EMPA

ERFA-Seminar 25. Februar 2002

Lärm von Wärmepumpen
Emissionen - Immissionen

K. Eggenschwiler, EMPA Dübendorf

Wir forschen und prüfen für Sie

1. Die Wärmepumpe als Schallquelle

Schallabstrahlung von Wärmepumpen
Charakterisierung der Luftschallabstrahlung
Charakterisierung der Körperschallabstrahlung

2. Prüfung der Schallleistung von Wärmepumpen

Grundgrössen der Messung
Schalldruck-Methode
Schallintensitäts-Methode
Normen
Messungen an Wärmepumpen
Schallleistungsmessungen im Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum in Töss

3. Berechnung der Lärmimmissionen

Schallausbreitung im Freifeld
Schallausbreitung im Innern eines Gebäudes

4. Beurteilung gemäss Lärmschutzverordnung LSV

Vorschriften für neue Anlagen - Vorsorgeprinzip und Grenzwerte
Grenzwerte für Wärmepumpen
Berechnung des Beurteilungspegels Lr

5. Beurteilung gemäss SIA 181, Schallschutz im Hochbau

Geltungsbereich
Schallschutzanforderungen:
- Anforderungsstufen
- Lärmempfindlichkeit
- Störgrad
- Grenzwertschema

Berechnung des Beurteilungspegels $L_{r,h}$

Anhang

A1 Beispiel: Schallausbreitung im Freien, Beurteilung nach LSV

A2 Beispiel: Beurteilung nach SIA 181

A3 Statistik der Messresultate Töss

1. Die Wärmepumpe als Schallquelle

Schallabstrahlung von Wärmepumpen.

Wärmepumpen erzeugen auf verschiedene Weise Schall. Hauptquellen sind Verdichter, Ventilatoren und Rohrleitungen. Grundsätzlich ist bei der Abstrahlung zwischen Luft- und Körperschall zu unterscheiden. Bei den im Freien aufgestellten Wärmepumpen ist in der Regel vor allem der abgestrahlte *Luftschall* von Bedeutung *(Abb. 1a),* während bei im Innern von Gebäuden aufgestellten Wärmepumpen auch der *Körperschall* beachtet werden muss *(Abb. 1b)*.

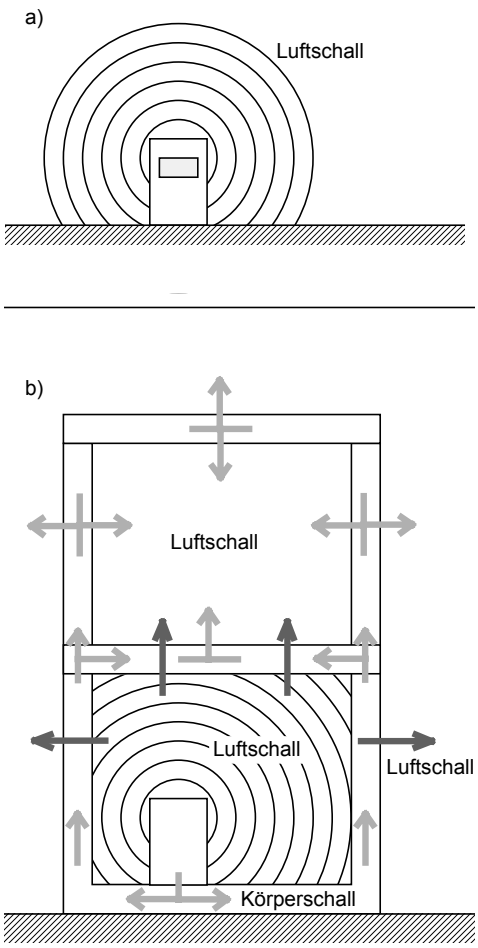


Abb. 1 Abstrahlung von Luftschall und Körperschall bei Wärmepumpen

Charakterisierung der Luftschallabstrahlung

Die Luftschallabstrahlung einer Wärmepumpe wird mit der Schalleistung beschrieben, allenfalls noch kombiniert mit einer Richtcharakteristik die angibt, in welchen Winkelbereich wieviel Schall abgestrahlt wird. Damit sind die Grundlagen gegeben, um die Schallimmissionen an einem Empfängerpunkt zu berechnen.

Die Schalleistung (Einheit Watt) ist die Schallenergie die von der Wärmepumpe pro Sekunde abgestrahlt wird. Sie kann mit der elektrischen, mechanischen oder thermischen Leistung verglichen werden. Im Alltag vorkommende Schalleistungen sind sehr klein *(Tabelle 1, 2. Spalte).*

Da in der Akustik meistens mit Dezibel (dB) gearbeitet wird, existiert auch zu der Schalleistung die entsprechende Pegelgrösse: Der Schallleistungspegel L_W ist wie folgt definiert:

$$L_W = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right) [dB]$$

$$W_0 = 10^{-12}\,W$$

Beispiele von Schalleistungspegel finden sich in *Tabelle 1* in der dritten Spalte.

In der Regel wird als Einzahlwert der A-bewertete Schalleistungspegel $L_{W,A}$ angegeben. Mehr Informationen liefert die frequenzabhängige Darstellung in Terz- oder Oktavschritten.

Tabelle 1 Beispiele von Schalleistungen und Schalleistungspegel

Schallquelle	Schalleistung W in Watt	Schallleistungspegel L_W in Dezibel
Unterhaltungssprache	$6{\cdot}10^{-6}$ W	68 dB
Max. menschl. Stimme	0.002 W	93 dB
Geige (fortissimo)	0.001 W	90 dB
Orgel, fortissimo	10 W	130 dB
Orchester (75 Musiker)	70 W	139 dB
Hifi-Lautsprecher	0.1 W	110 dB
Presslufthammer	1 W	120 dB
ungefährer Bereich von Wärmepumpen	$3{\cdot}10^{-7}$ - $3{\cdot}10^{-5}$ W	55 - 75 dB

Charakterisierung der Körperschallabstrahlung

In Bezug auf Luftschall können Wärmepumpen relativ einfach mit einer einzigen Zahl - dem A-bewerteten Schallleistungspegel - charakterisiert und miteinander verglichen werden. Die Messung der Schalleistung ist relativ einfach.

Beim Körperschall ist dies ungleich schwieriger. So existieren keine verbindlichen Normen zur Messung der Körperschallabstrahlung. Schliesslich ist auch die Berechnung der Ausbreitung des Körperschalls viel schwieriger. Aus diesem Grund ist es leider nicht üblich, zu Maschinen neben der Angabe des Schallleistungspegels ähnliche Grössen zur Körperschallabstrahlung anzugeben.

Trotzdem ist der Verminderung der Körperschallabstrahlung durch konstruktive Massnahmen, der richtigen Lagerung der Maschine, einer schwingungsgedämmten Aufhängung der Rohrleitungen etc. grösste Bedeutung beizumessen!

2. Prüfung der Schalleistung von Wärmepumpen

Grundgrössen der Messung

Zur Bestimmung der Schalleistung muss alle Energie gemessen werden, welche eine gedachte Hüllfläche rund um die zu prüfende Maschine pro Sekunde verlässt.

