



Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen

Ein Leitfaden



lärm



Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen

Ein Leitfaden

Impressum

Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen und Luftwärmepumpen

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: (08 21) 90 71-0
Fax: (08 21) 90 71-55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Referat 26, Georg Eberle, Wolfgang Fürst, Bernhard Ruttko

Redaktion:

LfU, Referat 26, Bernhard Ruttko

Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt, Titelbild, Abb. 1 – Abb. 30, Abb. 32, Abb. 33, Abb. 35 – Abb. 39
Sulzer Innotec, Sulzer-Allee 25, 8406 Winterthur (Schweiz); Abb. 31/S. 39, Abb. 34/S. 42, Abb. 44/S. 56, Abb. 45/S. 57,
Abb. 50/S. 61
EMPA, Eidgenössische Material Prüfungs- und Forschungsanstalt, Ueberlandstrasse 129, 8600 Dübendorf (Schweiz),
Abb. 43/S. 56, Abb. 46/S. 59, Abb. 47/S. 59, Abb. 48/S. 60, Abb. 49/S. 61
Wolter GmbH, Maschinen und Apparatebau, Am Wasen 11, 76316 Malsch; Abb. 40/S. 52
Expert Verlag, Wankelstr. 13, 71272 Renningen, Strömungsakustik in Theorie und Praxis, Walter Lips, Abb. 41/S. 53
Verlag Tribüne, Lärmschutz in der Praxis, Werner Schirmer; Abb. 42/S. 54

Druck:

Kessler Druck + Medien GmbH & Co. KG
Michael-Schäffler-Str. 1
86399 Bobingen

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

Stand:

Februar 2011
Korrektur gegenüber der Druckfassung:
S. 42, Tabelle letzte Zeile 75 dB(A) (nicht 80 dB(A))

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
I. Schalltechnische Grundlagen, Normen und Richtlinien	
1 Schalltechnische Grundlagen	7
1.1 Grundbegriffe	7
1.2 Schalldruckpegel	7
1.3 Schalleistungspegel	7
1.4 Frequenzbewertung	8
1.5 Zeitbewertung	9
1.6 Oktav- / Terzpegel	9
1.7 Mittelungspegel	9
1.8 Maximalpegel	9
1.9 Beurteilungspegel	9
1.10 Hörschwellenpegel	10
1.11 Schallausbreitung	10
2 Beurteilung nach TA Lärm	11
2.1 Immissionsrichtwerte	11
2.2 Beurteilungszeiten	11
3 Tieffrequente Geräusche	12
II. Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen	
4 Beurteilungsgrundlagen, Hauptgeräuschquellen	14
5 Tieffrequente Schallemissionen von Biogasanlagen	17
5.1 Diskussion der Ergebnisse	21
6 Tieffrequente Schallimmissionen von Biogasanlagen	22
6.1 Überschlägige Prognose tieffrequenter Schallimmissionen für den Innenraum	24
6.2 Diskussion der Ergebnisse	25
7 Schallschutzmaßnahmen	26
8 Zusammenfassung	33
III. Tieffrequente Geräusche bei „Luftwärmepumpen“	
9 Einleitung	34

10	Funktionsweise einer Luftwärmepumpe	35
11	Aufbau und Schallquellen einer Luftwärmepumpe	35
12	Schalleistungspegel und Frequenzverlauf (Tonhaltigkeit)	37
13	Beurteilung	39
13.1	Prüfung, Immissionsrichtwerte	39
13.2	Zuschläge zum Beurteilungspegel	39
13.3	Raum-Innenmessung nach DIN 45680	40
13.4	Baurechtliche Bestimmungen und städtebauliche Planung	41
14	Schallausbreitung und Möglichkeiten der Lärminderung	41
14.1	Luftschall	41
14.1.1	Niederfrequente Geräusche und Auswahl eines Gerätes	41
14.1.2	Erforderliche Abstände (orientierende Berechnung)	42
14.1.3	Reflexionen und Richtcharakteristik	42
14.1.4	Aufstellung der Wärmepumpe und Schallschirme	43
14.1.5	Absorbierende Bekleidungen von Oberflächen	45
14.1.6	Ventilatoren	45
14.1.7	Luftkanalgestaltung	47
14.1.8	Luftkanaleinbauten und -auskleidungen	47
14.1.9	Schalldämpfer	48
14.1.10	Resonatorschalldämpfer	49
14.1.11	Lichtschächte	50
14.2	Innenlärm und Körperschall	51
14.2.1	Aufstellung und elastische Lagerung	51
14.2.2	Installation, Rohrleitungen und Luftkanallagerung	52
14.2.3	Einhausung und Kapselung	53
14.2.4	Entdröhnung von Blechen	53
15	Schallschutzmaßnahmen	53
16	Zusammenfassung	54
17	Literatur	55
18	Abbildungen	56

Vorwort

Aufgrund des weltweit steigenden Energiebedarfs werden die Ressourcen der fossilen Energiequellen wie etwa Öl oder Kohle schneller verbraucht als bisher angenommen. Der Einsatz und die Entwicklung alternativer Energiequellen werden aus diesem Grund beschleunigt.

Biogasanlagen oder der Einsatz von Luftwärmepumpen in Wohngebieten stellen dabei nur einen kleinen Bereich der alternativen Energien dar. Diese Anlagen bereiten aus der Sicht des Lärmschutzes immer wieder Probleme. Sie emittieren insbesondere auch tieffrequenten Schall, der von den Außenbauteilen der Gebäude, wie Wänden oder Fenstern weniger stark gedämmt wird als die übrigen Frequenzanteile. Als Folge dessen treten häufig Lärmbelästigungen speziell durch tieffrequenten Schall in Wohnungen auf. Der Leitfaden diskutiert diese Lärmproblematik und zeigt Lösungen auf, die die Geräuschsituation verbessern können.

In dem [Kapitel I](#) des Leitfadens werden die schalltechnischen Grundlagen und die einschlägigen Regelwerke zur Erfassung und Beurteilung von tieffrequenten Geräuschimmissionen vorgestellt. Im [Kapitel II](#) (s. S. 14) werden die tieffrequenten Geräusche von Biogasanlagen, und im [Kapitel III](#) (s. S. 34) die von Luftwärmepumpen behandelt.



Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle
Präsident des Bayerischen Landesamtes für Umwelt

I. Schalltechnische Grundlagen, Normen und Richtlinien

Georg Eberle, Bayerisches Landesamt für Umwelt

1 Schalltechnische Grundlagen

1.1 Grundbegriffe

Unter dem Begriff „Schall“ ist die Ausbreitung von lokalen Druckschwankungen in elastischen Medien wie Luft und Flüssigkeit aber auch Feststoffen zu verstehen. Wird zum Beispiel eine Stimmgabel zum Schwingen angeregt, so werden die Moleküle der Umgebungsluft ebenfalls zum Schwingen gebracht. Wenn sich die schwingenden Moleküle dabei aufeinander zu bewegen kommt es zu lokalen Druckerhöhungen und umgekehrt wird der lokale Luftdruck verringert. Die schwingenden Moleküle regen dabei auch die benachbarten Moleküle zu Schwingungen an. Um die Schallquelle bilden sich dadurch wellenförmige Bereiche mit Druckerhöhungen und Druckabsenkungen aus. Diese Druckschwankungen werden als Schallwellen bezeichnet. Die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde kennzeichnen die Tonhöhe und werden als Frequenz mit der Einheit Herz (Hz) angegeben. Je höher die Anzahl der Schwingungen pro Sekunde umso höher ist auch die empfundene Tonhöhe. Dabei umfasst der Hörbereich eines Menschen etwa den Bereich von 20 Hz bis 20.000 Hz. Die Schwingungen unterhalb dieses Bereichs werden als Infraschall und darüber als Ultraschall bezeichnet.

1.2 Schalldruckpegel

Der Schalldruck ist ein Maß für die Stärke der Druckschwankungen und wird in Pascal (Pa) gemessen. Der Wahrnehmungsbereich des Menschen umfasst Druckschwankungen von $20 \cdot 10^{-6}$ Pa (Hörschwelle) bis 20 Pa. Die Schmerzgrenze befindet sich etwa bei 60 Pa. Die enorme Dynamik der Empfindlichkeit ist zahlenmäßig sehr aufwendig zu handhaben. Mit der logarithmischen Darstellung lässt sich wesentlich einfacher arbeiten, daher wird sie in der Akustik für viele Angaben und Berechnungen verwendet.

Als schalltechnische Kenngröße dient der Schalldruckpegel L_p mit der Einheit Dezibel (dB).

Berechnet wird er mit dem Schalldruck relativ zu einem Bezugswert, hier dem Schalldruck an der Hörschwelle im empfindlichsten Frequenzbereich des Ohres. Dieser stellt daher auch den Nullpunkt der dB-Skala dar. Die Schmerzschwelle mit 60 Pa liegt etwa bei 130 dB. Der Schalldruckpegel ist eine ortsabhängige Größe und kann nur bei Kenntnis des Schallfeldes und der Schallausbreitung auf andere Orte umgerechnet werden.

$$L_p = 20 \lg (p/p_0)$$

$$L_p = \text{Schalldruckpegel [dB]}$$

$$p = \text{Schalldruck [Pa]}$$

$$p_0 = \text{Bezugsschalldruck} = 20 \mu \text{ Pa}$$

1.3 Schalleistungspegel

Der Schalleistungspegel L_W gibt die von einer Schallquelle abgestrahlte Schalleistung an. Er ist eine für die Schallquelle typische ortsunabhängige Kenngröße mit der Einheit dB. Der L_W entspricht dem zehnfachen dekadischen Logarithmus des Verhältnisses der von der Schallquelle abgestrahlten Schalleistung P zur Bezugsschalleistung P_0 von 1 pW. Der L_W wird nicht direkt gemessen, sondern aus Schalldruckpegel L_p und Hüllfläche S berechnet.

$$L_w = L_p + 10 \lg (S/S_0)$$

L_w = Schalleistungspegel [dB]

L_p = Schalldruckpegel [dB]

S = Messflächeninhalt [m²]

S_0 = Bezugsflächeninhalt = 1m²

Bei einer gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlenden Punktschallquelle (Kugelstrahler) ist der Schalleistungspegel und der Schalldruckpegel in einem Abstand von 28,2 cm zum Quellenmittelpunkt gleich. Bei einer vielfach üblichen Angabe des Schalldruckpegels in 1 m Abstand ergibt sich beim Kugelstrahler gegenüber dem Schalleistungspegel ein um 11 dB geringerer Wert.

1.4 Frequenzbewertung

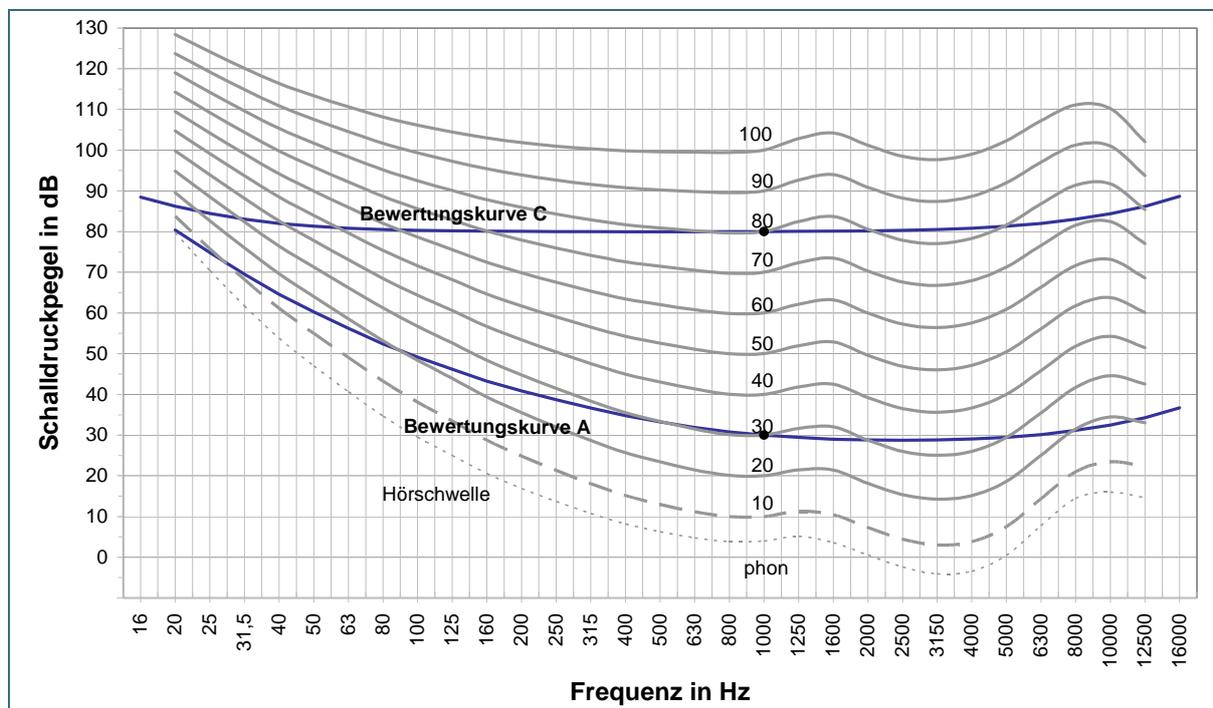


Abb. 1: Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne nach DIN ISO 226 [7], mit den Bewertungskurven A bei 30 dB und C bei 80 dB

In der menschlichen Lautstärkewahrnehmung gibt es im Frequenzbereich große Unterschiede. Geräusche im Bereich von 1000 Hz bis 4000 Hz werden bei gleichem Schalldruck lauter wahrgenommen als Geräusche unter oder über diesem Bereich. Daher erfolgt bei der Schallmessung eine gehörabhängige Gewichtung mit Frequenzfilter. Meist kommt ein A-Filter zum Einsatz. Der so ermittelte Geräuschpegel wird A-bewerteter Schalldruckpegel genannt und in der Einheit dB(A) angegeben. Der vom Menschen empfundene Geräuscheindruck wird damit relativ zuverlässig erfasst. Bei der Messung tiefer Frequenzen wird zudem ein C-Filter eingesetzt (Pegelangaben in dB(C)).

1.5 Zeitbewertung

Da das Ohr nicht die einzelne Schallschwingung, sondern vielmehr den Effektivwert des Schallsignals als Gehöreindruck aufnimmt, wurden für die Messgeräte verschiedene Zeitkonstanten bei der Effektivwertbildung des Schalldrucksignals festgelegt. Bei fast allen Geräuscharten wird heute mit der Zeitkonstanten „Fast“ gemessen, dabei beträgt die Zeitkonstante am Messgerät $\tau(\text{Tau}) = 0,125 \text{ s}$.

Pegelangaben mit dem Index „F“ kennzeichnen die Zeitbewertung Fast. (Hinweis: Es gibt auch die Zeitbewertungen „S“ für Slow und „I“ für Impuls. Diese sind aber für die vorliegende Abhandlung nicht relevant.)

1.6 Oktav- / Terzpegel

Der Frequenzbereich kann logarithmisch in Oktaven und Terzen (d.h. Dritteloktaven) unterteilt werden. Bei der Oktavteilung entspricht ein Oktavschritt einer Frequenzverdoppelung. Die Terzteilung unterteilt eine Oktav wiederum logarithmisch in drei Teile. Die Mittenfrequenz teilt die Terz oder Oktav in zwei logarithmisch gleiche Teile und kennzeichnet namentlich die Terz oder Oktav.

Der Terz-Schalldruckpegel $L_{\text{TerzF}}(t)$ kennzeichnet den mit der Zeitbewertung „F“ gebildeten Schalldruckpegel des terzbandgefilterten Geräusches [6].

1.7 Mittelungspegel

Der Mittelungspegel ist der energieäquivalenter Dauerschallpegel L_{Aeq} , L_{Ceq} bzw. $L_{\text{Terz,eq}}$, der während einer Messung aus den zeitlich sich ändernden Einzelmesswerten nach DIN 45641 [5] gebildet wird. Dabei beinhaltet das kontinuierliche Schallsignal während einer bestimmten Zeit den gleichen Energieanteil wie der ermittelte konstante energieäquivalente Pegelwert.

1.8 Maximalpegel

Maximaler Schalldruckpegel L_{AFmax} , L_{CFmax} bzw. $L_{\text{Terz,Fmax}}$ innerhalb eines Messzeitraumes. Er wird zur Kennzeichnung von kurzzeitigen Geräuschspitzen nach TA Lärm [2] herangezogen.

1.9 Beurteilungspegel

Der Beurteilungspegel L_r ist der aus dem Mittelungspegel des zu beurteilenden Geräusches und gegebenenfalls aus Zuschlägen gemäß TA Lärm für Ton- und Informationshaltigkeit, Impulshaltigkeit und für Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit gebildete Wert zur Kennzeichnung der mittleren Geräuschbelastung während der Beurteilungszeit. Der Beurteilungspegel L_r ist diejenige Größe, die mit den Immissionsrichtwerten nach TA Lärm verglichen wird. Bei der Beurteilung tieffrequenter Geräusche sind keine Zuschläge zu berücksichtigen. Es erfolgt für den Terz-Beurteilungspegel $L_{\text{Terz,r}}$ eine Berechnung aus Einwirkzeit und Beurteilungszeit:

$$L_{\text{Terz,r}} = L_{\text{Terz,eq}} + 10 \lg (T_e / T_r)$$

$$L_{\text{Terz,r}} = \text{Terz-Beurteilungspegel [dB]}$$

$$L_{\text{Terz,eq}} = \text{Terz-Mittelungspegel [dB]}$$

$$T_e = \text{Einwirkzeit}$$

$$T_r = \text{Beurteilungszeit}$$

1.10 Hörschwellenpegel

Wie bereits im Abschnitt Frequenzbewertung dargestellt, ändert sich die menschliche Wahrnehmung über den Frequenzbereich. Besonders deutlich trifft dies auf den Bereich unter 100 Hz zu. In der DIN 45680 [3] sind mittlere Hörschwellenpegel angegeben, ab deren Überschreitung mit einer Wahrnehmung durch Betroffene zu rechnen ist. Die jeweiligen Hörschwellenpegel sind für die Terzmittenfrequenzen von 8 Hz bis 100 Hz angegeben.

