EMPA

Wir forschen und prüfen für Sie

ERFA-Seminar 25. Februar 2002

Zur lärmarmen Konstruktion von Wärmpepumpenanlagen

K. Baschnagel, EMPA Dübendorf

1. **Einleitung**
2. **Kapseln, Schallschutzhauben**
3. **Schalldämpfer**
4. **Körperschallisolation**
5. **Rohrleitungen**
6. **Schematischer Aufbau lärmarm konstruierter Wärmepumpenanlagen**

1. Einleitung

Es ist immer am besten, wenn die Lärmbekämpfung an der Quelle ansetzt. Nachträgliche Schallschutzmassnahmen sind meistens viel teuerer und oft technisch gar nicht mehr machbar. Schliesslich ist eine - in einem Prüfbericht ausgewiesene - geringe Schallabstrahlung sicher auch ein gutes Werbe- und Verkaufsargument. Im übrigen verlangt es die Eidgenössischen Lärmschutzverordnung, dass, so weit technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar, ein Gerät eingesetzt wird, welches möglichst wenig Lärm erzeugt[1].

Wenn die Grundsätze der lärmarmen Konstruktion von Beginn weg in die Planung einbezogen werden, sollte ein leiseres Gerät nicht bedeutend teurer zu stehen kommen. Auf jeden Fall wird es günstiger, wenn Massnahmen gegen die Lärmabstrahlung mit Fachwissen ergriffen werden.

Lärmarme Konstruktion von Wärmepumpen kann sich auf bewährte Regeln der Lärmbekämpfung stützen, wie sie z.B. in den deutschen Richtlinien VDI[2] und in Fachbüchern[3] beschrieben sind. Im vorliegenden Aufsatz kann lediglich ein Einstieg in die Problematik vermittelt werden. Hilfe erhält der Konstrukteur nicht nur aus Fachbüchern sondern auch aus Dokumentationen von Firmen oder direkt von einem kompetenten Akustiker.

Bevor einzelne konstruktive Massnahmen diskutiert werden, lohnt es sich, die Möglichkeiten der Schallentstehung und -ausbreitung bei Wärmepumpen zu studieren.

Luftschall

Beim Luftschall handelt es sich um mechanische Schwingungen, die z.B. von vibrierenden Strukturen wie Maschinenteilen und von ausströmenden Gasen direkt an die Luft übertragen werden. Die Schallenergie gelangt dann über das Medium Luft an das Ohr des Empfängers (*Abb. 1)*.

Abb. 1 Ausbreitung von Luftschall

Körperschall

Mechanische Schwingungen, verursacht durch Wechselkräfte werden in Strukturen wie Maschinen- und Gebäudeteile eingeleitet und in diesen Medien übertragen (*Abb. 2)*. Schliesslich wird ein Teil dieser Energie an einem anderen Ort als Luftschall abgestrahlt.

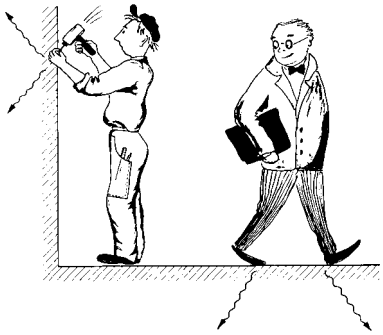

Abb. 2 Ausbreitung von Körperschall

Luft- und Körperschall

Oft wird der Schall als Kombination von Luft- und Körperschall abgestrahlt. (*Abb. 3)*.

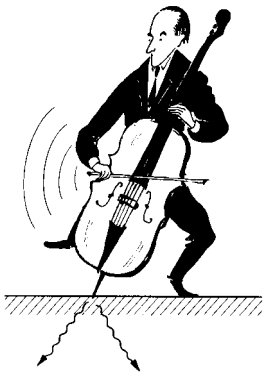

Abb. 3 Ausbreitung von Luft und Körperschall

---

[1] Eggenschwiler K., Lärm von Wärmepumpen, Heizung und Lüftung, Nr. 5, 1996.

