

Suva

Arbeitssicherheit
Postfach, 6002 Luzern
www.suva.ch

Auskünfte

Tel. 041 419 61 34

Bestellungen

www.suva.ch/waswo
Fax 041 419 59 17
Tel. 041 419 58 51

Titel

Lärmbekämpfung durch Kapselungen

Verfasser

Walter Lips, Bereich Physik

Titelbild

Das Prinzip der Kapselung finden wir auch in der Natur.
Der stachelige Mantel schützt den Kern der Kastanie vor schädlichen
Einflüssen von aussen. Bei der Kapselung von Maschinen ist es
gerade umgekehrt: Geschützt wird hier die Umgebung, und zwar
vor zu viel Lärm.

Abdruck – ausser für kommerzielle Nutzung – mit Quellenangabe gestattet.

Erstausgabe: November 1989

Überarbeitete Ausgabe: März 2010

Bestellnummer

66026.d (nur als PDF-Datei erhältlich)

Inhalt

Einleitung	2	6	Berechnung einer Kapselung	15	
1	Allgemeines	3	6.1	Abschätzverfahren	15
1.1	Lärmbekämpfungsmassnahmen	3	6.2	Genaueres Berechnungsverfahren	15
1.2	Bauarten von Kapselungen	3	6.2.1	Aufgabenstellung	15
1.3	Beispiele für zu kapselnde Maschinen	3	6.2.2	Berechnungsgrundlagen	16
2	Funktionsprinzip und Einflussgrössen	4	6.2.3	Berechnung	16
2.1	Reflexionen an der Kapselinnenwand	4	6.2.4	Wahl der Kapselung	16
2.2	Luftschalldämmung der Kapselwand	4	6.3	Zusammenfassung	16
2.3	Messung der Wirksamkeit einer Kapselung	4	7	Kosten-Nutzen-Überlegungen	17
2.4	Dämmverluste durch Öffnungen und Undichtigkeiten	5	7.1	Allgemeines	17
2.5	Körperschallübertragungen	5	7.2	Erfahrungswert	17
2.6	Weitere Begriffe	5	8	Beispiele	18
2.7	Zusammenfassung	5	8.1	Gute Beispiele	18
3	Anforderungen an Kapselungen	7	8.1.1	Kunststoffmühle	18
3.1	Allgemeine Anforderungen	7	8.1.2	Schraubenverpackungsanlage	18
3.2	Schalltechnische Anforderungen	7	8.1.3	Ultraschallschweissmaschine	19
3.2.1	Wirksamkeit einer Kapselung	7	8.1.4	Falzapparat an Rotationsdruckmaschine	20
3.2.2	Schalldämmung	8	8.1.5	GFK-Rohrschleuderanlage	20
3.2.3	Schallabsorption	8	8.1.6	Teilkapselung einer Exzenterstanzmaschine	21
4	Konstruktive Hinweise	9	8.1.7	Press- und Montageautomat	21
4.1	Allgemeines	9	8.1.8	Kommandoräume	22
4.2	Konstruktionsmerkmale	9	8.1.9	Hydraulikaggregat	23
4.3	Festlegung der Abmessungen	10	8.1.10	Stanzautomat	23
4.4	Entdröhnen	10	8.1.11	Teilkapselung einer Doppelgehrungs-kreissäge	24
4.5	Schallabsorbierende Auskleidung	10	8.1.12	Integrierte Kapselung	25
4.6	Abdeckung des Absorptionsmaterials	10	8.2	Unbefriedigende Beispiele	25
4.7	Versteifung des Kapselaufbaus	10	8.2.1	Gesenkschmiedepresse	25
4.8	Öffnungen und Dichtungen	11	8.2.2	Peltonturbinen	26
4.8.1	Belüftungs- und Entlüftungsöffnungen	11	8.2.3	Kunststoffmühle	27
4.8.2	Öffnungen für Materialzufuhr und -entnahme	11	8.2.4	Buchbindereimaschine	28
4.8.3	Abdichtung beim Übergang zwischen Kapselwand und angrenzenden Bauteilen	12	9	Bestellung der Kapselung	29
4.8.4	Türen, Fenster und Klappen	12	10	Schlussbemerkung	30
4.9	Prototypen und Teilkapselungen	12	Dank	31	
5	Ausführungsbeispiele Kapselwandung	13	Literaturverzeichnis	31	
5.1	Spezialfirmen	13	Anhang	32	
5.2	Einschaliger Wandaufbau	13	Muster einer Offert- und Bestellspezifikation für schalldämmende Kapselungen		
5.3	Zweischaliger Wandaufbau	14			