1.11 Schallausbreitung

Eine detaillierte Berechnung der Schallausbreitung aus den Emissionsdaten lässt sich für jede abstrahlende Schallquelle nach der DIN ISO 9613-2 [4], Abschnitt 6, durchführen. Dabei werden die Effekte durch Dämpfung aufgrund geometrischer Ausbreitung, Luftabsorption, Bodeneffekte, Abschirmung und verschiedener anderer Einflüsse berücksichtigt.

Vereinfacht kann die Berechnung der Schallausbreitung überschlägig auch nach Gleichung 4 der TA Lärm erfolgen (s. Nr. A.2.4.3 TA Lärm):

$$L_{Aeq}(s_m) = L_{WAeq} + DI + K_0 - 20 \lg(s_m) - 11 \text{ dB}$$

L_{WAeq} = der mittlere A-bewertete Schalleistungspegel der Schallquelle

s_m = Abstand des Immissionsortes in Meter [m] vom Zentrum der Quelle

DI = Richtwirkungsmaß der Schallquelle

K_0 = Raumwinkelmaß

K_0 berücksichtigt die Pegelerhöhungen durch reflektierende Flächen in der Nähe der Schallquelle:

Außer der Eigenabschirmung von schallabstrahlenden Gebäuden sind bei der überschlägigen Prognose keine Abschirmungen zu berücksichtigen.

Lage der Geräuschquelle	Ω in sr	K_0 in dB
frei im Raum, hoch über dem Boden	4π	0
in oder unmittelbar vor (über) einer stark reflektierenden Fläche (z.B. Dach, Boden)	2π	+3
vor zwei aufeinander senkrecht stehenden Flächen (auch Wandflächen über Boden)	π	+6
vor drei aufeinander senkrecht stehenden Flächen	$\pi/2$	+9

Tab. 1:
Raumwinkelmaße nach VDI 2714

sr: Steradian

2 Beurteilung nach TA Lärm

Für die schalltechnische Beurteilung von Anlagen nach §3 Absatz 5 BImSchG [1] wird die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm (TA Lärm) herangezogen.

2.1 Immissionsrichtwerte

Werden die in Nr. 6 der TA Lärm aufgeführten Immissionsrichtwerte (IRW) nicht überschritten, liegen keine schädlichen Umwelteinwirkungen im Sinne des BImSchG [1] vor.

Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden		
a) in Industriegebieten		70 dB(A)
b) in Gewerbegebieten	tags	65 dB(A)
	nachts	50 dB(A)
c) in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten	tags	60 dB(A)
	nachts	45 dB(A)
d) in allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	tags	55 dB(A)
	nachts	40 dB(A)
e) in reinen Wohngebieten	tags	50 dB(A)
	nachts	35 dB(A)
f) in Kurgebieten, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten	tags	45 dB(A)
	nachts	35 dB(A)
Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Immissionsrichtwerte am Tage um nicht mehr als 30 dB(A) und in der Nacht um nicht mehr als 20 dB(A) überschreiten.		

Tab. 2:
Immissionsrichtwerte nach 6.1 der
TA Lärm

2.2 Beurteilungszeiten

Die Immissionsrichtwerte in Tabelle 2 beziehen sich auf folgende Zeiten:

tags: 06:00 – 22:00 Uhr

nachts: 22:00 – 06:00 Uhr

Die in 2.1 angegebenen IRW gelten während des Tages für eine Beurteilungszeit von 16 Stunden. Maßgebend für die Beurteilung in der Nacht ist die volle Nachtstunde mit dem höchsten Beurteilungspegel, zu dem die zu beurteilende Anlage relevant beiträgt. Die Nachtzeit kann bis zu einer Stunde hinausgeschoben oder vorverlegt werden, soweit dies wegen der besonderen örtlichen oder wegen zwingender betrieblicher Verhältnisse unter Berücksichtigung des Schutzes vor schädlichen Umwelteinwirkungen erforderlich ist. Eine achtstündige Nachtruhe der Nachbarschaft im Einwirkungsbereich der Anlage ist sicherzustellen.

3 Tieffrequente Geräusche

Tieffrequente Geräuschanteile, die zum Beispiel durch Biogasanlagen oder Wärmepumpen erzeugt werden, können aufgrund der geringeren Dämmwirkung von Baustoffen bei tiefen Frequenzen, auch in weiter entfernten Wohnhäusern belästigende Immissionen verursachen.

Geräuschimmissionen, die überwiegend im tieffrequenten Bereich liegen, und deshalb leichter in den Innenraum eindringen, führen häufig auch dann zu Beschwerden, wenn der mit der Frequenzbewertung A gebildete Beurteilungspegel unter dem IRW der TA Lärm liegt. Der Verlauf der Hörschwelle ist besonders im tieffrequenten Bereich stark frequenzabhängig. Eine Beurteilung sollte daher nach der DIN 45680 [3] und dem zugehörigen Beiblatt 1 erfolgen. Diese DIN-Norm ist im Anhang der TA Lärm für die Beurteilung tiefer Frequenzen genannt (vgl. Nr. A. 1.5 TA Lärm).

Der Bereich der tiefen Frequenzen umfasst die Terzbänder mit den Mittenfrequenzen 10 Hz bis 80 Hz (in Sonderfällen 8 Hz bis 100 Hz). Schall wird als tieffrequent bezeichnet, wenn seine vorherrschenden Energieanteile unter 90 Hz liegen. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn der Differenzschalldruckpegel $L_{CF} - L_{AF}$ größer als 20 dB ist.

Die DIN 45680 [3] betrachtet die Geräuschsituation im Wohnraum an dem am stärksten betroffenen Aufenthaltsort und orientiert sich dabei an der durchschnittlichen Hörschwelle des Menschen. Das Geräusch wird hier im tieffrequenten Bereich spektral in Terzpegel aufgelöst und bei einem deutlich hervortretenden Einzelton (Abweichung zur Nachbarterz um mind. +5 dB) mit Anhaltswerten verglichen. In nachfolgender Tab. 3 und Abb. 2 sind die maximal zulässigen Terz-Beurteilungspegel $L_{Terz,r}$ und Terz-Maximalpegel $L_{Terz,Fmax}$ für die Tages- und Nachtzeiträume dargestellt.

Tab. 3: Nach DIN 45680 [3] zulässige Schallpegel im Wohnraum

Terzmittenfrequenz [Hz]	mittlere Hörschwelle L_{HS} nach DIN 45680 [3] [dB]	maximal zulässiger			
		$L_{Terz,r}$ [dB]		$L_{Terz,Fmax}$ [dB]	
		Tag	Nacht	Tag	Nacht
8	103	108	103	118	113
10	95	100	95	110	105
12,5	87	92	87	102	97
16	79	84	79	94	89
20	71	76	71	86	81
25	63	68	63	78	73
31,5	55,5	60,5	55,5	70,5	65,5
40	48	53	48	63	58
50	40,5	45,5	40,5	55,5	50,5
63	33,5	38,5	33,5	48,5	43,5
80	28	38	33	48	43
100	23,5	38,5	33,5	48,5	43,5

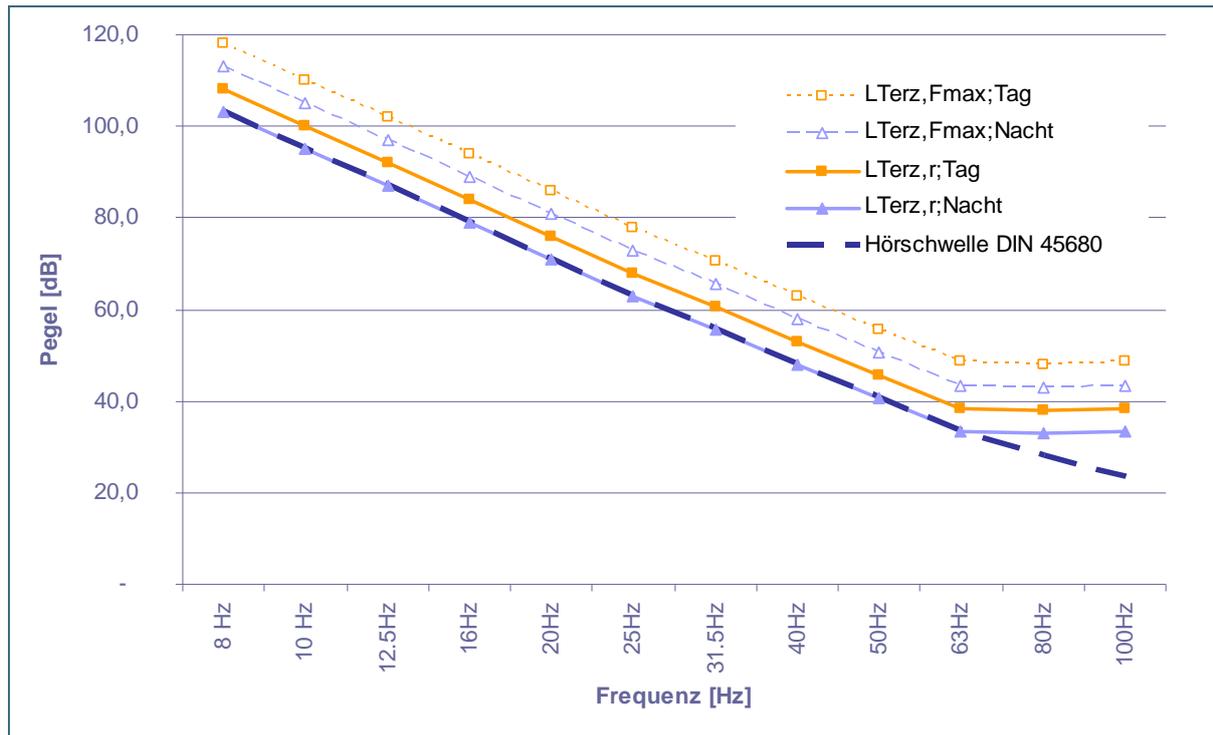


Abb. 2: Maximale zulässige Pegel nach DIN 45680 Beiblatt 1 [3] für Tag- und Nachtzeitraum

Sollte das in Terzbandbreite aufgelöste Schallsignal und auch das subjektive Empfinden keinen ausgeprägten Einzelton aufweisen, so sind die A-bewerteten Terzbeurteilungspegel $L_{\text{Terz},r}$ im Bereich von 10 Hz bis 80 Hz nach folgender Gleichung energetisch zu addieren. Terz-Beurteilungspegel, die geringer als die Hörschwelle L_{HS} sind, bleiben bei dieser Berechnung unberücksichtigt:

$$L_r = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{0,1(L_{\text{Terz},r,i} + K_{A,i})}$$

L_r = Beurteilungspegel [dB]

$L_{\text{Terz},r,i}$ = Terz-Beurteilungspegel über eine Stunde [dB]

$K_{A,i}$ = Korrekturwert für die A-Bewertung nach DIN EN 60651 [dB]

Der Beurteilungspegel L_r ist mit den Anhaltswerten nach Tab. 4 zu vergleichen und sollte die angegebenen Anhaltswerte nicht überschreiten.

Tab. 4: Anhaltswerte für tieffrequente Geräusche ohne Einzeltöne nach DIN 45680 [3]

Anhaltswerte bei tiefrequenten Geräuschen ohne Einzeltöne – Berechnung nach Gleichung 2		
Beurteilungszeit	L_r [dB]	L_{AFmax} [dB]
Tagstunden	35	45
Nachtstunden	25	35

Mit dem Begriff „Anhaltswerte“ soll zum Ausdruck gebracht werden, dass es sich nicht um gesicherte Grenzwerte handelt, sondern um empfohlene Werte, die sich auf die bisherigen Erfahrungen bei der Beurteilung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft gewerblicher Anlagen stützen [3].

II. Tieffrequente Geräusche bei Biogasanlagen

Bernhard Ruttko, Bayerisches Landesamt für Umwelt

4 Beurteilungsgrundlagen, Hauptgeräuschquellen

Die Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm - TA Lärm [2], definiert tieffrequente Geräusche als Pegelanteile unterhalb von 90 Hz (vgl. Nr. 7.3 TA Lärm), während die DIN 45680 „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft“ [3] den Bereich der tieffrequenten Geräusche schon ab 100 Hz abwärts festlegt.

Da Biogasanlagen Maximalpegel in den Terzbändern von 50 – 100 Hz (vgl. Abb. 9) emittieren, ist eine Beurteilung mit dem Schalldruckpegel und der Frequenzbewertung A nach TA Lärm alleine nicht ausreichend, auch wenn die von der Anlage insgesamt hervorgerufenen Beurteilungspegel die Immissionsrichtwerte gemäß Nr. 6.1 TA Lärm einhalten oder unterschreiten. Zusätzlich müssen die tieffrequenten Geräuschanteile betrachtet werden. Das zeigen die vielen Lärmbeschwerden im Umfeld von Biogasanlagen. Die tieffrequenten Geräusche von Biogasanlagen werden häufig als „Brummen“ wahrgenommen und von der Nachbarschaft als sehr störend, lästig, oder gar als gesundheitsgefährdend bezeichnet. Die bei Anlagen notwendige und übliche „Ermittlung der Geräuschimmissionen“ nach TA Lärm und die dazu gehörenden genehmigungsrechtlichen Belange des Immissionsschutzes werden hier nicht behandelt. Hinweise hierzu sind bereits im „*Biogashandbuch Bayern – Materialienband*“, das auf der Internetseite des LfU herunter geladen werden kann, enthalten:

<http://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/index.htm>.

Zweck dieses Leitfadens ist es, die Hauptgeräuschquellen einer Biogasanlage, die maßgeblich zu tieffrequenten Geräuschen beitragen, aufzuzeigen und Lösungsvorschläge zur Minderung zu empfehlen.

Eine Biogasanlage kann vereinfacht in einem Blockbild wie folgt dargestellt werden:

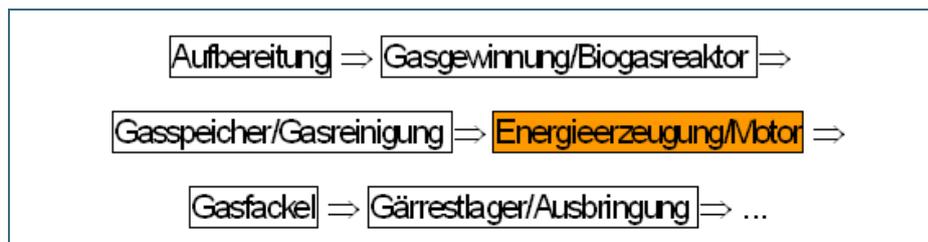


Abb. 3:
Schema einer Biogasanlage aus dem „Biogashandbuch Bayern“, S. 11, [8]

Aus der Sicht des Lärmschutzes ist der **Gasmotor** (Bereich *Energieerzeugung*) der Biogasanlage die **Hauptgeräuschquelle**. Die Schallübertragung nach außen erfolgt über die Lüftungsöffnungen, undichte Stellen, Wand- oder Dachflächen des Blockheizkraftwerks-Gebäudes/Containers und den Kamin.

Nachfolgende Abbildung zeigt Blockheizkraftwerks-Gebäude/Container von Biogasanlagen.



Abb. 4: Blockheizkraftwerks-Gebäude/Container von Biogasanlagen; Bereich Energieerzeugung

Eine weitere nennenswerte Schallquelle der Biogasanlage ist der **Luftkühler**, der außen am Blockheizkraftwerks-Gebäude/Container (BHKW) installiert ist. Dessen Geräuschcharakteristik ist aber nicht tieffrequent. Allerdings können infolge mangelhafter Entkoppelung am Fundament bzw. der Gebäudewand, Resonanzeffekte hervorgerufen werden.

Rührwerke und die **Substratdosiereinrichtung** emittieren ebenfalls keine tieffrequenten Geräuschanteile. Zudem sind sie nicht ununterbrochen im Betrieb wie der Gasmotor. Ähnlich wie beim Luftkühler, können die Rührwerke im Falle einer unsachgemäßen Befestigung Resonanzfrequenzen an der Aufhängung oder am Fermenter entstehen lassen, die im tieffrequenten Bereich liegen.

Der Fahrverkehr, die Substratanlieferung und Beschickung der Dosiereinrichtung erfolgt mit Fahrzeugen wie **Traktor**, **Radlader** oder **Teleskoplader**. Diese Fahrzeuge emittieren absolut betrachtet relativ hohe Schallemissionen mit dominanten tieffrequenten Geräuschanteilen, die von dem Dieselmotor verursacht werden (vgl. Abb. 12 und Abb. 13).