Bei allen Messverfahren wird im Prinzip die Hüllfläche *(Abb. 2)* in einzelne kleine Teilflächen unterteilt, und auf allen Teilflächen die *Schallintensität* gemessen.

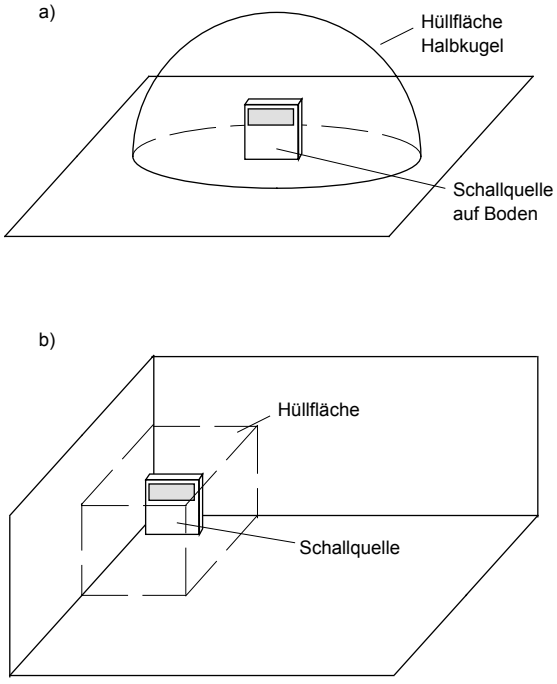


Abb. 2 Mögliche Hüllflächen: a) Auf Halbkugel auf einer reflektierenden Fläche. b) Teil eines Quaders in einer reflektierenden Ecke.

Die Schallintensität I ist definiert als die Schallenergie welche pro Sekunde durch einen Quadratmeter fliesst. Sie ermittelt sich aus dem Produkt von Schalldruck p und Schallschnelle v [1]:

$$\vec{I} = \vec{v} \cdot p$$

Die Schallintensität ist eine vektorielle Grösse, d.h., sie enthält auch die Richtung des Schalles.

Die Schalleistung W, die durch eine Teilfläche mit dem Flächeninhalt S fliesst berechnet sich als Produkt der Schallintensität I senkrecht auf der Teilfläche (Energie/s/m^2) und der Fläche S:

$$W = I \cdot S$$

W = Schalleistung $[Nm/s]$

$(1 Nm/s = 1 W)$

I = Schallintensität $[N/ms]$

$S =$ Fläche $[m^2]$

Die gesamte Schalleistung der Quelle berechnet sich aus der Summe aller Schalleistungen der Teilflächen.

In der Praxis ist es viel einfacher, an Stelle der Schallintensität den Schalldruck zu messen. Dies ist möglich, weil der Betrag der Schallintensität proportional zum Schalldruckquadrat ist.

$$I = p \cdot v \cong \frac{p^2}{\rho \cdot c}$$

I = Schallintensität $[N/ms]$

$p =$ Schalldruck $[N/m^2]$

v = Schallschnelle $[m/s]$

$\rho =$ Dichte der Luft $[kg/m^3]$

c = Schallgeschwindigkeit $[m/s]$

Es werden somit Schalldruck- und Schallintensitäts-Verfahren unterschieden. Schliesslich wird man sich auch darauf beschränken müssen, die Methoden nur auf einer beschränkte Zahl von Punkten auf der Hüllfläche durchzuführen.

Schalldruck-Methode

Um den Prüfling herum wird an Messpunkten auf einer gedachten Hüllfläche der *Schalldruck* gemessen. Mit der oben stehenden Formel kann aus dem Schalldruck die Schallintensität berechnet werden und damit die Schalleistung, die durch die Teilfläche geht. Die gesamte Schalleistung ergibt sich aus der Summe der Schalleistungen der Teilflächen.

Die Schalldruckmethode benötigt eine relativ einfache Messtechnik (Messaufnehmer: Schalldruckmikrofon). Sie funktioniert aber nur dann gut, wenn an den Messpunkten auf der Hüllfläche nur Schall vom Prüfling gemessen wird. Störschall von anderen Maschinen oder Schall, der an den Wänden in einem Raum reflektiert wird und bei den Messpunkten eintrifft, führt zu falschen Ergebnissen *(Abb. 3)*: An den Messpunkten wird der Schalldruck, der von diesen Quellen stammt, dem Anteil vom Prüfling überlagert.

Je nach Stärke von Störschall und Raumreflexionen und der gewünschten Messgenauigkeit ist der Einfluss auf das Messresultat noch zu tolerieren. Die Randbedingungen sind in den entsprechenden Normen beschrieben *(Tabelle 2)*.

[1] Nicht zu verwechseln mit der Schallgeschwindigkeit c= 340 m/s

Messungen in Räumen sind mit der Schalldruckmethode also prinzipiell schlecht durchführbar. Wenn der Raum allerdings ganz schallhart ist, dann kann auf einem Umweg wiederum die Schalleistung bestimmt werden (Hallraummethode).

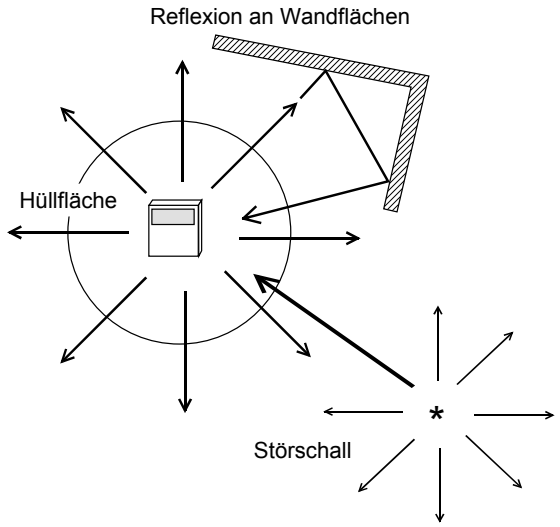


Abb. 3 Unerwünschte Anteile bei der Schallleistungsmessung mit der Schalldruckmethode: Störschall und Raumreflexionen.

Schallintensitätsmethode

Mit diesem Verfahren wird direkt die Schallintensität senkrecht auf der Messoberfläche gemessen.

Der Vorteil liegt darin, dass über die ganze Hüllfläche eine Bilanz der Schalleistung gerechnet werden kann. Schallenergie, die von fremden Quellen in die Hüllfläche eintritt, muss sie irgendwo wieder verlassen. Dasselbe gilt für Schallreflexionen an Wänden, die in die Hüllfläche eindringen. Da mit der Schallintensität der Vektor der Intensität gemessen wird, ist in der Bilanz die Summe dieser Energieanteile - theoretisch - null.

Die Messung auf der Hüllfläche kann punktweise durchgeführt werden (z.B. an 60 Positionen), wobei jeder Messpunkt eine kleine Teilfläche vertritt. Einfacher ist eine kontinuierliche Abtastung (Scanning) eines grösseren Teils einer Hüllfläche *Abb. 4)*.