[2] z.B. VDI 3720, Blatt 1 - 9, Lärmarm Konstruieren.

[3] Schirmer W., Technischer Lärmschutz VDI, Düsseldorf, 1996.
Lips W., Strömungsakustik in Theorie und Praxis, Expert Verlag, Band 474.
Schallschutz in Haustechnikanlagen. Impulsprogramm Haustechnik. Bundesamt für Konjunkturfragen., Form. 724.621, EDMZ 1988.

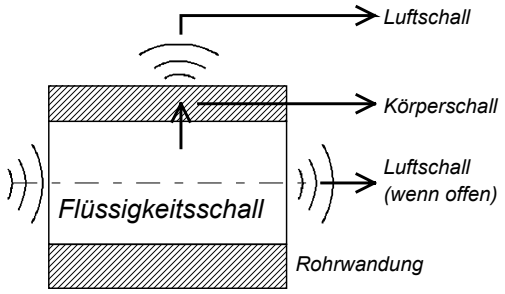

Abb. 4 Übertragungswege und Umwandlungen von Flüssigkeitsschall

2. Kapseln (Schallschutzhauben)[4]

Kapseln oder Schallschutzhauben sind erforderlich, wenn der abgestrahlte ***Luftschall*** zu Störungen führt (z.B. bei Luft/Wasser-Wärmepumpen im Freien, oder bei sehr lauten oder störenden, innen aufgestellten Wärmepumpen.)

In *Abb. 5* ist eine *idealisierte* Kapsel dargestellt, an der die Grundmechanismen studiert werden können.

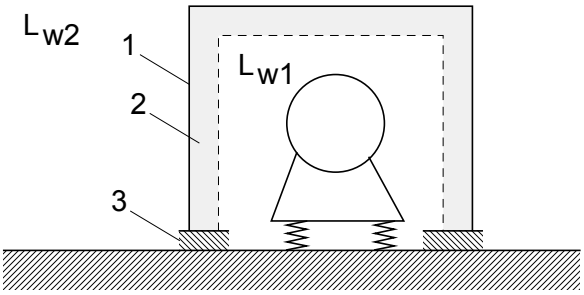

Abb. 5 Kapsel (1 Kapselwand, 2 schallabsorbierende Innenverkleidung, 3 körperschalldämmende, dichte Auflage)

Die akustische Wirkung wird bestimmt durch die Schalldämmung der Wandung und den Schallabsorptionsgrad der Auskleidung. Bei der von der Maschine mit und ohne Kapsel angestrahlten Schalleistung ergibt sich idealerweise der folgende Zusammenhang:

$$L_{w2} = L_{w1} - R + 10 * \log\left(\frac{1}{\alpha}\right)$$

L_{w1} = In die Kapsel abgestrahlte Schalleistung

L_{w2} = Von der Kapsel abgestrahlte Schalleistung

R = Schalldämmung der Kapselwand

α = Schallabsorptiongrad der vollflächigen Auskleidung

Beispiel:
Kapsel mit und ohne Auskleidung: Die abgestrahlte Schalleistung ist um 18 dB geringer wenn die Kapsel schallabsorbierend ausgekleidet ist.

L_{w1} = 100 dB (Schalleistung der Maschine in der Kapsel)
R = 30 dB (Schalldämmung der Kapselwand)

$\alpha = 0.01$ (ohne Auskleidung in Kapsel)

$$\Rightarrow 10 \cdot \log\left(\frac{1}{0.01}\right) = 20 \text{ dB}$$

$$\Downarrow$$

$$L_{w2} = 100 - 30 + 20 = 90 \text{ dB}$$

$\alpha = 0.6$ (mit Auskleidung in Kapsel)

$$\Rightarrow 10 \cdot \log\left(\frac{1}{0.6}\right) = 2$$

$$\Downarrow$$

$$L_{w2o} = 100 - 30 + 2 = 72 \text{ dB}$$

Es muss beachtet werden, dass die Wirkung der Kapsel stark frequenzabhängig ist. Die tiefen Frequenzen werden weniger gedämmt als die hohen.

