



Lärmschutz-Arbeitsblatt IFA-LSA 01-234

Raumakustik in industriellen Arbeitsräumen

Anforderungen, Grundlagen, Messverfahren, Maßnahmen,
Lärminderungserfolge

April 2020

Impressum

Herausgeber:
Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)

Glinkastraße 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
Fax: 030 13001-9876
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de

Ansprechpartner:
Dr. Florian Schelle

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)
Fachbereich Arbeitsgestaltung – Physikalische Einwirkungen
Alte Heerstr. 111
53757 Sankt Augustin

2. aktualisierte Ausgabe: April 2020

Lärmschutz-Arbeitsblatt IFA-LSA 01-234 zu beziehen bei Ihrem zuständigen Unfallversicherungsträger
oder unter www.dguv.de/publikationen

Raumakustik in industriellen Arbeitsräumen

Anforderungen, Grundlagen, Messverfahren,
Maßnahmen, Lärminderungserfolge

Inhaltsverzeichnis

	Seite		Seite		
1	Einleitung	5	6	Beispiele von raumakustisch günstig gestalteten Arbeitsräumen	28
2	Anforderungen an die Raumakustik in industriellen Arbeitsräumen	6	6.1	Werkstatt mit selbstverklebtem Akustikschaumstoff	28
3	Grundlagen zur Schallabsorption und deren Einfluss auf den Schalldruckpegel	7	6.2	Kulissensystem für eine Sheddachhalle	29
3.1	Schallabsorption	7	6.3	Raumakustische Maßnahmen in Verbindung mit Abschirmungen	30
3.2	Schallpegelabnahme mit zunehmendem Abstand von einer Schallquelle	7	6.4	Lehrwerkstatt mit Motorenprüfstand	31
3.3	Nachhallzeit und mittlerer Schallabsorptionsgrad	8	7	Zusammenfassung	33
3.4	Einfluss der Raumgröße auf die akustischen Eigenschaften	9		Literatur	34
4	Messverfahren zur Ermittlung von raumakustischen Kennwerten	11			
4.1	Ermittlung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$	11			
4.1.1	Berechnung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ aus absorbierenden Teilflächen	11			
4.1.2	Ermittlung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ mit Hilfe der Nachhallzeit	12			
4.2	Ermittlung der Schallpegelabnahme pro Abstands- verdopplung $DL_{2,TRLV}$	14			
4.2.1	Anordnung von Messpfad und Testschallquelle	14			
4.2.2	Durchführung der Schallausbreitungsmessungen	16			
4.2.3	Berechnung der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$	17			
5	Gestaltung und Planung von raumakustischen Maßnahmen	19			
5.1	Schallabsorptionsmaterialien	19			
5.2	Gestaltung von raumakustischen Maßnahmen	22			
5.2.1	Allgemeines	22			
5.2.2	Deckengestaltung	22			
5.2.3	Wandgestaltung	24			
5.3	Planung der Maßnahmen	25			
5.3.1	Allgemeine Hinweise für die Planung	25			
5.3.2	Vorgehen bei Auslegung nach dem mittleren Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$	26			
5.3.3	Vorgehen bei Auslegung nach der Schallpegel- abnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$	27			

1 Einleitung

Der Schalldruckpegel an Arbeitsplätzen innerhalb von Räumen wird nicht alleine durch den direkt von Geräten und Maschinen abgestrahlten Schall bestimmt, sondern auch durch den Schall, der von den Raumbegrenzungsflächen und der Einrichtung reflektiert wird. Dabei ist der Raumeinfluss in der Nähe der schallreflektierenden Flächen besonders hoch und hängt von deren Schallabsorptionsvermögen ab. Weiterhin nimmt der Raumeinfluss mit der Entfernung von den dominierenden Geräuschquellen zu. Zur Verbesserung der Raumakustik lassen sich die Decken- und/oder Wandflächen schallabsorbierend gestalten. Je nach Ausgangssituation sind damit in der Nähe der Lärmquellen Pegelminderungen zwischen ca. 1 dB(A) und 6 dB(A) zu erreichen, in größeren Abständen vielfach Pegelminderungen von mehr als 10 dB(A).

Eine schallabsorbierende Gestaltung von lärmbelasteten Arbeitsräumen ist in vielen Betrieben sinnvoll. Insbesondere bei der Planung neuer Arbeitsräume oder bei größeren Umbaumaßnahmen sollte die Raumakustik berücksichtigt werden, denn die geplante Integration dieser Maßnahmen ist in jedem Fall kostengünstiger als eine notwendige schallabsorbierende Nachrüstung. Aber auch in bestehenden, ungünstig gestalteten Arbeitsräumen ist vielfach eine raumakustische Nachbesserung zu empfehlen, ggf. auch als flankierende Maßnahme in Verbindung mit anderen Lärminderungsmaßnahmen.

Dieses Lärmschutz-Arbeitsblatt behandelt die Raumakustik in industriellen Arbeitsräumen unter Bezug auf die Anforderungen der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [1]. Nach der Vorstellung der zu beachtenden rechtlichen Vorgaben im Abschnitt 2 werden im Abschnitt 3 die für das Verständnis der folgenden Kapitel notwendigen akustischen Grundlagen und Begrifflichkeiten erläutert. Im Abschnitt 4 werden die Messverfahren zur Analyse der bestehenden raumakustischen Verhältnisse der industriellen Arbeitsräume beschrieben. Abschnitt 5 behandelt dann die verschiedenen Möglichkeiten der Gestaltung raumakustischer Maßnahmen und die dabei einzusetzenden schallabsorbierenden Materialien. Schließlich werden im Abschnitt 6 Beispiele raumakustisch gestalteter Arbeitsräume und die damit erreichten Lärminderungerfolge vorgestellt.

Hinweis: Informationen zu raumakustischen Maßnahmen für Büros finden sich z. B. in der DGUV Information 215-443 „Akustik im Büro“ [2], sowie dem Sicherheitstechnischen Informations- und Arbeitsblatt 230 228 „Akustische Raumgestaltung von Call Centern“ im IFA-Handbuch [3].

2 Anforderungen an die Raumakustik in industriellen Arbeitsräumen

Nach der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (LärmVibrationsArbSchV) [1] muss der Arbeitgeber Schutzmaßnahmen nach dem Stand der Technik festlegen, falls Mitarbeiter gehörgefährdendem Lärm ausgesetzt sind oder sein könnten. Nach § 3 der LärmVibrationsArbSchV ist der Arbeitgeber verpflichtet, eine entsprechende Gefährdungsbeurteilung zu erstellen und bei Bedarf Schutzmaßnahmen zu treffen, um die Gefährdung der Beschäftigten auszuschließen oder so weit wie möglich zu verringern. Dabei haben technische Maßnahmen Vorrang vor organisatorischen Schutzmaßnahmen und diese wiederum vor individuellen Schutzmaßnahmen (persönlicher Gehörschutz). Der Stand der Technik und das Vorgehen bei der Festlegung von Lärminderungsmaßnahmen werden im Teil 3 der Technischen Regeln zur LärmVibrationsArbSchV (TRLV Lärm) [4] konkretisiert.

Danach sollten die Lärminderungsmaßnahmen möglichst am Entstehungsort ansetzen, da diese Maßnahmen in der Regel den größten Erfolg versprechen. Ist dies nicht möglich oder nicht ausreichend, ist eine lärmindernde Gestaltung und Einrichtung der Arbeitsstätten und Arbeitsplätze vorzunehmen. Das bedeutet, die Arbeitsräume sind so zu gestalten, dass die Schallausbreitungsbedingungen dem Stand der Technik entsprechen. Die TRLV Lärm, Teil 3 macht dazu in Abschnitt 4.3 konkrete Vorgaben. Demnach kann der Stand der Technik für Arbeitsräume als eingehalten gelten, falls

A) Die **Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung** DL_2 im Abstandsbereich von 0,75 m bis 6 m in den Oktavbändern mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz bis 4000 Hz **mindestens 4 dB** beträgt,

oder

B) Der **mittlere Schallabsorptionsgrad** $\bar{\alpha}$ in allen Oktavbändern mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz bis 4000 Hz jeweils **mindestens 0,3** beträgt.

Die entsprechenden raumakustischen Kennwerte **Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung und mittlerer Schallabsorptionsgrad** werden in den Abschnitten 3.2 und 3.3 dieses Lärmschutz-Arbeitsblattes erläutert.

Je nach räumlichen Bedingungen kann es sinnvoll sein, das eine oder das andere Kriterium heranzuziehen. In kleineren Räumen (bis ca. 1000 m³ Volumen) lässt sich oft nur die Forderung an den mittleren Schallabsorptionsgrad ($\bar{\alpha} \geq 0,3$) realisieren. Die Anforderung an die Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung im Abstandsbereich von 0,75 bis 6 m – im Folgenden $DL_{2,TRLV}$ genannt – lässt sich in kleineren Räumen gegebenenfalls schon allein deshalb nicht realisieren, weil die Räume keine ausreichende Länge zur Festlegung geeigneter Messpfade aufweisen.

In großen Räumen ist hingegen die Realisierung der Vorgabe $\bar{\alpha} \geq 0,3$ mit verhältnismäßig hohem Aufwand verbunden, weil dafür große Flächen mit Schallabsorptionsmaterial belegt werden müssen. Andererseits lässt sich dort die Anforderung an die Schallpegelabnahme $DL_{2,TRLV} \geq 4$ dB aufgrund der größeren Abstände zu den reflektierenden Begrenzungsflächen in der Regel viel einfacher und mit verhältnismäßig geringem Materialeinsatz erreichen. Da große Räume ggf. die Messung auf mehreren Messpfaden erfordern (siehe Abschnitt 4.2.1), muss die Einhaltung der oben genannten Anforderungen für jeden Messpfad geprüft werden. Zusätzlich sollte der Raum für jeden Messpfad und in jedem Oktavband von 500 Hz bis 4000 Hz eine Schallpegelabnahme $DL_{2,TRLV} \geq 4$ dB aufweisen.

3 Grundlagen zur Schallabsorption und deren Einfluss auf den Schalldruckpegel

3.1 Schallabsorption

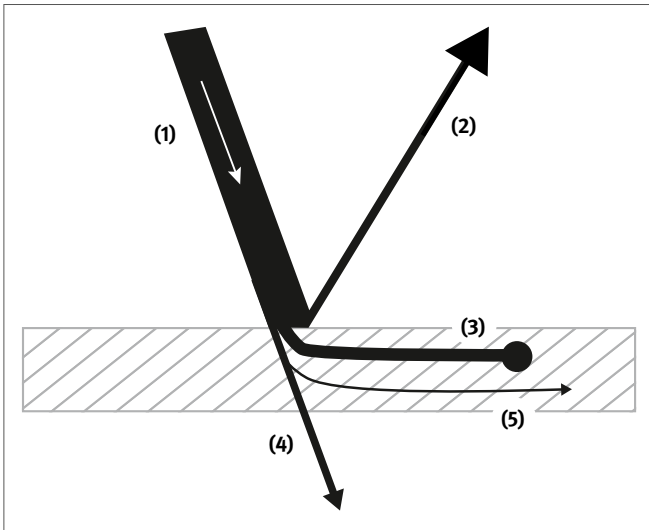


Abb. 3.1 Aufspalten der Schallenergie beim Auftreffen auf eine Begrenzungsfläche (schraffiert):
 (1) Auftreffende Schallenergie,
 (2) Reflektierter Schall,
 (3) Absorbierter Schall,
 (4) Transmittierter Schall,
 (5) Fortgeleiteter Körperschall.

Innerhalb von Räumen wird die Ausbreitung des Luftschalls (1) und damit der Abfluss der Schallenergie durch die Raumbegrenzungsflächen sowie durch Maschinen und andere Einrichtungsgegenstände behindert. Abbildung 3.1 zeigt, wie sich die gesamte Schallenergie (1) an einer Begrenzungsfläche aufspaltet. Dabei wird der Luftschall teilweise reflektiert (2), absorbiert (3), transmittiert (4) und als Körperschall fortgeleitet (5). Durch Körperschallfortleitung kann an anderer Stelle wiederum Luftschall emittiert werden. Der absorbierte Anteil (3) wird im Material in Wärme umgewandelt.

Das Verhältnis von absorbierter Schallenergie (3) zu auftreffender Schallenergie (1) wird als Schallabsorptionsgrad α bezeichnet:

$$\text{Schallabsorptionsgrad } \alpha = \frac{\text{absorbierte Schallenergie}}{\text{auftreffende Schallenergie}} \quad (3.1)$$

So bedeutet z. B. $\alpha = 0,5$, dass 50 % der Schallenergie absorbiert werden. Bei $\alpha = 1,0$ wird die auftreffende Schallenergie vollständig absorbiert. Schallabsorptionsgrade von mehr als 1 ($\alpha > 1,0$) sind nach der Definition nicht möglich, weil nicht mehr Schallenergie absorbiert werden kann, als überhaupt auf das Material auftrifft. Bei strikter Anwendung der Messnormen zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades können sich jedoch rein rechnerisch auch etwas größere Schallabsorptionsgrade ergeben, z. B. aufgrund systematischer Messfehler. In entsprechenden Prüfprotokollen sind deshalb ggf. auch Schallabsorptionsgrade von mehr als 1 ausgewiesen.

3.2 Schallpegelabnahme mit zunehmendem Abstand von einer Schallquelle

Abbildung 3.2 zeigt den Schalldruckpegelverlauf in Abhängigkeit vom Abstand r zu einer Punktschallquelle für verschiedene Umgebungsbedingungen. Die gepunktete schwarze Linie beschreibt dabei die Schallausbreitung unter Freifeldbedingungen. In einem Freifeld besteht eine ungehinderte Schallausbreitung, d. h. es gibt keine reflektierenden Hindernisse. Der Schalldruckpegel nimmt dabei um 6 dB pro Abstandsverdopplung ab ($DL_2 = 6 \text{ dB}$). Die durchgängige schwarze Linie zeigt den abstandsabhängigen Pegelverlauf für einen halligen Raum mit besonders stark schallreflektierenden Wänden. Dort fällt der Pegel nahe an der Schallquelle (im Direktschallfeld) genauso wie im Freifeld ab und geht dann mit zunehmender Entfernung in ein Diffusfeld mit nahezu abstandsunabhängigem Pegel über. Ein derartiges nahezu ideales Diffusfeld ist jedoch in der Regel nur in speziell zu Messzwecken gebauten Hallräumen vorzufinden. In industriellen Arbeitsräumen ergibt sich schon allein aufgrund größerer Abmessungen und der damit verbundenen Luftabsorption sowie der Absorption an der Einrichtung (Streukörper) mit zunehmendem Abstand jeweils eine weitere Pegelabnahme, wie es die rote gestrichelte Kurve in Abbildung 3.2 zeigt.

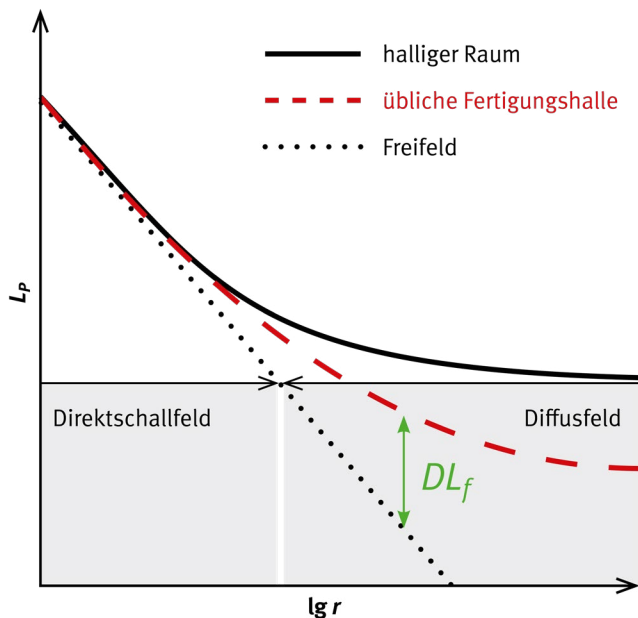


Abb. 3.2 Schalldruckpegel L_p in Abhängigkeit vom Logarithmus des Abstands r zur Schallquelle:

- a) für ein Freifeld (gepunktete schwarze Linie),
- b) für einen stark halligen Raum (schwarze Linie),
- c) für eine übliche Fertigungshalle (gestrichelte rote Linie).

DL_f : Schallpegelüberhöhung für die übliche Fertigungshalle exemplarisch für einen willkürlichen Abstand r (grüner Doppelpfeil).

Aus dem Verlauf solcher Schallausbreitungskurven lassen sich zwei Parameter zur Beurteilung der akustischen Qualität von Arbeitsräumen bestimmen: Die bereits erwähnte Schallpegelabnahme je Abstandsverdopplung DL_2 sowie die Schallpegelüberhöhung DL_f .

Die Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung DL_2 wird dabei jeweils über einen größeren Abstandsbe- reich gemittelt, so z. B. im Bereich zwischen 0,75 m und 6 m für die Ermittlung von $DL_{2,TRLV}$ nach TRLV Lärm. Für Räume ohne nennenswerte Schallabsorption an den Raumbegrenzungsflächen liegt $DL_{2,TRLV}$ meist zwischen 2 und 3 dB(A). Bei geeigneter schallabsorbierender Gestaltung hingegen werden bei mittleren Raumvolumina Werte von $DL_{2,TRLV}$ zwischen 4 und 4,5 dB(A) erreicht.