Nachfolgende Abbildungen zeigen typische Konfigurationen eines BHKW-Gebäudes und geräuschrelevante Komponenten einer Biogasanlage:

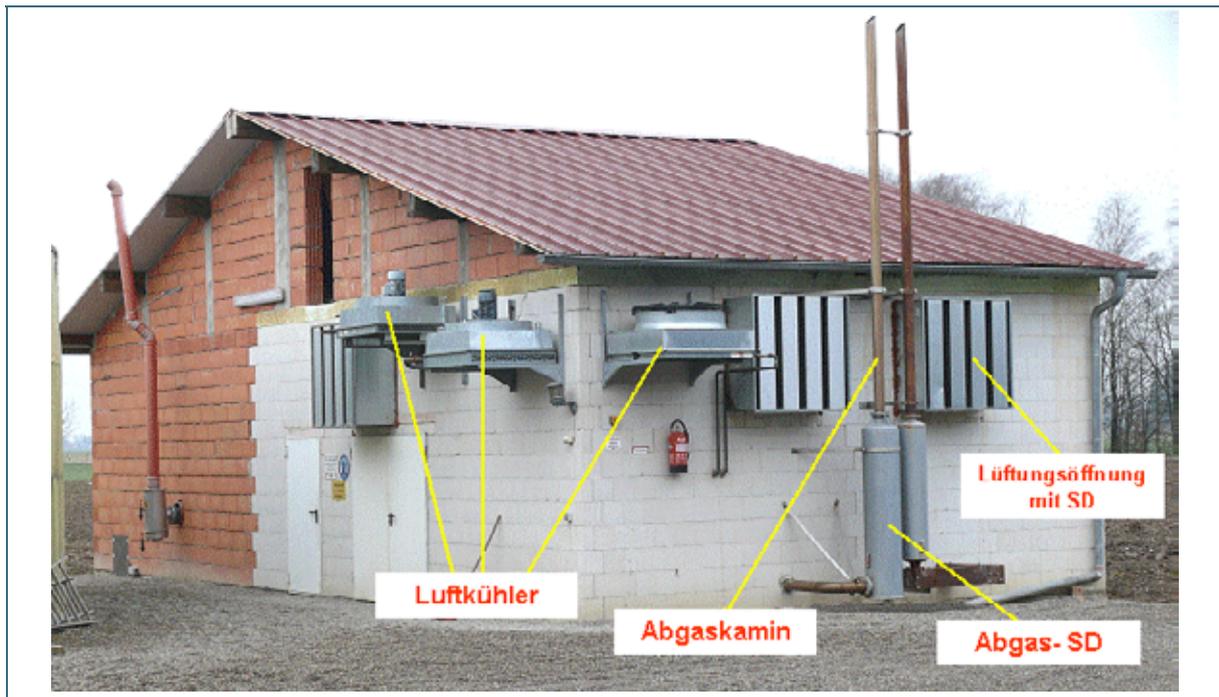


Abb. 5: Typische Konfiguration eines BHKW-Gebäudes; SD: Schalldämpfer



Abb. 6: Geräuschrelevante Komponenten einer Biogasanlage

5 Tieffrequente Schallemissionen von Biogasanlagen

Die vom LfU gemessenen Terzspektren von Innenpegeln im Gasmotorraum und Terz- Schalleis- tungspegel der Blockheizkraftwerksgebäude (BHKW-Gebäude) bei 1 und 2- motorigen Biogasanlagen mit einer elektrischen Leistung von 100 kW bis 530 kW sind in den folgenden Diagrammen abgebildet.

Tab. 5: Anzahl Gasmotore der in Abb. 7 dargestellten Biogasanlagen

Anlage	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
Anzahl Gasmotore	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	1	2	1	2
Leistung [kW]	100	110	190	200	200	200	200	250	300	320	330	330	350	530

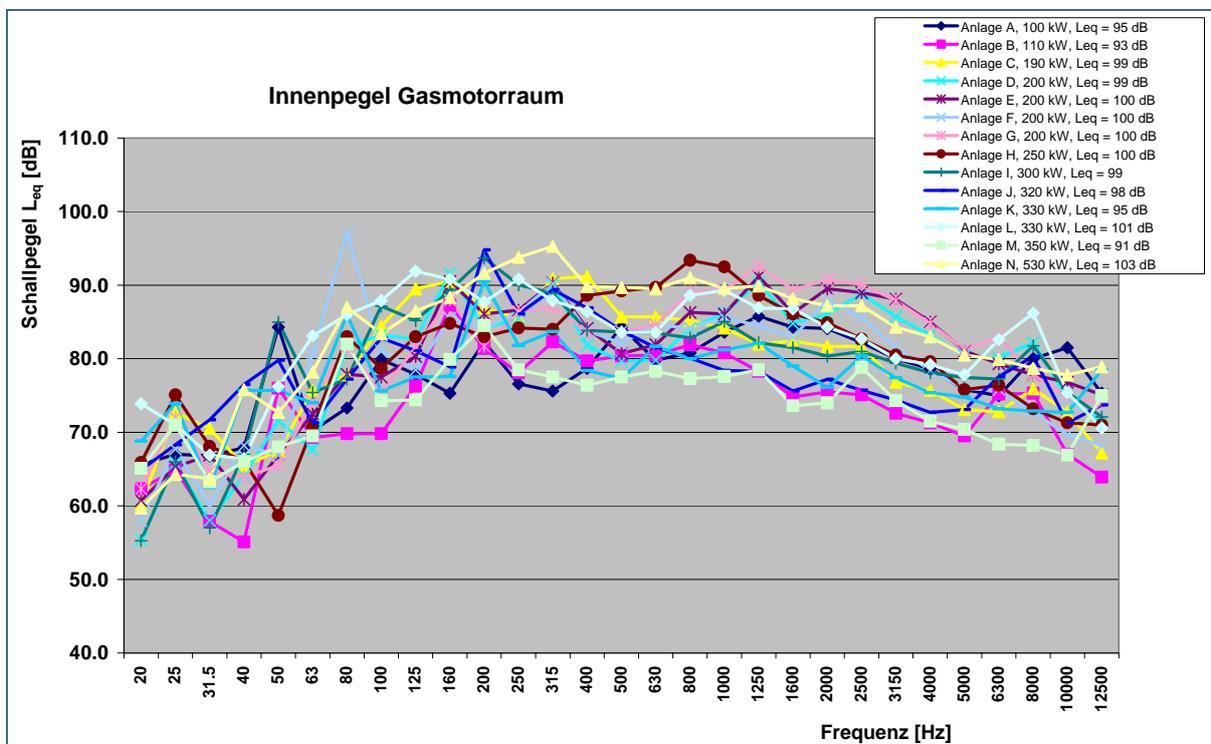


Abb. 7: Terz- Innenpegel L_{eq} im Gasmotorraum, LfU-Messung

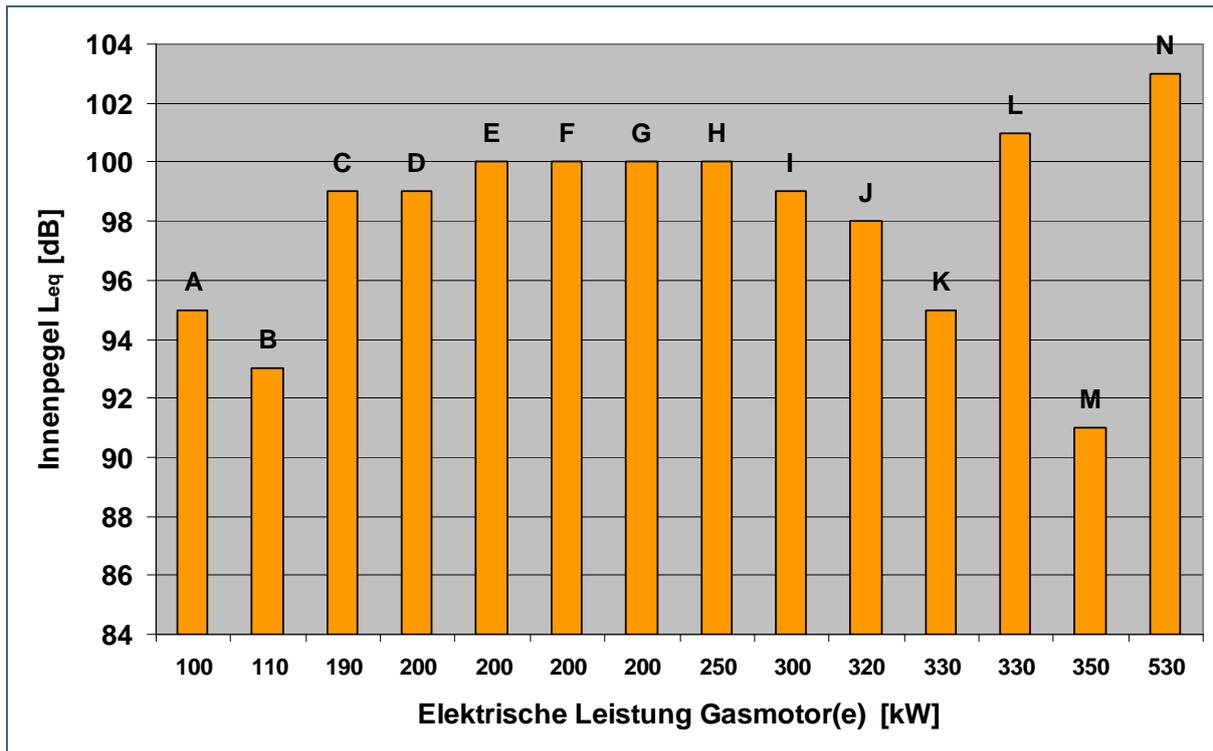


Abb. 8: Summen- Innenpegel L_{eq} im Gasmotorraum, LfU-Messung

In Abb. 8 sind die unbewerteten Summenpegel der Messungen dargestellt. Eine Leistungsabhängigkeit ist nicht erkennbar.

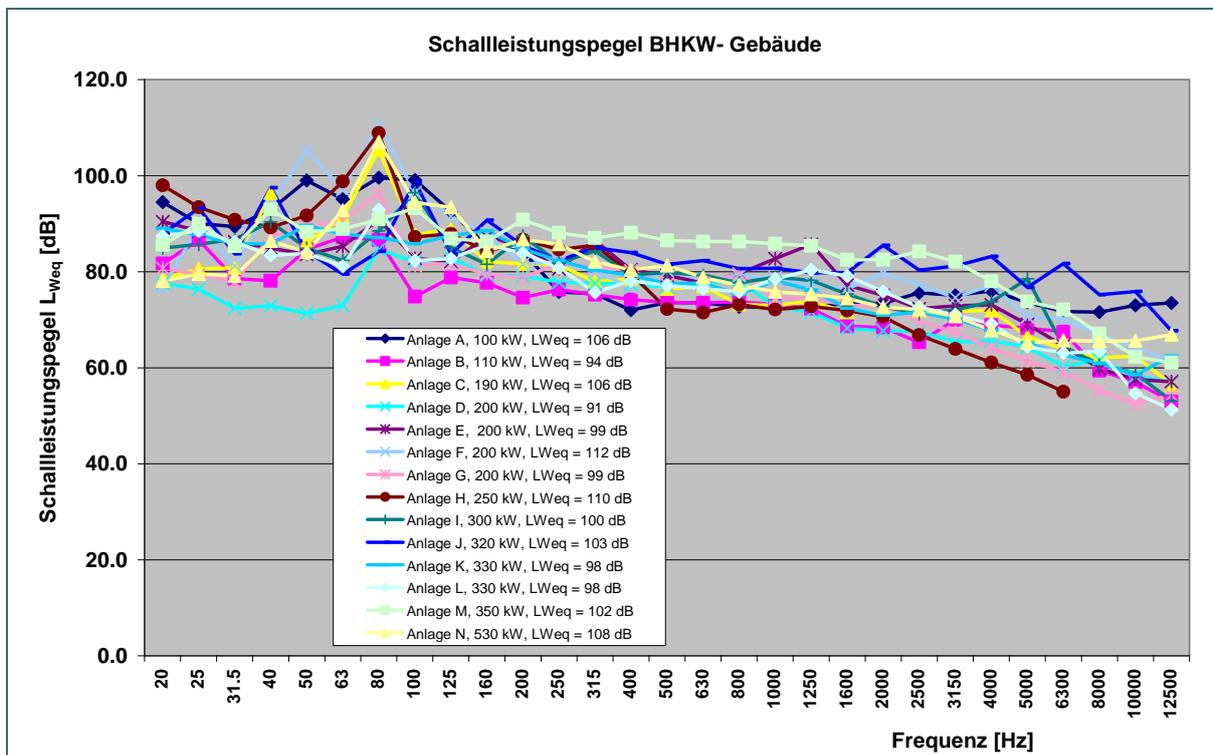


Abb. 9: Immissionswirksame Terzschalleistungspegel L_{w,eq} von BHKW- Gebäuden, LfU-Messung

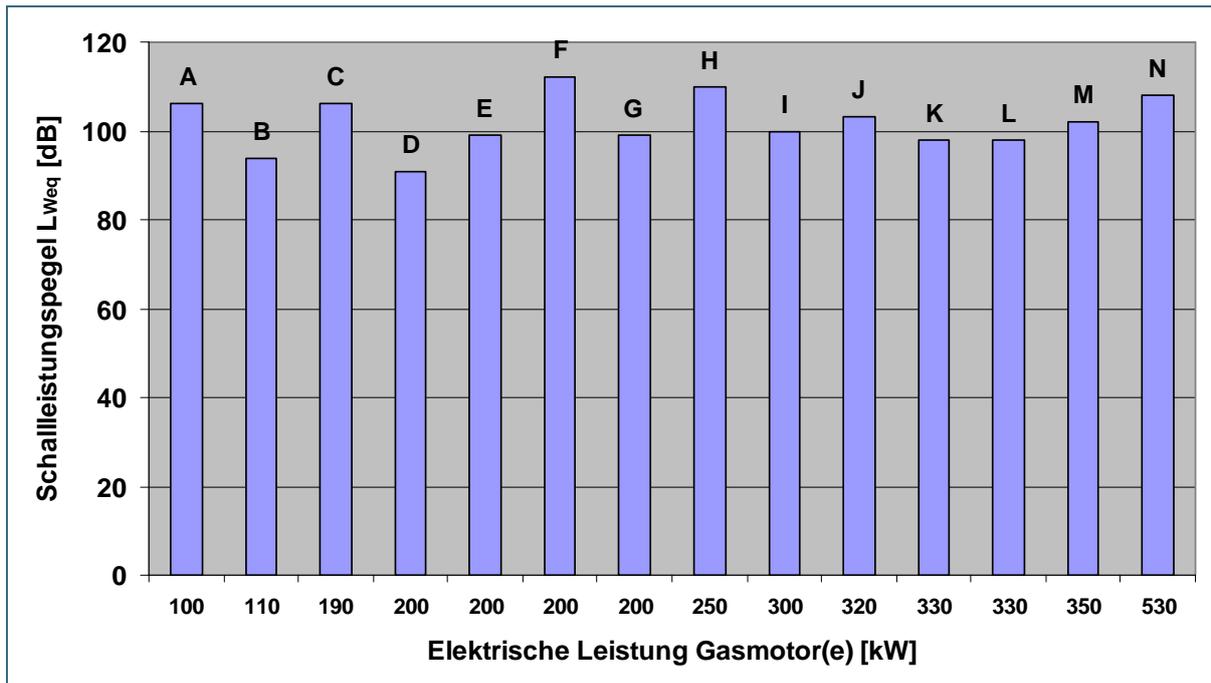


Abb. 10: Schallleistungspegel L_{w,eq} von BHKW-Gebäuden, LfU-Messung

Die in Abb. 9 dargestellten Pegelmaxima im Bereich von 50 – 100 Hz sind die Folge der Zündfrequenz der Gasmotoren.

Die Zündfrequenz f_z wird in [9] mit der Gleichung: $f_z = n Z / 30 T$ beschrieben (Gl. 1).

n ist dabei die Drehzahl, Z Anzahl der Zylinder und $T = 4$ bei Viertaktmotoren bzw. 2 bei Zweitaktmotoren.

Die Gasmotore werden üblicherweise mit einer Drehzahl von 1500 U/min betrieben. Für einen Viertakt-Gasmotor mit 6 Zylindern resultiert daraus im Idealfall eine dominante Frequenz von 80 Hz und für einen Gasmotor mit 8 Zylindern im Idealfall eine Frequenz von 100 Hz. Treten Resonanzen im Abgaskanal auf, ergeben sich Frequenzverschiebungen im Emissionsspektrum. Nachfolgende Abbildung zeigt Emissionsspektren der Biogasanlagen C und J aus Abb. 9.

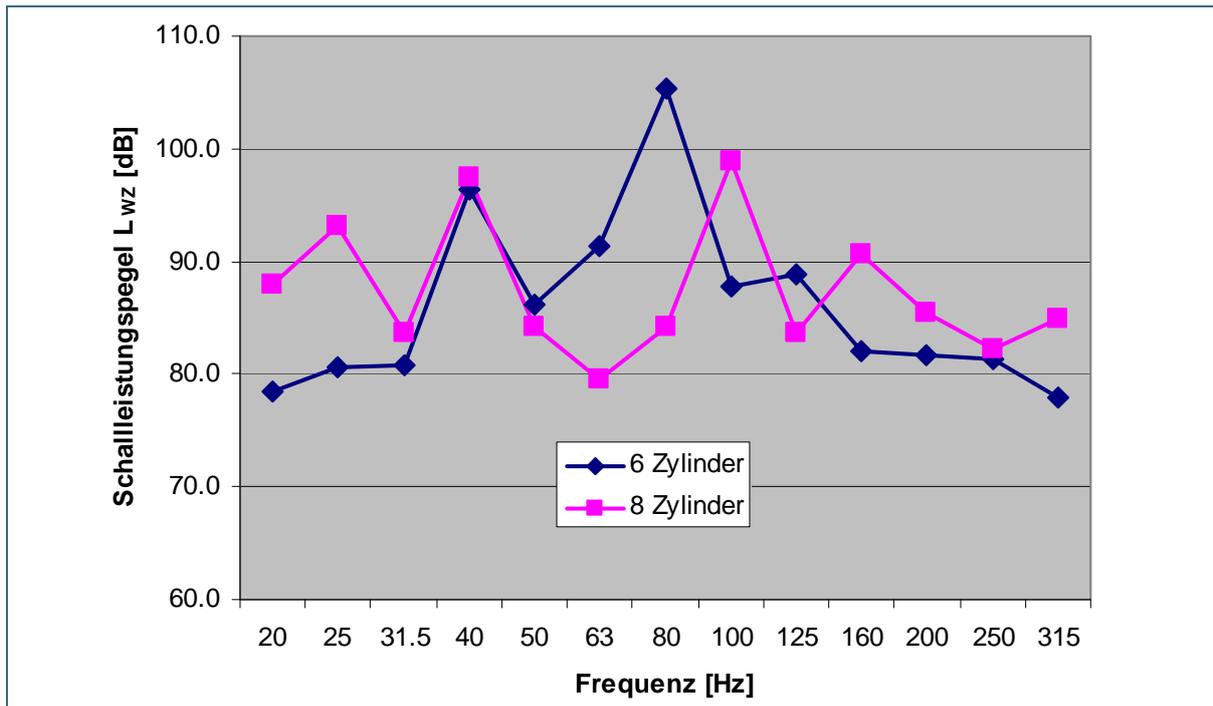


Abb. 11: Emissionsspektren von BHKW-Gebäuden mit Gasmotoren mit 6 und 8 Zylindern bei 1500 U/min und den dominanten Frequenzen bei 80 Hz und 100 Hz (Anlage C und J), LfU-Messung

Zum Betriebsablauf einer Biogasanlage gehören auch Fahrzeuge wie Radlader oder Traktor mit denen die Substrattransporte vom Fahrсило in die Dosiervorrichtung durchgeführt werden oder die Beschickung der Dosierer vorgenommen wird.