Bei der realen Kapsel sind die Verhältnisse etwas komplizierter. Es gibt Verluste durch Undichtigkeiten bei den Anschlüssen und Durchführungen sowie durch Körperschallübertragungen.

Eine gute Kapselung zeichnet sich aus durch:

- eine den Verhältnissen angepasste Luftschalldämmung,
- eine wirkungsvolle Schallabsorption auf der Innenseite,
- möglichst kleinen Öffnungen gegen aussen
- abgestimmte Körperschallisolation.

3. Schalldämpfer[5]

Bei lüftungstechnischen Anlagen sind häufig Schalldämpfer erforderlich, so auch bei Luft/Wasser-Wärmepumpen. Schalldämpfer müssen je nach Verwendungszweck optimiert und berechnet werden.

Es gibt verschiedene Bauarten von Schalldämpfern. Gemeinsam sind die Kenngrössen die beachtet werden müssen:

- Durchgangsdämpfung (frequenzabhängig)
- Druckverlust
- Eigengeräusch
- Bauvolumen
- Standfestigkeit (Alterungsbeständigkeit)

Zwei Bauformen von Absorptionsschalldämpfern finden sich in *Abb. 6a* und *6b*.

[4] Lips, W., Lärmbekämpfung durch Kapselung, SUVA, Luzern (Bestellnr. 66026).
VDI 2711, Schallschutz durch Kapselung.

[5] VDI 2567, Schallschutz durch Schalldämpfer.

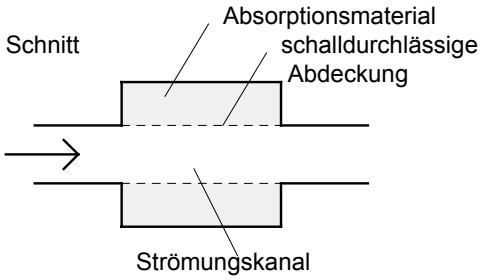

Abb. 6a Zylindrischer Absorptionsschalldämpfer

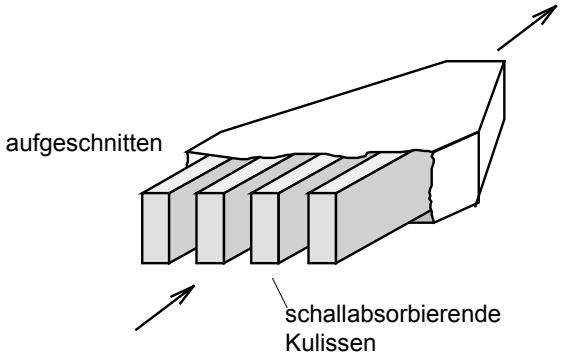

Abb. 6b Kulissenschalldämpfer (einseitig aufgeschnitten)

Ein Beispiel einer Durchgangsdämpfung, aufgetragen in Funktion der Frequenz, ist in *Abb. 6c* zu finden. Der zugehörige Schalldämpfer weist die höchste Dämpfung in den Oktavbändern 1 und 2 kHz auf, während er bei tiefen Frequenzen viel weniger wirkungsvoll ist.

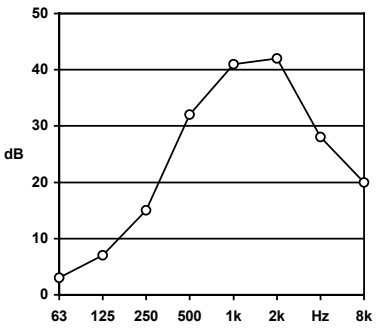

Abb. 8 Beispiel der Durchgangsdämpfung eines Absorptions-Schalldämpfers

Die starke Frequenzabhängigkeit der Durchgangsdämpfung muss bei der Dimensionierung des Schalldämpfers dem Schallspektrum des zu dämpfenden Geräusches gegenübergestellt werden. Zur Dämpfung von tiefen Frequenzen sind besondere, meistens aufwendige Massnahmen wie Resonatoren oder sehr lange Dämpfer erforderlich. Bei Ventilatoren ist es deshalb oft einfacher, das Geräusch dem Schalldämpfer anzupassen als umgekehrt. So ist beispielsweise das mittel- bis hochfrequente Geräusch eines Axialgebläses einfacher zu dämpfen als das leisere aber tieffrequente Geräusch eines Radialgebläses.