Die Schallpegelüberhöhung DL_f gibt in einem bestimmten Abstand von einer Punktschallquelle den Pegelunterschied im Vergleich zum Freifeld an. Im Diagramm in Abbildung 3.2 ist DL_f für die Fertigungshalle exemplarisch bei einem willkürlichen Abstand r als grüner Doppelpfeil eingezeichnet. Es lässt sich erkennen,

dass DL_f (d. h. der Einfluss der Raumakustik) mit zunehmendem Abstand r zu den Lärmquellen größer wird. DL_f ist zwar kein Kriterium zur Beurteilung der Raumakustik nach TRLV Lärm, beschreibt aber eine obere Grenze für die mögliche Pegelminderung durch raumakustische Maßnahmen am betrachteten Ort, falls der Schalldruckpegel von nur einer Lärmquelle bestimmt wird.

3.3 Nachhallzeit und mittlerer Schallabsorptionsgrad

Wie bereits erläutert ergeben sich bei Aufstellung einer Schallquelle innerhalb von geschlossenen Räumen aufgrund von Schallreflexionen höhere Pegel als unter Freifeldbedingungen. Ohne die Schallabsorption an den Begrenzungsflächen und die Transmission des Schalls ins Freie würde der Schalldruckpegel bei ständig emittierender Schallquelle unbegrenzt anwachsen. Wird die Schallquelle in dem Raum nun plötzlich abgeschaltet, so fällt der Schalldruckpegel durch Absorption kontinuierlich ab, wobei die Geschwindigkeit des Pegelabfalls vom mittleren Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ abhängt. Als Kennwert zur Beschreibung der Geschwindigkeit des Schallpegelabfalls wurde die Nachhallzeit T festgelegt, in der der Schalldruckpegel um 60 dB abfällt. Für ein diffuses Schallfeld besteht zwischen der Nachhallzeit, dem Raumvolumen V und der äquivalenten Absorptionsfläche A des Raumes der durch folgende Zahlenwertgleichung beschriebene Zusammenhang¹⁾:

$$T = 0,163 \cdot \frac{V}{A} \tag{3.2}$$

dabei ist:

- T die Nachhallzeit in s;
- V das gesamte Raumvolumen in m^3 ;
- A die äquivalente Absorptionsfläche in m^2 .

Die äquivalente Absorptionsfläche ist dabei ein Maß für das gesamte Absorptionsvermögen des Raumes und lässt sich aus den Absorptionsgraden α_i der i verschiedenen Teiloberflächen S_i bestimmen:

$$A = \sum_i \alpha_i \cdot S_i \tag{3.3}$$

1 Diese von W. C. Sabine empirisch gefundene Formel wurde später mit Hilfe der statistischen Theorie berechnet. Diese liefert den Zusammenhang $T = \frac{4 \ln(10^6) V}{c A}$, wobei $c = 343 \text{ m/s}$ die Schallgeschwindigkeit in Luft unter Normalbedingungen ist.

Das Verhältnis der äquivalenten Absorptionsfläche zur gesamten Raumbofläche S ergibt den mittleren Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ des Raumes:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S} \quad (3.4)$$

Die gesamte Raumbofläche S entspricht dabei der Summe aller Teiloberflächen S_i :

$$S = \sum_i S_i \quad (3.5)$$

3.4 Einfluss der Raumgröße auf die akustischen Eigenschaften

Wie bereits in Abschnitt 2 erläutert bietet sich der mittlere Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ vor allem zur Auslegung und Beurteilung kleinerer Hallen ($V \leq 1000 \text{ m}^3$) an, während sich die Verwendung der mittleren Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ für große Hallen ($V \geq 10000 \text{ m}^3$) empfiehlt. So lässt sich die Anforderung $DL_{2,TRLV} \geq 4 \text{ dB}$ in großen Hallen leichter realisieren, weil der mittlere Abstand zu allen Raumbegrenzungsflächen mit der Hallengröße zunimmt und man sich immer mehr den Freifeldbedingungen annähert.

Um die Zusammenhänge zwischen dem mittleren Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ sowie der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ und der Raumgröße zu veranschaulichen, wurden am Beispiel von drei unterschiedlich großen Hallen die entsprechenden raumakustischen Eigenschaften berechnet. Die Berechnungsgrundlage hierfür ist die VDI-Richtlinie 3760 [5]. Dabei wurden die Messpfade für die Schallausbreitungskurven jeweils parallel zur längsten Wand angelegt und eine Streukörperdichte von $q = 0,04 \text{ m}^{-1}$ angenommen (mittlere Belegungsdichte der Hallen).

Die Tabellen 3.1 und 3.2 zeigen die Ergebnisse für Hallen in den Dimensionen Länge · Breite · Höhe von $18 \cdot 10 \cdot 5 \text{ m}^3$, $45 \cdot 20 \cdot 8 \text{ m}^3$ sowie $100 \cdot 40 \cdot 10 \text{ m}^3$. Die Ergebnisse nach Tabelle 3.1 basieren auf einem angenommenen mittleren Schallabsorptionsgrad der Raumbegrenzungsflächen von $\bar{\alpha} = 0,1$, die Ergebnisse der Tabelle 3.2 auf einem angenommenen mittleren Schallabsorptionsgrad von $\bar{\alpha} = 0,3$. Beide Tabellen enthalten neben den angenommenen mittleren Absorptionsgraden $\bar{\alpha}$ und den Schallpegelabnahmen je Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ auch die Werte für die gesamten Raumbegrenzungsflächen S , die Raumvolumina V , die Nachhallzeiten T und die äquivalenten

Absorptionsflächen A . Wie diese Beispiele zeigen, ergeben sich mit zunehmender Hallengröße auch jeweils größere Schallpegelabnahmen je Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$.

Die größte Halle erfüllt danach die Anforderung der TRLV Lärm bezüglich Schallpegelabnahme ($DL_{2,TRLV} \geq 4 \text{ dB}$) bereits bei einem mittleren Absorptionsgrad von nur $\bar{\alpha} = 0,1$.

Abmessungen	S [m ²]	V [m ³]	T [s]	A [m ²]	$\bar{\alpha}$	$DL_{2,TRLV}$ [dB]
$18 \cdot 10 \cdot 5 \text{ m}^3$	640	900	2,3	64	0,1	1,6
$45 \cdot 20 \cdot 8 \text{ m}^3$	2840	7200	4,1	284	0,1	3,0
$100 \cdot 40 \cdot 10 \text{ m}^3$	10800	40000	6,0	1080	0,1	4,0

Tab. 3.1 Nachhallzeiten T und Schallpegelabnahmen pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ für drei unterschiedlich große Hallen mit einem mittleren Absorptionsgrad von $\bar{\alpha} = 0,1$.

Abmessungen	S [m ²]	V [m ³]	T [s]	A [m ²]	$\bar{\alpha}$	$DL_{2,TRLV}$ [dB]
$18 \cdot 10 \cdot 5 \text{ m}^3$	640	900	0,8	192	0,3	2,8
$45 \cdot 20 \cdot 8 \text{ m}^3$	2840	7200	1,4	852	0,3	4,0
$100 \cdot 40 \cdot 10 \text{ m}^3$	10800	40000	2,0	3240	0,3	4,6

Tab. 3.2 Nachhallzeiten T und Schallpegelabnahmen pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ für drei unterschiedlich große Hallen mit einem mittleren Absorptionsgrad von $\bar{\alpha} = 0,3$.

Die resultierenden Änderungen in der Nachhallzeit T und der äquivalenten Absorptionsfläche A ggü. Tab. 3.1 sind zu beachten.

Aus der Tabelle 3.2 lässt sich ablesen, dass zur Realisierung der TRLV-Vorgaben bezüglich des Schallabsorptionsgrads ($\bar{\alpha} = 0,3$) in der großen Halle eine Absorptionsfläche von mehr als 2000 m^2 nachgerüstet werden müsste, um letztlich eine leichte Verbesserung der Schallpegelabnahme je Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ auf $4,6 \text{ dB}$ zu erreichen. Deshalb ist es naheliegend, sich bei der Auslegung von großen Hallen nicht am mittleren Absorptionsgrad ($\bar{\alpha} \geq 0,3$), sondern an der Schallpegelabnahme je Abstandsverdopplung ($DL_{2,TRLV} \geq 4 \text{ dB}$) zu orientieren.

Anders sieht es für die kleinste Halle aus. Hier liegt der Nachrüstbedarf an Absorbentien zur Erfüllung der

TRLV-Vorgabe von $\bar{\alpha} \geq 0,3$ bei einer äquivalenten Absorptionsfläche von nur $A = 128 \text{ m}^2$. Durch diese raumakustische Maßnahme erhöht sich die Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,\text{TRLV}}$ um 1,2 dB, was eine deutliche Pegelreduzierung erwarten lässt. Allerdings liegt der Absolutwert der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung mit $DL_{2,\text{TRLV}} = 2,8 \text{ dB}$ immer noch deutlich unter der entsprechenden Vorgabe von 4 dB. Dieses Ergebnis deckt sich mit entsprechenden Auswertungen aus Betriebsmessungen, wonach sich die Anforderungen an die Schallpegelabnahme in Räumen bis zu einem Volumen von ca. 1000 m^3 kaum realisieren lassen [6]. Deshalb bietet sich in diesen Fällen eine Auslegung auf den mittleren Absorptionsgrad von 0,3 an.

Die mittelgroße Halle mit einer Größe von $45 \cdot 20 \cdot 8 \text{ m}^3$ liegt im Übergangsbereich, wo beide Kriterien anwendbar wären. Hier wird durch Erhöhung des mittleren Absorptionsgrades $\bar{\alpha}$ auf 0,3 auch das Kriterium bezüglich Schallpegelabnahme $DL_{2,\text{TRLV}} \geq 4 \text{ dB}$ erreicht.

4 Messverfahren zur Ermittlung von raumakustischen Kennwerten

4.1 Ermittlung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$

In diesem Abschnitt werden zwei alternative Verfahren zur Ermittlung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ beschrieben. Das erste Verfahren geht von bekannten oder typischen Schallabsorptionsgraden der einzelnen Teilflächen aus. Das zweite Verfahren basiert auf einer Messung der Nachhallzeiten und anschließender Berechnung nach der statistischen Theorie. Wo immer es möglich ist, sollte eine Messung und Bestimmung der raumakustischen Kennwerte Vorrang vor einer Abschätzung haben.

4.1.1 Berechnung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ aus absorbierenden Teilflächen

Prinzipiell lässt sich der mittlere Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ nach Gleichung (3.4) aus der äquivalenten Absorptionsfläche A und der gesamten Raumbooberfläche S berechnen. Die äquivalente Absorptionsfläche A kann dabei nach Gleichung (3.3) aus den Absorptionsgraden α_i der einzelnen Teilflächen S_i und den entsprechenden Größen der Flächen bestimmt werden. Die zugehörigen Absorptionsgrade α_i können dabei z. B. entsprechenden Tabellen in der Literatur entnommen werden. Für viele Materialien und spezielle Akustik-Produkte sollten sich Angaben der Hersteller (Prüfzeugnisse nach ISO 354 [7] oder ISO 11654 [8]) finden lassen.

Tabelle 4.1 zeigt die in der TRLV Lärm im Teil 3 [4] gegebene Auflistung von Schallabsorptionsgraden für verschiedene schallharte und schallabsorbierende Baumaterialien. Diese Werte sind jeweils über die Oktaven mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz bis 4000 Hz gemittelt und eignen sich für eine überschlägige Ermittlung des

mittleren Schallabsorptionsgrads $\bar{\alpha}$, z. B. zur Beurteilung von bereits existierenden Arbeitsräumen.

Für die Planung von neuen Arbeitsräumen empfiehlt sich jedoch die entsprechende Berechnung für die einzelnen Oktavbänder von 500 Hz bis 4000 Hz. Die in den Oktavbändern anzusetzenden Absorptionsgrade lassen sich z. B. der in der DIN 18041 [9] gegebenen Tabelle entnehmen. Außerdem sollten alle Hersteller von schallabsorbierenden Materialien die Absorptionsgrade für ihre Produkte angeben können. Aufgrund der Vielzahl von Varianten und der starken Abhängigkeit der Absorptionsgrade z. B. von der Materialstärke und der Art der Montage (siehe Abschnitt 5.1) sind bei dieser Rechnung größere Unsicherheiten möglich.

Beispiel:

Als einfaches Beispiel zu diesem Verfahren sei hier eine überschlägige Berechnung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ für die mittelgroße Halle ($45 \cdot 20 \cdot 8 \text{ m}^3$) aus Abschnitt 3.4 durchgeführt (Rechnung für Mittelwerte der Schallabsorption der Oktaven von 500 Hz bis 4000 Hz entsprechend Tabelle 4.1). Für die Raumbegrenzungsflächen wird die häufige Situation angenommen, dass die Decke aus Stahltrapezblech, die Wände aus unverputzten Ziegeln und der Boden aus Beton bestehen. In einer der Längswände befinden sich mehrere Fenster mit einer Gesamtfläche von 50 m^2 . Dann ergibt sich:

Decke: Fläche $S_1 = 45 \cdot 20 \text{ m}^2$,

Absorptionsgrad $\alpha_1 = 0,02$ (Stahltrapez)

Wände: Fläche $S_2 = (2 \cdot 45 \cdot 8 + 2 \cdot 20 \cdot 8 - 50) \text{ m}^2$,

Absorptionsgrad $\alpha_2 = 0,12$ (Ziegelwand);

Baumaterial – schallhart	α	Baumaterial – schallabsorbierend	α
Kacheln	0,02	Mineralfaser-Zylinderdecke mit 1 Zyl. pro m^2	0,83
Trapezblech	0,02	Mineralfaser-Kulissendecke	0,91
Fensterglas	0,02	Mineralfaser-Matten 50 mm	0,99
Beton	0,03	Hochlochziegel mit Mineralwolle hinterlegt	0,77
Verputzte Flächen	0,04	Trapezblech mit Mineralwolle hinterlegt	0,82
Kalksandstein	0,04	Weichschaumabsorber 50 mm direkt aufgelegt	0,95
Ziegelwand (unverputzt)	0,12		
Gasbeton	0,17		

Tab. 4.1 Schallabsorptionsgrade für verschiedene in industriellen Arbeitsräumen übliche Raumbegrenzungsflächen [4] (Mittelwerte über die Oktaven mit den Mittenfrequenzen von 500 bis 4000 Hz).

Fenster: Fläche $S_3 = 50 \text{ m}^2$, Absorptionsgrad $\alpha_3 = 0,02$
(Fensterglas)

Boden: Fläche $S_4 = 45 \cdot 20 \text{ m}^2$,
Absorptionsgrad $\alpha_4 = 0,03$ (Beton)

Somit ergibt sich nach Gleichung (3.3):

$$A = 0,02 \cdot 900 \text{ m}^2 + 0,12 \cdot 990 \text{ m}^2 + 0,02 \cdot 50 \text{ m}^2 + 0,03 \cdot 900 \text{ m}^2 \approx 165 \text{ m}^2$$

und

$$S = 900 \text{ m}^2 + 990 \text{ m}^2 + 50 \text{ m}^2 + 900 \text{ m}^2 = 2840 \text{ m}^2$$

Damit folgt nach Gleichung (3.4):

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S} = \frac{165 \text{ m}^2}{2840 \text{ m}^2} \approx 0,06$$

Da sich bei Schallabsorptionsmaterialien in Abhängigkeit von der Frequenz vielfach größere Unterschiede in der Schallabsorption ergeben, empfiehlt es sich, bei einer entsprechenden schallabsorbierenden Gestaltung von Teilflächen die obige Rechnung jeweils für die vier Oktaven mit den Mittenfrequenzen 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz und den jeweils dazugehörigen frequenzabhängigen Schallabsorptionsgraden durchzuführen. Auch der Vergleich mit den entsprechenden Vorgaben der TRLV Lärm erfordert eine separate Betrachtung für die einzelnen Oktavbänder.

4.1.2 Ermittlung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ mit Hilfe der Nachhallzeit

Berechnung des mittleren Schallabsorptionsgrades:

Der mittlere Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ kann unter bestimmten räumlichen Bedingungen durch eine Messung der Nachhallzeit T und unter Verwendung der Gleichungen (3.2) und (3.4) bestimmt werden. Dazu sollte ein möglichst diffuses Schallfeld vorliegen, wie es mit Blick auf die in den Normen DIN 18041 [9] und DIN EN 12354-6 [10] gegebenen Hinweise unter folgenden Bedingungen angenommen werden kann:

- Der Raum ist möglichst quaderförmig. Räume mit komplizierten Primärformen (kreisförmiger oder elliptischer Grundriss, konkav gewölbte Schnittführungen, gekoppelte Räume usw.) sind i. d. R. nicht geeignet.

- Länge und Breite des Raumes betragen das 0,3- bis 3-fache der Raumhöhe und die Länge höchstens das 2-fache der Raumbreite.
- Ggf. vorhandene schallabsorbierende Flächen sind gleichmäßig verteilt und der Absorptionsgrad zwischen Paaren gegenüberliegender Oberflächen weicht um nicht mehr als einen Faktor 3 voneinander ab.
- Der Raum enthält nur eine begrenzte Anzahl größerer Objekte, d. h. das Verhältnis der Summe des Volumenanteils aller Objekte zum Volumen des leeren Raumes ist kleiner als 0,2.