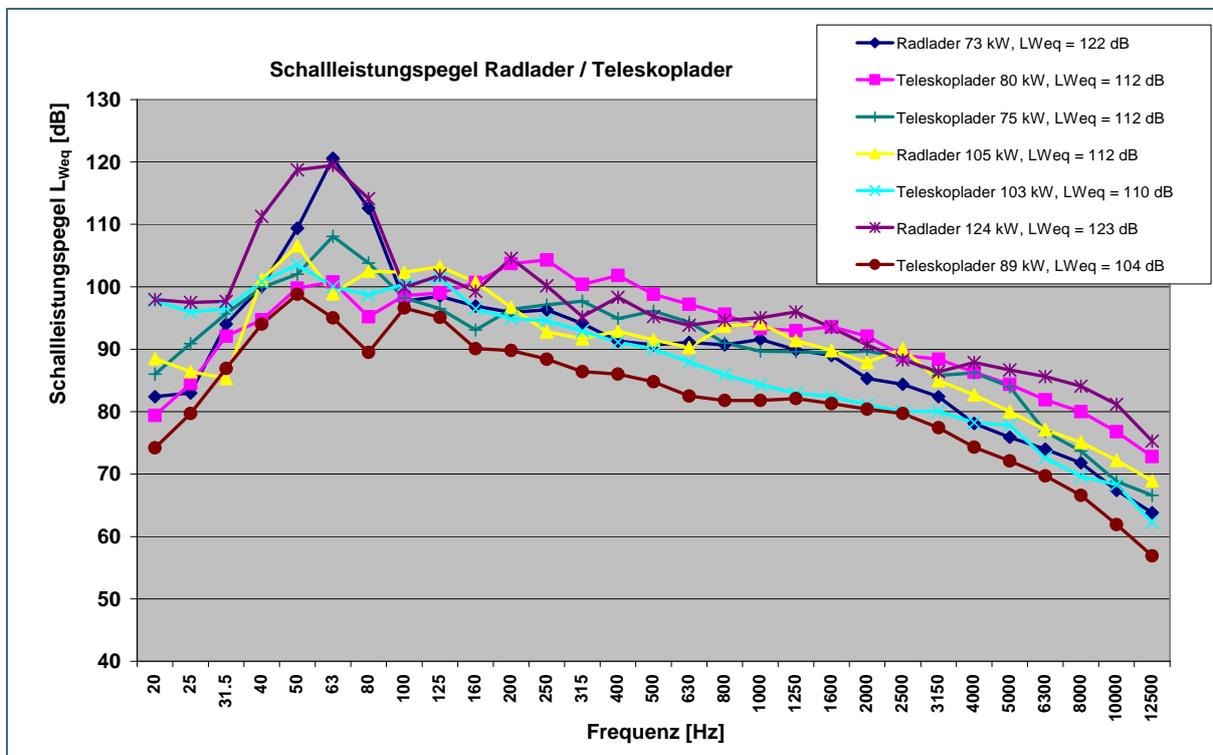


Abb. 12: Schalleistungspegel L_{Weq} von Radladern und Teleskopladern beim Beschicken des Substratdosierers, kW-Angaben entsprechen der Motorleistung des Fahrzeugs, LfU-Messung

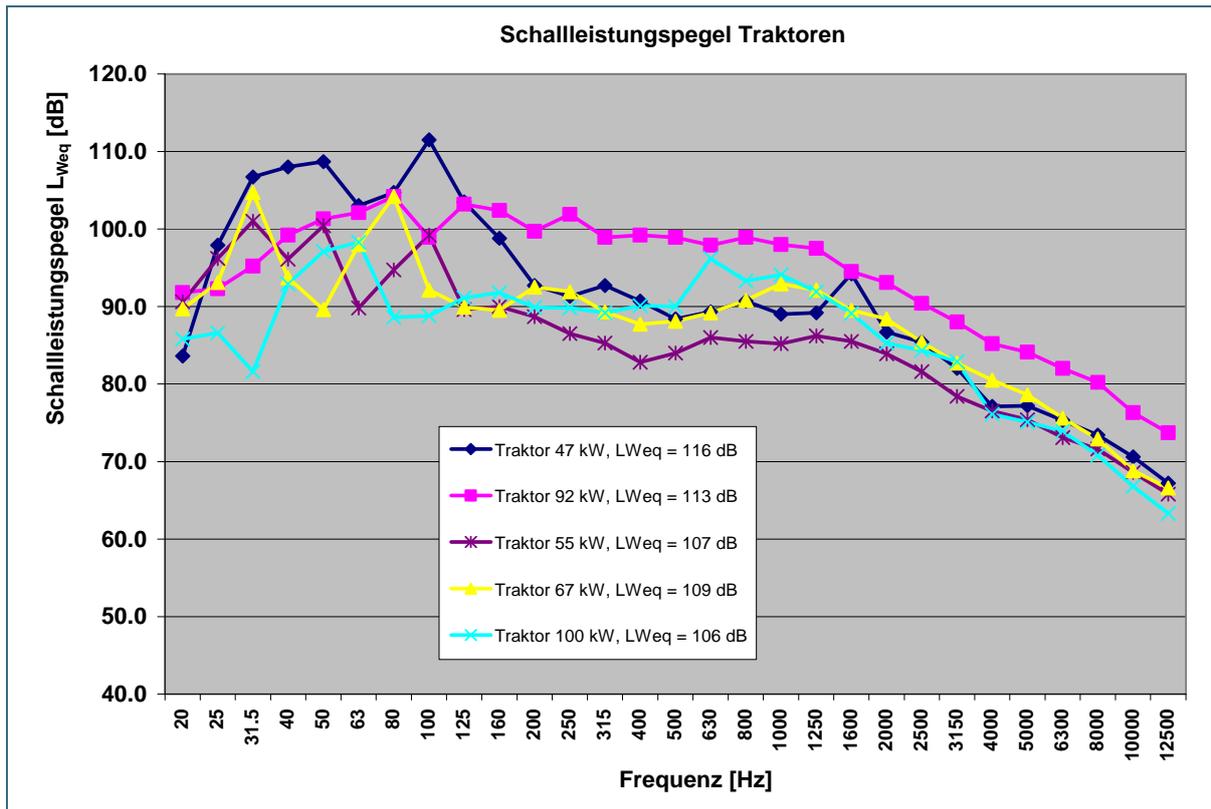


Abb. 13: Schalleistungspegel L_{Weq} von Traktoren bei der Substrataufnahme im Fahrсило bzw. Dosiererbeschickung, kW-Angaben entsprechen der Motorleistung des Fahrzeugs, LfU-Messung

5.1 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse in Abb. 7 und Abb. 9 zeigen, dass die Spektren im Gasmotorraum und die außerhalb des BHKW-Gebäudes keine Leistungsabhängigkeit aufweisen und sich im Hinblick auf die Geräuschverteilung im tieffrequenten Bereich unterscheiden. Die Innenpegel weisen eher (bis auf Anlage F) ein leichtes Ansteigen der Spektren oberhalb von 80 Hz zu den mittleren Frequenzen hin, wohingegen in den Spektren der BHKW-Gebäude Maximalpegel bei 50 bis 100 Hz zu erkennen sind und anschließend rechts davon ein leichter Abfall zu den mittleren und hohen Frequenzen erkennbar ist. Die Ursache darin liegt primär in einem nicht ausreichend gegen tiefe Frequenzen bedämpften Abgaskanal des Gasmotors (siehe auch Kapitel „Schallschutzmaßnahmen“). Aber auch an den Lüftungsöffnungen, die zwar mit Absorptionsschalldämpfern versehen sind, die jedoch im tieffrequenten Bereich nahezu unwirksam sind. Dadurch werden die vom Motorgehäuse abgestrahlten Frequenzen im Bereich von 50 – 100 Hz ungehindert nach Außen übertragen. Zur Schallemission von Lüftungsöffnungen liegen noch nicht genügend Messergebnisse vor. Es ist nicht auszuschließen, dass Resonanzen der Außenhaut des Gebäudes bzw. Körperschall bei der Schallabstrahlung eine Rolle spielen.

Schallpegel werden auch über undichte Stellen im Gebäude/Container nach Außen übertragen.

Traktoren und Radlader (Teleskoplader) emittieren zwar tieffrequente Geräusche, sind wegen der kurzen Betriebszeit mit ca. 1 Stunde in der Zeit von 6 – 22 Uhr am Tage aber eher vernachlässigbar. Nachts sind diese Fahrzeuge regulär auch bei sehr großen Anlagen (> 1 MW Feuerungswärmeleistung) nicht im Betrieb.

6 Tieffrequente Schallimmissionen von Biogasanlagen

Anhand der durch Messungen ermittelten Schallemission der Anlage H mit einer elektrischen Leistung von 250 kW, die ein ausgeprägtes Maximum in der Frequenz von 80 Hz aufweist, soll die Immissions-situation dargestellt werden.

Anlage H liegt zudem in einem ebenen, un bebauten Gelände und eignet sich gut als Beispiel für freie Schallausbreitung. In so einem Fall ist bei einer ausbreitungsgünstigen Wetterlage, wie sie die TA Lärm voraussetzt, mit einer maximalen Schallimmission am nächstgelegenen Immissionsort zu rechnen.

Da für die Beurteilung der tieffrequenten Schallimmissionen von Biogasanlagen der Frequenz- Bereich von ca. 50 – 100 Hz maßgeblich ist, wird in Abbildung 14 das Emissionsspektrum der Anlage H nur in dem Frequenzbereich von 20 – 250 Hz dargestellt. Das vollständige Spektrum ist in Abb. 9 zu sehen.

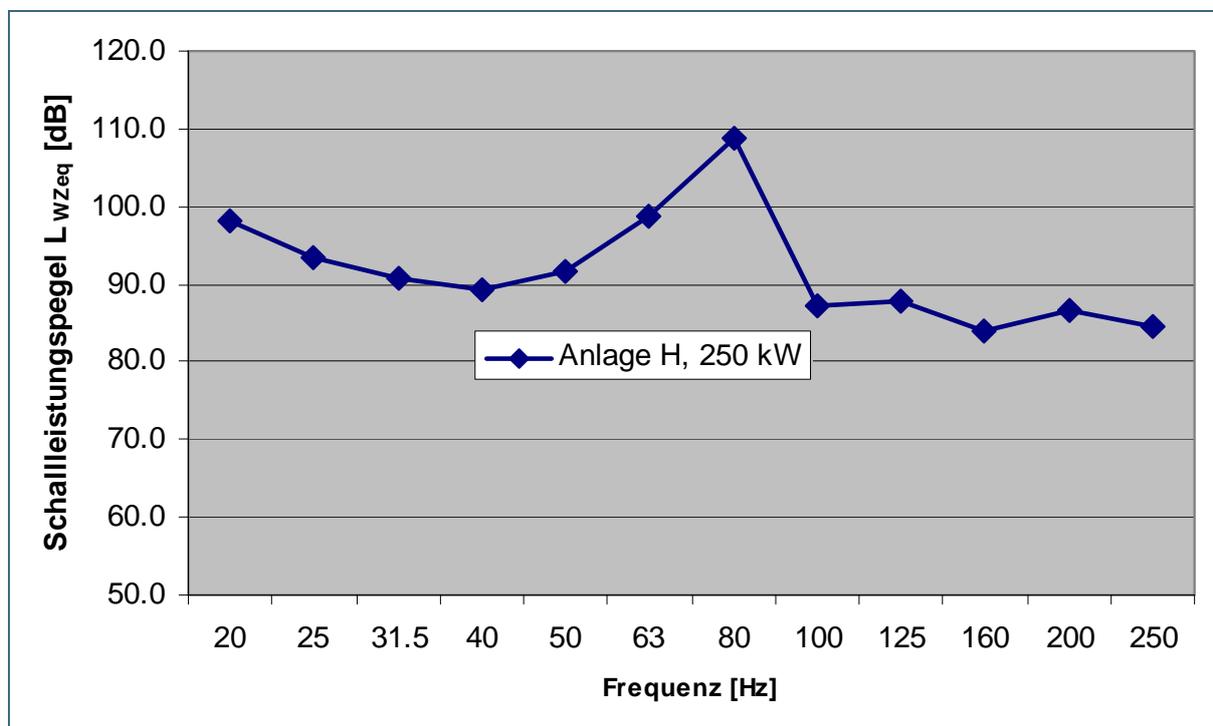


Abb. 14: Terz- Schalleistungspegel der Anlage H mit einer elektrischen Leistung von 250 kW, 1 Gasmotor, 6 Zylinder, LfU-Messung

Der unbewertete Schalleistungspegel $L_{Wz_{eq}}$ der Biogasanlage beträgt 110 dB, während der A-bewertete Schalleistungspegel $L_{WA_{eq}}$ über den gesamten Frequenzbereich mit 89 dB(A) anzugeben ist. Die Pegel weisen eine Messwertunsicherheit von ± 3 dB auf.

Anlage H liegt mit dem „A-Schalleistungspegel“ im mittleren Bereich der in Abb. 10 dargestellten Biogasanlagen.

Die Schallimmission wird nach DIN ISO 9613-2 ohne Luftabsorption, Bodendämpfung und mit einer Richtwirkungskorrektur D_c von 3 dB berechnet.

Die Prognose erfolgte an 4 Immissionsorten in $d = 50$ m, $d = 100$ m, $d = 200$ m und $d = 400$ m Entfernung zur Anlage.

Zum Vergleich wurden in das Diagramm auch die Hörschwellenpegel der DIN 45680 [3] eingezeichnet.

Abbildung 15 enthält die prognostizierten frequenzabhängigen Schallimmissionen. Abbildung 16 stellt die vom LfU an der Anlage H gemessenen Schalldruckpegel dar.

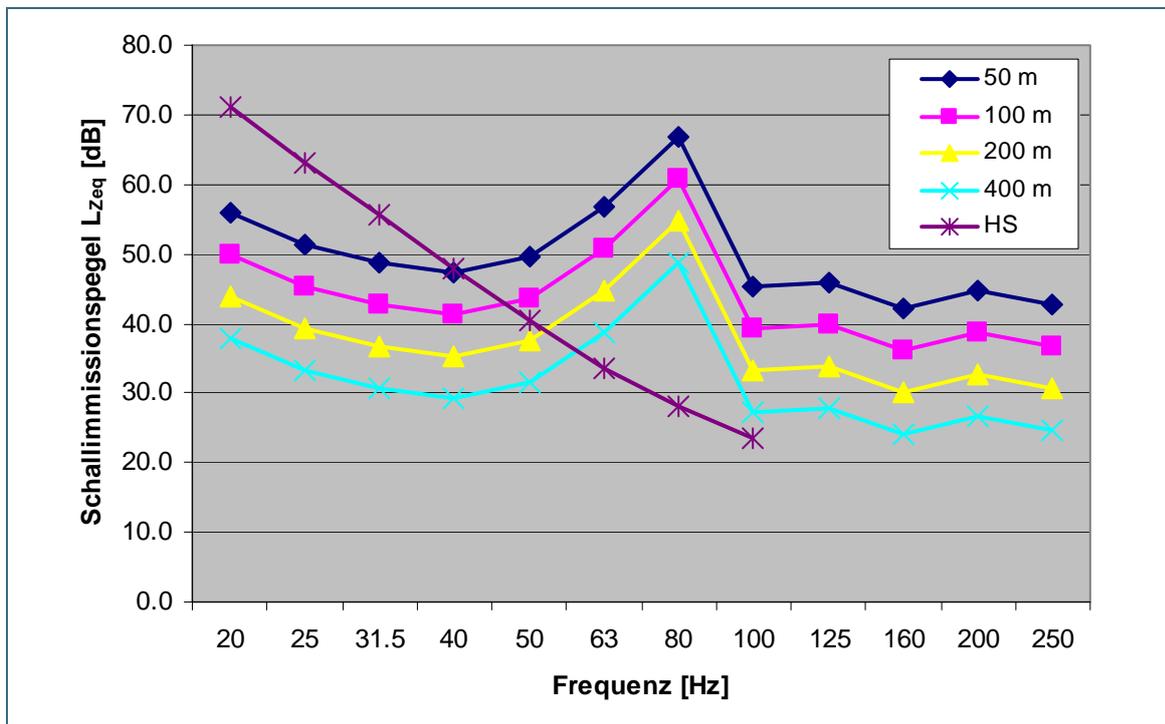


Abb. 15: Für die Biogasanlage H nach DIN ISO 9613-2 berechnete Immissionspegel L_{Zeq} mit der Hörschwellenpegelkurve HS nach DIN 45680 an Immissionsorten in Abständen von 50 – 400 Meter