Einleitung

Es gibt eine ganze Reihe von Lärmquellen, bei denen die Schallausbreitung nur mit Hilfe einer schalldämmenden Kapselung eingeschränkt werden kann. Es sind dies vor allem Maschinen mit grosser Arbeitsleistung, hohen Drehzahlen oder Drücken sowie Hilfsaggregate. In solchen Fällen ist die schalldämmende Kapselung (im Folgenden Kapselung genannt) oft die einzige Möglichkeit, den Schallpegel deutlich zu verringern. Kapselungen werden aber auch in jenen Fällen eingesetzt, wo es um die Beeinträchtigung benachbarter Arbeitsplätze durch niedrigere Schallpegel geht (z. B. EDV-Anlagen wie leistungsfähige Drucker, Rechner usw.) oder um sehr hohe Frequenzen (z. B. Ultraschallanlagen). Speziell geeignet für den Einsatz von Kapselungen sind automatisch betriebene Maschinen und Anlagen.

Die vorliegende Publikation soll einen Überblick vermitteln über die Probleme beim Bau von Kapselungen. Auch die Grenzen des technisch Machbaren und des finanziell Tragbaren werden darin aufgezeigt.

Der Inhalt wurde so zusammengestellt, dass auch der Praktiker im Betrieb mit Hilfe dieser Broschüre Probleme beurteilen und Lösungen finden kann. Es handelt sich nicht um eine wissenschaftliche Arbeit, sondern um ein «Rezeptbuch» für den Alltag!



Bild 1: Gekapselter Zuschneidautomat für Holzplatten.

1 Allgemeines

1.1 Lärmbekämpfungsmassnahmen

Die Lärmbekämpfungsmassnahmen an einer Lärmquelle gliedern sich in drei Hauptgruppen:

- Massnahmen zur Reduktion der Schallentstehung
- Massnahmen zur Reduktion der Schallübertragung
- Massnahmen zur Reduktion der Schallabstrahlung

Diese drei Hauptgruppen werden auch als Primärmassnahmen bezeichnet, weil sich all diese Anstrengungen zur Lärmbekämpfung auf die eigentliche Quelle konzentrieren (inkl. Schallabstrahlung). Eine Kapselung hat aber die Aufgabe, den von einer Maschine abgestrahlten Schall bezüglich seiner Ausbreitung zu reduzieren. Aus diesem Grund wird die Kapselung zuweilen auch als Sekundärmassnahme bezeichnet.

1.2 Bauarten von Kapselungen

Es wäre falsch oder zumindest eine unzulässige Vereinfachung, Kapselungen ganz allgemein als «schalldichte Kisten» zu bezeichnen. Je nach Bauart werden drei Arten von Kapselungen unterschieden:

- Vollkapselungen
- Teilkapselungen
- In die Maschinenkonstruktion einbezogene Kapselungen (integrierte Kapselungen)

Diese Unterscheidung wird bei der Grobbeurteilung eines Problems bereits erste Lösungsmöglichkeiten aufzeigen.

1.3 Beispiele für zu kapselnde Maschinen

Die Einsatzmöglichkeiten für Kapselungen sind ausserordentlich vielfältig. Wenn Sie am Abend Ihre tickende Uhr in die Schublade des Nachttischchens legen, damit sie nachts ungestört schlafen können, kapseln Sie diese Lärmquelle. Im Extremfall ist auch eine schwere, geschlossene Gebäudehülle, beispielsweise eine Wasserkraftwerkzentrale, eine Kapselung. Zwischen diesen beiden Beispielen liegen jene Fälle, mit denen wir uns hier befassen wollen (Voll- und Teilkapselungen):