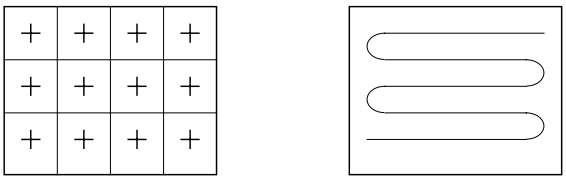


Abb. 4 Punktweises (links) und kontinuierliches (rechts) Abtasten einer Messoberfläche.

Der Nachteil der Methode liegt in der aufwendigen Messtechnik. Die Schallintensität ist nicht einfach zu messen. Die Sonden und die Geräte zur Verarbeitung der Messdaten sind relativ teuer.

Die Genauigkeit der Methode wird durch die Unzulänglichkeiten der Mess-Sonde bestimmt. Es ist mit dieser Methode zwar möglich, in halliger Umgebung und mit Störgeräuschen zu messen, allerdings nur innerhalb eines von den Spezifikation der Sonde bedingten Bereiches. In den Normen sind Verfahren festgelegt, die eine Aussage geben, ob eine Messung möglich ist, und wenn ja, in welcher Genauigkeitsklasse.

Normen

Zur Messung der Schalleistung von Maschinen stehen eine Reihe von internationalen Normen zur Verfügung. Es sind dies die Normen der Reihe ISO 3740, die auf Schalldruckmessungen basieren, sowie die Norm ISO 9614, welche auf Intensitätsmessungen beruht. Die Prüfverfahren unterscheiden sich einerseits in der erreichbaren Messgenauigkeit und andrerseits nach der angewendeten Methode.

Messungen an Wärmepumpen

Für die verschiedenen Klassen von Maschinen existieren verschiedene internationale und nationale Normen, welche die Messverfahren im Detail beschreiben. Für Wärmepumpen wird am Wärmepumpentestzentrum in Töss ein europäischer Normentwurf benutzt:

CEN prEN 255-7. Wärmepumpen - Anschlussfertige Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern - Teil 7: Anschlussfertige Wärmepumpen und Wärmepumpen zum Erwärmen von Trink- und Betriebswasser - Messung der Luftschallemissionen - Bestimmung des Schallleistungspegels.

In der Norm wird bezüglich der Messmethode auf die oben erwähnten ISO-Normen verwiesen. Festgelegt werden zudem die Betriebsbedingungen, unter denen die Schallleistungsmessung erfolgen muss:

Tabelle 2 Betriebsbedingungen zur Messung der Schalleistung an Wärmepumpen gemäss CEN prEN 255-7:1992

Wärmepumpe	Messpunkt	
Aussenluft/Wasser	A15	W50
Wasser/Wasser	W10	W50
Sole/Wasser	B0	W50

A [air] Temperatur der Umgebungsluft [°C]
B [brine] Temperatur der Sole [°C]
W [water] Temperatur des Wassers [°C]

Schallleistungsmessungen im Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum in Töss

Im Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrum in Töss wird die Schallleistungsmessung der Wärmepumpen-Prüflinge seit Beginn von der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, EMPA, Abt. Akustik, im Auftrag des Bundesamts für Energie BFE durchgeführt.

Es war von Anfang an klar, dass in Töss die Messung mit den konventionellen Methoden nicht möglich ist. Schon die Raumgrösse der Prüfstände lassen die Messung nach den meisten Normen nicht zu, aber auch die Störgeräusche und die Raumreflexionen sind zu stark.

Aus diesem Grund wird in Töss die Schallintensitätsmethode nach der Norm ISO 9614 Teil 1 und 2 eingesetzt. Auch mit dieser Norm bietet die Messung einige Schwierigkeiten. Die Raumgrössen sind nahe der untersten Grenze. Der Einfluss der Raumreflexionen wird zwar durch Einbringen von grossen Schallabsorber-Tafeln klein gehalten. Jedoch sind - besonders bei leisen Prüflingen - die Nebengeräusche des Prüfstandes relativ stark störend. Es steht deshalb zum voraus nie fest, ob die Messung wirklich zu einem Resultat führt, und mit welchem Messfehler die Messergebnisse behaftet sind. Erst nach dem ersten Messdurchgang wird auf Grund verschiedener Indikatoren klar, ob die Messung wiederholt werden muss, resp. welche Genauigkeitsklasse erreicht wurde. Im Rahmen der zur Verfügung stehenden Zeit werden die Messungen solange wiederholt, bis die bestmögliche Messgenauigkeit erreicht wird. Es muss aber immer damit gerechnet werden, dass wegen der schwierigen Randbedingungen die Prüfung abgebrochen werden muss.

Die ersten Messreihen in Töss wurden nach ISO 9614 Teil 1 mit punktweiser Abtastung durchgeführt. Dieses Verfahren erwies sich als sehr umständlich und zeitaufwendig. Als der Entwurf für die Messung nach dem Verfahren mit kontinuierlichem Abtasten erschien, wurden die Messungen auf diese Methode umgestellt. Die ersten Erfahrungen mit der neuen Methode wurden an einer deutschen Akustik-Konferenz vorgestellt[2].

An jedem Prüfling wird eine Messung durchgeführt und die Ergebnisse in einem Bericht dargestellt. Der Schallleistungspegel wird zusammen mit den anderen Messergebnissen des Wärmepumpentest- und Ausbildungszentrums in Töss veröffentlicht, und sieht z.B. so aus:

Tabelle 3 Beispiel: Angabe des A-bewerteten Schallleistungspegels einer Wärmepumpe, gemessen in Töss.

Schalleistung [dB(A)]	**62**
Standardabweichung	**2**

Die geprüfte Wärmepumpe strahlt also Schall mit einem Schallleistungspegel von 62 dB(A) ab. Die geschätzte Messungenauigkeit s beträgt 2 dB[3].

Im Messbericht werden auch die Resultate in Terzbändern angegeben, soweit diese ermittelt werden konnten (Beispiel: *Tabelle 4)*. Messwerte der einzelnen Terzbänder können eine bessere oder schlechtere Messungenauigkeit aufweisen, als der A-bewertete Schallleistungspegel.

Tabelle 4 Beispiel: Angabe des unbewerteten Schallleistungspegels in Terzen einer Wärmepumpe, gemessen in Töss.

Terzband [Hz]	Lw
50	52.6
63	47.5
80	47.8
100	64.3
125	43.6
160	48.7
200	62.2
250	51.6
315	44.8
400	42.1
500	44.1
630	41.3
800	46.6
1k	45.9
1.25k	46.7
1.6k	44.9
2k	43.6
2.5k	32.1
3.15k	26.5
4k	23.2
5k	13.1
6.3k	10.0

[2] Kurt Eggenschwiler, Schallleistungsmessungen an Wärmepumpen (Intensitätsmethode), DAGA Saarbrücken 1995.

[3] Der wahre Wert des Schallleistungspegels liegt mit 95% Wahrscheinlichkeit in einem Intervall von ± 2s um den gemessenen Wert.

Was haben die Messwerte für eine Bedeutung?

