in sich birgt.

Zum Ausrechnen der Gesamtaborption müssen wir die Schluckgrade aller Raumbegrenzungen kennen. In der Praxis taucht bei fast jedem Raum das Problem auf, für einige seiner Begrenzungen den richtigen Schluckgradwert zu finden. Hierauf müssen wir näher eingehen, doch vorher wollen wir noch eine Unklarheit beseitigen, die beim Aufmessen der Flächen von großflächigen Raumbegrenzungen entstehen kann. Solange es sich dabei um ebene Flächen handelt, gibt es keinen Zweifel darüber, wie die Flächen auszumessen sind. Anders jedoch, wenn es sich um Flächen mit größeren Unebenheiten handelt. Für solche Fälle gilt als Regel, daß eine Fläche mit Unebenheiten von weniger als etwa 1 m Tiefe noch so aufgemessen wird als ob die Unebenheiten nicht vorhanden wären.

Das Volumen eines Raumes und die Flächen seiner Begrenzungen erhalten wir durch Ausmessen der Dimensionen. Wie aber kommen wir zu den Schluckgraden der verschiedenen Raumbegrenzungen?

Viele akustische Laboratorien bemühen sich, durch Messungen an Proben die Schluckgrade von Materialien und Körpern zu ermitteln, die in Räumen der verschiedensten Art anzutreffen sind. Die Ergebnisse lassen sich in Tabellen zusammenstellen, wie dies in Tabelle 1 geschehen ist.

Was aber soll man bei Raumbegrenzungen tun, deren Schluckgrade man nicht in dieser Tabelle und auch sonst nirgends angegeben findet? In solchen Fällen muß man sie schätzen, man orientiert sich dabei an Raumbegrenzungen ähnlicher Art, deren Schluckgrade bekannt sind.

Auf diese Weise erhält man zwar keine sehr genauen Ergebnisse, aber auch die aus Messungen hervorgegangenen Ergebnisse enthalten eine gewisse Unsicherheit. Einmal stimmen die Proben, die bei der Messung verwendet wurden, in ihrer Struktur nicht genau mit dem überein, was in der Praxis erscheint, zum anderen werden die Schluckgrade im Laboratorium unter Bedingungen gemessen, die dem akustischen Idealzustand eines Raumes sehr nahe kommen.

Die normalen Räume weichen von diesem Idealzustand im allgemeinen stärker ab, deshalb entspricht die Schluckwirkung einer Raumbegrenzung nicht immer dem Wert, den sie auf Grund der Laboratoriumsmessung aufweisen müßte.

In der Tabelle 1 beziehen sich die Schluckgrade eines Elementes auf die Oktavbereiche, deren Mittelfrequenzen in der ersten Tabellenzeile stehen. Überblicken wir das Schluckgradverhalten der Elemente, die in dieser Tabelle aufgeführt sind, so sehen wir, daß sich nicht nur die Schluckgrade der verschiedenen Materialien und Körper wesentlich voneinander unterscheiden können, sondern daß sich die Schluckgrade eines Elementes auch sehr stark mit der Frequenz ändern können.

Wie sich eine Raumbegrenzung als Schallschlucker verhält, können wir nur verstehen, wenn wir uns über das Zustandekommen der Schallschluckwirkung klar werden. Doch bevor wir darauf näher eingehen, müssen wir eine Gruppe von Schallschluckern besonders herausstellen, die in jedem Raum einen großen, oft sogar dominierenden Anteil an der Gesamtaborption ausmacht: es sind die Personen, die sich in dem Raum als Zuhörer oder Akteure aufhalten.

Wir sollten uns merken: die Bodenfläche, die in einem normalen, für öffentliche Veranstaltungen bestimmtem Saal von den Zuhörern, dem Orchester oder Chor eingenommen wird, stellt in erster Näherung eine vollständig schallschluckende Fläche dar.

Die Absorptionen dieser Raumbegrenzungen können wir genau ausrechnen, wenn wir deren Schluckgrade kennen. Bei den Bemühungen, diese Werte zu ermitteln, hat es aber unangenehme Überraschungen gegeben, es hat sich nämlich gezeigt, daß die Schluckgrade a' je Person verschieden große Werte annehmen können.

Schon innerhalb eines Saales ändern sie sich mit dem Grad der Besetzung. Bei einem halb besetzten Saal, bei dem die anwesenden Zuhörer über die ganze Sitzplatzfläche verteilt sitzen, erreicht der Schluckgrad je Person einen höheren Wert als wenn der Saal voll besetzt ist. Das heißt aber, daß sich die Absorption der von Zuhörerplätzen besetzten Fläche zwischen halber und voller Besetzung nur wenig ändert und mithin die Nachhallzeiten auch nahezu gleich groß bleiben.

Tabelle 1a.

I. Schluckgrade α normaler Raumbegrenzungsflächen						
Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Sichtbeton, glattes Mauerwerk, Wasseroberfläche (Schwimmbad)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04
Putz auf Mauerwerk oder Beton	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Betonfußboden mit Deckenaufträgen aus Linoleum, PVC oder Gummi	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,01
Abgehängte Putz- oder Gipsplattendecke, entsprechende Leichtbauwände	0,25	0,2	0,1	0,05	0,05	0,10
Decke aus Holzdielen, 2,5 cm dick	0,24	0,2	0,14	0,12	0,10	0,12
Holzfußboden auf Lagerhölzern, lackiert oder versiegelt	0,2	0,15	0,14	0,10	0,05	0,05
Parkett auf Blindboden	0,20	0,15	0,10	0,10	0,05	0,1
Aufgeklebtes Parkett	0,04	0,04	0,06	0,12	0,10	0,15
Holztür	0,20	0,15	0,10	0,08	0,09	0,11
Geschlossene Fenster	0,10	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02
Kokosläufer	0,02	0,03	0,05	0,10	0,25	0,45
Teppich, 5 mm dick (mittel)	0,05	0,05	0,20	0,30	0,50	0,55
Veloursteppich	0,05	0,06	0,10	0,25	0,40	0,60
5 mm dicker Teppich mit 5 mm dicker Filzunterlage	0,07	0,20	0,55	0,65	0,80	0,70
Baumwollstoff, glatt an Wand anliegend	0,04	0,05	0,13	0,20	0,32	0,40
Naturfilz, 5mm dick	0,09	0,12	0,18	0,30	0,55	0,60
Glatter Stoffvorhang, im Mittel	0,10	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50
Faltiger, dicker Vorhang	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70
Kino-Bildschirm	0,10	0,10	0,20	0,30	0,50	0,60
Bühne ohne Vorhang (Richtwerte)	0,20	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50

Tabelle 1a Fortsetzung.

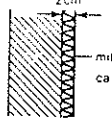
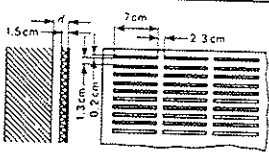
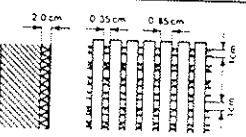
II. Schluckgrade α schallschluckender Materialien und Anordnungen						
Material und Aufbau	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Platten aus kunstharzgebundenen Mineralwollfasern, mit poröser Oberfläche, 2 cm dick; Raumgew. ca 100 g/dm ²						
a) unmittelbar an Wand oder Decke geklebt	0,05	0,20	0,65	1,00	1,10	1,00
b) auf Lattenrost mit 2,2 cm Abstand	0,10	0,35	0,85	1,10	1,10	1,00
c) mit 20 cm Abstand	0,50	0,95	0,85	0,90	0,95	0,80
Desgl., aber mit wenig poröser Oberfläche, auf Lattenrost mit 2,5 cm Abstand	0,15	0,5	0,3	0,2	0,2	0,2
Holzfaser-Leichtspanplatten (300 g/dm ²) mit poröser Oberfläche, 2 cm dick						
a) unmittelbar an Wand oder Decke geklebt	0,05	0,18	0,6	0,85	0,55	0,6
b) auf Lattenrost mit 5 cm Abstand	0,15	0,55	0,75	0,5	0,55	0,6
Desgl., aber mit wenig poröser Oberfläche, auf Lattenrost mit 5 cm Abstand	0,25	0,3	0,15	0,1	0,05	0,2
Holzfaser-Leichtspanplatten (400 g/dm ²) regelmäßig gelocht, 1,5 cm dick						
a) unmittelbar an Wand oder Decke geklebt	0,05	0,2	0,5	0,8	0,85	0,7
b) auf Metallkonstruktion in 20 cm Abstand	0,5	0,4	0,55	0,8	0,85	0,7
Mineralwoll-Platten oder Filze, Raumgewicht ca 50 g/dm ² , mit Abdeckung						
a) 	0,1	0,3	0,6	0,75	0,7	0,55
b) 						
Abstand d zwischen Wand und Abdeckung:						
d = 2,5 cm	0,05	0,25	0,75	1,1	0,9	0,45
d = 5,0 cm	0,1	0,35	1,0	1,1	0,85	0,5
c) 						
d = 20 cm	0,1	0,18	0,5	0,82	0,75	0,65

Tabelle 1a Fortsetzung.

Material und Aufbau	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Mineralwoll-Platten oder Filze mit Raumgew. 50 g/dm ³ , ohne Abdeckung unmittelbar an Wand oder Decke 3,0 cm dick 5,0 cm dick	0,15 0,2	0,35 0,55	0,7 1,1	1,1 1,2	1,0 1,2	0,95 1,1
Dünne Platten (ca 1 cm) mit Löchern oder Schlitzfen, mit Wand- bzw. Deckenabstand d montiert a) Lochplatte mit versetzten Löchern von 0,8 und 1,2 cm \varnothing , Lochmittenabstand 3,6 cm, mit Faservlies hinterlegt Abstand $d = 5$ cm Abstand $d = 10$ cm	0,05 0,1	0,15 0,4	0,7 0,85	0,7 0,5	0,3 0,35	0,25 0,25
b) Gleiche Platte wie a), mit ca 3 cm Mineralwollfilz hinterlegt Abstand $d = 5$ cm Abstand $d = 45$ cm	0,25 0,8	0,75 0,8	0,85 0,75	0,7 0,75	0,45 0,6	0,4 0,55
c) Schlitzplatte, Schlitz in nebeneinander liegenden Reihen, Schlitzlänge 4 cm, Schlitzbreite 0,25 cm, Schlitzabstand 1,3 cm, Reihenabstand 5 cm, mit Faservlies hinterlegt Abstand $d = 5$ cm Abstand $d = 10$ cm	0,05 0,1	0,15 0,25	0,6 0,65	0,55 0,4	0,25 0,3	0,25 0,3
d) Gleiche Platte wie c), mit ca 3 cm Mineralwollfilz hinterlegt Abstand $d = 5$ cm Abstand $d = 10$ cm	0,1 0,25	0,55 0,8	1,1 0,95	0,75 0,75	0,45 0,45	0,3 0,3
Holzwohle-Leichtbauplatten, unmittelbar an Wand oder Decke befestigt Plattendicke 2,5 cm Plattendicke 3,5 cm Plattendicke 5,0 cm	0,05 0,08 0,1	0,1 0,2 0,35	0,5 0,7 0,9	0,75 0,7 0,6	0,6 0,65 0,8	0,7 0,7 0,7
Holzwohle-Leichtbauplatten mit 2,5 cm Plattendicke, mit Wand- bzw. Deckenabstand d montiert Abstand $d = 2,5$ cm Abstand $d = 5$ cm Abstand $d = 8$ cm	0,1 0,15 0,3	0,2 0,35 0,55	0,65 0,55 0,45	0,5 0,4 0,45	0,7 0,75 0,7	0,8 0,75 0,75
Schale aus Hochlochziegeln, 1/4 Stein, ca 6 cm vor fester Wand, Löcher von Vorder- zur Rückseite durchgehend, im Hohlraum Mineralwollfilz	0,15	0,65	0,45	0,45	0,4	0,7

Tabelle 1a Fortsetzung.

Material und Aufbau	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Holzspanplatte (600 g/dm ³), 8 mm dick, auf Latenrost mit Wandabstand $d = 3$ cm, mit 2 cm Mineralwollfilz hinterlegt (mitschwingende Platte)	0,45	0,25	0,04	0,01	0,01	0,0
Gipskartonplatte, 1,0 cm dick, ungelocht, Wandabstand $d = 5$ cm	0,32	0,07	0,05	0,05	0,05	0,08
Sperrholz, 0,35 cm dick, ungelocht, Wandabstand $d = 5$ cm, mit Mineralwollfilz hinterlegt	0,21	0,37	0,24	0,12	0,02	0,08
Holzspanplatte, 2,2 cm dick, gelocht, Lochdurchmesser 1,0 cm, Lochabstand 12,5 cm, Wandabstand $d = 5$ cm, hinterlegt mit 3 cm Mineralwollfilz	0,41	0,15	0,0	0,03	0,08	0,12

Von Raum zu Raum schwanken die Schluckgrade je Person bei gleicher Besetzung nur wenig, solange auf jeden Zuhörerplatz ein etwa gleich großer Anteil des Raumvolumens kommt und die Nachhallzeiten sich nicht allzusehr voneinander unterscheiden. Die in der Tabelle 1b zuerst angegebenen Werte gelten für einen Bereich von etwa 4 bis 8 m³ Raumvolumen je Zuhörerplatz bei Nachhallzeiten zwischen etwa 0,8 und 2,2 s, sie beziehen sich auf den voll besetzten Saal.

In Räumen, in denen auf einen Zuhörerplatz ein größeres Raumvolumen kommt, und deren Nachhallzeiten auf höhere Werte ansteigen - Verhältnisse, auf die man in großen Kirchen mit hohen Decken trifft - entspricht die Schluckwirkung einer Person höheren Schluckgraden. In der Tabelle 1b sind für solche Fälle Richtwerte angegeben.

Tabelle 1b.

Art der Einheit	Schluckgrade α in m ² je Einheit					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Zuhörer, sitzend	0,15	0,30	0,45	0,45	0,45	0,45
Gepolstertes Gestühl, unbesetzt, (Durchschnittswerte)	0,15	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40
Mit Kunstleder bezogenes Gestühl, unbesetzt (Durchschnittswerte)	0,1	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Holzgestühl, Sperrholz, unbesetzt (Durchschnittswerte)	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
Zuhörer in sehr halligen Räumen (Kirchen u. ä.) im Durchschnitt	0,65	0,75	0,85	0,95	0,95	0,80

Ob die vorausberechneten Nachhallzeiten eines Saales ausreichend mit denen übereinstimmen, die man nachher in ihm mißt, hängt sehr wesentlich davon ab, wie weit die Rechenwerte der Schluckgrade je Person mit ihren wahren Werten in dem Saal übereinstimmen. Da die Absorption der Personen in einem Saal mit so großem Gewicht in seine Gesamtaborption eingeht, wirkt sich eine größere Abweichung vom wahren Wert empfindlich auf den Rechenwert der Nachhallzeit aus.

Die Unsicherheit, welche die berechnete Nachhallzeit hierdurch erhält, wird durch den Schluckgrad α je Person verursacht. Man muß sich deshalb fragen, ob und wie weit es sinnvoll ist, die Absorption vieler Personen auf die Absorptionswirkung einer Person zurückzuführen.

Bei Untersuchungen an Schallschluckern verschiedener Art ist festgestellt worden, daß die Schluckwirkung immer über ihren geometrischen Rand hinausreicht. Diese Erscheinung erklärt es auch, daß sich die Absorption der Zuhörer zwischen einem halb und voll besetzten Saal kaum ändert, wenn die Zuhörer nur über alle Plätze verteilt sitzen.

Aus diesem Sachverhalt müssen wir schließen, daß sich die Absorption vieler Personen nicht einfach aus der Summe der Schluckgrade je Person bildet. Auf diese Annahme aber stützt sich die Berechnung nach der bisherigen Methode, die daher auch nicht vollkommen befriedigen kann. Der amerikanische Akustiker Leo L. Beranek hat sich sehr bemüht eine zuverlässige Methode zu finden. Als Ergebnis seiner Untersuchungen an mehreren amerikanischen Konzertsälen kommt er in seinem Werk "Music, Acoustics and Architecture" *) zu folgendem Schluß: "Die Absorptionswirkung besetzter Zuhörerplätze, eines Chores oder Orchesters wächst in einem großen Konzertsaal proportional mit der Bodenfläche, die sie bedecken, sie ist nahezu unabhängig von der Zahl der besetzten Plätze (gleichmäßige Verteilung der Personen vorausgesetzt)".

Mit anderen Worten heißt das, nicht die Summe der Schluckgrade je Person ergibt die Absorption der Personen in einem Saal, sie kommt vielmehr wie bei Wänden und Decken zustande, nämlich durch das Produkt der Bodenfläche, die von den Plätzen der Zuhörer, des Chores oder Orchesters bedeckt wird, mit einem Schluckgrad α . Die Schluckgrade α , die hierbei - nach Beranek - anzusetzen sind, enthält die Tabelle 2. Einbezogen in die Fläche für diese Absorption werden Gänge bis zu einer Breite von etwa 1 m.

*) Verlag John Wiley & Sons, New York, London

Tabelle 2. Schluckgrade α für die von Zuhörern, Orchester oder Chor bedeckte Fläche (nach Beranek).

Art der Bedeckung	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Fläche von Zuhörern, Orchester und Chor, bei voller Besetzung	0,52	0,68	0,85	0,97	0,93	0,85
Stoffgepolstertes Gestühl, unbesetzt	0,44	0,60	0,77	0,89	0,82	0,7
Ledergepolstertes Gestühl, unbesetzt	0,4	0,5	0,58	0,61	0,58	0,5
Holzgestühl, unbesetzt	0,42	0,21	0,06	0,05	0,04	0,04

Soweit es sich zur Zeit übersehen läßt, gibt die von Beranek vorgeschlagene Methode einen zuverlässigen Wert für die Absorption aller Personen in einem Saal, jedenfalls soweit es sich um Konzertsäle oder Säle mit gleichen Besetzungsverhältnissen handelt (0,5 bis 0,8 m² Bodenfläche je Zuhörerplatz).

Wir haben gesehen, daß die Absorption der in einem Raum anwesenden Personen großen Einfluß auf die Gesamtaborption und damit auf die Nachhallzeit ausübt. Ist ein Raum unbesetzt, fehlt die Schallschluckwirkung durch die Personen, d.h. gegenüber dem besetzten Raum liegt die Gesamtaborption beim leeren Raum niedriger und damit die Nachhallzeit höher. Wir müssen in der Gesamtaborption den von den Personen herrührenden Anteil durch die Absorption der leeren Sitze ersetzen.

Die Absorption der leeren Sitze wird ebenso ausgerechnet wie die der Personen, und was wir dort über die Methode gesagt haben, gilt auch hier. Da in der Praxis sehr verschiedenartige Sitze verwendet werden, kann man als Schluckgrade nur Durchschnittswerte für einzelne Typen angeben.

Ein Gestühl, das nur wenig Schallenergie schluckt, ein Holzgestühl etwa, läßt die Nachhallzeiten des leeren Saales gegenüber dem besetzten stark ansteigen. Diese Erscheinung kann als unangenehm empfunden werden, wenn in dem Saal geprobt wird oder wenn er nur mit sehr wenigen Zuhörern besetzt ist.

Solche Unterschiede können durch stärkere schallschluckende Sitze gemildert werden. Gepolsterte Sitze besitzen neben der größeren Bequemlichkeit auch diesen Vorzug. Um ohne größere Unkosten die Schallschluckwirkung eines einfachen Holzgestühls zu steigern, ist vorgeschlagen worden, unter die Sitzflächen oder hinter die Rücklehnen Schallschluckstoffe anzubringen. Diese Vorschläge sind aber bisher nur selten verwirklicht worden.

19. Die Wirkungsweise von Raumbegrenzungen als Schallschlucker

Die Akustik eines Raumes kann man nur fachgerecht gestalten oder beurteilen, wenn man die Schluckwirkung der verschiedenen Raumbegrenzungen abschätzen kann, ohne die Werte der Schluckgrade schon zu kennen. Dazu muß man aber wissen, wie und wodurch eine Schallschluckwirkung zustande kommen kann.

Alle die Raumbegrenzungen, die einen nennenswerten Beitrag zur Gesamtaborption eines Raumes liefern, schlucken den Schall, indem sie einen mehr oder weniger großen Teil der einfallenden Schallenergie durch Reibung in Wärme umsetzen. Dieser Vorgang kann durch zwei verschiedenartige Effekte hervorgerufen werden. Danach können wir, etwas vergrößert betrachtet, die Raumbegrenzungen in zwei Gruppen einteilen. Es gibt aber auch Raumbegrenzungen, bei denen beide Effekte wirksam sein können.

Zur ersten Gruppe gehören alle Raumbegrenzungen mit einer porösen Struktur, wie z. B. Vorhänge, Teppiche, Polsterungen, Bekleidung von Personen und die meisten von der Industrie angebotenen Schallschluckmaterialien. Man pflegt Raumbegrenzungen dieser Art als "poröse Schallschlucker" zu bezeichnen. Wie diese Bezeichnung schon vermuten läßt, kommen die Reibungseffekte in den Poren dieser Stoffe zustande.

Wenn die Bewegungen der Luftmoleküle, durch den sich eine Schallwelle ausbreitet, die Poren erreicht, entstehen in den engen Kanälen Luftströmungen mit rasch wechselnden Richtungen. Physikalisch betrachtet handelt es sich bei diesen Reibungseffekten also um Strömungsvorgänge in engen Kanälen. Wir müssen deshalb vermuten, daß zwischen dem Strömungswiderstand, den ein poröser Stoff beim Hindurchströmen eines gleichmäßig fließenden Luftstromes bietet, und den bei Schallschwingungen auftretenden Reibungseffekten ein Zusammenhang besteht.

Ist dieser Strömungswiderstand sehr groß, wird die Schallwelle nicht sehr tief in den Stoff eindringen können, ist er sehr klein, entstehen nur relativ schwache Reibungseffekte.

Wie physikalische Untersuchungen gezeigt haben, besteht in der Tat ein solcher Zusammenhang. Die Schallschluckwirkung - und mithin der Schluckgrad - erreicht zwischen großem und kleinem Strömungswiderstand ein Maximum.

Als Einheit des Strömungswiderstandes wird gewöhnlich das "Rayl" (nach Lord Rayleigh) benutzt. Bei seiner Definition geht man davon aus, daß infolge eines Druckunterschiedes Δp zwischen Vor- und Rückseite einer porösen Schicht ein Luftstrom mit der Geschwindigkeit v durch sie hindurchströmt. Das Verhältnis des Druckunterschiedes Δp zur Strömungsgeschwindigkeit v wird als Strömungswiderstand r definiert.

Eine poröse Schicht besitzt einen Strömungswiderstand von 1 Rayl, wenn bei einem Druckunterschied von 1 mb zwischen ihrer Vor- und Rückseite eine Luftströmung von 1 cm/s durch die Schicht entsteht.

Poröse Stoffe erreichen eine maximale Schluckwirkung bei Strömungswiderständen zwischen 80 und 160 Rayl.

Doch in die Schallschluckeigenschaften eines porösen Schallschluckers geht nicht allein der Strömungswiderstand ein, eine wesentliche Rolle spielt daneben die Dicke der porösen Schicht. Das hängt damit zusammen, daß beim Auftreffen einer Schallwelle auf einen anderen Stoff immer auch die Reflexion einsetzt. An einem Reflexionspunkt kommt die Bewegung der Luftmoleküle vollkommen zum Stehen, sie nimmt mit wachsendem Abstand zu und erreicht ein Maximum, wenn der Abstand den vierten Teil der Wellenlänge einer einfallenden Schallwelle beträgt.

Da die Reibungseffekte aber durch die Bewegung der Luftmoleküle zustande kommen, kann ein poröser Schallschlucker seine voll Schluckwirkung erst erreichen, wenn seine wirksame Schichtdicke wenigstens so groß ist als die Viertelwellenlänge der einfallenden Schallwelle beträgt. Poröse Schallschlucker mit geringen Schichtdicken schlucken also hauptsächlich Schallanteile mit kurzen Wellenlängen, d. h. hoher Frequenzen. Ein praktisches Beispiel hierzu bilden Teppiche, deren Schluckgrade bei normalen Dicken erst bei 3 bis 4 kHz zu nennenswerter Größe ansteigen.

Bei größeren Schichtdicken erreichen poröse Schallschlucker ihre volle Schluckwirkung schon im Gebiet mittlerer Frequenzen. Ein günstiger Umstand trägt dazu bei, daß sie schon bei einer tieferen Frequenz als derjenigen einsetzt, die sich ergibt, wenn die Viertelwellenlänge der Schichtdicke gleichgesetzt wird. Beim Eindringen einer Schallwelle in eine poröse Schicht wird deren Wellenlänge verkürzt. Deshalb ent-

spricht das Viertel der Wellenlänge in einem porösen Stoff dem vierten Teil einer größeren Schallwellenlänge in der Luft.

Hierdurch erklärt es sich z. B., daß die als poröse Schallschlucker von der Industrie angebotenen Akustikplatten von 2 cm Dicke ihre volle Schluckwirkung schon bei etwa 1000 Hz erreichen, wenn sie auf eine Wand oder Decke aufgeklebt werden. Die zu 1000 Hz gehörende Schallwellenlänge in der Luft beträgt 34 cm, ihr vierter Teil also 8,5 cm. Gehen wir davon aus, daß die volle Schluckwirkung in der Akustikplatte erreicht ist, wenn die Plattendicke gleich dem vierten Teil der Wellenlänge in der Platte ist, so ergibt sich daraus eine Verkürzung der Schallwellenlänge in der Luft.

Die wirksame Schichtdicke einer Akustikplatte kann vergrößert werden, indem man sie nicht auf eine Wand oder Decke aufklebt, sondern sie mit Abstand davor auf einen Lattenrost aufnagelt. Beträgt der Abstand z. B. 2,5 cm, beginnt die volle Schluckwirkung bei etwa 700 Hz einzusetzen, und bei 20 cm schon bei etwa 250 Hz (Bild 46).

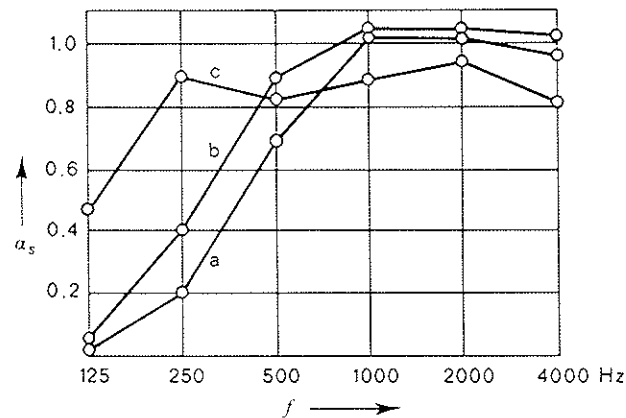


Bild 46. Der Verlauf des Schluckgrades von 2 cm dicken Akustikplatten aus kunstharz-gebundenen Mineralfasern.

- a) auf die Wand aufgeklebt,
- b) auf Lattenrost in 2,5 cm Wandabstand,
- c) auf Lattenrost in 20 cm Wandabstand

Poröse Schallschlucker zur Regulierung der Akustik eines Raumes können nicht nur in Form von Akustikplatten eingesetzt werden, auch Filze aus Mineralwolle sind dazu geeignet. Da deren Oberflächen meist unschön aussehen und leicht beschädigt werden können, müssen sie mit ge-

lochten Platten abgedeckt werden. Beträgt der Lochanteil etwa 20 % der Plattenoberfläche, wird die Schluckwirkung des Filzes durch die Abdeckung nur wenig beeinflusst. Bei geringerem Lochanteil sinkt die Schluckwirkung im Bereich höherer Frequenzen, solche Frequenzanteile werden dann von der Abdeckung reflektiert.

Wenn wir die Schluckeigenschaften der porösen Schallschlucker überblicken, so müssen wir feststellen, daß sie bei den Schichtdicken, die wir in der Praxis ansetzen können, nur die Schallanteile im mittleren und höheren Frequenzgebiet wirksam schlucken. Schallanteile im Bereich tiefer Frequenzen werden hauptsächlich von Raumbegrenzungen geschluckt, die zur zweiten Gruppe gehören und auf die wir jetzt eingehen wollen.

Diese zweite Gruppe umfaßt in erster Linie alle die Raumbegrenzungen, die man als dünne Platten ansprechen kann. Hierzu gehören z. B. die Scheiben geschlossener Fenster, abgehängte Decken, Holzverkleidungen, Schrankwände usw. Raumbegrenzungen dieser Art können durch einfallende Schallwellen zum Mitschwingen angeregt werden. Die Energie, die sie beim Schwingen verbrauchen, wird den einfallenden Schallwellen entzogen. Durch diesen Effekt kommt die Schluckwirkung dieser Gruppe von Raumbegrenzungen zustande.

Daß Schallschlucker dieser Art nur im tieffrequenten Gebiet einen nennenswerten Betrag an Schallenergie schlucken, ist leicht zu erklären. Mit steigender Frequenz setzt die Massenträgheit der plattenartigen Raumbegrenzungen dem Mitschwingen einen wachsenden Widerstand entgegen, die Platten können den sehr schnell werdenden Wechselkräften an ihrer Oberfläche nicht mehr folgen. Hieraus folgt, daß ihr Schluckgrad nur bei niedrigen Frequenzen größere Werte erreichen kann.

Die meisten Räume enthalten nicht nur natürliche poröse Schallschlucker, fast immer sind auch Raumbegrenzungen vorhanden, die durch das Mitschwingen ihrer Masse als Schallschlucker wirken. Sehr oft aber reicht die Schluckwirkung der natürlichen Raumbegrenzungen nicht aus, damit sich in einem Raum die akustischen Verhältnisse einstellen, die ihm angemessen sind.

Muß die Schluckwirkung im Bereich tiefer Frequenzen erhöht werden, so kann man zu diesem Zweck dünne, überall dichte Platten aus Sperrholz-, Gipskarton- oder Hartfaserplatten mit Abstand auf einem Lattenrost vor eine Wand oder unter die Decke setzen.

Der Schluckgrad einer solchen Anordnung steigt aber nicht stetig mit abnehmender Frequenz an, er erreicht vielmehr in einem verhältnismäßig schmalen Frequenzgebiet seine größten Werte. Diese besondere Eigenschaft entsteht durch die Federwirkung der zwischen Platte und fester Wand eingeschlossenen Luft. Die Masse der Platte bildet zusammen mit der Luftfederung ein schwingungsfähiges System, das durch die einfallenden Schallwellen zu erzwungenen Schwingungen erregt wird. Stimmt die Frequenz der einfallenden Schallwelle mit der Resonanzfrequenz dieses Schwingungssystems überein, schwingt die Platte infolge des Resonanzeffektes besonders stark (Bild 47a). Dadurch wird der einfallenden Schallwelle entsprechend viel Energie entzogen.

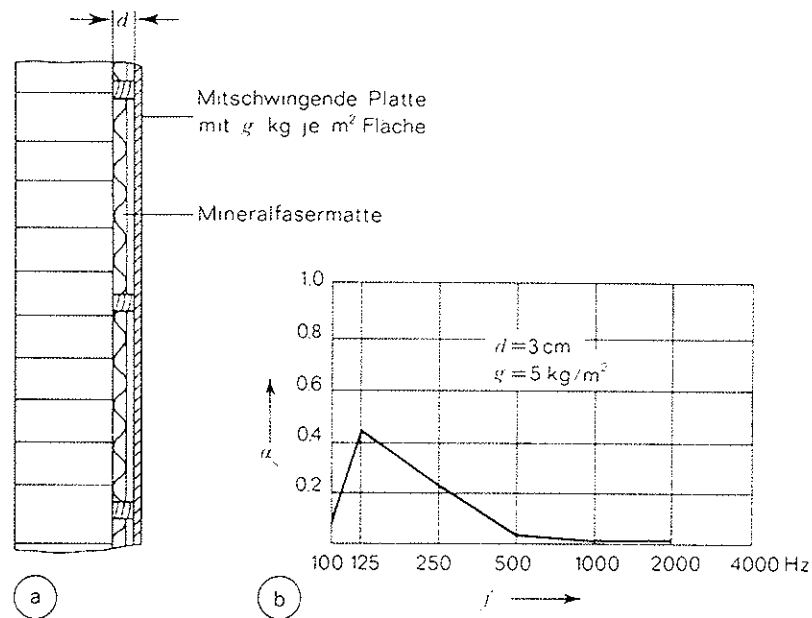


Bild 47. a) Die mitschwingende Platte vor einer Wand als Tiefenschlucker
b) Der Verlauf des Schluckgrades einer mitschwingenden Platte vor einer Wand

Diese Resonanzerscheinung kann dazu benutzt werden, um die Schluckwirkung der mitschwingenden Platte sehr wesentlich zu verbessern. Die Resonanzfrequenz wird durch eine entsprechende Dimensionierung der Anordnung in ein Frequenzgebiet gelegt, in dem die Gesamtaborption besonders stark vergrößert werden muß. Damit die Wirkung nicht auf ein schmales Frequenzgebiet in der Umgebung der Resonanzfrequenz

beschränkt bleibt, muß das Schwingungssystem aus Plattenmasse und Luftfederung gedämpft werden. Zu diesem Zweck wird der Luftraum zwischen Platte und fester Wand mit Mineralwollfilzen als Dämpfungsmittel ausgefüllt. Hierdurch beginnt das Ansteigen des Schluckgrades schon sehr viel früher oberhalb und unterhalb der Resonanzfrequenz einzusetzen (Bild 47b).

Damit wir der Platte auch die vorgesehene Resonanzfrequenz geben können, müssen wir wissen, von welchen Eigenschaften ihr Wert abhängt. In die Resonanzfrequenz geht die Plattenmasse pro m^2 Wandfläche - das "Flächengewicht" *) - und die Dicke der Luftschicht zwischen Platte und fester Wand ein, die Beziehung zwischen diesen drei Größen lautet:

$$f_r = \frac{600}{\sqrt{g \cdot d}}$$

f_r = Resonanzfrequenz in Hz

g = Flächengewicht der mitschwingenden Platte in kg/m^2

d = Plattenabstand zur Wand in cm.

Nehmen wir als Beispiel eine Sperrholzplatte mit 4 kg/m^2 Masse in 3 cm Abstand von der Wand, so erhalten wir nach Einsetzen dieser Größen eine Resonanzfrequenz von etwa 135 Hz.

Es gibt noch eine zweite Möglichkeit, die Schluckwirkung im Bereich tiefer Frequenzen zu vergrößern. Dabei wird ein Effekt ausgenutzt, den schon Helmholtz aufgedeckt hat und der gewöhnlich an Gefäßen demonstriert wird, deren Innenraum durch eine dünne Röhre mit der Außenluft verbunden ist (Helmholtzresonator).

Jedes derartige Gefäß enthält ein schwingungsfähiges Gebilde, das auf den ersten Blick nicht zu erkennen ist. Zwar ist sofort einzusehen, daß die Luft im Innenraum als Federelement in Frage kommen kann, wo aber ist die schwingende Masse? Es hat sich gezeigt, daß die Luft in und etwas vor der Öffnung diese Funktion übernimmt.

Man kann dieses Schwingungssystem leicht anregen, wenn man den Rand der Öffnung anbläst, dann entsteht ein Pfeifton, dessen Tonhöhe der Resonanzfrequenz entspricht. Nimmt man als Demonstrationsgefäß eine leere Bierflasche, so kann man auch zeigen, wie sich die Tonhöhe an-

*) Richtiger müßte es "Flächenmasse" heißen, doch man hat allgemein das Wort "Flächengewicht" beibehalten, das schon geprägt wurde, als man noch nicht so streng zwischen Gewicht und Masse unterschied wie heute.

dert, wenn der Innenraum der Flasche durch Hineingießen von Wasser verkleinert wird.

Da ein Helmholtzresonator ebenso ein Schwingungssystem darstellt wie eine dünne Platte vor einer festen Wand, kann man ihn auch ebenso als Schallschlucker einsetzen. Seine praktische Ausführung besteht wieder aus einer Platte, diesmal aber mit Öffnungen, die mit einem bestimmten Abstand vor die feste Wand montiert wird. Als Öffnungen verwendet man entweder runde Löcher, oder, weil diese oft nicht gut aussehen, lange Schlitz. In der zuletzt genannten Ausführung nennt man den Schallschlucker auch einen Schlitzresonator (Bild 48).

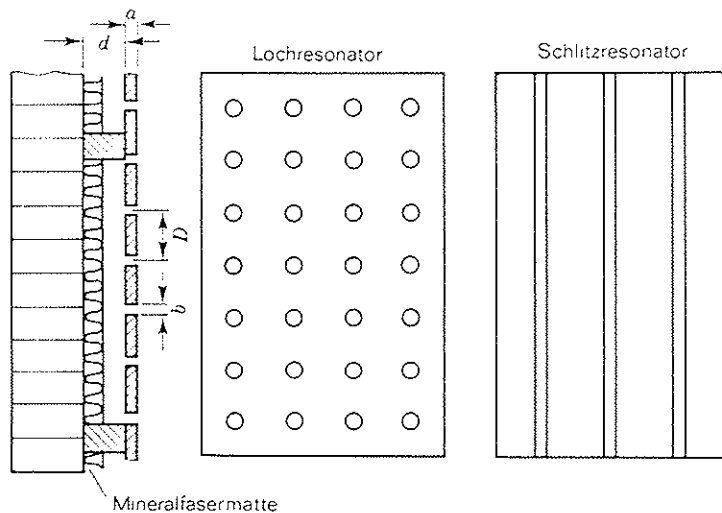
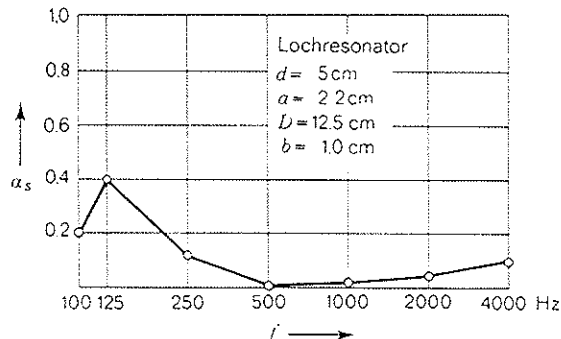


Bild 48.
Anwendung des Helmholtz-Resonator-Prinzips zur Tiefenschluckung



Die Resonanzfrequenz für eine Platte mit runden Löchern erhalten wir durch die folgende Formel:

$$f_r = 54 \sqrt{\frac{n\pi r^2}{dl'}}$$

wobei

$$l' = l + r;$$

f_r = Resonanzfrequenz in Hz

n = Anzahl der Löcher auf 1 m² Wandfläche

r = Radius eines Loches in cm

d = Plattenabstand zur Wand in cm

l' = Länge der in den Öffnungen schwingenden Luftmasse in cm

l = Dicke der Platte in cm.

Rechnen wir auch hierzu ein Beispiel; eine Platte mit einer Dicke von $l = 0,5$ cm enthalte auf 1 m² Wandfläche $n = 5$ Löcher mit einem Radius $r = 2$ cm. Der Abstand der Platte zur Wand betrage $d = 5$ cm. Dann ergibt sich eine Resonanzfrequenz $f_r = 100$ Hz.

Die entsprechende Formel für einen Schlitzresonator lautet:

$$f_r = 54 \sqrt{\frac{S}{dl'}}$$

wobei

$$l' = l + 0,5b + \frac{2b}{\pi} \ln \frac{\lambda r}{\Delta b};$$

f_r = Resonanzfrequenz in Hz

S = Schlitzfläche auf 1 m² Wandfläche in cm²

l = Dicke der Platte in cm

b = Breite der Schlitzes in cm

l' = Länge der in den Schlitzes schwingenden Luftmasse in cm

d = Plattenabstand zur Wand in cm

λ_r = Wellenlänge in Luft bei der Resonanzfrequenz in cm.

Ebenso wie die schwingende Platte müssen auch die in den Öffnungen schwingenden Luftmassen gedämpft werden, man benutzt dazu auch die gleiche Methode: der Luftraum wird mit Mineralwollfilzen ausgefüllt. Äußerlich ähnelt der Helmholtzresonator als Schallschlucker einem porösen Schallschlucker, der durch eine mit Öffnungen versehene Abdek-

kung geschützt wird. Doch die Abdeckung eines porösen Schallschluckers muß im Vergleich zur Abschlußplatte eines Helmholtzresonators einen größeren Lochflächenanteil erhalten. Man kann aber den Effekt des Helmholtzresonators mit dem des porösen Schallschluckers kombinieren, indem man den für einen Helmholtzresonator erforderlichen Lochflächenanteil etwas vergrößert. Auf diese Weise erhält man einen im mittleren Frequenzgebiet gut wirksamen Schallschlucker.

Im vorigen Kapitel haben wir in der Tabelle 1 die Schluckgrade einer Anzahl von Raumbegrenzungen angegeben. Größe und frequenzabhängiges Verhalten der Schluckgradwerte lassen deutlich erkennen, durch welchen Effekt die Schluckwirkung jeweils zustande kommt. So treten sie uns nicht mehr als bloße Rechengrößen entgegen, sondern als Zahlen, die den Vorgang der Schallschluckung beschreiben.

Die Effekte, die zur Schallschluckung ausgenutzt werden können, bieten genügend Möglichkeiten, um jeder Wand- oder Deckenfläche die Absorption zu geben, die sie zur Regulierung der Akustik des Raumes erhalten muß. Ein Problem entwickelt sich aber häufig daraus, die Oberfläche des Schluckmaterials so zu gestalten, daß es sich in die Architektur des Raumes einfügt. Mancher Architekt scheut sich, schallschluckende Flächen als solche sichtbar werden zu lassen. Wie es scheint, rührt diese Scheu meist nur daher, daß unter Schallschluckmaterial die Akustikplatten mit runden Vertiefungen verstanden werden. Diese Platten gibt es mit den gleichen Schallschluckeigenschaften nicht nur mit Vertiefungen, sondern auch mit glatten Oberflächen, die noch verschieden eingefärbt werden können.

Poröse Schallschlucker hinter einer Abdeckung mit genügend vielen Öffnungen geben mit der Abdeckung einen großen Spielraum, Wand- oder Deckenflächen zu gestalten, wobei der Anteil der Öffnungen an der Gesamtfläche wenigstens 20% betragen soll. Solche Verkleidungen können hergestellt werden z. B. aus

Holzleisten, auf Abstand nebeneinandergesetzt,
einem Gitterwerk aus dünnen Holzstäben,
einer Holztäfelung mit langen Schlitzern, die auch verdeckt sein können,
Gipskartonplatten mit runden Löchern oder langen Schlitzern,
Blechen mit verschiedenartigen Öffnungen,
Metalldrahtgittern usf.

Zum Schluß müssen wir noch auf ein Material eingehen, dem manche Leute in der Raumakustik Eigenschaften zuschreiben, die uns Wunderbare grenzen, nämlich Holz. Edles Holz, so hört man es, soll einem Raum einen guten Klang verleihen wie dem Klangkörper einer guten Geige.

Nun ist es richtig, daß die Klangeigenschaften einer Geige mit besonderen Eigenschaften des Holzes zusammenhängen, aus dem der Geigenkörper hergestellt ist. Diesen Zusammenhang kann man aber nicht auf die Akustik eines Raumes übertragen, wie physikalische Untersuchungen längst eindeutig ergeben haben. Durch das Mitschwingen einer Holzfläche in einem Raum wird nur Schallenergie geschluckt, eine Schallabstrahlung durch Mittönen wie bei einem Geigenkörper findet nicht statt. Den Glauben an die Wunderwirkung des Holzes aber, der immer noch im Schwange ist, pflegen einige Akustiker etwas respektlos als "Holzkrankheit" zu bezeichnen.