4. Körperschallisolation[6]

Die wirksamste Massnahme gegen Körperschallübertragung ist die elastische Lagerung oder Abfederung des Schwingungserzeugers. Die Funktionsweise sei anhand des bekannten Feder-Masse-Schwingers kurz erklärt.

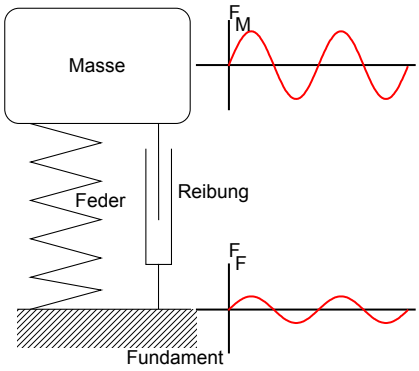

Abb. 7 Feder-Masse-Schwinger mit Reibung

Wenn das Verhältnis gebildet wird von der ins Fundament eingeleiteten Kraft F_F zu der die Masse bewegenden Kraft F_M, dann ergibt sich in Funktion der Frequenz der folgende Verlauf:

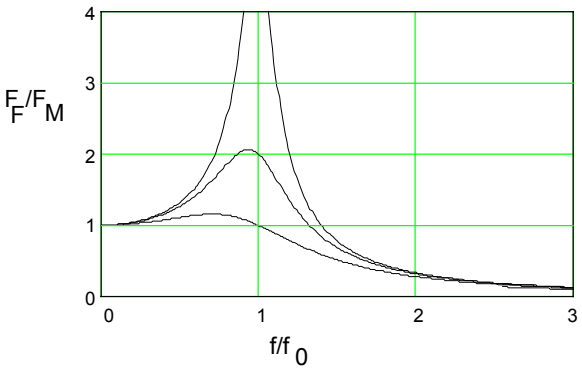

Abb. 8 Verhältnis F_F/F_M für verschiedene Dämpfungen (Reibung) in Funktion zur normierten Frequenz f/f_o. f ist die Erregerfrequenz und f_o die Resonanzfrequenz des Feder-Masse-Schwingers.

Entscheidend ist, dass die ins Fundament eingeleitete Kraft nur dann geringer wird als die anregende Kraft, wenn die Erregerfrequenz einiges höher ist als die Resonanzfrequenz des Systems. In der Nähe der Resonanzfrequenz wird die Anregung des Fundamentes und damit die Körperschallübertragung sogar grösser, als wenn die anregende Kraft direkt auf das Fundament einwirken würde.

Die Resonanzfrequenz ist also die zentrale Grösse die uns angibt, welche Frequenzbereiche

[6] Lips, W., Elastische Lagerung von Maschinen, SUVA, Luzern (Bestellnr. 66057).
VDI 2062, Schwingungsisolierung. VDI 3727, Schallschutz durch Körperschalldämpfung

durch die elastische Lagerung wirkungsvoll gedämmt werden können. Sie hängt hauptsächlich ab von:

- der wirksamen Masse der zu federnden Körperschallquelle,
- der dynamischen Steifigkeit der Feder unter der Belastung und
- der wirksamen Masse der Unterlage.

Im folgenden werden einige Überlegungen zur konstruktiven Lösung der Schwingungsisolation gemacht.

Flächenförmige Lagerung

Für flächenförmige Lagerungen eignen sich nur Materialien, die volumenelastisch sind, d.h. ihr Volumen bei der Belastung ändern können. Die flächenförmige Lagerung wird hautsächlich in der Bauakustik zur Trittschalldämmung eingesetzt und ist für die Lagerungen im Bereich der Wärmepumpen *nicht* geeignet.