Werden die obigen Bedingungen nicht eingehalten, so muss man auf jeden Fall mit größeren Unsicherheiten rechnen. So stößt man z. B. bei den vielfach üblichen Flachräumen (Länge > 5-fache Höhe, Breite > 3-fache Höhe) und Langräumen (Länge > 5-fache Höhe, Breite = 0,3- bis 3-fache Höhe) auf die Grenzen für die Nachhallzeitmessung und die entsprechende Berechnung des mittleren Absorptionsgrades. Zusätzliche Unsicherheiten können sich in sehr großen Hallen ergeben, da sich dort die Luftabsorption im Raumvolumen verstärkt auswirkt.

Da die Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [4] raumakustische Vorgaben für die Oktavbänder von 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz machen, sollte die Nachhallzeit T für diese Oktavbänder ermittelt werden. Im nächsten Schritt lassen sich dann die äquivalenten Absorptionsflächen A in diesen Frequenzbändern berechnen. So ergibt sich nach der im Abschnitt 3.3 eingeführten Zahlenwertgleichung (3.2) bei Auflösung nach der äquivalenten Absorptionsfläche A die folgende Gleichung:

$$A = 0,163 \cdot \frac{V}{T} \quad (4.1)$$

dabei ist:

- A die äquivalente Absorptionsfläche in m^2 ;
- V das gesamte Raumvolumen in m^3 ;
- T die Nachhallzeit in s.

Der mittlere Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ kann dann für die einzelnen Oktavbänder nach Gleichung (3.4) jeweils aus dem Verhältnis der äquivalenten Absorptionsfläche A zur gesamten Raumbooberfläche S bestimmt werden. Für eine überschlägige Beurteilung eines Arbeitsraumes genügt die Betrachtung von nur einem Frequenzband, z. B. der Oktave mit der Mittenfrequenz von 1000 Hz.

Verfahren zur Ermittlung der Nachhallzeit:

Die DIN EN ISO 3382-2 [11] beschreibt mehrere Verfahren zur Ermittlung der Nachhallzeit T . Zur Anregung des Raumes und der Erfassung des anschließenden Pegelabfalls kann man entweder über einen Lautsprecher ein Rauschsignal erzeugen und dieses plötzlich ausschalten oder einen Schallimpuls erzeugen. Für letztere Anregung benötigt man eine Schallquelle, die einen ausreichend starken und breitbandigen Schallimpuls liefert. Dies kann z. B. der Schuss einer Signalpistole oder das Platzen eines Luftballons sein. Außerdem wird hinsichtlich Genauigkeit zwischen Kurz-, Standard- und Präzisionsverfahren mit entsprechend unterschiedlichem Messaufwand unterschieden.

Zusätzlich ist das Verfahren der integrierten Impulsantwort beschrieben. Damit lässt sich eine Raumimpulsantwort aufzeichnen, aus der alle notwendigen raumakustischen Eigenschaften berechnet werden können. Das Verfahren benötigt entsprechende Messsysteme, ist jedoch weniger anfällig gegenüber Störschall.

In diesem Lärmschutz-Arbeitsblatt wird nur das Kurzverfahren beschrieben, weil es mit relativ geringem Aufwand in der betrieblichen Praxis anzuwenden ist und für diese Anwendung ausreichend genaue Ergebnisse liefert.

Zur Ermittlung der Nachhallzeit bzw. Erfassung des Pegelabfalls nach der Schallanregung wird ein geeignetes Messsystem benötigt (siehe DIN EN ISO 3382-2, Abschnitt 4.2 [11]). In der Regel wird dazu ein Schallpegelanalysator eingesetzt, der eine Funktion zur Ermittlung der Nachhallzeit besitzt. Vielfach bieten die Schallpegelmesser dabei unterschiedliche Auswertungen an und weisen z. B. Nachhallzeiten mit den Bezeichnungen EDT (Early Decay Time), T_{20} und T_{30} als Messwerte aus. Diese Nachhallzeiten EDT, T_{20} und T_{30} basieren jeweils auf einer Auswertung kürzerer Abfallzeiten und Extrapolation auf den Pegelabfall von 60 dB. Dabei werden für EDT die Pegelabfälle zwischen 0 dB und 10 dB, für T_{20} die Abfälle zwischen 5 dB und 25 dB und für T_{30} die Abfälle zwischen 5 dB und 35 dB verwendet. In der DIN EN ISO 3382-2 wird der Verwendung von T_{20} Vorrang gegeben, da für die Abschätzung des stationären Schalldruckpegels in einem Raum der frühere Teil des Abklingens geeigneter ist. Zudem kann die Auswertung über den größeren Pegelabfall von 30 dB in einigen Arbeitsräumen Probleme bereiten, da der Grundgeräuschpegel gewöhnlich zu hoch ist. Deshalb wird auch in diesem

Lärmschutz-Arbeitsblatt die Erfassung der Nachhallzeit T_{20} empfohlen, obwohl bei Ermittlung der Nachhallzeit T_{30} bei ausreichendem Signal-Rausch-Abstand erfahrungsgemäß etwa die gleichen Ergebnisse zu erwarten sind.

Bei dem Kurzverfahren nach DIN EN ISO 3382-2 [11] ist die Nachhallzeit zweimal nacheinander zu erfassen, wobei die Schallquelle jeweils an derselben Stelle verbleibt, die Mikrofone aber an zwei unterschiedlichen Stellen positioniert werden. Bei Anwendung des Verfahrens mit Hilfe eines Lautsprechers und abgeschaltetem Rauschsignal ist aufgrund des Zufallscharakters des Signals für jede Mikrofonposition eine mehrfache Messung der Nachhallzeit und die Berechnung des entsprechenden Mittelwertes notwendig.

Die Schallquelle ist jeweils möglichst in der Nähe einer Ecke des Raumes aufzustellen. Die Mikrofone sollten einen möglichst großen Abstand zu der Schallquelle einhalten, um einen zu starken Einfluss des Direktschalls zu vermeiden. Im Rahmen der hier beschriebenen Anwendung sollte es ausreichen, wenn der Abstand zwischen Mikrofon und Schallquelle $1/3$ der größten Raumabmessung beträgt. Außerdem ist zu beachten, dass das Mikrofon zur nächstgelegenen reflektierenden Oberfläche (einschließlich des Bodens) jeweils einen Abstand von mindestens 1 m einhält. Die beiden Mikrofonpositionen sollten mindestens 2 m voneinander entfernt sein. Es empfiehlt sich, Positionen in unterschiedlichen Bereichen des Raumes zu wählen und symmetrische Positionen zu vermeiden. Erfahrungsgemäß ergeben sich keine großen Unterschiede für die Nachhallzeiten an den beiden Messpunkten. Bei tiefen Frequenzen, z. B. bei 250 Hz und darunter, muss allerdings mit größeren Abweichungen zwischen verschiedenen Messungen gerechnet werden. Als Ergebnis ist jeweils der arithmetische Mittelwert aus den verschiedenen Messungen zu bestimmen.

Beispiel:

Als Beispiel für die Bestimmung des mittleren Schallabsorptionsgrades sei eine quaderförmige Halle mit den Abmessungen Länge · Breite · Höhe von $30 \cdot 20 \cdot 10 \text{ m}^3$ betrachtet, d. h. das Verhältnis von Länge zu Höhe entspricht der oben empfohlenen Grenze von 3:1. In der Halle sind neun kleinere Maschinen aufgestellt, die allesamt eine Bauhöhe von weniger als zwei Metern haben. Alle Raumbegrenzungsflächen sind aus schallharten Materialien (Beton, Blech) ausgeführt (d. h.

keine absorbierenden Raumbegrenzungsflächen). Somit kann ein ausreichend diffuses Schallfeld angenommen werden, so dass der mittlere Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ aus Nachhallzeitmessungen ermittelt werden kann.

In Tabelle 4.2 sind die Nachhallzeiten T von dieser Halle in den Oktavbändern von 500 Hz bis 4000 Hz zusammengestellt (jeweils Mittelwerte aus zwei Messungen von T_{20}). Ebenso sind hier die nach Gleichung (4.1) berechneten äquivalenten Absorptionsflächen A und die nach Gleichung (3.4) berechneten mittleren Schallabsorptionsgrade $\bar{\alpha}$ gelistet.

Oktavbandmittenfrequenz [Hz]	500	1000	2000	4000
T [s]	3,5	3,8	3,3	2,5
A [m ²]	279	257	296	391
$\bar{\alpha}$	0,13	0,12	0,13	0,18

Tab. 4.2 Nachhallzeiten für eine 6000 m³ große Fertigungshalle sowie daraus berechnete äquivalente Absorptionsflächen A und mittlere Schallabsorptionsgrade $\bar{\alpha}$ für die Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz bis 4000 Hz.

Die entsprechende Rechnung für die 500 Hz-Oktave ergibt sich wie folgt:

Das Raumvolumen ist $V = 30 \cdot 20 \cdot 10 \text{ m}^3 = 6000 \text{ m}^3$ und die gesamte Raumbooberfläche ist $S = 2 \cdot 20 \cdot 30 \text{ m}^2 + 2 \cdot 10 \cdot 30 \text{ m}^2 + 2 \cdot 10 \cdot 20 \text{ m}^2 = 2200 \text{ m}^2$.

Bei der Nachhallzeit von 3,5 s ergibt sich die äquivalente Absorptionsfläche nach Gleichung (4.1) zu:

$$A = 0,163 \cdot \frac{V}{T} [\text{m}^2] = 0,163 \cdot \frac{6000}{3,5} \text{ m}^2 \approx 279 \text{ m}^2$$

und der mittlere Schallabsorptionsgrad nach Gleichung (3.4) zu:

$$\bar{\alpha} = \frac{A}{S} = \frac{279 \text{ m}^2}{2200 \text{ m}^2} \approx 0,13.$$

4.2 Ermittlung der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$

4.2.1 Anordnung von Messpfad und Testschallquelle

Die Bestimmung der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung DL_2 auf einem Messpfad ist z. B. in der VDI-Richtlinie 3760 [5] und in der DIN EN ISO 14257 [12] beschrieben. Dabei werden drei Entfernungsbereiche (Nah-, Mittel-, Fernbereich) unterschieden und jeweilige Regressionsgeraden zur Beschreibung der Pegelabnahme betrachtet. In der betrieblichen Praxis ist es allerdings aufgrund von Maschinen und anderen Einrichtungsgegenständen bzw. aufgrund der begrenzten Abmessungen oft nicht möglich, Messpfade zu realisieren, die über den Nahbereich hinausgehen.

In den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV Lärm) [4] werden Anforderungen an die Pegelabnahme für den Abstandsbereich von 0,75 m bis 6 m festgelegt, was näherungsweise dem Nahbereich nach DIN EN ISO 14257 entspricht. Deshalb beschränkt sich das im vorliegenden Lärmschutz-Arbeitsblatt beschriebene Messverfahren auf diesen nach TRLV Lärm festgelegten Bereich. Erfahrungsgemäß ergeben sich aber für den in der VDI 3760 [5] und in DIN EN ISO 14257 [12] festgelegten Nahbereich zwischen 1 m und 6 m vergleichbare Werte [13]. Zur Unterscheidung von dem allgemeinen Kennwert für die Pegelabnahme DL_2 wird die nach diesem Lärmschutz-Arbeitsblatt zu bestimmende Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung für den Abstandsbereich zwischen 0,75 m und 6 m als $DL_{2,TRLV}$ bezeichnet.

Als Schallquelle (hier: Testschallquelle) ist eine Vergleichsschallquelle nach DIN EN ISO 6926 [14] oder eine Schallquelle zu verwenden, welche die Anforderungen von DIN EN ISO 14257, Anhang A [12] erfüllt. Die Testschallquelle sollte danach eine möglichst ungerichtete Schallabstrahlung aufweisen und in den Oktavbändern mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz bis 4000 Hz ein breitbandiges Rauschen erzeugen.

Bei der Festlegung der Messpfade zur Ermittlung der Schallpegelabnahme je Abstandsverdopplung sind nach diesem Lärmschutz-Arbeitsblatt folgende Vorgaben zu beachten:

- Der Messpfad beginnt im akustischen Zentrum der Testschallquelle (meist die geometrische Mitte) und umfasst vier Mikrofonpositionen in 0,75 m, 1,5 m, 3 m und 6 m Abstand. Das Mikrofon ist jeweils auf die Schallquelle auszurichten.

- Die bevorzugte Pfadhöhe liegt 1,5 m über dem Boden. Bei Verwendung einer anderen Pfadhöhe ist diese im Messbericht zu vermerken.
- Der Pfad verläuft geradlinig entlang einer freien Sichtlinie parallel zum Boden, d. h. alle Mikrofonpositionen und das akustische Zentrum der Testschallquelle sollten sich in der gleichen Höhe befinden.
- Der Pfad sollte zu allen Wänden einen Abstand von mindestens 4 m einhalten, sofern der Raum die entsprechende Größe aufweist. Kann dieser Wandabstand nicht eingehalten werden, z. B. in kleineren Räumen, so sind die Wandabstände im Messbericht aufzuführen.
- Große reflektierende Strukturen (Streukörper) sollten einen Mindestabstand zum Messpfad von 3 m einhalten. Für Streukörper bis zu einer Höhe von 1 m ist ein Mindestabstand von 1,5 m zum Pfad zu beachten. Ggf. unvermeidbare Abweichungen von diesen Vorgaben sind im Messbericht zu vermerken.
- Entlang des Pfades sollten sich möglichst keine Streukörper auf dem Fußboden befinden. Streukörper bis zu 0,5 m Höhe sind in Ausnahmefällen zulässig, falls sich das nicht vermeiden lässt. Dann muss jedoch die Lage und Größe der Streukörper im Messbericht angegeben werden.

In großen Halle von mehr als 60 m Länge sind in dieser Richtung zwei Messpfade möglichst gleichmäßig zu verteilen. Bei einer Hallenlänge von mehr als 90 m sind in dieser Richtung nach dem gleichen Prinzip drei Messpfade anzuordnen. In Hallen von mehr als 20 m Breite sollte ein zusätzlicher Messpfad in Hallenquerrichtung festgelegt werden.

Abbildung 4.1 zeigt zwei Beispiele für Messpfade in unterschiedlich großen Hallen. In Abbildung 4.1 ist unter (a) die kleinste Halle skizziert, in der ein Pfad den o.g. Abstand zu den Wänden von 4 m einhält. Abbildung 4.1 zeigt unter (b) die Lage von drei Messpfaden in einer größeren Halle. Aufgrund der Länge der Halle von mehr als 60 m sind in dieser Richtung zwei Messpfade gleichmäßig über die Länge zu verteilen. Die Breite beträgt mehr als 20 m, so dass in dieser Richtung ein weiterer Messpfad mittig angelegt ist.

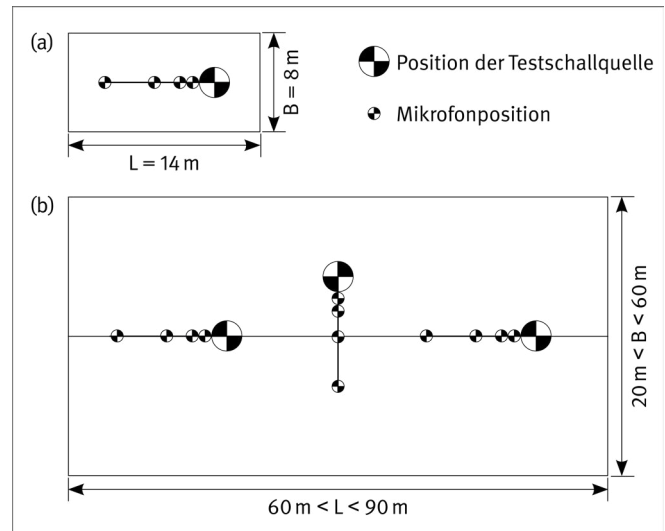


Abb. 4.1 Beispiele optimaler Messpfade in Hallen, die gleichmäßig mit Arbeitsplätzen belegt sind.

(a) Mittlerer Pfad in der kleinsten Halle, die einen Wandabstand von 4 m ermöglicht,

(b) Pfade in einer Halle mit einer Länge von mehr als 60 m und einer Breite von mehr als 20 m.

Mit Blick auf die oben genannten Vorgaben zur Festlegung von Messpfaden bieten sich vor allem zentrale Transportwege von ausreichender Breite als Messpfade an, wie es die Beispiele in Abbildung 4.2 zeigen. Unter Umständen müssen jedoch Messpfade verwendet werden, die nicht vollständig den obigen Bedingungen entsprechen. Das erfordert dann entsprechende Angaben im Messbericht und führt in jedem Fall zu einer geringeren Aussagekraft der Messergebnisse.

Sind in großen Hallen nur Teilbereiche mit Arbeitsplätzen belegt oder sollen nur Teilbereiche raumakustisch nachgebessert werden, so sind die Messpfade ggf. nur in dem entsprechenden Bereich in einer möglichst zentralen Lage anzuordnen. Ein entsprechendes Beispiel ist in der Abbildung 4.2 unter (a) gezeigt. Abbildung 4.2 zeigt unter (b) die Anordnung des Messpfades in Wandnähe, falls die Arbeitsplätze nur entlang einer Hallenwand gelegen sind. Dabei ist allerdings der notwendige Wandabstand von mindestens 4 m zu beachten. Falls innerhalb einer Halle Bereiche mit offensichtlich großen Unterschieden in der raumakustischen Situation bestehen, z. B. aufgrund einer unterschiedlichen Deckenhöhe oder einer nur bereichsweise schallabsorbierend gestalteten Decke, empfiehlt sich die separate Betrachtung der verschiedenen Bereiche und die Festlegung von getrennten Messpfaden, um die jeweilige Situation für diese Bereiche zu erfassen.