20. Raumakustische Regeln aus den Erfahrungen mit vorhandenen Räumen

Die raumakustischen Regeln, die wir bisher entwickelt haben, basieren hauptsächlich auf physikalischen Gesetzen kombiniert mit Eigenschaften unserer Hörempfindung. Die Erfahrung aus vorhandenen Räumen, die es ja von jeder Kategorie in mehr oder weniger großer Zahl gibt, haben wir bisher kaum herangezogen. Doch diese geben nicht nur gute Orientierungshilfen für die Gestaltung eines neuen Raumes ab, wir brauchen sie auch, um eine Lücke zu schließen, welche die reine Forschung bis jetzt noch offen gelassen hat. Wir können nämlich nur aus Erfahrungen ableiten, wo die obere Grenze der Personenzahl und des Raumvolumens für einen Raum liegt, der einen bestimmten Zweck erfüllen soll.

Um die Erfahrungen an vorhandenen Sälen für die Gestaltung neuer Säle auszuwerten, eignet sich gut als Orientierungsgröße das Raumvolumen, das auf einen Zuhörerplatz entfällt.

Ein Saal mit einem Raumvolumen von 3000 m³ und 600 Plätzen z. B. hat 5 m³ Raumvolumen pro Platz.

Wir wissen, daß die Absorption durch die in einem Raum anwesenden Personen einen großen Teil seiner Gesamtaborption ausmacht. Durch die Zahl der Kubikmeter Raumvolumen pro Zuhörerplatz können wir abschätzen, wie stark die Absorption der Zuhörer die Gesamtaborption beeinflusst. Daraus erhalten wir einen groben Überblick über die Menge an Schallschluckmaterial, die vorgesehen werden muß, damit der Raum seine richtige Nachhallzeit erhält.

Die folgende Zusammenstellung gibt für die in der Praxis vorkommenden Bereiche einen Überblick über die Beziehung zwischen den Kubikmetern Raumvolumen pro Platz und dem Gewicht, mit dem die Zuhörerabsorption die Gesamtaborption belastet.

Bei $3 - 4 \text{ m}^3/\text{Platz}$ bildet allein die Absorption der Zuhörer eine so starke Komponente, daß die gewünschte Nachhallzeit bei mittleren und höheren Frequenzen oft schon unterschritten wird, wenn keinerlei weitere Absorptionen vorhanden sind. Wenn überhaupt, dürfen außer meist notwendigen Tiefenschluckern nur sehr wenige zusätzliche Schallschlucker angebracht werden, hauptsächlich nur an Stellen, an denen störende Schallrückwürfe entstehen können.

Bei $4 - 6 \text{ m}^3/\text{Platz}$ geht die Absorption der Zuhörer bei mittleren und höheren Frequenzen immer noch mit großem Gewicht in die Gesamtaborption ein, doch in der Regel sind außer Tiefenschluckern auch einige zusätzliche Schallschlucker für mittlere und höhere Frequenzen erforderlich, damit der Raum die richtigen Nachhallzeiten erhält.

Bei $6 - 8 \text{ m}^3/\text{Platz}$ verringert sich der dominierende Einfluß der Zuhörerabsorption, zur Regulierung der Nachhallzeit sind in der Regel zusätzliche Schallschlucker für alle Frequenzbereiche erforderlich.

Bei $8 \text{ m}^3/\text{Platz}$ und mehr verliert die Zuhörerabsorption den beherrschenden Einfluß auf die Gesamtaborption. Damit sich in dem Raum die richtigen Nachhallzeiten einstellen, müssen praktisch immer zusätzliche Schallschlucker vorgesehen werden.

Wie sehen nun die entsprechenden Verhältnisse bei den vorhandenen Räumen der verschiedenen Kategorien aus, und wo liegt bei diesen die maximale Raumgröße und Zuhörerzahl? Dazu der folgende Überblick.

1. Klassenräume

Das Volumen von Klassenräumen normaler Größe liegt in dem Bereich von 200 bis 300 m^3 , in denen im Normalfall 20 bis 30 Plätze untergebracht werden. Auf einen Platz entfällt also ein Raumvolumen in der Größenordnung von 10 m^3 . Es müssen demnach zusätzliche Schallschlucker angebracht werden, damit die Nachhallzeit in den für Vortragsräume dieser Größe günstigen Bereich von etwa $0,7 \text{ s}$ fällt.

Bei Verwendung guter Schallschlucker wie etwa Akustikplatten müssen ca $25 - 30 \text{ m}^2$ Wand- bzw. Deckenfläche damit versehen werden. Sie werden am zweckmäßigsten im oberen Drittel der Rückwand, an einer Seitenwand oder an den Seiten der Decke angebracht. Der als Reflektor wirksame Teil der Decke muß davon frei gehalten werden.

2. Hörsäle, Vortragssäle

Räume dieser Art sind in der Regel sehr viel dichter besetzt als Klassenräume; das Raumvolumen pro Platz liegt gewöhnlich zwischen 4 und 5 m^3 . Daraus ergibt sich, daß für mittlere und höhere Frequenzen im allgemeinen keine oder nur wenige zusätzliche Schallschlucker erforderlich sind, sondern nur für tiefe Frequenzen. Ungünstig macht sich bei diesen Räumen oft bemerkbar, daß sich die Nachhallzeiten zwischen dem leeren oder wenig besetzten Saal und dem voll besetzten Saal relativ stark unterscheiden, weil für gewöhnlich ein einfaches Holzgestühl eingebaut werden muß. Da ein Polstergestühl, das die Unterschiede mildern würde, meist nicht zu haben ist, würde sich hier das schon erwähnte Holzgestühl empfehlen, bei dem unter der Sitzfläche oder hinter der Rücklehne Schallschluckstoffe angebracht sind.

Die obere Grenze dieser Räume liegt bei einem Raumvolumen von etwa 2500 m^3 und einer Personenzahl von 600 . Soll ein größerer Raum für eine größere Personenzahl gebaut werden, müssen die Worte des Sprechers durch eine Lautsprecheranlage verstärkt werden.

3. Kinosäle

In Kinosälen wird der verfügbare Raum gewöhnlich so weit als möglich ausgenutzt, die Raumvolumina pro Platz liegen in dem Bereich von 3 bis 4 m^3 . Deshalb führt die Absorption der Zuhörer allein schon meist zu den relativ kurzen Nachhallzeiten, die in der gleichen Größe wie die von Vortragssälen liegen sollen.

Zusätzliche Schallschlucker für mittlere und höhere Frequenzen dürfen daher nicht oder nur sehr wenige angebracht werden, hauptsächlich nur an Flächen, an denen sich störende Schallrückwürfe bilden können.

Da in Kinosälen das Gestühl meist ganz oder teilweise gepolstert ist, unterscheiden sich die Nachhallzeiten zwischen vollem und leerem Saal nur wenig.

Eine raumakustisch bedingte obere Grenze für die Größe und Personenanzahl von Kinosälen gibt es praktisch nicht, da alle Schallereignisse über Lautsprecher wiedergegeben werden. Bei entsprechender Dimensionierung liegt die Leistungsgrenze einer Lautsprecheranlage sehr viel höher als die der natürlichen Schallquellen.

4. Aulen und Gemeindesäle

In diesen Sälen wird gewöhnlich sowohl Sprache als auch Musik vorgelesen. Die Nachhallzeiten sollten also größer sein als bei Vortragssälen und auf der Grenze zwischen denen für Musik und Sprache liegen.

Aber bei vielen vorhandenen Sälen dieser Kategorie kommen auf das vorhandene Raumvolumen zu viele Plätze, im Schnitt bewegen sich die Raumvolumina pro Platz zwischen 3,5 und 4 m³, manchmal liegen sie noch unter 3,5 m³. Unter solchen Voraussetzungen werden die Nachhallzeiten für mittlere und höhere Frequenzen schon durch die Absorption der Zuhörer allein unter die Werte gedrückt, die anzustreben wären.

Aus diesen Erfahrungen sollte man die Lehre ziehen, daß bei Sälen dieser Kategorie auf einen Platz wenigstens ein Anteil von 4,5 m³ des Raumvolumens kommen sollte. Die Gefahr, daß das Raumvolumen im Verhältnis zur Zahl der Plätze zu groß gerät, besteht kaum.

Da sich das Raumvolumen pro Platz immer im Bereich niedriger Werte bewegen wird, sind keine oder nur wenige zusätzliche Schallschlucker für mittlere und höhere Frequenzen erforderlich, dagegen in der Regel für tiefe Frequenzen. Auch bei diesen Sälen würde sich ein Gestühl empfehlen, daß die Schallenergie besser schluckt als ein einfaches Holzgestühl, damit die Nachhallzeiten des leeren oder schwach besetzten Saales weniger stark ansteigen als bei einem einfachen Holzgestühl.

Die obere Grenze für diese Säle liegt etwa bei einem Raumvolumen von 3000 m³ und 600 Plätzen. Bei größeren Sälen und mehr Plätzen kommt man ohne Lautsprecheranlage nicht mehr aus.

5. Schauspieltheater

Ihre Volumina können und werden gewöhnlich stark ausgenutzt; das Raumvolumen pro Platz bewegt sich zwischen 3,5 und 4,5 m³. Zusätzliche Schallschlucker für mittlere und höhere Frequenzen dürfen nicht oder nur sehr wenige angebracht werden, hauptsächlich nur, um stören-

de Schallrückwürfe zu vermeiden. Die Absorption bei tiefen Frequenzen muß dagegen oft vergrößert werden. Da zur Ausstattung eines Theaters in der Regel ein Polstergestühl gehört, unterscheiden sich die Nachhallzeiten des voll besetzten und leeren Saales nur wenig.

Die obere Grenze reiner Schauspieltheater liegt bei einem Raumvolumen von ca 3000 m³ und etwa 800 Plätzen.

6. Theater für Oper und Schauspiel

In Theatern mittelgroßer Städte werden sowohl Schauspiele als auch Opern aufgeführt. Ihre Nachhallzeiten sollten, ebenso wie bei Aulen oder Gemeindesälen, im Grenzbereich der für Musik und Sprache günstigen Werte liegen. Bei den vorhandenen Theatern dieser Kategorie, bei denen es sich vielfach noch um ältere handelt, kommt auf einen Platz oft ein zu geringer Anteil des Raumvolumens. Damit die Nachhallzeiten nicht zu kurz geraten, sollte das Raumvolumen pro Platz einen Wert von 4,5 m³ nicht unterschreiten.

Damit die Worte der Akteure auf allen Plätzen gut zu verstehen sind, darf ein solches Theater nicht zu groß werden. Das maximale Volumen liegt bei etwa 6000 m³ und die maximale Zuhörerzahl beträgt ca 1400.

7. Große Opernhäuser

In reinen Opernhäusern dominiert die Musik, doch auch Gesang und Sprache müssen noch gut ankommen. Die optimalen Nachhallzeiten liegen deshalb im unteren Bereich der für Musik günstigen Werte.

Bei den Opernhäusern, die in den letzten Jahrzehnten gebaut wurden, bewegen sich die Raumvolumina pro Platz etwa zwischen 5,5 und 6,5 m³. Unter diesen Voraussetzungen stellen sich die richtigen Nachhallzeiten fast von selbst ein, höchstens einige zusätzliche Schallschlucker für tiefe und mittlere Frequenzen können erforderlich sein, um störende Schallrückwürfe zu vermeiden oder die Nachhallzeiten geringfügig herabzusetzen.

Als vernünftige obere Grenze für Opernhäuser kann man ein Raumvolumen von etwa 10000 m³ mit ca 1500 Plätzen ansetzen. Es sind zwar noch größere gebaut worden - das größte dürfte wohl die "Hall of Music" der Purdue Universität in Amerika (in Lafayette, Indiana) sein, die ein Volumen von 35900 m³ und 6107 Plätze hat - doch von so großen Sälen kann man eine befriedigende Akustik nicht mehr erwarten, wenigstens nicht ohne elektro-akustische Hilfsmittel.

8. Konzertsäle

Konzertsäle, in denen nur Musik gespielt wird, erfordern relativ lange Nachhallzeiten. Deshalb muß auf einen Zuhörerplatz ein genügend großes Raumvolumen kommen. Bei den in den letzten Jahrzehnten gebauten Konzertsälen liegt das Raumvolumen pro Platz in dem Bereich von 6,5 bis 8,5 m³. Bei diesen Besetzungsverhältnissen sind zur Regulierung der Nachhallzeiten nur wenige zusätzliche Schallschlucker erforderlich.

Die obere Grenze des Raumvolumens bei Konzertsälen liegt bei etwa 25000 m³, wobei ca 3500 Plätze untergebracht werden können. Die Erfahrungen aus den vorhandenen Konzertsälen lassen vermuten, daß es für die Größe eines solchen Saales ein Optimum gibt, das bei einem Raumvolumen von etwa 17000 m³ liegt.

9. Kirchenräume

Bei den meisten Kirchen kommt auf einen Besucherplatz ein ziemlich großes Raumvolumen, das oft über 8 m³ pro Platz hinausgeht. Fast immer sind deshalb zusätzliche Schallschlucker für alle Frequenzbereiche erforderlich, damit die Nachhallzeiten nicht zu lang geraten. So einleuchtend sich dieser Sachverhalt offenbart, so schwierig erweist es sich häufig, die Schallschlucker so anzubringen, daß sie sich in die Architektur des Kirchenraumes einfügen. Doch wenn der Architekt weiß, welche Möglichkeiten es gibt, Schallschlucker herzustellen, findet sich auch immer ein Lösung.

Auch bei einem Kirchenraum empfiehlt es sich, ein Gestühl zu verwenden, das den Schall stärker schluckt als ein gewöhnliches Holzgestühl.

21. Methodische Gestaltung eines Saales nach den Regeln der Raumakustik, als Beispiel der Entwurf einer Aula

Die Ergebnisse, die wir aus Angaben vorhandener Räume erhalten haben, runden das System der raumakustischen Regeln ab. Wie geht man nun am besten vor, um diese Regeln beim Entwurf eines Saales praktisch anzuwenden? Die bisherige Darstellung hat die zweckmäßigste Reihenfolge im wesentlichen schon vorgezeichnet. Man sollte nur damit beginnen, sich nach der Methode des letzten Kapitels einen allgemeinen Überblick zu verschaffen.

Zusammengenommen können wir den raumakustischen Entwurf eines Saales dann nach folgendem Schema aufbauen:

1. Verwendungszweck des Saales eindeutig feststellen!
Hierüber muß Klarheit bestehen, nicht nur, weil die Gestaltung davon abhängt, sondern auch, um möglichen späteren Beanstandungen begegnen zu können, die oft entstehen, weil der Saal für Zwecke benutzt wird, die nicht vorgesehen waren.
2. Zahl der vorgesehenen Zuhörerplätze angeben, verfügbares oder zu empfehlendes Raumvolumen ermitteln.
Aus diesen Gründen ergibt sich das Raumvolumen pro Platz, durch das man sich über die zu erwartende raumakustischen Verhältnisse orientieren kann (siehe Kapitel 19).
3. Zuhörer möglichst gut mit direktem Schall versorgen.
Dies ist bei der Anordnung der Zuhörerplätze und der Schallquelle zu berücksichtigen und beeinflusst deshalb die Gestaltung des Grundrisses und des Saalaufbaues (siehe Kapitel 6).
4. Zuhörer und Akteure mit ersten Reflexionen versorgen, eine möglichst große Schalldiffusität vorsehen.
Hiervon wird hauptsächlich die konstruktive Durchbildung der oberen Saalbegrenzungen und der Seitenwände bestimmt (siehe Kapitel 10, 11 und 12).
5. Prüfen, ob sich schädliche Schallrückwürfe bilden können.
In der Regel stören zuerst die Schallanteile, die einmal von der Saalrückwand reflektiert oder zweimal reflektiert von dem hinteren Teil der Saaldecke und der Saalrückwand in den Saal zurückgeworfen werden. Besonders kritisch sind alle größeren, nach außen gewölbte Raumbegrenzungen. Bildung störender Schallrückwürfe durch Schallschlucker oder tiefe Gliederung der Reflexionsfläche vermeiden (siehe Kapitel 9, 10 und 13).
6. Die Nachhallzeiten des Saales einstellen.
 - a) Den optimalen Wert der Nachhallzeit für den Frequenzbereich um 500 Hz ermitteln (siehe Kapitel 15).
 - b) Die erforderliche Gesamtabsorption danach bestimmen. (siehe Kapitel 16).
 - c) Eventuell notwendige Menge an Schallschluckern für den Frequenzbereich von 500 Hz ausrechnen und die Orte der Anbringung angeben (siehe Kapitel 16, 17 und 18).
 - d) Frequenzabhängiges Verhalten der Nachhallzeit mit den unter c)

vorgesehenen Schallschluckern ermitteln, Schallschlucker gegebenenfalls ergänzen oder auswechseln (siehe Kapitel 16).

Wie dies Schema gehandhabt wird, wollen wir jetzt an dem Entwurf einer Aula als Beispiel zeigen.

Wir wollen davon ausgehen, daß eine Aula für 500 Plätze gebaut werden soll. Vom Auftraggeber sei mitgeteilt, daß die Aula für Ansprachen, Theateraufführungen von Schülern und für Aufführungen von Schülerchören und Orchestern vorgesehen werden soll. Soweit der Auftrag. Folgen wir nun dem Schema.

Zu 1.: Der Saal soll für Ansprachen, Theaterspiele in kleinem Rahmen, Chor und Instrumentalmusik geeignet sein. Als Sprecher kann demnach ein Redner hinter einem Podium oder ein als Schauspieler agierender Schüler auf einer kleinen Bühne in Frage kommen. Der Chor besteht aus etwa 20 Schülern, im Schülerorchester spielen etwa 10 Schüler mit. In dem leeren oder wenig besetzten Saal soll geprobt werden.

Zu 2.: Die Zahl der vorgesehenen Zuhörerplätze beträgt 500. Wir wollen annehmen, daß das Raumvolumen frei gewählt werden kann, wir setzen es mit etwa 2500 m^3 an. Das ergibt ein Raumvolumen pro Platz von 5 m^3 , d.h. die Gesamtabsorption für mittlere und höhere Frequenzen wird noch nicht von vornherein allzusehr durch die Absorption der Zuhörer belastet, zur Regulierung der Nachhallzeiten bleibt daher noch ein kleiner Spielraum.

Zu 3.: Um die Zuhörer gut mit direktem Schall zu versorgen, können und müssen wir die Schallquelle durch eine Bühne oder ein Podium anheben. Ein nach hinten ansteigendes Gestühl kann in einer Aula aus verschiedenen Gründen meist nicht eingebaut werden, wir wollen deshalb auch hier keines vorsehen. Damit kommen wir gleich zum nächsten Schritt, wir müssen versuchen, die Zuhörerfläche so anzulegen, daß die Zuhörer in den hinteren Sitzreihen nicht zu weit von der Schallquelle entfernt sitzen. Die Voraussetzung dazu kann aber nur durch einen entsprechenden Grundriß geschaffen werden.

Da man bei einer Aula kaum von einem anderen als rechteckigen Grundriß ausgehen kann, müssen wir vermeiden, daß der Saal im Verhältnis zur Breite unnötig lang wird. Nehmen wir an, wir könnten über Länge und Breite frei verfügen, so kommen wir nach den Erkenntnissen des 6. Kapitels zu einer günstigen Sitzplatzfläche, wenn wir den Saal etwas breiter als lang anlegen.

Setzen wir eine Breite von 22 m und eine Länge von 18 m an, so kommen wir bei einer Deckenhöhe von 7 m zu einem Volumen von etwas über 2500 m^3 . Mit diesen Abmessungen bewegen wir uns im Rahmen der Regeln, die bei der Dimensionierung des Raumes zu berücksichtigen sind. Da bei der konstruktiven Durchbildung noch etwas Raumvolumen verloren geht, kommen wir beim fertigen Saal ziemlich genau auf 2500 m^3 .

Zu 4.: Zur gezielten Lenkung erster Reflexionen mit kurzen Laufzeitdifferenzen, die den direkten Schallanteil verstärken, benutzen wir die Saaldecke. Damit die mittleren und hinteren Sitzreihen mehr Reflexionsschall erhalten als ihnen eine durchgehend horizontale Decke zuführen kann, stellen wir den vorderen Teil der Decke schräg, und zwar so, daß der vordere Deckenteil tiefer einsetzt und dann bis zum horizontalen Hauptteil der Decke ansteigt. Die zweckmäßigste Neigung und Größe des schrägen Deckenteils ermitteln wir, indem wir die Regeln anwenden, die wir für Reflexionen an ebenen Flächen kennengelernt haben.

Damit der Saal eine ausreichende Schalldiffusität erhält, bilden wir die Seitenwände als diffus reflektierende Flächen aus. Wir wollen annehmen, daß an beiden Seitenwänden Fensterflächen vorgesehen werden müssen. Wir teilen die Fensterfläche auf jeder Seite in mehrere schmale hohe Einzelfenster auf. Zwischen jedem Fenster lassen wir einen ungefähr fensterbreiten Wandteil stehen, den wir etwa $1/2 \text{ m}$ in den Saal vortreten lassen. In dieser Ausführung stellen beide Seitenwände diffus reflektierende Flächen dar.

Nach Durcharbeiten der ersten 4 Punkte können wir den Saal in Grund- und Aufriß darstellen; Bild 49 zeigt das Ergebnis.

Zu 5.: Als schädliche Schallrückwürfe können der an der Saalrückwand reflektierte Schallanteil oder der zweimal über Saaldecke-Saalrückwand umgelenkte Schallanteil in Frage kommen. Wir bilden für beide Fälle das arithmetische Mittel aus den Wegen des direkten und reflektierten Schalles an verschiedenen Zuhörerplätzen. Es ergibt sich, daß dieser Wert beide Male auf allen Plätzen unter 20 m bleibt, d.h. wir brauchen von diesen Reflexionen keine Störwirkung zu befürchten.

Da die Seitenwände diffus reflektieren, können sich zwischen ihnen keine Flatterechos bilden.

Zu 6. (a) Um die optimale Nachhallzeit zu finden, müssen wir berücksichtigen, daß in dem Saal sowohl Sprache als auch Musik vorgetragen werden sollen, d.h. wir müssen einen Kompromiß zwischen den für Sprache und Musik optimalen Werten suchen. Schlagen wir im Kapitel 15

die Bilder 42/43 auf, so können wir daraus für das gegebene Raumvolumen als guten Kompromiß eine Nachhallzeit von 1,1 s im Bereich von 500 Hz herauschälen.

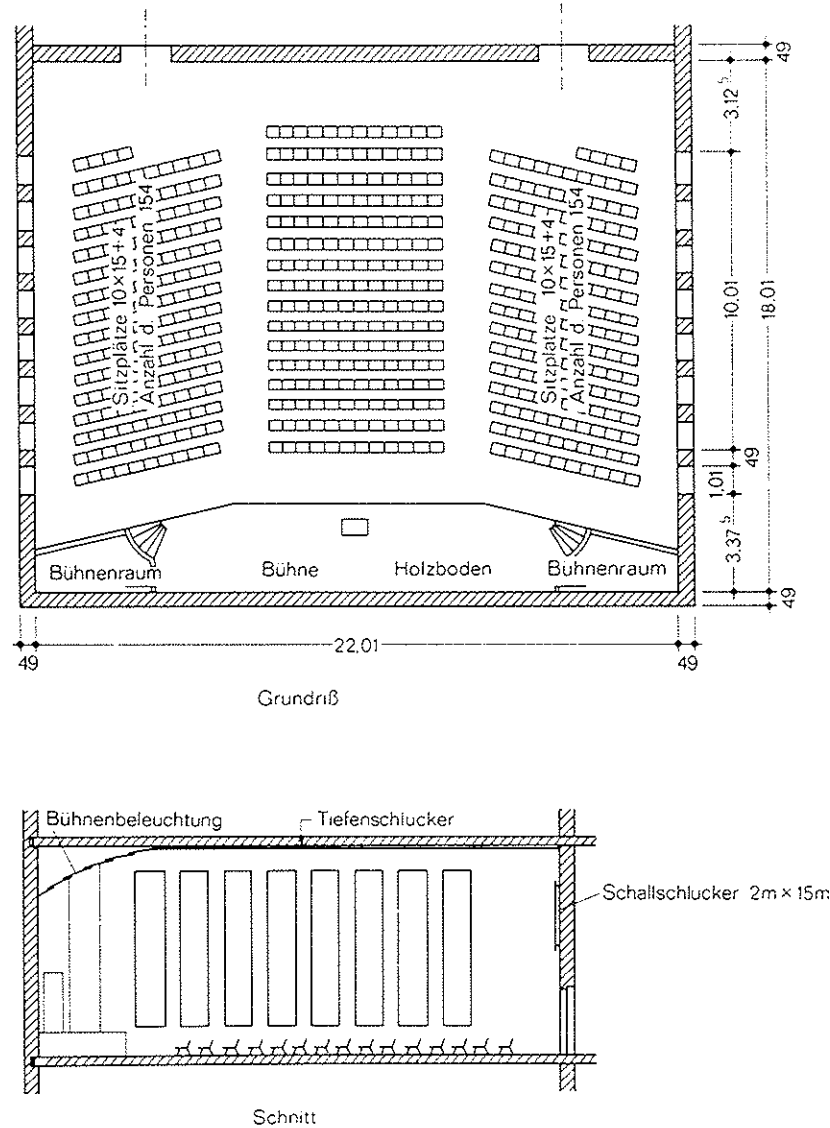


Bild 49. Entwurf einer Aula mit Berücksichtigung raumakustischer Regeln. (Nach einem Übungsentwurf von A. Ahnsdorf an der Ing.-Schule Bremen)

Zu 6. **b**) Für die weitere Bearbeitung stellen wir die Abhängigkeit der Nachhallzeit von der Gesamtabsorption in einem doppelt-logarithmischen Koordinatensystem dar (Bild 50). Daraus können wir sofort ablesen, daß der Raum eine Gesamtabsorption von 370 m² erhalten muß, damit sich eine Nachhallzeit von 1,1 s einstellt.

Zu 6. **c**) Wir rechnen die Gesamtabsorption bei 500 Hz aus, die der voll besetzte, aber noch nicht fertig eingerichtete Saal hätte. Dazu müssen wir das Material der Wände, der Decke und des Fußbodens kennen. Nehmen wir an, daß die Wände aus verputztem Mauerwerk bestehen, als oberer Saalabschluß eine Holzdecke (1 Zoll dick) abgehängt und auf dem Fußboden Holzparkett verlegt ist, so ergibt sich nach Tabelle 3: $A_0 = 342,6 \text{ m}^2$.

Würden wir übrigens die Absorption der Personen nach der von Beranek empfohlenen Methode ausrechnen, so erhielten wir für die Absorption der Personen $A_{\text{Pers}} = 0,85 \cdot 270 \text{ m}^2 = 230 \text{ m}^2$, also fast das gleiche Ergebnis wie zuvor.

An der Gesamtabsorption von 370 m², die der Saal zu einer Nachhallzeit von 1,1 s erhalten muß, fehlt dem unfertigen Saal mit der Gesamtabsorption von 342,6 m² also noch eine Absorption von 27,4 m². Damit dieser Fehlbetrag ergänzt wird, müssen wir zusätzlich Schallschlucker anbrin-

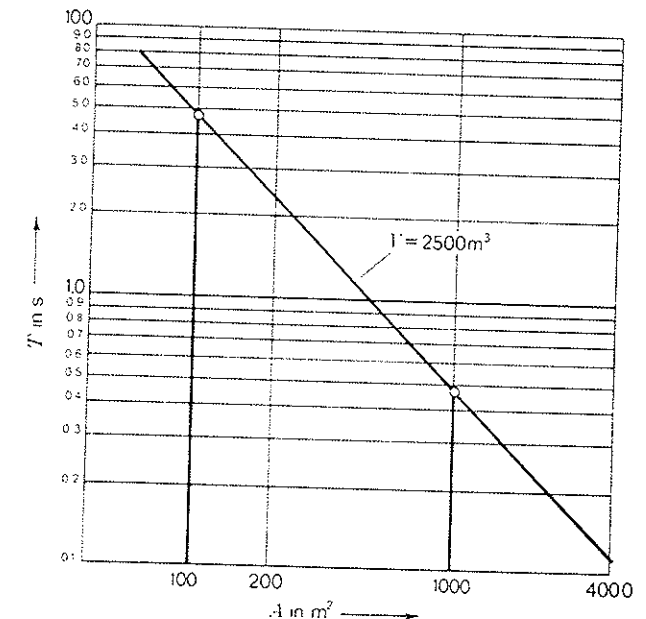


Bild 50.
Die Nachhallzeit in Abhängigkeit von der Gesamtabsorption für das Volumen der Aula von 2500 m³

Tabelle 3. Rechnerische Ermittlung der Nachhallzeiten in der Aula.

	S in m ²	125 Hz		250 Hz	
		α	A in m ²	α	A in m ²
1. Decke, gesamt	380	0,24	91	0,20	76
2. Rückwand ohne Türen	146	0,02	3	0,02	3
3. Türen	8	0,20	1,6	0,15	1
4. Seitenwände	146	0,02	3	0,02	3
5. Fenster	85	0,1	8,5	0,04	3
6. Bühne, Rückwand und Seitenwände	115	0,02	2	0,02	2
7. Bühnenboden (Holzfußboden)	42	0,2		0,15	6
8. Saalboden (Parkett auf Blindboden)	340	0,2	68	0,15	51
9. Zuhörer, 500 im Saal und 20 auf der Bühne	n = 520	$\alpha' = 0,15$	78	$\alpha' = 0,30$	156
Summe der Absorptionen von 1 - 9			255,1		301
10. Akustikplatten aus 2 cm Mineralwollplatten auf 2 cm Lattenrost	32	0,10	3,2	0,35	11
Summe der Absorptionen von 1 - 10			258,3		312
Nachhallzeiten des fertigen, vollbesetzten Saales		1,57 s		1,3 s	
11. Holzgestühl, unbesetzt	n = 500	$\alpha' = 0,02$	10	$\alpha' = 0,02$	10,0
Summe der Absorptionen von 1 bis 8, 10 und 11			190		166
Nachhallzeiten des leeren Saales mit Holzgestühl		2,14 s		2,45 s	
12. Mit Kunstleder bezogenes Gestühl	n = 500	$\alpha' = 0,1$	50	$\alpha' = 0,13$	65
Summe der Absorptionen von 1 bis 8, 10 und 12			230,3		221
Nachhallzeiten des leeren Saales mit Kunstleder bezogenem Gestühl		1,75 s		1,84 s	

500 Hz		1000 Hz		2000 Hz		4000 Hz	
α	A in m ²	α	A in m ²	α	A in m ²	α	A in m ²
0,14	53	0,12	46	0,10	38	0,12	46
0,03	4,4	0,04	6	0,05	7	0,05	7
0,10	0,8	0,08	1	0,09	1	0,11	1
0,03	4,4	0,04	6	0,05	7	0,05	7
0,03	2,6	0,02	2	0,02	2	0,02	2
0,03	3,5	0,04	5	0,05	6	0,05	6
0,14	5,9	0,1	4	0,05	2	0,05	2
0,1	34	0,1	34	0,05	17	0,10	34
$\alpha' = 0,45$	234	$\alpha' = 0,45$	234	$\alpha' = 0,45$	234	$\alpha' = 0,45$	234
	342,6		338		314		335
0,85	27,4	1,1	35	1,1	35	1,0	32
	370,0		373		349		367
1,1 s		1,09 s		1,16 s		1,11 s	
$\alpha' = 0,02$	10	$\alpha' = 0,04$	20	$\alpha' = 0,04$	20	$\alpha' = 0,03$	15
	146		159		135		148
2,78 s		2,55 s		3,0 s		2,74 s	
$\alpha' = 0,15$	75	$\alpha' = 0,15$	75	$\alpha' = 0,11$	55	$\alpha' = 0,07$	35
	210		214		170		168
1,94 s		1,90 s		2,39 s		2,42 s	

gen. Nehmen wir als Schallschlucker Akustikplatten auf 2 cm Lattenrost oder einen anderen porösen Schallschlucker mit ähnlichen Eigenschaften, so benötigen wir davon eine Fläche von $S = \frac{27.4}{0.85} = 32 \text{ m}^2$.

Diese Menge an Schallschluckern reicht jedoch nur dann aus, wenn die Schluckgrade der Wand- oder Deckenfläche, auf dem die Schallschlucker angebracht werden sollen, gegen den Schluckgrad der Schallschlucker vernachlässigt werden können. Ist dies nicht der Fall, muß beim Ausrechnen der erforderlichen Fläche der Schluckgrad des Schallschluckmaterials um den Schluckgrad der Wand- oder Deckenfläche vermindert werden. In unserem Beispiel haben wir es jedoch nur mit Putzflächen zu tun, deren Schluckgrad gegen den der vorgesehenen Schallschlucker vernachlässigt werden kann.

An welchen Flächen bringen wir das Schallschluckmaterial nun an? Wir verteilen es auf die obere Hälfte der Rückwand. Wir haben zwar gesehen, daß die von diesen Flächenteilen zurückgeworfenen Schallanteile nicht stören, da sie aber unter den zuerst reflektierten Schallanteilen die längsten Wege zurücklegen müssen, tragen sie zur Schallverstärkung am wenigsten bei.

Zu 6. d) Nach dem Anbringen des Schluckmaterials hat sich die Nachhallzeit des Saales bei 500 Hz auf den gewünschten Wert von 1,1 s eingestellt. Jetzt müssen wir prüfen, welche Nachhallzeiten sich unter den gegebenen Voraussetzungen bei den übrigen, hier in Frage kommenden, Frequenzen ergeben. Die Tabelle 3 auf den vorangegangenen Seiten 138 und 139 enthält die Ausrechnungen zusammengestellt.

Der Verlauf der Nachhallzeiten in Abhängigkeit von der Frequenz, der sich nach dieser Tabelle ergibt, ist im Diagramm des Bildes 51 gezeigt. An Hand dieses Diagrammes können wir nun feststellen, daß die Nachhallzeiten außerhalb 500 Hz im Bereich der Toleranz bleiben, die wir im Kapitel 15 angegeben haben. Wir brauchen die vorgesehenen Schallschlucker also nicht zu ändern oder zu ergänzen. Daß wir die Gesamtaborption im Bereich tiefer Frequenzen nicht besonders zu vergrößern brauchen, hat seinen Grund darin, daß mit der abgehängten Decke und dem Parkettboden genügend starke tieffrequente Schallschlucker vorhanden sind, sonst hätten wir auch bei tiefen Frequenzen zusätzliche Schallschlucker vorsehen müssen, etwa durch vorgesetzte mit-schwingende Platten oder durch Helmholtzresonatoren.

In das Diagramm des Bildes 51 ist auch der Verlauf der Nachhallzeiten bei leerem Saal eingetragen. Es gilt die obere Kurve für ein einfaches

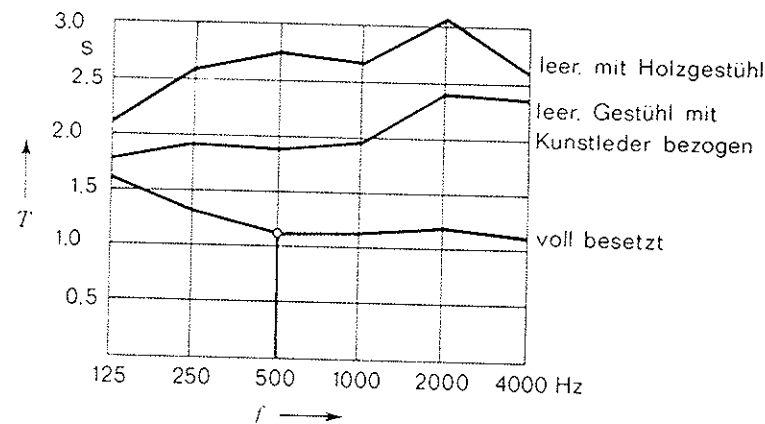


Bild 51. Verlauf der Nachhallzeiten der fertigen Aula

Holzgestühl, die darunter liegende für ein mit Kunstleder bezogenes Gestühl. An den Ergebnissen, die diese beiden Kurven wiedergeben, sehen wir deutlich den Vorteil des Gestühls mit Kunstlederbezug. Die Nachhallzeit steigt bei leerem Saal weniger an als bei Verwendung eines einfachen Holzgestühles, d.h. es kann bei leerem oder wenig besetztem Saal besser geprobt werden.

22. Minderung der Lautstärke von Geräuschen innerhalb eines Raumes durch Schallschlucker

In diesem Kapitel wollen wir untersuchen, wie die Lautstärke und damit die Störwirkung von Geräuschen in einem Raum herabgesetzt werden kann, wenn seine Gesamtaborption durch Anbringen von Schallschluckmaterialien vergrößert wird. Dies Thema gehört nicht zur Bauakustik, zu der es oft gerechnet wird, sondern eindeutig zur Raumakustik.

Die Ursache für die falsche Einordnung ist leicht aufzudecken, ebenso wie in der Bauakustik geht es darum, die Lautstärke von Geräuschen zu verringern. Aber die Bauakustik beschäftigt sich damit, die Lautstärke

von Geräuschen, die von außen in einen Raum eindringen, durch Schalldämmung zu vermindern. Hier dagegen sollen Geräusche mit Hilfe raumakustischer Maßnahmen unfreiwillige Hörer in einem Raum mit möglichst geringer Lautstärke erreichen. Die Geräusche können dabei sowohl innerhalb wie außerhalb des Raumes erzeugt worden sein.

Leider kann man es nicht als einen bloßen Formfehler ansehen, wenn die Methode, durch Anbringen von Schallschluckern die Lautstärke von Raumgeräuschen herabzusetzen, der Bauakustik angehängt wird. Diese falsche Verbindung hat schon so manchen Architekten zu der Ansicht verleitet, man könne durch Anbringen von Akustikplatten die Schalldämmung einer Wand oder Decke erhöhen. Die Enttäuschung ist sehr groß, wenn nach Abschluß der Arbeiten festgestellt wird, daß eine merkbare Verbesserung der Schalldämmung nicht festzustellen ist. Schallschluckstoffe können schalldämmende Maßnahmen nur ergänzen, nicht aber entscheidend fördern.

Das Prinzip, nach dem die Lautstärke von Raumgeräuschen mit Hilfe von Schallschluckern herabgesetzt werden kann, ist leicht zu verstehen. Wir wissen, daß sich die Lautstärke, mit der wir ein Schallereignis in einem Raum wahrnehmen, zusammensetzt aus dem Anteil des direkten Schalles und den von den Raumbegrenzungen zurückgeworfenen Schallanteilen.

Den direkten Schall kann man durch raumakustische Maßnahmen nicht beeinflussen, wohl aber die Intensitäten der von den Raumbegrenzungen zurückgeworfenen Schallanteile. Diese können wir durch Schallschlucker mehr oder weniger stark herabsetzen. Daraus folgt, daß die Lautstärke eines Raumgeräusches um den Betrag gesenkt werden kann, um den die zurückgeworfenen Anteile den Direktschall verstärken. Damit erhalten wir eine anschauliche Vorstellung von den Möglichkeiten, aber auch von den Grenzen der Lautstärkeminderung durch den Effekt der Schallschluckung.

Um diese Methode zu unterbauen, müssen wir zuerst wissen, wie die Lautstärke eines Raumgeräusches mit den Standorten von Schallquelle (SQ) und Hörer im Raum und den Eigenschaften des Raumes zusammenhängt. Ein einfaches und überschaubares Ergebnis kann man aber, wie oft in der Raumakustik, nur unter bestimmten Voraussetzungen ableiten, die in der Praxis nie ganz, meist aber mit ausreichender Näherung erfüllt sind. Wir müssen annehmen, daß wir es mit einer Schallquelle zu tun haben, die ein konstantes Geräusch in alle Richtungen gleichmäßig ausstrahlt und das in einem Raum, in dem die Schallwellen überall gleichmäßig verteilt sind.

Drücken wir nun die Schallerregung eines Punktes im Raum durch den Schallpegel L aus, so nimmt dieser unter den eben genannten Voraussetzungen zunächst mit wachsendem Abstand von der Schallquelle ab, geht dann aber sehr bald in einen konstant bleibenden Wert über.

Im größten Teil des Raumes also herrscht ein (theoretisch genau; praktisch annähernd) gleich großer Schallpegel, der nur in der näheren Umgebung der Schallquelle zunimmt (Bild 52). Ohne größeren Fehler können wir in der Regel den Schallpegel der Lautstärke gleichsetzen.

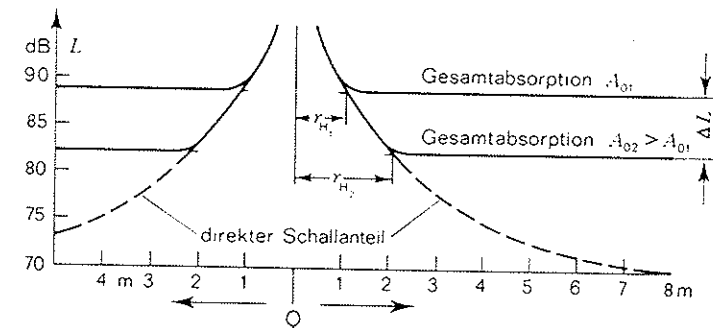
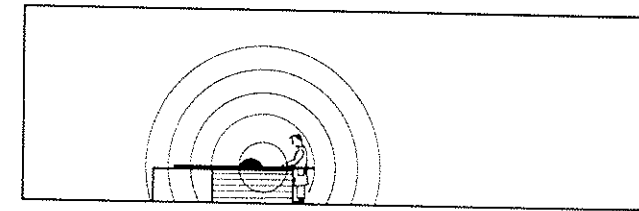


Bild 52. Schallpegel- bzw. Lautstärkeverhalten eines Geräusches, das von einer Schallquelle in einem Raum ausgeht. r_H = Hallradius

Wie es zu diesem Verhalten des Geräuschpegels kommt, ist leicht zu erklären. In der Nähe der Schallquelle übersteigt die Intensität des Direktschalles die der Summe aller anderen Schallanteile, deshalb verhält sich der Schallpegel in diesem Bereich ebenso als ob die Schallquelle in freier Umgebung stünde. Aber mit zunehmender Entfernung nimmt die Intensität des Direktschalles rasch ab, so daß sie zur Summe aller Intensitäten, die den Geräuschpegel ausmacht, sehr bald nichts Nennenswertes mehr beiträgt. Der Geräuschpegel bildet sich dann nur noch aus zurückgeworfenen Schallanteilen. Da diese, wie wir vorausgesetzt haben,

im Raume gleichmäßig verteilt sein sollen, muß die Summe ihrer Intensitäten konstant bleiben (siehe Band 1).