Richtige Anwendung von Gummi

Gummi (Elastomere) ist ein Material, dessen Volumen bei Belastung praktisch konstant bleibt. Gummi darf nicht auf Zug beansprucht werden. Daraus leitet sich die richtige Anwendung von Gummi ab (siehe *Abb. 9*).

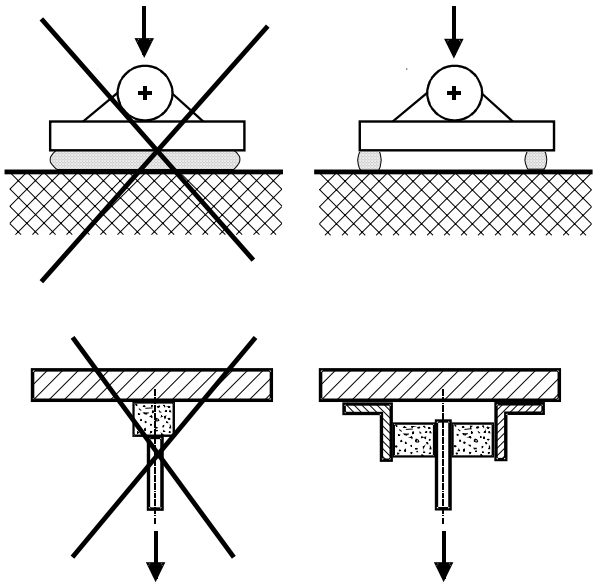

Abb. 9 Richtige Anwendung von Gummi

Punktweise Abfederung

Die punktweise Abfederung *(Abb. 10)* von Maschinen ist gut berechenbar und lässt sich gut kontrollieren. Sie wird angewendet

- auf Geschosstrenndecken bei Maschinen mit mittlerer Körperschallanregung,
- auf der Gebäudefundamentplatte bei Maschinen mit starker Körperschallanregung.

Bei einer grösseren Anzahl von kleinen Maschinen, deren Körperschall gedämmt werden soll, wird diese Art der Abfederung relativ aufwendig.

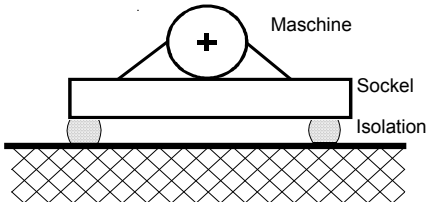

Abb. 10 Punktweise Lagerung einer Maschine (Einfachisolation)

Doppelisolation

Wenn Maschinen mit starker Schwingungsanregung auf Geschosstrenndecken gestellt werden, ist eine Erhöhung der Dämmung oft unumgänglich. Mit der Doppelisolation *(Abb. 11)* können bei richtiger Dimensionierung wesentlich höhere Körperschalldämmwerte erreicht werden als mit der Einfachisolation. Die Berechnung ist allerdings komplizierter und bei Fehlanpassungen stellt sich rasch ein schlechteres Ergebnis ein.

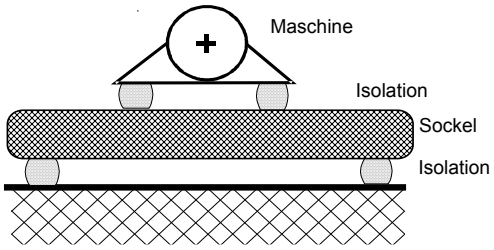

Abb. 11 Doppelisolation einer Maschine auf einer Geschosstrenndecke.

Gruppenisolation

Wenn mehrere kleinere Geräte gegen Körperschall gedämmt werden sollen, ist es sinnvoll, sie auf einem gemeinsamen Sockel zu montieren *(Abb. 12).*

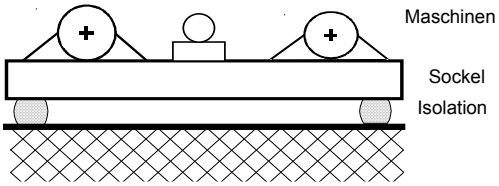

Abb. 12 Gruppe von Maschinen auf dem gleichen Sockel

Sockel

Sockel unter den Maschinen dienen einerseits als Lastverteiler *(Abb. 10 und 12)*. Sie erhöhen andererseits die Masse des Schwingungserregers, wodurch die Schwingungsamplituden der Maschine reduziert werden, was sich besonders auf die Rohrleitungsanschlüsse positiv auswirkt. Bei gleicher Resonanzfrequenz ist die Isolationswirkung mit oder ohne Sockel aber etwa gleich.