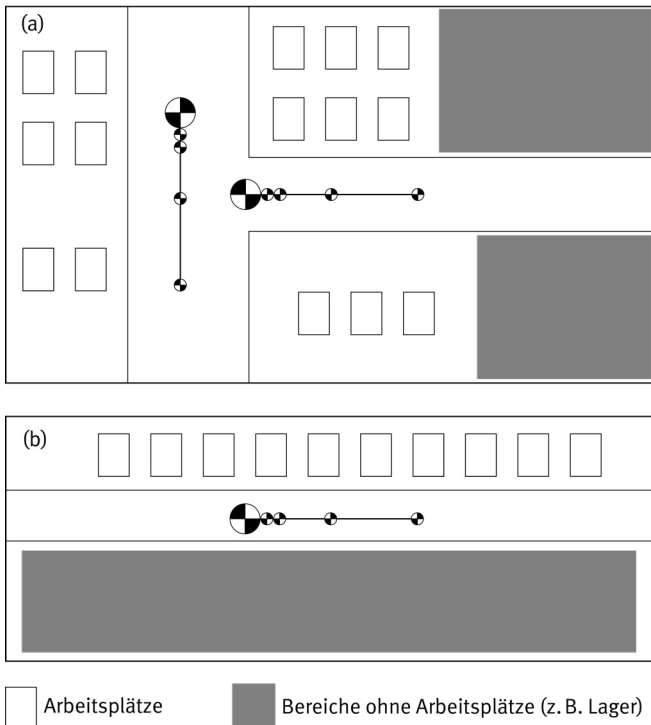


Abb. 4.2 Beispiele optimaler Messpfade in Hallen, in denen nur Teilbereiche mit Arbeitsplätzen belegt sind.

4.2.2 Durchführung der Schallausbreitungsmessungen

Für die Ermittlung der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ sind Schallpegelmessgeräte einzusetzen, die den Anforderungen an Geräte der Klasse 1 oder Klasse 2 nach DIN EN 61672-1 [15] entsprechen und über die Möglichkeit der Frequenzanalyse in Oktavbandbreite verfügen.

Die Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ ist für jeden Messpfad gesondert zu bestimmen. Während der Messungen sollten, soweit möglich, alle im Raum vorhandenen Schallquellen (Maschinen, Lüftungssysteme, Druckluftleitungen, etc.) ausgeschaltet sein, um das Geräusch der Testschallquelle mit einem möglichst hohen Störgeräuschabstand zu erfassen.

Pro Pfad sind an allen vier Messpunkten jeweils die äquivalenten Dauerschallpegel der Testschallquelle L_p' für die Oktavbänder mit den Mittenfrequenzen von 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz über eine Zeitdauer von mindestens 10 s aufzunehmen.

Um einen möglichen Fremdgeräuscheinfluss zu erfassen, sind an allen vier Messpunkten eines Messpfades

auch jeweils die Fremdgeräuschpegel L_p'' in den Oktavbändern von 500 Hz bis 4000 Hz zu ermitteln. Sofern das Fremdgeräusch größere Pegelschwankungen aufweist, sind allerdings längere Messdauern erforderlich. Die Messdauer muss dabei jeweils ausreichen, um den mittleren Pegel des Geräusches repräsentativ zu erfassen. Das gilt dann sowohl für die Erfassung des Fremdgeräuschpegels L_p'' als auch für die Erfassung des Schalldruckpegels L_p' der Testschallquelle, d. h. beide Messungen sind über dieselbe Messdauer durchzuführen. Liegen Fremdgeräusche mit periodischen Pegelschwankungen vor, sollte die Mittelungszeit bei der Messung von L_p'' und von L_p' möglichst mehrere vollständige Perioden umfassen. Alle ermittelten Schalldruckpegel sind mit einer Stelle nach dem Komma aufzunehmen, um bei der Berechnung der Schallausbreitungsminderung nicht schon bei der Eingabe mit gerundeten Werten zu arbeiten.

Falls die Differenz zwischen dem Schalldruckpegel der Testschallquelle L_p' und dem Fremdgeräuschpegel L_p'' mehr als 15 dB beträgt, ist keine Fremdgeräuschkorrektur anzuwenden. Bei einem Fremdgeräuschabstand von $\Delta L = L_p' - L_p''$ zwischen 6 und 15 dB ist der Fremdgeräuscheinfluss zu korrigieren. Bei einem Fremdgeräuschabstand ΔL von weniger als 6 dB ist keine Korrektur mehr zulässig. In diesem Fall muss man versuchen, das Fremdgeräusch durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren. Gegebenenfalls muss die Messung zu einem anderen Zeitpunkt, z. B. während der Betriebsruhe, durchgeführt werden.

Um den Fremdgeräuscheinfluss zu korrigieren, kann man den Fremdgeräuschpegel L_p'' nach den Rechenregeln der Akustik vom ermittelten Schalldruckpegel der Testschallquelle L_p' entsprechend der Gleichung (4.2) subtrahieren und erhält so den korrigierten äquivalenten Dauerschalldruckpegel L_p der Testschallquelle:

$$L_p = 10 \cdot \lg(10^{0,1 L_p'} - 10^{0,1 L_p''}) \text{ dB} \quad (4.2)$$

Alternativ kann der äquivalente Dauerschallpegel der Testschallquelle L_p auch mittels der in Tabelle 4.3 aufgeführten Fremdgeräuschkorrektur K in Abhängigkeit vom Fremdgeräuschabstand $\Delta L = L_p' - L_p''$ nach Gleichung (4.3) ermittelt werden:

$$L_p = L_p' - K \quad (4.3)$$

Fremdgeräuschabstand $\Delta L = L_p' - L_p''$ [dB]	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fremdgeräuschkorrektur K [dB]	1,3	1,0	0,8	0,6	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1

Tab. 4.3 Tabelle zur Bestimmung der Fremdgeräuschkorrektur K .

Diese Fremdgeräuschkorrektur nach Gleichung (4.2) oder (4.3) ist für jedes Einzelmessergebnis, d. h. für jeden Messpunkt und die dort aufgenommenen Oktavbandpegel durchzuführen, sofern sich ein Fremdgeräuschabstand zwischen 6 dB und 15 dB ergibt. In der Regel sollte die Fremdgeräuschkorrektur nur an den Messpunkten in größerem Abstand zu der Testschallquelle, z. B. in 6 m Abstand, und in Arbeitsräumen mit einem hohen Grundgeräuschpegel notwendig sein. An den Messpunkten in geringerem Abstand zur Testschallquelle sollte das Geräusch dieser Quelle dominieren, so dass der Fremdgeräuscheinfluss zu vernachlässigen ist.

Nach Durchführung der Messungen und eventueller Fremdgeräuschkorrektur erhält man pro Messpfad einen Satz von Schalldruckpegeln L_{pi} für die Messpunkte $i = 1$ bis 4, der sich am besten tabellarisch darstellen lässt. Als Beispiel sei hier die Tabelle 4.4 gezeigt, in der die Ergebnisse einer entsprechenden Schallausbreitungsmessung eingetragen sind.

Messpunkt	L_{pi} [dB] bei Oktavbandmittenfrequenz [Hz]			
	500	1000	2000	4000
$i = 1$ ($r_1 = 0,75$ m)	79,2	81,9	80,4	84,3
$i = 2$ ($r_2 = 1,50$ m)	74,4	77,1	75,3	78,5
$i = 3$ ($r_3 = 3,00$ m)	70,2	73,0	71,0	73,2
$i = 4$ ($r_4 = 6,00$ m)	67,1	69,8	67,4	69,3

Tab. 4.4 Beispielwerte L_{pi} an den Messpunkten i für die Oktaven von 500 Hz bis 4000 Hz. Die Abstände r_i sind jeweils die Abstände von der Testschallquelle.

4.2.3 Berechnung der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$

Die Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ lässt sich entweder durch eine Regressionsrechnung unter Einbeziehung der Schalldruckpegel L_{pi} aller vier Messpunkte oder nach einem vereinfachten Verfahren berechnen, das allerdings nur die Schalldruckpegel für die Messpunkte 1 und 4 berücksichtigt. Nach der DIN EN ISO 14257 [12] ist die Schallpegelabnahme als Regressionsgerade zu berechnen. In diesem Lärmschutz-Arbeitsblatt wird nachfolgend zusätzlich ein vereinfachtes Verfahren zur Bestimmung der Schalldruckpegelabnahme dargestellt. Da beide Verfahren bei sorgfältiger Festlegung der Messpfade unter Berücksichtigung der entsprechenden Vorgaben nach Abschnitt 4.2.1 in der Regel zu etwa gleichen Ergebnissen führen, können beide Verfahren als Alternativen akzeptiert werden.

A) Verfahren mit Regressionsrechnung:

Die DIN EN ISO 14257 [12] beschreibt eine Regressionsrechnung zur Bestimmung der mittleren Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung DL_2 unter Berücksichtigung aller Messwerte eines Pfades. Für die Berechnung von $DL_{2,TRLV}$ aus allen vier nach TRLV Lärm festgelegten Messpunkten lässt sich diese Rechnung auf folgende Formel vereinfachen:

$$DL_{2,TRLV} = \frac{1,306 \sum_{i=1}^4 L_{pi} \cdot 4 \sum_{i=1}^4 [L_{pi} \cdot \lg(\frac{r_i}{r_0})]}{6} \quad (4.4)$$

dabei ist:

r_i der Abstand des Messpunktes i von der Testschallquelle, an dem der Schalldruckpegel L_{pi} gemessen wurde

$r_0 = 1$ m Bezugsabstand

Beispiel:

Als Beispiel sei hier die Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ für die in der Tabelle 4.4 für die 500 Hz-Oktave angegebenen Werte unter Anwendung der Gleichung (4.4) berechnet:

$$DL_{2,TRLV} (500 \text{ Hz}) = \left[\frac{1,306 \cdot (79,2 + 74,4 + 70,2 + 67,1)}{6} - \frac{4 \cdot [79,2 \lg(0,75) + 74,4 \lg(1,5) + 70,2 \lg(3,0) + 67,1 \lg(6,0)]}{6} \right] \text{ dB} \approx 4,0 \text{ dB}$$

B) Vereinfachtes Verfahren:

Beim vereinfachten Verfahren basiert die Berechnung der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ auf den Messwerten an dem ersten und letzten Punkt des jeweiligen Pfades und ist daher besonders anfällig für Messfehler oder für besondere raumakustische Bedingungen am ersten bzw. letzten Messpunkt (z. B. Reflexionen an nahegelegenen Streukörpern).

Deshalb empfiehlt es sich, bei Anwendung des vereinfachten Verfahrens auch jeweils die einzelnen Schallpegelabnahmen $L_{pi} - L_{pj}$ zwischen benachbarten Messpunkten bzw. den Verlauf der Kurve für die Schallausbreitung zu betrachten. In der Regel sollte die Pegelabnahme mit zunehmender Entfernung von der Testschallquelle kleiner werden, d. h. die entsprechende Kurve sollte abflachen. Ist dies der Fall, so sind bei Anwendung des vereinfachten Verfahrens nur geringe Abweichungen im Vergleich zum Verfahren mittels Regressionsrechnung zu erwarten.

Zur Berechnung der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ ist je Frequenzband jeweils die Differenz der Messwerte in 0,75 m und in 6 m Abstand zu bilden ($L_{p1} - L_{p4}$) und entsprechend Gleichung (4.5) durch 3 (3-fache Verdopplung des Abstandes) zu dividieren:

$$DL_{2,TRLV} = (L_{p1} - L_{p4}) / 3 \tag{4.5}$$

mit:

L_{p1} Schalldruckpegel am Messpunkt in 0,75 m Abstand zur Testschallquelle

L_{p4} Schalldruckpegel am Messpunkt in 6,0 m Abstand zur Testschallquelle

Beispiel:

Zur Veranschaulichung des vereinfachten Verfahrens seien die in der Tabelle 4.4 beispielhaft aufgelisteten Messergebnisse entsprechend ausgewertet und in die Tabelle 4.5 übertragen. Dabei sind jeweils die Differenzen $L_{pi} - L_{pj}$ zwischen benachbarten Messpunkten gelistet. Hier zeigt sich ganz deutlich, dass sich in der

Nähe der Testschallquelle jeweils größere Differenzen als zwischen den von der Quelle weiter entfernten Messpunkten ergeben. Tatsächlich errechnen sich nach beiden hier beschriebenen Verfahren (A) und (B) dieselben Werte für die Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$. Die entsprechenden Werte sind in den unteren beiden Zeilen der Tabelle 4.4 angegeben.

Schallpegelabnahme	Oktavbandmittenfrequenz [Hz]			
	500	1000	2000	4000
$L_{p1} - L_{p2}$ [dB]	4,8	4,8	5,1	5,8
$L_{p2} - L_{p3}$ [dB]	4,2	4,1	4,7	5,3
$L_{p3} - L_{p4}$ [dB]	3,1	3,2	3,6	3,9
$DL_{2,TRLV}$ [dB] nach Verfahren (A)	4,0	4,0	4,3	5,0
$DL_{2,TRLV}$ [dB] nach Verfahren (B)	4,0	4,0	4,3	5,0

Tab. 4.5 Ergebnisse der Auswertung der in Tabelle 4.4 beispielhaft zusammengestellten Messwerte. Schallpegelabnahmen $L_{pi} - L_{pj}$ zwischen benachbarten Messpunkten sowie berechnete Kennwerte $DL_{2,TRLV}$ unter Anwendung des Regressionsverfahrens (Verfahren A) und unter Anwendung des vereinfachten Verfahrens (Verfahren B).

5 Gestaltung und Planung von raumakustischen Maßnahmen

Dieser Abschnitt beschreibt verschiedene Maßnahmen zur Auslegung von industriellen Arbeitsräumen entsprechend dem in den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV Lärm) [4] beschriebenen Stand der Technik (siehe Abschnitt 2). Dabei werden zunächst verschiedene Schallabsorptionsmaterialien vorgestellt und anschließend Möglichkeiten aufgezeigt, um diese in den Raum zu integrieren. Schließlich werden im Abschnitt 5.3 konkrete Hinweise für die Planung der Maßnahmen und für die Ermittlung der benötigten Menge an Absorbern gegeben.

5.1 Schallabsorptionsmaterialien

Die häufigsten in der betrieblichen Praxis eingesetzten Schallabsorber sind offenporige Materialien, in denen die Schallwellen durch Reibung an den Porenwänden abgebaut werden und somit die Schallenergie in Wärme umgewandelt wird. Die für das Absorptionsvermögen entscheidenden Materialeigenschaften sind dabei das Volumen und die Struktur der offenen Poren, sowie der damit zusammenhängende Strömungswiderstand des Materials. Um die beschriebene Wirkung zu erhalten, ist es wichtig, dass die Oberfläche der Absorber offen bleibt. So ist insbesondere bei Renovierungen zu beachten, dass die Poren nicht durch Farbanstriche verschlossen werden.

Poröse Absorber bestehen meist aus Mineralfasermaterialien oder aus Akustikschaumstoffen auf der Basis von Polyurethan oder Melaminharz. Mineralfaserplatten sind die am häufigsten verwendeten Absorber. Sie können je nach Bedarf in Form loser Mineralwolle oder als selbsttragende Platten verwendet werden, wobei selbst für höhere Luftfeuchtigkeiten geeignete Varianten zur Verfügung stehen. Dabei sind Mineralfaserplatten alterungsbeständig und in nicht brennbaren Ausführungen erhältlich (Brandschutzklasse A1). So sind auch selbsttragende Mineralfaserplatten mit geschützten Oberflächen erhältlich. Dabei werden die Materialien beispielsweise mit einer Mineralvlieskaschierung versehen.

Anmerkung:

Gegen die Verwendung von Mineralfasermaterialien gibt es gelegentlich Bedenken, weil eine Gesundheitsgefährdung durch die Fasern befürchtet wird. Allerdings kann eine besondere Gesundheitsgefährdung durch Mineralfasern bei modernen Produkten ausgeschlossen werden. Die Hersteller können ihre Produkte heute im Sicherheitsdatenblatt, Abschnitt 11

(Toxikologische Angaben) als nicht krebserzeugend gemäß § 6 der Gefahrstoffverordnung [16] ausweisen. Bei der Verarbeitung müssen lediglich Mindestschutzmaßnahmen zum Schutz der Beschäftigten vor Stäuben ergriffen werden. Die Anwendung der Mindestschutzmaßnahmen schützt insbesondere vor gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Atmungsorgane und vor hautreizenden Einwirkungen der Fasern. Detaillierte Informationen hierzu enthält eine Handlungsanleitung zum Umgang mit Mineralwolle-Dämmstoffen [17].

Schaumstoffmaterialien haben bei vergleichbarer Wirksamkeit ein deutlich geringeres Flächengewicht, was z. B. aus Gründen der begrenzten Belastbarkeit einer Raumdecke von Bedeutung sein kann. Abbildung 5.1 zeigt in der Mitte eine Melaminharzplatte. Diese sind in der Regel schwer entflammbar und können der Brandschutzklasse B1 zugeordnet werden.