Der Bereich, in dem der zunächst fallende Geräuschpegel in einen konstant bleibenden Wert übergeht, liegt in einer Kugelschale, die wir uns um die Schallquelle gelegt denken müssen. Den Abstand dieser Kugelschale von der Schallquelle nennt man den Hallradius. Dieser ist um so größer, je mehr Schallenergie insgesamt von den Raumbegrenzungen geschluckt wird, d.h. je größer die Gesamtabsorption ist. Das gibt auch die folgende Formel wieder, nach der man ihn ausrechnen kann:

$$r_H = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A_0}{\pi}}$$

A_0 in m^2
 r_H in m

Da die Gesamtabsorption über die Sabinesche Formel mit dem Raumvolumen V und der Nachhallzeit T verknüpft ist, kann man den Hallradius auch so ausdrücken:

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}$$

V in m^3
 T in s

Wie laut ein Hörer das Geräusch einer Schallquelle empfängt, hängt also davon ab, ob er sich innerhalb oder außerhalb des Hallradius bewegt. In beiden Gebieten jedoch wird die Höhe des Geräuschpegels durch die Schalleistung festgelegt, die von der Schallquelle ausgestrahlt wird, anders ausgedrückt, ob diese ein mehr oder weniger lautes Geräusch erzeugt.

Zusammenfassend können wir das Verhalten eines Geräusches in einem Raum wie folgt beschreiben:

1. Innerhalb des Hallradius, d.h. in der näheren Umgebung der SQ, bildet sich die Stärke des Geräusches aus der Intensität des Direktschalles, sie ist deshalb abhängig von der ausgestrahlten Schalleistung und dem Abstand von der Schallquelle, dagegen unabhängig von irgendwelchen Raumeigenschaften.
2. Außerhalb des Hallradius, d.h. im größten Teil des Raumes, bildet sich die Stärke des Geräusches aus den Intensitäten zurückgeworfener Schallanteile, sie ist von der ausgestrahlten Schalleistung und

der Gesamtabsorption des Raumes abhängig, dagegen ist sie fast unabhängig vom Standort im Raum.

Aus diesen beiden Punkten können wir sofort eine erste grundlegende Regel ableiten: In jedem Fall sollten möglichst geräuscharme Geräte, Armaturen, Maschinen oder Apparate verwendet werden. Denn überall im Raum hängt die Höhe der Geräuschlautstärke zuerst von der ausgestrahlten Schalleistung der Geräuschquelle ab. Die Bedeutung dieser Regel wird noch dadurch erhöht, daß die Geräuschlautstärke innerhalb des Hallradius durch raumakustische Maßnahmen nicht beeinflußt werden kann.

Durch Anbringen von Schallschluckern wird der Geräuschpegel in dem gesamten Gebiet gesenkt, das außerhalb des Hallradius liegt. Der Betrag, um den sich der Schallpegel des Geräusches verringert, kann durch eine einfache Formel ausgerechnet werden. Beträgt die Gesamtabsorption eines Raumes im Anfangszustand A_{01} und vergrößert sie sich dann nach dem Anbringen von Schallschluckern auf A_{02} , so wird der Schallpegel des Geräusches vermindert um

$$\Delta L = 10 \lg \frac{A_{02}}{A_{01}} \text{ in dB.}$$

Drücken wir die Gesamtabsorptionen in dieser Formel durch die zugehörigen Nachhallzeiten aus, dann lautet sie:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{T_1}{T_2} \text{ in dB.}$$

Im Normalfall können wir wieder die Lautstärkeminderung als ebenso groß wie die Schallpegelminderung ansetzen.

Aus diesen beiden Formeln können wir einige bemerkenswerte Schlussfolgerungen ziehen:

1. In einem Raum, der im Anfangszustand nur eine geringe Gesamtabsorption und mithin hohe Nachhallzeit aufweist, kann die Geräuschlautstärke durch Anbringen von Schallschluckern relativ stark gesenkt werden. Man erreicht in der Praxis unter dieser Voraussetzung Schallpegelminderungen in der Größenordnung von 8 bis 10 dB.
2. Enthält ein Raum im Anfangszustand schon eine größere Gesamtabsorption und dadurch keine lange Nachhallzeit, so ist durch das Anbringen von Schallschluckern nur eine relativ geringe Senkung des Geräuschpegels zu erzielen, da die Gesamtabsorption nicht beliebig stark vergrößert werden kann. Die Erfahrung hat gezeigt, daß we-

nigstens 3 dB erzielbar sein müssen, um die Lautstärke der Raumgeräusche spürbar herabzusetzen.

Überall im Lande gibt es noch viele Räume, in denen die Geräuschlautstärke mit guten Gründen gesenkt werden sollte und durch Anbringen von Schallschluckern auch gesenkt werden könnte. Doch wenn diese Schallschlucker nachträglich angebracht werden müssen, handelt es sich genau besehen um eine Maßnahme, die bei der Einrichtung des Raumes versäumt wurde.

Sobald ein Raum fertiggestellt ist, sollen die Schallschlucker schon angebracht sein, die er seinem Verwendungszweck entsprechend benötigt. Das heißt aber, daß ein fachgerechter Einrichtungsplan hierüber genaue Angaben enthalten muß. Damit stellt sich die Frage, wie die erforderliche Menge an Schallschluckern ermittelt werden kann.

Eine Dimensionierungsregel dafür können wir uns verschaffen, wenn wir von einer Erfahrung ausgehen, die sich aus dem folgenden Zusammenhang ergeben hat.

Viele Schallschlucker an Decke und Wänden, die den Geräuschpegel niedrig halten sollen, geben dem Raum eine hohe Gesamtaborption und infolgedessen sehr kurze Nachhallzeit. Durch aufmerksames Beobachten kann man feststellen, daß viele Menschen sich nicht in Räumen wohlfühlen, deren Nachhallzeiten extrem kurz geraten sind. Diejenigen, die versuchen, ihr Mißbehagen zu beschreiben, sprechen von einem Druck auf den Ohren, den sie empfinden, und von einem beklemmenden Gefühl, das sie beschleicht.

Aus diesen Beobachtungen können wir als Nutzanwendung folgern, daß es für die Nachhallzeiten eine untere Grenze gibt, die nicht unterschritten werden sollte, damit ist für die Gesamtaborption eine obere Grenze verknüpft, die nicht überschritten werden dürfte. Die Grenzwerte hängen von dem Volumen des Raumes ab. Bild 53a gibt in Abhängigkeit vom Raumvolumen die Grenze der Nachhallzeiten an, die nach bisherigen Erfahrungen nicht unterschritten werden sollte, Bild 53b enthält die entsprechenden oberen Grenzen der Gesamtaborption.

Aus diesem Ergebnis können wir schließen:

Man kann in einem Raum nur soviel an Schallschluckern anbringen - und mithin den Geräuschpegel nur soweit niedrig halten - als dadurch der Grenzwert der Gesamtaborption, den Bild 53b angibt, nicht überschritten wird.

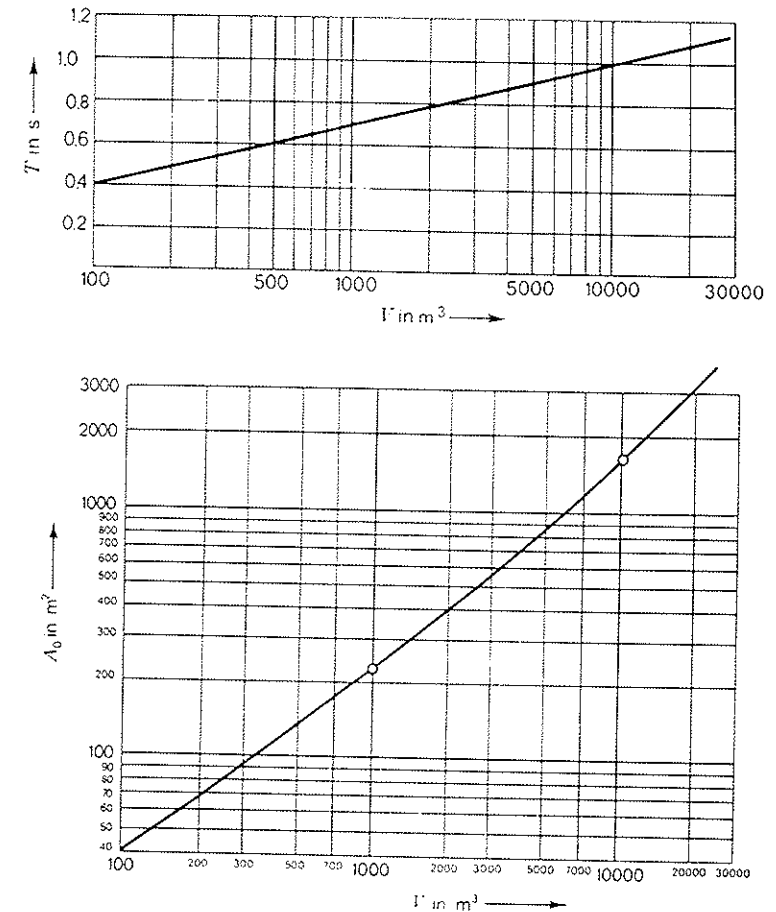


Bild 53. a) Untere Grenze der Nachhallzeiten in Abhängigkeit von Raumvolumen, b) die dazu korrespondierende obere Grenze der Gesamtaborption

Danach können wir die Menge der anzubringenden Schallschlucker durch die Absorption finden, die herauskommt, wenn wir von dem Grenzwert der Gesamtaborption die Absorptionen der übrigen Raumbegrenzungen abziehen, die mit den Schallschluckern nicht oder voraussichtlich nicht bedeckt werden sollen. Die Absorptionen dieser Raumbegrenzungen kann man so gut es geht ausrechnen oder abschätzen. In sehr vielen Fällen aber kann man den Gesamtbetrag an Absorption, der dabei zustande kommt, gegen die Absorption der anzubringenden Schallschlucker vernachlässigen. Dann gibt der Grenzwert der Gesamtaborption schon die Absorption der Schallschlucker an, die vorgesehen werden können.

23. Die Praxis der Lautstärkeminderung durch Schallschlucker, das Großraumbüro

Die Ergebnisse, die wir bis hierhin aus physikalischen und hörpsychologischen Zusammenhängen herausgearbeitet haben, wollen wir jetzt auf die Praxis anwenden. Wir nehmen dazu als Beispiel eine Montagehalle, in der geräuschvolle Arbeiten verrichtet werden. Ihre Abmessungen sind gegeben: Länge = 25 m; Breite = 12 m; Höhe = 6 m; daraus folgt ein Volumen von 1800 m^3 .

Aus Bild 53a lesen wir ab, daß die untere Grenze der Nachhallzeit für einen Raum mit diesem Volumen $0,7 \text{ s}$ beträgt, die nach Bild 53b durch eine Gesamtaborption von 425 m^2 erreicht wird. Bei dieser Montagehalle sollen die Absorptionen der Raumbegrenzungen, die nicht mit Schallschluckmaterial bedeckt werden, zusammengenommen gegen die Absorption der vorgesehenen Schallschlucker vernachlässigt werden können. Der Grenzwert der Gesamtaborption kann also dem Rechenwert der Absorption gleichgesetzt werden, den die vorgesehenen Schallschlucker erreichen sollen.

Wie in solchen Fällen meist üblich, werden als Schallschlucker Akustikplatten verwendet. In der Ausschreibung legen wir fest, daß die Akustikplatten in 2 cm Abstand auf einem Lattenrost unter der Decke oder vor den Wänden befestigt werden müssen. Diese Anordnung liefert im Bereich von 500 Hz einen Schluckgrad von $0,85$. Um die erforderliche Absorption von 425 m^2 aufzubringen, muß eine Fläche von

$$S = \frac{A}{\alpha} = \frac{425}{0,85} = 500 \text{ m}^2 \text{ mit dieser Schallschluckanordnung bedeckt werden.}$$

Über den Nutzen dieser Maßnahme erhalten wir Aufschluß, wenn wir die Schallpegelminderung ausrechnen, die gegenüber der Halle ohne Schallschlucker erzielt wird. Dazu müssen wir die Gesamtaborption der Halle ausrechnen, den sie in diesem Zustand aufweisen würde. Wir nehmen an, daß die Wände als verputztes Mauerwerk, die Decke als unterseitig verputzte Vollbetondecke und die Hälfte einer Längswand als Fensterfläche angelegt sind, der Bodenbelag besteht aus Stirnholzabschnitten. Die Absorption dieser Raumbegrenzungen beträgt bei 500 Hz rund 33 m^2 . Nehmen wir dazu noch die Absorption von 30 Personen mit $0,85 \cdot 30 = 26 \text{ m}^2$ (hoher Schluckgrad je Person wegen relativ geringer

Personenzahl im Verhältnis zum Volumen) und schätzen wir die Absorption der Einrichtungsgegenstände mit 20 m^2 , so erhalten wir für die Gesamtaborption A_{01} den Wert 79 m^2 .

Für den Betrag, um den der Geräuschpegel in der Halle durch die Schallschlucker gesenkt wird, finden wir dann $\Delta L = 8 \text{ dB}$, das sind auch etwa 8 phon . Würden die Betriebsgeräusche in der Halle ohne Schallschlucker einen Wert von 96 phon erreichen, so steigen sie in der Halle mit Schallschluckern nur auf etwa 87 phon an. Die Geräuschbelastigung der meisten Personen in der Halle wird danach fühlbar herabgesetzt. Nur die Personen, die sich in unmittelbarer Nähe lauter Geräuschquellen - also innerhalb des Hallradius - aufhalten müssen, werden dadurch nicht entlastet.

Wir müssen noch festlegen, an welchen Stellen das Schallschluckmaterial anzubringen ist. Hier kommt in erster Linie immer die Decke in Frage. Ohne Schallschlucker erreichen die von ihr zurückgeworfenen Schallanteile praktisch jeden Hörer in einem Raum und liefern dadurch einen wesentlichen Beitrag zur Lautstärkeerhöhung. Daß sie die Ausbildung dieser Schallanteile praktisch verhindern, erklärt den guten Effekt den die Schallschlucker an der Decke bringen.

Aber auch an Wänden sollten einige Schallschlucker angebracht werden, bei gegenüberliegenden wenigstens auf einer von beiden. In einigen Räumen wie Büros, Kaffees, Restaurants und Korridoren kann auch der Fußboden, in Form eines Teppiches, mit Schallschluckmaterial bedeckt werden. Das bringt zudem noch den Vorteil, daß beim Gehen nicht so starke Trittergeräusche erzeugt werden.

Wie unser Beispiel zeigt, muß eine ziemlich große Fläche mit Schallschluckmaterial bedeckt werden, um das Optimum an Lautstärkeminderung zu erzielen. Nun gehören Schallschluckstoffe nicht eben zu den billigsten Baumaterialien, und deshalb kommt es vor, daß die verfügbaren Geldmittel nicht ausreichen, um die errechnete Menge an Schallschluckmaterial bereitzustellen.

In solchen Fällen sollte man die Materialmenge, für die das Geld reicht, nicht in einer geschlossenen Fläche anbringen, sondern möglichst über eine größere Fläche an Decke und Wänden verteilen. Da die Schluckwirkung aller Schallschlucker über ihren geometrischen Rand hinausreicht, übersteigt die Absorption, die dann wirksam wird, den Rechenwert, so daß der tatsächliche Effekt größer ist als nach der einfachen Theorie zu erwarten.

Bei manchen Räumen, in die zwecks Lautstärkeminderung zwar Schallschluckstoffe hineingehören, kommt es nicht darauf an, unbedingt das Optimum an Schallpegelminderung anzustreben. Das gilt z. B. für alle Arten von Durchgangsräumen wie Treppenhäuser, Korridore oder Eingangshallen, auch bei Sporthallen aller Art braucht man nicht so weit zu gehen. Doch in geräuscherfüllten Räumen, in denen Menschen in mehr oder weniger großer Zahl ihre tägliche Arbeitszeit verbringen müssen, sollte man immer versuchen, so weit als möglich an das Optimum heranzukommen.

Als Schallschluckmaterial haben wir in unserem Beispiel Akustikplatten verwendet, die auf einem Lattenrost verlegt werden sollen. Natürlich hätte man auch eine andere Ausführungsform vorsehen können. Für den Effekt kommt es nur auf die Schallschluckeigenschaften an, genauer gesagt auf die Schluckgrade. Da praktisch nur poröse Schallschlucker in Frage kommen, muß man darauf achten, daß die Schluckgrade nicht nur oberhalb 1000 Hz, sondern genügend weit unter dieser Frequenz noch ausreichend große Werte erreichen. Deshalb sollten auch in unserem Beispiel die Akustikplatten nicht unmittelbar unter die Decke oder an die Wände geklebt, sondern auf einem Lattenrost angebracht werden, weil nur dadurch die Schluckgrade unter 1000 Hz gesteigert werden (siehe Kapitel 19).

Ein starkes Absinken der Schluckwirkung unter 1000 Hz kann die geräuschemindernde Wirkung der Schallschlucker sehr beeinträchtigen, denn bei vielen Geräuschquellen liegen im Frequenzbereich von etwa 200 Hz bis 1000 Hz starke Komponenten des Gesamtgeräusches.

Am Schluß dieses Kapitels wollen wir noch auf einen besonderen Typ eines Arbeitsraumes eingehen, der in den letzten Jahren aufgekommen ist, nämlich das Großraumbüro. Mit diesem Namen wird ein Geschäftsraum bezeichnet, in dem die gesamte Verwaltung eines Unternehmens auf einer einzigen großen Fläche verteilt ohne trennende Zwischenwände untergebracht ist.

Es gehört nicht in den Rahmen dieses Werkes, den Nutzen eines Großraumbüros gegenüber der herkömmlichen Form vieler Einzelbüros aufzuzeigen. Wir wollen hier nur die akustischen Voraussetzungen behandeln, die erfüllt sein müssen, damit im Großraumbüro störungsfrei gearbeitet werden kann.

Zunächst müssen in einem Großraumbüro wie in jedem geräuscherfüllten Arbeitsraum genügend viele Schallschlucker angebracht sein, um den Geräuschpegel niedrig zu halten. Es muß aber noch eine weitere Vor-

aussetzung erfüllt sein, die allen Bestrebungen um Geräuscheminderung zu widersprechen scheint. Denn um wechselseitige Störungen zu vermeiden, muß ein genügend hoher und gleichbleibender starker Grundgeräuschpegel vorhanden sein, der in einem Lautstärkebereich von 50 bis 55 phon liegen sollte.

Die Funktion, die dieser Grundgeräuschpegel auszuüben hat, wird verständlich, wenn wir uns das Lautstärkeverhalten einer Schallquelle in einem Raum in Erinnerung zurückrufen. Mit wachsendem Abstand von der Schallquelle sinkt die Lautstärke eines Einzelgeräusches, aber nur bis zum Hallradius, dann bleibt sie annähernd konstant. Wenn auch die Lautstärke dieses Einzelgeräusches außerhalb des Hallradius relativ niedrig liegt, so kann es immer noch stören, wenn der Raum sehr ruhig ist. Herrscht dagegen im ganzen Raum ein nicht zu niedriges, aber gleichbleibendes Grundgeräusch, so geht das Einzelgeräusch darin unter. Im Gegensatz zu einem Einzelgeräusch, das nur relativ kurze Zeit andauert, stört ein höheres gleichbleibend starkes Grundgeräusch nicht, die Gewöhnung verdrängt es aus dem Bewußtsein.

Damit dieser Grundgeräuschpegel auf natürliche Weise zustande kommt, muß ein Großraumbüro für eine genügend große Zahl von Arbeitsplätzen angelegt sein. Für die Größe eines Großraumbüros gibt es deshalb eine untere Grenze, die nach bisherigen Erfahrungen durch etwa 40 Arbeitsplätze festgelegt ist. Auf einen Arbeitsplatz rechnet man 7 bis 8 m² Bodenfläche, daraus folgt, ein Großraumbüro erfordert eine Mindestgröße von etwa 300 m² Bodenfläche.

Teil B: Bauakustik

24. Die Übertragung von Schall über die Bauteile eines Gebäudes

Die Eigenschaften des Schalles werden oft mit denen des Lichtes verglichen, und in der Tat gibt es zwischen beiden viele Parallelen. Doch während es keine prinzipiellen Schwierigkeiten bereitet, einen Raum gegen den Einfall von Licht völlig abzuschirmen, gelingt dies für den Schall nur mehr oder weniger unvollkommen. Eine schallundurchlässige Wand, die einer lichtundurchlässigen entspricht, gibt es nicht.

Nur sehr wenige feste Stoffe lassen Licht durch oder leiten es weiter, wie z. B. Glas. Dagegen wird Schall von allen festen Körpern übertragen, übrigens auch von allen Flüssigkeiten und Gasen. Wir müssen also davon ausgehen, daß jeder Bauteil eine Schallerregung weiterleitet.

Doch wenn es auch keinen absoluten Schutz gegen die Übertragung von Geräuschen gibt, so wissen wir aus Erfahrung, daß der Grad der Schallübertragung sehr verschieden groß ausfallen kann. Es gibt, populär ausgedrückt, Häuser mit ruhigen und andere mit hellhörigen Wohnungen.

Für den Architekten kommt es in erster Linie darauf an zu wissen, wie Wände, Decken und die anderen, zum Bau gehörenden Teile, angeordnet, aufgebaut und beschaffen sein müssen, damit die Menschen im Gebäude ausreichend gegen die Übertragung von Geräuschen geschützt sind.

Im Rahmen der Bauakustik sollen hierfür Regeln aufgestellt und Unterlagen geschaffen werden. Doch in Planung und Ausführung hängen die Maßnahmen, die sich daraus ergeben, von dem Grad der Schalldämmung ab, der erreicht werden muß, oder anders ausgedrückt, was als "ausreichender" Schutz gegen die Übertragung von Geräuschen gelten kann.

Der "ausreichende" Schutz gegen die Übertragung von Geräuschen hängt zunächst von dem Verwendungszweck benachbarter Räume ab. Was zwischen zwei Büroräumen einer Firma noch als ausreichende Dämmung

gegen eine Schallübertragung angesehen werden kann, reicht für zwei nebeneinander liegende Wohnungen nicht aus. Eine zwischen benachbarten Wohnungen ausreichende Schalldämmung genügt wiederum nicht, wenn an eine Wohnung eine Gaststätte grenzt.

Daß in diesen Fällen verschieden große Anforderungen an die Schalldämmung gestellt werden müssen, ist ohne weiteres einzusehen. Aber über das, was nun in jedem Fall als ausreichend gelten kann, müssen wir uns letztlich auf menschliche Urteile stützen, und was der eine für ausreichend hält, empfindet der andere als unzureichend.

Wie in fast allen Anwendungsbereichen der praktischen Akustik stoßen wir auch hier wieder auf das Problem, die Urteile über Sinneswahrnehmungen, die nie einheitlich sind, in einen Bewertungsmaßstab umzuformen. Die Bewertung "ausreichend" kann sich daher nur auf das Urteil eines statistischen Durchschnittes beziehen.

So ist es zu verstehen, daß es immer Menschen gibt, die - von ihrem Standpunkt zu Recht - die in Normvorschriften als ausreichend bezeichneten Schalldämmungen für nicht ausreichend halten. Dieser Umstand führt in der Praxis nicht selten zu unliebsamen Differenzen, wenn nämlich ein Bauherr nach Fertigstellung seines Hauses über zu große Geräuschbelästigung klagt, die Überprüfung dann aber ergibt, daß die einschlägigen Normvorschriften eingehalten sind.

Der Architekt ist ohne besondere Vereinbarungen nur verpflichtet, die von der Normung als ausreichend bezeichneten Schalldämmungen zu erreichen. Mancher Bauherr, der informiert worden wäre, hätte aber für einen verbesserten Schallschutz die dazu erforderlichen Mittel bereitgestellt, welche die Gesamtbaukosten auch nur unwesentlich vergrößern, wenn die höhere Schalldämmung von vornherein eingeplant wird. Dagegen ist eine nachträgliche Verbesserung einer unzureichenden Schalldämmung immer mit relativ großen Unkosten verbunden.

Noch ein beachtenswerter Umstand beeinflusst in der Praxis das Urteil über die Qualität einer Schalldämmung. Die meisten Klagen über einen angeblich nicht ausreichenden Schallschutz kommen nämlich aus Wohngebieten, in denen der Pegel der allgemeinen Umgebungsgeräusche sehr niedrig liegt, also aus sogenannten ruhigen Wohngebieten. Diese auf den ersten Blick merkwürdige Tatsache ist aber leicht zu erklären. Von einem höheren Grundgeräuschpegel werden die normalerweise in einem Haus produzierten Geräusche, die bei einer nach Norm ausreichenden Schalldämmung noch übertragen werden, überdeckt, bei geringem Grundgeräuschpegel dagegen werden sie hörbar und stören dann.

Hieraus folgt als Nutzenanwendung, daß bei Häusern in ruhigen Wohngebieten eine höhere Schalldämmung angestrebt werden sollte als die Norm verlangt.

Um den Grad einer Schalldämmung festlegen und feststellen zu können, sind besondere Schall-Dämme- und Schall-Schutzmaße eingeführt, die auf genormten Meßverfahren basieren, darauf kommen wir noch ausführlicher zu sprechen.

Erst wenn bei der Planung eines Baues klar geworden ist, wie hoch der Schallschutz sein muß, können die Maßnahmen im einzelnen festgelegt werden, durch die man eine entsprechende Schalldämmung erreicht. Nun ist es sicher kein Geheimnis, daß es dafür ein einfaches Rezept nicht gibt. Entsprechend den verschiedenen möglichen Geräuschursachen sind verschiedenartige Maßnahmen erforderlich.

Um für jede der möglichen Geräuschursachen eine wirksame Schalldämmung anzulegen, müssen wir wissen, auf welche Weise Geräusche von der Geräuschquelle über die Bauteile in fremde Wohn- und Arbeitsräume gelangen können. Physikalisch betrachtet ist eine Schallübertragung ein sehr verwickelter Vorgang.

Doch ohne die physikalischen Vorgänge im einzelnen zu berücksichtigen, können wir jede Schallübertragung in drei Phasen zerlegen. Wir erhalten damit ein Schema, nach dem wir vorgehen können, um jede Art von Schallschutzproblem methodisch zu bearbeiten. Dieser allgemeine Wegweiser stellt sich folgendermaßen dar (Bild 54):

1. Phase: Anregung der Bauteile durch die Geräuschquelle.

Hier gibt es zwei Möglichkeiten, nämlich

- a) die Bauteile werden durch Luftschall angeregt, d.h. von Schallwellen, die z. B. durch Sprechen oder Singen oder von Musikinstrumenten und Lautsprechern in Rundfunk- und Fernsehgeräten erzeugt, beim Ausbreiten in der Luft auf Bauteile auftreffen, die den Luftraum begrenzen.
- b) ein Bauteil wird direkt angeregt, d.h. zwischen dem Geräuscherzeuger und dem Bauteil besteht eine feste mechanische Verbindung. Mit dieser Anregungsart haben wir es zu tun, wenn z. B. Teile, die zur Wasserversorgung eines Hauses gehören, wie Leitungen, Armaturen, Wasch-, Toiletten- und Wannenbecken fest mit einer Wand oder Decke verbunden sind; erzeugt werden die Geräusche beim Einlaufen oder Auslaufen von Wasser. Entsprechendes gilt auch für fest montierte Geräte, die Geräusche durch Motoren erzeugen. Schließlich gehört hierhin auch die

Anregung des Fußbodens durch die Geräusche, die beim Begehen erzeugt werden.

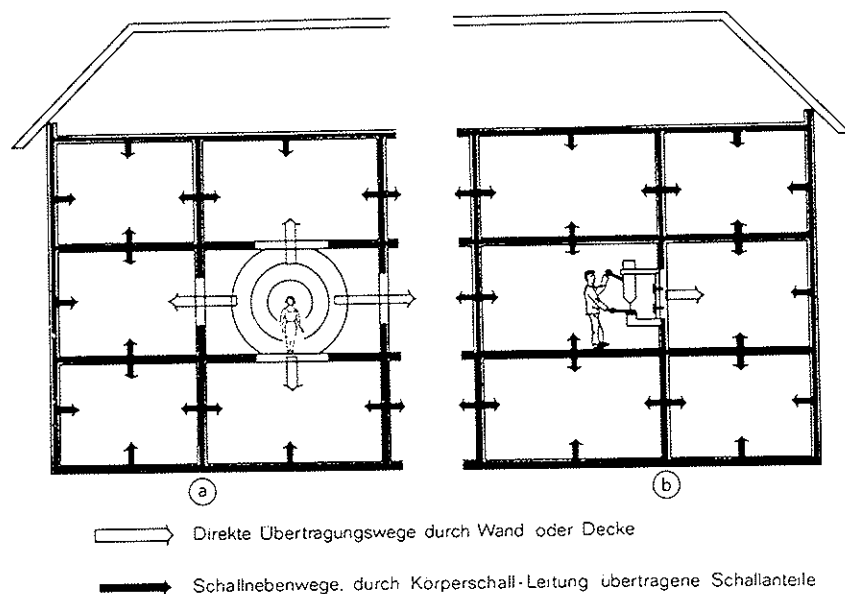


Bild 54. Anregung der Bauteile und Wege der Schallübertragung über Wände und Decken.

- a) Anregung durch Luftschall,
b) Anregung durch direkten Kontakt

2. Phase: Die Wege der Schallübertragung über die Bauteile.

Es gibt prinzipiell zwei Wege, auf denen Geräusche über die Bauteile übertragen werden:

- a) der direkte Weg, hierunter versteht man die Schallübertragung unmittelbar durch die gemeinsame Trennwand oder Trenndecke zwischen zwei Räumen;
b) der indirekte Weg oder Nebenweg, auch mit Flankenübertragung oder Schalllängsleitung bezeichnet. Hierbei handelt es sich um die Schallausbreitung in den Bauteilen als festen Körpern (Körperschall-Leitung).

Während der Schall auf dem direkten Weg praktisch nur in die unmittelbar benachbarten Räume übertragen wird, gelangen Schallanteile auf dem indirekten Weg in alle Räume eines Gebäudes.

3. Phase: Die Schallabstrahlung eines über den indirekten Weg angeregten Bauteiles.

Es hängt von bestimmten Eigenschaften der Wände oder Decken ab, ob sie die Schallanteile, die sie durch Körper-Schallleitung zugeführt erhalten, stark oder schwach in den angrenzenden Luftraum abstrahlen. Nicht zuletzt wird eine Schalldämmung also auch hiervon beeinflusst.

In allen Fragen des Schallschutzes kann und sollte sich der Architekt in der Praxis an das Normblatt DIN 4109 halten, es trägt den Titel: "Schallschutz im Hochbau". Die darin aufgeführten Regeln gelten als anerkannte Regeln der Baukunst, die angegebenen Forderungen stellen Mindestforderungen dar, die erfüllt werden müssen, auch wenn dies zwischen dem Bauherrn und dem Architekten nicht ausdrücklich vereinbart ist.

Ohne daß besonders darauf hingewiesen wird, liegt dem Normblatt DIN 4109 eine Gliederung zu Grunde, in dem die erste Phase des oben angegebenen 3-Phasen Schemas noch etwas modifiziert und auf die besonderen Verhältnisse im Hochbau zugeschnitten ist. Wenn man in der Praxis die Höhe des erforderlichen Schallschutzes ermittelt, wenn man dann die dazu notwendigen Maßnahmen festlegt, oder wenn man gegebenenfalls nachzuprüfen hat, wie hoch ein Schallschutz tatsächlich ausfällt, immer sollte man von dieser Gliederung ausgehen. Sie ist folgendermaßen aufgebaut:

1. Der Luft-Schallschutz, er umfaßt alles, was mit der Dämmung der Geräusche zusammenhängt, die Wände oder Decken durch Luftschall zur Schallübertragung anregen.
2. Der Tritt-Schallschutz, er bezieht sich speziell auf die Dämmung der Geräusche, die am Fußboden durch Tritte, fallende Gegenstände u.ä. entstehen. Hierbei handelt es sich also um eine direkte Anregung eines Bauteiles.
3. Schutz gegen die Übertragung von Geräuschen, die durch haustechnische oder sonstige technische Einrichtungen erzeugt werden. Die Geräuschquellen, die in diese Gruppe fallen, regen ein Bauteil hauptsächlich auf direktem Wege zur Schallübertragung an, die Anregung durch Luftschall ist dagegen meist zu vernachlässigen.
4. Schutz gegen den Außenlärm, also hauptsächlich gegen den Lärm des Straßenverkehrs. Der Außenlärm regt in erster Linie die Fensterscheiben eines Gebäudes durch Luftschall zur Geräuschübertragung an.

Für die ersten drei Sparten dieser Gliederung enthält das Normblatt DIN 4109 Mindestforderungen, die erfüllt werden müssen, für die vierte Sparte dagegen vorerst nur Empfehlungen.

In der folgenden Darstellung werden wir uns an diese Gliederung des Normblattes anlehnen.

25. Das mittlere Luftschalldämmmaß \bar{R} und das Luftschallschutz-Maß LSM

Es sind besondere Maßstäbe geschaffen worden um den Grad einer Schallübertragung festzustellen und die Qualität einer Schalldämmung bzw. eines Schallschutzes eindeutig zu kennzeichnen. Wir können diesen nur verstehen, wenn wir uns mit den Meßverfahren vertraut machen, auf denen sie sich gründen.

An dieser Stelle muß darauf hingewiesen werden, daß man über die Höhe eines Luftschall- oder Trittschallschutzes keine brauchbares Urteil erhält, wenn man lediglich die Lautstärke von übertragenen Geräuschen mit einem Lautstärkemesser mißt. Leider kann man sich mit einfachen Mitteln kein objektives Maß der Luftschall- oder Trittschall-Übertragung verschaffen, man benötigt dazu besondere Meßanordnungen.

Die Meßverfahren, die dabei anzuwenden sind, enthält das Normblatt DIN 52210, das den Titel "Messungen zur Bestimmung des Luft- und Tritt-Schallschutzes" trägt. Ohne auf alle Einzelheiten einzugehen, wollen wir die Meßverfahren kurz beschreiben, zuerst die Messung der Luft-Schalldämmung bzw. des Luft-Schallschutzes.

Nach dem genormten Meßverfahren wird zuerst die Höhe der Dämmwirkung ermittelt, die zwischen zwei benachbarten Räumen gegen die Übertragung von Luftschall-Geräuschen besteht. Etwas vereinfacht ausgedrückt dient als Maß für die Schalldämmung zwischen den beiden Räumen der Unterschied der Schallpegel, die sich in beiden Räumen bilden, wenn in einem Raum ein besonderer Prüfschall erzeugt wird.

Der Prüfschall wird gewöhnlich von einer Anordnung aus mehreren Lautsprechern abgestrahlt. Erregt werden die Lautsprecher von einem elektrischen Tongenerator, der ein Geräusch erzeugt, das sich ungefähr wie

das Rauschen eines Wasserfalles anhört und das man deshalb einfach Rauschen nennt. Dieses Rauschen hat die Eigenschaft, daß alle Frequenzen des Hörschalles darin enthalten sind.

Die Empfindlichkeit unseres Gehörs ändert sich mit der Frequenz (Kurven gleicher Lautstärke, siehe Band 1, Seite 22), deshalb ist die Lautstärke, mit der wir ein Geräusch wahrnehmen, nicht allein von dessen gesamter Intensität abhängig, sie wird von der Verteilung der Gesamtintensität auf den Frequenzbereich des Hörschalles wesentlich mitbestimmt. Geräusche mit größeren Schallanteilen bei mittleren Frequenzen - etwa zwischen 200 Hz und 3000 Hz - hören sich lauter an als andere mit gleicher Gesamtintensität, deren höchste Schallanteile in Frequenzgebieten darunter oder darüber liegen.

Auch die Schallübertragung und damit die Wirkung einer Schalldämmung ändert sich mit der Frequenz der Schallanteile. Hieraus folgt, daß die Qualität einer Schalldämmung davon mitbestimmt wird, wie die Dämmung von der Frequenz abhängt. Um diese Eigenschaft zu erfassen, wird dem Lautsprecher nicht das gesamte Rauschspektrum zugeführt. Hinter den Rauschgenerator wird ein Filter geschaltet, das von dem gesamten Rauschen jeweils nur einen schmalen Frequenzbereich zum Lautsprecher durchkommen läßt. Die Frequenzbandbreite, die das Filter passieren läßt, beträgt gewöhnlich eine Drittel-Oktave (auch Terz genannt).

Der Durchlaßbereich wird nacheinander in mehreren Stufen geändert, jede folgende Stufe läßt das Frequenzband der nächsthöheren Dritteloktave durch. Bezeichnet wird die Lage einer Dritteloktave im Frequenzbereich des Hörschalles durch ihre "Mittenfrequenz" f_m , das ist die Frequenz, die auf der logarithmisch geteilten Frequenzachse in der Mitte einer Dritteloktave liegt.

Wird so die Schalldämmung mit steigenden Mittenfrequenzen geprüft, erhält man ihre Abhängigkeit von der Frequenz. Um ein zuverlässiges Urteil über eine Schalldämmung zu erhalten, braucht man die Prüfung nicht auf den gesamten Frequenzbereich des Hörschalles zu erstrecken, es genügt das Frequenzgebiet zwischen 100 Hz und 3200 Hz. In den darunter und darüber liegenden Frequenzgebieten nimmt nicht nur die Empfindlichkeit des Gehörs ab, normale Geräusche enthalten in diesen Frequenzbereichen auch nur Schallanteile mit geringen Intensitäten.

Die Prüfung der Luft-Schalldämmung (Bild 55) beginnt damit, daß in dem Raum mit den geräuscherzeugenden Lautsprechern, dem Senderaum, die Schallpegel L_1 in jeder Dritteloktave zwischen 100 Hz und

3200 Hz gemessen werden. Der Schallpegelmesser enthält zwischen dem Mikrofon und dem Anzeigeteil ebenfalls ein Drittel-Oktavfilter, dessen Durchlaßbereich jeweils mit dem in der Lautsprecheranordnung übereinstimmen muß. Um mögliche Streuungen der Schallpegel innerhalb des Raumes auszugleichen, muß mit dem Mikrofon an sechs verschiedenen Punkten im Raum eine Meßreihe aufgenommen werden, die Ergebnisse der verschiedenen Meßreihen werden gemittelt.

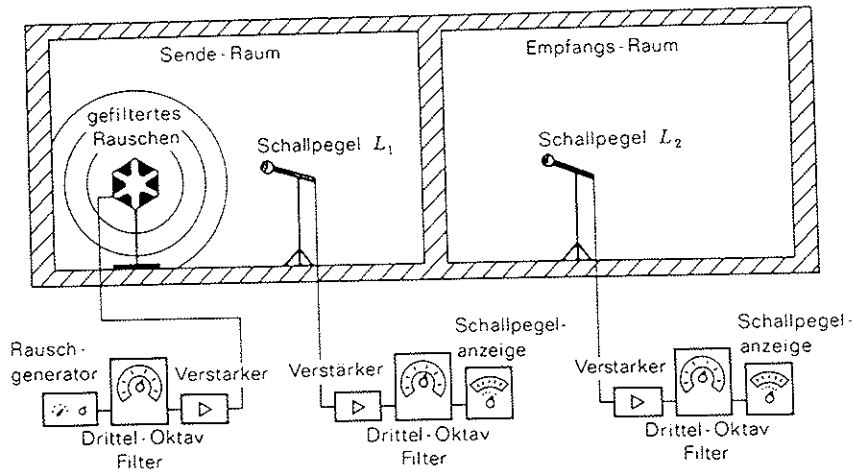


Bild 55. Meßanordnung zur Prüfung der Luftschalldämmung

Anschließend mißt man im Nebenraum, dem Empfangsraum, nach dem gleichen Verfahren und in der gleichen Weise die Schallpegel L_2 . Die Schallpegeldifferenzen $D = L_1 - L_2$ geben schon einen Aufschluß über die Höhe der Luft-Schalldämmung zwischen den beiden Räumen, sie allein reichen aber noch nicht zur objektiven Kennzeichnung der Schalldämmung aus. Denn die im Empfangsraum gemessenen Schallpegel L_2 hängen nicht allein von der Stärke der übertragenen Geräusche ab, sondern auch - erinnern wir uns an das Kapitel 22 - von der Absorption des Empfangsraumes, die je nach Art der Möblierung sehr verschieden ausfallen kann.

Ein objektives Maß für die Schalldämmung zwischen zwei Räumen muß von der zufälligen Absorption des Empfangsraumes unabhängig sein. Dies kann erreicht werden, wenn man für den Empfangsraum eine Bezugs-Absorption festlegt und die bei der vorhandenen Absorption gemessenen Schallpegel L_2 auf die Werte umrechnet, die bei einem Empfangsraum mit der festgelegten Bezugsabsorption gemessen worden wären.

Auf dieser Methode basieren die "Norm-Schallpegeldifferenzen" D_n zur Kennzeichnung der Luft-Schalldämmung zwischen zwei Räumen. Aus den Schallpegeldifferenzen $L_1 - L_2$ erhält man die Norm-Schallpegeldifferenzen durch Hinzufügen eines Korrekturgliedes, durch das die Schallpegel L_2 auf die Bezugsabsorption reduziert werden. Die Norm-Schallpegeldifferenzen werden nach folgender Formel ausgerechnet:

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{A_{0B}}{A_0} \text{ in dB}$$

A_{0B} = Bezugsabsorption

A_0 = vorhandene Gesamtaborption des Empfangsraumes.

Die Bezugsabsorption A_{0B} ist im Normblatt DIN 52210 mit 10 m^2 für Wohnräume festgelegt.

Will man ein Maß für die Luft-Schalldämmung eines einzelnen Bauteiles - einer Wand oder Decke also - erhalten, so müssen die Schallpegeldifferenzen durch ein anderes Korrekturglied ergänzt werden. Dieses entwickelt sich aus der Überlegung, daß die Luft-Schalldämmung eines Bauteiles durch den Unterschied der Schalleistungen gekennzeichnet werden kann, den die Trennwand oder -Decke zwischen beiden Räumen auf der Senderaumseite zugeführt bekommt und auf der anderen Seite in den Empfangsraum abstrahlt. Auf dieser Überlegung basieren die "Luft-Schalldämm-Maße" R , man erhält sie nach der folgenden Rechenvorschrift:

$$R = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A_0} \text{ in dB}$$

S = Fläche der beiden Räume gemeinsamen Trennwand oder -Decke in m^2 .

A_0 = vorhandene Gesamtaborption des Empfangsraumes in m^2 .

Die Luft-Schalldämm-Maße R dienen aber nicht nur dazu, die Luft-Schalldämmung einzelner Bauteile zu bewerten, im Normblatt DIN 4109 werden sie auch dazu benutzt, um daraus einen Maßstab für die Luft-Schalldämmung zwischen zwei Räumen abzuleiten. Genau besehen hätten dafür die Norm-Schallpegeldifferenzen herangezogen werden müssen, in dieser Sache ist die Normung nicht ganz konsequent.

Entsprechend ihrer Definition können nämlich die Schalldämm-Maße R von Bauteilen nur in akustischen Laboratorien gemessen werden, in denen die Meßräume so gebaut sind, daß die angrenzenden Bauteile keinen nennenswerten Betrag an indirektem Schall übertragen. Diese Vorausset-

zung ist in normalen Gebäuden praktisch nie erfüllt, die gewöhnlichen Wände und Decken des Hochbaues übertragen auf dem Wege der Körperschalleitung immer soviel Schallenergie in den Nebenraum, daß dieser Anteil nicht mehr gegen den direkt übertragenen Anteil zu vernachlässigen ist. Die Schalldämm-Maße einer Wand erreichen mit "bau-üblichen Nebenwegen" - so der Fachausdruck - also geringere Werte als unter definitionsgerechten Meßbedingungen.

Damit das Schalldämm-Maß aber auch unter normalen Baubedingungen beibehalten werden kann, hat man dafür das "Bau-Schalldämm-Maß" R' eingeführt, das ebenso wie das Schalldämm-Maß R ermittelt wird.