- Bearbeitungsautomaten in der Metall-, Holz- und Kunststoffindustrie
- Abfüll- und Verpackungsautomaten in der chemischen Industrie, in der Lebensmittel- und Metallwarenindustrie
- Kompressoren (stationär und mobil), Gebläse
- Hydraulikaggregate und -pumpen
- Motoren (Elektro-, Benzin-/Diesel-, Gasmotoren), stationär und mobil
- Pumpen
- Troval- und Reinigungsanlagen, Zentrifugen
- Ultraschallschweissanlagen und -bäder
- Montageautomaten
- Fabrikationslinien
- Prüfstände allgemein
- Vibrationsförderer
- Stanz- und Pressautomaten
- Schneidmühlen, Hackmaschinen
- Sandstrahlanlagen
- Spinn- und Wickelautomaten, Webmaschinen in der Textilindustrie
- Schleif- und Schärfmaschinen für Werkzeuge
- Druckmaschinen, Falz- und Zusammentragmaschinen in der Papier- und Druckindustrie
- EDV-Anlagen (Plattenspeicher, Drucker)
- Dampf- und Gasturbinen
- Wärmeerzeugungsanlagen (Öfen, Brenner)
- Fertigungsanlagen in der Zementwarenindustrie

Sie sehen, es gibt eine Fülle von Anwendungsmöglichkeiten! Bei sehr grossen Anlagen, z. B. bei Kraftwerken, Stahl- und Walzwerken, Giessereien usw., wird nicht die Lärmquelle gekapselt, sondern der Mensch: Man baut schallgedämmte Stellerräume. Darauf soll hier aber nicht näher eingegangen werden.

2 Funktionsprinzip und Einflussgrößen

2.1 Reflexionen an der Kapselinnenwand

Der von der Schallquelle ausgehende Luftschall trifft auf die Oberfläche der Kapselinnenwand und wird dort – je nach Absorptionsvermögen – mehr oder weniger stark reflektiert (siehe Bild 2). Die Reflexionen haben innerhalb der Kapselung eine Pegelerhöhung zur Folge. Bei schallharten Oberflächen (z. B. Stahlblech) kann der Pegel so stark erhöht werden, dass die Wirksamkeit der Kapselung teilweise aufgehoben wird. Deshalb ist eine wirkungsvolle Schallabsorption der Kapselinnenwand sehr wichtig.

Das Mass für die Absorptionsfähigkeit einer Materialoberfläche ist der Schallabsorptionsgrad α_s . Er gibt die Fähigkeit eines Materials an, den Schall zu «schlucken». α_s liegt üblicherweise zwischen 0 und 1, wobei Werte über 1 (bis etwa 1,2) möglich sind. Grundsätzlich gilt: Je höher der Schallabsorptionsgrad α_s , desto besser die Absorption. Absorbierende Schichten sind porös und meistens relativ leicht (z. B. Mineralfaserplatten, Glas- und Steinwolle usw.); vgl. Ziff. 3.2.3.

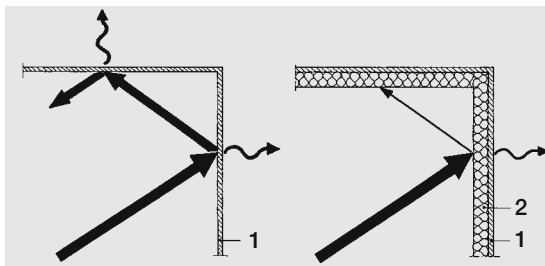


Bild 2: Reflexion (links) und Absorption (rechts) an Kapselinnenwand.

- 1 Kapselwand für die Luftschalldämmung
- 2 Absorptionsschicht

2.2 Luftschalldämmung der Kapselwand

Wie stark der Schallpegel durch eine geschlossene und schallabsorbierend ausgekleidete Kapselung reduziert wird, hängt im Wesentlichen von der Luftschalldämmung der Kapselwand ab. Der theoretisch mögliche Wert wird aber in der Praxis nur selten erreicht, da Öffnungen und Undichtigkeiten die Schalldämm-

ung beeinflussen (siehe Bild 3). Zur Erzielung einer hohen Luftschalldämmung braucht man schwere oder mehrschalige Systeme (z. B. Bleche, Holzplatten usw.).

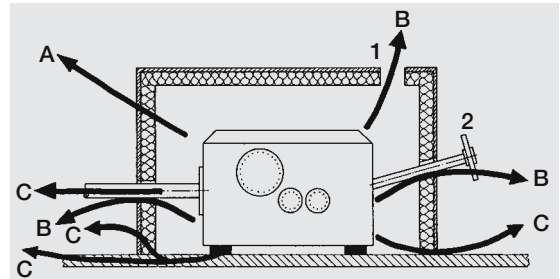


Bild 3: Beispiel für die Schallübertragungswege einer Kapselung.