- Von den geprüften Wärmepumpen lässt sich eine "Rangliste" erstellen. Der Käufer einer Wärmepumpe weiss, ob eine Maschine lauter ist als die andere.
- Für die Beurteilung der Lärmimmissionen in der Umgebung einer aussen oder innen aufgestellten Wärmepumpen lassen sich Prognosen rechnen.

3. Berechnung der Lärmimmissionen

Aus den in Töss ermittelten Werten für die Schalleistung können nun die Schallimmissionen an einem Empfängerort berechnet werden, z.B. beim Nachbarhaus im Schlafzimmerfenster. Für einfache Fälle und zur Abschätzung werden im folgenden einige Regeln angegeben. Für genauere Ergebnisse und kompliziertere Fälle sind Akustik-Fachleute[4] beizuziehen.

Schallausbreitung im Freifeld

In *Abb. 5* sind zwei Situationen abgebildet, bei denen die Schallausbreitung hindernisfrei auf der Sichtlinie von der Wärmepumpe bis zum Immissionsort (Empfangsort) im Haus rechts passieren kann. Bei solchen Situationen müssen lediglich die Verluste durch die geometrische Ausbreitung des Schalles von der Quelle zum Empfänger *(1)* und die Verhältnisse bei der Abstrahlung *(2)* berücksichtigt werden.

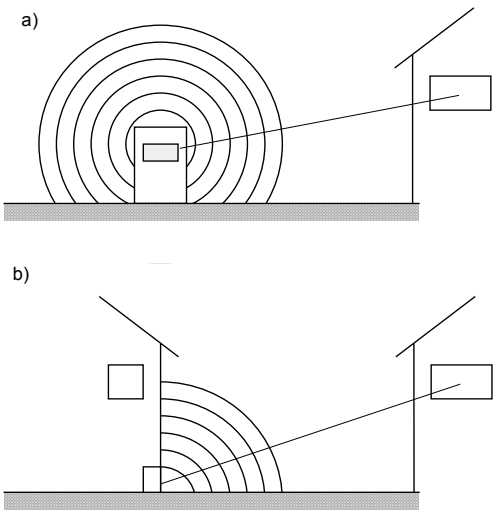


Abb. 5 Zwei einfache Situationen der Schallausbreitung:
a) freistehende Luft/Wasser-Wärmepumpe
b) Luftauslass- und Einlassöffnungen einer Luft/Wasser-Wärmepumpe

[4] siehe z.B. Liste der dipl. Akustiker SGA: http://www.sga-ssa.ch

(1) Schallpegel im Freien im Abstand x einer Punkt-Quelle mit der Schalleistung L_W

Situation: siehe *Abb. 6.*

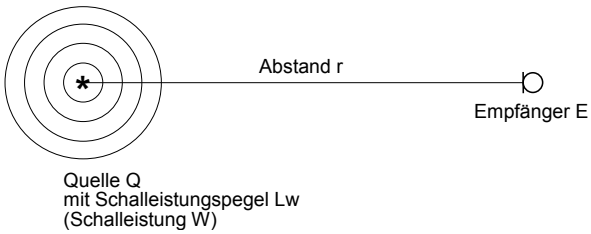


Abb. 6 Empfänger E im Abstand x der Kugelquelle Q

Gesucht ist vorerst die Schallintensität I, also die Schalleistung die bei E senkrecht durch 1 m^2 strömt. Weil die von Q ausgestrahlte Schalleistung W sich auf eine Kugeloberfläche verteilt gilt:

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

W = Schalleistung der Quelle

$4 \cdot \pi \cdot r^2$ = Oberfläche, Kugel mit Radius x

r = Entfernung Quelle - Empfänger

Mit der Schallpegeldefinition ergibt sich der Pegel L(x) bei E wie folgt:

$$L(x) = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

$$= 10 \cdot \log\left(\frac{W/W_0}{4 \cdot \pi \cdot r^2}\right)$$

I_0 = Bezugsintensität

W_0 = Bezugsschalleistung

$$L(R) = 10 \cdot \log\left(\frac{W}{W_0}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2}\right)$$

$$L(R) = L_W + 10 \cdot \log\left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot r^2}\right)$$

oder

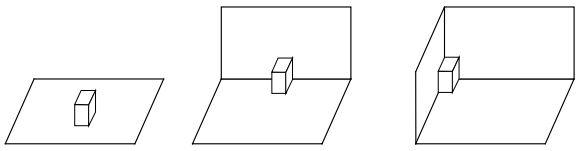
$$\boxed{L(r) = L_W - 20 \cdot \log(r) - 11}$$

Der Term $20 \cdot \log(r)$ bedeutet eine Abnahme des Schallpegels von 6 dB pro Verdoppelung des Abstandes r

(2) Wirkung der näheren Umgebung der Quelle

Je nach dem wo die Schallquelle steht, muss noch eine Korrektur zum oben berechneten Wert addiert werden. Es wurde angenommen, dass die Quelle ganz im Freien "schwebt". Das entspricht z.B. einer Kaminöffnung auf einem schlanken Kamin. Wenn die Quelle auf einer reflektierenden Ebene steht (Wärmepumpe im Freien), dann wird

die ganze Schallenergie nur in den Halbraum ausgestrahlt. Die empfangene Schallleistung wird damit verdoppelt, der Pegel am Immissionsort also um 3 dB erhöht *(Abb. 7a)*. Analoge Überlegungen gelten für die Abstrahlung in den Viertelraum (Wärmepumpe an Hauswand resp. Ansaug- und Auslassöffnungen in Hauswand) und für den Achtelraum (Quelle in Raumecke).



Q = 2	Q = 4	Q = 8
D_C = 3 dB	D_C = 6 dB	D_C = 9 dB

Abb. 7 Richtwirkung durch Aufstellung der Wärmepumpe auf reflektierender Ebene, in Kante und in Ecke

Der Schallpegel L(x) beim Empfänger E berechnet sich demnach im einfachsten Fall wie folgt:

$$L(r) = L_W + 10 \cdot \log\left(\frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot r^2}\right)$$

oder

$$L(x) = L_w - 20 \cdot \log(x) - 11 + D_C$$

Wenn der Schallpegel an einem näheren Punkt P in Entfernung a bekannt ist, berechnet sich der Pegel bei E wie folgt *(Abb. 8)*:

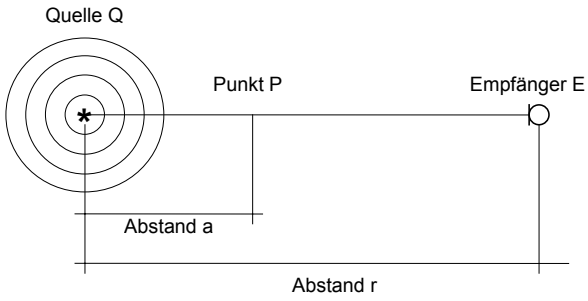


Abb. 8 Schallpegel in verschiedenen Entfernungen

$$L(x) = L(a) - 20 \cdot \log\left(\frac{r}{a}\right)$$

Bei vielen Situationen mit Wärmepumpen kann man mit den oben angegebenen Formelnd den für A-bewertete Schallpegel berechnen. Wenn die Situation komplizierter ist (Hindernisse, grössere Distanzen), dann müssen verschiede Effekte berücksichtigt werden und die Berechnung wird mit Vorteil in Oktavbändern durchgeführt. Die entsprechende Formel für den Schallpegel am Immissionsort E lautet dann:

$L = L_W - 20 \cdot \log(r) - 11 + D_C - D_D - D_B - D_Z$ ...