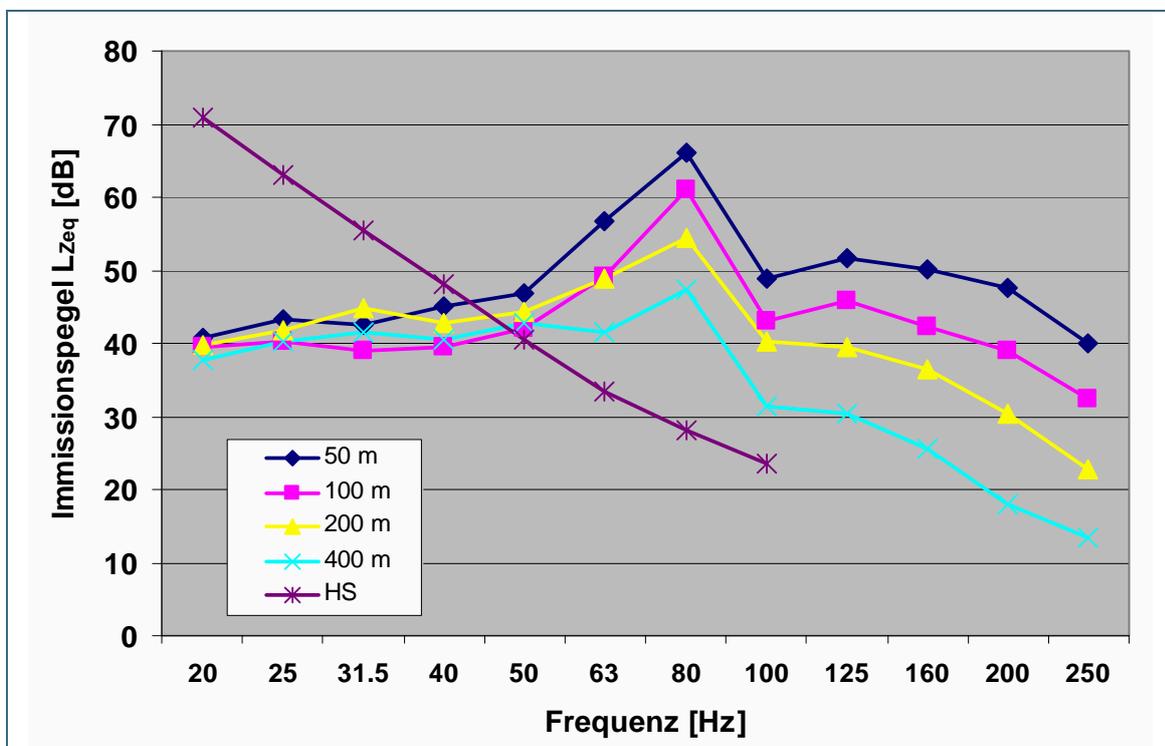


Abb. 16: An der Biogasanlage H nach TA Lärm gemessene Immissionspegel L_{Zeq} mit der Hörschwellenpegelkurve HS nach DIN 45680 an Immissionsorten in Abständen von 50 – 400 Meter, LfU-Messung

In Abb. 15 und Abb. 16 ist zu sehen, dass die berechneten und die gemessenen Terzpegel L_{Zeq} von 63 – 100 Hz gut übereinstimmen, sowie in einer Entfernung von 400 m zur Biogasanlage, die Hörschwellenpegel deutlich überschreiten. Diese Pegel wurden im Freien gemessen. Gemäß DIN 45680 sind zur Feststellung, ob tieffrequente Geräuschimmissionen vorliegen, aber Schallpegelmessungen innerhalb eines Gebäudes in dem am stärksten betroffenen Aufenthaltsraum durchzuführen. Häufig soll schon im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens also noch vor der Errichtung der Biogasanlage geklärt werden, ob mit schädlichen tieffrequenten Geräuschanteilen im Betrieb zu rechnen ist. Im nachfolgenden Kapitel wird eine vereinfachte Prognoseberechnung vorgeschlagen.

6.1 Überschlägige Prognose tieffrequenter Schallimmissionen für den Innenraum

Wegen fehlender bauakustischer Anforderungen, werden Schalldämmwerte von Außenbauteilen für den Frequenzbereich unterhalb von 100 Hz in der Regel nicht erhoben [3]. Aufgrund dessen kann eine zuverlässige Prognose über die zu erwartenden Innenpegel im tieffrequenten Bereich im Wohnraum nicht durchgeführt werden. Der Innenpegel kann hier nur überschlägig angegeben oder abgeschätzt werden. Das kann in Anlehnung an die Gleichung 4 der TA Lärm (Nr. A.2.4.3) erfolgen. Allerdings fehlt hier noch ein Term, der den Zusammenhang zur Schalldämmung der Außenhaut des Gebäudes herstellt. Erfahrungswerte aus Schallpegelmessungen zeigen, dass die Außenhaut eines Wohngebäudes in den Terzen von 50 – 100 Hz ein resultierendes Schalldämmmaß von in etwa 15 dB aufweist.

Zur Vereinfachung wird die Eigenabschirmung der Biogasanlage (Richtwirkungsmaß DI) vernachlässigt, und ein mittleres Schalldämmmaß R von 15 dB eingeführt. Die modifizierte Gleichung der TA Lärm lautet dann:

$$L_{eq, Terz, Innen} = L_{Weq, Terz} + K_0 - 20 \lg(s) - 11 - R \quad (\text{Gl. 2})$$

mit

$L_{eq, Terz, Innen}$: Unbewerteter Schallimmissionspegel für die zu untersuchende Terzfrequenz im Innenraum in dB

$L_{Weq, Terz}$: Unbewerteter Schalleistungspegel für die zu untersuchende Terzfrequenz in dB

K_0 : Raumwinkelmaß, hier 3 dB,

s : Entfernung zwischen Biogasanlage und Wohngebäude (Außenfassade) in Metern,

R : mittleres Schalldämmmaß für die Außenbauteile des Wohngebäudes, hier 15 dB.

Tabelle 6 enthält die für die *Anlage H* berechneten Terz-Schallimmissionspegel im Innenraum bei 80 Hz mit $L_{Weq, Terz} = 108,9$ dB und dem Hörschwellenpegel $L_{HS} = 28$ dB nach DIN 45680.

Tab. 6: Überschlägig berechnete Terz-Schallimmissionspegel $L_{eq, Terz, Innen}$ für $f = 80$ Hz im Innenraum bei freier Schallausbreitung

Abstand zur Biogasanlage.	$L_{eq, Terz, Innen}$ [dB]	ΔL_1 [dB] $L_{eq, Terz, Innen} - L_{HS}$	Anhaltswert für Einzelton 80 Hz nach DIN 45680, tags / nachts [dB]
50 m	52	24	10 / 5
100 m	46	18	10 / 5
200 m	40	12	10 / 5
400 m	34	6	10 / 5

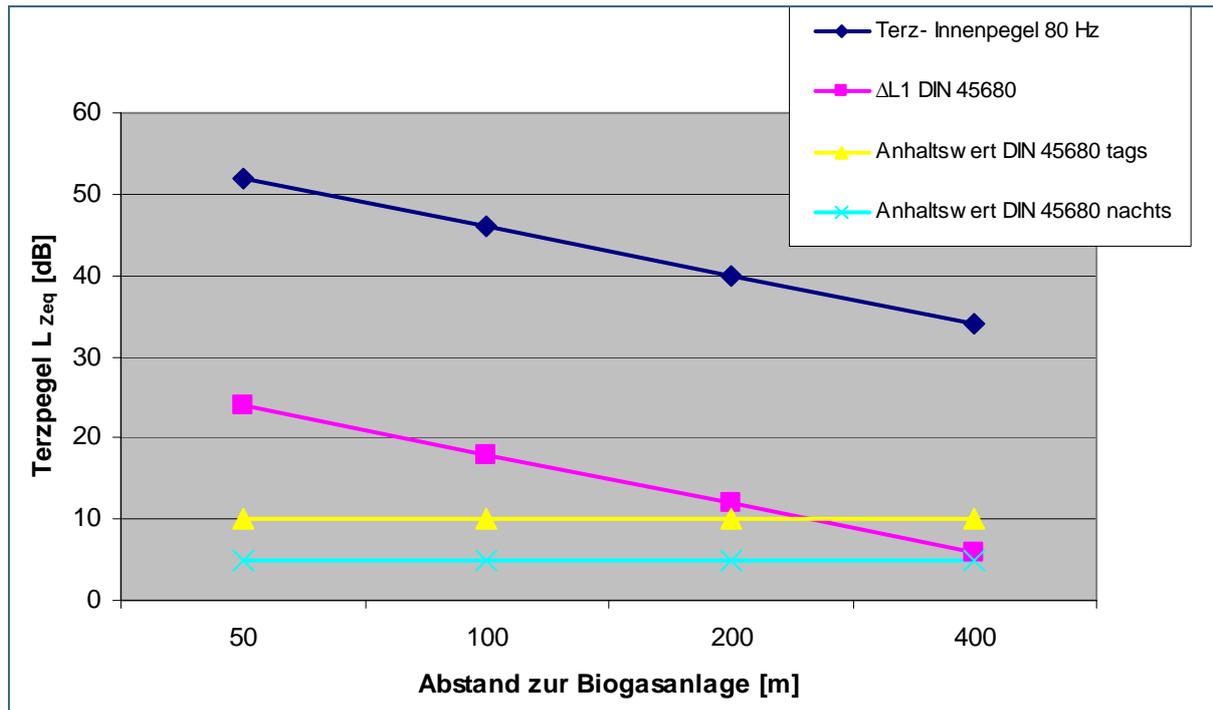


Abb. 17: Überschlüssig berechnete Terz-Schallimmissionspegel $L_{Zeq, Terz, Innen}$ für $f = 80$ Hz im Innenraum bei freier Schallausbreitung

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Anhand der Schalleistung der *Anlage H* (vgl. Abb. 9 und Abb. 14) wurde sowohl mittels Prognose als auch messtechnisch bei freier Schallausbreitung aufgezeigt, dass tieffrequente Schallimmissionen im Frequenzbereich bei 80 Hz zu erwarten sind, die an der Außenfassade in allen Entfernungen die Pegel der Hörschwellenkurve überschreiten. Dabei ist anzumerken, dass die Biogasanlage H bereits mit einem Schalldämpfer zur Minderung tieffrequenter Geräusche ausgerüstet war.

Zur Beurteilung sind die Innenpegel in einem Gebäude heran zu ziehen. Da die DIN 45680 nur ein Messverfahren zur Feststellung der Innenpegel beinhaltet, wurde in 6.1 eine überschlägige Prognose vorgeschlagen, die es mit relativ geringem Aufwand ermöglicht, die zu erwartenden Innenpegel bei gegebener Schallemission einer Biogasanlage (mit oder ohne Schalldämpfer) abzuschätzen. Eine derartige Prognose kann für jede dominante Frequenzkomponente von 50 – 100 Hz durchgeführt werden; das ist nach bisherigen Kenntnisstand auch der Frequenzbereich, der „Lärm-Probleme“ in der Nachbarschaft verursacht.

Da die *Anlage H* einen hervortretenden Einzelton aufweist, erfolgte die Beurteilung nach Tabelle 1 des Beiblattes 1 zur DIN 45680. Die Rechenergebnisse zeigen (vgl. Tab. 6 und Abb. 17), dass eine Biogasanlage mit dieser Schallemission ab einer Entfernung von ca. 400 Metern und freier Schallausbreitung voraussichtlich keine belästigenden tieffrequenten Schallimmissionen im Sinne der DIN 45680 hervorruft.

Ist der Abstand zwischen der hier untersuchten Biogasanlage und einem Wohnhaus deutlich geringer als 400 m, ist mit der Überschreitung des Anhaltswertes für einen Einzelton nach DIN 45680 bei 80 Hz sowohl tags als auch nachts zu rechnen.

7 Schallschutzmaßnahmen

Führt die überschlägige Prognose zu dem Ergebnis, dass in der Nachbarschaft mit belästigenden tieffrequenten Immissionen zu rechnen ist, sollte das Augenmerk auf die Schalldämmung und Körperschallisolierung des Gasmotors gerichtet werden. Als Lärmschutzmaßnahmen kommen insbesondere in Frage:

- **Absorptions- und Reflexionsschalldämpfer in der Abgasleitung zwischen Motor und Kamin; Reflexionsschalldämpfer (vgl. Abb. 20) abgestimmt auf tieffrequente dominante Geräuschanteile**

Abbildung 18 zeigt zum Vergleich ein Frequenzspektrum eines Gasmotors ohne Schalldämpfer:

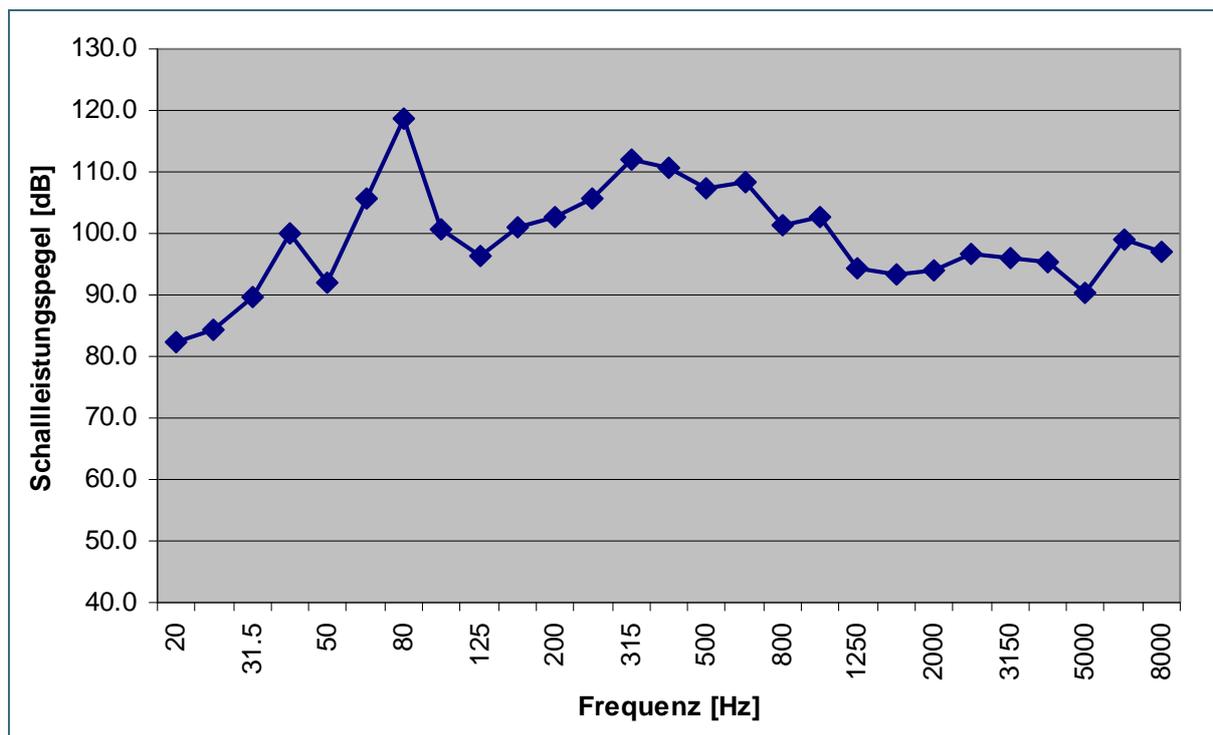


Abb. 18: Beispiel für ungedämpfte Abgas-Schallleistungspegel eines 12 Zylinder-Gasmotors bei 370 kW_{eL}, Herstellerangabe; L_{WZ} = 121 dB, L_{WA} = 114 dB(A)

Tiefe Frequenzen können nur mit einem **Reflexionsschalldämpfer** wirksam gemindert werden. Abb. 19 zeigt zwei Spektren von Reflexionsschalldämpfern mit einer mittleren Einfügungsdämpfung von 25 dB und 15 dB.

Absorptionsschalldämpfer haben das beste Minderungspotenzial im Frequenzbereich von 250 Hz – bis etwa 1000 Hz.

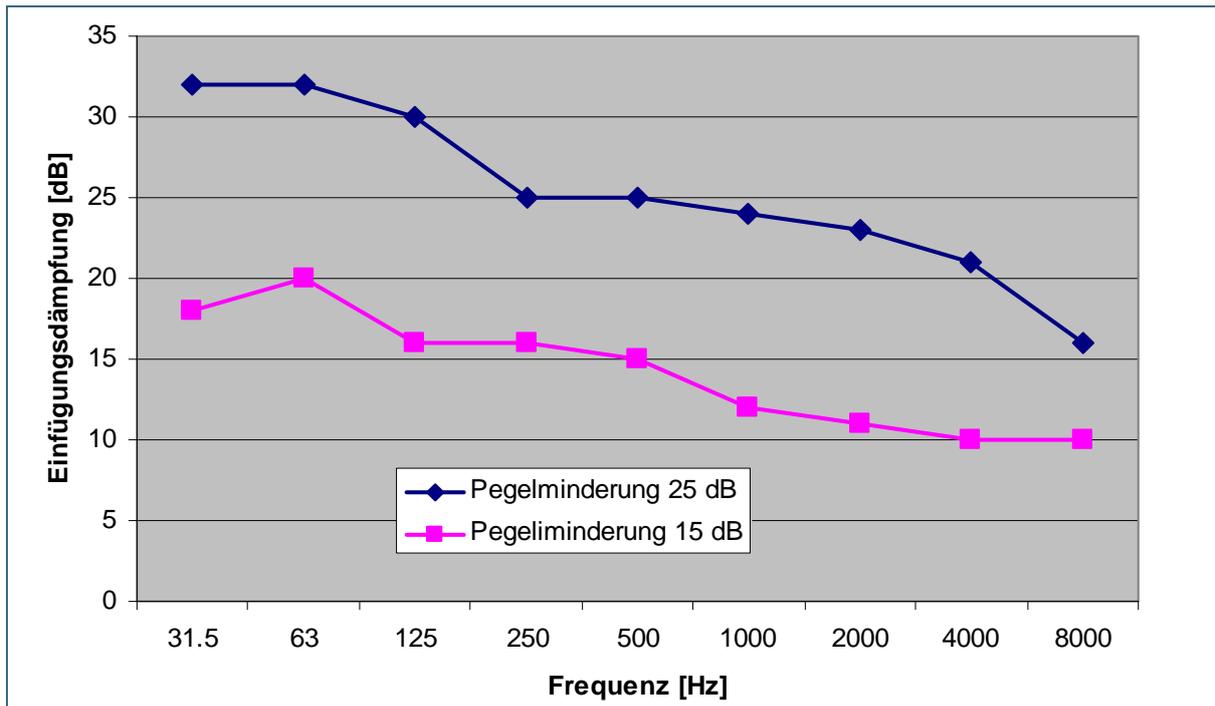


Abb. 19: Einfügungsdämpfung von Reflexionsschalldämpfern, Herstellerangabe



Abb. 20: Reflexionsschalldämpfer (Pfeil) an einer einmotorigen Biogasanlage

Biogasanlagen werden vorwiegend in ländlichen Gebieten betrieben. In Dorfgebieten kommt es wegen der relativ kurzen Abstände häufig zu Lärmbeschwerden.