Um bei einem Mineralfasermaterial ein Ausrieseln zu vermeiden oder um die Absorber vor Verschmutzungen zu schützen, werden die Materialien vielfach mit Kaschierungen versehen. Dafür werden z. B. dünne Kunststofffolien, Vliese aus Glas- bzw. Mineralfasern oder dünne Farbschichten verwendet. Um zugleich einen mechanischen Schutz zu erreichen, werden dickere Vliesmaterialien, dickere Folien mit einer Lochung oder Textilgewebe als Kaschierung eingesetzt. Zum Schutz vor einem Eindringen von Dämpfen, Ölnebeln oder für den Einsatz in Hygienebereichen kommen auch etwas dickere Folien zum Einsatz, in die das Absorptionsmaterial

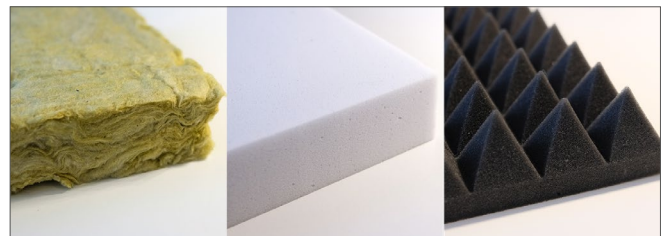


Abb. 5.1 Gebräuchliche Materialien für poröse Absorber; links: Steinwollplatte, Mitte: Melaminharzschaumstoffplatte, rechts: Polyurethanschaumstoffplatte (PU-Platte) mit Pyramidenmuster. Diese Materialien sind in verschiedenen Formen, Dicken, mit unterschiedlichen Mustern und Kaschierungen als Schutz bspw. gegen Feuchte erhältlich. Die akustische Eignung muss im Einzelfall anhand der geplanten Nutzung und des Datenblatts geprüft werden.

eingeschweißt wird. Diese Materialien lassen sich dann z. B. mit einem Hochdruckreiniger säubern. Allerdings sind diese dickeren Folien weniger durchlässig für den Schall und daher weist das gesamte Absorptionselement (inkl. Folie) bei höheren Frequenzen eine geringere Schallabsorption auf.

Erfahrungsgemäß reduziert sich das Absorptionsvermögen des eingesetzten Materials nur geringfügig, falls für die Kaschierung ein dünnes Mineralfaservlies oder eine dünne Polyethylenfolie von nicht mehr als 20 µm Dicke eingesetzt wird. Die Folie sollte dabei lose um die Absorber geschlagen und bei ggf. notwendigem Feuchtigkeitsschutz verschweißt werden. Bei straff gespannter oder aufgeklebter Folie wird die Schalldurchlässigkeit für hohe Frequenzen gemindert.

Poröse Absorber wirken über den gesamten Frequenzbereich des Hörschalls, wobei der Absorptionsgrad zu tiefen Frequenzen hin abnimmt. Um tiefe Frequenzen gut zu absorbieren, sind in der Regel dickere Materialien notwendig. Die Abhängigkeit von der Dicke des Absorbers ist in Abbildung 5.2 am Beispiel eines Akustikschaumstoffs dargestellt. Hier wurde ein hoch wirksamer Akustikschaumstoff jeweils direkt an die Raumbegrenzungsfläche geklebt, und zwar in einer Materialstärke von 10 mm (rote Strichpunktcurve), 50 mm (blaue gepunktete Kurve) und 80 mm (schwarze Kurve). Dabei ist der 10 mm dicke Absorber unterhalb von 1000 Hz nur gering wirksam. Mit dem 50 mm dicken Material wird dagegen schon bei 500 Hz eine recht gute Schallabsorption von 80 % erreicht. Das 80 mm dicke Material ist sogar schon bei Frequenzen ab ca. 200 Hz hoch wirksam.

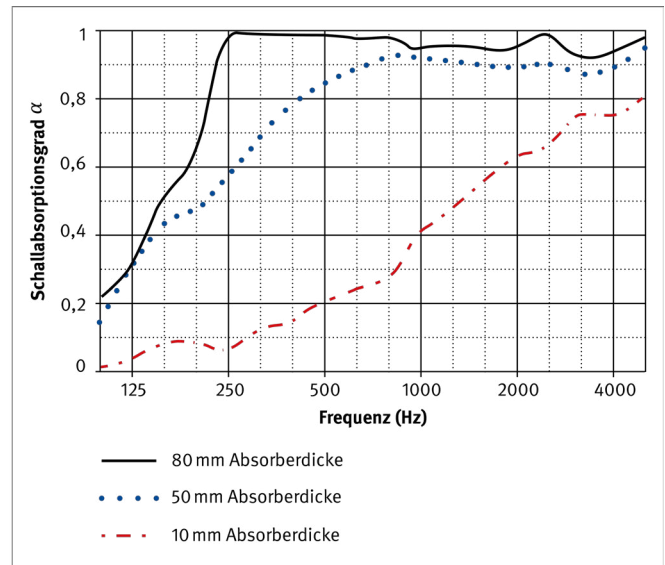


Abb. 5.2 Beispiel für die Schallabsorption eines porösen Absorbers in unterschiedlicher Materialdicke bei direkter Montage auf der Wand oder der Decke.

Für die Wirksamkeit poröser Absorber ist neben der Materialdicke auch der Abstand des Absorptionsmaterials zur Reflexionsfläche (Wand bzw. Decke) relevant. So lässt sich der Absorptionsgrad zu tiefen Frequenzen hin durch Montage der Absorber mit Abstand zu den Raumbegrenzungsflächen verbessern, wie Abbildung 5.3 am Beispiel einer 25 mm dicken Mineralfaserplatte zeigt.

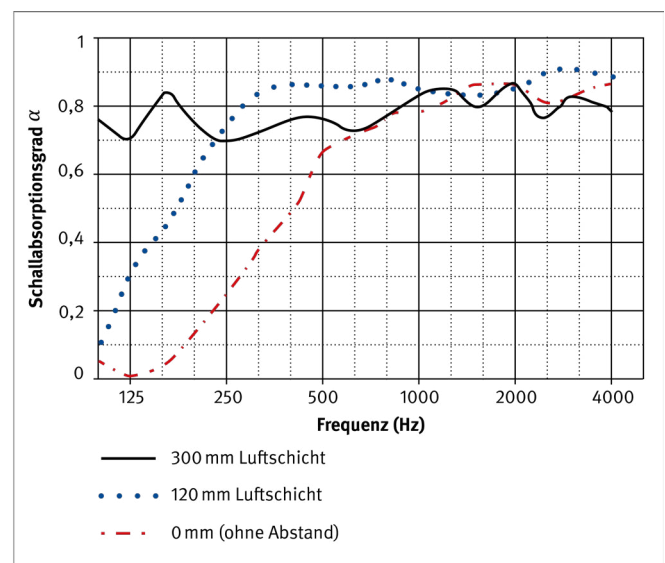


Abb. 5.3 Schallabsorptionsgrad eines porösen Absorbers in Abhängigkeit vom Abstand zur Wand bzw. Decke.

Nach Abbildung 5.3 ist der Absorptionsgrad für alle drei Varianten oberhalb von 1000 Hz recht gut. Für die direkt montierte 25 mm Mineralfaserplatte ergibt sich jedoch unterhalb von 500 Hz eine deutlich geringere Schallabsorption (rote Strichpunktcurve). Bei einem Wandabstand von 120 mm ist dieselbe Platte jedoch schon ab ca. 200 Hz recht wirksam (blaue gepunktete Kurve). Bei 300 mm Wandabstand lässt sich die Wirksamkeit bei tiefen Frequenzen noch weiter verbessern, allerdings ist der Verlauf des Absorptionsgrads aufgrund von Resonanzeffekten etwas ungleichmäßiger (schwarze Kurve).

Dieses Beispiel zeigt, dass sich die Schallabsorption von porösen Absorbern durch Montage in einem gewissen Abstand zur Wand bzw. durch Realisierung einer abgehängten Decke zu tiefen Frequenzen hin verbessern lässt. Daran wird jedoch auch deutlich, dass in Abhängigkeit von der Abhänghöhe des Materials bzw. dem dahinter liegenden Luftraum mit deutlichen Unterschieden in der Schallabsorption gerechnet werden muss und für genaue raumakustische Planungen die entsprechenden Angaben des Materialherstellers für die vorgesehene Montage benötigt werden. Die Hersteller bzw. Lieferanten von Absorptionsmaterial lassen ihre Produkte deshalb in der Regel für unterschiedliche Abhänghöhen prüfen und können entsprechende Angaben zur Absorption in Abhängigkeit von den Einbaubedingungen machen.

In speziellen Fällen lassen sich auch mikroperforierte Absorber in industriellen Arbeitsräumen sinnvoll einsetzen. Hierbei handelt es sich um spezielle Resonanzabsorber, die aus einem Material mit einer sehr feinen Lochung und einem dahinter liegenden Luftraum bestehen. In einfachster Form lässt sich ein solcher Absorber aus einer gelochten Folie oder einem gelochten Blech vor einer Reflexionsfläche aufbauen. Dabei wird die Schallenergie durch Reibung der Luft in den kleinen Löchern des Materials abgebaut.

Abbildung 5.4 zeigt Beispiele für mikroperforierte Materialien, wobei unter (a) eine transparente Folie vor einer strukturierten Tapete zu sehen ist. Unter (b) ist ein mikrogeschlitztes Blech aus Edelstahl vor einem bedruckten Papier gezeigt. Durch das perforierte Blech lässt sich im linken Teil des Bildes die Kante des Papiers erkennen. Solche Bleche sind sehr robust und können daher auch unter Umgebungsbedingungen eingesetzt werden, in denen die Verwendung poröser Absorber problematisch ist.

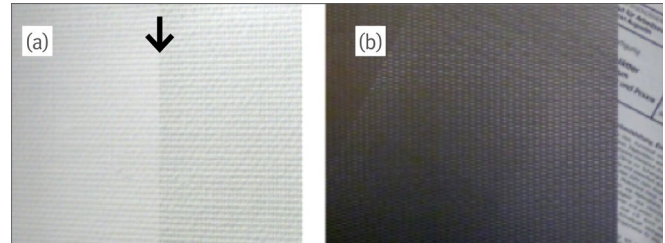


Abb. 5.4 Beispiele für mikroperforierte Absorber:
(a) Transparente mikroperforierte Folie vor einem Teil einer strukturierten Tapete. Der Pfeil markiert die Grenze zwischen dem Bereich mit (links) und ohne Folie (rechts).
(b) Mikrogeschlitztes Blech aus Edelstahl vor einem Papier. Durch die perforierten Bereiche des Bleches ist links schwach die Kante des Papiers erkennbar.

Für die Wirksamkeit eines Absorbers aus mikroperforiertem Material ist das Luftpolster zwischen dem Absorbermaterial und der dahinter liegenden Reflexionsfläche von zentraler Bedeutung. Der wirksame Frequenzbereich und der erreichbare Absorptionsgrad werden vor allem durch den Abstand zur Reflexionsfläche bestimmt. Eine einzelne Lage mikroperforierten Materials ist nur in einem relativ schmalen Frequenzbereich wirksam. Um eine gute Wirkung bei einer bestimmten Frequenz zu erreichen, sollte der Abstand zwischen Material und Reflexionsfläche etwa einem Viertel der Wellenlänge entsprechen. Um breitbandiger wirksame Absorber zu realisieren, lassen sich mehrere Lagen mikroperforierten Materials in unterschiedlichen Abständen kombinieren.

Abbildung 5.5 zeigt Beispiele für die Wirksamkeit von Absorbern aus mikroperforiertem Material. Der Absorber aus der einzelnen mikroperforierten Folie in 5 cm Abstand zur Reflexionsfläche (schwarze Kurve) lässt rein rechnerisch eine besondere Wirksamkeit bei ca. 1700 Hz erwarten. Das wird durch die dargestellte, messtechnisch ermittelte Kurve bestätigt. Für das System aus zwei übereinanderliegenden mikroperforierten Folien (rote gestrichelte Kurve) ergibt sich eine verbesserte Wirkung in einem weiteren Frequenzbereich.

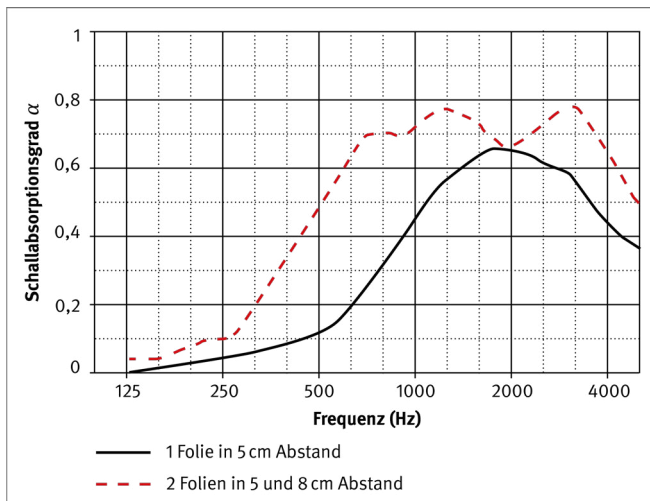


Abb. 5.5 Schallabsorption von mikroperforierten Folien in Abhängigkeit von der Frequenz. Die schwarze Kurve zeigt den Absorptionsgrad einer einzelnen mikroperforierten Folie in 5 cm Abstand zur Reflexionsfläche. Die rote gestrichelte Kurve zeigt die Absorption für ein System aus zwei übereinanderliegenden Folien mit 5 cm und 8 cm Abstand zur Reflexionsfläche.

5.2 Gestaltung von raumakustischen Maßnahmen

5.2.1 Allgemeines

Da schallabsorbierende Materialien neben der akustischen Dämpfung in der Regel auch eine hohe Wärmedämmung aufweisen, insbesondere Mineralfasermaterialien, muss man bei der Anbringung des Materials auf Außenwänden oder Dächern mit einer Taupunktunterschreitung in dem Material rechnen. Die im Absorptionsmaterial kondensierte Feuchtigkeit kann dann zu Bauschäden führen. Deshalb erfordert die schallabsorbierende Gestaltung von äußeren Begrenzungsflächen eines Gebäudes jeweils geeignete Maßnahmen zur Vermeidung der Taupunktunterschreitung bzw. zur Vermeidung des Eindringens der Feuchtigkeit in das Material. Das lässt sich z. B. durch eine Hinterlüftung des Absorptionsmaterials oder durch Einfügen einer Dampfsperre auf der Innenseite realisieren.

Die im Folgenden vorgestellten Materialien für die schallabsorbierende Gestaltung von Raumbegrenzungsflächen werden von einer großen Zahl von Lieferanten angeboten. Als Hilfe bei der Auswahl entsprechender schallabsorbierender Materialien kann die Lärmschutz-Information IFA-LSI 01-200 [18] dienen. Diese wurde erstellt, um Unternehmen, die Schallschutzmaßnahmen planen, beim Auffinden geeigneter Werkstoffe und Bauelemente zu unterstützen. Sie enthält neben den Lieferanten der hier angesprochenen schallabsorbierenden

Materialien auch die Lieferanten für andere Schallschutzmaterialien und Bauelemente, z. B. für Kapseln, Schalldämpfer, Türen und Fenster, aber auch Hersteller lärmgeminderter Werkzeuge.

5.2.2 Deckengestaltung

Die Deckenfläche ist häufig die Raumbegrenzungsfläche, die neben dem notwendigerweise schallharten Fußboden für die Mehrzahl der Arbeitsplätze die am nächsten gelegene Reflexionsfläche darstellt. Deshalb ist eine schallabsorbierende Deckengestaltung i. d. R. als vorrangige und besonders wirksame raumakustische Maßnahme anzusehen.

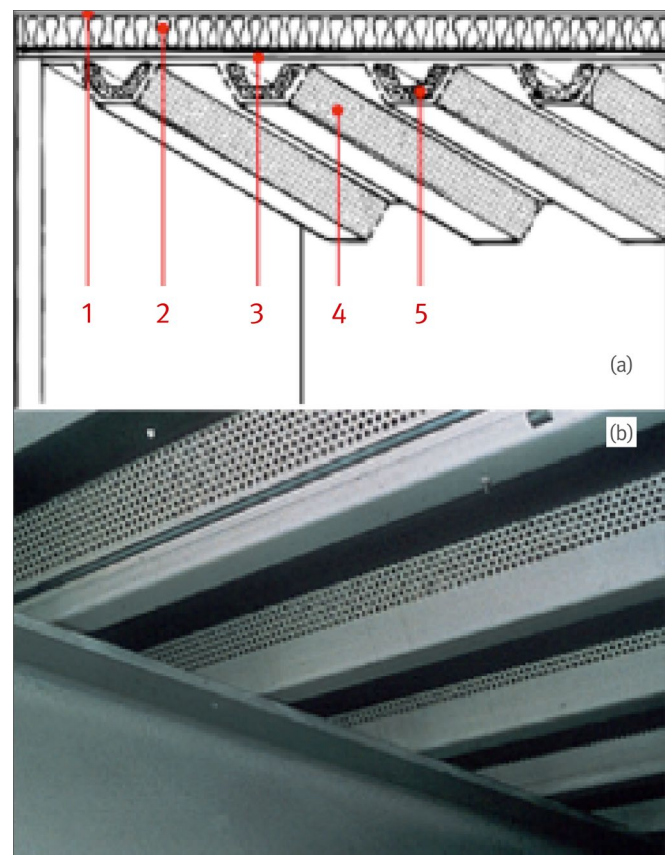


Abb. 5.6 Bei Neubau einer Halle realisierbarer schallabsorbierender Dachaufbau aus Lochtrapezblech

- a) Prinzipskizze mit (1) Dachhaut, (2) Dachdämmung, (3) Dampfsperre, (4) Stahltrapezprofil mit gelochten Stegen, (5) Absorptionsmaterial mit Rieselschutz,
- b) Foto einer Decke aus Lochtrapezblech.