L = Schallpegel am Immissionsort [dB]
L_W = Schallleistungspegel [dB]
r = Abstand [m]
D_C = Richtcharakteristik-Korrektur [dB]
D_D = Luftdämpfung (Dissipation) [dB]
D_B = Bodeneffekt [dB]
D_Z = Hinderniswirkung (Abschirmindex) [dB]

Die Berechnungsverfahren sind in Normen festgelegt[5], resp. können Fachbüchern entnommen werden.

Das Resultat der in diesem Abschnitt beschriebenen Berechnungen ist der Pegel am Immissionsort, der die Grundlage für die Beurteilung gemäss Lärmschutzverordnung bildet (siehe Abschnitt 4).

4. Beurteilung gemäss Lärmschutzverordnung LSV

Vorschriften für neue Anlagen - Vorsorgeprinzip und Grenzwerte

Für Situationen wie in *Abb. 9*, wo eine Nachbarliegenschaft Lärmimmissionen von einer geplanten Wärmepumpe erhält, gilt die Lärmschutzverordnung unabhängig davon, ob für die Wärmepumpe eine Baubewilligung notwendig war oder nicht. Was bedeutet dies?

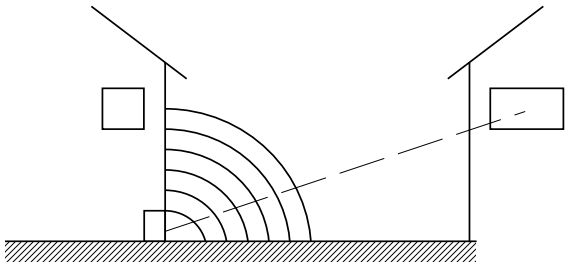


Abb. 9 Schallausbreitung zum Nachbarhaus

Für neue Anlagen gilt Kapitel 3 der Lärmschutzverordnung. In Art. 7 ist festgehalten:

[1]Die Lärmimmissionen einer neuen ortsfesten Anlage müssen nach Anordnung der Vollzugsbehörden so weit begrenzt werden,:

a) als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist
und
b) dass die von der Anlage alleine erzeugten Lärmmissionen die Planungswerte nicht überschreiten.

[5] ISO 9613-2

Bei a) handelt es sich um das **Vorsorgeprinzip**, d.h. also, dass unabhängig vom Einhalten von Grenzwerten ein wirtschaftlich tragbarer Schallschutz an der Quelle nach dem Stand der Technik zu realisieren ist!

Soweit die Vollzugsbehörde keine Erleichterungen gemäss Art. 8[2] gewährt, müssen gemäss b) auf jeden Fall die sogenannten **Planungswerte** eingehalten werden. Für Wärmepumpen gelten die Grenzwerte von Anhang 6, Industrie und Gewerbelärm (Abschnitt 1e: Heizungs-, Klima- und Lüftungsanlagen). Die Grenzwerte finden sich in einem Schema, wo nach Tag/Nacht-Perioden und Empfindlichkeitsstufen unterschieden wird *(Tabelle 5)*. Sie gelten für die sogenannten Beurteilungspegel Lr.

Tabelle 5 Grenzwertschema der LSV für Industrie und Gewerbelärm

ES	Planungswert		Immissions-grenzwert		Alarmwert	
	Tag	Nacht	Tag	Nacht	Tag	Nacht
I	50	40	55	45	65	60
II	55	45	60	50	70	65
III	60	50	65	55	70	65
IV	65	55	70	60	75	70

Die Empfindlichkeitsstufen ES sind von der Gemeinde festgelegt:

ES I Erholungszonen
ES II Wohnzonen
ES III Wohn- und Gewerbezonen
ES IV Industriezone

Berechnung des Beurteilungspegels Lr

Die Ermittlung der Beurteilungspegel Lr welche mit dem Grenzwert im Beurteilungsschema verglichen werden ist in Abschnitt 6 von Anhang 3 beschrieben. Es muss je ein Lr für den Tag (07 bis 19 Uhr) und die Nacht (19 bis 07 Uhr) berechnet werden.

Es sind einzelne *Lärmphasen* zu unterscheiden. Lärmphasen sind Zeitabschnitte mit unterschiedlichen Störwirkungen. Beispiel: Bei einer Wärmepumpe mit zweistufigem Betrieb mit unterschiedlicher Geräuschentwicklung sind also zwei Lärmphasen zu unterscheiden. In der Regel wird aber nur eine Lärmphase vorliegen.

Der Beurteilungspegel berechnet sich aus der energetischen Summe (Dezibeladdition) der Teilbeurteilungspegel Lr,i der einzelnen Lärmphasen.:

$$Lr = 10 \cdot \log \sum_i 10^{0.1 \cdot Lr,i}$$

Der Teilbeurteilungspegel wird für die durchschnittliche tägliche Dauer der Lärmphase i wie folgt berechnet:

$$Lr,i = Leq,i + K1,i + K2,i + K3,i + 10 \cdot \log(ti/t0)$$

Dabei bedeuten

Leq,i A-bewerteter Mittelungspegel während der Lärmphase i

K1,i für Wärmepumpen 5 am Tag, 10 in der Nacht

K2,i Tongehalt: 0 nicht hörbar; 2 schwach hörbar; 4 deutlich hörbar; 6 stark hörbar

K3,i Impulsgehalt: 0 nicht hörbar; 2 schwach hörbar; 4 deutlich hörbar; 6 stark hörbar

ti durchschnittliche Dauer der Lärmphase i in Minuten

t0 720 Minuten

Die Berechnung des Leq wurde oben in Abschnitt 3 besprochen.

Die durchschnittliche tägliche Dauer der Lärmphase i berechnet sich wie folgt

$$ti = Ti/B$$

wobei Ti die jährliche Dauer der Lärmphase i und B die Anzahl der jährlichen Betriebstage bedeuten. Wenn die Wärmepumpe nur in der Wintersaison in Betrieb ist, dann wird also nur diese Zeit beurteilt.

Die Beurteilung gemäss Lärmschutzverordnung ist in *Abb. 10* im Überblick nochmals dargestellt.

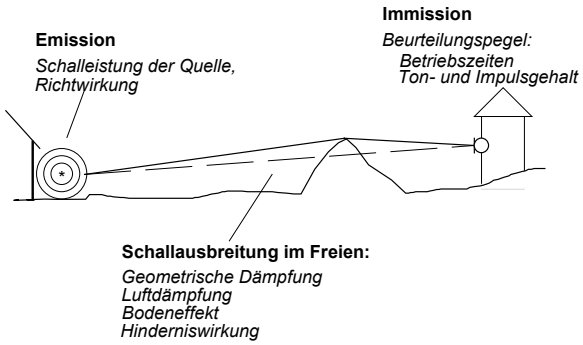


Abb. 10 Beurteilung von Lärmimmissionen

5. Beurteilung gemäss SIA 181

Für den Schallschutz an neuen Gebäuden wird in der Lärmschutzverordnung LSV auf die Norm SIA-181 verwiesen. Im Zusammenhang mit dem Lärm von Wärmepumpen interessiert vor allem die Beurteilung von haustechnischen Geräuschen.