Abb. 21 zeigt den Verlauf der Terz-Schalldruckpegel an einer Biogasanlage im Dorfgebiet, die aufgrund von Beschwerden aus der Nachbarschaft mit einem wirksameren Reflexionsschalldämpfer nachgerüstet wurde. Der neue Schalldämpfer hatte nicht nur in der dominanten Frequenz von 80 Hz den Gesamtpegel um 9 dB vermindert, sondern auch in den daneben liegenden Terzen von 63 und 100 Hz um ca. 10 dB herabgesetzt. Der Lärmkonflikt war damit beendet worden.

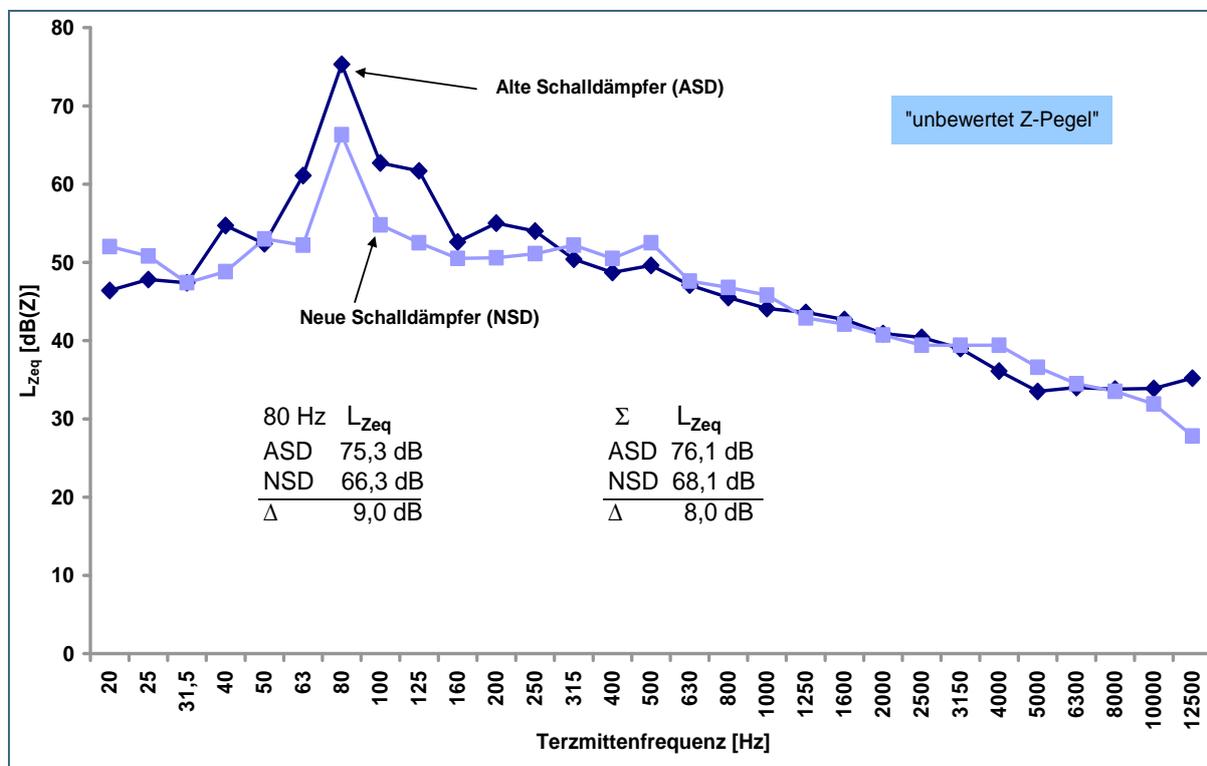


Abb. 21: Terz- Schalldruckpegel einer zweimotorigen Biogasanlage mit 530 kW_{eL} in 22 m Entfernung mit alten und neuen Reflexionsschalldämpfern, LfU-Messung

Da der Gasmotor Schwingungen in den Boden und auf die Außenhaut des Gebäudes überträgt, die Körperschall verursachen können, muss auch

- **der Biogasmotor schwingungsisoliert aufgestellt werden.**

Gerade bei den Biogasanlagen „Marke Eigenbau“ wird zu wenig Sorgfalt auf eine ordnungsgemäße Schwingungsisolierung gelegt. Der Gasmotor kommt dabei auf Schwingungsdämpfern zur Aufstellung, die ungeeignet sind um die Schwingungsenergie genügend abzapfen. Dadurch können weitere Übertragungspfade entstehen, die die Bildung von tieffrequenten Geräuschen begünstigen.

Neben der Schwingungsisolierung sind in der Planungsphase mindestens folgende Schallschutzmaßnahmen vorzusehen:

- **Biogasmotor im Massivgebäude oder Container mit einem Schalldämmmass $D_e \geq 40$ dB,** (vgl. Abb. 22), **Schalleistungspegel Gasmotor $L_{WA} \leq 100$ dB(A),**
- **Zum Immissionsort abgewandte Lüftungsöffnungen des BHKW-Gebäudes/Containers mit Schalldämpfern** (vgl. Abb. 23),
- **Kapselung/Einhausung des Biogasverdichters,**
- **Kapselung/Einhausung ggf. vorhandener Abgasreinigung mit Gebläse,**

- **Schallisolierung der Abgasleitungen mit fugendichter Überführung vom Gebäude ins Freie** (vgl. Abb. 24),
- **geräuscharme Luftkühler mit abgeschirmter Aufstellung** (vgl. Abb. 25),
- **Maßnahmen zur Vermeidung von Körperschallübertragung am Kamin** (vgl. Abb. 26),
- **Abschirmung, Kapselung der Rührwerke** (vgl. Abb. 27),
- **Abschirmung, Kapselung des Substratdosierers** (vgl. Abb. 28).



Abb. 22: Biogasmotor im Massivgebäude mit schallabsorbierender Wandverkleidung



Abb. 23:
Kulissenschalldämpfer
mit Lamellen an einer
Lüftungsöffnung eines
BHKW-Gebäudes



Abb. 24:
Fugendichte Überfüh-
rung der Abgasleitung
vom BHKW-Gebäude
ins Freie



Abb. 25:
Beispiel für einen ab-
geschirmten Luftkühler
am BHKW-Gebäude



Abb. 26:
Von der Gebäudewand
entkoppelte Abgaska-
mine, Luftkühler befin-
det sich im Schacht
unterhalb des Gitters



Abb. 27:
Gekapseltes Fermen-
ter-Rührwerk



Abb. 28:
Beispiel für einen ab-
geschirmten Substrat-
dosierer



Abb. 29:
Beispiel für ein BHKW-
Gebäude einer Bio-
gasanlage mit geringer
Schallemission (L_{WA} 85
dB(A)). Die Schall-
dämpfergehäuse (Pfeil)
sind gekapselt.

8 Zusammenfassung

Die Untersuchung hatte gezeigt, dass die von den BHKW-Gebäuden insgesamt abgestrahlten Schallleistungspegel unabhängig von der Größe und der elektrischen Nennleistung der Biogasanlage sind; es kommt vielmehr darauf an, wie gut die Schallschutzvorrichtungen sind.

Die in Kapitel 7 aufgeführten Schallschutzmaßnahmen entsprechen dem Stand der Schallschutztechnik. Die Schallleistungspegel der vom LfU untersuchten Biogasanlagen lagen im Durchschnitt bei rund 90 dB(A). Nach unserer Einschätzung wäre ein Schallleistungspegel von rund 85 dB(A) mit verhältnismäßig geringem Aufwand möglich.

Mit der hier vorgeschlagenen überschlägigen Prognose für tieffrequente Geräusche können bei Kenntnis des Frequenzspektrums der Biogasanlage, und das werden in der Regel die Schallleistungspegel der ungedämpften Abgasmündung des Gasmotors sein, Innenpegel bei freier Schallausbreitung in einem Wohnraum abgeschätzt werden. Die abgeschätzten Pegel liegen auf der sicheren Seite.

Wenn die Anhaltswerte für einen Einzelton nach DIN 45680 infolge Prognose maßgeblich überschritten sind, wird man nicht umhin kommen, die Schallschutzmaßnahmen im Abgaskanal des Gasmotors und dabei insbesondere den Reflexionsschalldämpfer, falls vorhanden, zu optimieren.

Der aufgrund der Prognose ausgelegte Reflexionsschalldämpfer im Abgaskanal des Gasmotors wird möglicherweise eine bessere Pegelminderung aufweisen, als der „von der Stange“ gekaufte. Wenn das auch in die Praxis umgesetzt wird, ist eine kostspielige Nachrüstung des Schalldämpfers dann meistens nicht mehr erforderlich.

Problematisch sind auch die Lüftungsöffnungen des BHKW-Gebäudes/Containers, deren Schalldämpfer keinen ausreichenden Schutz gegen tieffrequente Geräusche bieten. Sofern möglich, können diese auf der zum Immissionsort abgewandten Seite angeordnet werden.

Kritisch kann auch die Schwingungsisolierung des Gasmotors sein. Es ist nicht ausgeschlossen, dass auf diesem Wege im Falle einer mangelhaften Schwingungsisolierung tieffrequente Geräusche infolge Resonanz nach Außen emittiert werden. Es empfiehlt sich deshalb, die Anlagenplanung und Aufstellung der Biogasanlage von einer Fachfirma durchführen zu lassen. Die Genehmigungsbehörden sollten schon im Rahmen einer baurechtlichen Genehmigung einen Sach- und Fachkundenachweis hierzu verlangen.

Fahrzeuge wie Traktor und Radlader emittieren zwar tieffrequente Geräusche, sind aber wegen ihrer kurzen Betriebszeit tagsüber nicht maßgeblich an der Schallemission der Biogasanlage beteiligt. Ein Betrieb zur Nachtzeit sollte nur in einigen wenigen Einzelfällen z. B. bei ausreichend großen Abständen zwischen Anlage und Wohnbebauung zulässig sein, und eher die Ausnahme bilden.

Es soll nicht unerwähnt bleiben, dass auch in der Rechtsprechung zunehmend öfter die Forderung aufgestellt wird, die tieffrequenten Geräuschimmissionen schon im Rahmen des baurechtlichen oder immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahrens zu prognostizieren, um eine Aussage zur Zulässigkeit des Vorhabens machen zu können.

III. Tieffrequente Geräusche bei „Luftwärmepumpen“

Wolfgang Fürst, Bayerisches Landesamt für Umwelt

9 Einleitung

In zunehmendem Maße werden Eigenheime, aber auch Mehrfamilienhäuser und Betriebsgebäude ohne Wohnnutzung mit Wärmepumpen beheizt. Laut Bundesverband Wärmepumpe e. V. waren Anfang 2010 ca. 350.000 Wärmepumpen in Deutschland installiert. Etwa ein Drittel davon in Bayern [10]. Ungefähr die Hälfte aller neu angeschafften Wärmepumpen sind Luftwärmepumpen. Bei diesen kommt es immer wieder zu Beschwerden wegen störender Geräusche, besonders wenn die Anlagen im Freien aufgestellt sind. Ein Problem stellen dabei die für diese Anlagen charakteristischen Geräuschemissionen im niederfrequenten Bereich dar, die oft als „Brummen“ wahrgenommen und als sehr störend empfunden werden. Die Belästigungen für Anwohner ergeben sich insbesondere durch den zeitlich uneingeschränkten Betrieb dieser Anlagen und aus dem abrupten Einschalten in den frühen Morgenstunden bei Wärmebedarf des Betreibers oder in der Nachtzeit, wenn ein günstiger Stromtarif vereinbart ist. Diese Einschaltvorgänge können zu Aufwachreaktionen bei den Nachbarn führen. Luftwärmepumpen haben ein hohes Beschwerdepotential, weil sie mit dazu beitragen, dass sich das Wohnumfeld aus der Sicht des Lärmschutzes wesentlich verschlechtert. Das Ruhebedürfnis der Betroffenen ist hoch, so dass auch niedrige Pegel nicht akzeptiert werden. Wärmepumpen sind immissionsschutzrechtlich nicht genehmigungsbedürftige Anlagen, die den Anforderungen der §§ 22 bis 24 des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) unterliegen. Die Anlagen dürfen also nur so errichtet und betrieben werden, dass

- schädliche Umwelteinwirkungen u. a. durch Geräusche verhindert werden, die nach dem Stand der Technik vermeidbar sind, und
- nach dem Stand der Technik unvermeidbare schädliche Umwelteinwirkungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden.

Bei nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen findet grundsätzlich keine schalltechnische Überprüfung und keine Abnahme nach Inbetriebnahme statt. Nach § 24 BImSchG kann die zuständige Behörde aber im Einzelfall die zur Durchführung des § 22 BImSchG erforderlichen Anordnungen treffen. Bestimmungen zur Ermittlung der Geräuschemissionen von Anlagen und die Beurteilung anhand der dazugehörigen gebietsabhängigen Immissionsrichtwerte enthält die „Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm“ (TA Lärm). Sie ist für die Beurteilung zum Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Geräusche einschlägig.

Die Prüfung einer Anordnung im Einzelfall kommt insbesondere in Betracht, wenn bereits die vereinfachte Regelfallprüfung nach Nr. 4.2 TA Lärm oder die Prüfung auf Einhaltung der Anforderungen bei unvermeidbaren schädlichen Umwelteinwirkungen nach Nr. 4.3 TA Lärm ergibt, dass der Anlagenbetreiber die Grundpflichten für nicht genehmigungsbedürftige Anlagen nicht erfüllt oder konkrete Anhaltspunkte dafür vorliegen, dass Geräuschemissionen der Anlage einen relevanten Beitrag zu einer durch mehreren Anlagen hervorgerufenen schädlichen Umwelteinwirkung leisten. In die Geräte- und Maschinenlärmschutzverordnung (32. BImSchV, [21]) sind Luftwärmepumpen derzeit nicht eingeschlossen, sodass die Betriebszeitbeschränkungen dieser Vorschrift nicht anwendbar sind.

Es ist in hohem Maße gegenseitige Rücksichtnahme gefordert, damit keine wesentlichen Beeinträchtigungen für das Nachbargrundstück von Wärmepumpen ausgehen (vgl. auch §§ 906, 1004 BGB) und generell ist dafür Sorge zu tragen, dass neue und regenerative Energien wegen der von ihnen hervorgerufenen Lärmbelastung keinen Akzeptanzverlust erleiden.

10 Funktionsweise einer Luftwärmepumpe

Luftwärmepumpen sind Maschinen, die Wärme der Außenluft oder Abluft von dem niedrigen Temperaturniveau der Umwelt auf ein höheres Temperaturniveau anheben, um sie zu Heizzwecken zu nutzen. Hierfür wird Luft mit einem Ventilator angesaugt und über einen Kältemittelverdampfer geleitet. Die Umweltwärme wird in einem Kreislaufprozess der Umgebung durch das Kältemittel entzogen, wobei es bei der niedrigeren Umgebungstemperatur zum Verdampfen gebracht wird. Bei der Verflüssigung (Kondensation) gibt es diese Umweltwärme bei einer höheren Temperatur an den Heizkreislauf ab. Dazu wird das Kältemittel zuvor verdichtet. Die Bezeichnung Wärmepumpe beruht also darauf, dass Wärmeenergie aus der Umwelt unter Zufuhr von technischer Arbeit auf ein höheres nutzbares Temperaturniveau angehoben (gepumpt) wird.

Zur Beheizung von Gebäuden werden im unteren Leistungsbereich überwiegend Elektro-Kompressionswärmepumpen verwendet, bei höheren Leistungen auch Gasmotorwärmepumpen. Für den Kreislaufprozess kommt also meist elektrische Energie für den Verdichter (Kompressor) zum Einsatz. Die wesentlichen Bestandteile dieser Systeme sind der Verdampfer, der Verdichter (Kompressor), ein Verflüssiger (Kondensator) und schließlich ein Expansionsventil (Drossel) zum Entspannen des Kältemittels.

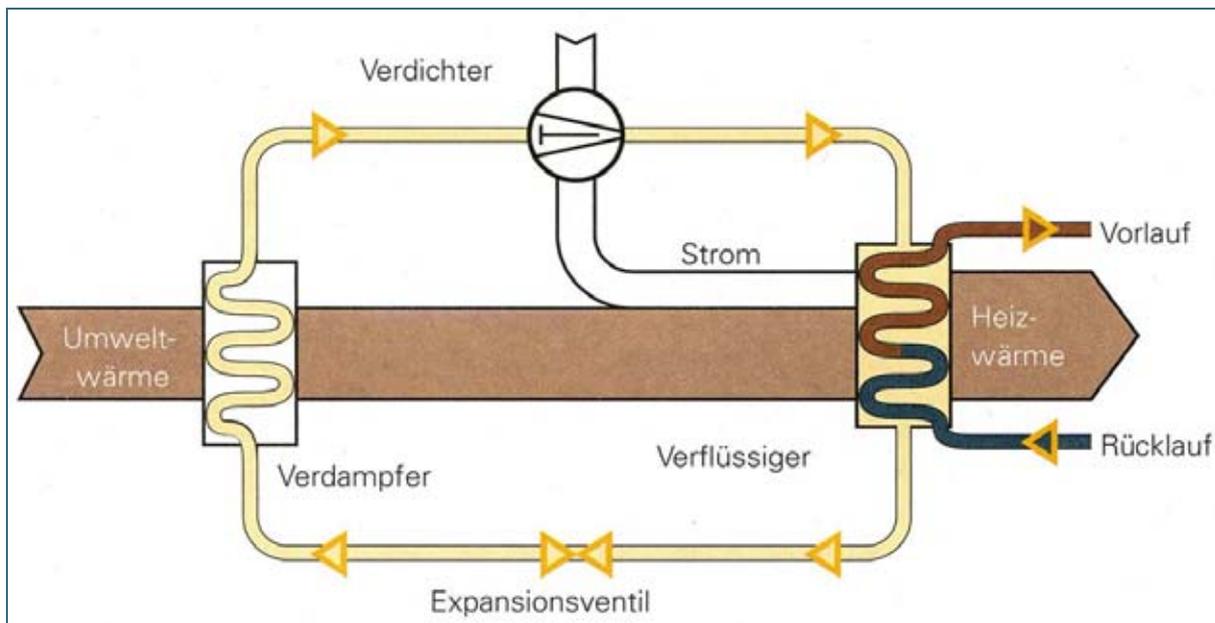


Abb. 30: Funktionsprinzip der Wärmepumpe [12]

Das Verhältnis der an den Heizkreislauf abgegebenen nutzbaren Wärmeleistung zur zugeführten (elektrischen) Leistung wird als Leistungszahl bzw. als COP („Coefficient of Performance“) bezeichnet.