Die Bau-Schalldämm-Maße geben von der schalldämmenden Wirkung eines Bauteiles unter praktischen Bedingungen ein besseres Bild als die Schalldämm-Maße R . Doch die "bau-üblichen Nebenwege" beeinflussen die Bau-Schalldämm-Maße R' - je nach Art der angrenzenden Wände und Decken - unterschiedlich stark. Dies Moment der Unsicherheit spielt in der Regel keine besondere Rolle, bei kritischen Anforderungen an die Luft-Schalldämmung darf es aber nicht außer acht gelassen werden.

Die Absorptionen des Empfangsraumes, die sowohl bei den Norm-Schallpegel-Differenzen D_n als auch bei den Luft-Schalldämm-Maßen R berücksichtigt werden müssen, kann man in der Praxis nicht dadurch erhalten, indem man die Absorptionen aller Raumelemente aufsummiert, da die Schluckgrade der meisten Einsichtungsgegenstände in Wohn-, Schlaf- und Arbeitsräumen nicht bekannt sind. Die Norm schreibt deshalb vor, daß im Empfangsraum die Nachhallzeiten gemessen werden, daraus sind die Gesamtabsorptionen dann über die Sabine'sche Formel zu errechnen.

Zu bemerken wäre noch, daß die Korrekturen, die zu den Schallpegel-Differenzen $L_1 - L_2$ hinzugefügt werden müssen, um daraus die Norm-Schallpegel-Differenzen D_n oder die Schalldämm-Maße R zu bilden, in der Regel die Zahlenwerte der Schallpegeldifferenzen nur unwesentlich verändern. Eine Korrektur von mehr als 3 dB kommt nur selten vor.

Wenn wir nun in zwei benachbarten Räumen die Schallpegel L_1 und L_2 gemessen und dazu für den Empfangsraum die Gesamtabsorption A_0 ermittelt haben, können wir die Schalldämm-Maße R (oder die Norm-Schallpegel-Differenzen D_n) ausrechnen. Jetzt fragt es sich, wie auf Grund dieser Werte die Luft-Schalldämmung beurteilt werden kann.

Der einfachste und nächstliegende Weg führt über die sogenannten "mittleren Schalldämm-Maße" \bar{R} . Hierunter versteht man den arithmeti-

schen Mittelwert der Schalldämm-Maße, wegen der geringeren Meßgenauigkeit sind jedoch die bei 100 Hz und 3200 Hz gemessenen Schalldämm-Maße nur mit dem halben Wert einzusetzen. Mit Rücksicht darauf lautet dann die Formel für die Mittelwertbildung:

$$\bar{R} = \frac{R_1/2 + R_2 + R_3 + \dots + R_n/2}{n-1} \quad \text{in dB.}$$

Mit dem mittleren Schalldämm-Maß wurde früher die Luft-Schalldämmung zwischen zwei Räumen gekennzeichnet, auch heute verwendet man es noch in Sonderfällen. Um eine Vorstellung von der Größenordnung zu geben, in der sich \bar{R} -Werte bewegen: in der älteren Normung wurde gefordert, daß die Luft-Schalldämmung einer Wohnungstrennwand ein \bar{R} von mindestens 48 dB erreichen muß. Eine Wand mit einem \bar{R} über 50 dB dämmt den direkt übertragenen Schall bereits so gut, daß sein Anteil im Empfangsraum nicht höher liegt als die indirekt von den angrenzenden Bauteilen übertragenen Schallanteile. Die relativ geringe Schalldämmung einfacher Türen und Fenster drückt sich darin aus, daß ihre mittleren Schalldämmungen \bar{R} bei etwa 20 dB liegen.

Eine mittlere Norm-Schallpegel-Differenz wird ebenso gebildet wie das mittlere Schalldämm-Maß, auch für die Größenordnung der Zahlenwerte und ihre Relationen zur schalldämmenden Wirkung gilt im wesentlichen das gleiche.

Das mittlere Schalldämm-Maß ist zwar sehr einfach gebildet, aber es kennzeichnet die Wirkung einer Luftschalldämmung nur unvollkommen, denn die effektive Schalldämmung hängt nicht allein von den Beträgen der Schalldämm-Maße R ab, sondern auch deren Frequenzen müssen dabei berücksichtigt werden.

Eine Wand z. B., bei der die Schalldämm-Maße R unter 400 Hz und über 1,5 kHz relativ hohe Werte erreichen, zwischen diesen Frequenzen aber nur auf vergleichsweise niedrige Werte ansteigen, würden wir bei einer praktischen Prüfung als nicht besonders gut schalldämmend einstufen, weil sie den Schall in einem Frequenzbereich schlecht dämmt, in dem ihn unser Gehör gut wahrnehmen kann. Doch nach dem mittleren Schalldämm-Maß zu urteilen, das noch ziemlich hoch ausfallen würde, müßten wir es mit einer recht gut schalldämmenden Wand zu tun haben.

Wenn auch solche Diskrepanzen zu den Ausnahmen gehören, so kann das mittlere Schalldämm-Maß doch keinen allgemein verbindlichen Maßstab für die Schalldämmung abgeben. Es sind im Laufe der Zeit verschiedene Methoden geprüft und erwogen worden, um eine bessere Übereinstimmung zwischen dem Maß der Schalldämmung und ihrem gehörmäßigen

Effekt zu erhalten. Am Ende hat sich als beste Lösung eine Methode herausgebildet, die zu dem heute gültigen Luft-Schallschutz-Maß LSM führt.

Die etwas umständliche Methode, nach der das Luft-Schallschutz-Maß zu ermitteln ist, deutet darauf hin, daß verschiedene Erfahrungen darin verarbeitet sind. Zuerst werden die Schalldämm-Maße R als Punkte in ein Dämmmaß/Frequenz-Diagramm eingetragen und die Punkte durch Geradenstücke miteinander verbunden (Bild 56). Die Kurve, die durch die aneinander gesetzten Geradenstücke entsteht, gibt den frequenzabhängigen Verlauf der Schalldämmung wieder. Je höher ihre Punkte im Diagramm liegen, um so besser ist die Schalldämmung der Wand oder Decke. Im allgemeinen steigt eine solche Kurve, wenn auch mit mehr oder weniger großen Abweichungen, mit der Frequenz an.

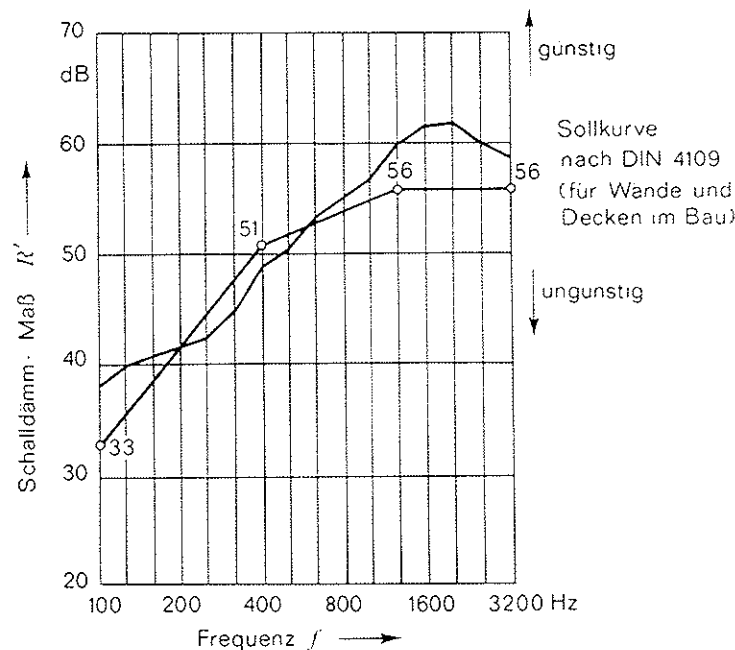


Bild 56. Graphische Darstellung der Luftschall-Dämmmaße R in Abhängigkeit von der Frequenz. Als Beispiel eine 25 cm starke, auf beiden Seiten verputzte Wand aus Vollsteinen, Flächengewicht der Wand 525 kg/m^2 (mittleres Schalldämm-Maß $\bar{R} = 52 \text{ dB}$, Luftschallschutz-Maß $\text{LSM} = +3 \text{ dB}$)

Die aus den Messungen hervorgegangene Kurve wird nun in ganz besonderer Weise mit einer genormten Sollkurve verglichen. Je nach Lage

der Meßpunkte wird die Sollkurve soweit nach oben oder unten verschoben, bis die Abweichungen gegen die noch unter ihr liegenden Meßpunkte - bei ungünstigen Schalldämm-Maßen also - im Mittel 2 dB betragen. Die über der verschobenen Sollkurve liegenden Meßpunkte werden als auf dieser Kurve liegend angesehen, sie gehen bei der Mittelwertbildung also mit 0 dB ein. Zu beachten ist noch, daß ungünstige Abweichungen bei 100 Hz und 3200 Hz mit dem halben Wert einzusetzen sind und die Summe der Abweichungen bei n Meßwerten deshalb nur durch $n-1$ zu teilen ist.

Meist gelingt es nicht beim ersten Mal, die richtige Verschiebung der Sollkurve zu finden, bei der die eben beschriebene Bedingung erfüllt wird. Hat man sie aber gefunden, so kann man das Luft-Schallschutz-Maß LSM sofort ablesen. Die Anzahl der dB, um die die Sollkurve nach oben oder unten verschoben werden mußte, stellt das Luft-Schallschutz-Maß dar. Bei einer Verschiebung nach oben, nach günstigen Werten also, erhält das LSM ein positives Vorzeichen, bei einer Verschiebung nach unten ein negatives.

Als Beispiel ist in Bild 56 das Ergebnis einer Schalldämmungs-Messung an einer 25 cm starken, beiderseits verputzten Kalksand-Vollsteinwand wiedergegeben. Das Luft-Schallschutz-Maß dieser Wand beträgt $+3 \text{ dB}$.

Die hier als Beispiel angeführte 25 cm starke Kalksand-Vollsteinwand hat für die Bewertung des Luftschallschutzes eine besondere Bedeutung dadurch erhalten, als der frequenzabhängige Verlauf ihrer Schalldämm-Maße bei der Festlegung der Sollkurve Pate gestanden hat. Da diese Wand sehr viel als Wohnungstrennwand gebaut worden war und sich hinsichtlich ihrer schalldämmenden Eigenschaften bewährt hatte, konnte man darauf einen praxisnahen Bewertungsmaßstab aufbauen. Die Skala des Luft-Schallschutz-Maßes ist auch so angelegt, daß Wände oder Decken mit einem Luft-Schallschutz-Maß von 0 dB an als Wohnungstrennwände bzw. -Decken als ausreichend gelten.

Gelegentlich kommt es vor, daß ein mittleres Schalldämm-Maß in ein Luft-Schallschutz-Maß verwandelt werden muß oder auch umgekehrt. Wie sich aber aus dem Vorherstehenden ergibt, kann eine strenge Beziehung zwischen beiden Größen nicht bestehen. Wenn jedoch der Kurvenverlauf der Schalldämm-Maße von der allgemeinen Tendenz, mit der Frequenz anzusteigen, nicht stärker abweicht, kann man mit guter Näherung jedem mittleren Schalldämm-Maß nach folgender Beziehung ein Luft-Schallschutz-Maß zuordnen:

$$\text{LSM} \approx \bar{R} - 50 \text{ in dB, bzw. } \bar{R} \approx \text{LSM} + 50 \text{ in dB.}$$

26. Die Luftschalldämmung einschaliger Wände und Decken

Durch die gemeinsame Trennwand oder Decke zwischen zwei Räumen werden normalerweise die Geräusche am stärksten von einem Raum in den benachbarten übertragen, die im Luftraum auf der einen Seite der Trennwand oder -Decke erzeugt werden. Wir müssen uns also darüber klar werden, von welchen Eigenschaften einer Wand oder Decke die Dämmung gegen die direkte Schallübertragung abhängt, wenn sie durch Luftschall angeregt wird.

Die Schallwellen erzeugen an den Oberflächen von Wänden und Decken Kräfte rasch wechselnder Richtung und Größe. Denken wir uns die ganze Fläche einer Wand in viele kleine Flächenteilchen aufgelöst, so wird die hinter jedem Flächenelement liegende Masse durch die Kraft an ihrer Vorderseite in Bewegung gesetzt, denn es gilt auch hier das Grundgesetz der Mechanik: Kraft = Masse · Beschleunigung. Doch die Massen hinter den Flächenelementen sind nicht frei beweglich, sondern sie sind durch elastische Kräfte miteinander verbunden.

Ohne auf weitere Einzelheiten einzugehen, können wir aus diesen Zusammenhängen schon schließen, daß der Schallübergang von den Massen hinter den Wandflächenelementen und ihrer elastischen Bindung untereinander abhängt. Doch Masse und elastischen Bindung müssen nicht über die ganze Dicke der Wand gleichbleibend sein, sie können auch sprunghaft wechseln, so wenn z. B. eine Wand aus zwei festen Schalen mit einem dazwischen liegenden Luftraum oder weichem Material aufgebaut ist. Es ist klar, daß die Schallübertragung im zuerst genannten Fall anders abläuft als im letzten genannten.

Die erste Eigenschaft, von der die Schalldämmung einer Wand abhängt, betrifft also ihren konstruktiven Aufbau, d. h. ob sie aus einer einzigen zusammenhängenden Schale besteht, oder aus mehreren Schalen zusammengesetzt ist, die durch Luftschichten oder weiche Materialien voneinander getrennt sind.

Die Luftschalldämmung einschaliger Wände (oder Decken), die wir in diesem Kapitel behandeln wollen, ist schon relativ früh von L. Berger (1911) untersucht worden. Die von ihm entdeckte Gesetzmäßigkeit, das "Bergersche Gesetz", können wir unter Berücksichtigung neuerer Er-

kenntnisse ganz allgemein so formulieren: Die Luftschalldämmung einschaliger Wände wächst in der Regel mit der Wandmasse pro Wandflächeneinheit, dem "Flächengewicht" der Wand, gewöhnlich in kg/m^2 angegeben.

In diesem Satz finden wir die Erklärung dafür, daß es in früheren Zeiten kaum Schwierigkeiten mit unzureichenden Luftschalldämmungen gab, weil alle Bauteile schwer und massiv ausgeführt wurden.

Das Bergersche Gesetz ist physikalisch leicht zu deuten, je höher nämlich das Flächengewicht liegt, um so größer ist die Massenträgheit der hinter jedem Flächenelement liegenden Masse und um so größer der Widerstand gegen die Schallübertragung durch Mitschwingungen. Diese Erklärung finden wir bestätigt, wenn wir zu Bild 56 zurückblättern, in der die Schalldämm-Maße einer 25 cm KSV-Wand abhängig von der Frequenz dargestellt sind. Das Ansteigen der Schalldämm-Maße mit der Frequenz können wir darauf zurückführen, daß die Masselemente der Wand den mit zunehmender Frequenz schneller werdenden Bewegung einen wachsenden Trägheitswiderstand entgegensetzen.

Nach dieser Erklärung scheinen die elastischen Kräfte, die die Masselemente miteinander verbinden, an dem Mechanismus der Schallübertragung durch die Wand nicht beteiligt zu sein. Eingehendere physikalische Untersuchungen haben auch gezeigt, daß die Wirkung der Elastizität bei relativ schweren Wänden, wie sie eine 25 cm starke Vollsteinwand schon darstellt, gegen die der Massenträgheit stark zurücktritt. Doch bei leichteren Wänden beeinflusst sie die Schalldämmung nicht unwesentlich und im allgemeinen in ungünstigem Sinne, darauf werden wir noch ausführlicher zurückkommen. Hiermit hängt es aber zusammen, daß die mittleren Schalldämm-Maße bzw. die Luftschallschutz-Maße nicht gleichmäßig mit dem Flächengewicht zunehmen.

In Bild 57 ist die Zuordnung zwischen dem Flächengewicht einschaliger, steifer Wände in kg/m^2 und der mittleren Schalldämmung bzw. dem Luftschallschutz-Maß bei bauüblichen Nebenwegen dargestellt (nach DIN 4109). Von diesem Diagramm können wir ablesen, welches Flächengewicht eine einschalige Wand erhalten muß, die eine bestimmte Luftschalldämmung erreichen soll, bzw. welche Luftschalldämmung von einer einschaligen Wand zu erwarten ist, deren Flächengewicht festgestellt werden kann.

Der ungünstige Einfluß der Wandelastizität zeigt sich besonders in dem abgeflachten Teil der Kurve etwa zwischen den Flächengewichten 10 bis 100 kg/m^2 . Einschalige Wände mit Flächengewichten in diesem Bereich

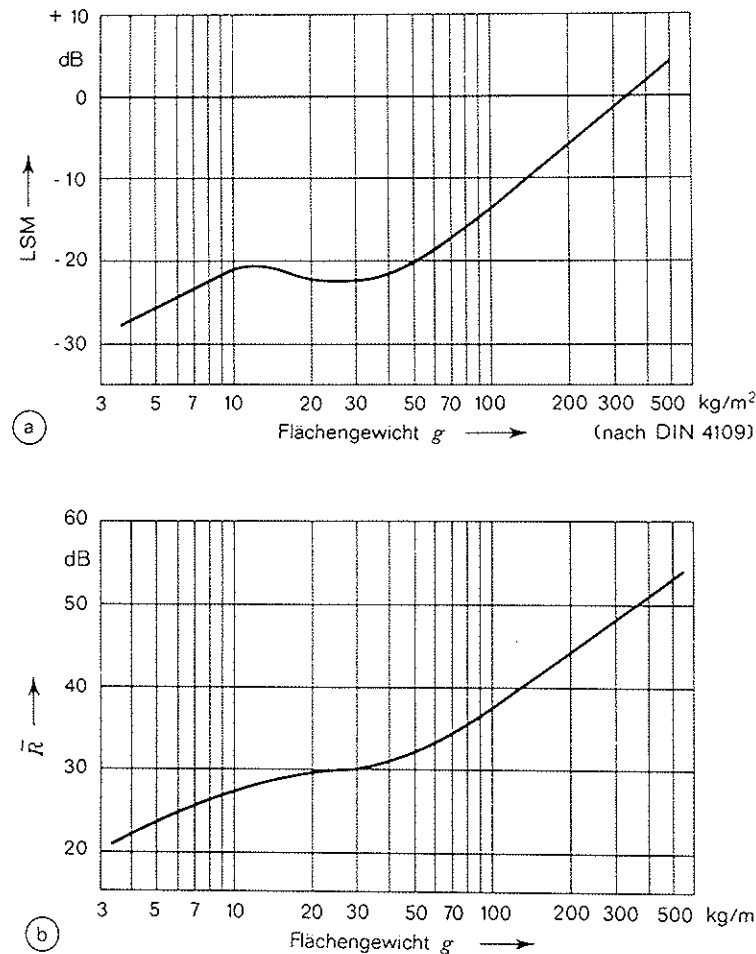


Bild 57. Verhalten des
 a) Luftschallschutz-Maßes LSM (nach DIN 4109)
 b) mittleren Schalldämm-Maßes R
 einschaliger Wände in Abhängigkeit vom Flächengewicht

oder etwas darüber geben also nur eine relativ niedrige Schalldämmung her. Wenn man in der Praxis Klagen hört, daß etwa in einem Verwaltungs- oder Fabrikationsgebäude zu viele Luftschallgeräusche von einem Raum in den Nachbarraum übertragen werden, stellt man meistens fest, daß es sich bei den Zwischenwänden um einschalige Wände handelt, deren Flächengewichte in diesem ungünstigen Bereich liegen. Hierzu einige Beispiele mit den zugehörigen Schalldämmwerten:

6 cm Porengipsplatten: Flächengewicht 36 kg/m^2 ; $\bar{R} = 29 \text{ dB}$; $LSM = -24 \text{ dB}$
 10 cm Porengipsplatten: Flächengewicht 62 kg/m^2 ; $\bar{R} = 34 \text{ dB}$; $LSM = -17 \text{ dB}$
 7,5 cm Porenbetonplatten: Flächengewicht 85 kg/m^2 ; $\bar{R} = 36 \text{ dB}$; $LSM = -15 \text{ dB}$.
 Alle Wände in fertigem Zustand.

In die gleiche Gruppe mit entsprechend geringen Schalldämmungen gehören auch Wände, die zwar aus zwei Schalen bestehen, etwa aus Gipskartonplatten oder Holzspanplatten, bei der aber beide Schalen an einem gemeinsamen Ständerwerk befestigt sind. Auch das Ausfüllen der Zwischenräume innerhalb beider Schalen mit Schallschluckstoffen bringt nicht, wie oft angenommen wird, eine nennenswerte Verbesserung der Schalldämmung mit sich.

Einschalige Wände, die eine gute Schalldämmung erreichen sollen, müssen nach dem Bergerschen Gesetz relativ schwer sein. Die Zuordnung zwischen dem Flächengewicht und den Schalldämmwerten nach Bild 57 gibt uns die Möglichkeit, dasjenige Flächengewicht zu fixieren, bei dem das Luftschallschutzmaß mit 0 dB einsetzt. Dieses Flächengewicht beträgt 350 kg/m^2 .

Doch bei einer Wohnungstrennwand mit diesem Flächengewicht liegt die Schalldämmung an der unteren Grenze des von der Norm geforderten Schallschutzes. Zwar ist bei dem Wert des Luftschallschutzmaßes von 0 dB eine zusätzliche Schallübertragung über "bauübliche Nebenwege" berücksichtigt, doch nur für einen durchschnittlichen Einfluß dieses Übertragungsweges.

In ungünstigen Fällen kann auf dem indirekten Wege ein größerer Schallanteil übertragen werden als normal, z. B. dann, wenn die flankierenden Wände als leichte steife Wände ausgeführt sind. Solche Wände leiten den indirekt zugeführten Schall überdurchschnittlich gut weiter. Um die Verschlechterung der Schalldämmung, die hierdurch verursacht wird, auszugleichen, verlangt die Norm in solchen Fällen Wohnungstrennwände mit wenigstens 400 kg/m^2 Flächengewicht, und zwar dann, wenn das Flächengewicht der flankierenden Wände unter 250 kg/m^2 liegt.

Wie die Erfahrung gezeigt hat, werden Wohnungstrennwände mit einem Luftschallschutzmaß von gerade eben 0 dB von vielen Leuten als nicht ausreichend schalldämmend angesehen. Wir sollten uns deshalb als Grenzwert nicht das Flächengewicht von 350 kg/m^2 merken, sondern im Gedächtnis festhalten:

Einschalige Wohnungstrennwände besitzen eine ausreichende Luftschalldämmung, wenn ihr Flächengewicht wenigstens 400 kg/m^2 beträgt.

Eine Wand mit ziemlich genau diesem Flächengewicht stellt die 24 cm starke, auf beiden Seiten verputzte Wand aus Kalksand-Lochsteinen dar, bei der die Rohdichte der Steine $1,4 \text{ kg/dm}^3$ beträgt. In der folgenden Tabelle 4 sind einige weitere ausreichend schwere Wände mit ihren Flächengewichten und den zugehörigen Schalldämmwerten aufgeführt (nach DIN 4109).

An dieser Stelle sind keine Beispiele für einschalige Decken aufgeführt. Der Grund: einschalige Wohnungstrenndecken kommen praktisch nicht vor. Eine Wohnungstrenndecke muß nämlich nicht nur einen ausreichenden Luftschallschutz bieten, sie muß daneben auch ausreichend trittschalldämmend sein, und diese Bedingung kann von einer einschaligen Decke nicht erfüllt werden.

Ergänzend muß noch darauf hingewiesen werden, daß die angegebenen Schalldämmwerte nur zu erreichen sind, wenn die Wände überall dicht sind. Schon kleine Öffnungen können die Schalldämmung merklich verschlechtern. Das gleiche gilt ebenso für mehrschalige Wände und für Decken.

Die Angaben in diesem Kapitel für die Schalldämmung einschaliger Wände reichen nicht zu sehr hohen Luftschall-Dämmwerten hinauf. Es gibt aber in der Praxis Fälle, in denen eine höhere Luftschalldämmung gefordert wird als sie hier für einschalige Wände aufgeführt sind. So z. B. verlangt die Norm für Trennwände zwischen einer Gaststätte und einer Wohnung ein Luftschall-Schutzmaß von + 10 dB.

Um derart hohe Schalldämmungen zu erzielen, genügt es nicht mehr, den direkt übertragenen Schall durch Wände mit hoher Schalldämmung abzuwehren. Bei Luftschall-Schutzmaßen mit mehr als etwa + 3 dB liegen die Schallanteile, die durch Körperschalleitungen auf den indirekten Wegen übertragen werden, in der gleichen Größenordnung wie der von der Wand durchgelassene Schallanteil. Sehr hohe Schalldämmungen erfordern deshalb besondere Maßnahmen, um auch den Grad der Schallübertragung auf den indirekten Wegen herabzudrücken. An späterer Stelle werden wir noch darauf zurückkommen.

Tabelle 4.

Spalte	a	b	c	d	e	f	g
Zeile	Normblatt Nr.	Bezeichnung	Rohdichte kg/dm³	Wandgewicht > 400 kp/m²		Wandgewicht > 350 kp/m² < 400 kp/m²	
				Mindestdicken ohne Putz mm	Wandgewicht mit Putz kp/m²	Mindestdicken ohne Putz mm	Wandgewicht mit Putz kp/m²
Mauerwerk aus Voll-, Loch- und Hohlblocksteinen, beiderseits 15 mm dick geputzt							
1	DIN 105	Lochziegel, Vollziegel	1	365	450	300	380
2			1,2	300	445	240	360
3		Vollziegel Hochbauklinker	1,4	240	405	—	—
4			1,8	240	485	—	—
5			1,9	240	505	—	—
6	DIN 106 Blatt 1	Kalksand-Hohlblocksteine	1,2	—	—	300	380
7			1,2	300	440	240	360
8		Kalksand-Lochsteine	1,2	300	445	240	360
9			1,4	240	405	—	—
10			1,6	240	440	—	—
11		Kalksand-Vollsteine	1,6	240	440	—	—
12			1,8	240	485	—	—
13			2	240	530	—	—
14	DIN 398	Hüttensteine	1,8	240	485	—	—
15		Hüttenhartsteine	1,9	240	505	—	—
16	DIN 18 151	Zwei- oder Dreikammer-Hohlblocksteine	1	300	420	—	—
17			1,2	300	460	—	—
18			1,4	240	410	—	—
19			1,6	240	440	—	—
20		Hohlblocksteine ohne Sandfüllung	1	365	400	—	—
21			1,2	—	—	—	—
22			1,4	—	—	300	355
23			1,6	300	430	240	380
24	DIN 18 152	Leichtbeton-Vollsteine	0,8	365	405	—	—
25			1	365	450	300	380
26			1,2	300	445	240	360
27			1,4	240	405	—	—
28			1,6	240	440	—	—
29	DIN 4165	Gasbeton- und Schaumbetonsteine	0,6	—	—	490	390
30			0,8	490	485	365	380
Leichtbetone und Betone in fugenlosen Wänden und geschoßhohen Platten, beiderseits 15 mm dick geputzt							
31	DIN 4164	Gas- und Schaumbeton	0,6	—	—	500	350
32			0,8	437,5	400	375	350
33	DIN 4232	Bims-, Steinkohlenschlacken-, Ziegelsplittbeton o. ä.	0,8	437,5	400	375	350
34			1	375	425	312,5	360
35			1,2	312,5	425	250	—
36			1,4	250	400	—	350
37		Haufwerkporiger Beton aus nicht porigen Zuschlagstoffen, z. B. Kies	1,6	250	450	187,5	350
38			1,7	250	475	187,5	370
39			1,5	250	425	—	—
40			1,7	250	475	187,5	370
41			1,9	187,5	405	—	—
42	DIN 1047	Kies- oder Splittbeton mit geschlossenem Gefüge	2,2	187,5	460	150	380

(Nach DIN 4109)

27. Der Einfluß der Wandelastizität auf die Luftschalldämmung, biegeeweiche und biegesteife Schalen

Wenn zwischen zwei nebeneinander liegenden Räumen eine höhere Luftschalldämmung wie etwa die zwischen Räumen benachbarter Wohnungen gefordert wird und diese Forderung durch einschalige schwere Wände erfüllt werden kann, brauchen wir im allgemeinen einen ungünstigen Einfluß der Wandelastizität nicht zu befürchten. Eine solche Wand muß dann ein so großes Flächengewicht erhalten, daß dieser Effekt keine große Rolle mehr spielt.

Doch nicht selten kommt es vor, daß schwere einschalige Wände nicht gesetzt werden können und trotzdem eine hohe Luftschalldämmung verlangt werden muß. Durch einschalige Wände ist dies Problem grundsätzlich nicht zu lösen, sondern nur durch mehrschalige, in der Regel 2-schalige Wände. Jede Schale einer solchen Wand aber liegt mit dem Flächengewicht in einem Bereich, in dem die Schalldämmung durch die Wandelastizität verschlechtert werden kann. Wir müssen uns deshalb fragen, ob und wie die nicht unwesentliche Verschlechterung der Schalldämmung, die dadurch entstehen kann, zu vermeiden oder zu verringern ist. Doch wie hängt die Elastizität einer Wand mit ihrer Schalldämmung zusammen?

Um uns hierüber klar zu werden, stellen wir die schalldämmenden Eigenschaften einer Wand aus einem Material mit sehr geringer Elastizität einer zweiten gleichschweren aus einem Material hoher Elastizität gegenüber. In das Diagramm des Bildes 58 sind die Schalldämm-Maße R einer Wand aus 0,57 cm dicken Bleiplatten und die einer Wand aus 8 cm dicken Gipsplatten eingetragen, das Flächengewicht beider Wände beträgt 65 kg/m^2 .

Die Kurven beider Schalldämmmaße unterscheiden sich in ganz bezeichnender Weise. Während die Schalldämmmaße der Wand aus Blei mit zunehmender Frequenz gleichmäßig ansteigen, zeigt die entsprechende Kurve der Wand aus Gipsplatten ein ganz anderes Verhalten. Nach kurzem Ansteigen fallen die Schalldämmmaße ab und steigen erst nach Durchlaufen eines Minimums wieder an. Diese beiden Beispiele zeigen, wie sehr die Elastizität einer Wand ihre Schalldämmung beeinflussen kann.

Die mittleren Schalldämmmaße beider Wände drücken die Tatsache deutlich aus: das mittlere Schalldämmmaß der Wand aus Bleiplatten beträgt $\bar{R} = 44 \text{ dB}$, das der gleichschweren Wand aus Gipsplatten dagegen nur $\bar{R} = 32 \text{ dB}$.

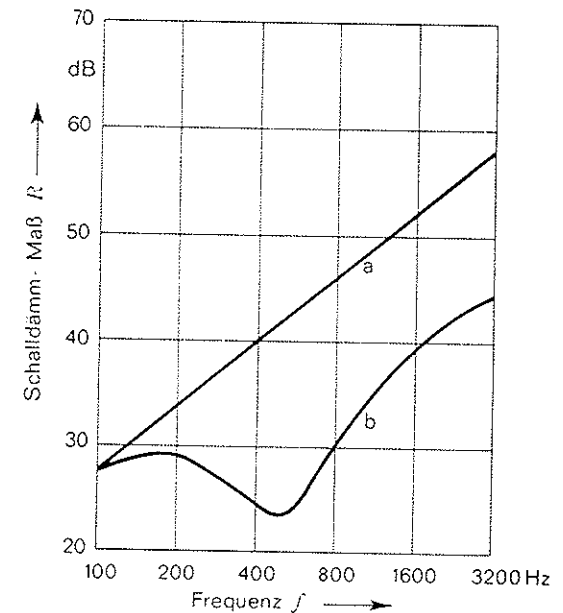
Bild 58.

Verlauf des Luftschalldämm-Maßes \bar{R}

a) einer Wand aus 0,57 cm dicken Bleiplatten; mittleres Schalldämm-Maß $\bar{R} = 44 \text{ dB}$

b) einer Wand aus 8 cm dicken Gipsplatten, mittleres Schalldämm-Maß $\bar{R} = 32 \text{ dB}$

Flächengewicht beider Wände: 65 kg/m^2
(idealisierte Darstellung)



Das gleichmäßige Ansteigen der Schalldämmmaße-Kurve, das die Wand aus Bleiplatten abgibt, ist physikalisch einfach zu deuten. Darin drückt sich der mit der Frequenz ansteigende Trägheitswiderstand der Massenelemente aus, aus denen die Wand besteht. Wie aber ist das Mitwirken der Elastizität bei der Wand aus Gipsplatten zu erklären?

Der physikalische Effekt, durch den die Elastizität einer Wand deren Schalldämmung beeinflusst, ist nicht ohne weiteres zu erkennen. Er wurde auch erst im Jahre 1942 von Lothar Cremer entdeckt. Um ihn zu verstehen, entwickeln wir ein besonderes Modell vom Aufbau einer Wand.

Wir denken uns eine Wand aufgebaut aus kleinen Masseteilchen, die von einer Wandseite zur anderen reichen und die durch Federn miteinander verbunden sind (Bild 59). Werden nun einige dieser Masseteilchen etwa durch einen Stoß senkrecht zur Wandfläche erregt, so wird die Erregung durch die Federn auf die benachbarten Masseteilchen übertragen, und so entsteht eine wellenartige Ausbreitung der Erregung. Da sich

bei diesen Wellen die Masseteilchen der Wand ebenso senkrecht zur Wandoberfläche bewegen wie bei einer Durchbiegung der Wand, nennt man sie Biegewellen.

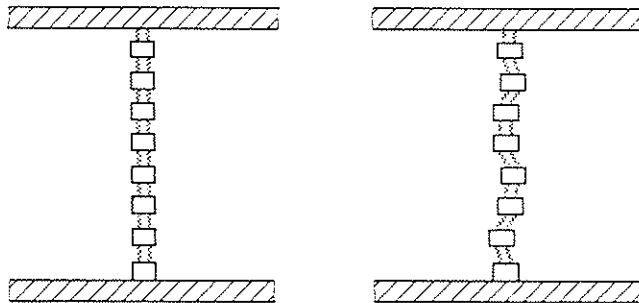


Bild 59.
Modell einer
Wand zur Ver-
anschaulichung
der Biegewellen

Für die Geschwindigkeit, mit der sich die Biegewellen in der Wand ausbreiten, wird in der Elastizitätstheorie eine Formel abgeleitet. Danach hängt die Geschwindigkeit dieser Wellen zunächst vom Flächengewicht der Wand und vom Elastizitätsmodul des Wandmaterials ab, außerdem aber - abweichend von der Schallwellenausbreitung in der Luft - noch von der Frequenz der Biegewelle, und zwar nimmt sie mit der Frequenz zu. Ein solches Verhalten bei Wellenausbreitungen nennt man in der Physik "Dispersion".

Biegewellen entstehen aber nicht nur dann in einer Wand, wenn ein kleiner Teil der Wandfläche zu Biegeschwingungen erregt wird. Eine Schallwelle, die schräg auf die Wand auftrifft, wirkt auf sie durch Druckunterschiede ein, die an der Wandoberfläche entlang eilen, und hierdurch wird in der Wand eine mitlaufende Biegewelle erzeugt.

Im allgemeinen weicht nun die Geschwindigkeit, mit der die Schalldruckwellen an der Wandoberfläche entlang gleiten, von der natürlichen Geschwindigkeit der Biegewellen ab. Doch es kann eben auch der Fall eintreten, daß diese beiden Geschwindigkeiten übereinstimmen, und in diesem Fall setzt die Wand ihrer Erregung zu Biegewellen kaum einen Widerstand entgegen. Infolgedessen wird die Schallwelle nahezu ungehindert in den Nachbarraum übertragen, d.h. die Schalldämmung ist sehr gering.

Der Entdecker Lothar Cremer hat diesen Effekt mit "Koinzidenz" oder "Spuranpassung" bezeichnet, einer guten Tradition der Physik würde es jedoch entsprechen, den Effekt mit dem Namen seines Entdeckers zu verbinden.

Wie wirkt sich dieser Effekt nun auf die Schalldämmung einer Wand insgesamt aus? Wir müssen davon ausgehen, daß auf jede Wand oder Decke eines Raumes nicht nur die direkt von der Schallquelle kommenden Schallwellen auftreffen, sondern auch die große Zahl der reflektierten Schallanteile. Das heißt, auf jede Raumbegrenzung treffen Schallwellen eines Schallereignisses aus allen Richtungen auf. Durch Koinzidenz wird jedoch nicht der gesamte auftreffende Schall durchgelassen, sondern nur der Teil, für den die Koinzidenzbedingung erfüllt ist. Deshalb sinkt auch die Kurve der Schalldämmmaß nicht auf nahezu 0 dB ab, sondern sie durchläuft ein Minimum.

Da es kein Wand- oder Deckenmaterial ohne Elastizität gibt, muß dieses Minimum in der Dämmmaß-Kurve jeder einschaligen Wand oder Decke erscheinen. Das trifft auch zu, doch hierdurch werden die schalldämmenden Eigenschaften einer Wand nur dann beeinträchtigt, wenn das Minimum in einem Frequenzbereich liegt, in dem unser Gehör Geräusche besonders gut empfängt. Praktisch heißt das: fällt das Minimum in der Schalldämmmaß-Kurve in den Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 2000 Hz, wird die Schalldämmung der Wand durch Koinzidenz verschlechtert, liegt es außerhalb dieser Frequenzgrenzen, wird die Schalldämmung dadurch kaum beeinträchtigt.

Sehen wir uns unsere beiden Beispiele daraufhin an, so können wir feststellen, daß das Dämmmaß-Minimum bei der Wand aus Bleiplatten außerhalb dieses Frequenzbereiches liegen muß, bei der Wand aus Gipsplatten dagegen fällt es mitten hinein.

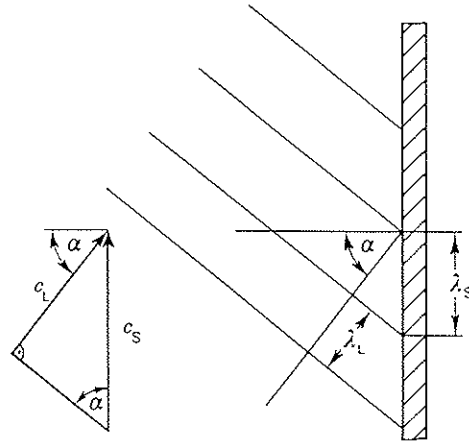
Das Minimum im Verlauf einer Schalldämmmaß-Kurve wird von den Schallwellen hervorgerufen, deren Spuren sich auf der Wandfläche mit den gleichen Geschwindigkeiten bewegen wie die natürlichen Biegewellen der Wand. Die Spurgeschwindigkeit nun ist am kleinsten, wenn eine Schallwelle parallel zur Wandfläche läuft, sie ist dann gleich der Schallgeschwindigkeit in der Luft. Bei Vergrößern des Winkels zwischen der Richtung der Schallwelle und der Wandfläche steigt die Spurgeschwindigkeit an (Bild 60), bei senkrechtem Einfall wird sie unendlich groß.

Da die Geschwindigkeit der Biegewellen mit der Frequenz zunimmt, setzt die Koinzidenz bei der kleinstmöglichen Spurgeschwindigkeit ein, also die der wand-parallelen Schallwellen mit der Schallgeschwindigkeit in der Luft als Spurgeschwindigkeit. Wenn wir nun diejenige Frequenz der Biegewellen bestimmen, bei der ihre Geschwindigkeit mit der Schallgeschwindigkeit in der Luft übereinstimmt, haben wir das Einsetzen der Koinzidenz und damit das Einsetzen des Minimums in der Schalldämmmaß-Kurve fixiert. Diese Frequenz wird in der Norm mit Grenz-

Bild 60.

Spurgeschwindigkeit c_s einer unter dem Winkel α einfallenden Schallwelle

$$c_s = c_L / \sin \alpha$$



frequenz bezeichnet, für Wände mit gleichmäßigem Gefüge ergibt sich dafür die folgende Formel:

$$f_g = \frac{20\,000}{d} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \text{ in Hz}$$

- E = Elastizitätsmodul (dynamischer) in kp/cm^2
 d = Wanddicke in cm
 ρ = Dichte des Wandmaterials in kg/m^3 .

Rechnen wir als Beispiel die Grenzfrequenz der 0,57 cm dicken Bleiplatte aus, so erhalten wir mit

$$\begin{aligned} E &= 200\,000 \text{ kp/cm}^2 \\ d &= 0,57 \text{ cm} \\ \rho &= 11\,300 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

eine Grenzfrequenz von

$$f_g = \frac{20\,000}{0,57} \sqrt{\frac{11\,300}{200\,000}} = 8\,350 \text{ Hz.}$$

Die Grenzfrequenz von 0,57 cm dicken Bleiplatten liegt also so hoch, daß sich die Koinzidenz auf deren Schalldämmung nicht auswirken kann.

Wir wollen das Ausrechnen der Grenzfrequenzen vereinfachen, indem wir in Tabelle 5 die Grenzfrequenzen f_{g0} für verschiedene Wände mit 1 cm Dicke aufführen. Um die Grenzfrequenz für eine Wand mit d cm Dicke zu erhalten, braucht man den Tabellenwert nur durch d zu teilen:

$$f_g = \frac{f_{g0}}{d} \text{ in Hz.}$$

Tabelle 5. Grenzfrequenzen f_{g0} verschiedener Wände von 1 cm Dicke.

Wandmaterial	Flächengewicht bei 1 cm Dicke in kg/m^2	Grenzfrequenz f_{g0} in Hz
Mauerwerk	17	1400
Beton	22	1400
Gips	10	3000
Glas	25	1100
Sperrholz	8	1800
Spanplatten	6	3600
Fichtenholz (quer-längs)	7	1600 - 1100
Stahl	75	1200
Blei	113	4800
Porenbeton	7	4500
Aluminium	27	1100

Um die Anwendung dieser Tabelle an einem Beispiel zu zeigen, wollen wir die Grenzfrequenz der 8 cm dicken Gipsplatten ermitteln, deren Schalldämmmaß-Kurve in Bild 58 dargestellt ist. Wir erhalten

$$f_g = \frac{3000}{8} = 385 \text{ Hz.}$$

Wie die Kurve der Schalldämmmaße dieser Platten auch eindeutig zeigt, beginnt das Minimum bei dieser Frequenz einzusetzen.

Wollen wir vermeiden, daß die Luft-Schalldämmung einer Wandschale durch Koinzidenz verschlechtert wird, so muß ihre Grenzfrequenz entweder unter 100 Hz oder über 2000 Hz liegen. Untersuchen wir zuerst, unter welcher Voraussetzung die Grenzfrequenz unter 100 Hz liegt.

Aus der oben stehenden Tabelle können wir ablesen, daß dazu die Wände bei allen Materialien relativ dick werden müssen; die untere Grenze liegt im günstigsten Fall bei etwa 15 cm. Wir können daraus schließen, daß die Grenzfrequenzen nur bei schweren Wänden unter 100 Hz liegen.

Betrachten wir das Verhalten der Grenzfrequenzen bei abnehmenden Wanddicken, etwa von 15 cm an, so müssen wir feststellen, daß die Wände aus allen Materialien den kritischen Bereich von 100 Hz bis 2000 Hz durchlaufen, wo also die Koinzidenz die effektive Schalldämmung wesentlich verschlechtert.