Geltungsbereich

Die folgenden Ausführungen gelten ohne spezielle Abmachungen nur, wenn die Wärmepumpe ausserhalb einer Nutzungseinheit aufgestellt ist. Nutzungseinheiten sind Räume oder Raumgruppen welche in Bezug auf die Nutzung eine selbständige rechtliche oder organisatorische Einheit bilden. Für ein Einfamilienhaus muss der Bauherr selber die Schallschutzanforderungen vertraglich festlegen. Im Reiheneinfamilienhaus gelten für die Immissionen der Wärmepumpe aus dem Keller des Nachbarhauses die normalen Schallschutzanforderungen der SIA-181 (Mindestanforderungen). Die *erhöhten* Anforderungen sind vertraglich zu vereinbaren. Die gleichen Bedingungen gelten für Eigentumswohnungen. In einer Mietwohnung gelten ohne spezielle Abmachungen die Mindestanforderungen.

Schallschutzanforderungen

Die Schallschutzanforderungen gemäss SIA 181 basieren auf folgenden Grundlagen:

- Anforderungen an den Schallschutz
- Lärmempfindlichkeitsstufe der zu schützenden Räume
- Störgrad

Anforderungsstufen

Es wird zwischen verschiedenen Anforderungsstufen unterschieden:

- Die **Mindestanforderungen** sind grundsätzlich einzuhalten.
- Die **erhöhte Anforderung** sind vertraglich zu vereinbaren. Sie sind angezeigt wenn höhere Ansprüche gestellt werden (meistens bei Reiheneinfamilienhäusern, Eigentumswohnungen).
- Spezialfälle.

Lärmempfindlichkeit

Die Bestimmung der Lärmempfindlichkeit erfolgt nach *Tabelle 6*.

Störgrad

Schliesslich muss der Störgrad festgelegt werden. Für haustechnische Geräusche gilt die Einteilung gemäss *Tabelle 7*. Bei Wärmepumpen handelt es sich in den meisten Fällen um Dauergeräusche. Ausnahmen sind impulsartige Einschaltgeräusche etc.

Grenzwertschema

Wenn die Schallschutzanforderungen festgelegt sind, dann kann in *Tabelle 8* der Grenzwert abgelesen werden, den der Beurteilungspegel $L_{r,h}$ einhalten muss.

Tabelle 6 Zurordnung gemäss SIA 181: Empfindlichkeitsstufen

Lärmempfindlichkeit	Beschreibung
gering	Räume für vorwiegend manuelle Tätigkeit. Räume, welche von vielen Personen oder nur kurzzeitig benützt werden. Beispiel: Werkstatt, Handarbeits-, Empfangs-, Warteraum, Grossraumbüro, Kantine, Küche, Verkaufsraum, Labor, Korridor, usw.
mittel	Räume für geistige Arbeiten, Wohnen und Schlafen. Beispiel: Wohn-, Schlafzimmer, Studio, Schulzimmer, Singsaal, Büroräume, Hotel-, Spitalzimmer, usw.
hoch	Räume für Benutzer mit besonders hohem Ruhebedürfnis. Beispiel: Ruheräume in Spitälern und Sanatorien, spezielle Therapieräume, Musik, Lese- und Studierzimmer usw.

Tabelle 7 Zuordnung gemäss SIA 181: Grad der Störung gemäss

Grad der Störung	Beschreibung
mässig	Einzelgeräusche am Tag (06-22 Uhr)
stark	Dauergeräusche am Tag (06-22 Uhr) Einzelgeräusche in der Nacht (22-06 Uhr)
sehr stark	Dauergeräusche in der Nacht (22-06 Uhr)

Tabelle 8 Grenzwerte für den Beurteilungspegel $L_{r,h}$ *gemäss SIA 181:*

Lärmempfindlichkeit	Grad der Störung				
	mässig		stark		sehr stark
	F	B	**F**	B	**F**
gering	**45**	50	**40**	45	**35**
mittel	**40**	45	**35**	40	**30**
hoch	**35**	40	**30**	35	**25**

F: Funktionsgeräusche B: Benutzergeräusche. Für Wärmepumpen gilt immer F.

Für erhöhte Anforderungen gilt ein Grenzwert der 5 dB tiefer liegt.

Ermittlung des Beurteilungspegels $L_{r,h}$

Bei der Bestimmung des Beurteilungspegel $L_{r,h}$ von haustechnischen Geräuschen wird zwischen Einzelgeräuschen und Dauergeräuschen unterschieden.

Einzelgeräusche

Es wird der A-bewertete Maximalschallpegel L_A mit der Zeitkonstante FAST gemessen am Ort wo sich normalerweise Personen aufhalten. Der Beurteilungspegel $L_{r,h}$ berechnet sich wie folgt:

$$L_{r,h} = L_A + K1$$

K1 = 0 für möblierte Räume
3 für unmöblierte Räume

Dauergeräusche

Einfache Methode:

Es wird der A-bewertete Schallpegel L_A mit der Zeitkonstante FAST gemessen am Ort wo sich normalerweise Personen aufhalten. Der Beurteilungspegel $L_{r,h}$ berechnet sich wie folgt:

$$L_{r,h} = L_A + K1 + K2 + K3$$

K1	Möblierung	0 für möblierte Räume -3 für unmöblierte Räume
K2	Tongehalt:	0 nicht hörbar 2 schwach hörbar 4 deutlich hörbar 6 stark hörbar
K3	Impulsgehalt:	0 nicht hörbar 2 schwach hörbar 4 deutlich hörbar 6 stark hörbar

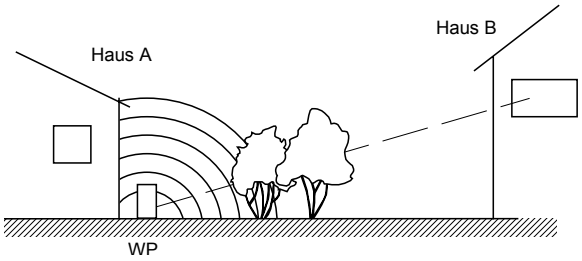
Aufwendige Methode:

Wenn der Beurteilungspegel $L_{r,h}$ exakter ermittelt werden muss, dann ist eine Messung in Terzbändern notwendig. Neben dem Schalldruckpegel ist auch die Nachhallzeit zu messen. Die Methode ist in der Norm SIA 181 beschrieben.

Anhang

A1 Einfaches Beispiel: Schallausbreitung im Freien, Berechnung des Beurteilungspegels

Situation



Vor dem Haus A soll neu eine Luft/Wasser-Wärmepumpe im Garten erstellt werden.