Sockel wie in *Abb. 13* sind schwingungstechnisch nur von Bedeutung, wenn eine Maschine auf einer sehr leichten Geschosstrenndedecke steht.

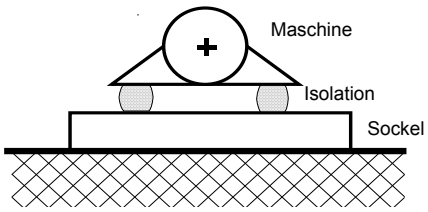

Abb. 13 Diese Anwendung eines Sockels ist nur bei leichten Geschosstrenndecken sinnvoll.

Abgehende Leitungen etc.

Bei der elastischen Lagerung von Kompressoren, Pumpen, Ventilatoren etc. muss darauf geachtet werden, dass kein Körperschall auf die Rohrleitungen und Kanäle übertragen wird. Geeignet ist der Einsatz von Kompensatoren. Bei Leitungen werden gute Ergebnisse mit flexiblen Schläuchen erreicht, welche um 90 bis 360° gebogen sind.

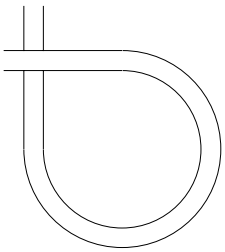

Abb. 14 Kompensator: Schlauchleitung 270° gebogen.

Zusammenfassung

Die elastische Lagerung von Maschinen erfordert eine fachgerechte Dimensionierung aller Komponenten. Es ist folgendes Vorgehen zu empfehlen:

Vorabklärungen

- Masse (Gewicht) des zu federnden Gerätes.
- Erreger-Frequenz und -Kraft des zu federnden Gerätes.
- Wirksame Masse der Unterlage z.B. Decke.
- Eigenfrequenz dieser Unterlage.
- erforderliche Isolationswirkung.
- zulässige Amplituden am Gerät.

Mögliches Vorgehen bei der Dimensionierung:

- Abstimmungsverhältnis aufgrund der geforderten Isolationswirkung festlegen.
- Resonanzfrequenz f_0 der Abfederung festlegen.
- Kontrolle: f_0 darf nicht in der Nähe der Eigenfrequenz der Unterlage (Decke) sein.
- Ist Sockel als Zusatzmasse erforderlich?
- Berechnung der Abfederung.

5. Rohrleitungen[7]

Bei Wärmepumpenanlagen sind es oft auch Rohrleitungen, die zu belästigendem Lärm führen. Meistens handelt es sich um Körperschall, welcher von den Geräten auf die Leitung übertragen wird oder um Körperschall, welcher durch Flüssigkeitsschall erzeugt wird. Weiter kann eine zu hohe Strömungsgeschwindigkeit bei Freonleitungen zu starken, heultonartigen Geräusche führen. Oft werden durch das Rohrleitungsnetz weite Gebäudeteile mit Körperschall regelrecht verseucht.

Auch bei Rohrleitungen ist das wirksamste Mittel gegen Körperschall die elastische Lagerung oder Aufhängung. Deshalb gelten die gleichen Gesetze wie bei der Lagerung von Maschinen. So ist z.B. jede Leitungsbefestigung ein Feder-Masse-System.

Um eine gute Körperschalldämmung zwischen Rohrleitung und Gebäude zu erreichen, muss das Rohrleitungssystem vollständig vom Gebäude entkoppelt werden. Alle Befestigungspunkte und Durchführungen sind zu isolieren. Dies gilt selbstverständlich auch für alle Geräte im Leitungssystem wie Pumpen, Wärmetauscher, Armaturen etc.