Erst unterhalb einer bestimmten, vom Wandmaterial abhängigen Wanddicke überschreitet die Grenzfrequenz das Ende des kritischen Frequenzbereiches bei 2000 Hz. Von da an verschwindet der ungünstige

Einfluß der Koinzidenz auf die Schalldämmung der Wand. Doch mit den geringen Waddicken sind auch niedrige Flächengewichte verbunden, als einschalige Wände sind solche Wände deshalb nur wenig schalldämmend, praktisch kommen sie daher nur für mehrschalige Wände in Frage.

Wenn wir zwei Wände gleichen Flächengewichtes miteinander vergleichen, von denen die Grenzfrequenz der einen über 2000 Hz und die der anderen unter 2000 Hz liegt, so unterscheiden sich die Wandmaterialien durch ihre Elastizität. Wie aus der Formel für die Grenzfrequenz hervorgeht, muß der Elastizitätsmodul der ersteren unter dem der zweiten liegen, das heißt aber auch, daß die Wand mit der über 2000 Hz liegenden Grenzfrequenz einer Durchbiegung einen geringeren Widerstand entgegensetzt als die mit einer Grenzfrequenz unter 2000 Hz. Man bezeichnet deshalb Wandschalen mit Grenzfrequenzen über 2000 Hz als "biegeweiche" Schalen, und die mit unter 2000 Hz liegenden Grenzfrequenzen als "biegesteife" Schalen.

Biege weiche Schalen besitzen nicht nur den Vorzug, daß ihre Schalldämmung durch Koinzidenz nicht beeinträchtigt wird, sie zeichnen sich noch durch eine weitere für die Schalldämmung sehr nützliche Eigenschaft aus.

Wird nämlich eine Wandschale etwa am Rande zu Biegeschwingungen erregt, so übertragen die dadurch entstehenden Biege wellen Schallenergie in den angrenzenden Luftraum. Eine Wandschale strahlt nun die Schallanteile mit Frequenzen unterhalb ihrer Grenzfrequenz weniger stark in den Luftraum als die in dem darüber liegenden Frequenzgebiet, und je höher die Grenzfrequenz, um so weniger Schallenergie wird bei allen tieferen Frequenzen abgestrahlt.

Da sich eine biege weiche Schale aber gerade dadurch auszeichnet, daß ihre Grenzfrequenz relativ hoch liegt, strahlt sie Schallanteile mit Frequenzen des darunter liegenden Frequenzgebietes, in dem Geräuschteile besonders stark stören, nur wenig ab. Die praktische Bedeutung dieser Eigenschaft können wir daran ermessen, daß die Randeinspannung jeder Wandschale von den Schallanteilen, die sich auf dem indirekten Wege ausbreiten, zu Biegeschwingungen erregt wird.

Für die unterschiedliche Schallabstrahlung, die mit der Koinzidenz zusammenhängt, gilt auch die Umkehrung. Das heißt also: treffen Luftschallwellen auf die Oberfläche einer Wandschale, so werden die Randeinspannungen bei Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz nur wenig, oberhalb der Grenzfrequenz dagegen stark zu Biegeschwingungen er-

regt. Dieser Effekt ergänzt die Vorzüge einer biege weichen Schale, da sie unabhängig von der Wandseite, vor der sie angeordnet wird, die Schalldämmung nach beiden Richtungen verbessert.

Ebenso wie bei einschaligen Wänden hängt auch die Schalldämmung mehrschaliger Wände sehr wesentlich von den Flächengewichten der einzelnen Wandschalen ab. Eine Wandschale einer mehrschaligen Wand muß deshalb nicht nur biege weich sein, sie soll auch ein möglichst hohes Flächengewicht besitzen. Leider widersprechen sich diese beiden Forderungen weitgehend. Doch die unterschiedlichen Eigenschaften der Baumaterialien geben die Möglichkeit, einen günstigen Kompromiß zu finden.

Als Material für eine biege weiche Schale wäre Blei am besten geeignet. Doch als Baumaterial kann man es bestenfalls einmal für Türen benutzen, die eine sehr hohe Schalldämmung erreichen sollen. Aber auch alle anderen Schwermetalle, insbesondere also auch Eisen, geben als Bleche biege weiche Schalen mit günstigen Eigenschaften ab.

Als biege weiche Schalen für Wände und Decken werden in der Praxis hauptsächlich benutzt:

Kalkmörtelputz, 1,5 cm dick, auf freihängenden Putzträgern oder auf Holzwolle-Leichtbauplatten;

Gipskartonplatten, 0,95 cm bis 1,8 cm dick;

Holzspanplatten, 1,6 bis 1,9 cm dick.

Für Sonderfälle kann man auch speziell präparierte Schalen erhalten, die die ungewöhnlichen Ansprüche einer biege weichen Schale besonders gut erfüllen. Entweder sind in diese Schalen kreuzweise Rillen eingeschnitten, wodurch sie biege weicher werden ohne daß das Flächengewicht wesentlich verringert wird, oder es sind über die ganze Fläche verteilt dicht nebeneinander kleine Massestücke aufgeklebt, die das Flächengewicht erhöhen ohne dabei die Elastizität nennenswert zu beeinflussen (Brevunda-System).

28. Die Luftschalldämmung zweischaliger Wände

Eine hohe Luftschalldämmung bei geringen Flächengewichten kann nur durch 2-schalige Wandkonstruktionen erzielt werden, wobei diese bestimmte Voraussetzungen erfüllen müssen. Um uns hierüber klar zu werden, müssen wir uns einen Einblick in den physikalischen Vorgang verschaffen, durch den die Schallerregung einer Wandschale auf die andere übergeht und so in den Nebenraum gelangt.

Wir gehen von den Kurven der Schalldämm-Maße aus, in denen sich die schalldämmenden Eigenschaften unmittelbar ausdrücken. In dem Bild 61 sind die - idealisierten - Dämmmaß-Kurven von zwei 2-schaligen Wänden und einer einschaligen Wand dargestellt. Alle drei Wände besitzen das gleiche Flächengewicht von 24 kg/m^2 , jede Schale der beiden 2-schaligen Wände hat 12 kg/m^2 , sie unterscheiden sich durch die Schalenabstände, der bei der Wand I $a = 8,5 \text{ cm}$ und bei der Wand II $a = 1,5 \text{ cm}$ beträgt.

Vergleichen wir die Kurven der beiden 2-schaligen Wände mit der der gleichschweren einschaligen Wand, so fällt ein ganz charakteristischer Unterschied auf. Während die Kurve der einschaligen Wand langsam, aber gleichmäßig (mit 6 dB pro Oktave) ansteigt, fallen die Kurven der 2-schaligen Wände nach anfänglichem Ansteigen ab, bis sie bei bestimmten Frequenzen ein Minimum erreicht haben. Nach Überschreiten des Minimums aber nehmen die Schalldämm-Maße wieder zu, und zwar dann sehr viel stärker als bei der einschaligen Wand (mit etwa 18 dB pro Oktave).

Das Minimum in der Dämmmaß-Kurve, das bei jeder 2-schaligen Wand erscheint, hat nichts mit der Wandelastizität der Schalen und einer damit verbundenen Koinzidenz zu tun. Die in Bild 61 dargestellten Kurven beziehen sich auf Wände mit Schalen, deren Wandelastizitäten vernachlässigbar sind, d.h. biegeweiße Schalen.

Das Durchlaufen des Minimums und das sich anschließende starke Ansteigen der Dämmmaß-Kurve lassen sich erklären, wenn wir die 2-schalige Wand als ein Schwingungssystem auffassen, das durch eine einfallende Schallwelle zu erzwungenen Schwingungen erregt wird. Die bei-

den Wandschalen stellen dabei zwei Massen dar, die durch die Elastizität der Luft zwischen ihnen als Feder miteinander verbunden sind.

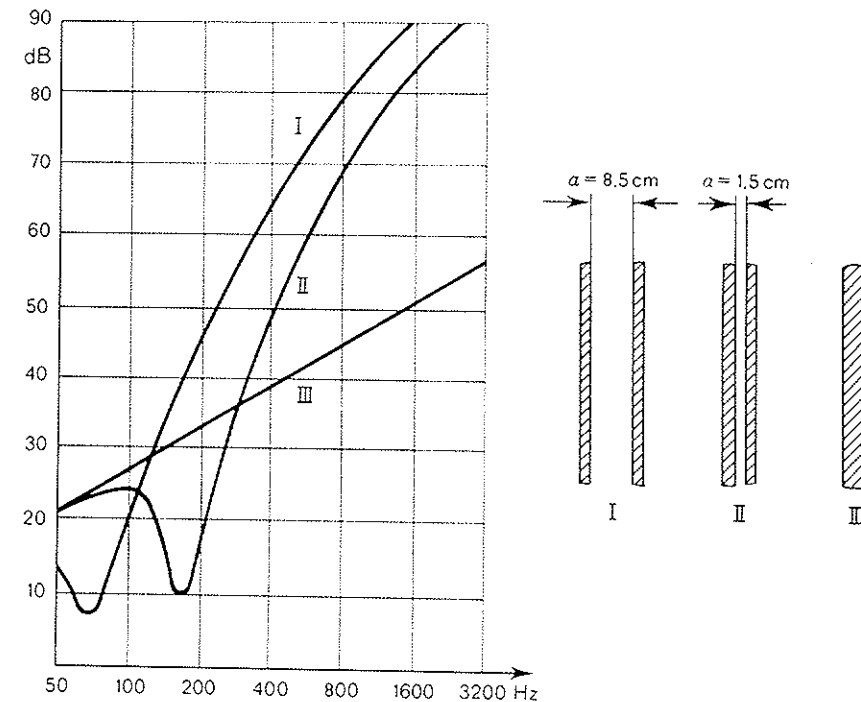


Bild 61. Verlauf der Luftschalldämm-Maße \bar{R} zwei-schaliger Wände ohne Schallnebenwege; Flächengewicht einer Schale: 12 kg/m^2 (idealisierte Darstellung); Schalenabstand: I) $a = 8,5 \text{ cm}$
II) $a = 1,5 \text{ cm}$
III) Einschalige Wand mit einem Flächengewicht von 24 kg/m^2

Wenn bei einem derartigen Schwingungssystem auf eine der beiden Massen periodische Kräfte, wie sie durch das Einfallen einer Schallwelle entstehen, einwirken, werden beide Massen zu Schwingungen erregt. Die Schwingungsweiten beider Massen hängen nicht nur von der Größe der einwirkenden Kräfte ab, sondern sehr wesentlich auch von der Frequenz.

Bei niedrigen Frequenzen bewegen sich beide Massen so, als ob sie fest miteinander verbunden wären, die Trägheitskräfte der Massen sind noch so gering, daß sie die Feder nicht beanspruchen. In Bezug auf die Schalldämmung verhält sich die Wand wie eine einschalige. Mit zunehmender

Frequenz jedoch beginnen die Massenträgheiten beider Massen wirksam zu werden. Wenn Feder- und Trägheitskräfte gleich groß geworden sind, kommt es zur sogenannten Resonanz, bei der die Schwingungsweiten beider Massen sehr stark ansteigen. Bei der Resonanzfrequenz f_0 erreichen die Schwingungsweiten ein Maximum, und infolgedessen sinkt die Schalldämmung auf ein Minimum. Bei weiterem Ansteigen der Frequenz aber nehmen die Trägheitskräfte weiter zu und übertreffen die Federkraft immer stärker. Die Feder ist immer weniger imstande, die Anregung der einen Masse auf die andere zu übertragen, d.h. die Schalldämmmaße der Wand nehmen sehr stark zu.

Aus dieser Betrachtung folgt, daß die besseren schalldämmenden Eigenschaften einer 2-schaligen Wand erst oberhalb der Resonanzfrequenz einsetzen. In der Umgebung der Resonanzfrequenz verhält sich die 2-schalige Wand sogar ungünstiger als die einschalige. Wir können daraus die Regel ableiten: die Resonanzfrequenz einer 2-schaligen Wand muß genügend tief liegen, d.h. praktisch unter 100 Hz, damit ihre besonderen schalldämmenden Eigenschaften auch zum Tragen kommen.

Damit wir diese Bedingung erfüllen können, müssen wir wissen, wie die Resonanzfrequenz ermittelt werden kann. Aus der Schwingungslehre ergibt sich dafür die folgende Formel:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s' \left(\frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} \right)}$$

Hierin ist:

s' = Federkonstante der Luftschicht (oder einer eventuellen Schicht aus Weichfaserstoffen), bezogen auf die Wandflächeneinheit.

g_1, g_2 = Flächengewichte der beiden Schalen.

Es gibt verschiedene Konstruktionen 2-schaliger Wände, auf die wir nun eingehen wollen, und für jede der Konstruktionen werden wir eine darauf zugeschnittene Formel für die Resonanzfrequenz (auch Eigenfrequenz genannt) angeben.

a) die 2-schalige Wand aus 2 biegeweichen Schalen

Eine Wand dieser Konstruktion liefert bei dem niedrigsten Flächengewicht die höchste Luftschalldämmung. Die am Anfang dieses Kapitels behandelten 2-schaligen Wände gehören auch zu dieser Gruppe. Wenn

beide Schalen das gleiche Flächengewicht g und den Abstand a haben, kann die Resonanzfrequenz nach der folgenden einfachen Formel ausgerechnet werden:

$$f_0 = \frac{850}{\sqrt{g \cdot a}} \text{ in Hz}$$

g = Flächengewicht einer Schale in kg/m^2

a = Schalenabstand in cm.

Für die Wand I z. B. mit 12 kg/m^2 Flächengewicht je Schale und 8,5 cm Schalenabstand, deren Schalldämm-Maße in Bild 61 dargestellt sind, erhalten wir als Resonanzfrequenz

$$f_0 = \frac{850}{\sqrt{12 \cdot 8,5}} = 85 \text{ Hz}$$

Für die Wand II mit den gleichschweren Schalen und 1,5 cm Schalenabstand ergibt sich

$$f_0 = \frac{850}{\sqrt{12 \cdot 1,5}} = 200 \text{ Hz}$$

Wie aus der letzten Formel für die Resonanzfrequenz hervorgeht - und die Rechenbeispiele verdeutlichen es - hängt die Resonanzfrequenz gleichermaßen von dem Flächengewicht einer Schale und den Innenabständen beider Schalen ab. Die Wand II z. B. hat wegen des geringen Abstandes der Schalen sehr ungünstige schalldämmende Eigenschaften, ihre Resonanzfrequenz liegt mit 200 Hz zu hoch. Der Schalenabstand der Wand I dagegen gibt mit 8,5 cm eine Resonanzfrequenz von 85 Hz und ist daher genügend groß. Diese Wand ist als schalldämmende Wand gut geeignet.

Sehen wir die Frequenz von 85 Hz als obere zulässige Grenze für die Resonanzfrequenz an, so können wir den noch zulässigen Mindestabstand beider Schalen festlegen, er beträgt:

$$a_{\min} = \frac{100}{g} \text{ in cm}$$

g = Flächengewicht einer der beiden gleichschweren Schalen in kg/m^2 .

In der Praxis sind jedoch aus verschiedenen Gründen höhere Abstände anzustreben, als sie sich nach dieser Formel ergeben.

Leider ist es bei 2-schaligen Wänden nicht - wie bei einschaligen - möglich, Diagramme anzugeben, aus denen bei bekannten Flächenge-

wichten der Schalen und dem Schalenabstand das Luft-Schallschutzmaß LSM und das mittlere Schalldämm-Maß \bar{R} abgelesen werden können. Deshalb sind nachstehend einige praktische Beispiele 2-schaliger Wände mit biegeweichen Schalen angegeben, deren Luft-Schallschutzmaße größer oder gleich 0 dB sind; deren Luftschalldämmung also einer ausreichend schalldämmenden Wohnungstrennwand entspricht.

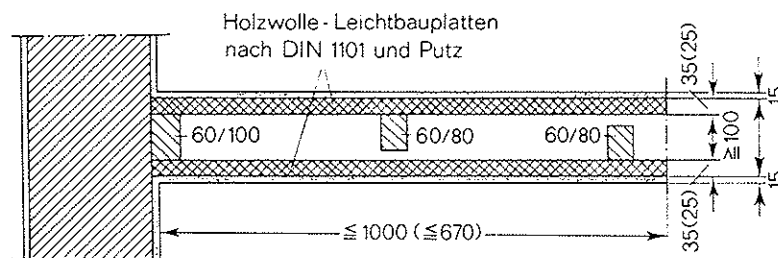


Bild 62. Zwei-schalige Leichtbauwand aus Holzwole-Leichtbauplatten, auf geteiltem Ständerwerk montiert und auf den Außenseiten verputzt.
Flächengewicht: ca. 70 kg/m^2 LSM = + 3 dB (nach DIN 4109)

In Bild 62 ist eine 2-schalige Wand dargestellt, deren Schalen aus außen verputzten Holzwole-Leichtbauplatten bestehen. Jede Schale ist auf eigenem Ständerwerk montiert. Nach diesem Muster wurden die ersten Leichtbauwände mit guter Schalldämmung gebaut. Das Flächengewicht einer solchen Wand - beide Schalen zusammengekommen - beläuft sich auf etwa 70 kg/m^2 . ihr Luftschallschutzmaß bei bauüblichen Nebenwegen beträgt + 3 dB. Zum Vergleich: das Flächengewicht einer einschaligen Wand muß 480 kg/m^2 betragen, um das gleiche Luftschallschutzmaß zu erreichen.

Bild 63 enthält die Darstellung einer ähnlichen Wandkonstruktion, bei der die Schalen aus anderen Materialien bestehen, wie z.B. Gipskartonplatten, Holzspanplatten, auch Bleche aus Eisen oder anderer Metalle können dafür in Frage kommen. In der Mitte zwischen den Schalen ist eine Matte aus Schallschluckmaterial vorzusehen, die verhindern soll, daß sich zwischen den Schalen stehende Schallwellen ausbilden, die die Schalldämmung herabsetzen würden. Bei Schalen aus Holzwole-Leichtbauplatten ist diese Maßnahme überflüssig, da diese auf der unverputzten Innenseite gute Schallschlucker darstellen.

Beide Schalen der in den Bildern 62/63 angegebenen Wände sind über die Randeinspannung durch festes Material miteinander verbunden, aber die Schalenflächen selbst dürfen an keiner Stelle eine feste Verbindung

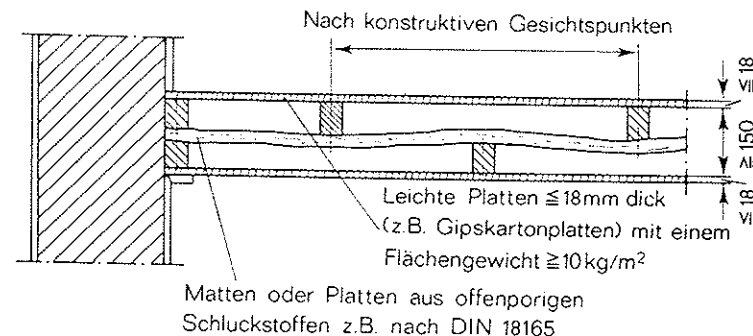


Bild 63. Zwei-schalige Leichtbauwand aus Gipskartonplatten, Holzspanplatten u.ä. auf geteiltem Ständerwerk. LSM = 0 bis + 3 dB (nach DIN 4109)

haben. Man darf also auch nicht beide Schalen an einem gemeinsamen Ständerwerk befestigen, das würde zwar den Wandaufbau wesentlich vereinfachen als wenn für beide Schalen ein eigenes Ständerwerk aufgebaut werden muß, aber dann verhält sich die Wand nicht mehr wie eine 2-schalige, sie erreicht nur noch eine geringe Schalldämmung. Die Randeinspannungen dagegen können fest miteinander verbunden sein, weil die biegeweichen Schalen nur wenig Schallenergie aufnehmen oder abstrahlen.

Da eine 2-schalige Wand dieser Art leicht ist, könnte sie direkt auf einen schwimmenden Estrich gesetzt werden. Doch dann sinkt ihr Luftschallschutzmaß um etwa 10 dB, da ein durchgehender Estrich einen relativ großen Schallanteil durch Körperschalleitung in den Nebenraum leitet. Soll die schalldämmende Wirkung der 2-schaligen Wand vollausgenutzt werden, muß sie unmittelbar auf der Rohdecke stehen. Die im Text und bei den Bildern angegebenen Luftschallschutzmaße beziehen sich auf diesen Zustand.

b) die biegesteife Schale mit biegeweicher Vorsatzschale

Bei dieser 2-schaligen Wandkonstruktion wird vor eine mittelschwere und daher biegesteife Schale eine biegeweiche Schale gesetzt. Die mittelschwere Schale ist auch dadurch zu kennzeichnen, daß sie als einschalige Wand ein mittleres Schalldämm-Maß \bar{R} von etwa 35 bis 45 dB abgeben würde. Da das Flächengewicht der biegesteifen Schale wesentlich höher liegt als das der biegeweichen, schwingt die biegesteife Schale im

Bereich der Resonanzfrequenz kaum mit. Deshalb geht in die Formel für die Resonanzfrequenz nur das Flächengewicht der biegeweichen Schale ein. Sie lautet:

$$f_0 = \frac{600}{\sqrt{g \cdot a}} \text{ in Hz.}$$

g = Flächengewicht der biegeweichen Schale in kg/m^2

a = Schalenabstand in cm.

Legen wir auch hier die obere Grenze für die Resonanzfrequenz mit 85 Hz fest, so ergibt sich daraus als Mindestabstand für beide Schalen:

$$a_{\min} = \frac{50}{g} \text{ in cm.}$$

g = Flächengewicht der biegeweichen Schale in kg/m^2 .

Während aus zwei biegeweichen Schalen praktisch nur Wände hergestellt werden können, eignen sich biegesteife Schalen mit biegeweicher Vorsatzschale sowohl für Wände als auch für Decken. Es muß nur darauf geachtet werden, daß das Flächengewicht der biegesteifen Schale genügend groß ist, es darf einen Wert von 100 kg/m^2 nicht unterschreiten, anderenfalls wird ein Luft-Schallschutzmaß von 0 dB nicht erreicht.

Die biegeweiche Vorsatzschale ist ebenso aufgebaut wie eine der beiden einer Wand aus zwei biegeweichen Schalen. Als praktische Beispiele sind in Bild 64 Muster dieser Wandkonstruktion angegeben, deren Luft-Schallschutzmaße über 0 dB liegen. Wenn das Flächengewicht der biegesteifen Schale den Wert von 200 kg/m^2 übersteigt, kann das Ständerwerk unmittelbar an der biegesteifen Schale befestigt werden, bei geringeren Flächengewichten muß es dagegen mit Abstand montiert werden.

Die biegeweiche Vorsatzschale kann auch auf etwa 3 cm dicken Matten aus Stein- oder Glaswolle vor die biegesteife Schale montiert werden, sofern die Matten genügend weich sind. Um sicherzustellen daß diese Bedingung erfüllt ist, sollte bei Anwendung dieser Methode immer ein Prüfzeugnis angefordert werden. Grundsätzlich falsch ist jedoch eine Ausführung, bei der eine Putzschicht als biegeweiche Schale auf Holz- wolle-Leichtbauplatten angebracht wird, die unmittelbar an der biege- steifen Schale befestigt sind. Da die Holz- wolle-Leichtbauplatten zu steif sind, steigt die Resonanzfrequenz auf über 100 Hz an und die effektive Schalldämmung der Wand wird nicht verbessert, sondern verschlechtert.

Die Flächengewichte von Wänden aus einer biegesteifen Schale mit biege- weicher Vorsatzschale bewegen sich in dem Bereich von etwa 150 kg/m^2

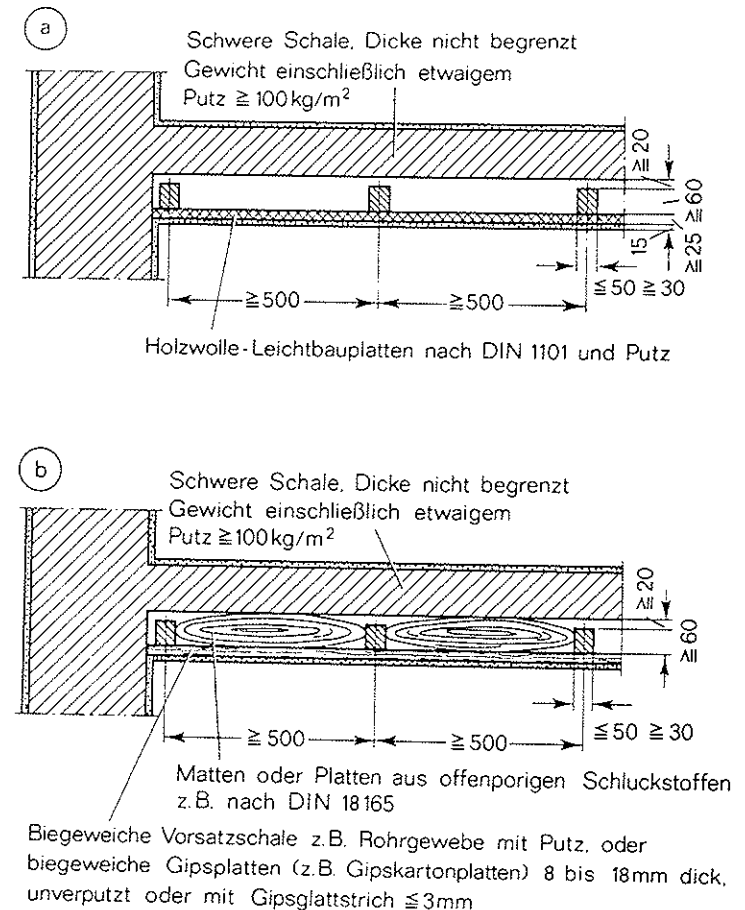


Bild 64. Zwei-schalige Wände aus einer biegesteifen Schale mit biegeweicher Vor-
satzschale aus
a) Holz- wolle-Leichtbauplatten, auf der Außenseite verputzt,
b) Gipskartonplatten, Holzspanplatten u.ä.
LSM = 0 bis +3 dB
Ist das Flächengewicht der biegesteifen Schale größer als 200 kg/m^2 , kann
das Ständerwerk unmittelbar an der biegesteifen Schale befestigt werden
(nach DIN 4109)

bis 300 kg/m^2 . Sie sind also noch relativ schwer, und da ihre Her- stel- lungskosten vergleichsweise hoch liegen, wird man sie als Trennwände bei Neubauvorhaben nur in Sonderfällen vorsehen. Ihr Prinzip eignet sich aber vorzüglich dazu, die unzureichende Schalldämmung einer ein- schaligen Wand mit zu niedriger Schalldämmung zu verbessern. Die

einschalige Wand bildet dann die biegesteife Schale, vor die eine biege- weiche Schale montiert wird.

Während mittelschwere biegesteife Schalen bei Wänden, die größere Schalldämmungen aufweisen müssen, seltener anzutreffen sind, begeg- nen sie uns bei allen Deckenkonstruktionen, bei denen die Flächenge- wichte der Decke aus statischen Gründen niedrig gehalten werden müs- sen. Die biege- weiche Vorsatzschale erscheint bei solchen Decken als Unterdecke. Im Rahmen des Schallschutzes von Decken werden wir da- rauf noch eingehen.

c) die 2-schalige Wand aus 2 biegesteifen Schalen

Diese Wand liefert im allgemeinen keine bessere Luftschalldämmung als eine einschalige Wand mit gleichem Flächengewicht. Unter den meisten vorliegenden Voraussetzungen geht die Verbesserung, die der 2-schalige Aufbau mit sich bringt, durch die Folgen des Koinzidenzeffektes wie- der verloren, da sich gewöhnlich beide ungünstigen Einflüsse, welche die Koinzidenz hervorruft, addieren. Im kritischen Frequenzbereich durch- laufen nicht nur die Schalldämm-Maße das Koinzidenz-Minimum, son- dern beide Schalen strahlen auch noch den Schall, den sie über die Rand- einspannung erhalten, besonders stark ab und nehmen den zugestrahnten entsprechend gut auf.

Wenn die Randeinspannungen nicht durch festes Material miteinander verbunden sind, wird der Weg der Körperschalleitung unterbrochen. Die nicht unwesentliche Verbesserung der Schalldämmung, die damit ver- bunden ist, kann nur in wenigen Fällen genutzt werden, dann aber sollte man immer Gerbauch davon machen. Denn nicht nur die Luftschalldämm- ung wird dadurch verbessert, auch die Schallanteile, die von einer di- rekten Anregung der Bauteile herrühren, werden weniger stark übertra- gen.

Die Randeinspannungen einer Wand aus zwei biegesteifen Schalen können weitgehend voneinander getrennt werden, wenn es möglich ist, beide Schalen mit durchgehender Luftschicht aufzubauen, so daß eine feste Verbindung beider Schalen nur noch über das gemeinsame Fundament läuft. Doch in den meisten Fällen kann man die beiden biegesteifen Scha- len, aus denen die Trennwände von Wohnungen oder Arbeitsräumen auf- gebaut sein könnten, nicht durchgehend voneinander trennen. Es gibt aber eine Häuserart, bei der diese Möglichkeit nicht nur besteht, bei der

sie auch unbedingt ausgenutzt werden sollte, nämlich bei den Einfami- lienreihenhäusern.

Immer wieder hört man Klagen von Bewohnern dieser Häuser über zu große Geräuschbelästigung, wenn die Wohnungstrennwände normgerecht, aber einschalig angelegt sind. Hauptsächlich sind es dann durch direk- te Anregung verursachte Geräusche, die stören. Werden aber die Woh- nungstrennwände aus zwei biegesteifen Schalen mit durchgehender Luft- schicht aufgebaut, wird nicht nur die Übertragung dieser Geräusche stark herabgesetzt, auch die Luftschalldämmung wird noch vergrößert. Beispiele für eine Wandkonstruktion von Wänden aus zwei biegesteifen Schalen enthält Bild 65.

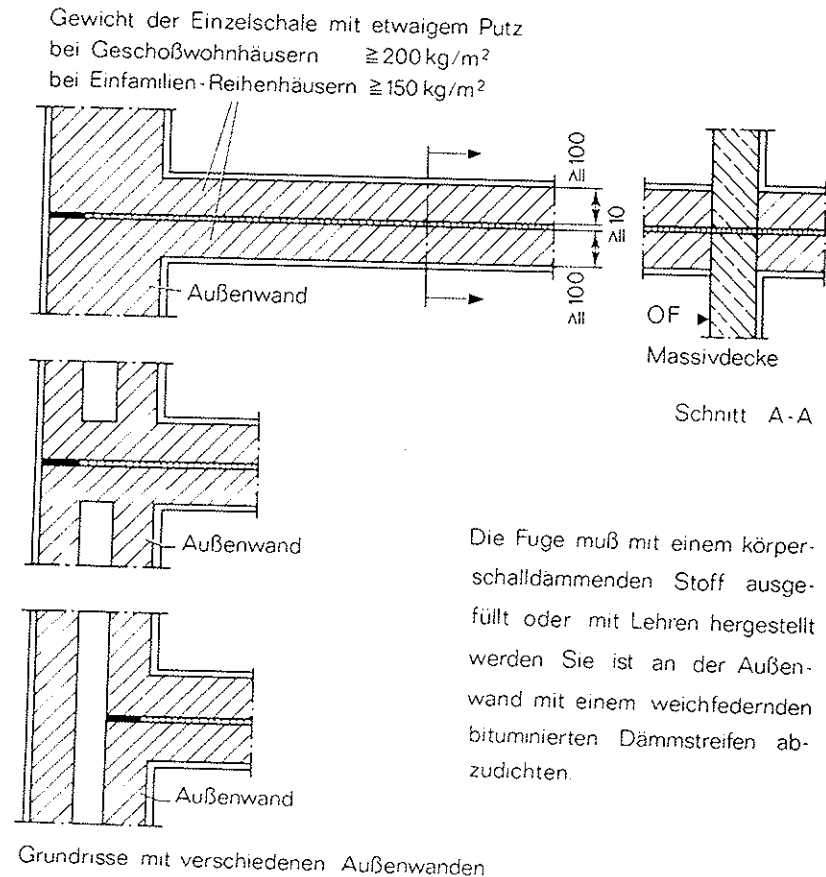


Bild 65. Zwei-schalige Wand aus zwei biegesteifen Schalen mit durchgehender Trennschicht (nach DIN 4109)

Eine weitere, sehr verbreitete Anwendung zweier biegesteifer Schalen mit getrennter Randeinspannung findet sich bei Decken mit einem schwimmenden Estrich als Deckenaufgabe. Die weiche Dämmschicht trennt die biegesteife Schale des Estrichs von der biegesteifen Rohdecke. Der schwimmende Estrich, in erster Linie zur Verbesserung der Tritt-Schalldämmung angelegt, der in dem Zusammenhang noch ausführlich behandelt wird, verbessert also auch die Luft-Schalldämmung.

Die Resonanzfrequenz kann nach der gleichen Formel ausgerechnet werden, wie sie für Wände aus zwei biegeweichen Schalen angegeben wurde. Wegen der relativ größeren Flächengewichte liegt sie jedoch fast immer bei den kleinsten, in der Praxis noch einzuhaltenden Wandabständen unter 100 Hz.

Die tatsächlich mögliche Verbesserung der Schalldämmung wird in der Praxis nur dann erreicht, wenn die beiden Schalen nicht durch unbeabsichtigte Schallbrücken - z.B. Mörtelreste - doch miteinander verbunden werden. Diese Fehlerquelle kann nur durch Sorgfalt bei der Ausführung vermieden werden.

29. Die Luftschalldämmung von Türen und Fenstern

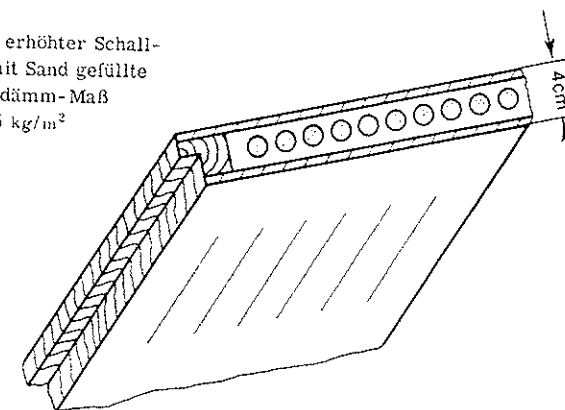
Die normalen Türen und Fenster zeichnen sich durch geringe Luftschalldämmungen aus, schon allein deshalb, weil ihre Flächengewichte als einschalige Bauteile sehr niedrig liegen, hinzu kommt, daß sie gewöhnlich nicht genügend dicht schließen.

Die Flächengewichte normaler Türblätter liegen zwischen 10 kg/m^2 und 20 kg/m^2 . Bei guter Abdichtung steigen die mittleren Schalldämm-Maße \bar{R} der daraus angefertigten Türen mit den Flächengewichten an, und zwar von etwa 20 dB bis 28 dB. Doch sehr häufig wird die Dichtung einer Tür zu wenig beachtet, und dann erreichen die mittleren Schalldämm-Maße nur etwa 15 dB.

Soll eine Türöffnung mit einer Tür höherer Schalldämmung verschlossen werden, so gibt es dazu - eine gute Dichtung vorausgesetzt - die gleichen Möglichkeiten wie bei Wänden: entweder sie wird einschalig mit höherem Flächengewicht oder 2-schalig mit genügend großem Abstand beider Schalen angelegt.

Türblätter für einschalige Türen mit höherem Flächengewicht können auf verschiedene Weise hergestellt werden. Das Prinzip, das dabei gewöhnlich angewandt wird, besteht darin, daß über die Fläche des Türblattes verteilt Hohlräume geschaffen werden, die mit Materialien höherer Dichte gefüllt werden. So gibt es z.B. eine gut schalldämmende Türkonstruktion, bei der als Türblatt eine Spanplatte verwendet wird, die dicht nebeneinander liegende senkrechte Bohrungen enthält (Bild 66). Diese Bohrungen werden mit Sand gefüllt, dadurch erreicht das Türblatt ein Flächengewicht von 35 kg/m^2 und ein mittleres Schalldämm-Maß von 35 dB. Als Füllmaterial können auch genügend dicke Schwermetallbleche verwendet werden, die - auf beiden Seiten verkleidet - den Kern des Türblattes bilden.

Bild 66.
Türblatt aus Spanplatten mit erhöhter Schalldämmung durch vertikale, mit Sand gefüllte Bohrungen. Mittleres Schalldämm-Maß $\bar{R} = 35 \text{ dB}$; Flächengewicht 35 kg/m^2



Einschalige Türen mit guter Schalldämmung müssen wegen ihres hohen Flächengewichtes besonders stabile Aufhängungen erhalten. Aus diesem Grunde kann man sie deshalb oft nicht anbringen. Die Gruppe dieser Türen verlangt also sowohl vom Türblatt wie von der Aufhängung eine Sonderausführung.

Auch mit normalen Türblättern kann man zu guten Schalldämmungen kommen, wenn man die Türöffnung durch eine Doppeltür mit zwei Türblättern verschließt. Bei dieser Anordnung wird die Schalldämmung durch den Effekt verbessert, den wir von 2-schaligen Wänden kennen. Einfache massive Türblätter bis zu 2 cm Dicke stellen noch ausreichend biege- weiche Schalen dar, es muß nur darauf geachtet werden, daß beide Türblätter genügend weit auseinander stehen, damit die Resonanzfrequenz tief genug liegt.

Nehmen wir ein praktisches Beispiel: bei einem Flächengewicht von etwa 15 kg/m^2 je Türblatt und etwa 10 cm Abstand zwischen den Blättern bringt die Doppeltür ein mittleres Schalldämm-Maß \bar{R} von etwa 40 dB bis 45 dB, der Wert hängt im Einzelfall noch etwas von der Qualität der Dichtung und der Ausführung des Futter ab. Der obere Grenzwert ist zu erreichen, wenn das Türfutter zwischen den beiden Blättern mit Schallschluckmaterial ausgefüllt wird, ebenso ist zu empfehlen, auf eine Türblattfläche im Hohlraum der Doppeltür Schallschluckmaterial anzubringen.

Eine 2-schalige Türkonstruktion kann auch in einem einzelnen Türblatt vereinigt werden. Damit aber die Resonanzfrequenz genügend tief liegt ohne daß die Tür dabei zu dick wird, kommen als Schalen praktisch nur Stahlbleche in Frage, der Zwischenraum zwischen den beiden Schalen wird mit Schallschluckmaterial ausgefüllt, dann erreichen diese Türen ebenfalls Schalldämm-Maße von 40 - 45 dB.

Die schalldämmenden Eigenschaften von Fenstern ähneln denen der Türen. Einfache Fenster bringen mit den geringen Flächengewichten ihrer Scheiben nur geringe Schalldämmung auf, die durch undichte Rahmen sehr oft noch weiter absinken. Eine normale 3 mm dicke Fensterscheibe z. B. besitzt ein Flächengewicht von $7,5 \text{ kg/m}^2$ und erreicht damit ein mittleres Schalldämm-Maß \bar{R} von 24 dB. Bild 67 enthält für den Bereich üblicher Fensterscheibendicken die zugehörigen mittleren Schalldämm-Maße \bar{R} für dicht schließende Fenster.

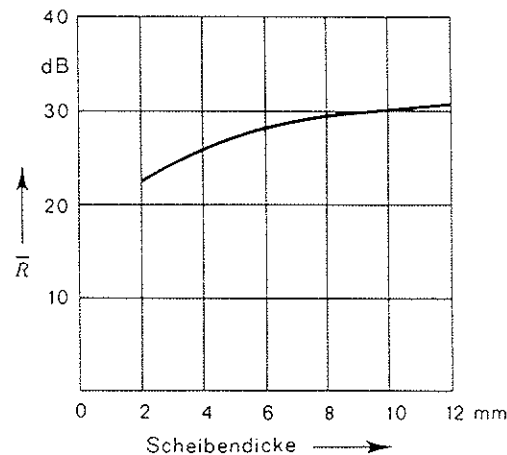


Bild 67.
Mittleres Schalldämm-Maß
von Einfachfenstern in Abhängigkeit von der Scheibendicke

Höhere Schalldämmungen sind mit einfachen Fenstern praktisch nicht herzustellen, sie würden sehr dicke schwere Glasscheiben erfordern,

die nicht zu haben sind und auch nur sehr schwierig zu verarbeiten wären. Anstatt mit Glasscheiben können Fensteröffnungen in manchen Fällen auch durch Schalen aus Glasbausteinen verschlossen werden. Nur so kann man eine Wandöffnung mit einer einschaligen lichtdurchlässigen - wenn auch nicht durchsichtigen - Anordnung verschließen, die eine höhere Luftschalldämmung erreicht. Die mittleren Schalldämm-Maße \bar{R} von 5 cm bis 8 cm dicken Schalen aus Glasbausteinen reichen von 35 dB bis 42 dB.

Ein durchsichtiges Fenster, das eine höhere Schalldämmung vollbringen soll, kann man nur durch mehrschalige, d. h. gewöhnlich 2-schalige Systeme schaffen. Einfache Glasscheiben bis zu 6 mm Dicke stellen noch biegeeweiche Schalen dar. Ein Doppelfenster, das daraus hergestellt wird, entspricht daher einer Wand aus zwei biegeweichen Schalen. Deshalb muß beachtet werden, daß der Abstand beider Schalen genügend groß wird, in der Praxis wenigstens 10 cm bei 5 mm dicken Scheiben.

Ein Fenster mit guter Schalldämmung muß also als echtes Doppelfenster konstruiert sein. Dies muß betont werden, weil Doppelfenster gewöhnlich vorgesehen werden, um den Wärmeschutz eines Gebäudes zu verbessern. Für diesen Zweck können die Scheiben dichter zusammenstehen, was denn auch häufig ausgenutzt wird. Doch die guten schalldämmenden Eigenschaften, die eine 2-schalige Konstruktion hervorbringen kann, werden dann nicht ausgenutzt.

Im Gegensatz zu einer Wand aus zwei biegeweichen und auf beiden Seiten glatten Schalen kann man zwischen die Scheiben eines Doppelfensters keine Schallschluckmatten hängen. Doch bis zu einem gewissen Grade läßt sich die Verbesserung der Schalldämmung durch die Schallschluckmatten auch erreichen, indem man die Innenseite der Laibung mit Schallschluckmaterial (etwa 1,5 cm dick) auskleidet.

Die mittleren Schalldämm-Maße \bar{R} von dicht schließenden Doppelfenstern mit genügend großen Scheibenabständen bewegen sich zwischen 35 dB und 40 dB. Durch solche Fenster dringt beispielsweise nur noch sehr wenig von dem Verkehrslärm, der an verkehrsreichen Straßen herrscht, in die dahinter liegenden Räume.

Ein noch so fachgerecht gebautes Doppelfenster verliert jedoch größtenteils seine schalldämmenden Eigenschaften, wenn es geöffnet wird, um den Raum zu lüften. Diese Unvollkommenheit kann nur vermieden werden, wenn die Fenster dauernd geschlossen bleiben, in der Praxis heißt das, sie dürfen nicht geöffnet werden können. Dann müssen die Räume entweder künstlich klimatisiert werden, oder die Außenwände müssen

Lüftungskanäle mit schalldämpfenden Auskleidungen erhalten, die von innen nach Bedarf geöffnet werden können.

Die mittleren Schalldämm-Maße von Türen und Fenstern liegen in der Regel immer unter denen der Wände, in die sie eingebaut sind.