11 Aufbau und Schallquellen einer Luftwärmepumpe

Hauptschallquellen sind der Ventilator, der Verdichter (Kompressor), die Rohrleitungen und Luftkanäle sowie u. U. schwingende Verkleidungsbleche. Bei der Schallabstrahlung ist zwischen Luft- und Körperschall zu unterscheiden. Für im Freien aufgestellte Luftwärmepumpen ist in der Regel nur der abgestrahlte Luftschall von Bedeutung, während bei Wärmepumpen und Wärmepumpenteilen im Innern von Gebäuden sowohl der Luft- als auch der Körperschall beachtet werden muss.

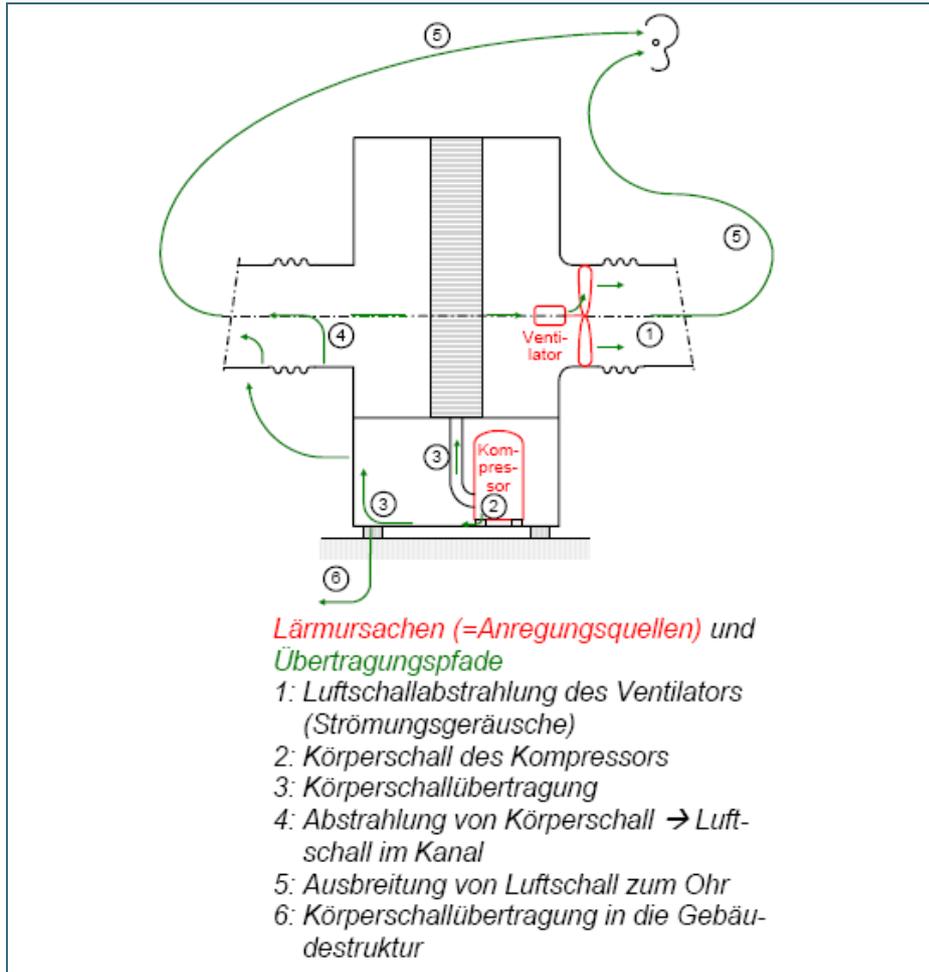


Abb. 31:
Aufbau einer Luftwärmepumpe und Schallübertragungspfade [14]

Den größten Anteil am Gesamtgeräusch hat in der überwiegenden Anzahl der Fälle der Ventilator. An den Ventilatorschaufeln entstehen Wirbel und Druckschwankungen, die als Lärm an die Umgebung abgestrahlt werden. Die anderen Lärmursachen sollten aber nicht vernachlässigt werden. Hier ist neben Luftschall vom Kompressor, auch die Körperschallübertragung vom Kompressor und von den Kompressorleitungen auf andere Gerätebauteile, auf den Boden oder die Wand und von dort auf andere umliegende Gebäudewände zu nennen, die dann ihrerseits Schall abstrahlen. Es müssen alle relevanten Ursachen und Schallübertragungspfade berücksichtigt werden. Zu nennen sind hier das Abtaugeräusch, elektrische und sonstige Strömungsgeräusche, für die es Dämpfungsmöglichkeiten, wie Kapselung, Pulsations- oder Entspannungsdämpfer gibt. Maßnahmen an der stärksten Lärmquelle sind am wirksamsten, weil leise Störungen zunächst überdeckt werden.

Relativ komplex ist die Lärmentwicklung bei Strömungen, also insbesondere im Luftkanal, an den Verdampferlamellen oder in den Kältemittelleitungen, z. B. am Expansionsventil. Hauptursachen sind pulsierende Strömungen durch den Kolben des Kompressors und Turbulenzen bei der Umströmung von Hindernissen und Kanten. So entstehen freie Wirbel an den Ein- und Auslassöffnungen bzw. Strömungsinstabilitäten und Dichteschwankungen. Eine turbulenzfreie (laminare) Strömung ist in technischen Bauteilen selten. Von erheblichem Einfluss ist die Geschwindigkeit des strömenden Mediums, die bei vorgegebener thermischer Leistung und dem hierfür erforderlichen Luftstrom, vom Querschnitt des durchströmten Bauteils abhängt. Bei größerem Querschnitt kann die Luft langsamer strömen und ist leiser.

Im Gegensatz zu Erdwärme- oder Wasser- bzw. Sole/Wasser-Wärmepumpen, die in der Regel nur innen aufgestellt werden, ist bei Luftwärmepumpen eine Innen- oder Außenaufstellung möglich. Die Einzelkomponenten dieser Wärmepumpen sind, mit längeren Rohren verbunden, auf einfache Weise auch teilweise innen oder außen aufstellbar. So kann z. B. nur der Verdampfer und der Ventilator im Freien platziert sein, der Kompressor aber innen stehen (Splitgeräte). Verdampfer- und Ventilatorgröße sind dann leichter zu dimensionieren und aufeinander anpassbar. Prinzipiell ist es denkbar, für jedes Teilgerät einen schalltechnisch günstigen Standort und auch eine günstigste Größe auszuwählen. Die Abstände der Teile der Anlage dürfen wegen der dann erforderlichen Länge der Rohrleitungen nicht zu groß sein. Sogenannte Kompaktgeräte weisen diesbezüglich weniger Flexibilität auf.

Vor allem außen montierte Luftwärmepumpen oder Wärmepumpenteile können in einem größeren Umkreis anliegende Nachbarn belästigen. Sie verursachen aber über die Luftansaugöffnungen außen auch dann noch eine Lärmbelästigung, wenn sie im Gebäudeinneren aufgestellt sind. Strömungswirbel in den Rohren und Luftkanälen, sowie an Verkleidungs- bzw. Wetterschutzgittern führen zu Druckschwankungen, die als Lärm durch die Öffnungen abgestrahlt werden und die in der Regel eine erhebliche Richtcharakteristik aufweisen. Hierbei ist von Bedeutung, dass sie 24 Stunden am Tag, also auch in der empfindlichen Nachtzeit betrieben werden.

Luftwärmepumpen sind starken Schwankungen ausgesetzt, was auf die Energieeigenschaften des Wärmeträgers Luft zurückzuführen ist. Besonders im Winter ist der Wirkungsgrad der Wärmepumpe, also das Verhältnis zwischen nutzbarer zu aufgewendeter Energie ungünstiger. Sie müssen länger laufen und eine Vereisung muss vermieden werden. Entscheidend für die Gesamtbetriebsdauer ist auch der Energieverbrauch des Gebäudes, einschließlich des Warmwasserbedarfs. Bei gut gedämmten Häusern laufen die Anlagen kürzer. Für die Beurteilung des Lärms bleibt aber die lauteste Nachtstunde entscheidend.



Abb. 32:
Wärmepumpe (Schalleistungspegel laut Datenblatt 62 dB(A))

12 Schalleistungspegel und Frequenzverlauf (Tonhaltigkeit)

Die immissionswirksamen Schalleistungspegel liegen für den überwiegenden Teil der innen aufgestellten Luftwärmepumpen bei ca. 55 dB(A) bis 60 dB(A), für außen aufgestellte in der Mehrzahl bei 62 dB(A) bis 67 dB(A). Die Pegel der Anlagen streuen jedoch in einem weiteren Bereich von ca. +/- 15 dB(A) um diese Mittelwerte. Es zeigt sich, dass der Stand der Schallschutztechnik bereits bei ei-

nem Schallleistungspegel von etwa 50 dB(A) liegt, die meisten Anlagen aber erheblich lauter sind. Anlagen mit einer größeren Leistung oder Leistungszahl müssen nicht mehr Lärm erzeugen, als kleine oder solche mit geringerer Leistungszahl [13].

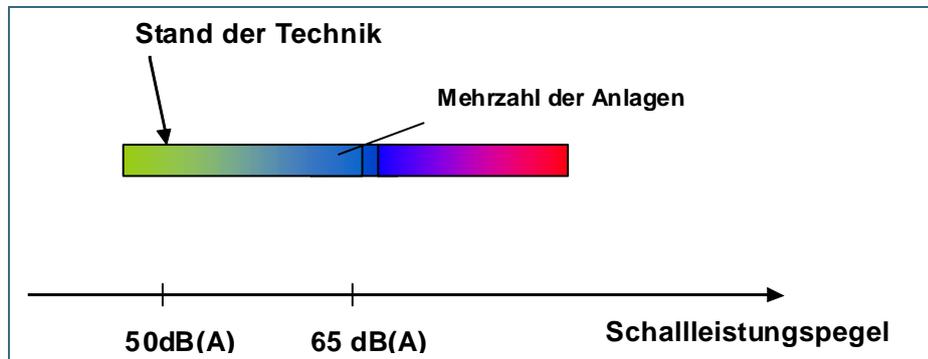


Abb. 33:
Stand der Technik bei
Luftwärmepumpen

Die Betrachtung der Frequenzzusammensetzung des Geräusches (Tonhaltigkeit) ist für die Beurteilung der Lästigkeit wichtig, vor allem wenn Einzeltöne hervortreten.

Ursachen sind, neben dem Kompressor, insbesondere die Geräusche durch die Ventilatorschaufeln und eventuell Emissionen des Ventilatorantriebes selbst. Werden die Bleche der Luftkanäle oder sonstige Gehäuseteile zu Resonanzen angeregt, breiten sich hiervon ausgehend tonhaltige Geräusche in die Umgebung aus. Die frequenzabhängigen Geräuschanteile sind in der Folge bei der Dimensionierung von Schalldämpfern oder absorbierenden Auskleidungen zu berücksichtigen und auch für die Wirksamkeit von Abschirmungen bedeutend. Einzeltöne bei ganzzahligen Vielfachen der Kompressordrehzahl und der Ventilator-Schaufelfrequenz (Grundton und Obertöne) treten besonders hervor. Um die Schaufelfrequenzen zu erhalten, muss die Ventilator-drehzahl von Minuten in Sekunden umgerechnet und mit der Schaufelanzahl multipliziert werden.

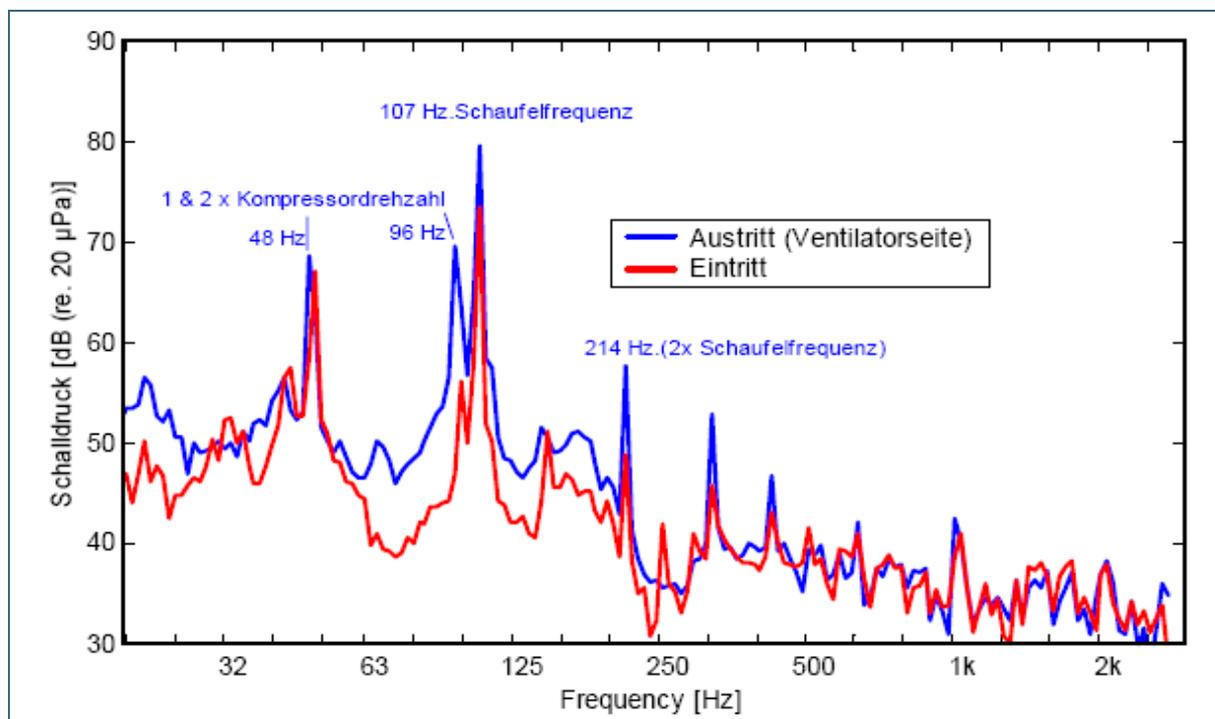


Abb. 34: Typisches Frequenzspektrum einer Luftwärmepumpe [14]

Abb. 34 zeigt typische Schallleistungsmaxima im niedrigen Frequenzbereich für Luftwärmepumpen.

13 Beurteilung

13.1 Prüfung, Immissionsrichtwerte

Die Beurteilung erfolgt für Luftwärmepumpen als Anlagen nach § 3 Abs. 5 BImSchG nach der TA Lärm. Zur Vermeidung von schädlichen Umwelteinwirkungen dürfen grundsätzlich die Immissionsrichtwerte der TA Lärm nicht überschritten werden. Diese beziehen sich auf unterschiedliche Gebietsarten und auch auf bestimmte Zeiten, nämlich tags von 6:00 Uhr bis 22:00 Uhr und nachts 22:00 Uhr bis 6:00 Uhr. Es ist auf den Gesamtlärm aller Anlagen abzustellen. Maßgebend für die Beurteilung ist wegen der um 15 dB(A) niedrigeren Nachtimmissionsrichtwerte die Nachtzeit. Hier gilt die sogenannte lauteste Nachtstunde, also eine volle Stunde (z. B. 1:00 bis 2:00 Uhr) mit dem lautesten Beurteilungspegel, zu der die Anlage relevant beiträgt.

Luftwärmepumpen werden in den meisten Fällen, insbesondere bei kalter Witterung und wenn ein erhöhter Warmwasserbedarf besteht, auch nachts in der Regel mindestens eine volle Stunde laufen.

Wegen der Summenwirkung sollte eine einzelne Wärmepumpe die jeweiligen Immissionsrichtwerte unterschreiten. Auch die Gleichbehandlung der Wohneigentumsbesitzer legt es nahe, von vorne herein reduzierte Immissionsrichtwerte anzusetzen. Sonst könnte bereits eine einzige Anlage den Immissionsrichtwert ausschöpfen.

13.2 Zuschläge zum Beurteilungspegel

Zu beachten ist, dass tiefe Frequenzen, Töne und Informationshaltigkeit eines Geräusches, als besonders lästig empfunden werden. Insbesondere störende Brummtöne breiten sich weit aus und werden selbst durch Isolierfenster nicht ausreichend gemindert. Bei Lärmmessungen an Luftwärmepumpen-Anlagen wurde zwar festgestellt, dass sie nicht tieffrequent im Sinne der TA Lärm waren, trotzdem wiesen sie diesbezüglich eine gewisse Lästigkeit auf und auch eine gewisse Tonhaltigkeit. Darüber hinaus änderte sich die Frequenz der Maximalpegel, je nachdem in welcher Stufe die Anlage läuft, was neben dem Anlagengeräusch eine gewisse zusätzliche Informationshaltigkeit darstellt. Höhere Stufen weisen ihre Pegelmaxima bei höheren Frequenzen auf, müssen aber nicht lauter sein. Tab. 7 zeigt die Terzanalyse einer typischen Luftwärmepumpe.

Frequenz	Stufe 5	Stufe 6	Stufe 7	Stufe 8
	L_{Zeq} [dB(A)]	L_{Zeq} [dB(A)]	L_{Zeq} [dB(A)]	L_{Zeq} [dB(A)]
40 Hz	47,7	43,9	46,2	50,5
50 Hz	48,8	47	43,2	52,9
63 Hz	48	46,6	49,8	50,3
80 Hz	45,8	41,4	46,4	42,3
100 Hz	61,6	63,4	46,2	46,6
125 Hz	45,1	59,9	47,1	59,5
160 Hz	45,4	45,6	44,6	49,5
200 Hz	43,7	43,9	45,8	44,5

Tab. 7:
Terzanalyse einer Luftwärmepumpe mit tonhaltigem Frequenzverhalten in unterschiedlichen Betriebsstufen

Um die Ton- und Informationshaltigkeit bei der Beurteilung zu berücksichtigen, erschien gemäß TA Lärm für die hier vermessene Anlage einen Zuschlag von + 6 dB(A) angemessen.