1 Lüftungsöffnung

2 Bedienelemente

Weg A: Luftschallübertragung über die Kapselwand

Weg B: Luftschallübertragung über Undichtigkeiten und Öffnungen

Weg C: Körperschallübertragung und Abstrahlung als Luftschall

2.3 Messung der Wirksamkeit einer Kapselung

Die Wirksamkeit einer Kapselung wird üblicherweise mit dem Einfügungsdämm-Mass D_{pA} angegeben. Man misst an einem oder mehreren Beurteilungspunkten ausserhalb der Kapselung den Schallpegel ohne Kapselung (L_Q) und mit Kapselung (L_K):

$$D_{pA} = L_Q - L_K \text{ [dB]} \quad \text{[GL 1]}$$

Die Messungen können in Terz- oder Oktavbandanalyse oder bei einer einfachen Abschätzung allenfalls nur in dB(A) durchgeführt werden. Die Messmethode und die entsprechenden Randbedingungen sind ausführlich beschrieben in der Norm EN ISO 15667 (2000), Akustik – Leitfaden für den Schallschutz durch Kapseln und Kabinen.

2.4 Dämmverluste durch Öffnungen und Undichtigkeiten

Die auf Grund des Kapselaufbaus maximal mögliche Pegelreduktion wird in den meisten Fällen nicht erreicht, da verschiedene unvermeidbare Öffnungen und Undichtigkeiten das Resultat verschlechtern:

- Öffnungen zur Be- und Entlüftung
- Öffnungen für Materialzufuhr und -entnahme
- Öffnungsflächen bei Rohr- oder Wellendurchführungen
- Undichte Stossstellen zwischen Kapselwand und angrenzenden Bauteilen
- Undichte Stossstellen zwischen einzelnen Kapselteilen
- Undichte Türen, Reparatur und Beobachtungsöffnungen

Die maximal erzielbare Pegelreduktion durch eine Kapselung hängt nicht nur vom Aufbau der Kapselwand (Luftschalldämmung), sondern in besonders starkem Masse vom gesamten freien Querschnitt S_f der Öffnungen ab (Beispiele siehe Tabelle 1). Mit S_f bezeichnet man die Summe aller Öffnungen (Angabe in % der gesamten Kapseloberfläche).

Summe aller Öffnung S_f	Erzielbares Einführungs-dämmmass bei einem optimalen Wandaufbau D_{pA}
0,01 %	ca. 40 dB
0,1 %	ca. 30 dB
1 %	ca. 20 dB
10 %	ca. 10 dB

Tabelle 1: Maximal erzielbare Pegelreduktion in Funktion des freien Querschnittes.

2.5 Körperschallübertragungen

Wird der Luftschallpegel einer Schallquelle überwiegend durch den Körperschall der Anlage bestimmt, reduziert dies die erzielbare Wirkung der Kapselung weiter (siehe Bild 3, Weg C). Mögliche Übertragungswege für Körperschall sind:

- Fehlende oder ungenügende Körperschalldämmung der Lagerung
- Starre Verbindung der Schallquelle mit der Kapselwandung

Der so übertragene Körperschall wird schliesslich als Luftschall ausserhalb der Kapselung abgestrahlt.

2.6 Weitere Begriffe

Im weiteren werden auch folgende Begriffe verwendet:

f = Frequenz [Hz]

c = Schallgeschwindigkeit [m/s], in Luft
bei 20° C: $c = 340$ m/s

λ = Wellenlänge [m]

L_W = Schalleistungspegel [dB]

L_{WA} = A-bewerteter Schalleistungspegel [dB]

T = Nachhallzeit [s], Mass für die Halligkeit

S = Fläche [m²]

A = Schallabsorptionsfläche [m²]

2.7 Zusammenfassung

Zu einer guten Kapselung gehören eine angepasste Luftschalldämmung, eine wirkungsvolle Schallabsorption an der Innenseite, möglichst kleine Öffnungen und eine auf die Verhältnisse abgestimmte Körperschalldämmung (siehe Bild 4).