Das mittlere Schalldämm-Maß einer Wand mit Tür oder Fenster bewegt sich zwischen dem der Wand allein und dem von Tür oder Fenster allein. Wir können es ausrechnen, wenn folgende Größen bekannt sind:

1. die Fläche der Wand einschließlich Tür- oder Fensteröffnung S_0 und ihr mittleres Schalldämm-Maß \bar{R}_0 ;
2. die Fläche der Tür oder des Fensters S_1 und das zugehörige mittlere Schalldämm-Maß \bar{R}_1 .

Wir bilden das Verhältnis der beiden Flächen $S_0 : S_1$ und die Differenz der mittleren Schalldämm-Maße $\bar{R}_0 - \bar{R}_1$. Mit diesen Werten gehen wir in das Diagramm des Bildes 68 und bestimmen auf der Abszisse den

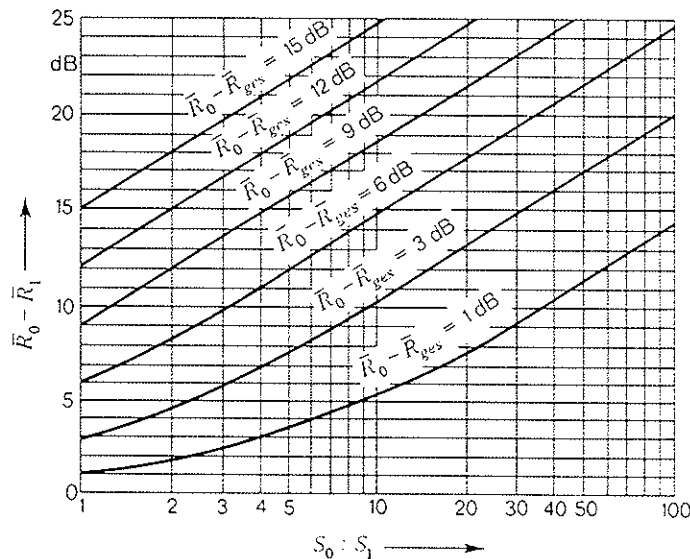
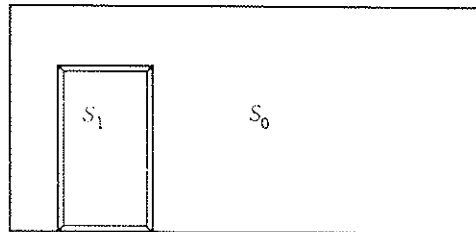


Bild 68.
Zur Ermittlung des mittleren Schalldämm-Maßes \bar{R} einer Wand mit Tür oder Fenster
(nach DIN 4109)



Punkt mit dem Zahlenwert des Flächenverhältnisses, gehen dort senkrecht hoch, bis der Zahlenwert der Dämmmaß-Differenz $\bar{R}_0 - \bar{R}_1$ erreicht ist, dessen Einheiten auf der Ordinate abgetragen sind. Diejenige Kurve der in das Diagramm eingetragenen Kurvenschar, die dem so ermittelten Punkt am nächsten liegt oder auf die er fällt, gibt an, um wieviel die Schalldämmung der Wand durch die Tür oder das Fenster absinkt. Das mittlere Schalldämm-Maß der Wand einschließlich Tür oder Fenster \bar{R}_{ges} erhalten wir dann, indem wir diese Differenz von dem mittleren Schalldämm-Maß der Wand allein \bar{R}_0 abziehen.

Nehmen wir dazu ein Beispiel:

In eine Halbssteinwand aus Kalksand-Vollsteinen, die auf beiden Seiten 1,5 cm dick verputzt ist, soll eine Tür eingesetzt werden. Die Fläche der gesamten Wand einschließlich Türöffnung beträgt 14 m^2 , die der Tür 2 m^2 . als Flächenverhältnis erhalten wir also $14 : 2 = 7$. Um das mittlere Schalldämm-Maß der Wand zu ermitteln, bestimmen wir zuerst ihr Flächengewicht, es beträgt 250 kg/m^2 . Mit diesem Wert liefert die Wand nach dem Diagramm des Bildes 57 ein mittleres Schalldämm-Maß \bar{R}_0 von 45 dB.

Wird die Türöffnung mit einer nicht zu leichten und gut schließenden Tür verschlossen, können wir mit einem mittleren Schalldämm-Maß \bar{R}_1 von 25 dB rechnen. Die Differenz der mittleren Schalldämm-Maße beträgt dann $\bar{R}_0 - \bar{R}_1 = 45 - 25 = 20 \text{ dB}$. Gehen wir nun in das Diagramm des Bildes 68, so finden wir den Kreuzungspunkt, der zu dem Flächenverhältnis 7 und der Dämmmaß-Differenz 20 dB gehört, ungefähr auf der mit 12 dB beschrifteten Kurve. Als mittleres Schalldämm-Maß der Wand einschließlich Tür erhalten wir damit $\bar{R}_{ges} = 45 - 12 = 33 \text{ dB}$.

30. Das Trittschallschutz-Maß TSM und das Verbesserungs-Maß des Trittschallschutzes VM

Von allen Begrenzungen eines Raumes wird der Fußboden am stärksten unmittelbar beansprucht. Durch Gehen, Laufen, fallende Gegenstände, eingeschaltete Haushaltsgeräte, auch wenn sie auf einem Tisch oder Stuhl stehen usw. werden in direktem Kontakt mit der Oberfläche des Fußbodens Geräusche produziert, die auf die Decke übergehen und von dort über die Bauteile in alle Räume eines Hauses gelangen können. Was

zu tun und zu beachten ist, damit möglichst wenig Geräusche dieser Art in benachbarte Räume dringen, faßt man unter dem Begriff "Tritt-Schallschutz" zusammen.

Um Mindestforderungen an den Tritt-Schallschutz aufstellen und den Erfolg trittschalldämmender Maßnahmen beurteilen zu können, wurde ein Meßverfahren geschaffen, dessen Einzelheiten im Normblatt DIN 52210 festgelegt sind. Ohne dies Meßverfahren zu kennen, kann man die Maßgrößen nicht verstehen, die eingeführt sind, um die Dämmung gegen Trittschallgeräusche zu bewerten. Die wesentlichen Züge dieses Verfahrens wollen wir deshalb im folgenden behandeln.

Auf dem Fußboden der Decke, deren Trittschalldämmung untersucht werden soll, werden von den aufschlagenden Hämmern eines Hammerwerkes Geräusche erzeugt, die eine starke Trittschallanregung darstellen. Das Hammerwerk muß nach DIN 52210 so beschaffen sein, daß seine 500 g schweren Hämmer mit einer Auflagefläche aus Stahl aus 4 cm Höhe 10 mal in der Sekunde frei auf die Decke fallen (Bild 69). Ein Hammerwerk, das nach dieser Normvorschrift gebaut ist, besteht gewöhnlich aus 5 Hämmern, die über eine elektrisch betriebene Mechanik rasch nacheinander fallen und wieder angehoben werden.

Je besser die Decke gegen die Übertragung von Trittschallgeräuschen geschützt ist, um so weniger laut sind die rasch aufeinander folgenden Schläge der Hämmer in den benachbarten Räumen - insbesondere in dem darunter liegenden Raum - zu hören. Die Lautstärke der Schlaggeräusche könnte somit schon einen Maßstab für die Qualität der Schalldämmung abgeben. Früher hat man sie auch dazu benutzt, sie wurde in dieser Verbindung mit Norm-Tritt-Lautstärke (nach DIN 4110) bezeichnet. Der Tritt-Schallschutz einer Decke galt als ausreichend, wenn die Norm-Tritt-Lautstärke in einem Nachbarraum - vor allem in dem darunter liegenden - den Grenzwert von 85 DIN-phon nicht überschritt.

Doch die Lautstärken der Hammergeräusche kennzeichnen den Tritt-Schallschutz einer Decke nicht eindeutig. Deshalb wurde - angelehnt an die Messung des Luft-Schallschutzes - ein verfeinertes Meßverfahren entwickelt. Ebenso wie dort und auch mit dem gleichen Schallpegelmeßgerät werden im Empfangsraum die Schallpegel L in Stufen von Drittel-Oktaven (oder Oktaven) gemessen, die das Hammergeräusch im Frequenzbereich von 100 Hz bis 3200 Hz erzeugt, das ebenso wie ein Rauschgeräusch alle Frequenzen des hörbaren Gebietes in dichter Folge enthält. Um die natürlichen Streuungen im Raum auszugleichen, soll diese Schallpegel-Serie an sechs verschiedenen Standorten im Empfangsraum gemessen und die Ergebnisse gemittelt werden.

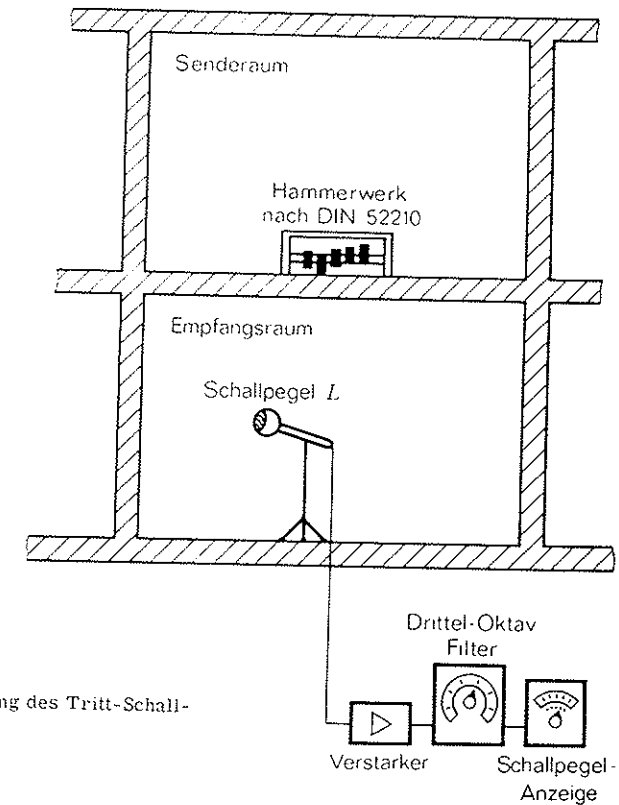


Bild 69.
Meßanordnung zur Prüfung des Tritt-Schallschutzes einer Decke

Da die Schallpegel L nicht allein von der Größe der Geräuschanteile abhängen, die durch die Decke und über die Wände in den Empfangsraum dringen, sondern auch von den Beträgen der Gesamtabsorption, muß man sie auf einen Empfangsraum mit allgemein vereinbarter Gesamtabsorption reduzieren. Die Gesamtabsorption, die der zur Messung benutzte Empfangsraum enthält und deren Beträge dazu benötigt werden, erhält man über die Sabinesche Formel aus den Nachhallzeiten, die zu diesem Zweck gemessen werden müssen.

Die auf den Bezugsraum reduzierten Schallpegel heißen "Norm-Tritt-Schallpegel" L_n . sie werden aus den gemessenen Schallpegeln durch Hinzufügen eines Korrekturgliedes gebildet:

$$L_n = L + 10 \lg \frac{A}{A_0} \text{ in dB;}$$

L = gemessene Schallpegel

A = Gesamtabsorption des Empfangsraumes

α_0 = Gesamtaborption des Bezugsraumes, sie beträgt nach DIN 52210, unabhängig von der Frequenz, 10 m^2 für Wohnräume.

Wir sehen, daß bei diesem Meßverfahren die gleiche Methodik angewandt wird wie beim Messen der Luftschalldämmung. Ähnlich wie dort werden die Werte der Norm-Trittschallpegel L_n in ein Diagramm eingetragen. In Bild 70 ist das Ergebnis einer abgeschlossenen Trittschallschutzmessung als Beispiel dargestellt.

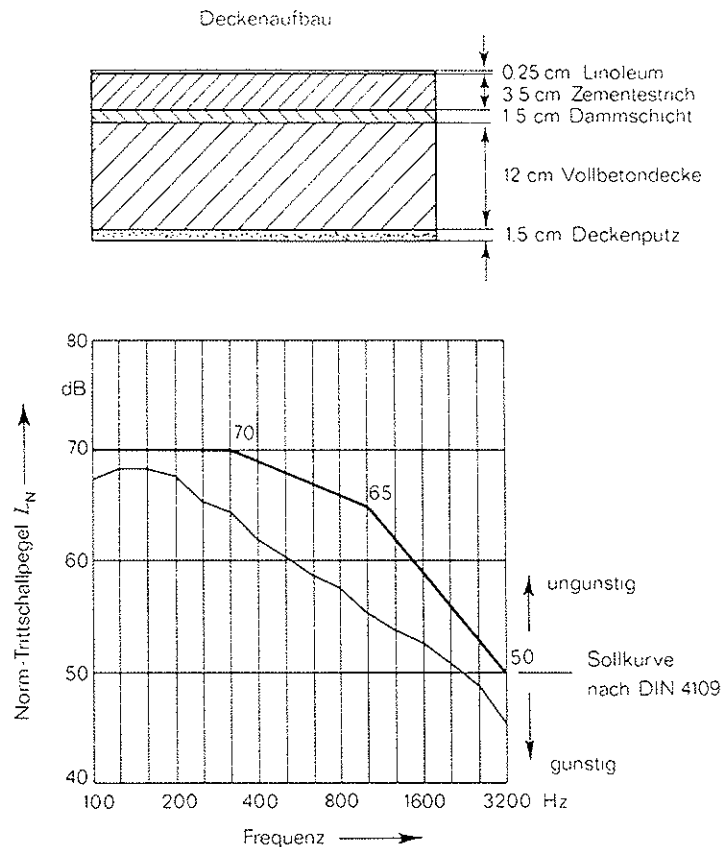


Bild 70. Ergebnis einer Trittschallschutz-Messung, in einem Diagramm dargestellt.
Trittschallschutzmaß der untersuchten Decke: TSM = + 7 dB

Gegenüber der entsprechenden Darstellung einer Trittschallschutzmessung muß ein Unterschied hervorgehoben werden. Auf der Ordinate des Luft-Schallschutzdiagrammes ist ein Dämmmaß, auf der Ordinate des

Tritt-Schallschutzdiagrammes dagegen ein Geräuschpegel abgetragen. Ein Luft-Schallschutz ist um so besser, je höher die eingetragenen Punkte im Diagramm liegen. Bei der Darstellung einer Trittschallschutzprüfung verhält es sich umgekehrt, je niedriger die Punkte im Diagramm liegen, um so besser ist der Tritt-Schallschutz.

Um den Tritt-Schallschutz einer Decke endgültig beurteilen zu können, ist im Normblatt DIN 4109 - ähnlich wie beim Luftschallschutz - eine Sollkurve festgelegt worden. Ihr Verlauf wurde aus den frequenzabhängigen Eigenschaften des Gehörs und denen der Trittschallgeräusche entwickelt. Entsprechend dem Charakter der Größe, die auf der Ordinate abgetragen ist, steigt die Sollkurve des Trittschalles zunächst mit zunehmender Frequenz an, während die des Luft-Schallschutzes bei höheren Frequenzen abfällt.

Das "Tritt-Schallschutzmaß" TSM, das den Schallschutz einer Decke bewertet, wird nun ebenso gebildet wie das Luft-Schallschutzmaß. Die Sollkurve wird so weit nach oben oder unten verschoben, bis die darauf bezogenen ungünstigen Abweichungen im Mittel 2 dB betragen. Der Betrag in dB, um den die Sollkurve hierzu verschoben werden muß, ergibt das Tritt-Schallschutzmaß TSM. Bei einer Verschiebung in Richtung auf günstiges Verhalten - hier also nach unten - erhält das Tritt-Schallschutzmaß ein positives, im anderen Fall ein negatives Vorzeichen. Die Höhe der genormten Sollkurve ist so festgelegt, daß der Tritt-Schallschutz einer Wohnungstrenndecke als noch ausreichend gilt, wenn ihr TSM wenigstens 0 dB beträgt.

Da der Erfolg trittschall-dämmender Anordnungen wie z.B. schwimmender Estriche sehr wesentlich von der Qualität der Ausführung abhängt, ist ein Verfahren (von Cremer) geschaffen worden, durch das man sich ohne elektro-akustische Hilfsmittel ein ungefähres Urteil über den Tritt-Schallschutz einer Decke verschaffen kann. Neben dem genormten Hammerwerk benötigt man dazu nur noch ein Vergleichshammerwerk. Wenn das genormte Hammerwerk bei der Prüfung die Decke erregt, wird im Empfangsraum das Vergleichshammerwerk in Tätigkeit gesetzt. Durch Hörvergleich wird nun festgestellt, ob das von Vergleichshammerwerk erzeugte Geräusch lauter ist als das, was die vom Normhammerwerk erregte Decke abstrahlt oder umgekehrt. Im ersten Fall kommt der Decke ein positives, im anderen Fall ein negatives Tritt-Schallschutzmaß zu. Dieses Verfahren liefert ein sicheres Urteil, wenn das Tritt-Schallschutzmaß einer Decke über + 4 dB unter - 4 dB liegt, im Grenzgebiet um 0 dB ist eine eindeutige Entscheidung oft nicht zu treffen.

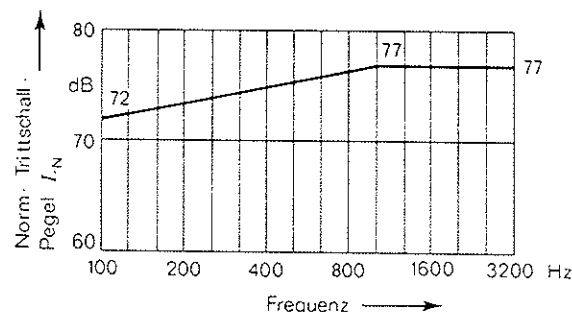
Es gibt verschiedene Anordnungen, die den Tritt-Schallschutz einer Decke verbessern. Der Grad des trittschall-dämmenden Effektes, den eine Anordnung hervorbringt, wird durch das "Verbesserungsmaß des Tritt-Schallschutzes" VM bezeichnet. Ein für akustische Prüfungen eingerichtetes Institut ermittelt es nach folgender genormter Methode:

Von einer Rohdecke werden zuerst nach der oben beschriebenen Methode die Norm-Trittschallpegel L_n bestimmt. Dann wird die zu prüfende Anordnung auf der Rohdecke angebracht und nun die Norm-Trittschallpegel erneut bestimmt. Die letzten Pegel-Werte müssen im Durchschnitt niedriger liegen als die ersten, sonst hätte die Anordnung keinen trittschall-mindernden Effekt. Dem entsprechend müssen auch die Tritt-Schallschutzmaße unterschiedlich ausfallen.

Die Differenz der beiden Ergebnisse könnte nun schon ein Maß für die trittschall-dämmende Wirkung der Anordnung abgeben. Doch in die Norm-Trittschallpegel L_n , aus denen die Tritt-Schallschutzmaße gebildet werden, gehen nicht nur die direkten Schallanteile ein, die von der Decke abgestrahlt werden, sondern auch diejenigen sind darin enthalten, die - durch Körperschalleitung übertragen - von den übrigen Raumbegrenzungen abgehen. Dadurch aber hängt die Differenz dieser Luft-Schallschutzmaße von einer individuellen Eigenschaft des Prüfortes ab.

Um zu einer Maßgröße zu kommen, die davon unabhängig ist, werden die Differenzen der Norm-Trittschallpegel ΔL_n auf eine fiktive Decke bezogen, deren Norm-Trittschallpegel im Normblatt DIN 4109 festgelegt sind (Bild 71). Die Pegelwerte dieser gedachten Decke stimmen ungefähr mit denen überein, die eine 12 cm dicke Vollbetondecke ohne Deckenauflage abgeben würde, wenn bei der Prüfung keine Schallanteile auf indirektem Wege übertragen werden.

Bild 71.
Verlauf der Norm-Trittschallpegel L_n der fiktiven Bezugsdecke zur Ermittlung des Trittschall-Verbesserungs-Maßes VM nach DIN 4109; Trittschallschutz-Maß dieser Decke TSM = - 17 dB



Wir denken uns jetzt die zu prüfende Anordnung auf der fiktiven Decke angebracht. Die Norm-Trittschallpegel, die dann hierfür anzurechnen sind, erhalten wir, indem wir von den Norm-Trittschallpegeln der gedachten Decke die Pegeldifferenzen ΔL_n abziehen. Von diesen neuen Norm-Trittschallpegeln wird das Tritt-Schallschutz-Maß gebildet. Der Unterschied nun zwischen diesem Tritt-Schallschutz-Maß und dem der gedachten Decke ohne Auflage, das - 17 dB beträgt, stellt das Verbesserungsmaß des Tritt-Schallschutzes VM dar.

Um eine Vorstellung von der Größenordnung zu geben, in der sich die VM-Werte von Deckenauflagen bewegen, sie liegen zwischen 5 dB, z. B. bei 1,5 mm dicken PVC-Belägen und 35 dB bei besonders guten schwimmenden Estrichen.

Das Trittschall-Verbesserungsmaß VM dient in erster Linie dazu, die Qualität der trittschall-dämmenden Eigenschaften einer Decke zu bewerten, es gibt aber auch annähernd an, um wieviel die Deckenauflage das Tritt-Schallschutzmaß einer Decker heraufsetzt. Wegen der praktisch immer vorhandenen Schallausbreitung durch Körperschalleitung ist der Verbesserungseffekt jedoch meist geringer als das VM angibt.

Im Normalfall kennt man das Tritt-Schallschutzmaß einer Decke nicht, es sei denn, es wäre gemessen worden. Deshalb kann gewöhnlich das Tritt-Schallschutzmaß für den endgültigen Zustand einer Decke nicht durch Addition des Tritt-Schallschutzmaßes der Rohdecke und des Verbesserungsmaßes der Deckenauflage bestimmt werden.

31. Trittschall-mindernde Deckenauflagen

Es gibt keine Deckenkonstruktion, die ohne trittschall-mindernde Deckenauflage einen ausreichenden Tritt-Schallschutz, genauer ein Tritt-Schallschutzmaß von wenigstens 0 dB erreicht.

Bei Rohdecken mit annähernd gleichmäßiger Dichte, z. B. bei Vollbetondecken, kann man zwar feststellen, daß der Trittschallschutz ebenso wie der Luftschallschutz mit dem Flächengewicht zunimmt. Doch während das Luft-Schallschutzmaß bei einem bestimmten Flächengewicht die 0 dB-Marke passiert, kommt das Tritt-Schallschutzmaß auch bei noch so schweren Decken nicht an 0 dB heran.

Wir können aus diesem Sachverhalt die sehr einfache, aber grundsätzliche Regel ableiten: jede Rohdecke muß eine trittschall-mindernde Deckenauflage erhalten.

Das Prinzip aller trittschall-mindernder Anordnungen besteht darin, daß zwischen der Gehfläche des Fußbodens und der Rohdecke eine weichfedernde Schicht eingeschaltet wird. Entsprechend ihrer besonderen Eigenschaften können sie in zwei Gruppen eingeteilt werden.

Zur ersten Gruppe zählen die Deckenauflagen, die den Trittschallschutz einer Decke verbessern, ohne ihren Luftschallschutz nennenswert zu beeinflussen. Es handelt sich dabei um weichfedernde Gehbeläge.

Die zweite Gruppe besteht aus den Deckenauflagen, die nicht nur den Trittschallschutz der Decke verbessern, sondern außerdem auch ihren Luftschallschutz (dazu noch ihren Wärmeschutz). Alle Anordnungen dieser Gruppe können wir unter dem Begriff "schwimmender Estrich" zusammenfassen.

Betrachten wir zuerst die erste Gruppe der weichfedernden Gehbeläge. Entsprechend ihrer trittschall-mindernden Eigenschaften können wir sie auf drei Güteklassen verteilen.

In die untere Güteklasse mit nur geringer Verbesserung des Trittschallschutzes fallen die Gehbeläge, deren Trittschall-Verbesserungsmaß VM zwischen 5 dB und 12 dB liegt. Hierzu gehören einfache Linoleum-, PVC- und Gummibeläge von 1,5 mm bis 2 mm Dicke und einfache Parkettbeläge.

Die nächste Güteklasse mit mittlerer Verbesserung des Trittschallschutzes umfaßt alle Gehbeläge mit Verbesserungsmaßen von 12 dB bis 20 dB. Vertreter dieser Gruppe sind die schon eben genannten Gehbeläge, aber mit weichfedernder Unterschicht aus Textilfilz, Korkment, weichem Gummi oder Schaumkunststoff.

Zur oberen Güteklasse mit hoher Verbesserung des Trittschallschutzes gehören die Gehbeläge mit Verbesserungsmaßen über 20 dB. Es sind hauptsächlich gute Teppiche und Gummibeläge mit Porengummi als Unterschicht, die so hohe Verbesserungswerte erreichen.

Trittschall-mindernde Gehbeläge können als alleinige Deckenauflage nur verwendet werden, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

1. Die Rohdecke allein muß ausreichend luftschall-dämmend sein, im Normalfall muß ihr Luftschallschutzmaß wenigstens 0 dB betragen.

2. Das Verbesserungsmaß des Gehbelages muß - nach DIN 4109 - wenigstens 19 dB betragen, was durch ein Prüfungszeugnis nachgewiesen sein muß.

Doch nicht nur als alleinige Deckenauflage, sondern auch zusätzlich auf einem schwimmenden Estrich verlegt, verbessern trittschall-mindernde Gehbeläge die schalltechnischen Eigenschaften einer Decke noch durch einen eigenen Beitrag. Sie vermindern zwar den Schallübergang auf die Rohdecke nicht mehr wesentlich, doch sie dämpfen in dem Raum selbst, in dem sie ausgelegt sind, die Trittschallgeräusche, eine Eigenschaft, die der schwimmende Estrich allein nicht besitzt.

Der schwimmende Estrich, die tritt- und luftschall-dämmende Deckenauflage der zweiten Gruppe, besteht aus Estrichplatten von einigen cm Dicke aus Zement, Gips, Magnesia oder Gußasphalt, die auf einer weichfedernden Dämmschicht aus Faser- oder Schaumkunststoffen auf der Rohdecke "schwimmen" (Bild 72). Diese Anordnung bildet ein 2-schaliges System mit der Rohdecke und dem Estrich als Schalen, die durch die Dämmschicht voneinander getrennt sind.

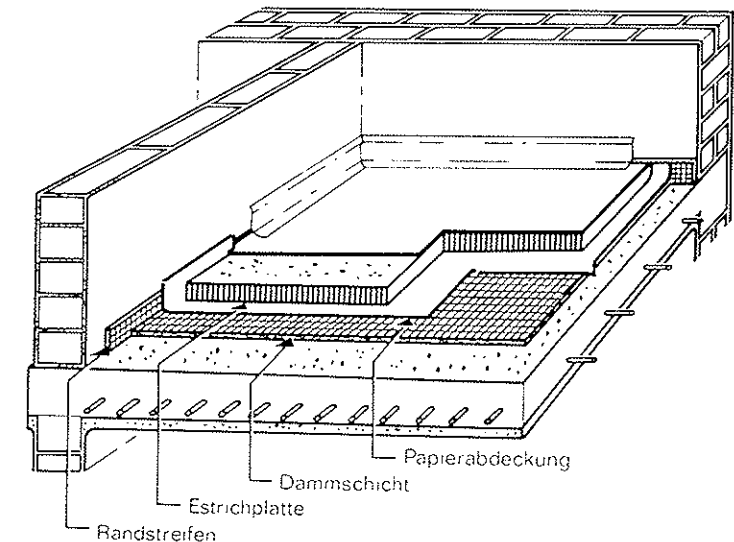


Bild 72. Beispiel für den Aufbau eines schwimmenden Estriches

Die Erzeuger von Trittschall-Geräuschen regen die Oberseite des Estriches ähnlich zu erzwungenen Schwingungen an wie die Schalldruckwellen von Luftschall-Geräuschen. Deshalb gibt es auch zwischen dem

trittschall-mindernden und dem luftschall-dämmenden Effekt des schwimmenden Estriches Parallelen.

Im frequenzabhängigen Verlauf des Norm-Trittschallpegels L_n spielt die Resonanzfrequenz eine ebenso große Rolle wie im entsprechenden Verlauf des Schalldämm-Maßes R . Bei der Resonanzfrequenz f_0 ist die trittschall- wie die luftschall-dämmende Wirkung gering, was sich im Verlauf der Norm-Trittschallpegel durch ein Maximum, bei dem Dämm-Maß der Luftschallübertragung durch ein Minimum ausdrückt.

Gegen eine Übertragung von Trittschall- wie von Luftschall-Geräuschen schützt der schwimmende Estrich nur die Anteile, deren Frequenzen oberhalb der Resonanzfrequenz liegen. Wie bei einer 2-schaligen Wand muß deshalb auch beim schwimmenden Estrich eine genügend tiefe Resonanzfrequenz - möglichst unter 100 Hz - angestrebt werden.

Die Resonanzfrequenz eines schwimmenden Estriches wird nach der gleichen Methode ausgerechnet wie die einer 2-schaligen Wand. Da die Rohdecke mit ihrer im Vergleich zum Estrich sehr viel größeren Masse im Bereich der Resonanzfrequenz kaum mitschwingt, geht in die Formel für die Resonanzfrequenz nur das Flächengewicht des Estriches ein. Die Formel lautet zunächst allgemein:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s'}{g}}$$

g = Flächengewicht des Estriches in kg/m^2
 s' = Steifigkeit der Dämmschicht in kp/cm^3 .

Bei der 2-schaligen Wand konnten wir die entsprechende Formel vereinfachen, weil sich die Steifigkeit s' aus der Federung der Luftschicht zwischen den Schalen ableiten ließ. Zwischen Estrich und Rohdecke aber erstreckt sich eine Dämmschicht, die steifer ist als eine gleich dicke Luftschicht und deren Steifigkeit nicht nur von der Dämmschicht-Dicke, sondern auch von ihrem Material abhängt.

Um die Steifigkeit verschiedenartiger Dämmschichten zu ermitteln, ist ein besonderes Prüfverfahren entwickelt worden (DIN 52214). Danach wird die Steifigkeit unter der Belastung ermittelt, der die Dämmschicht durch den Estrich und die Verkehrslast ausgesetzt wird.

Das Ergebnis wird in kp/cm^3 angegeben, eine Dimension, die auf den ersten Blick etwas merkwürdig anmutet. Sie ist aber leicht zu erklären: Bei der Steifigkeit handelt es sich um eine Federkonstante bezogen auf eine Flächeneinheit der Bodenfläche. Wird die Federkonstante, das Ver-

hältnis von Federkraft zu Federweg, in kp/cm angegeben, und als Einheit der Bodenfläche 1 cm^2 angesetzt, so folgt daraus schon für die Steifigkeit die Dimension kp/cm^3 .

Es ist im Bauwesen sonst nicht üblich, die Einheit cm statt m zu verwenden. Hier bringt es jedoch den Vorteil, daß sich die Steifigkeiten in kleinen Zahlen ausdrücken.

Setzen wir die Steifigkeit in kp/cm^3 und das Flächengewicht des Estriches wie gewöhnlich in kg/m^2 ein, so kann man die Formel für die Resonanzfrequenz in die folgende Form bringen:

$$f_0 = 500 \sqrt{\frac{s'}{g}} \text{ in Hz.}$$

g = Flächengewicht in kg/m^2
 s' = Steifigkeit der Dämmschicht in kp/cm^3

Rechnen wir dazu ein Beispiel:

Auf einer Dämmschicht mit einer Steifigkeit von 3 kp/cm^3 liege ein $3,5 \text{ cm}$ dicker Zementestrich. Für das Flächengewicht des Estriches erhalten wir 77 kg/m^2 . Als Resonanzfrequenz ergibt sich dann:

$$f_0 = 500 \sqrt{\frac{3}{77}} = 99 \text{ Hz.}$$

Da die Flächengewichte üblicher Estriche sich nur wenig voneinander unterscheiden - sie können etwa zwischen 50 kg/m^2 und 80 kg/m^2 variieren - hängt die Resonanzfrequenz in erster Linie von der Steifigkeit der Dämmschicht ab, und die Dämmwirkung des schwimmenden Estriches damit auch (Bild 73).

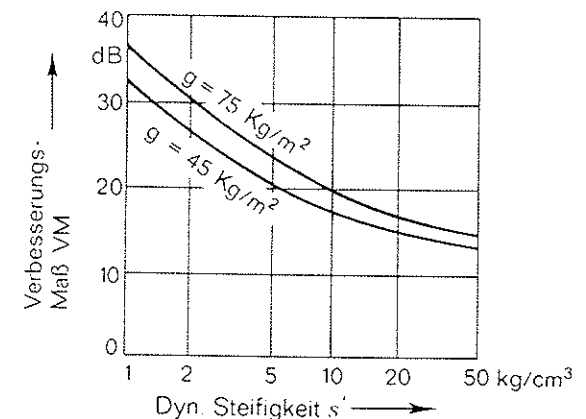


Bild 73.
 Das Schallschutz-Verbesserungsmaß des schwimmenden Estriches in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Dämmschicht (nach DIN 4109)

Je höher die schalltechnischen Anforderungen sind, die an einen schwimmenden Estrich gestellt werden, um so niedriger muß die Steifigkeit ihrer Dämmschicht liegen. Man kann daher die Ansprüche an den Schallschutz, die ein schwimmender Estrich erfüllen soll, durch Höchstwerte der Steifigkeit abgrenzen. Im Normblatt DIN 4109 hat man die Dämmschichten in zwei Gruppen eingeteilt. Zur Dämmstoffgruppe I gehören die Dämmschichten mit Steifigkeiten unter 3 kp/cm^3 . Dämmschichten mit höheren Steifigkeiten bis 9 kp/cm^3 gehören zur Dämmstoffgruppe II.

Für Estriche auf Rohdecken, die eine Deckenaufgabe nicht nur zur Trittschalldämmung, sondern auch zur Verbesserung des nicht ausreichenden Luftschallschutzes benötigen, dürfen nur Dämmschichten der Dämmstoffgruppe I verwendet werden. Bei Rohdecken, deren Luftschallschutz schon ohne Deckenaufgabe ausreicht, genügen Dämmschichten der Dämmstoffgruppe II.

Die Steifigkeit einer Dämmschicht hängt nicht nur von der Weichheit des Dämmmaterials ab, sondern auch von seiner Dicke bei betriebsmäßiger Belastung. Beträgt die Steifigkeit einer 1 cm dicken Dämmschicht s'_0 , so ändert sie sich mit der Dicke nach folgender Beziehung:

$$s' = \frac{s'_0}{d}$$

s'_0 = Steifigkeit der 1 cm dicken Dämmschicht in kp/cm^2

d = Dicke der Dämmschicht bei betriebsmäßiger Belastung in cm.

Wenn wir die Steifigkeit einer Dämmschicht je cm Dicke kennen, können wir sie für jede beliebige Dicke ausrechnen. In der folgenden Tabelle sind die Steifigkeiten je cm Dicke einiger Dämmstoffe angegeben, die in der Praxis viel benutzt werden.

Der schwimmende Estrich ist im Prinzip sehr einfach aufgebaut, doch in der Praxis kann seine Funktion oder seine Haltbarkeit durch Fehler im Aufbau erheblich beeinträchtigt werden. Die Erfahrungen haben gezeigt, daß bestimmte Regeln beachtet werden müssen, damit diese Deckenaufgabe das erfüllt, was sie theoretisch verspricht.

Damit bei der großen Zahl der schwimmenden Estriche, die hergestellt werden, Fehlerquellen soweit als möglich vermieden werden, sind die wichtigsten dieser Regeln in die Normung eingegangen. Sie beziehen sich im einzelnen auf Güteforderungen bei Dämmschichten und der Estriche und die Technik der Ausführung.

Tabelle 6.

Die Steifigkeit je cm Dicke verschiedener Dämmstoffe.

Dämmstoff	Steifigkeit s'_0 je cm Dicke in kp/cm^2
Filze oder Platten aus Stein- oder Glaswolle	1,8 bis 2,2
Filze oder Matten aus Kokosfasern	2,5 bis 3,5
Schaumkunststoff je nach Fabrikat	6,0 bis 17,0
Schaumkunststoff vorhanden oder unterseitig profiliert	1,7 bis 2,0
Torfplatten	21,0
dto., unterseitig profiliert	10,0
Weichfaserdämmplatten	19,5
HWL-Platten, lose verlegt	52,5
Korkplatten, lose verlegt	65,0

Fassen wir das Wesentliche zusammen: die Eigenschaften, die Dämmschichten als Matten, Filze oder Platten aus mineralischen oder pflanzlichen Faserstoffen besitzen sollen, sind im Normblatt DIN 18165 aufgeführt. Für Bahnen oder Platten aus Schaumkunststoffen stehen die entsprechenden Vorschriften im Normblatt DIN 18164.

Nach DIN 4109 soll die Dicke der Dämmschicht bei normaler Belastung nicht unter 7,5 mm (bei Asphaltestrichen 6 mm) liegen. Zu empfehlen ist jedoch, sie nicht dünner als 1 cm anzulegen, möglichst 1,5 cm oder noch dicker. Bei normgerechten Dämmschicht-Fabrikaten soll auf der Verpackung die Dicke der Dämmschicht in unbelastetem und belastetem Zustand angegeben sein, außerdem die Dämmstoffgruppe, in die sie auf Grund ihrer Steifigkeit einzuordnen ist.

Wenn z. B. auf der Verpackung aufgedruckt ist: 20/15 mm I, so heißt das, daß die Dämmschicht unbelastet 20 mm und belastet 15 mm dick ist und zur Dämmstoffgruppe I gehört.

Vorschriften über die Zusammensetzung, Festigkeit und Mindestdicke von Estrichen enthält das Normblatt DIN 4109. Im Normalfall beträgt die Mindestdicke eines Estriches 3,5 cm (bei Gips- und Anhydrit-Estrichen 3 cm). Sehr weiche Dämmschichten erfordern jedoch größere Estrichstärken. Wenn die Dämmschicht durch die Last des Estriches mehr als 7 mm und höchstens 12 mm zusammengedrückt wird, darf der Estrich 4 cm Dicke (bei Gips- und Anhydrit-Estrichen 3,5 cm) nicht unterschreiten. Wird er mehr als 12 mm zusammengedrückt, steigen die Mindestdicken noch um weitere 0,5 cm.

Das Aufbringen eines schwimmenden Estriches beginnt mit dem Verlegen der Dämmschicht. Vorher muß jedoch dafür gesorgt werden, daß die Rohdecke keine Unebenheiten aufweist und ausreichend getrocknet ist. Unebenheiten müssen gegebenenfalls durch Ausgleichsschichten (kein Sand) beseitigt werden.

Ein sehr verhängnisvoller Fehler kann sich beim Hersteller eines schwimmenden Estriches einstellen, wenn sich zwischen dem Estrich und der Rohdecke oder den anstoßenden Wänden feste Verbindungen bilden. Durch solche Schallbrücken geht die Dämmwirkung weitgehend verloren. Um dies zu vermeiden, müssen besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden: die Dämmschichten müssen so verlegt sein, daß keine Fugen offen bleiben, Dämmplatten werden im Verband angeordnet. Bei mehrlagigen Dämmschichten müssen die Fugen der unteren Schicht von der oberen Schicht verdeckt werden. Vor dem Aufbringen des Estriches sind an den Wänden, Türrahmen und anderen herausragenden Teilen Dämmstreifen anzulegen, die nachher bündig mit der Oberkante des Estriches abgeschnitten werden. In Bade- und Toilettenräumen wird die Trennfuge zwischen den Boden- und Wandfliesen mit plastischem Kitt verschlossen (Bild 74).

Um die Dämmschicht gegen das Eindringen von Feuchtigkeit beim Auftragen des Estriches zu schützen, muß sie auf der ganzen Oberfläche mit nackter Bitumenpappe oder einer mindestens 0,2 mm starken Kunststoffolie abgedeckt werden. Die einzelnen Bahnen müssen sich an den Stößen mindestens 8 cm überlappen.

Beim Auftragen des Estriches darf die Dämmschicht oder ihre Abdeckung auf keinen Fall beschädigt werden; hierdurch entstehen die meisten Schallbrücken.

Bei Zementestrichen können Schwindrisse entstehen, wenn sie sehr große Flächen ohne Unterbrechung überdecken. Der Estrich auf größeren Fußbodenflächen wird daher aus mehreren Estrichplatten zusammengesetzt, die durch Fugen voneinander getrennt sind. Eine Estrichplatte sollte nicht größer als 20 m² sein, keinesfalls darf sie über 30 m² groß ausfallen. Eine Fuge im Estrich muß auch zwischen den Türöffnungen vorgesehen werden.

Schließlich darf der Estrich erst betreten werden, wenn er genügend ausgehärtet ist.

Den Trittschallschutz von Rohdecken erhöhen schwimmende Estriche etwa entsprechend den Verbesserungsmaßen VM. Diese liegen normaler-

weise zwischen 20 dB und 30 dB, bei sehr weichfedernden Dämmschichten steigen sie bis auf ca 35 dB, fachgerechte Verlegung vorausgesetzt.

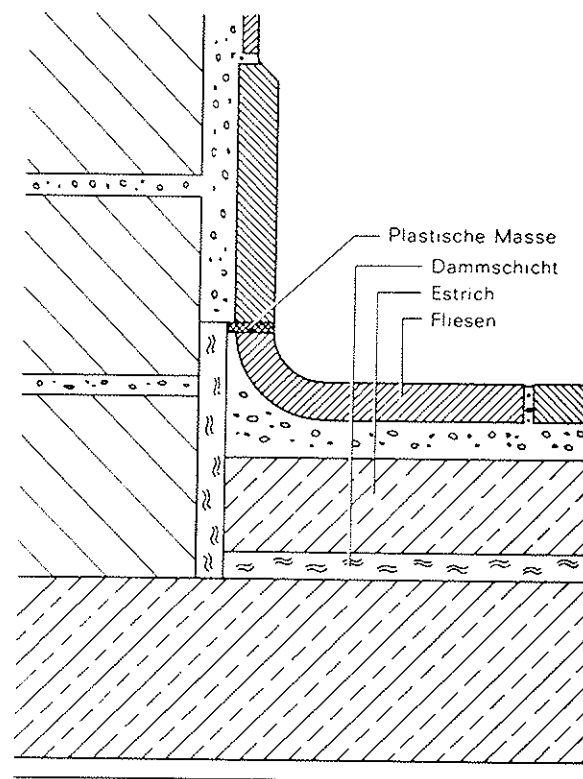


Bild 74.
Anschluß der Bodenfliesen auf dem schwimmenden Estrich in Bade- und Toilettenräumen an die Wandfliesen

Der Luftschallschutz einer Rohdecke wird durch den schwimmenden Estrich theoretisch um den gleichen Betrag verbessert, den das Verbesserungsmaß des Trittschallschutzes angibt. Tatsächlich aber wird der Luftschallschutz normalerweise nur auf Luftschallschutz-Maße von 0 dB bis +3 dB angehoben.

Die Schallanteile, die durch Körperschalleitung übertragen werden, verhindern es gewöhnlich, daß der mögliche Verbesserungseffekt ganz ausgenutzt wird. Weil das Luftschallschutz-Maß hierdurch nach oben begrenzt wird, trägt der schwimmende Estrich um so mehr zur Verbesserung des Luftschallschutzes bei, je kleiner das Luftschallschutz-Maß ist, das die Decke allein hergibt.

32. Der Luft- und Trittschallschutz von Decken

Die besonderen statischen Belastungen, die eine Decke aufzunehmen hat, haben dazu geführt, daß eine ganze Reihe verschiedenartiger Deckenkonstruktionen entstanden sind. Diese bringen auch verschiedene schalltechnische Voraussetzungen mit. In diesem Kapitel wollen wir die Maßnahmen zusammenstellen, die erforderlich sind, damit bei den in der Praxis vorkommenden Deckenkonstruktionen ausreichender Luft- und Trittschallschutz sichergestellt wird.