Die Distanz von der Wärmepumpe zum Schlafzimmerfenster von Haus B beträgt 15 Meter. Die Sichtlinie ist unterbrochen durch ein leichtes Gebüsch. Das Haus B befindet sich in einer reinen Wohnzone mit Empfindlichkeitsstufe II.

Die Betriebsdauer der Wärmepumpe beträgt im Durchschnitt 6 h am Tag und 3 h in der Nacht während der Heizperiode im Winter (Prognose). Die Schalleistung der Wärmepumpe wird mit 65 dB(A) angegeben. Aus Erfahrung ist bekannt, dass die Wärmepumpe relativ stark brummt.

Wie ist die Situation zu beurteilen?

Berechnung der Lärmimmissionen

Gemäss Lärmschutzverordnung sind Empfangspunkte im offenen Fenster von *lärmempfindlichen* Räumen wesentlich. Lärmempfindliche Räume sind *Räume in Wohnungen, ausgenommen Küchen ohne Wohnanteil, Sanitärräume und Abstellräume (...)* (LSV Art. 2^{6})

Da das Schlafzimmerfenster das am nächsten liegende Fenster der lärmempfindlichen Räume von Haus B ist, müssen die Immissionen dort ermittelt werden.

In diesem einfachen Fall müssen nur die geometrischen Verluste und die Abstrahlwirkung der Hauskante in die Rechnung einbezogen werden. Die Wirkung des Gebüsches ist vernachlässigbar klein!

$L(x) = L_W - 20 \cdot \log(r) - 11 + D_C$

$L_{W,A}$ = 65 dB(A)
r = 15m
D_C = 6 dB (Die WP ist in einer Kante plaziert)

L = 65 - 20·log(15) - 11 + 6 = 36.5 dB(A)

L entspricht dem Leq in der folgenden Formel.

Beurteilung gemäss Lärmschutzverordnung (LSV)

Lr = Leq + K1 + K2 + K3 + 10·log(t/t0)

	Tag	Nacht	
Leq	36.5	36.5	
K1	5	10	1)
K2	4	4	2)
10·log(t/t0)	-3	-6	
Lr	**43**	**45**	

1) LSV Anhang 6 Abschnitt 33^{1} (K1 für Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen).
2) deutlich hörbarer Tongehalt.

Für eine neue Anlage sind in der vorliegenden Situation die Planungswerte (PW) der Empfindlichkeitsstufe II einzuhalten:

	Tag	Nacht
PW	**55**	**45**

Am Tag sind die Planungswerte deutlich eingehalten, in der Nacht nur knapp.

Die Grenzwerte sind also eingehalten (LSV Art. 7^{1b}). Es gilt jedoch noch zu überprüfen, ob gemäss Art. 7^{1a} der LSV (**Vorsorgeprinzip**) die Lärmemissionen der neuen Anlage soweit begrenzt sind, ***als dies technisch und betrieblich möglich und wirtschaftlich tragbar ist.***

A2 Beispiel: Beurteilung nach SIA 181

Situation

Im Schlafzimmer einer Eigentumswohnung in einem Haus wird der Lärmpegel, der durch eine Wärmepumpe im Keller verursacht wird, nachts als zu laut empfunden. Im Kaufvertrag sind die erhöhten Anforderungen nach SIA 181 abgemacht. Eine Schallmessung ergibt einen Pegel von 29 dB(A). Die Tonhaltigkeit wird als "deutlich hörbar" bezeichnet.

Anforderungsstufe:	Erhöhte Anforderungen (gemäss Vertrag)
Lärmempfindlichkeit:	mittel (siehe *Tabelle 8)*
Störgrad:	sehr stark (siehe *Tabelle 9)*, Dauergeräusch in der Nacht

Aus dem Grenzwertschema *(Tabelle 10)* ergibt sich ein Grenzwert von 30, der sich wegen den erhöhten Anforderungen um 5 dB vermindert, also **25 dB** beträgt.

Der Beurteilungspegel berechnet sich wie folgt:

$$L_{r,h} = L_A + K1 + K2 + K3$$

K1	Möblierung	0	möblierter Raum
K2	Tongehalt:	4	deutlich hörbar
K3	Impulsgehalt:	0	nicht hörbar

damit gilt

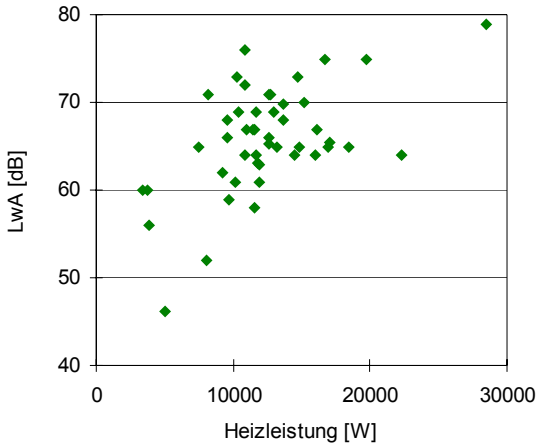
$$\mathbf{L_{r,h}} = 29 + 0 + 4 + 0 \mathbf{= 33}$$

Der Beurteilungspegel ist um 8 dB zu hoch!

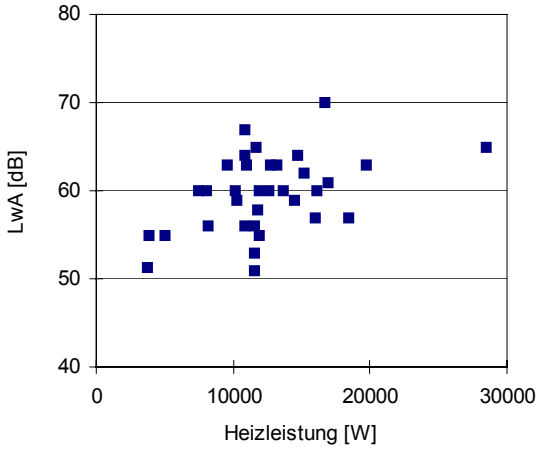
A3 Statistik der Schallleistungsmessungen in Töss

Heizleistung - Schallleistungspegel

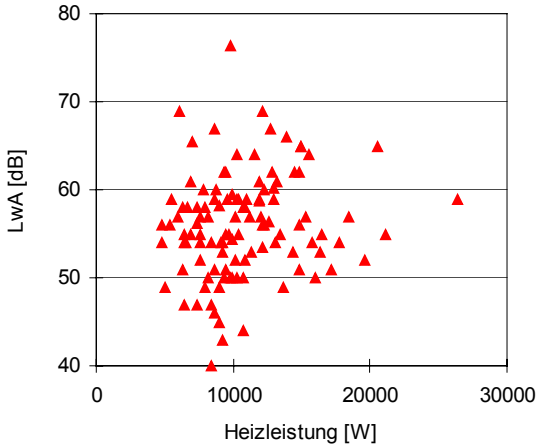
Luft/Wasser-Wärmepumpen (Aussen)
Betriebspunkt A15, W50