Wenn Leitungen gegen Körperschall isoliert werden müssen, sind mit Vorteil nur Rohrbefestigungsmaterialien zu verwenden, deren Körperschalldämmung geprüft wurde.

Wegen der oft sehr kleinen Masse der Kältemittelleitungen und der starken tieffrequenten Anregung ist eine wirksame Abfederung nicht auf einfache Art möglich. In Fällen mit erhöhten Schallschutzanforderungen sind Gummifederelemente mit zusätzlicher Masse erforderlich *(Abb. 15)*

[7] VDI 3733, Geräusche bei Rohrleitungen

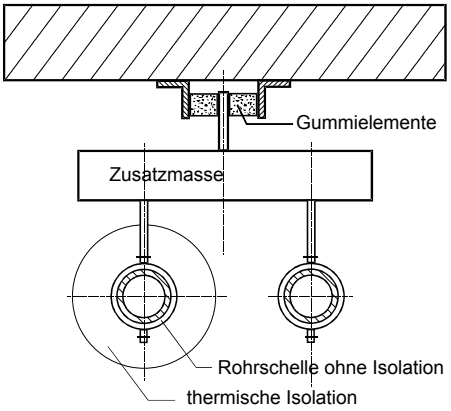

Abb. 15 Körperschalldämmung bei Kältemittelleitungen für erhöhte Schallschutzanforderungen.

6. Schematischer Aufbau lärmarm konstruierter Wärmepumpenanlagen

Luft/Wasser-Wärmepumpe.
Aussen aufgestellt

Bei *aussen* aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen sind am meisten Lärmprobleme zu befürchten.

Die Massnahmen an der Quelle selber sind eigentlich sehr aufwendig, weil der Hauptlärmerzeuger meistens der Ventilator ist: Als *Maximal*variante müssen die Zu- und Abluftkanäle als Schalldämpfer ausgebildet werden. In *Abb. 16* ist eine *schematische* Darstellung gegeben. Wärmetauscher und Ventilator befinden sich in einem schallabsorbierenden Kanal, die restlichen Teile in einer Kapsel.

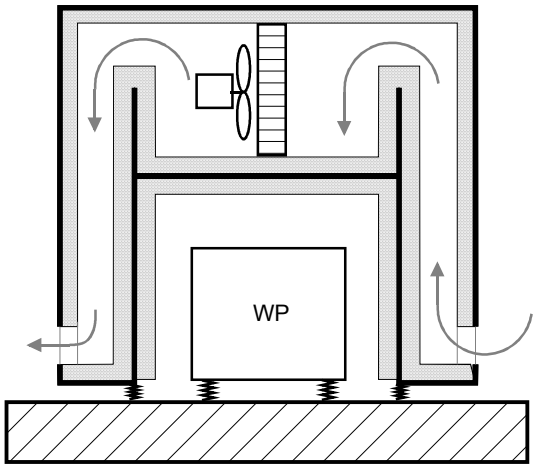

Abb. 16 Schematisch dargestellte Lärmschutzmassnahmen an einer aussen aufgestellten Luft/Wasser-Wärmepumpen.

Die dargestellte Maximalvariante ist natürlich nicht immer erforderlich. Zu beachten sind bei aussen aufgestellten Wärmepumpen:

- *Aufstellungsort.* Die Wärmepumpe muss möglichst abgeschirmt und nicht in der Nähe von eigenen und fremden Wohn- und Schlafräumen aufgestellt werden. Allenfalls muss auf innen aufgestellte Wärmepumpen mit geeigneten Zu- und Abluftkanälen (Schalldämpfer) ausgewichen werden. Lärmschutzwände rund um die Wärmepumpe sind aus strömungstechnischen Gründen eher ungünstig.
- *Ventilatoren.* Die Bauart des Ventilators ist entscheidend für die Geräuschentwicklung[8]. Zudem dürfen Ventilatoren nie an leichte Strukturen (wie dünne Bleche) montiert werden, da diese den Körperschall der Ventilatoren als Luftschall abstrahlen.