Alle Betondecken können hinsichtlich ihrer schalltechnischen Eigenschaften in zwei Gruppen eingeteilt werden, so auch im Normblatt DIN 4109. Die Deckengruppe I umfaßt alle Decken, die ohne zusätzliche Maßnahmen weder einen ausreichenden Luftschallschutz noch Trittschallschutz erreichen. Zur Deckengruppe II gehören die Decken, die allein mit Luftschallschutz-Maßen von 0 dB und mehr schon einen normalerweise ausreichenden Luftschallschutz abgeben, bei denen nur der Trittschallschutz angehoben werden muß.

In die Deckengruppe I (Tabelle 7) gehören zuerst die Vollbetondecken, die mehr als 10 cm und weniger als 14 cm dick sind. Mit ihren Flächengewichten unter 350 kg/m^2 kommen ihre Luftschallschutzmaße nicht an 0 dB heran. Weiter fallen in diese Gruppe die verschiedenen Arten der Hohlkörperdecken. Ihre Luftschalldämmungen sind nicht allein deswegen unzureichend, weil ihre Flächengewichte weniger als 350 kg/m^2 betragen, die Verbindungsstege der Hohlkörper ziehen eine weitere Verschlechterung nach sich. In erster Näherung können wir die obere und untere Schicht dieser Decken als biegesteife Schalen auffassen, die durch zahlreiche Schallbrücken verbunden sind.

Zur Deckengruppe II (Tabelle 8) zählen zuerst die Vollbetondecken mit mehr als 14 cm Dicke, dazu mit 1,5 cm Putz auf der Unterseite. Die über 350 kg/m^2 liegenden Flächengewichte - bei genau 14 cm Dicke und 1,5 cm Putz sind es 360 kg/m^2 - verschaffen ihnen Luftschallschutzmaße von 0 dB und mehr.

Neben den schweren Vollbetondecken gehören in diese Deckengruppe die Stahlbeton-Rippen- und Balkendecken mit einer Unterdecke, vorausgesetzt, daß diese als biegeeweiche Vorsatzschale angelegt ist.

Tabelle 7.

Beispiele von Massivdecken der Deckengruppe I, d.h. ohne Deckenauflage sind sowohl Luftschall- als auch Trittschalldämmung dieser Decken nicht ausreichend (LSM und TSM sind kleiner als 0 dB) (nach DIN 4109)

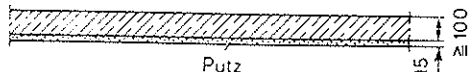
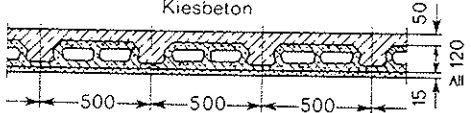
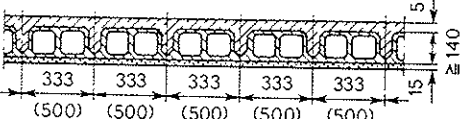
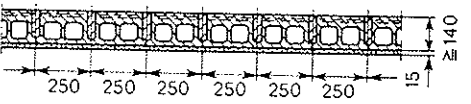
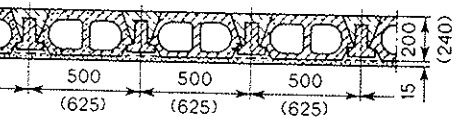
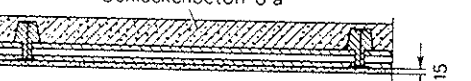
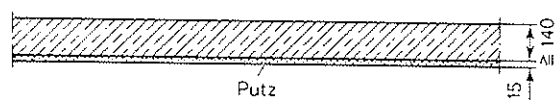
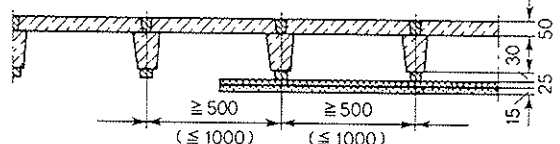
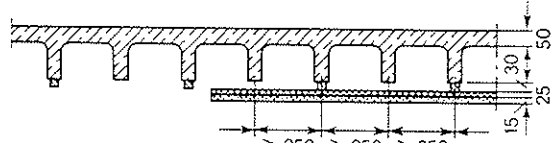

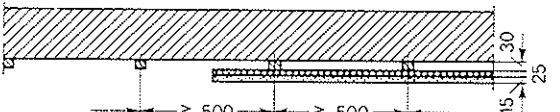
Nr	Bezeichnung und Darstellung (Maße in mm)
1.	<p>Stahlbetonplatten nach DIN 1045 aus Kiesbeton</p>  <p>Putz</p> <p>100 15</p>
2.	<p>Stahlbetonrippendecken nach DIN 1045 mit Hohlkörpern aus Leichtbeton nach DIN 4158</p>  <p>Kiesbeton</p> <p>500 500 500</p> <p>120 15</p>
3.	<p>mit statisch nicht mitwirkenden Deckenziegeln nach DIN 4160</p>  <p>333 333 333 333 333</p> <p>(500) (500) (500) (500) (500)</p> <p>140 15</p>
4.	<p>mit statisch mitwirkenden Deckenziegeln nach DIN 4159</p>  <p>250 250 250 250 250</p> <p>140 15</p>
5.	<p>Stahlbeton-Fertigbalkendecke nach DIN 4233 und DIN 4225 mit Fullkörpern aus Leichtbeton</p>  <p>500 500 500</p> <p>(625) (625) (625)</p> <p>240 15</p>
6.	<p>Decke zwischen I-Trägern Stahlbetonhohldielen nach DIN 4028</p>  <p>Schlackenbeton o.ä.</p> <p>15</p>

Tabelle 8.

Beispiele von Massivdecken der Deckengruppe II, d.h. auch ohne Deckenauflage ist die Luftschalldämmung ausreichend ($LSM \geq 0$ dB), die Trittschalldämmung dagegen nicht ($TSM < 0$ dB) (nach DIN 4109)

Nr.	Bezeichnung und Darstellung (Maße in mm)
1	<p>Stahlbetonplatten nach DIN 1045 aus Kiesbeton</p>  <p>Putz</p>
2	<p>Stahlbetonrippendecken ohne Fullkörper nach DIN 4225</p>  <p>(35)</p>
3	<p>nach DIN 1045 und DIN 4225</p> 
4	<p>Gestelzte Decken zwischen I-Trägern Stahlbetondecke nach DIN 1045</p>  <p>Befestigung bei Drahtputzdecken nach DIN 4121 an Abhängern, bei gerohrten Decken u. a. an Holzlaten</p>
5	 <p>Decken nach Tabelle 7 mit einer Unterdecke als biegeeweiche Vorsatzschale</p>

Eine Unterdecke als biegeeweiche Schale muß nicht nur überall dicht und aus biegeweichen Materialien hergestellt sein, wie z. B. aus 1,5 cm dicken Putz auf leichten Putzträgern oder aus Gipskartonplatten, sie darf über die Aufhänger nur mit wenigen und kleinen Flächenstücken an die Rohdecke befestigt sein. Zwei Befestigungsstellen sollen deshalb nicht dichter als 50 cm zusammenstehen, und die Berührungsflächen zwischen Rohdecke und Unterdecke müssen durch schmale Holzleisten an der Unterseite der Rippen oder Balken möglichst klein gehalten werden (Bild 75). Es gibt auch Spezialaufhänger mit einem weichfedernden Zwischenstück, das die feste Verbindung zwischen Rohdecke und Unterdecke aufhebt (Bild 76).

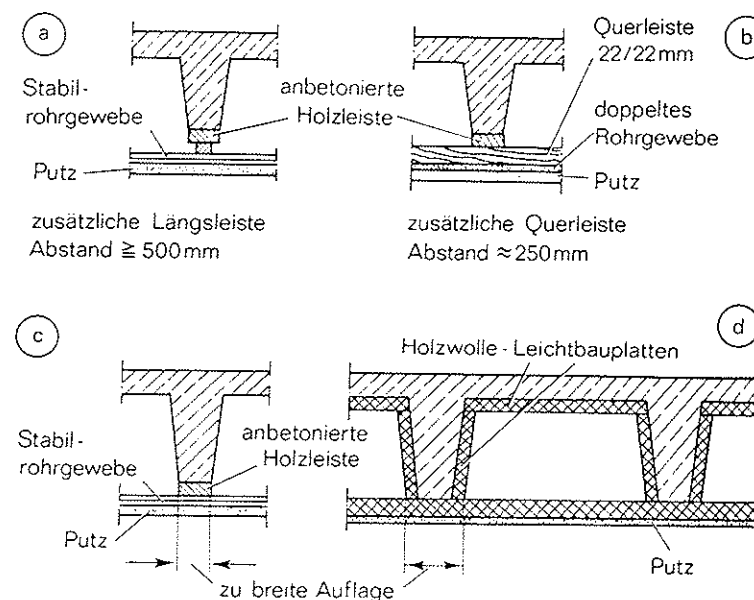


Bild 75. Befestigung der Unterdecke als biegeeweiche Vorsatzschale (nach DIN 4109)

a, b: geeignete Befestigung,
c, d: ungeeignete Befestigung

Übrigens wechseln alle Decken der Deckengruppe I in die Deckengruppe II über, wenn sie eine derartige Unterdecke erhalten.

Nach der Deckengruppe, der eine Decke angehört, richtet es sich, welche Deckenauflage sie erhalten muß, damit sie ausreichend luft- und trittschalldämmend wird, d.h. ihr Luftschall- und Trittschallschutz-Maß wenigstens 0 dB beträgt.

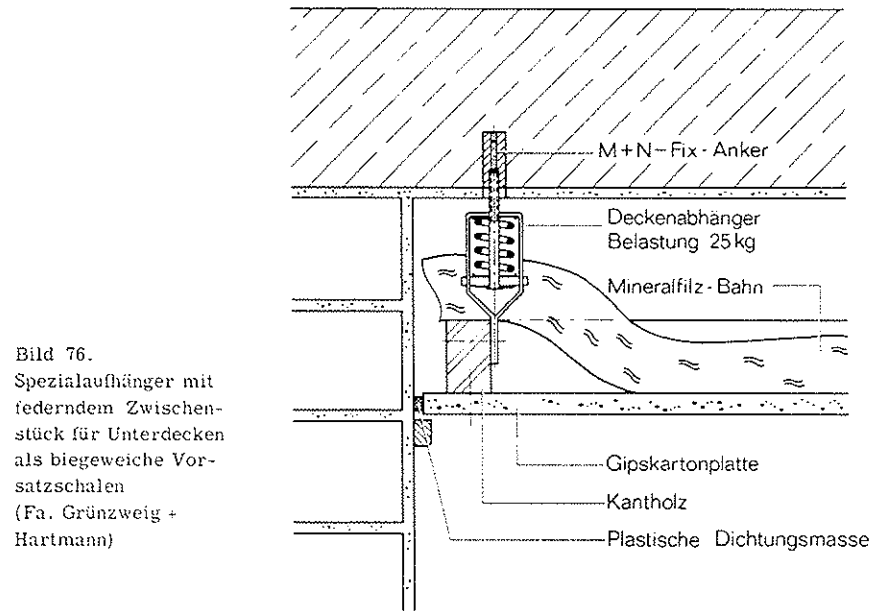


Bild 76.
Spezialaufhänger mit federndem Zwischenstück für Unterdecken als biege- weiche Vorsatzschalen (Fa. Grünzweig + Hartmann)

Eine Decke der Deckengruppe I muß in jedem Fall einen schwimmenden Estrich erhalten, denn sonst leidet sie an einem unzureichenden Luftschallschutz. Es dürfen auch nur Dämmschichten der Dämmstoffgruppe I verwendet werden, da sonst der Luftschallschutz nicht ausreichend verbessert wird.

Bei einer Decke der Deckengruppe II ist als Deckenauflage ebenfalls ein schwimmender Estrich mit den gleichen Dämmschichteigenschaften zu empfehlen, wie sie für die Decken der Gruppe I vorgeschrieben sind. Doch bei diesen Decken können auch Dämmschichten der Dämmstoffgruppe II verarbeitet werden.

Da die Decken der Gruppe II schon als Rohdecken ausreichend luftschalldämmend sind, genügen als Deckenauflagen auch weichfedernde Gehbeläge, deren Eignung für diesen Zweck jedoch durch ein Prüfzeugnis nachgewiesen sein muß.

Die Dämmschicht unter einem schwimmenden Estrich trägt nicht nur dazu bei, den Schallschutz einer Decke zu erhöhen, sie verbessert auch ihre Wärmedämmung. Mit einer Dämmschicht aus 1,5 cm dicken Platten oder Matten aus Mineralwollfasern z. B. erhält eine Wohnungstrenndecke aus Vollbeton auch eine nach Norm (DIN 4108) ausreichende Wärmedämmung.

Im Gegensatz zur Dämmschicht eines schwimmenden Estriches kann ein weichfedernder Gehbelag bei der Wärmedämmung nicht berücksichtigt werden. Die dann eventuell unzureichende Wärmedämmung darf nicht dadurch erhöht werden, daß man an der Unterseite der Decke Holzwolle-Leichtbauplatten anputzt und darunter den Deckenputz anbringt. Wie schon bei den 2-schaligen Konstruktionen erörtert, verschlechtert diese Anordnung die Schalldämmung sehr wesentlich. Die Wärmedämmung kann in einem solchen Fall z. B. durch eine Unterdecke verbessert werden, die als biege- weiche Schale ausgebildet ist.

Eine Sonderstellung unter den Decken nehmen die Holzbalkendecken ein. Gewöhnliche Holzbalkendecken, in früheren Zeiten die Regel und gelegentlich noch heute anzutreffen, erreichen als Wohnungstrenndecken weder einen ausreichenden Luftschall- noch Trittschallschutz. Wenn wir den konstruktiven Aufbau einer üblichen Holzbalkendecke betrachten, finden wir leicht die Ursache für diesen Mangel. Sowohl die Holzdielen des Fußbodens als auch die Unterdecke sind unmittelbar an den Balken befestigt. So sind viele Schallbrücken vorhanden, die eine wirksame Schalldämmung verhindern.

Die Schalldämmung einer Holzbalkendecke kann nur ausreichend verbessert werden, wenn entweder die Dielen des Fußbodens oder die Unterdecke über eine weichfedernde Verbindung an die Holzbalken befestigt werden.

Bild 77a und b zeigen zwei Konstruktionen nach der zuerst genannten Methode. Bei diesen Deckenausführungen liegen weichfedernde Dämmstreifen zwischen den Fußbodendielen und den Holzbalken, die als Platten, Filze oder Matten aus Faserdämmstoffen oder ähnlichen weichfedernden Materialien der Dämmstoffgruppe I bestehen.

Ein Ausführungsbeispiel für eine weichfedernd angehängte Unterdecke zeigt Bild 78. Die Holzleisten, an denen der Putzträger befestigt wird und die von den Holzbalken durch eine weichfedernde Dämmschicht getrennt sind, werden - in Abständen von etwa 30 cm - von besonderen Federbügeln gehalten.

Es gibt noch eine dritte Methode, den Schallschutz einer Holzbalkendecke zu verbessern. Sie besteht darin, daß die Sandschüttung hochgelegt wird und die Lagerhölzer darin eingebettet werden (Bild 79). In dieser Anordnung kann die schalldämmende Wirkung der Sandschüttung ausgenutzt werden. Liegt diese wie meist üblich zwischen den Balken, trägt sie zur Schalldämmung nicht wesentlich bei, wie Versuche bestätigt haben.

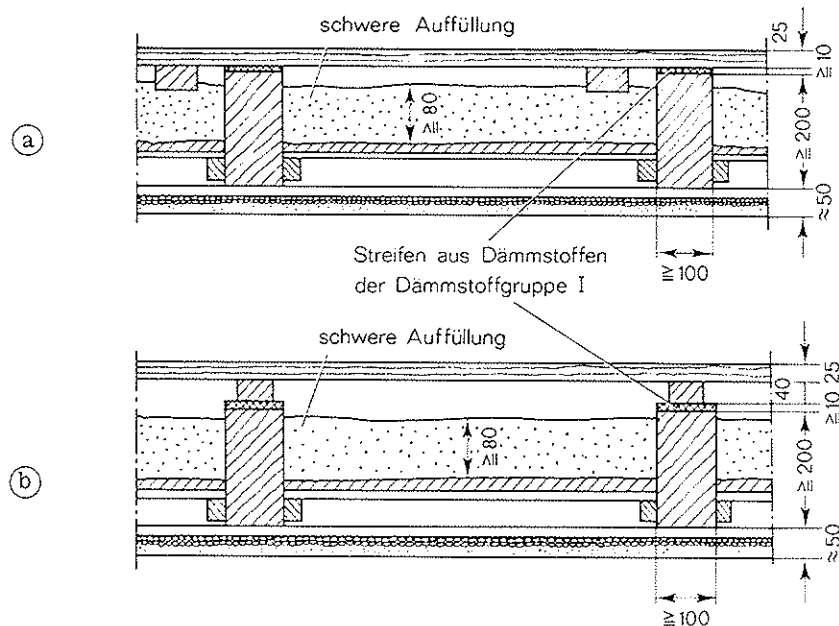


Bild 77. Holzbalkendecken mit ausreichendem Luft- und Trittschallschutz durch weichfedernde Zwischenschichten zwischen den Fußbodendielen und den Holzbalken. LSM und TSM ca. 0 dB bis +3 dB (nach DIN 4109)

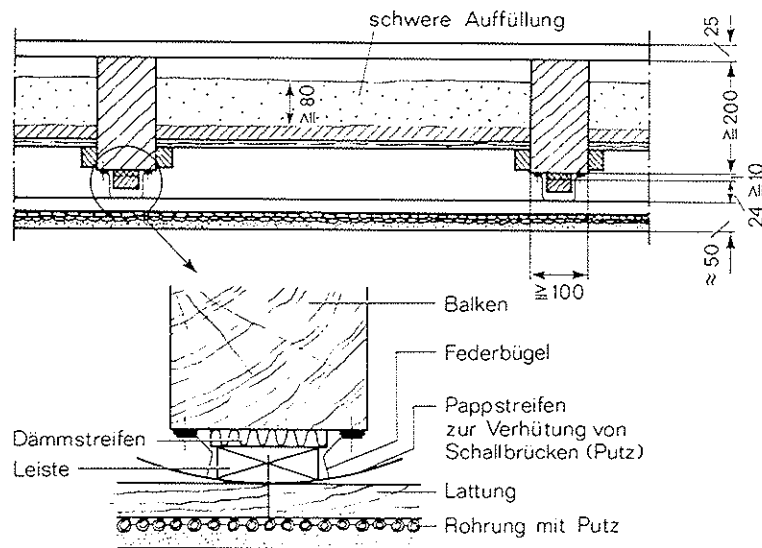


Bild 78. Holzbalkendecke mit ausreichendem Luft- und Trittschallschutz (LSM und TSM 0 dB bis - 3 dB) durch weichfedernd angehängte Unterdecke (nach DIN 4109)

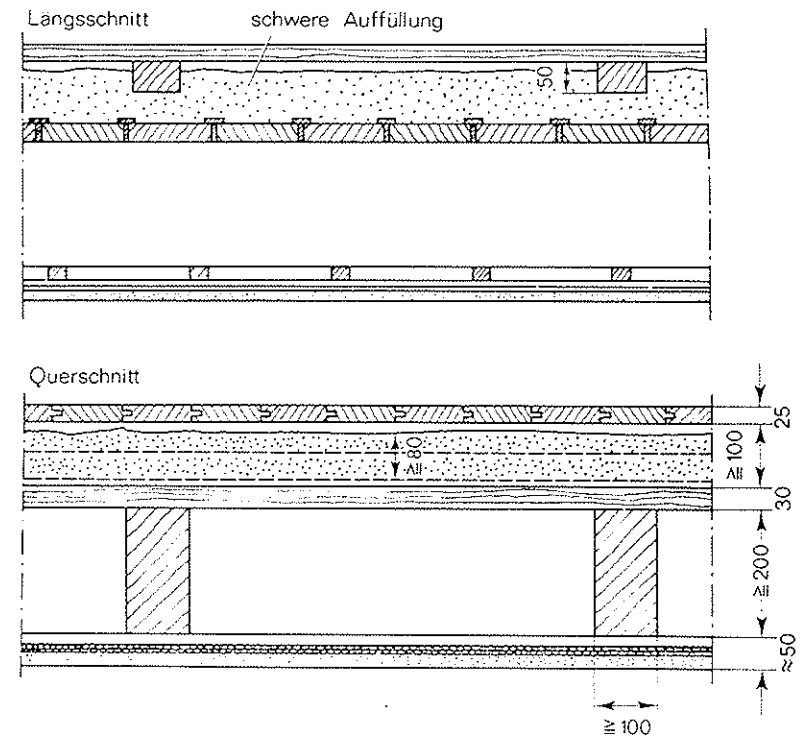


Bild 79. Holzbalkendecke mit ausreichendem Luft- und Trittschallschutz durch Einbettung der Lagerhölzer in die hochgelegte Sandschüttung (LSM und TSM wie bei Bild 77 und 78) (nach DIN 4109)

Holzbalkendecken, die in ihrem Aufbau den Bildern 77, 78, 79 entsprechen, erreichen Luftschall- und Trittschallschutzmaße von 0 dB und etwas darüber. Als Wohnungstrenndecken oder Decken mit vergleichbaren Anforderungen geben sie einen ausreichenden Schallschutz ab.

33. Schutz vor Geräuschen haustechnischer und anderer technischer Einrichtungen, Schallübertragung durch Lüftungsschächte

Viele Einrichtungen eines Wohn- oder Geschäftshauses, die sanitäre Aufgaben zu erfüllen haben, die Arbeit erleichtern oder unnötige Mühen ersparen, erzeugen daneben auch Geräusche. Hierzu gehören in erster Linie Toiletten, Wasch- und Badeeinrichtungen, dann auch Ölheizungen, Fahrstühle, Waschmaschinen und die Arbeitsvorrichtungen und Maschinen gewerblicher Betriebe.

Geräusche, die von diesen Einrichtungen ausgehen und in andere Räume übertragen werden, können ebenso oder noch mehr stören wie die gewöhnlichen Luftschall- und Trittschallgeräusche. Vor allem sind es oft Toiletten und Einrichtungen des Bades, die als unangenehme Geräuschquellen in Erscheinung treten, da sie zu jeder Tages- und Nachtzeit zu hören sein können.

Damit die Bewohner eines Hauses auch gegen Geräusche dieser Art ausreichend geschützt werden, enthält die Norm DIN 4109 Mindestforderungen, die diesmal auf ein einfaches Meßverfahren bezogen sind. Als Meßgerät wird nur ein DIN-Lautstärkemesser benötigt, das ist ein Schallpegelmeßgerät, dessen Eigenschaften den Vorschriften des Normblattes DIN 5045 genügen müssen.

In einem Raum, in den Geräusche der eben beschriebenen Geräuschquellen übertragen werden und stören können, wird die Lautstärke mit einem DIN-Lautstärkemesser gemessen. Sie darf, so lautet die Mindestforderung im Normblatt DIN 4109, in Wohn-, Schlaf- und Arbeitsräumen (Küchen, Bäder und ähnliche Nebenräume ausgenommen), in Raummitte gemessen, 30 DIN-phon nicht übersteigen (internationale Bezeichnung: 30 dB (A)).

Anm.: Da die Lautstärke nicht nur von der Höhe der übertragenen Schallenergie abhängt, sondern auch von der Gesamtabsorption des Empfangsraumes, muß in Zweifelsfällen - wie beim Normtrittschallpegel L_n - der Lautstärkewert auf eine Gesamtabsorption von 10 m² reduziert werden.

Geräusche, die von Geräuscherzeugern aus Räumen der gleichen Wohnung oder des gleichen Betriebes kommen, werden nicht berücksichtigt, sondern nur die aus Nachbarwohnungen oder -Betrieben, Keller oder Maschinenräumen (Fahrstuhl) übertragenen.

Bei haustechnischen Gemeinschaftsanlagen, Maschinen und Geräten gewerblicher Betriebe als Geräuschquellen darf die Lautstärke unter den eben beschriebenen Meßbedingungen "ausnahmsweise" - so die Norm - bis zu 40 DIN-phon betragen, wenn sie nur in der Zeit von 7⁰⁰ Uhr bis 22⁰⁰ Uhr in Betrieb sind. (Besondere Vorschriften für Belüftungsanlagen enthält das Normblatt DIN 1946).

Von den Geräuschquellen, mit denen wir es hier zu tun haben, geht die Schallausbreitung hauptsächlich von einer direkten Anregung eines Bauteiles aus. Zwar erzeugen die meisten dieser Einrichtungen auch Luftschall-Geräusche, diese sind jedoch meist nicht so hoch, als daß sie, allein in andere Räume übertragen, noch stören würden.

Die gleichartige Anregung der Bauteile verlangt auch gleichartige Abwehrmaßnahmen. Doch auf diesem Sektor des Schallschutzes stehen nicht bautechnische Maßnahmen an erster Stelle, zuerst muß dafür gesorgt werden, daß möglichst geräuscharme Armaturen, Spüleinrichtungen, Fahrstühle, Maschinen usw. verwendet werden. Bei allen diesen Anlagen sollte eine geringe Geräuschbildung als wesentliches Qualitätsmerkmal herausgestellt und als Bedingung gefordert werden.

Nun zu den bautechnischen Maßnahmen, die zu treffen sind, damit sich möglichst wenig Geräusche über die Bauteile ausbreiten können. Sie bestehen im Prinzip darin, daß die feste Verbindung zwischen den Geräuscherzeugern und den Bauteilen gelöst und durch eine möglichst weichfedernde Verbindung ersetzt wird.

Es wird also die gleiche Methode angewandt, wie wir sie vom schwimmenden Estrich her kennen. In vielen Fällen wird auch der schwimmende Estrich unmittelbar dazu benutzt, eine Geräuschausbreitung abzdämmen. So z. B. bei Wannen- und Toilettenbecken oder Ölheizungen, die auf dem Estrich montiert sind. Hierbei muß darauf geachtet werden, daß sich keine Schallbrücken bilden, die die Dämmwirkung weitgehend aufheben können. Dieser Fehler wird häufig beim Einsetzen von Wannenbecken begangen, wenn das Becken zwar auf dem schwimmenden Estrich steht, der Beckenrand dann aber fest mit der Wand verbunden wird. Für die Verbindung des Beckenrandes mit der Wand gibt es elastische Kunststoffelemente (Bild 80):

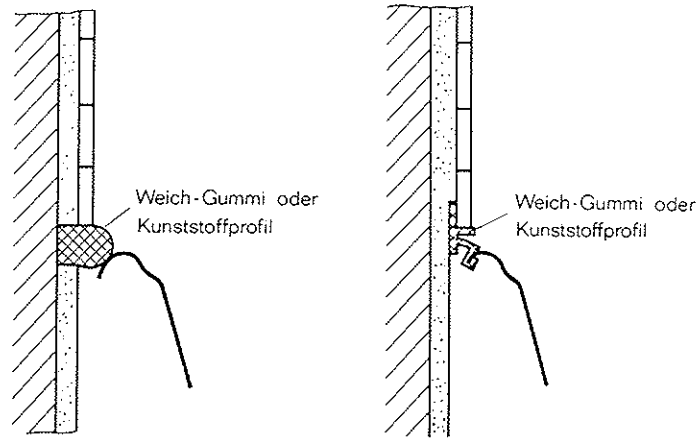


Bild 80. Weichfedernde Verbindung eines Wannenbeckens mit der Wand

Wie auch andere geräuscherzeugende Einrichtungen über weichfedernde Zwischenschichten mit Wänden oder Decken verbunden werden können, zeigt das Bild 81. Insbesondere dürfen hierbei die Rohrleitungen nicht vergessen werden.

Wenngleich in den Rohrleitungen selbst nur in Ausnahmefällen Geräusche erzeugt werden, können sie als Schallbrücken den Effekt, den eine weichfedernde Zwischenschicht hervorbringt, mehr oder weniger stark beeinträchtigen. Auch sie dürfen also nicht unmittelbar mit den Bauteilen in Verbindung stehen. Um dies zu vermeiden, werden deshalb die möglichen Berührungsflächen mit körperschalldämmenden Schichten ummantelt. Hierzu eignen sich, je nach dem ob die Rohrleitungen auf Putz, in Rohrschächten oder unter Putz liegen oder Decken bzw. Wände durchstoßen: Filz, Faserdämmstoffe, Gummi oder gummiähnliche Kunststoffe und Kork.

Die Ausbreitung von Geräuschen, die von der direkten Anregung eines Bauteiles ausgehen, kann noch durch eine weitere Maßnahme verringert werden. Die Geräuscherzeuger sollten möglichst an schwere Bauteile montiert werden, genauer gesagt an Bauteile mit hohem Flächengewicht. Die große Trägheit, die die Massenelemente eines solchen Bauteiles besitzen, setzen der Anregung einen großen Widerstand entgegen. Wände mit geringem Flächengewicht werden dagegen viel stärker angeregt.

Hierzu ein praktisches Anwendungsbeispiel: Sehr häufig werden die Wohnungen so aufgeteilt, daß Küchen und Bäder nebeneinander liegen, weil

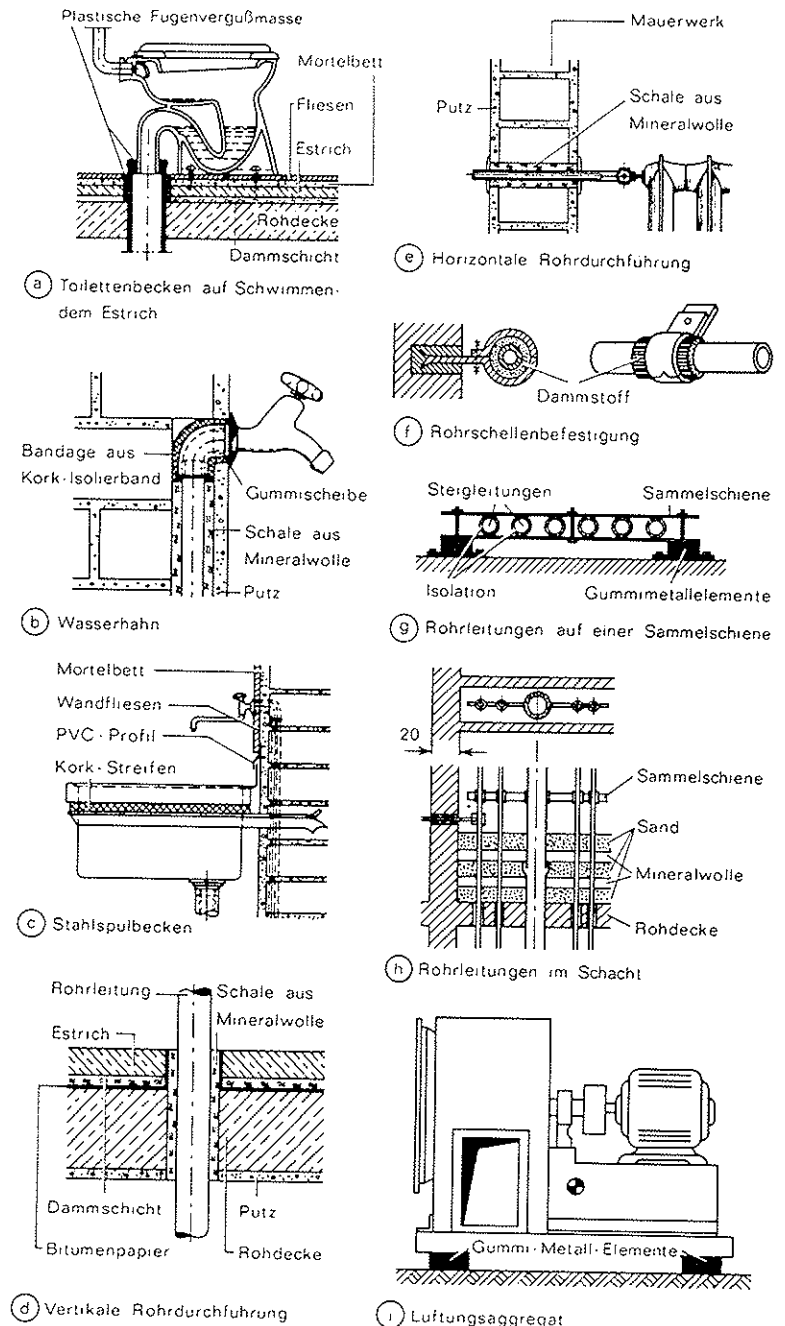


Bild 81. Montage haustechnischer und anderer technischer Einrichtungen über weichfedernde Zwischenschichten an die Bauteile (unter Verwendung von Firmenprospekten der Fa. Grünzweig + Hartmann)

die gemeinsame Trennwand dann die Wasser- und Abwassereinrichtungen aufnehmen kann. Diese Trennwand sollte so schwer als möglich ausgeführt werden, also z.B. aus 24 cm starkem Mauerwerk aus Vollsteinen auf beiden Seiten verputzt.

Um die Geräuschbelästigung durch haustechnische Einrichtungen - besonders auch innerhalb einer Wohnung - niedrig zu halten, müssen wir noch eine letzte Regel beachten. Alle diese Geräuscherzeuger sollten möglichst weit entfernt von Wohn- oder Schlafräumen angeordnet sein. So dürfen z.B. Wasser- oder Abwassereinrichtungen keinesfalls an eine Wand montiert sein, die das Bad von einem Wohn- oder Schlafzimmer trennt.

Räume, wie Küchen, Bäder und Toiletten, in denen die haustechnischen Einrichtungen normalerweise untergebracht sind, können den Schallschutz in einem Hause noch auf andere Weise beeinträchtigen. Sehr oft müssen Räume dieser Art eigene Entlüftungskanäle erhalten. Ein einfacher Schacht, der von unten nach oben durchläuft, und an den in einem mehrgeschossigen Haus übereinanderliegende Räume angeschlossen sind, überbrückt die Schalldämmung der Decken.

Um zu verhindern, daß die Schalldämmung hierdurch herabgesetzt wird, gibt es die folgenden Möglichkeiten:

1. Jeder Raum erhält einen eigenen Schacht.
2. Schächte mit Querschnitten, die kleiner sind als 13,5 cm × 20 cm und schallschluckende Innenwände haben, wie z.B. unverputztes Mauerwerk, Bimsbeton oder Ziegelsplittbeton, können an jedem zweiten Stockwerk angeschlossen werden. Wenn Innenwände mit diesem Aufbau auch keine guten Schallschlucker im üblichen Sinne darstellen, so entziehen sie den durchlaufenden Schallwellen durch den langen Weg genügend viel Schallenergie.
3. Auch Sammelschachtanlagen nach DIN 1807 können verwendet werden, wenn ihre Innenwände wie unter 2. schallschluckend gestaltet sind und der Luftweg zwischen den Anschlüssen zweier übereinander liegenden Stockwerke durch eingebaute Zungen auf etwa 6 m verlängert wird.

Sammelschachtanlagen mit Motorlüftung müssen schalldämpfende Luftansaugkästen erhalten. Die Eignung einer solchen Anlage muß durch ein Prüfzeugnis nachgewiesen sein.

34. Maßnahmen zu einem verbesserten und zu einem hohen Schallschutz

Werden etwa zwischen den benachbarten Wohnungen eines Mehrfamilienwohnhauses gerade eben die Mindestforderungen an den Schallschutz erreicht, die das Normblatt DIN 4109 vorschreibt, so beklagen sich die Bewohner nicht selten, daß sie durch Geräusche aus Nebenwohnungen über Gebühr belästigt werden. Für sie ist es dann wenig tröstlich zu hören, daß der Schallschutz ihres Hauses nach den derzeitig anerkannten Regeln der Baukunst als ausreichend gilt, wenn auch nur knapp.

Der Architekt sollte deshalb im Rahmen seiner Möglichkeiten dazu beitragen, die Belästigung und Schädigung durch die vielen Geräusche, denen wir in unserer Zeit ausgesetzt sind, einzudämmen und sich verpflichtet fühlen, den Schallschutz eines Bauvorhabens so gut wie möglich auszuführen. Ein gegenüber den Mindestforderungen verbesserter Schallschutz erhöht den Baupreis im allgemeinen nicht wesentlich, wenn er von vornherein eingeplant wird. Nur nachträgliches Verbessern ist zumeist mit größeren Unkosten verbunden.

Um zu einem verbesserten Schallschutz zu kommen, brauchen wir nur die bauakustischen Regeln der letzten Kapitel anzuwenden. Fassen wir die wesentlichen Maßnahmen, die sich daraus ableiten lassen, stichwortartig zusammen:

1. a) Einschalige Trennwände von Wohnungen oder Wände mit vergleichbaren Anforderungen sollten ein Flächengewicht von wenigstens 480 kg/m² erhalten. Dieses Flächengewicht erreicht z.B. ein auf beiden Seiten verputztes Mauerwerk aus Vollsteinen (als Wohnungstrennwand ist auch der Wärmeschutz nach DIN 4108 ausreichend). Die flankierenden Wände von Trennwänden benachbarter Wohnungen sollten mit genügend großen Flächengewichten - möglichst nicht unter 350 kg/m² - die Schalldämmung der Trennwände so wenig als möglich durch Flankenübertragung beeinträchtigen.
- b) Eine leichtere Trennwand, die den gleichen Zweck erfüllt, besteht aus einer biegesteifen Schale (Mindestdicke 15 cm, Flächengewicht mindestens 200 kg/m²) mit biegeweicher Vorsatzschale auf freistehendem Ständerwerk davor.

- c) Wenn eine Trennwand aus zwei Schalen mit wenigstens 1 cm dicker durchgehender Trennfuge gebaut werden kann (wie z. B. bei Reihenhäusern), können beide Schalen biegesteif sein (Mindestdicke 15 cm, Flächengewicht mindestens 200 kg/m^2 je Schale).
2. a) Es sollten Decken vorgesehen werden, die schon als Rohdecken mit Luftschallschutz-Maßen über 0 dB einen hinreichenden Luftschallschutz gewähren und also zur Deckengruppe II gehören.
 b) Als Deckenaufgabe sollten sie dann einen schwimmenden Estrich erhalten, wie er für Decken der Gruppe I gefordert wird, d. h. die Steifigkeit der Dämmschicht soll weniger als 3 kp/cm^3 betragen.
 c) Zusätzlich ist ein weichfedernder Gehbelag mit einem Verbesserungsmaß von mehr als 12 dB zu empfehlen, hauptsächlich um die Trittschall-Geräusche im Raum ihrer Erzeugung zu dämpfen.
3. Um zu vermeiden, daß leichte biegesteife Nebenwände, z. B. die Wohnungswand, die durch Körperschall-Leitung zugeführten Schallanteile zu stark abstrahlen, sollen ihre Flächengewichte wenigstens 250 kg/m^2 betragen. Selbstverständlich können diese Wände mit sehr viel geringeren Gewicht auch aus biegeweichen Schalen 2-schalig aufgebaut werden.
4. Gebäude in geräuscherfüllter Umgebung sollten gegen Störungen durch den Außenlärm besonders geschützt werden. Dies gelingt praktisch nur, wenn dicht schließende Doppelfenster mit genügend großem Scheibenabstand anstatt einfacher Fenster vorgesehen werden.

Werden alle diese Maßnahmen konsequent angewandt, so kann man damit rechnen, daß die Luftschallschutz-Maße bei + 5 dB bis + 8 dB liegen, bei sorgfältiger Ausführung der schwimmenden Estriche können die Trittschallschutz-Maße auf über + 10 dB ansteigen. Messen wir das Ergebnis der Maßnahmen an diesen Schallschutzmaßen, so scheint der Erfolg, insbesondere beim Luftschallschutz, nicht sehr überwältigend zu sein.

Doch bei der Bauweise, die größtenteils praktiziert wird, liegen die Luftschallschutz-Maße gerade eben bei 0 dB oder höchstens knapp darüber. Die Trittschallschutz-Maße bewegen sich mit etwa + 2 dB bis + 8 dB in einem günstigeren Bereich, die größeren Streuungen erklären sich hauptsächlich durch unterschiedliche Herstellungsqualitäten.

Verglichen mit diesem Normalzustand schirmt der verbesserte Schallschutz die Wohn- oder Arbeitsräume sehr viel wirkungsvoller gegen Geräusche der Nachbarn ab. Außerdem steigt dadurch der Wert eines Hauses wesentlich mehr als die etwas höher liegenden Herstellungskosten ausmachen.

Ob ein verbesserter Schallschutz beim Bau eines Hauses vorgesehen werden kann, muß zwischen dem Bauherrn und dem Architekten vereinbart werden. Es gibt jedoch verschiedene Fälle, in denen die Norm DIN 4109 einen noch höheren Schallschutz fordert als der verbesserte Schallschutz hergeben kann. Das betrifft Wände und Decken zwischen Wohnungen oder Arbeitsräumen und Betrieben, in denen es sehr laut werden kann, wie z. B. in Gaststätten, Gewerbebetrieben oder Lichtspieltheatern.

Zwischen den Wohnungen oder Arbeitsräumen und den lauten Räumen muß nach DIN 4109 ein Luftschallschutz-Maß von wenigstens + 10 dB, ein Trittschallschutz-Maß von wenigstens + 20 dB erreicht werden.

Für einen so hohen Schallschutz reichen die bisher beschriebenen Maßnahmen nicht aus. Es genügt nicht, nur die direkt übertragenen Schallanteile durch gut schalldämmende Wände und Decken abzuwehren, auch die Schallanteile, die durch Körperschall-Leitung übertragen werden, müssen wirksam abgedämmt werden. Wir wollen im folgenden skizzieren, durch welche Maßnahmen dies Problem zu lösen ist.

Alle Wände, die einen lauten Betrieb von fremden Wohn- oder Arbeitsräumen trennen, müssen massiv und so schwer gebaut sein, daß sie allein auf Grund ihres Flächengewichtes unter normalen Bedingungen Luftschallschutz-Maße von mehr als + 3 dB erreichen. Das heißt praktisch, die Wände bestehen mindestens aus 24 cm starken, auf beiden Seiten verputzten Vollsteinwänden oder anderen gleichschweren oder schwereren Wänden.

Auch die Decken müssen im Rohzustand schon eine ausreichend hohe Luftschalldämmung besitzen, praktisch kommen dafür nur Vollbetondecken von wenigstens 16 cm Dicke in Frage, die auf der Unterseite verputzt sind.

Alle übrigen Innenwände des Gebäudes müssen als einschalige Wände ein Flächengewicht von wenigstens 250 kg/m^2 erreichen, oder sie sind noch besser aus biegeweichen Schalen 2-schalig aufgebaut.

Wenn diese Voraussetzungen erfüllt sind, kann der Schallschutz durch folgende Maßnahmen auf die geforderte Höhe hinaufgeschraubt werden (Bild 82).

In dem lauten Betrieb werden vor die Innenseiten der Trennwände, der Außenwände und auf beiden Seiten einschaliger Innenwände biegeeweiche Schalen montiert. Die Decke erhält eine Unterdecke als biegeeweiche

Vorsatzschale und der Boden einen schwimmenden Estrich besonders hoher Güte mit einem Verbesserungsmaß von mindestens 30 dB.