Beim Neubau einer Halle lässt sich mit relativ geringem Zusatzaufwand eine schallabsorbierende Deckenkonstruktion realisieren. Abbildung 5.6 zeigt ein Beispiel für eine entsprechende Decke, wobei die schallabsorbierenden Eigenschaften der zur Wärmedämmung des Daches benutzten Mineralwolle ausgenutzt werden können. Allerdings begrenzt die notwendige Dampfsperre zur Vermeidung einer Taupunktunterschreitung innerhalb der Dachdämmung deren akustische Wirksamkeit auf tiefe Frequenzen. Um eine schallabsorbierende Deckenfläche zu realisieren, wird unterhalb der Dampfsperre Stahltrapezblech mit gelochten Stegen verwendet. Darin wird Absorptionsmaterial eingelegt, das die Schallabsorption bei mittleren und hohen Frequenzen übernimmt. Die mit einem solchen Aufbau erreichbare Schallabsorption hängt allerdings von der Lochung und den geometrischen Details der Stahltrapezprofile ab und sollte deshalb beim Hersteller der Profile erfragt werden.

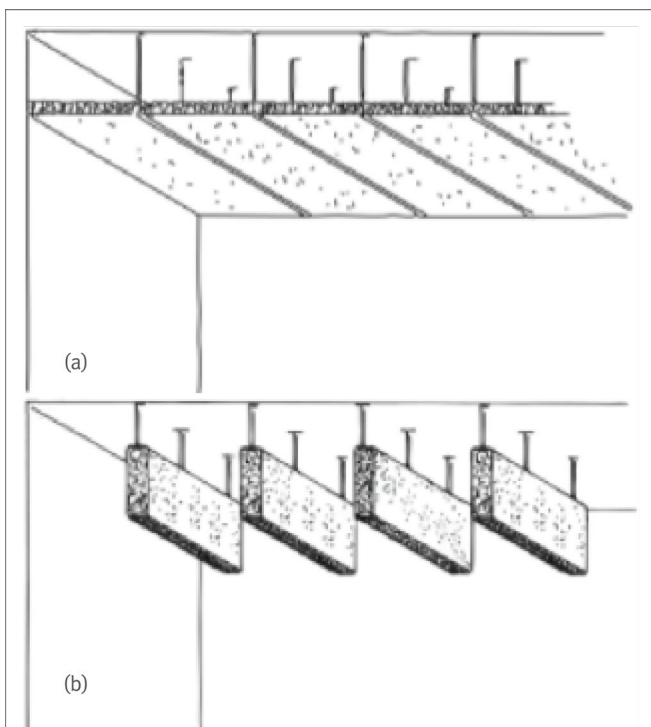


Abb. 5.7 Beispiele für geschlossene und offene Gestaltung schallabsorbierender Decken:

- (a) Abgehängte Deckenkonstruktion aus selbsttragenden Akustikplatten,
- (b) Kulissensystem.

Eine alternative Möglichkeit zur schallabsorbierenden Gestaltung sind horizontal abgehängte Decken, wie in Abbildung 5.7 unter (a) gezeigt. Als relativ kostengünstige Lösung bietet sich der Aufbau einer entsprechenden Decke aus selbsttragenden Akustikplatten aus Mineralfasermaterial an. Eine andere Möglichkeit bilden gelochte Paneelleisten mit aufgelegten Mineralwolleplatten. Hierbei ist wichtig, dass die freien Flächen zwischen den Paneelen zusammen mit gegebenenfalls vorhandenen Lochflächen in den Paneelen mindestens 30% der gesamten Deckenfläche ausmachen, um eine ausreichende Wirksamkeit des Absorptionsmaterials zu gewährleisten.

Zur Vermeidung einer Taupunktunterschreitung im Absorptionsmaterial kann es erforderlich sein, den Raum oberhalb der abgehängten Decke mit dem übrigen Luftvolumen des Raumes zu verbinden. Dies kann z. B. durch einen umlaufenden Abstand von 0,5 m bis 1 m der Absorptionsfläche zur Hallenwand und zu den Binderseitenflächen erreicht werden, ggf. unterstützt durch zusätzliche Freiflächen innerhalb der Absorberebene. So kann der Luft- und Wärmeaustausch erhalten bleiben, ohne dass aufwändige Variationen des Aufhängesystems erforderlich werden.

Alternativ lassen sich schallabsorbierende Deckenplatten auch ohne Abstand direkt an der Decke montieren, z. B. durch Kleben oder Verschrauben. Das gilt z. B. für Zwischendecken in Gebäuden, da hier mit keiner Taupunktunterschreitung zu rechnen ist. Da die direkte Montage des Materials auf der Raumbegrenzungsfläche entsprechend den zur Abbildung 5.3 gegebenen Erläuterungen eine geringere Schallabsorption erwarten lässt, insbesondere bei tiefen Frequenzen, sollte man in diesem Fall das Absorptionsmaterial besonders sorgfältig auswählen. So gibt es verschiedene, in der Regel etwas dickere Materialien, die auch bei direkter Montage tief-frequente Geräuschanteile relativ gut absorbieren.

Eine ebene Anordnung der Absorber ist in vielen Fällen ungünstig, z. B. weil dadurch der Lichteinfall über Oberlichter verhindert wird oder vorhandene Installationen, wie Lüftungssysteme, Brandmeldesysteme und Sprinkleranlagen, mit hohem Aufwand umgebaut werden müssten. Hier bieten die in Abbildung 5.7 unter (b) dargestellten Kulissensysteme eine Alternative. Die entsprechende Deckenkonstruktion lässt sich durch Abhängen von Absorberplatten, sogenannten Baffeln, oder von zylinderförmigen Absorbieren realisieren. Diese Konstruktion bietet auch den Vorteil, dass sich das

Absorptionsmaterial in der unmittelbaren Nähe der Lärmquellen konzentrieren lässt, um den Schall damit bereits im Bereich der Entstehung zu absorbieren und die Ausbreitung im Raum zu verringern.

Das Absorptionsvermögen eines Kulissensystems hängt ganz wesentlich von der Dichte der Anordnung der Absorberelemente ab. Die Hersteller geben die Absorptionsgrade in der Regel für bestimmte Abstände der Elemente zueinander an. Für plattenförmige Absorber empfiehlt sich im allgemeinen ein Reihenabstand, der ungefähr der ein- bis zweifachen Plattenhöhe entspricht. Die dichtere Anordnung ist dabei natürlich akustisch wirksamer, allerdings sind geringere Abstände als die einfache Plattenhöhe nicht sinnvoll und unverhältnismäßig teuer. Bei Realisierung einer Kulissen- decke muss man generell mit einer etwas geringeren Absorption bei tiefen Frequenzen unterhalb von 500 Hz rechnen, als bei einer abgehängten geschlossenen Decke.

ein Hohlraum (2) zwischen den Absorbieren und der Reflexionsfläche eingebaut werden, um den Absorptionsgrad bei tiefen Frequenzen zu verbessern. Neben den meist herstellerseitig angebrachten Kaschierungen zum Schutz der Schallabsorber (3) gegen Eindringen von Feuchtigkeit oder Ausrieseln von Material empfiehlt sich, vor allem im unteren Wandbereich, oftmals ein zusätzlicher mechanischer Schutz (4). Dazu eignen sich je nach Umgebungsbedingungen z. B. Lochziegel, Lochblech, Streckmetall oder gelochte Paneele, die von verschiedenen Herstellern für diese Zwecke angeboten werden. Um eine ausreichende Wirksamkeit des Absorptionsmaterials zu erhalten, sollte der mechanische Schutz einen Lochanteil von mindestens 30 % der Gesamtoberfläche aufweisen.

Abbildung 5.9 zeigt ein Beispiel für eine schallabsorbierende Wandgestaltung aus Lochziegeln sowie eine Konstruktion unter Verwendung von Lochblech.

5.2.3 Wandgestaltung

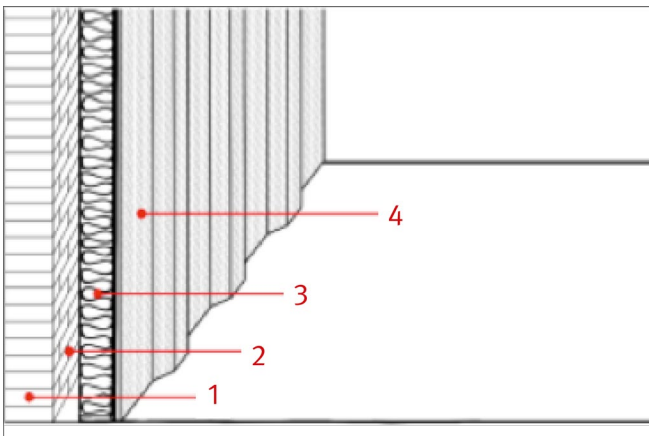


Abb. 5.8 Schematische Darstellung einer schallabsorbierenden Wand.
 (1) Schalldämmende Schale,
 (2) Hohlraum (optional),
 (3) Absorber mit Riesel- bzw. Feuchtigkeitsschutz,
 (4) Mechanischer Schutz mit mindestens 30 % Lochfläche (optional).

Ein Beispiel für den Aufbau einer schallabsorbierenden Wand ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Das äußere Bauteil ist eine geschlossene Schale (1), die die Schallübertragung durch die Wand (zum Nebenraum oder Außenbereich) dämmt. Bei Außenwänden beinhaltet diese Schale möglicherweise bereits eine Wärmeisolierung mit Dampfsperre. Auch bei Wänden kann optional

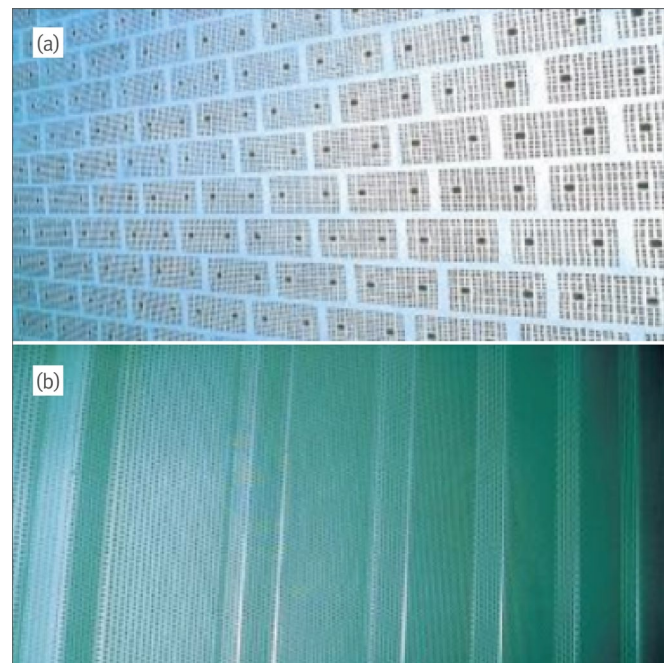


Abb. 5.9 Schallabsorbierende Wandgestaltung aus Lochziegeln (a) sowie eine Konstruktion unter Verwendung von Lochblech (b).

Gegen Lochziegel wird bei Staubbelastung häufig der Einwand erhoben, dass mit der Zeit eine starke Staubablagerung in den Löchern zu erwarten sei. Diese Vermutung hat sich in praktischen Anwendungsfällen nicht bestätigt. Lediglich am Locheingang kommt es nach mehreren Jahren zu geringfügigen Staubablagerungen. Das Lochinnere bleibt wegen der fehlenden Strömung praktisch staubfrei.

Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 erläutert besteht bei einer Außenwand jeweils die Gefahr einer Taupunktunterschreitung im Absorptionsmaterial. Deshalb kann ggf. ein zusätzlicher Aufwand gefordert sein, z. B. um eine Hinterlüftung zu realisieren.

5.3 Planung der Maßnahmen

5.3.1 Allgemeine Hinweise für die Planung

Da raumakustische Maßnahmen hohe Kosten verursachen können, empfiehlt es sich, das Material ganz gezielt und nur in den tatsächlich benötigten Mengen einzusetzen. Dabei ist die Ermittlung der notwendigen Menge davon abhängig, nach welchem Kennwert die Raumakustik ausgelegt wird.

Ob die Verwendung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ oder der mittleren Schallpegelabnahme je Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ zweckmäßig ist, hängt vor allem von den Abmessungen der Halle ab. Wie in Abschnitt 3.4 beschrieben eignet sich bei kleineren Hallen mit einem Volumen bis 1000 m³ am ehesten der mittlere Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$ zur Auslegung der Raumakustik, da die Anforderung an die Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung ($DL_{2,TRLV} \geq 4$ dB) bei kleinen Hallen schwer erreichbar ist. Bei Hallen mit einem Volumen von mehr als 10.000 m³ ist eine Auslegung nach dem mittleren Schallabsorptionsgrad nicht mehr empfehlenswert, da sich dann das Kriterium $DL_{2,TRLV} \geq 4$ dB mit wesentlich geringerem Aufwand realisieren lässt.

Bei Auslegung anhand des mittleren Schallabsorptionsgrads würde bei Hallen dieser Größe unverhältnismäßig viel Absorptionsmaterial benötigt. Bei Nutzung des mittleren Schallabsorptionsgrades $\bar{\alpha}$ zur Auslegung der Raumakustik lässt sich die benötigte Menge des Absorptionsmaterials relativ einfach bestimmen. Der Rechenweg dazu ist im folgenden Abschnitt 5.3.2 beschrieben. Bei Auslegung nach der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ sind zur Ermittlung der benötigten Menge an Absorptionsmaterial

deutlich aufwändigere Berechnungen notwendig, z. B. nach der VDI-Richtlinie 3760 [5, 13]. Für diese Zwecke werden verschiedene kommerzielle Programme angeboten. Ein Einblick in die Vorgehensweise zur Ermittlung der benötigten Menge an Absorptionsmaterial bei Auslegung der Raumakustik anhand der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ wird in Abschnitt 5.3.3 gegeben.

Nicht nur die Menge des Absorptionsmaterials, sondern auch dessen Positionierung hat einen Einfluss auf die mögliche Lärminderung. Daher ist auch zu bedenken, dass Absorber immer dann am effektivsten sind, wenn sie möglichst nah an der Lärmquelle angebracht werden. Befinden sich z. B. in der Halle einzelne besonders laute Maschinen, wird eine größere Lärminderung erreicht, wenn das Absorptionsmaterial in der Nähe dieser Maschinen konzentriert wird. Deshalb kann es z. B. sinnvoll sein, eine einzelne laute Maschine in einer Hallenecke zu positionieren und die benachbarten Wandbereiche zusätzlich zur Decke mit Schallabsorbem zu versehen.

Ist als Lärminderungsmaßnahme die Verwendung von Schallschirmen geplant, so sollte auch die Raumakustik in der Umgebung des Schirms besondere Beachtung finden. Wird der Schall durch nahe Oberflächen oberhalb oder seitlich des Schallschirms in den abzuschirmenden Bereich reflektiert, ergibt sich eine deutlich reduzierte Wirksamkeit des Schirms. Deshalb hat die schallabsorbierende Gestaltung von Raumbegrenzungsflächen in der Umgebung eines Schirms eine große Bedeutung für die erreichbare Lärminderung. Außerdem sollten die Schallschirme selbst zumindest auf der dem Lärm zugewandten Seite schallabsorbierend gestaltet sein.

In Einzelfällen kann es in kleinen Räumen durchaus sinnvoll sein, mittlere Schallabsorptionsgrade von $\bar{\alpha} > 0,3$ zu realisieren, weil damit eine weitergehende Pegelreduktion zu erreichen ist (siehe auch Beispiel in Abschnitt 6.4).

5.3.2 Vorgehen bei Auslegung nach dem mittleren Schallabsorptionsgrad $\bar{\alpha}$

Wird der mittlere Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ als Kriterium verwendet, so lässt sich der Aus- bzw. Nachrüstbedarf an Absorbern relativ einfach berechnen.

Im ersten Schritt empfiehlt es sich, die nach TRLV Lärm geforderte Sollabsorptionsfläche A_{Soll} zu berechnen. Diese ergibt sich aus dem geforderten mittleren Absorptionsgrad $\bar{\alpha}$ und der Summe der Raumbegrenzungsflächen S nach Gleichung (3.5):

$$A_{\text{Soll}} = \bar{\alpha} \cdot S = 0,3 \cdot S \quad (5.1)$$

Im nächsten Schritt kann dann die benötigte zusätzliche äquivalente Absorptionsfläche A_{Zus} berechnet werden, die in Form von Schallabsorbern einzubringen ist. A_{Zus} ergibt sich aus der Differenz zwischen der vorhandenen Absorptionsfläche A_{Ist} und der Sollabsorptionsfläche A_{Soll} :

$$A_{\text{Zus}} = A_{\text{Soll}} - A_{\text{Ist}} \quad (5.2)$$

Die vorhandene Absorptionsfläche A_{Ist} lässt sich entweder durch eine Rechnung mit absorbierenden Teilflächen gemäß Abschnitt 4.1.1 ermitteln, oder bei bestehenden Hallen auch durch eine Nachhallzeitmessung nach Abschnitt 4.1.2.