Luft/Wasser-Wärmepumpe.
Innen aufgestellt

Für die Lärmsituation von innen aufgestellten Luft-Wasser-Wärmepumpen sind die Zu- und Abluftkanäle mit entscheidend. Bei der Standortwahl müssen Empfangspunkte in der Nachbarschaft und beim eigenen Haus berücksichtigt werden. Oft sind besonders tieffrequente Abstrahlungen störend.

Bei der Projektierung ist genügend Platz für allfällige Schalldämpfer in den Kanälen vorzusehen (Druckverluste einkalkulieren). Neben dem weiter unten besonders für die Körperschallabstrahlung von Sole/Wasser und Wasser/Wasser-Wärmepumpen aufgeführten ist folgendes zu beachten:

- *Körperschallentkopplung*. Die Luftkanäle sind von den Körperschallquellen entkoppelt zu montieren.

Sole/Wasser und Wasser/Wasser-Wärmepumpen

Sole/Wasser und Wasser/Wasser-Wärmepumpen werden in den allermeisten Fällen im Innern von Gebäuden aufgestellt. Auch wenn der Abstrahlung von Luftschall Beachtung geschenkt werden muss, liegt das Schwergewicht der Schallschutzmassnahmen auf der Seite des Körperschalls.

Grundsätzlich sind alle Anlagekomponenten möglichst auf einer einzigen Platte zu montieren, welche fachgerecht elastisch gelagert ist *(Abb. 17)*. Die Luftschalldämmung wird durch eine Kapsel gewährleistet, welche über die *ganze* Einrichtung gestülpt wird. Zu- und Wegfuhr von Kühlluft muss über Schalldämpfer erfolgen. Leitungsdurchführungen müssen schalldicht sein

[8] Lips W., Strömungsakustik in Theorie und Praxis expert verlag, Band 474.
VDI 3731, Blatt 2. Emissionskennwerte technischer Schallquellen: Ventilatoren

und es darf kein Körperschall auf die Kapsel übertragen werden.

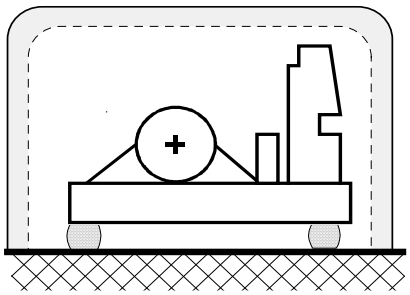

Abb. 17 Schematisch dargestellte Lärmschutzmassnahmen an einer innen aufgestellten Sole/Wasser oder Wasser/Wasser-Wärmepumpe.

Besonders zu beachten sind die folgenden Punkte:

- *Aufstellungsort.* Die Gebäudefundamentplatte (Kellerboden) ist für die Lagerung einer Wärmepumpe wesentlich günstiger als eine Geschosstrenndecke. Die unmittelbare Nähe von Büro -, Wohn - und Schlafräumen ist zu meiden.
- *Leitungsnetz.* Das Leitungsnetz ist von der Wärmepumpe mit Kompensatoren und vom Gebäude mit elastischen Aufhängungen zu entkoppeln. Besondere Sorgfalt ist den Kältemittelleitungen zu widmen.
- *Splittpunkt.* Bei gesplitteten Anlagen ist darauf zu achten, dass möglichst keine oder nur kurze Kältemittelleitungen erforderlich sind.
- *Sekundäre Einrichtungen.* Wenn sekundäre Einrichtungen wie Wärmetauscher, Pumpen, Ventilatoren, Regelventile, elektrische Steuerungen usw. nicht mit der Wärmepumpe zusammen elastisch gelagert sind, müssen sie bei Bedarf durch geeignete Massnahmen vom Gebäude entkoppelt werden.
- *Dimensionierungen.* Um mit möglichst geringem Aufwand einen optimalen Schallschutz zu erreichen, müssen alle Schallschutzmassnahmen richtig dimensioniert und optimiert werden.