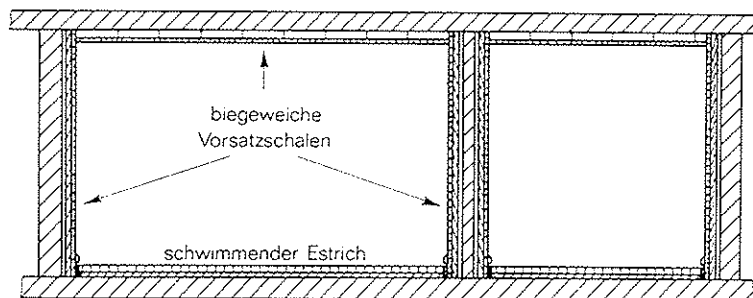


Bild 82. Fußboden-, Wand- und Deckenaufbau bei sehr hohen Anforderungen an den Schallschutz

Der Schallschutz erreicht durch diese Maßnahmen das geforderte hohe Niveau, weil nur noch sehr geringe Schallanteile durch Körperschallleitung übertragen werden. Die Trennschichten zwischen den Innenschalen und den Wänden und Decken setzen die Übertragung dieser Schallanteile auf die übrigen Bauteile wirksam herab. Dadurch kann die Verbesserung des Schallschutzes, den die 2-schaligen Konstruktionen bei Wänden und Decken ermöglichen, auch in diesem Bereich sehr hoher Schalldämmung zum Tragen kommen.

35. Wo werden Ansprüche an den Schallschutz gestellt?

Bevor im einzelnen festgelegt werden kann, wie Wände, Decken, Türen, Fenster usw. aufgebaut werden sollen, muß man sich darüber klar sein, wo ein genügender Schallschutz berücksichtigt werden muß. Wir sollten bei diesen Überlegungen immer vom Normblatt DIN 4109 ausgehen. Es enthält für die Bauten, mit denen es der Architekt in seinem Berufsleben hauptsächlich zu tun hat, Mindestforderungen an den Schallschutz, die in jedem Fall erfüllt werden müssen, unabhängig davon, ob dies zwischen dem Bauherrn und Architekten vereinbart war oder nicht.

Wenn die Mindestforderungen dieses Normblattes nicht erfüllt worden sind, z. B. in einem Wohnhaus mit mehreren Wohnungen, so können die

Mieter auf Mietminderung klagen (§§ 537, 472 und 473 BGB), und der Bauherr kann nicht nur die Beseitigung dieser Mängel auf dem Rechtswege erzwingen (§§ 633, 634 BGB), er kann auch noch Schadenersatz fordern (§ 635 BGB).

Wegen ihrer grundsätzlichen Bedeutung für den Schallschutz im Bauwesen sind die Mindestforderungen, die im Normblatt DIN 4109 an den Luftschall- und Trittschallschutz von Wänden und Decken gestellt werden, in der Tabelle 9 abgedruckt. Wie im Normblatt ist die Tabelle durch Empfehlungen zu einem verbesserten Schallschutz ergänzt.

Außer einer ausreichenden Dämmung gegen Luft- und Trittschallgeräusche wird in der gleichen Norm ein ausreichender Schutz gegen die Geräusche haustechnischer und anderer technischer Einrichtungen im Hause verlangt. Die Einzelheiten dazu sind im Kapitel 33 angegeben.

Gegen starken Lärm von außen (z. B. in Straßen mit hoher Verkehrsdichte) sollen die dem Lärm zugewandten Wohn-, Schlaf-, Arbeits-, Vortrags-, Versammlungs-, Schul-, Krankenzimmer und dergleichen durch dichtschießende Fenster mit erhöhter Luftschalldämmung geschützt werden.

Die Liste der Normforderungen stellt keineswegs einen vollständigen Katalog aller Fälle dar, bei denen ein Schallschutz zu berücksichtigen wäre. Die Norm beschränkt sich vielmehr darauf, den individuellen Wohn- und Arbeitsbereich gegen das Eindringen von Geräuschen hinreichend abzusichern. So beziehen sich die Normforderungen in erster Linie auf den Wirkungsbereich, in dem die meisten Menschen am wenigsten gestört sein möchten: auf ihre Wohnung und - bei vorwiegend geistiger Tätigkeit - auf ihren Arbeitsraum.

Welches Mindestmaß an Schallschutz die Wände und Decken von Wohnungen und Arbeitsräumen aufbringen müssen, hängt von dem Verwendungszweck der angrenzenden Räume ab. Sind dies ebenfalls Wohnungen bzw. Arbeitsräume oder Treppen-, Boden- und Kellerräume, also "ruhige" Räume, müssen Wände und Decken ein Luftschallschutz-Maß von wenigstens 0 dB, die Decken gleich nach Fertigstellung des Baues ein Trittschallschutz-Maß von + 3 dB erreichen, das zwei Jahre danach noch 0 dB betragen muß. Bei dieser Festlegung ist berücksichtigt worden, daß die Dämmschichten in den ersten Monaten etwas verhärten, ein Prozess, der nach spätestens zwei Jahren abgeschlossen ist.

Im Besonderen muß darauf hingewiesen werden, daß auch bei solchen Decken Forderungen an den Trittschallschutz gestellt werden, unter denen keine Aufenthaltsräume, sondern Keller, Garagen, Abstellräume

Tabelle 9.

Luft- und Trittschallschutz von Decken, Luftschallschutz von Wänden. Mindestanforderungen und Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz bei Aufenthaltsräumen (nach DIN 4109)

Spalte	a	b	c ₁	c ₂	d	e ₁	e ₂
Zeile	Bauteile	Mindestanforderungen Trittschallschutzmaß TSM in dB Luftschallschutzmaß LSM in dB	unmittelb. ≥ 2 Jahre nach Fertigstellung des Baues		Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz Trittschallschutzmaß TSM in dB Luftschallschutzmaß LSM in dB	unmittelb. ≥ 2 Jahre nach Fertigstellung des Baues	
Geschöfshäuser mit Aufenthaltsräumen (Wohnungen und Arbeitsräume)							
1	Decken unter nicht nutzbaren Dachräumen	—	—	—	—	—	—
2	Decken unter nutzbaren Dachräumen, z. B. unter Trockenböden, Waschküchen, Bodenkammern und ihren Zugängen	0	3	0	≥ 3	≥ 13	≥ 10
3	Wohnungstrenndecken und Decken zwischen fremden Arbeitsräumen	0	3	0	≥ 3	≥ 13	≥ 10
4	Decken über Kellern, Hausfluren, Treppenträumen unter Aufenthaltsräumen	0	3	0	≥ 3	≥ 13	≥ 10
5	Decken über Durchfahrten, Einfahrten von Sammelgaragen u. ä. unter Aufenthaltsräumen	3	3	0	≥ 3	≥ 13	≥ 10
6	Decken unter Terrassen, Loggien und Laubengängen über Aufenthaltsräumen	—	3	0	—	≥ 13	≥ 10
7	Decken unter Laubengängen	—	3	0	—	≥ 13	≥ 10
8	Decken zweigeschossiger Wohneinheiten	—	3	0	—	≥ 13	≥ 10
9	Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen	0	—	—	≥ 3	—	—
10	Treppenraumwände und Wände neben Hausfluren	0	—	—	≥ 3	—	—
11	Wände neben Durchfahrten, Einfahrten von Sammelgaragen u. ä.	3	—	—	≥ 3	—	—
Einfamilienhäuser							
12	Decken in Einfamilien-Reihen- und Einfamilien-Doppelhäusern	—	3	0	≥ 0	≥ 13	≥ 10
13	Decken in freisteh. Einfamilienhäusern	—	—	—	≥ 0	≥ 13	≥ 10
14	Haustrennwände (Wohnungstrennwände) zwischen Einfamilien-Reihen- und Einfamilien-Doppelhäusern	3	—	—	≥ 3	—	—
Gaststätten, Lichtspieltheater, Gewerbebetriebe und dgl., die an Wohnungen oder fremde Arbeitsräume grenzen							
15	Decken	10	20	20	> 10	> 20	> 20
16	Wände	10	—	—	> 10	—	—
Hotels, Gasthäuser, Krankenhäuser							
17	Decken zwischen „ruhigen Räumen“ (Übernachtungs- und Krankenzimmer) und „lauten Räumen“ (Gasträume, Küchen und dgl.)	10	20	20	> 10	> 20	> 20
18	Wände entsprechend Zeile 17	10	—	—	> 10	—	—
19	Decken zwischen „ruhigen Räumen“ (Übernachtungs- und Krankenzimmer) einschl. der zugehörigen Flure	0	3	0	≥ 3	≥ 13	≥ 10
20	Wände entsprechend Zeile 19	—3	—	—	≥ 0	—	—
Schulen							
21	Decken zwischen Unterrichtsräumen und dgl. einschl. der Flure	3	13	10	—	—	—
22	Wände zwischen Unterrichtsräumen und dgl.	3	—	—	—	—	—
23	Wände zwischen Unterrichtsräumen und Fluren bzw. Treppenträumen	0	—	—	—	—	—

u. ä. liegen. In diesen Fällen beziehen sich die Trittschallschutz-Maße auf die Trittschall-Geräusche, die durch Körperschall-Leitung in die Räume auf gleicher Ebene oder darüber gelangen.

Sind es keine "ruhigen", sondern "laute" Räume wie Gaststätten, Gewerbebetriebe oder Lichtspieltheater, die an Wohnungen oder fremde Arbeitsräume grenzen, wird ein hoher Schallschutz gefordert. Die Luftschallschutz-Maße der Trennwände und -Decken müssen in diesen Fällen + 10 dB, die Trittschallschutz-Maße der Decken + 20 dB betragen. Wenn Betriebe dieser Art wie gewöhnlich im Erdgeschoß untergebracht sind, brauchen die geforderten Trittschallschutz-Maße nur für die seitlich angrenzenden und darüber liegenden Räume erreicht zu werden. Unter dieser Voraussetzung stellt ein Trittschallschutz-Maß von + 20 dB keine besonders hohe Forderung dar.

Die übrigen Räume, für die in der Norm ein Mindestmaß an Schallschutz gefordert wird, ähneln in ihrem Verwendungszweck den Wohnungen oder gewöhnlichen Arbeitsräumen, es sind:

Krankenräume in Krankenhäusern,
Übernachtungsräume in Hotels,
Unterrichtsräume in Schulen.

Die Mindestforderungen an den Schallschutz, den Wände und Decken dieser Räume erfüllen müssen, sind - mit zwei Ausnahmen - die gleichen wie die bei Wohnungen. Das heißt, ist der angrenzende Raum ein "ruhiger" Raum, muß das Luftschallschutz-Maß der Wände und decken wenigstens 0 dB, das Trittschallschutz-Maß der Decken nach Fertigstellung + 3 dB und nach zwei Jahren noch 0 dB betragen. Liegt jenseits der Trennwand oder -Decke ein "lauter" Raum, z. B. eine Gaststätte oder eine Küche, muß das Luftschallschutz-Maß mindestens + 10 dB, das Trittschallschutz-Maß + 20 dB erreichen.

Die erste Ausnahme bilden Wände, die Übernachtungs- oder Krankenzimmer voneinander oder vom Flur trennen. Ihr Luftschallschutz-Maß braucht nur - 3 dB zu betragen. Diese Forderung ist z. B. mit 11,5 cm dicken Wänden zu verwirklichen, deren Flächengewicht einschließlich Putz wenigstens 250 kg/m² beträgt.

Zur zweiten Ausnahme zählen alle Decken von Unterrichtsräumen und die Wände zwischen ihnen. Bei diesen Bauteilen müssen die Luftschallschutz-Maße wenigstens + 3 dB betragen, die Trittschallschutz-Maße der Decken unmittelbar nach Fertigstellung + 13 dB und zwei Jahre danach noch + 10 dB.

Fassen wir zusammen: die Norm verlangt nur dort ein Mindestmaß an Schallschutz, wo es durch ein allgemeines Interesse begründet werden kann. Das bedeutet einmal, daß ein guter Schallschutz über dem Mindestmaß liegt - und die Norm gibt Empfehlungen zu einem verbesserten Schallschutz - zum anderen, daß viele Fälle nicht in der Norm aufgenommen sind, bei denen der Schallschutz nicht vergessen werden darf, wenn später keine Klagen über Geräuschbelästigungen kommen sollen, die durch einen besseren Schallschutz zu vermeiden gewesen wären.

Damit kommen wir zu der Frage, wo außerhalb der Norm auf einen genügend großen Schallschutz gesehen werden muß. Hierfür gibt es kein allgemeines Rezept, doch beim Durchprüfen dieses Aspektes kann man sich gut an der Norm orientieren.

Für die Räume innerhalb einer Wohnung z. B. oder innerhalb eines Betriebes schreibt die Norm - von Ausnahmen abgesehen - keine Mindestforderungen an den Schallschutz vor. Doch nebeneinander liegende Räume in einer Wohnung oder in einem Betrieb, die regelmäßig oder öfter gleichzeitig benutzt werden, sollten vor gegenseitiger Störung nach Möglichkeit so gut geschützt werden, wie es die Norm etwa für Wände zwischen Übernachtungsräumen in Hotels als Minimum vorschreibt. Keinesfalls jedoch sollte ein mittleres Schalldämm-Maß \bar{R} von 40 dB - entsprechend einem Luftschallschutz-Maß von etwa - 10 dB - unterschritten werden. Das bedeutet, eine einschalige Trennwand muß einer Schallübertragung mit wenigstens 150 kg/m² entgegenwirken.

Ein weiteres Beispiel für einen Fall, bei dem ein genügend großer Schallschutz vorgesehen werden muß, bildet das Sprechzimmer eines Arztes oder Anwaltes. Besonders kritisch ist die Trennwand zwischen Sprechzimmer und Wartezimmer, weil ihre Schalldämmung durch die Verbindungstür zwischen beiden Räumen sehr geschwächt werden kann. Neben einer gut schalldämmenden Wand muß dort eine gut schalldämmende Tür vorgesehen werden, am besten eine Doppeltür mit genügend großem Abstand beider Türblätter.

Eine gute Schalldämmung sollten auch diejenigen Türen in Hotels erhalten, durch die man vom Korridor aus die Übernachtungsräume betritt. Diese Aufgabe kann besonders zweckmäßig gelöst werden, wenn die Wasch- und Toiletteneinrichtungen unmittelbar hinter den Korridortüren eingebaut werden, den eigentlichen Übernachtungsraum betritt man dann durch eine zweite Tür (Bild 83).

Auf anderen Sektoren des Hochbaues begegnen uns anders liegende Probleme des Schallschutzes. So z. B. müssen Theater- und Konzertsäle

und ähnliche Veranstaltungsräume einen besonders hohen Schutz gegen den Außenlärm erhalten. Die seitlich einfallenden Schallanteile werden in der Regel genügend abgedämmt, weil das Saalinnere meist von zwei Wänden umgeben ist, zwischen den Foyer und Kleiderablagen untergebracht sind. Bei den Dach- und Deckenkonstruktionen jedoch muß die Frage der ausreichenden Schalldämmung besonders beachtet und bearbeitet werden, denn diese werden aus statischen Gründen gewöhnlich sehr leicht angelegt.

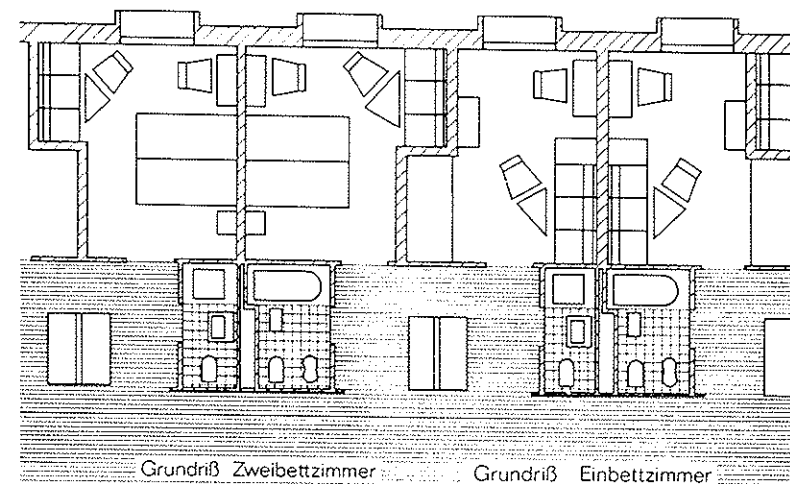


Bild 83. Aufbau eines Hotelzimmers mit gutem Schallschutz gegen den Korridor

Es kommt auch vor, daß die Umgebung eines Gebäudes, einer Fabrik oder eines Kraftwerkes etwa, gegen Geräusche geschützt werden müssen, welche die Betriebsanlagen innerhalb des Gebäudes erzeugen. Vom VDI sind in den Richtlinien "Beurteilung und Abwehr von Arbeitslärm" VDI 2058 Grenzwerte der Lautstärken angegeben, die vor dem nächst benachbarten Wohnhaus nicht überschritten werden dürfen.

Diese Grenzwerte betragen:

1. In Industriegebieten	tagsüber:	65 DIN-phon
	nachts :	50 DIN-phon
2. in gebieten, die vorwiegend Wohnzwecken dienen	tagsüber:	60 DIN-phon
	nachts :	45 DIN-phon
3. in reinen Wohngebieten	tagsüber:	50 DIN-phon
	nachts :	35 DIN-phon

Die Frage, ob gegen eine Lärmausstrahlung in die Umgebung besondere Maßnahmen vorgesehen werden müssen, ist grundsätzlich bei jedem Betrieb zu prüfen, in dem maschinelle Anlagen aufgestellt sind. Für Betriebe in Gebieten, die vorwiegend Wohnzwecken dienen, muß dieser Aspekt besonders kritisch betrachtet werden. Das hängt nicht allein damit zusammen, daß die Lautstärken der Geräusche die relativ niedrigen Grenzwerte - besonders nachts - leicht überschreiten können, hinzu kommt, daß das nächst benachbarte Wohnhaus oft nur wenige Meter von dem Betrieb entfernt steht.

Um zu verhindern, daß starke Innengeräusche in der Umgebung stören, muß für eine genügende Schalldämmung der Außenflächen des Gebäudes gesorgt werden. Praktisch heißt das, es müssen gut schalldämmende Fenster und Außentüren eingebaut werden, denn die Außenwände allein besitzen in der Regel eine genügend hohe Schalldämmung.

Diese Maßnahmen haben eine Konsequenz, die nicht übersehen werden darf. Bei dicht schließenden Fenstern und Außentüren kann das Gebäude nicht mehr auf natürlichem Wege belüftet werden, es muß daher eine künstliche Belüftung vorgesehen werden.

Es gibt noch manchen anderen Fall, bei dem der Schallschutz zu beachten ist, wie können nicht alle aufzählen. Die Beispiele, die wir behandelt haben, stellen typische Fälle dar, die zeigen sollen, unter welchen Bedingungen schalldämmende Maßnahmen berücksichtigt werden müssen. Die Betrachtungen, die wir dazu angestellt haben, geben einen Rahmen ab, in dem sich berechnete Ansprüche an einen genügenden Schallschutz bewegen.

Wenn wir zum Schluß die Regeln und Methoden überblicken, die wir anwenden müssen, um gute raum- und bauakustische Verhältnisse zu schaffen, so müssen wir erkennen, daß sie sehr stark in die konstruktive Durchbildung eines Entwurfes eingehen, sie müssen deshalb sehr frühzeitig darin einbezogen werden. Denn eine gute Akustik in einem Saal und in sonstigen Räumen, ein guter Schutz gegen die Übertragung von Geräuschen, stellt sich - entgegen einer immer noch verbreiteten Meinung - nicht durch Zufall ein, sondern nur als Ergebnis einer sorgfältigen Planung.

Zusammenhänge in Stichworten und Formeln

A. Raumakustik

In die Gestaltung aller Räume - ausgenommen normale Wohn- und Schlaf Räume unter 50 m^3 Raumvolumen - muß die Raumakustik einbezogen werden.

In Bezug auf die anzustrebenden akustischen Eigenschaften sind zwei Gruppen von Räumen zu unterscheiden:

- Gruppe I: Räume, in denen Sprache oder Musik vorgetragen wird.
- Gruppe II: Räume, in denen die sich darin aufhaltenden Personen möglichst wenig durch Geräusche gestört werden sollen.

Akustische Gestaltung von Räumen der Gruppe I

- ① Verwendungszweck des Raumes eindeutig feststellen.
- ② Raumvolumen und Anzahl der Plätze ermitteln; als Maß zur überschlägigen Orientierung über die erforderlichen raumakustischen Maßnahmen wird das Raumvolumen durch die Anzahl der Plätze geteilt. Folgende Rückschlüsse ergeben sich aus der Größe dieses Wertes:
 - 3 bis $4 \text{ m}^3/\text{Platz}$. Bei dieser sehr dichten Besetzung belasten allein die Personen durch ihre Schallschluckwirkung die Eigenschaften eines Raumes (seine Gesamtabsorption) mit so starkem Gewicht, daß in der Regel zusätzliche poröse Schallschlucker an Wänden und Decken vermieden werden müssen.
 - 4 bis $6 \text{ m}^3/\text{Platz}$. Die Personen nehmen mit ihrer Schallschluckwirkung immer noch großen Einfluß auf die akustischen Eigenschaften eines Raumes, doch können je nach dem Verwendungszweck des Raumes zusätzlich poröse Schallschlucker erforderlich sein.
 - 6 bis $8 \text{ m}^3/\text{Platz}$. Der dominierende Einfluß, den die Personen durch ihre Schallschluckwirkung auf die akustischen Eigenschaften des Raumes nehmen, geht zurück. In der Regel sind zusätzliche poröse Schallschlucker erforderlich.

über 8 m³/Platz. Die Schallschluckwirkung der Personen verliert den dominierenden Einfluß auf die akustischen Eigenschaften des Raumes. Praktisch müssen immer zusätzliche poröse Schallschlucker angebracht werden.

In allen Fällen muß beachtet werden, daß entweder durch genügend große Flächen dünnwandiger Raumbegrenzungen oder sonst durch entsprechende Maßnahmen eine genügend starke Schallschluckwirkung im Bereich tiefer Tonlagen erzielt wird.

③ Versorgung der Zuhörer mit direktem Schall; Faustregel: Die Zuhörer werden gut mit direktem Schall versorgt, wenn sie die Vorderseite der Schallquelle gut sehen können. Maßnahmen: Entfernung zwischen Schallquelle und Zuhörern möglichst klein halten, daraus ergibt sich als Konsequenz für die Grundrißgestaltung die Regel: Das Verhältnis der Breite eines Saales zu seiner Länge sollte nicht kleiner als 2 : 3 sein. Weitere mögliche Maßnahmen: Ansteigen der Sitzreihen nach hinten; Zuhörerplätze auf Rängen und Balkonen.

④ Versorgung von Zuhörern und Vortragenden mit schallverstärkenden Reflexionen kurzer Laufzeitdifferenzen; Lage der wichtigsten Reflexionsfläche: oberhalb der Schallquelle! In vielen Fällen muß hierzu die Saaldecke herangezogen werden; damit sie diesen Zweck ausreichend erfüllen kann, soll das Verhältnis der Höhe des Saales zu seiner Länge in dem Bereich von 1 : 3 bis 1 : 2 liegen. Anzustreben ist eine diesem Zweck entsprechende besondere Formgebung der oberen Raumbegrenzung. Seitenwände möglichst tief gliedern, um diffus reflektierende Flächen zu erhalten.

⑤ Vermeidung von störenden Schallrückwürfen; diese können sich bilden, wenn das arithmetische Mittel aus den Wegen des direkten und zurückgeworfenen Schalles über 20 m hinausgeht. Beseitigung der Störwirkung: Die Reflexionsfläche, die die störenden Schallrückwürfe in den Saal lenkt, stark schallschluckend gestalten oder tief gliedern. Störende Schallrückwürfe entstehen vorwiegend an großen, nach außen gewölbten Raumbegrenzungen, in größeren Sälen durch Reflexionen über Saaldecke und Rückwand und an der Rückwand allein.

⑥ Den Nachhall des Raumes regulieren; die optimale Nachhallzeit eines Raumes hängt von seinem Verwendungszweck und seinem Raumvolumen ab. Zur Orientierung dienen die folgenden Richtwerte:

Räume für Sprachvorträge: von 0,6 s bis 1,3 s; steigend mit dem Raumvolumen von 100 bis 10 000 m³.

Räume für Musikvorträge: von 0,8 s bis 2,2 s; steigend mit dem Raumvolumen von 100 bis 20 000 m³.

Kirchenräume: von 1,0 s bis 2,7 s; steigend mit dem Raumvolumen von 500 bis 50 000 m³.

Damit sich die optimale Nachhallzeit einstellt, muß der Raum die Gesamtabsorption

$$A_0 = 0,163 \frac{V}{T} \quad \text{in m}^2$$

erhalten. In dieser Formel ist V das Raumvolumen in m³, T die optimale Nachhallzeit in s.

Die Gesamtabsorption A_0 erhält man durch Summieren der Schallschluckwirkungen (Absorptionen) aller Raumbegrenzungen:

$$A_0 = \alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \alpha_3 S_3 + \dots + \alpha'_1 n_1 + \alpha'_2 n_2 + \alpha'_3 n_3 + \dots \quad \text{in m}^2$$

α = Schluckgrad einer Fläche;

S = Größe dieser Fläche in m².

α' = Schluckgrad je Einheit in m²;

n = Anzahl dieser Einheiten.

Der Fehlbetrag zwischen der Absorptionssumme der von vornherein vorhandenen Raumbegrenzungen einschließlich aller Personen und der erforderlichen Gesamtabsorption muß durch Anbringen von Schallschluckmaterial ausgeglichen werden.

Zusätzlich erforderliche poröse Schallschlucker werden in der Regel an die Raumbegrenzungen in folgender Reihenfolge angebracht:

1. an der Rückwand;
2. unter der Decke außerhalb der Reflexionsfläche;
3. verteilt auf die Seitenwände, bei großen Orchestern als Schallquelle auch an der Stirnwand.

Schallschlucker für den Bereich tiefer Tonlagen werden möglichst auf alle großflächigen Raumbegrenzungen verteilt angeordnet.

Akustische Gestaltung von Räumen der Gruppe II

Wird die Gesamtabsorption eines Raumes A_{01} durch Anbringen von Schallschluckmaterial auf den Wert A_{02} vergrößert, so sinkt der Geräuschpegel im Raum um den Betrag:

$$\Delta L = 10 \lg \frac{A_{02}}{A_{01}} = 10 \lg \frac{T_1}{T_2} \quad \text{in dB, annähernd auch in phon.}$$

Der Geräuschpegel sinkt jedoch nicht in unmittelbarer Umgebung der Schallquelle, d. h. innerhalb des Hallradius r_H ; wobei

$$r_H = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{A_0}{\pi}} = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad \text{in m ist.}$$

Die Gesamtfläche in einem Raum, die zur Senkung des Geräuschpegels mit Schallschluckmaterial zu bedecken ist, ergibt sich aus der Absorption, die von ihr aufzubringen ist. Bei nicht zu großen Räumen erhält man für diese Absorption einen angemessenen Wert, in dem man diese der Deckenfläche gleichsetzt.

Mit dem Schluckgrad α (im Frequenzbereich von 500 Hz) des vorgesehenen Schluckmaterials beträgt die erforderliche Gesamtfläche dann:

$$S = \frac{A}{\alpha} \quad \text{in m}^2.$$

Der größte Teil des Schluckmaterials wird unter der Decke angebracht, ein Teil ist jedoch auch auf die Wände zu verteilen. Dabei sollte von zwei gegenüberliegenden Wänden wenigstens eine mit Schluckmaterial bedeckt werden. Es empfiehlt sich, das Schluckmaterial an den oberen Wandhälften anzubringen.

Ist keine ausreichende Menge an Schluckmaterial verfügbar, sollte das vorhandene Material nicht auf einer Fläche konzentriert angebracht, sondern über eine möglichst große Fläche verteilt werden. Schallschluckplatten können z. B. schachbrettartig angeordnet werden.

B. Bauakustik

Mindestforderungen und Regeln enthält das Normblatt DIN 4109 "Schallschutz im Hochbau".

Gliederung des Schallschutzes:

- ① Luftschallschutz.
- ② Trittschallschutz.
- ③ Schutz gegen Geräusche haustechnischer und technischer Anlagen.
- ④ Schutz gegen den Außenlärm.

Bei stärkeren Geräuschquellen in einem Gebäude ist Geräuschbelästigung der Nachbarn zu vermeiden (VDI 2058).

① Luftschallschutz:

a. Kennzeichnung des Luftschallschutzes

durch die Schalldämmung zwischen zwei Räumen. Meßverfahren nach DIN 52 210. Ältere Maßgröße (in Sonderfällen auch heute noch gebräuchlich): Das mittlere Schalldämm-Maß \bar{R} :

Eine Wohnungstrennwand oder -decke mit ausreichendem Luftschallschutz muß ein mittleres Schalldämm-Maß \bar{R} von etwa 50 dB erreichen.

Neuere und verbindliche Maßgröße:

Das Luftschallschutz-Maß LSM:

Eine Wohnungstrennwand oder -decke mit ausreichendem Luftschallschutz muß ein Luftschallschutz-Maß LSM von mindestens 0 dB erreichen (nach DIN 4109).

Annähernder Zusammenhang zwischen dem Luftschallschutz-Maß LSM und dem mittleren Schalldämm-Maß:

$$\text{LSM} = \bar{R} - 50 \text{ dB.}$$

b. Wände mit ausreichendem Luftschallschutz

I. Einschalige Wände

mit einem Flächengewicht über 400 kg/m². (In Sonderfällen 350 kg/m², dann müssen die flankierenden Wände ein Flächengewicht von 250 kg/m² und mehr aufweisen)

II. Zweischalige Wände

a) Wände aus zwei biegeweichen Schalen auf geteiltem Ständerwerk.

Biegeweiche Schalen sind z. B.:

1,5 cm Putz auf HWL-Platten oder Schilfrohrplatten; Schalenabstand \geq 10 cm.

1,0 cm bis 1,8 cm Gipskartonplatten (bei diesen im Hohlraum Mineralwolleplatten); Schalenabstand \geq 15 cm.

b) Wände aus einer biegesteifen Schale mit biegeweicher Vorsatzschale.

Zweischalige Leichtbauwände ergeben nur dann einen ausreichenden Luftschallschutz, wenn eine unzulässig große Schallübertragung über die Schallnebenwege verhindert wird. Aus diesem Grunde dürfen diese Wände z. B. nicht auf einen schwimmenden Estrich gestellt werden, sondern müssen unmittelbar auf der Rohdecke stehen.

HWL-Platten, die unmittelbar an eine Wand oder unter einer Decke befestigt (angeputzt) und dann an der Oberseite verputzt werden, verschlechtern in jedem Fall den Schallschutz!

c) Wände aus zwei biegesteifen Schalen nur bei durchgehender Trennfuge, z.B. als Hautrennwände bei Reihenhäusern.

② Trittschallschutz

a. Kennzeichnung des Trittschallschutzes
durch die von einem Norm-Trittschall-Hammerwerk (DIN 52 210) erzeugten und übertragenen Geräusche.

Verbindliche Maßgröße:

Das Trittschallschutz-Maß TSM:

Eine Wohnungstrenndecke mit ausreichendem Trittschallschutz muß ein TSM von wenigstens 0 dB erreichen (2 Jahre nach Fertigstellung, unmittelbar nach Fertigstellung + 3 dB) (nach DIN 4109).

b. Herstellung von Decken mit ausreichendem Trittschallschutz

I. Durch schwimmenden Estrich, dieser kann auch den Luftschallschutz verbessern.

II. Durch weichfedernde Gehbeläge.

Decken mit ausreichendem Luft- und Trittschallschutz:

Erforderliche Maßnahmen hängen von der Zugehörigkeit einer Decke zur Deckengruppe I oder II ab.

Deckengruppe I: Rohdecken ohne ausreichenden Luftschall- und Trittschallschutz; hierunter fallen alle Vollbeton- und Hohlkörperdecken mit Flächengewichten unter 350 kg/m^2 (d.h. auch bei Vollbetondecken unter 14 cm Dicke).

Maßnahmen: Schwimmender Estrich mit genügend weichfedernder Dämmschicht der Dämmstoffgruppe I.

Deckengruppe II: Rohdecken mit ausreichendem Luftschallschutz, nur Trittschallschutz nicht ausreichend. Hierunter fallen Vollbetondecken mit Flächengewichten über 350 kg/m^2 (d.h. über 14 cm Dicke), außerdem Rippenbeton- und Betonbalkendecken mit einer abgehängten Decke als biegeweiße Vorsatzschale. Erhalten Decken der Deckengruppe I eine solche Unterdecke, wechseln sie in die Deckengruppe II über.

Maßnahmen: Schwimmender Estrich mit Dämmschicht der Dämmstoffgruppe II (besser jedoch Dämmstoffgruppe I) oder weichfedernde Gehbeläge, deren Eignung für diesen Zweck nachgewiesen sein muß.

③ Schutz gegen Geräusche haustechnischer und technischer Einrichtungen.

Mindestforderung nach DIN 4109:

Die von diesen Einrichtungen erzeugten Geräusche dürfen in fremden Wohn- und Arbeitsräumen eine Lautstärke von 30 DIN-phon - tagsüber 40 DIN-phon - nicht überschreiten.

Maßnahmen: Geräte, Armaturen, Maschinen und Rohrleitungen dürfen nur über weichfedernde Zwischenschichten mit den Bauteilen verbunden werden.

④ Schutz gegen Außenlärm

Bisher keine Mindestforderungen.

Auf Schutzmaßnahmen wird in der Norm DIN 4109 jedoch bei Wohn-, Arbeits- und Krankenzimmern bei starkem Außenlärm (z.B. an Straßen mit hoher Verkehrsdichte) ausdrücklich hingewiesen.

Maßnahmen: Dichtschließende Doppelfenster mit genügend großem Scheibenabstand (ca. 10 cm). Gleiche Maßnahmen auch bei möglicher Störung der Nachbarschaft durch Innenlärm.

Grenzen Gewerbebetriebe mit stärkerer Geräuschentwicklung an Wohn- und Arbeitsräume, so werden höhere Anforderungen an den Schallschutz gestellt ($\text{LSM} \geq +10 \text{ dB}$; $\text{TSM} \geq +20 \text{ dB}$). Zur Erfüllung dieser Forderungen sind besondere Maßnahmen erforderlich.

Sachverzeichnis

- Abdeckungen 113, 114, 121, 126
abgehängte Decke 112, 121, 213
Absorption 22, 104, 108
Absorptionsgrad, siehe Schall-
schluckgrad
Akustik 11
Akustikplatten 113, 114, 120
Amphitheater 24
Arbeitsraum 227, 228, 229
Auditorium, siehe Hörsaal
Aula 14, 130, 134 - 141
Ausbreitungsgeschwindigkeit,
siehe Schallgeschwindigkeit
Ausfallswinkel 44
Außenlärm 157, 227, 239

Badeeinrichtungen 218
Bauakustik 12
Bau-Schalldämm-Maß 162
Bayreuther Festspielhaus 99
Betondecken 201, 211, 212
Bergersches Gesetz 166
Beugung 17, 57, 58
biegesteife Schalen 178
biegeweiche Schalen 178
Biegewellen 174
Brevunda-System 179
Bühne 112
Bürraum 14, 149

Dämmschicht 203 - 209
Dämmstoffgruppen I und II 206
Decken 210, 211, 212
Deckenauflagen 201

Deckengruppen I und II 210, 238
Deckenhöhe 66
Deckenreflexion 64
Deutlichkeit 20
dezi-Bel, dB 17
diffuse Reflexionen 59
Diffusität 59
diffus reflektierende Oberflächen
61, 76
DIN 4109 157, 168, 171, 184,
185, 187, 189, 194, 200, 205,
211, 212, 213, 216, 217, 218,
228
DIN 5045 218
DIN 18164 207
DIN 18165 207
DIN 52210 158, 196
direkter Schall = Direktschall
19
direkter Übertragungsweg 156
Doppelfenster 193
Dritteloktave 159

ebene Flächen 43
Echo 37
Einfallswinkel 44
Einfamilienreihenhaus 189, 228
Eingangshalle 14, 150
einschalige Wände 166, 169
Entlüftungsschächte 222
Estrich 203, 205, 207

Fahrstühle 219

Farel-Saal 28, 30
 Fenster 112, 190, 192
 Flankenübertragung 156
 Flatterecho 69, 70
 Flächengewicht 123
 Frequenz 16, 55

 Gaststätte 14, 225, 228
 Gästeräume 14
 Gehbeläge 202
 gekrümmte Raumbegrenzungen
 48 - 55
 Gemeindesaal 14, 28, 29, 130
 Gesamtabsorption 105, 109, 147,
 235
 Gestühl 22
 Gewerbebetriebe 225
 Gipskartonplatten 185, 187
 Glasbausteine 193
 Grenzfrequenz 175, 176
 Großer Sendesaal des Funkhau-
 ses Hannover 62
 Großraumbüro 150

 Hallenbad 14
 Hallradius 143, 144, 236
 haustechnische Einrichtungen
 218, 239
 Helmholtzresonator 123, 124
 Hörsaal 14, 31, 32, 129
 Hotel 228, 231
 Holz 127
 Holzbalkendecken 215 - 217
 Holzgestühl 115, 117
 Holzspanplatten 179
 Holzwolle-Leichtbauplatten 114,
 184, 186, 187
 Hz, Hertz 16

 Indirekter Übertragungsweg 156
 Intensität 16
 Intensitätsunterschied 39

 Kaffee 149
 Kammerton 16
 Kanzel 34
 Kinosaal 129
 Kirche 14, 34, 102, 103, 132
 Klassenräume 14, 129
 Koinzidenz 174
 Konzertsaal 14, 132, 231
 Körperschall-Leitung 156
 Korridor 14, 149, 150
 Krankenzimmer 228, 229
 Krümmungsmittelpunkt 49
 Krümmungsradius 49, 50

 Laboratoriumsraum 14
 Laufzeitdifferenz 37, 40, 44,
 45
 Lautstärkeindruck 16, 20
 Lautstärkeerhöhung 42
 Lautstärkeminderung 145
 Leichtbauwände 180, 182
 Lichtspieltheater 14, 225
 Lochplatten 121
 Luftschall 155
 Luftschalldämm-Maß 158, 161
 Luftschallschutz 157, 237
 Luftschallschutz-Maß LSM 158
 Lüftungsschächte 222

 Mailänder Skala 25, 26, 27
 Maschinensaal 14
 Massenträgheit 121
 Mechanische Werkstätten 14
 Milli-Sekunde 39
 Mindestforderungen 228 - 232
 mitschwingende Platten 121,
 122
 Mittenfrequenz 92, 159
 mittleres Schalldämm-Maß 163
 Montagehalle 148

Nachhall 19, 41, 90, 234
 Nachhalldauer 91
 Nachhallgrade 90, 91
 Nachhallzeit
 a) Definition 91
 b) optimale Werte 94, 96,
 98, 102, 103, 234
 c) Regulierung 17, 137, 235
 Nebenwege 156
 Norm-Schalldämmungsdifferenz 161
 Norm-Tritt-Lautstärke 196
 Norm-Trittschallpegel 197
 nützliche Schallrückwürfe 40

 Ohmsches Gesetz der Akustik
 16
 Oktave 92
 Ölheizungen 219
 Opernhäuser 14, 131
 Opernhaus Köln 27, 28, 29
 Orchester 65

 Parabolspiegel 53
 Parkettboden 112
 Pegelschreiber, siehe Schallpe-
 gelschreiber
 phon 17
 Physik-Hörsaal der TH Braun-
 schweig 31, 32
 Podium 34
 Polsterstühle 115, 117
 poröse Schallschlucker 118,
 121

 Ränge 25, 27
 Raumakustik 12
 Raumgeräusche 142
 Raumbegrenzung 17
 Raumvolumen 109, 127
 Rauschen 91, 159
 Reflektoren 73, 74

 Reflexionen an ebenen Flächen
 43
 Reflexionen an gekrümmten
 Raumbegrenzungen 48
 Reflexionsgesetz 17, 43, 44
 Reibung 118
 Resonanzfrequenz 122, 123,
 125, 183, 186, 204, 205
 Restaurant 14, 149
 Richtcharakteristik 34
 Richtungseindruck 20
 Rohrleitungen 220, 221
 Royal Festival Hall 77, 78
 Rückwand 67

 Sabinesche Formel 105, 109,
 235
 Sabinesche Nachhallzeit 91
 Sandschüttung 216, 217
 Schallbrücken 208
 Schalldämm-Maß 158 ff
 Schalldiffusität 59
 Schallenergie 16
 Schallgeschwindigkeit 16
 Schallintensität 13
 Schallkonzentration 49, 53
 Schalllängsleitung 156
 Schallnebenwege 156
 Schallpegel 16
 Schallpegel-Differenz 22, 39,
 40, 45, 160
 Schallpegel-Minderung 145
 Schallpegelschreiber 90
 Schallrückwürfe 17, 36
 Schallschluckergrade 84, 112,
 113, 114, 115, 117
 Schallschlucker 118
 Schallstrahl = Schallwellenstrahl
 schalltoter Raum 38
 Schallwellen 15
 Schallwellenlänge 16, 55

- Schallwellenstrahl 18
 Schallquelle 20, 21, 23
 Schauspieltheater 14, 130
 Schlitzresonator 124
 Schluckgrad, siehe Schallschluck-
 grad
 Schreibmaschinensaal 14
 schwimmender Estrich 203
 Seitenwände 69, 70
 Sendesaal, Funkhaus Hannover
 62
 Silbenverständlichkeit 95
 Sitzreihenanstieg 33, 34
 Sitzreihentiefe 33
 Sitzverteilung 23 - 35
 Spiegelbildquelle 43, 44
 Sporthalle 150
 Sprachverständlichkeit 96
 Sprecher 23, 65
 Sprechzimmer 230
 Spuranpassung 174
 Steifigkeit 204, 206, 207
 Stirnwand 68
 störende Schallrückwürfe 40,
 78
 Strahlenschnittpunkt 50, 51, 52
 Strömungswiderstand 118, 119

 Teatro olimpico 24, 25
 Teiltöne 16
 technische Einrichtungen 218,
 239
 Teppich 112, 202
 Theater 14, 131, 231
 Tiefenschlucker 121 - 126
 Toiletteneinrichtungen 218, 221
 Treppenhaus 14, 150, 228
 Trittschallhammerwerk 196
 Trittschallschutz 157, 196, 238

 Trittschallschutz-Maß TSM 195
 Türen 112, 190
 Turnhallen 14

 Übernachtungsräume 229, 230
 Unterdecken 112, 121, 213
 Unterrichtsräume 129, 228,
 229

 VDI 2058 231
 Verbesserungsmaß VM 195,
 200, 205
 Vergleichshammerwerk 199
 Verkaufsraum 14
 Verständlichkeit 20
 Vorhänge 112
 Vortragssaal 14, 129

 Wandelastizität 172
 Wannenbecken 219, 220
 Wascheinrichtungen 218
 Wellenlänge 16, 55, 60
 Wellenlängenbereich 16
 Wohnungstrenndecke 165, 199,
 228
 Wohnungstrennwände 165, 169,
 223, 228

 Zuhörer 22, 23, 115, 117
 Zuhörerabsorption 22, 31
 Zuhörerplätze 23
 zweischalige Wände
 a) aus 2 biegeweichen Scha-
 len 182
 b) aus einer biegesteifen
 Schale mit biegeweicher Vor-
 satzschale 185
 c) aus 2 biegesteifen Schalen
 188
 Zylinderfläche 49