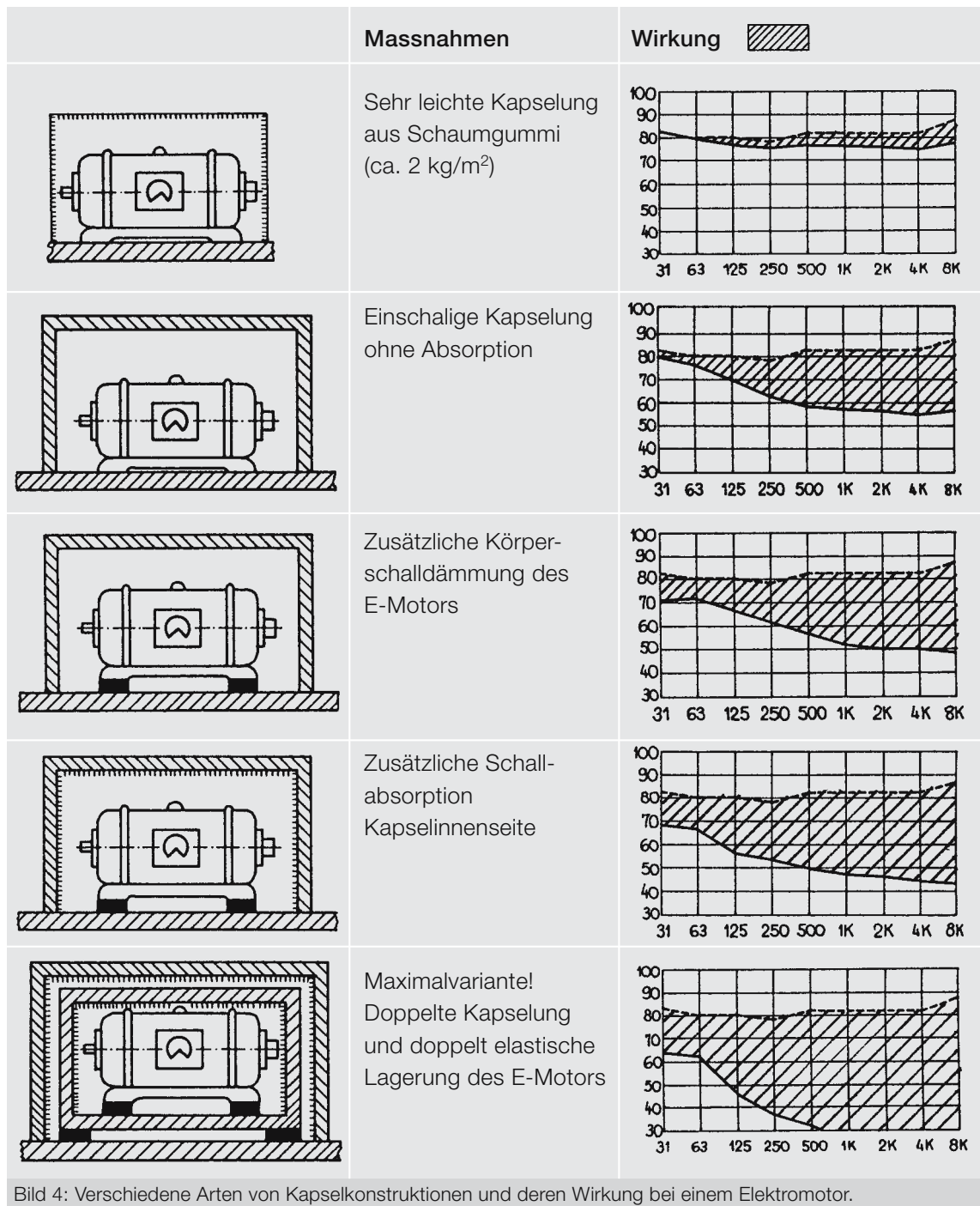


Bild 4: Verschiedene Arten von Kapselkonstruktionen und deren Wirkung bei einem Elektromotor.

3 Anforderungen an Kapselungen

3.1 Allgemeine Anforderungen

Bei der Konstruktion einer Kapselung ist auf folgende Punkte zu achten:

- Hinreichende, den Verhältnissen angepasste Luftschalldämmung des Kapselmaterials
- Wirksam absorbierende Auskleidung (unbrennbar, widerstandsfähig, nicht fasernd, lässt sich allenfalls reinigen)
- Schalltechnisch dichte Konstruktion (Dichtungen bei Klappen und Türen)
- Schalldämpfer bei Materialzu- und -wegführung
- Keine Körperschall- oder Schwingungsübertragungen von der zu kapselnden Maschine auf die Kapselung
- Prüfen, ob die zu kapselnde Maschine auf Schwingungsdämmelementen gelagert ist oder allenfalls gelagert werden soll
- Leicht bedienbare Türen und Klappen, evtl. Schliesshilfen
- Zuverlässige Wärmeabfuhr (Energiebilanz aufstellen, Beleuchtung nicht vergessen)
- Gute Beleuchtung des Arbeitsbereiches (Leuchtstoff- oder Halogenlampen)
- Überwachungsmöglichkeit der Maschine im geschlossenen Zustand der Kapselung (Fenster, TV-Kamera)
- Optimale Bedienbarkeit der gekapselten Maschine oder Anlage für eine möglichst geringe Leistungseinbusse
- Einfache Wartung (z. B. leicht demontierbar, aufklappbar, mit Kran abhebbar, problemloser Ersatz defekter Teile usw.)
- Sicherheitsgerechte Konstruktion

Und ausserdem:

- Seien Sie mutig bei der Farbgebung; es muss ja nicht immer Standardgau oder -grün sein!
- Machen Sie einen Kostenvergleich: Stellen Sie der Kostenberechnung für einen Eigenbau auch die Offerte einer Spezialfirma gegenüber.

3.2 Schalltechnische Anforderungen

Nebst allgemeinen Anforderungen wie Dichtigkeit usw. gibt es spezielle schalltechnische Anforderungen, die an das Kapselmateriale gestellt werden. Zwei dieser speziellen Anforderungen sollen herausgegriffen werden: die Schalldämmung und die Schallabsorption. Es soll auch gezeigt werden, wie gross die Wirksamkeit einer Kapselung sein muss.

3.2.1 Wirksamkeit einer Kapselung

Von einer Kapselung können auch bei bestmöglicher Konstruktion keine akustischen Wunder erwartet werden. Die Angaben in Tabelle 2 sind Erfahrungswerte für das Einfügungsdämmmass D_{pA} .

Die in Tabelle 2 aufgeführten Werte dürfen keinesfalls unterschritten werden.

Hauptsächlicher Frequenzbereich der Lärmquelle*	Einführungsdämm-Mass D_{pA} für Vollkapselungen		
	Kleine Maschinen	Mittlere Maschinen	Grosse Maschinen und Anlagen
tief	15 dB	10 dB	5–10 dB
mittel	20–25 dB	15–20 dB	10–20 dB
hoch	25–40 dB	10–30 dB	15–25 dB
	Teilkapselung		
tief	0	0	0
mittel	5 dB	5 dB	5 dB
hoch	10 dB	5–10 dB	5 dB

Tabelle 2: Erfahrungswerte für das Einfügungsdämm-Mass D_{pA} .

* tief: 125 bis 500 Hz

mittel: 1'000 bis 2'000 Hz

hoch: > 4'000 Hz

3.2.2 Schalldämmung

In den meisten Fällen dürfte es genügen, für eine Kapselung Material mit einem bewerteten Bauschalldämm-Mass von $R'_w = 25\text{--}30$ dB zu verwenden. Sind vor allem tiefe Frequenzen durch eine Kapselung zu reduzieren (z. B. bei Transformatoren), müssen Elemente mit entsprechender Schalldämmung verwendet werden. Unter Ziffer 4 werden praktische Lösungsvorschläge dargestellt.

Die meisten Hersteller von Kapselungen können das bewertete Bauschalldämm-Mass für ihre Produkte angeben.

3.2.3 Schallabsorption

Bei einer Kapselung ist es besonders wichtig, dass die dem Lärm zugewandte Innenseite schallabsorbierend ausgeführt wird. Hierbei soll der mittlere Absorptionsgrad $\bar{\alpha}_s \geq 0,8$ betragen. Sind ausschliesslich hohe Frequenzen zu reduzieren (z. B. Ultraschallanlagen), genügt es, wenn dieser Wert ab etwa 1000 Hz erfüllt wird (kleinere Schichtdicken möglich). Auch hierzu werden unter Ziffer 4 Lösungsvorschläge aufgezeigt.

In Tabelle 3 werden die Absorptionsgrade einiger Materialien angegeben.