Luft/Wasser-Wärmepumpen (Innen)
Betriebspunkt A15, W50

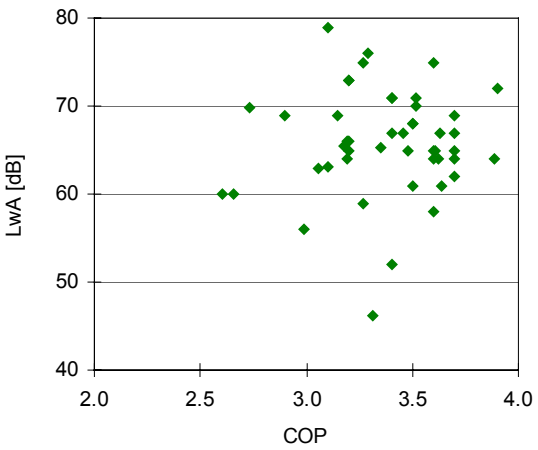


Sole/Wasser, Wasser/Wasser-Wärmepumpen
Betriebspunkt B0, W50; W10, W50

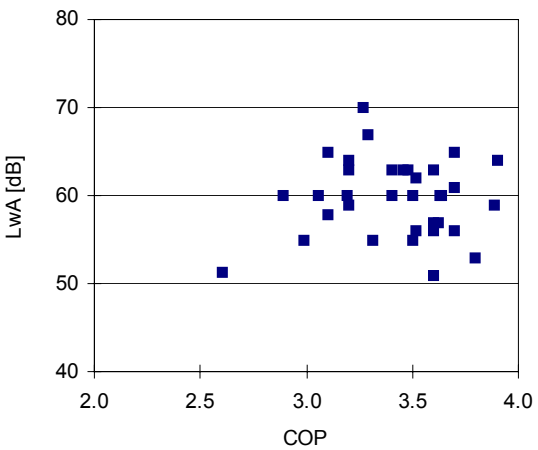


COP[6] - Schallleistungspegel

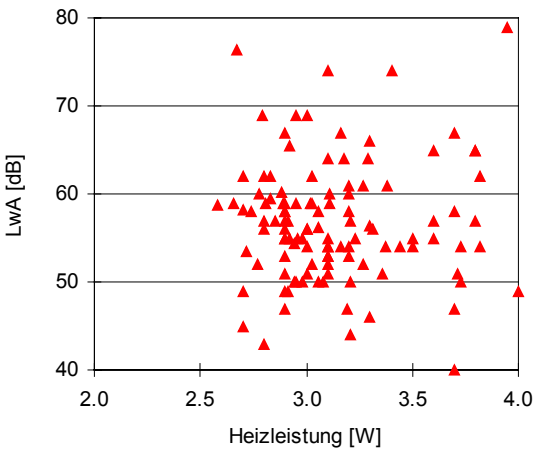
Luft/Wasser-Wärmepumpen (Aussen)
Betriebspunkt A15, W50



Luft/Wasser-Wärmepumpen (Innen)
Betriebspunkt A15, W50



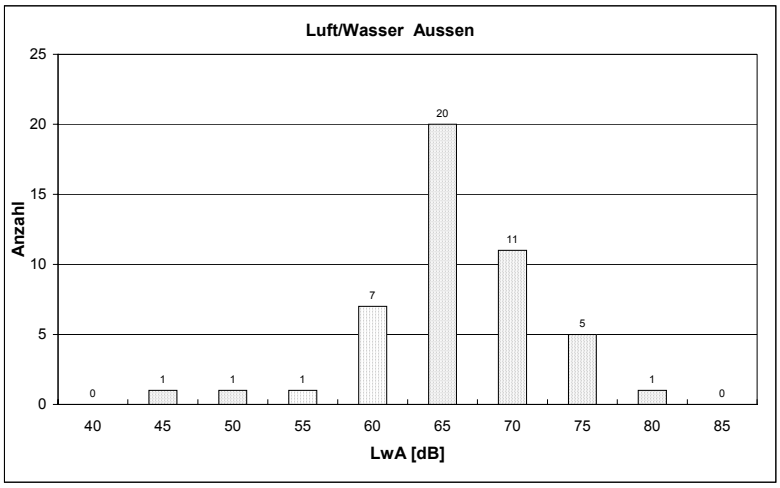
Sole/Wasser, Wasser/Wasser-Wärmepumpen
Betriebspunkt B0, W50; W10, W50



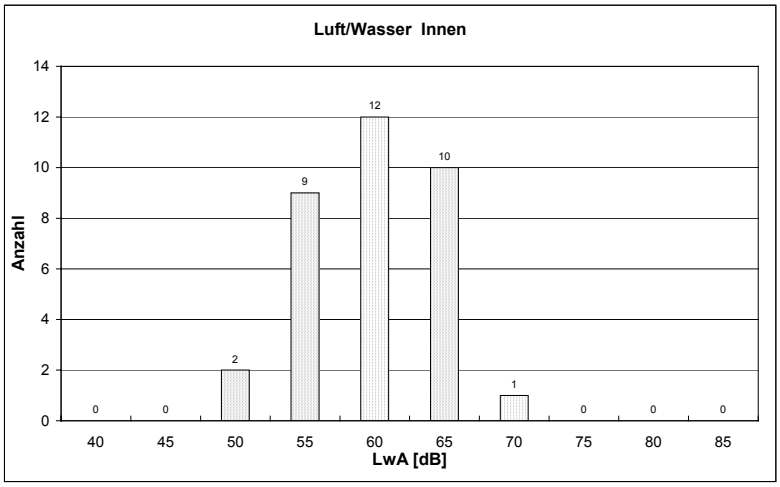
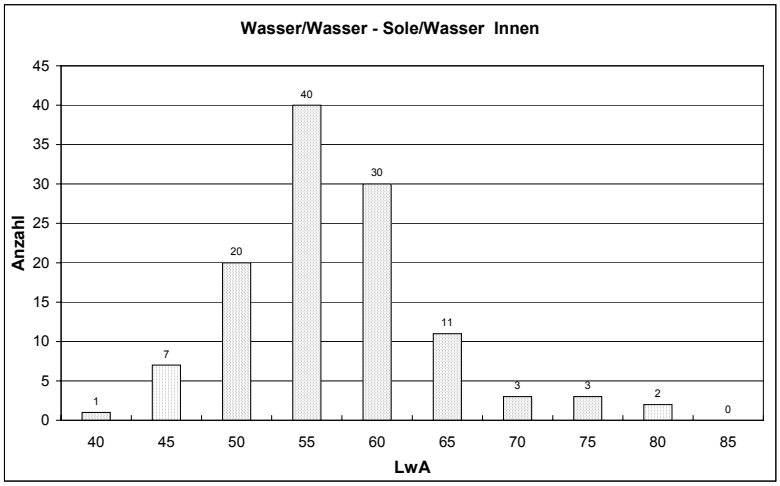
[6] COP = Coefficient of Performance.

Schallleistungspegel

Luft/Wasser-Wärmepumpen (Aussen) Betriebspunkt A15, W50



Luft/Wasser-Wärmepumpen (Innen) Betriebspunkt A15, W50



Sole/Wasser, Wasser/Wasser-Wärmepumpen Betriebspunkt B0, W50; W10, W50