Die benötigte zusätzliche Fläche an Absorptionsmaterial S_{Zus} ergibt sich aus dem Verhältnis von A_{Zus} zum Absorptionsgrad α des Materials:

$$S_{\text{Zus}} = \frac{A_{\text{Zus}}}{\alpha} \quad (5.3)$$

Nach den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (TRLV Lärm) ist die Anforderung $\bar{\alpha} \geq 0,3$ für jede der Oktaven mit den Mittenfrequenzen 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz und 4000 Hz zu erfüllen. Deshalb ist die Rechnung für jede dieser Oktaven einzeln durchzuführen. Die größte der vier ermittelten Flächen S_{Zus} bestimmt die Menge des einzubringenden Absorptionsmaterials. In vielen Fällen ergibt sich diese Fläche aus der Rechnung für die tiefste betrachtete Frequenz, d. h. für 500 Hz, weil die bestehenden Räume und auch die einzusetzenden Materialien hier eine geringere Schallabsorption als bei höheren Frequenzen aufweisen. Dies ist im Einzelfall zu prüfen.

Beispiel:

Als Beispiel sei hier auf den in Abschnitt 4.1.1 betrachteten Raum zurückgegriffen. Die vereinfachte Rechnung mit über die Oktavbänder von 500 Hz bis 4000 Hz gemittelten Absorptionsgraden ergab hier einen mittleren Schallabsorptionsgrad von nur $\bar{\alpha} = 0,06$, d. h. es besteht offensichtlich ein deutlicher Nachrüstbedarf. Die Begrenzungsflächen dieses Raums ergaben zusammen eine Fläche von $S = 2840 \text{ m}^2$. Als vorhandene äquivalente Absorptionsfläche A_{Ist} wurden 165 m^2 ermittelt.

Im ersten Schritt ist nun die nach TRLV Lärm geforderte äquivalente Absorptionsfläche A_{Soll} nach Gleichung (5.1) zu berechnen:

$$A_{\text{Soll}} = 0,3 \cdot S = 0,3 \cdot 2840 \text{ m}^2 = 852 \text{ m}^2$$

Damit ergibt sich die hinzuzufügende äquivalente Absorptionsfläche A_{Zus} nach Gleichung (5.2) zu

$$A_{\text{Zus}} = A_{\text{Soll}} - A_{\text{Ist}} = 852 \text{ m}^2 - 165 \text{ m}^2 = 687 \text{ m}^2$$

Von den verschiedenen in der Tabelle 4.1 aufgelisteten Materialien sei nun für die Nachrüstung die Mineralfaser-Kulissendecke ausgewählt, für die ein über die Oktavbänder von 500 Hz bis 4000 Hz gemittelter Absorptionsgrad von 0,91 angegeben ist. Damit errechnet sich die mit diesem Material zu belegende Fläche nach Gleichung (5.3):

$$S_{\text{Zus}} = \frac{A_{\text{Zus}}}{\alpha} = \frac{687 \text{ m}^2}{0,91} = 755 \text{ m}^2$$

Nach dem vereinfachten Verfahren, d. h. auf der Basis von über die relevanten Oktavbänder gemittelten Absorptionsgraden, errechnet sich also für die nachzurüstende Mineralfaser-Kulissendecke eine erforderliche Fläche von 755 m^2 .

Bei genauerer Analyse der bestehenden raumakustischen Situation in den Oktavbändern von 500 Hz bis 4000 Hz sollten sich in Abhängigkeit von der Frequenz unterschiedliche nachzurüstende äquivalente Absorptionsflächen A_{Zus} errechnen. Nach Auswahl des einzusetzenden Absorptionsmaterials lässt sich dann die benötigte Materialmenge nach Gleichung (5.3) für jede Frequenz unter Berücksichtigung des jeweiligen Absorptionsgrades berechnen.

5.3.3 Vorgehen bei Auslegung nach der Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$

Für die Ermittlung der benötigten Menge an Absorptionsmaterial auf der Grundlage der Vorgaben der TRLV Lärm zur Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung $DL_{2,TRLV}$ sind Rechnungen erforderlich, die nicht mehr von Hand durchgeführt werden können. Die entsprechende Auslegung von Arbeitsräumen erfordert den Einsatz von spezieller Software, die die in Abschnitt 3.2 beschriebenen Schallausbreitungskurven von Räumen für die verschiedenen Oktaven berechnen können. Diese Programme erfordern zunächst die Eingabe der Raumabmessungen und der Absorptionsgrade der Begrenzungsflächen. Aus den berechneten Schallausbreitungskurven berechnen die Programme dann die Schallpegelabnahmen pro Abstandsverdopplung DL_2 für verschiedene Abstandsbereiche. Falls das Programm keine Ergebnisse für den nach den Technischen Regeln TRLV Lärm zu betrachtenden Abstandsbereich von 0,75 m bis 6 m liefert, kann alternativ das Ergebnis für den in der VDI-Richtlinie 3760 definierten Nahbereich (1 m bis 5 m) benutzt werden, da damit näherungsweise die gleichen Ergebnisse zu erwarten sind [6].

Mit Hilfe solcher Berechnungen von $DL_{2,TRLV}$ lässt sich die benötigte Menge an Absorptionsmaterial schrittweise annähern, z. B. indem man das Absorptionsvermögen der Raumbegrenzungsflächen im Berechnungsmodell durch Hinzufügen von Absorbern so lange erhöht, bis die Rechnung für alle vier Oktaven von 500 Hz bis 4000 Hz mittlere Pegelabnahmen $DL_{2,TRLV}$ von mindestens 4 dB ergibt.

6 Beispiele von raumakustisch günstig gestalteten Arbeitsräumen

6.1 Werkstatt mit selbstverklebtem Akustikschaumstoff

Das erste Beispiel zeigt eine relativ kostengünstige Lösung der schallabsorbierenden Nachrüstung eines Arbeitsraumes, die relativ leicht auch in Eigenleistung durch den entsprechenden Betrieb realisiert werden kann. Da das hier eingesetzte dünne Schaumstoffmaterial ohne Abstand direkt an der Decke des Raumes montiert wurde (Verklebung), lässt sich, wie bereits im Abschnitt 5.1 erläutert, damit allerdings bei tiefen Frequenzen keine gute Schallabsorption erreichen.

In einer Werkstatt ergaben sich vor allem durch Schweiß-, Schleif- und Richtarbeiten zeitweise hohe Lärmpegel mit Werten von mehr als 100 dB(A). Dies führte bei mehreren Mitarbeitern zu Tages-Lärmexpositionspegeln $L_{EX,8h}$ von mehr als 85 dB(A) und somit zu einer Überschreitung des oberen Auslösewertes der Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [1]. Die entsprechende Lärmsituation macht die Kennzeichnung als Lärmbereich sowie die Aufstellung und Durchführung von Lärminderungsmaßnahmen erforderlich (siehe hierzu IFA-LSA 01-305 [19]). Abbildung 6.1 zeigt den Grundriss der Werkstatt, die aus einer ca. 15 · 13 m² großen Haupthalle und einem angrenzenden ca. 10 · 8 m² großen Seitenschiff besteht. Die Haupthalle hat ein Satteldach mit einer Firsthöhe von ca. 7,5 m und einer Traufhöhe von ca. 5 m (mittlere Höhe 6 m), wobei im Firstbereich auf ca. 10 m Länge und ca. 4 m Breite Dachfenster angebracht sind. Das Seitenschiff hat ein 3,8 m hohes Flachdach.

Die größtenteils aus Kalksandstein und Beton aufgebauten Raumbegrenzungen waren alle schallhart. Die sich daraus ergebenden, ungünstigen raumakustischen Bedingungen waren auch subjektiv als spürbare Halligkeit wahrnehmbar und werden durch die in Tabelle 6.1 in Abhängigkeit von der Frequenz aufgelisteten raumakustischen Kennwerte bestätigt.

Oktavbandmittelfrequenz [Hz]	500	1000	2000	4000
$\bar{\alpha}$	0,09	0,10	0,11	0,15
$DL_{2,TRLV}$ [dB]	2,0	2,1	2,5	3,4

Tab. 6.1 Mittlere Schallabsorptionsgrade und Schallpegelabnahmen pro Abstandsverdopplung für die Werkstatt aus Abbildung 6.1 in der ursprünglichen Situation.

Zur Verbesserung der Raumakustik und Realisierung eines mittleren Absorptionsgrades von 0,3 wurde die Installation einer zusätzlichen äquivalenten Absorptionsfläche von 150 m² in der Haupthalle und einer zusätzlichen äquivalenten Absorptionsfläche von 60 m² im Seitenschiff berechnet. Für die Ermittlung der notwendigen Fläche des absorbierenden Materials wurde ein Schallabsorptionsgrad von $\alpha = 0,9$ angenommen, so dass eine zusätzliche Absorberfläche von ca. 230 m² ausreichen sollte.

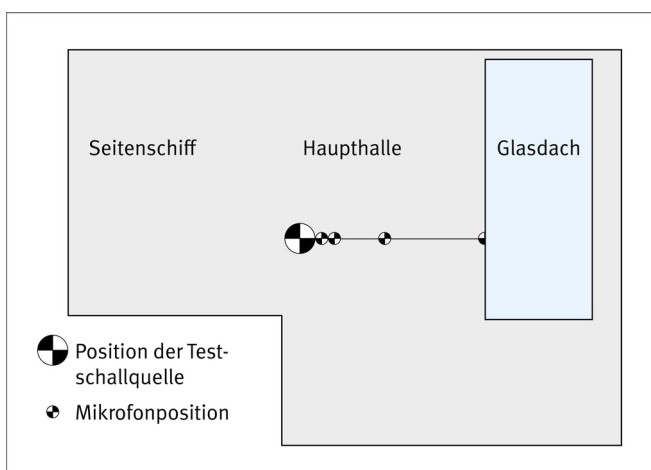


Abb. 6.1 Grundriss einer Werkstatt mit eingezeichnetem Messpfad zur Ermittlung von $DL_{2,TRLV}$.



Abb. 6.2 Direkt an Decke und Wände verklebte Absorber aus Melaminharzschaum mit gewellter Oberflächenstruktur.

Die Installation der Absorber wurde vom Betrieb selbst durchgeführt. Dabei kamen Akustikschaumstoffplatten mit strukturierter Oberfläche aus Melaminharz in einer Dicke von 45 mm zum Einsatz, die direkt auf die Decken- und Wandflächen geklebt wurden (siehe Abbildung 6.2). Wie bereits erwähnt ist diese Konstruktion bei Frequenzen unter 1000 Hz etwas weniger wirksam als eine abgehängte Decke. Es gibt jedoch verschiedene, in der Regel etwas dickere Materialien, die auch bei direkter Montage tieffrequente Geräuschanteile relativ gut absorbieren.

Oktavbandmittenfrequenz [Hz]	500	1000	2000	4000
$\bar{\alpha}$	0,25	0,30	0,33	0,35
$DL_{2,TRLV}$ [dB]	3,5	2,6	4,0	4,5

Tab. 6.2 Schallabsorptionsgrade und Schallpegelabnahmen pro Abstandsverdopplung für die Werkstatt aus Abbildung 6.1 nach Durchführung der raumakustischen Maßnahmen.

Die nach Durchführung der genannten Maßnahmen erreichte raumakustische Situation wird durch die entsprechenden Kennwerte in der Tabelle 6.2 beschrieben. Mit dem hier ausgewählten Absorbermaterial wurden demnach die Anforderungen der TRLV Lärm an die Schallabsorption ($\bar{\alpha} \geq 0,3$) in den Oktaven oberhalb von 500 Hz erfüllt. Bei 500 Hz ergab sich mit einem mittleren Absorptionsgrad von 0,25 eine etwas ungünstigere Situation, die jedoch in diesem Fall toleriert werden konnte, da in der Halle vorwiegend hochfrequente Geräuschquellen betrieben werden. Die erzielten Lärminderungen lagen je nach Arbeitsplatz zwischen 2 und 5 dB(A).

6.2 Kulissensystem für eine Sheddachhalle

In einer Werkstatt wurden in einem Arbeitsbereich mit Blechverarbeitung zeitweise hohe Schalldruckpegel erzeugt, die aufgrund ungünstiger raumakustischer Bedingungen in alle Arbeitsbereiche übertragen wurden. Dadurch ergab sich für alle Beschäftigten in der Werkstatt eine verhältnismäßig hohe Lärmbelastung.

Die Grundfläche der Werkstatt beträgt $33 \cdot 19,5 \text{ m}^2$. Die Sheddachkonstruktion mit fünf quer verlaufenden Sheds ergibt eine Raumhöhe zwischen 3,5 m an der Shedunterkante und 5,7 m an der Shedoberkante. Vor

Ausführung der raumakustischen Maßnahmen waren alle Raumbegrenzungsflächen schallhart (Blech- bzw. Glasflächen und Beton). Die zugehörigen Messwerte für $DL_{2,TRLV}$ für zwei unterschiedliche Pfade sind in Tabelle 6.3 zusammengestellt.

Oktavbandmittenfrequenz [Hz]	500	1000	2000	4000	
$DL_{2,TRLV}$ [dB]	Pfad 1	2,9	2,5	2,7	3,3
	Pfad 2	2,9	2,7	2,9	3,4

Tab. 6.3 Schallpegelabnahmen pro Abstandsverdopplung in einer Sheddachhalle mit schlechter Raumakustik (Ausgangssituation).

Zur raumakustischen Nachbesserung wurde eine schallabsorbierende Deckengestaltung vorgeschlagen. Da die Unterzüge zwischen den Sheds wegen der Licht- und Heizungsinstallation nicht schallabsorbierend belegt werden konnten, wäre eine direkte schallabsorbierende Flächenbelegung lediglich auf den senkrechten Shedflächen sowie den Stirnflächen der Sheds möglich gewesen, entsprechend einer Gesamtfläche von ca. 235 m^2 (ca. 25 % der verbauten Deckenfläche). Zusätzlich zum geringen Belegungsgrad wären bei dieser Maßnahme die senkrechten Shedflächen nur aus einer Richtung direkt beschallt worden. Dies hätte nur in einer Richtung eine nennenswerte Verringerung der Schallpegelabnahme ergeben.

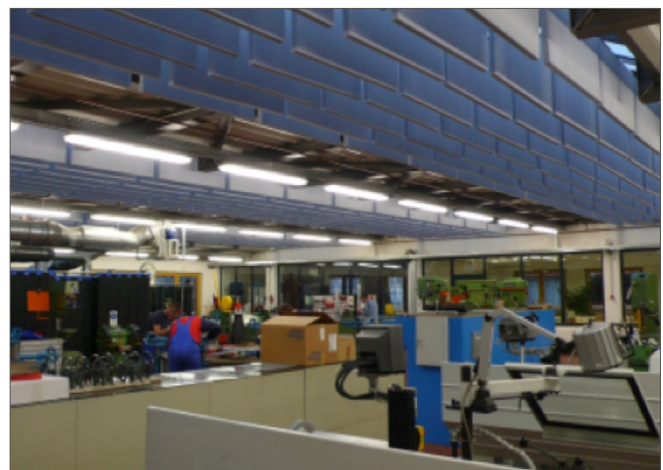


Abb. 6.3 Anordnung von Kulissensystemen zur Verbesserung der Raumakustik einer Sheddachhalle.

Oktavbandmittenfrequenz [Hz]		500	1000	2000	4000
$DL_{2,TRLV}$ [dB]	Pfad 1	4,2	4,1	3,8	4,1
	Pfad 2	4,1	3,9	4,0	4,4

Tab. 6.4 Schallpegelabnahmen pro Abstandsverdopplung in der Sheddachhalle nach Durchführung der raumakustischen Maßnahmen.

Deshalb wurden in den fünf Shedöffnungen der Decke jeweils Kulissensysteme mit acht Reihen Akustikplatten aus Melaminharzschäum in Höhe der Deckenunterzüge vertikal aufgehängt (siehe Abbildung 6.3). Die Achsabstände zwischen den Reihen von 0,4 m entsprechen dabei jeweils der Höhe der Absorberplatten. Die damit erreichte raumakustische Situation ist durch die auf zwei Messpfaden ermittelten $DL_{2,TRLV}$ -Werte in Tabelle 6.4 beschrieben. Damit werden die nach TRLV Lärm geforderten mittleren Pegelabnahmen $DL_{2,TRLV}$ von mindestens 4 dB auf beiden Pfaden für die meisten Frequenzen erreicht. Die geringen Unterschreitungen der Vorgaben liegen im Bereich der Messunsicherheit und können toleriert werden. Im Vergleich zu der ursprünglichen Situation in der Halle (siehe Tabelle 6.3) konnten vor allem in größerer Entfernung zu dem Bereich der Blechverarbeitung deutliche Lärminderungen erreicht werden. Der Lärmbereich ließ sich dadurch auf die unmittelbare Umgebung der lautesten Arbeitsplätze eingrenzen.

6.3 Raumakustische Maßnahmen in Verbindung mit Abschirmungen

In einer überwiegend aus Beton- und Glasflächen gebildeten, ca. 14 · 11,5 m² großen und ca. 7 m hohen Halle waren ohne räumliche Unterteilung Arbeitsplätze mit stark unterschiedlicher Geräuschabstrahlung angeordnet (Abbildung 6.4). Wie aus den in der Tabelle 6.5 zusammengestellten raumakustischen Kennwerten abzulesen ist, bestand hier eine sehr ungünstige Situation mit mittleren Schallabsorptionsgraden von ca. 0,1 bis 0,15. Insbesondere die zeitweilig ausgeführten Richtarbeiten sowie die Schmiedearbeiten konnten Schalldruckpegel von mehr als 100 dB(A) verursachen. Um diese Situation wirksam zu verbessern, wurden in diesem Beispiel verschiedene Maßnahmen, wie Raumtrennung und raumakustische Maßnahmen, miteinander kombiniert.