Material	Absorptionsgrad $\bar{\alpha}_s$ bei der Frequenz Hz						$\bar{\alpha}_s$
	125	250	500	1000	2000	4000	
50 mm Steinwolleplatten, 85 kg/m ³ (z. B. Flumroc)	0,18	0,77	1,01	1,04	0,97	0,97	0,82
50 mm Glasfaserplatten, 55 kg/m ³ (z. B. Isover)	0,22	0,83	1,06	1,02	0,98	0,95	0,81
30 mm offenporige Schaumstoffplatten, 30 kg/m ³ , strukturierte Oberfläche (z. B. pinta acoustic, Nauer, Sigerist)	0,15	0,31	0,73	1,05	0,88	0,97	0,68

Tabelle 3: Absorptionsgrade $\bar{\alpha}_s$.

4 Konstruktive Hinweise

4.1 Allgemeines

Der Wandaufbau einer Kapselung (siehe Bild 5) ist in seinen Grundzügen immer gleich.

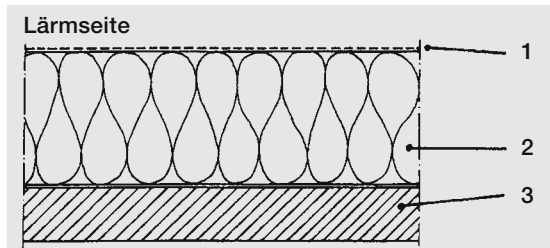


Bild 5: Prinzipieller Wandaufbau einer Kapselung.

- 1 Abdeckung des Absorptionsmaterials (Lochblech, Streckmetall usw.)
- 2 Absorptionsmaterial
- 3 Trägerplatte und Material für die Schalldämmung

Die Trägerplatte kann aus folgenden Materialien ausgeführt werden:

- Einfachblech oder Holzplatte
- Mehrschichtblech
- Verbundblech
- Einfachblech mit schwerer, biegeweicher Dämmschicht (z. B. Bleifolie)
- Einfachblech mit Entdröhnbelag

Um hohe Dämmwerte zu erzielen, muss ein zweischaliger Wandaufbau gewählt werden (siehe Bild 6).

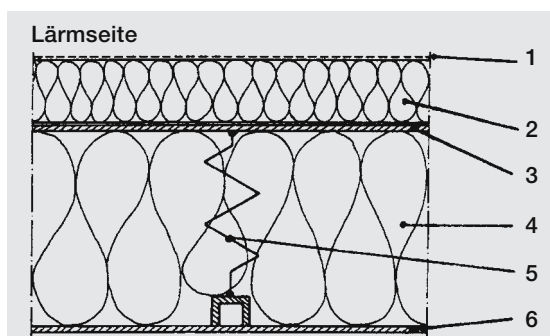


Bild 6: Prinzipieller zweischaliger Wandaufbau.

- 1 Abdeckung des Absorptionsmaterials
- 2 Absorptionsmaterial
- 3 Innenwand
- 4 Absorptionsmaterial
- 5 Elastische Verbindungselemente
- 6 Aussenwand

4.2 Konstruktionsmerkmale

In Tabelle 4 sind die Konstruktionsmerkmale verschiedener Kapselkonstruktionen zusammengestellt.

Nr.	Wandaufbau	kg/m ² ¹⁾	Zulässiger freier Querschnitt S_f ²⁾	Körperschalldämmung der Schallquelle ³⁾	D_{pA} dB(A)
1	Einschalig, ohne Absorption	5–15	< 5 %	Keine oder einfache Lagerung	5–15
2	Einschalig, mit Absorption	5–15	< 0,5 %	Einfache elastische Lagerung	7–25
3	Einschalig, mit Absorption	20–25	< 0,1 %	Einfache elastische Lagerung	10–30
4	Zweischalig, mit Absorption, oder schwere einschalige Kapsel, gemauert	10–20	< 0,01 %	Doppelt elastische Lagerung oder einfache Lagerung mit Fundamenttrennung	20–40
5	Zweischalig, mit Absorption, oder schwere einschalige Kapsel, gemauert	20–30	Möglichst vermeiden	wie Nr. 4	30–50

Tabelle 4: Konstruktionsmerkmale verschiedener Kapselkonstruktionen.

¹⁾ Flächengewicht ohne Tragkonstruktion, schallabsorbierende Auskleidung und Abdeckung

²⁾ Ohne Öffnungen mit Schalldämpfern (z. B. für Belüftung)

³⁾ Nicht notwendige Massnahmen, falls es nur um Strömungsgeräusche geht