Als Maßnahmen boten sich die Auslagerung der Schmelde und der hydraulischen Presse an, ferner die Zusammenfassung von Schleif- und Richtarbeiten in einer schallabsorbierend gestalteten Kabine, wie in der Grundrisskizze in Abbildung 6.5 gezeigt. Dabei wurde dieser abzutrennende Bereich mit hochabsorbierenden Innenwand- und Deckenflächen in eine Raumecke verlegt.

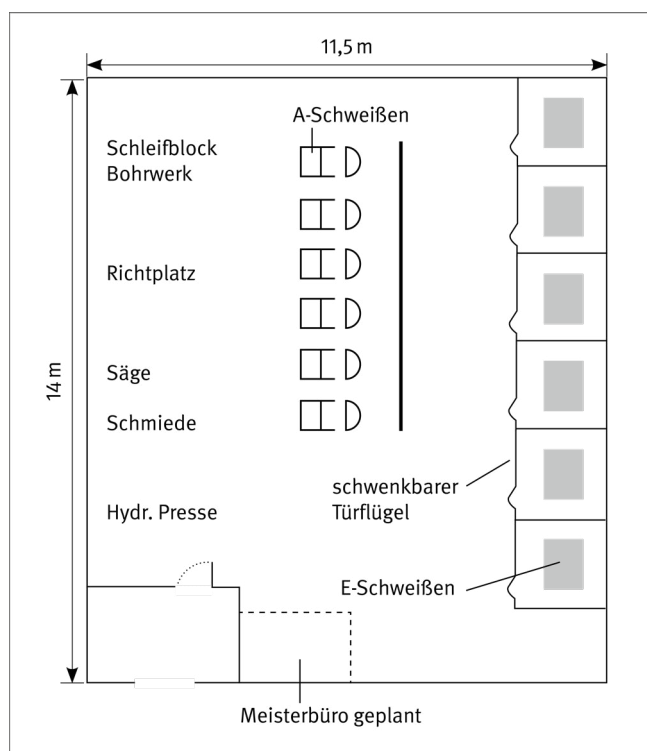


Abb. 6.4 Hallengrundriss im Ausgangszustand der lärmbehafteten Halle.

Oktavbandmittenfrequenz [Hz]	500	1000	2000	4000
$\bar{\alpha}$ (vorher)	0,10	0,11	0,13	0,15
$\bar{\alpha}$ (nachher)	0,42	0,39	0,39	0,37

Tab. 6.5 Mittlere Schallabsorptionsgrade der Halle aus Abbildung 6.4 vor und nach Durchführung der raumakustischen Maßnahmen.

Im Zusammenhang mit den Baumaßnahmen wurden die raumakustischen Verhältnisse der gesamten Halle nachgebessert. Angesichts der 7 m hohen Decke und der Nähe der Arbeitsplätze zu den Wänden wurde einer schallabsorbierenden Wandgestaltung gegenüber einer schallabsorbierenden Decke der Vorzug gegeben.

Dabei wurde auch die Abschirmung vor den Autogenschweißplätzen (A-Schweißen) mit Schallabsorbieren versehen. Sämtliche schallabsorbierend gestalteten Wandbereiche sind in Abbildung 6.5 entsprechend gekennzeichnet.

In den kleinen Elektroschweißkabinen wirken sich die Schallreflexionen der unmittelbar umgebenden Wandflächen bzw. Abschirmungen sehr stark auf den Gesamtpegel aus. Daher wurden nicht nur alle drei gemauerten Wände, sondern auch der rückwärtige schwenkbare Türflügel schallabsorbierend gestaltet.

Durch die großflächige Installation von schallabsorbierenden Flächen an den Wänden und Abschirmungen konnte die Gesamtsituation in dem Raum ganz wesentlich verbessert werden, so dass die in den Technischen Regeln TRLV Lärm geforderten mittleren Schallabsorptionsgrade deutlich übertroffen wurden (siehe Tabelle 6.5). In Verbindung mit der Einhausung des Schleif- und Richtplatzes sowie der Auslagerung besonders lauter Arbeiten ergaben sich z. B. für die Elektroden-Schweißer Pegelminderungen von 15 dB(A). Für die Richt- und

Schleifarbeitsplätze in der abgetrennten Kabine wurden immerhin noch Pegelminderungen von 8 dB(A) ermittelt.

6.4 Lehrwerkstatt mit Motorenprüfstand

In einer Kfz-Lehrwerkstatt, in der jeweils Probeläufe von Motoren durchgeführt werden, kam es durch die hohen Lärmemissionen der Motoren in Kombination mit den allseits schallharten Raumbegrenzungsflächen aus Beton bzw. Mauerwerk zu hohen Schalldruckpegeln von ca. 103 dB(A). Da die für die Ausbildung notwendigen Unterweisungen an den Motoren unter den gegebenen Bedingungen nicht möglich waren, mussten hier geeignete Schallschutzmaßnahmen realisiert werden.

Die relativ kleine Halle hat eine Grundfläche von $18 \cdot 6 \text{ m}^2$, eine Deckenhöhe von 3,5 m und beinhaltet drei Motorenprüfstände. Die mittleren Schallabsorptionsgrade des ursprünglichen Raumes sind in Tabelle 6.6 gelistet.

Oktavbandmittenfrequenz [Hz]	500	1000	2000	4000
$\bar{\alpha}$ (vorher)	0,07	0,08	0,09	0,11
$\bar{\alpha}$ (nachher)	0,65	0,62	0,58	0,54

Tab. 6.6 Mittlere Schallabsorptionsgrade der Lehrwerkstatt vor und nach schallabsorbierender Gestaltung der Decken und Wände.

Aufgrund der Raumabmessungen und der ungünstigen Ausgangssituation sind raumakustische Maßnahmen hier besonders effektiv. Deshalb wurden in diesem Fall neben der raumakustischen Deckengestaltung, womit sich bereits die Vorgaben der TRLV Lärm bezüglich Schallabsorption ($\bar{\alpha} \geq 0,3$) erfüllen ließen, auch eine schallabsorbierende Gestaltung aller vier Wände realisiert. Für die Decke wurde ein Aufbau aus gelochtem Stahltrapezblech mit hinterlegter Mineralwolle gewählt. Die Wände wurden durch Lochziegel mit hinterlegter, foliengeschützter Mineralwolle aufgebaut. Zusätzlich wurden zwischen den Motoren beidseitig schallabsorbierende Abschirmwände aufgestellt, um die Geräuscheinwirkungen von den benachbarten Prüfständen zu verringern. Abbildung 6.6 zeigt den entsprechend optimierten Raum mit Blick auf einen Prüfstand. Die durch diese Maßnahmen erzielten mittleren Schallabsorptionsgrade sind in Tabelle 6.6 in der unteren Zeile dargestellt.

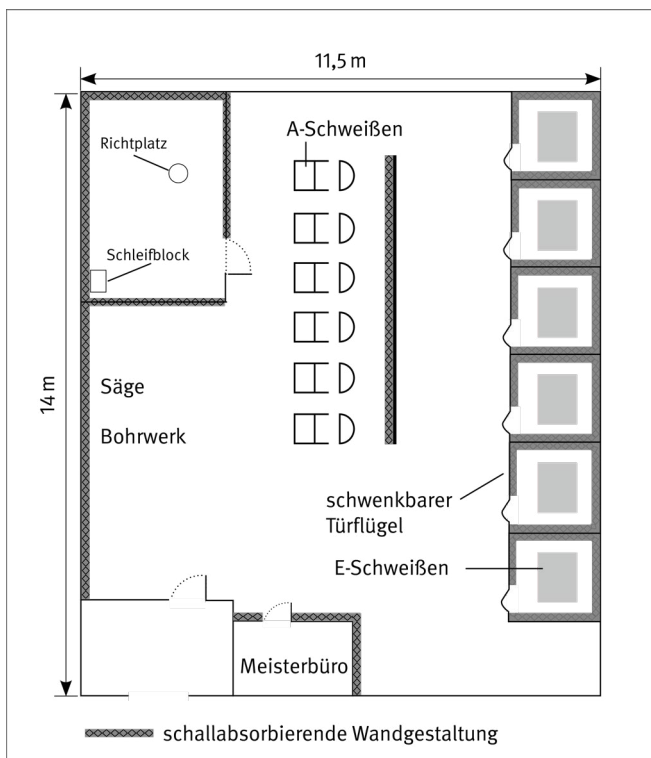


Abb. 6.5 Hallengrundriss nach raumakustischer Nachrüstung und Realisierung von Abschirmungen.

Durch die raumakustischen Maßnahmen und die Abschirmungen ließen sich in der Nähe der Prüfstände Pegelminderungen von ca. 6 dB(A), in größerer Entfernung (ca. 3 m) sogar von ca. 12 dB(A) erreichen. Berechnungen nach VDI 3760 belegen, dass durch eine schallabsorbierende Decke alleine, wie sie nach TRLV Lärm ausgereicht hätte, nur Pegelminderungen von ca. 3 dB(A) in Maschinennähe und von ca. 6 dB(A) in größerer Entfernung erreicht worden wären.

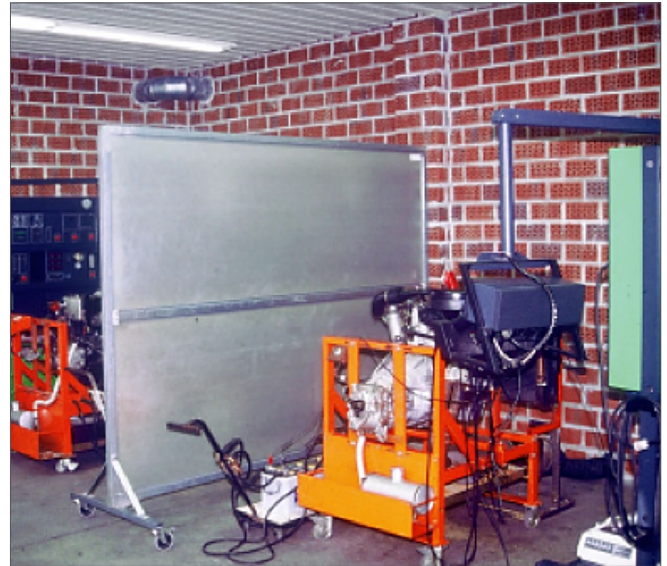


Abb. 6.6 Kfz-Lehrwerkstatt mit Motorenprüfständen nach schallabsorbierender Gestaltung von Decke und Wänden. Gezeigt ist ebenfalls eine beidseitig absorbierende Abschirmwand.

7 Zusammenfassung

In industriellen Arbeitsräumen lässt sich der Reflexionsschall an den Raumbegrenzungsflächen durch raumakustische Maßnahmen reduzieren, so dass oftmals eine deutliche Minderung der Lärmbelastung für die Beschäftigten zu erreichen ist. Insbesondere bei Neubauten ist eine akustisch optimale Gestaltung der Raumbegrenzungsflächen zu empfehlen, da eine schallabsorbierende Nachrüstung mit deutlich höheren Kosten verbunden ist. Aber auch in bestehenden Arbeitsräumen kann eine raumakustische Nachbesserung als flankierende oder gar alleinige Lärminderungsmaßnahme sinnvoll sein.

Bei der Gestaltung von schallabsorbierenden Raumbegrenzungsflächen werden meistens offenporige Absorber aus Mineralfasern oder Schaumstoffen eingesetzt. Um ein Ausrieseln von Mineralfasern zu verhindern, werden solche Absorber mit Kaschierungen, z. B. aus Vliesen oder dünnen Folien, versehen. Je nach Ausführung können diese Kaschierungen auch einen Schutz der Absorber vor Beschädigung oder dem Eindringen von Feuchtigkeit bieten.

Die Anforderungen an eine gute Raumakustik richten sich nach dem Stand der Technik, der in den Technischen Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung anhand von zwei raumakustischen Kennwerten beschrieben wird. Als Kennwerte sind danach der mittlere Schallabsorptionsgrad und die mittlere Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung zu beachten.

Für die Auslegung von kleinen bis mittelgroßen Hallen mit einem Volumen bis ca. 1000 m^3 eignet sich vor allem der mittlere Schallabsorptionsgrad. Damit lässt sich die Menge des benötigten Schallabsorptionsmaterials für neue Hallen relativ leicht berechnen. Für bestehende Hallen ist zunächst die gegebene Situation zu erfassen, um dann die notwendige Materialmenge für die Nachrüstung zu berechnen.

Für mittelgroße und große Hallen mit einem Volumen über 10.000 m^3 empfiehlt sich dagegen eine Auslegung mit Blick auf die geforderte mittlere Schallpegelabnahme pro Abstandsverdopplung. Für die Berechnung der benötigten Menge an Schallabsorptionsmaterial sind bei Verwendung dieses Kennwerts allerdings aufwändigere Rechenverfahren anzuwenden. Mit Hilfe geeigneter Software kann man die Schallausbreitung für einen Arbeitsraum und den entsprechenden raumakustischen Kennwert berechnen, z. B. nach der VDI-Richtlinie 3760. Die raumakustische Gestaltung der Halle bzw. die Menge an Absorptionsmaterial ist dann schrittweise so lange zu variieren, bis die Rechnung die nach TRLV Lärm vorgegebenen Werte der Schallpegelabnahme ergibt. Daraus lässt sich dann die erforderliche Materialmenge für die akustische Gestaltung bzw. für die Nachrüstung eines Arbeitsraumes ermitteln.

Literatur

- [1] **Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen** (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – LärmVibrationsArbSchV), Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261) die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 5 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist.
- [2] **DGUV Information 215-443: Akustik im Büro - Hilfe für die akustische Gestaltung von Büros**, Hrsg. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV); Berlin, 2019.
- [3] **Hertwig, R.:** Akustische Raumgestaltung von Callcentern, IFA-Handbuch: Berlin. 2010.
▶ https://www.ifa-handbuchdigital.de/IFA-HB_230228
- [4] **Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung** – TRLV, Teil Lärm. GMBI Nr. 34-35 vom 05. September 2017.
- [5] **VDI 3760:1996-02**, Berechnung und Messung der Schallausbreitung in Arbeitsräumen.
- [6] **Maue, J. H.:** Reflexionsarme Arbeitsräume nach UVV Lärm, Sicherheitsingenieur 23 (1992) Nr. 4, S. 16-22.
- [7] **DIN EN ISO 354:2016-03**, Akustik – Messung der Schallabsorption in Hallräumen (ISO 354:2003); Deutsche Fassung EN ISO 354:2003.
- [8] **DIN EN ISO 11654:1997-07**, Akustik – Schallabsorber für Anwendungen in Gebäuden – Bewertung der Schallabsorption (ISO 11654:1997); Deutsche Fassung EN ISO 11654:1997.
- [9] **DIN 18041:2016-03**, Hörsamkeit in Räumen – Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise für die Planung.
- [10] **DIN EN 12354-6:2004-04**, Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 6: Schallabsorption in Räumen; Deutsche Fassung EN 12354-6:2003.
- [11] **DIN EN ISO 3382-2:2008-09**, Akustik – Messung von Parametern der Raumakustik – Teil 2: Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen (ISO 3382-2:2008); Deutsche Fassung EN ISO 3382-2:2008.
- [12] **DIN EN ISO 14257:2011-11**, Akustik – Messung und Parametrisierung der Schallausbreitungskurven in Arbeitsräumen zum Zweck der Beurteilung der akustischen Qualität (ISO 14257:2001); Deutsche Fassung EN ISO 14257:2001.
- [13] **Maue, J. H.:** Erfahrungen mit Lärmprognosen für Arbeitsräume unter Anwendung der VDI-Richtlinie 3760. Sicherheitsingenieur 29 (1998), Nr. 10, S. 16-22 und Nr. 11, S. 22-24.
- [14] **DIN EN ISO 6926:2016-08**, Akustik – Anforderungen an die Eigenschaften und die Kalibrierung von Vergleichsschallquellen für die Bestimmung von Schallleistungspegeln (ISO 6926:2016); Deutsche Fassung EN ISO 6926:2016.
- [15] **DIN EN 61672-1:2014-07**, Elektroakustik – Schallpegelmesser – Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2013); Deutsche Fassung EN 61672-1:2013.
- [16] **Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung – GefStoffV)**, Gefahrstoffverordnung vom 26. November 2010 (BGBl. I S. 1643, 1644), die zuletzt durch Artikel 148 des Gesetzes vom 29. März 2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist.
- [17] **Handlungsanleitung zu Gefahrstoffen: Umgang mit Mineralwoll-Dämmstoffen (Glaswolle, Steinwolle)** (2018), Hrsg.: Berufsgenossenschaft der Bauwirtschaft (BG BAU).
- [18] **Lärmschutz-Information IFA-LSI 01-200: Bezugsquellenverzeichnis für lärmgeminderte Werkzeuge und Materialien**,
▶ <https://www.dguv.de> mit dem Webcode d1181784.
- [19] **Lärmschutz-Arbeitsblatt IFA-LSA 01-305: Geräuschminderung im Betrieb – Lärmreduzierungsprogramm**, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV); Berlin, 2019.

**Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)**

Glinkastraße 40

10117 Berlin

Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)

Fax: 030 13001-9876

E-Mail: info@dguv.de

Internet: www.dguv.de