13.3 Raum-Innenmessung nach DIN 45680

Bei Beschwerden über niederfrequente Geräusche wird oftmals über Brummen oder Wummern der betroffenen Räume geklagt. Ein Außengeräusch oder eine Körperschallübertragung im Gebäudeinneren regt im Raum Resonanzen an. Aufschluss hierüber kann eine Raum-Innenmessung nach DIN 45680 mit anschließendem Vergleich mit der Hörschwelle geben. Die Norm legt ein Verfahren zur Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in Gebäuden bei Luft- und Körperschallübertragung fest. Hierbei muss der Raum akustisch, schmalbandig abgetastet und das Frequenzspektrum nach Terzen analysiert und bewertet werden. Abb. 35 zeigt eine Messung an einer Luftwärmepumpe mit einem Messpunkt in einem Raum (blau) und vor dem Gebäude (grün). Die eingetragene Hörschwelle nach DIN 45680 wird innen nicht überschritten, sondern nur außen.

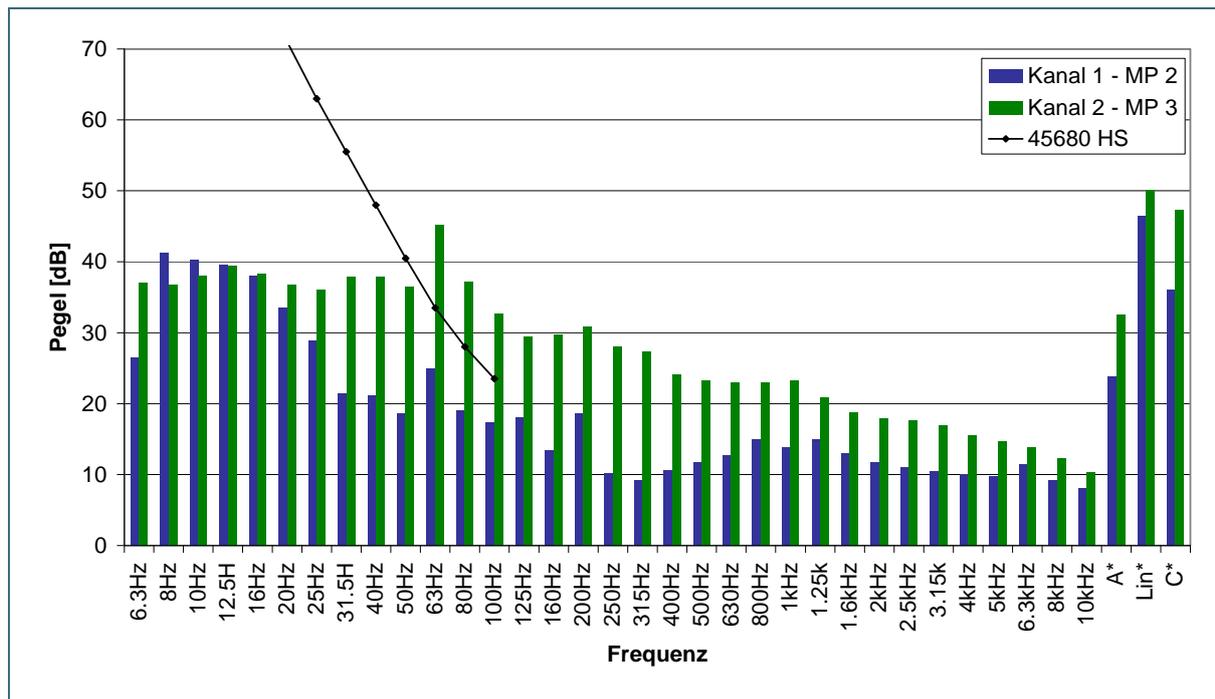


Abb. 35: Gleichzeitige Innen- und Außenmessung aufgeteilt nach Terzen an einer Luftwärmepumpe

Bei der Messung an einer anderen Luftwärmepumpe wurden dagegen, wie in Abb. 36 zu sehen ist, Überschreitungen der Hörschwelle auch im Gebäudeinneren festgestellt.

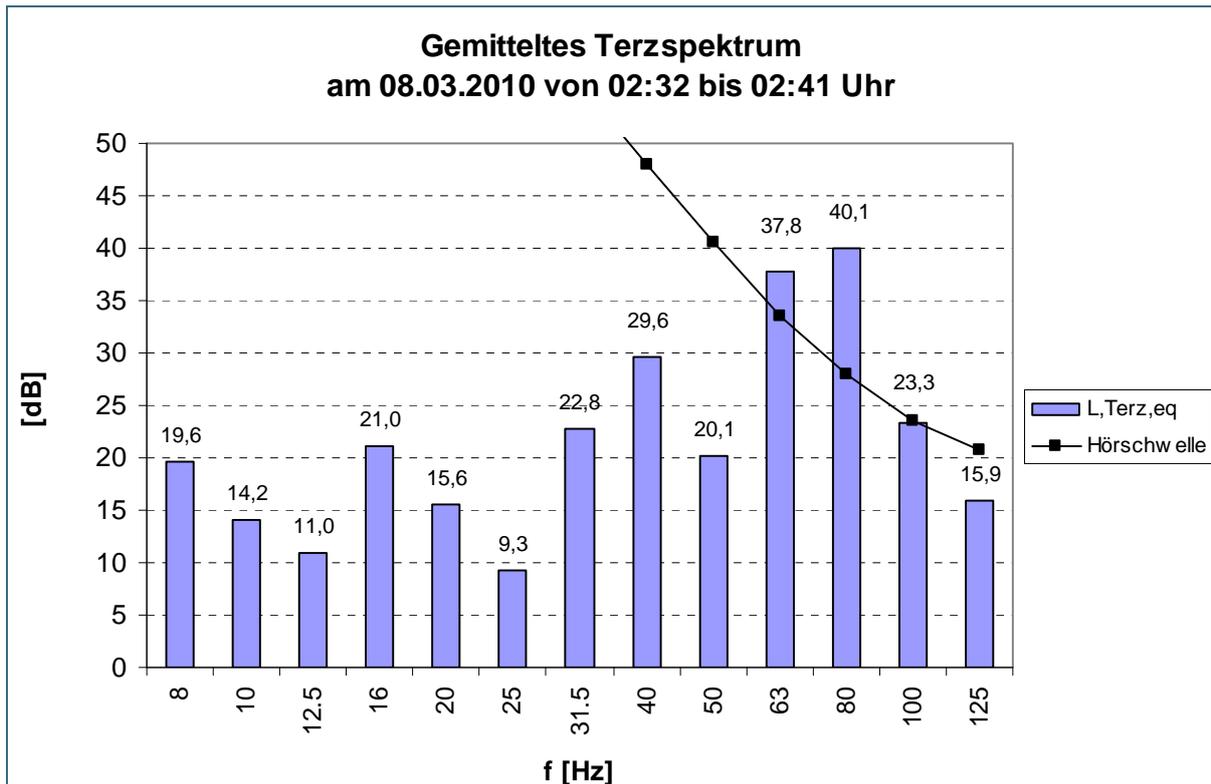


Abb. 36: Terzanalyse einer Raum- Innenmessung nach DIN 45680 wegen einer Luftwärmepumpe mit tonhaltigen Frequenzverlauf bei tiefen Frequenzen und Überschreitungen

In Beiblatt 1 zu DIN 45680 werden Hinweise zur Beurteilung gegeben. Es werden Anhaltswerte für Aufenthaltsräume, die Wohnzwecken dienen, und für Räume mit vergleichbarer Schutzwürdigkeit genannt. Im Allgemeinen wird keine erhebliche Belästigung durch tieffrequente Geräuschemissionen anzunehmen sein, wenn die Anhaltswerte unterschritten sind.

13.4 Baurechtliche Bestimmungen und städtebauliche Planung

Immissionsschutzrechtlich ist die Wärmepumpe als nicht genehmigungsbedürftige Anlage zu beurteilen. Es wird empfohlen, baurechtliche Vorgaben zu machen und die Unterschreitung eines reduzierten Immissionsrichtwerts oder Immissionsrichtwertanteils bereits für die Einzelanlage in einem Bebauungsplan vorzuschreiben.

14 Schallausbreitung und Möglichkeiten der Lärminderung

14.1 Luftschall

14.1.1 Niederfrequente Geräusche und Auswahl eines Gerätes

Generell ist festzustellen, dass niederfrequente Geräusche schwer zu mindern sind. Die tiefen Frequenzanteile breiten sich gut aus und sind schwer zu bedämpfen. Höhere Frequenzen werden auf dem Ausbreitungsweg durch Luft- und Bodenabsorption besser abgeschwächt.

Da Wärmepumpen einen relativ hohen Anteil von niedrigen Frequenzen aufweisen, ist bei ihnen besonders auf die Auswahl eines leisen Gerätes zu achten. Spätere Lärminderungsmaßnahmen sind aufwendig und teuer. Am Besten sind leise Geräte mit Innenaufstellung und optimierten Luftkanälen, die die lärmschutzfachlichen Anforderungen erfüllen. Einzelne Geräte, die dem derzeit besten Stand

der Schallschutztechnik entsprechen, weisen einen immissionswirksamen Schalleistungspegel von nur ca. 50 dB(A) auf (z. B. Splitgeräte).

14.1.2 Erforderliche Abstände (orientierende Berechnung)

Die erforderlichen Abstände zum Immissionsort sowie die notwendigen Lärmschutzmaßnahmen sind grundsätzlich abhängig von der Festlegung der Immissionsrichtwerte. Die folgende Tabelle zeigt die Abstände für verschieden laute Wärmepumpen, die einzuhalten sind, um die um mindestens 6 dB(A) reduzierten Nacht-Immissionsrichtwerte nach TA Lärm (Nr. 3.2.1) zu unterschreiten (Berücksichtigung der Summenwirkung mit anderen Anlagen). Für die orientierende Berechnung wurde von einer Außenanstellung an einer Außenwand und einem Lästigkeitszuschlag für eine niederfrequente Tonhaltigkeit von 6 dB(A) ausgegangen. Nicht berücksichtigt sind eine Hindernisdämpfung, z. B. durch Schallschirme oder Mehrfachreflexionen. Bei ungünstigen Fällen könnte sich durch Reflexionen der erforderliche Abstand verdoppeln. Ein Vergleich mit den oben angegebenen Schalleistungspegeln zeigt deutlich, dass die meisten Wärmepumpen für herkömmliche Bebauungssituationen nicht geeignet sind, so dass Einhausungen und Abschirmungen notwendig werden.

Tab. 8: Erforderliche Abstände in Abhängigkeit der Baugebietsnutzung (Prognose), Ansätze für die Ausbreitungsrechnung nach DIN ISO 9613-2 E: Punktquelle vor Wand, überwiegend poröser Boden, freie Schallausbreitung, Höhe EO:1,5 m, Höhe IO: 2 m, $C_{met} = 0$; berechnet mit einem EDV-Programm, in ungünstigen Fällen (Reflexionen) kann sich der Abstand verdoppeln; WR: reine Wohngebiete, WA: allgemeine Wohngebiete, MI: Mischgebiete, GE: Gewerbegebiete, IRW: Immissionsrichtwert

Schalleistungspegel der Wärmepumpe	Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit (z. B.)	Nutzungszeit	Erforderlicher Abstand zwischen Wärmepumpe und schutzbedürftiger Bebauung in einem			
			WR	WA	MI	GE
			Nacht- IRW jeweils um 6 dB(A) reduziert			
45 dB(A)	6 dB	Nachts	6,7 m	3,4 m	1,6 m	< 1 m
50 dB(A)	6 dB	Nachts	12,4 m	6,7 m	3,4 m	1,6 m
55 dB(A)	6 dB	Nachts	22,2 m	12,4 m	6,7 m	3,4 m
60 dB(A)	6 dB	Nachts	31,8 m	22,2 m	12,4 m	6,7 m
65 dB(A)	6 dB	Nachts	48,8 m	31,8 m	22,2 m	12,4 m
70 dB(A)	6 dB	Nachts	79,2 m	48,8 m	31,8 m	22,2 m
75 dB(A)	6 dB	Nachts	133,0 m	79,2 m	48,8 m	31,8 m

Die Abstände können sich im Einzelfall reduzieren, wenn die Anlage den Lärm nicht, wie in der Tabelle angenommen, gleichmäßig in alle Richtungen abstrahlt und günstig aufgestellt wird. Auch die Richtcharakteristik kann ausgenutzt werden.

14.1.3 Reflexionen und Richtcharakteristik

Bei näherer Untersuchung der individuellen Aufstellungsbedingungen in einer konkreten Bebauungssituation ergab sich für die Belastung am Immissionsort eine erhebliche Abweichung der Messung vom erwarteten, berechneten Beurteilungspegel, bei dem nur die geometrische Ausbreitungsdämpfung angesetzt wurde. Dies wird durch Reflexionen an umliegenden Fassaden und durch die Richtcharakteristik der Luftwärmepumpe hervorgerufen. Eine Simulation mit einem schalltechnischen Berechnungsprogramm bestätigt dies. Die Anlage strahlt nicht gleichmäßig in den Raum aus, sondern gebündelt und der Schall wird von Fassaden zurückgestrahlt. Für diesen Einzelfall ergibt sich durch die Reflexionen und die Richtwirkung rechnerisch eine Erhöhung um ca. 4,7 dB(A). Dies entspricht dem

Einwirken von drei Anlagen. Nach [18] können sich in ungünstigen Fällen um bis zu 6 dB(A) höhere Schallleistungspegel ergeben. Für die Luftwärmepumpen heißt dies, dass sich der erforderliche Abstand verdoppelt, bzw. sie entsprechend leiser sein müssen.

Bei der Prognose des Beurteilungspegels scheiden deshalb überschlägige Ermittlungen oftmals aus und es müssen detaillierte Überlegungen oder Berechnungen durchgeführt werden. Abb. 37 zeigt eine Rasterberechnung für einen konkreten Fall. Der Beschwerdeführer war nicht am meistbetroffenen, maßgebenden Immissionsort.

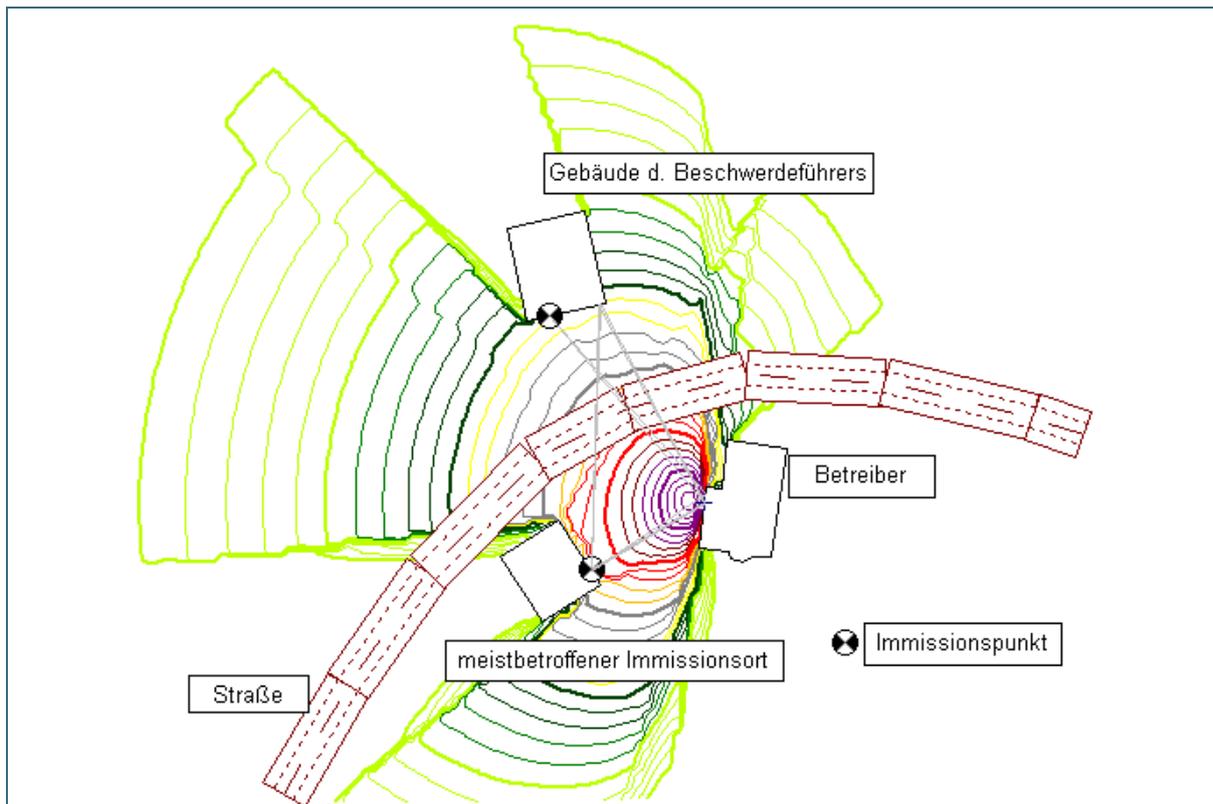


Abb. 37: Rasterberechnung mit Immissionspunkten an zwei Gebäuden (Schallstrahlen grau)

14.1.4 Aufstellung der Wärmepumpe und Schallschirme

Bei der unter Nr. 14.1.2 gemachten Berechnung wurde eine Punktquelle vor einer Wand angenommen. Die Luftwärmepumpe strahlt also nicht ringsum, sondern nur in einen Teil des Raumes ab – man spricht vom Viertelraum. Ist eine Schallquelle auf dem Boden, ohne Wand abgestellt, strahlt sie in den Halbraum über dem Boden ab und am Immissionsort reduzieren sich die Pegel um 3 dB(A), wenn sonst keine Reflexionen oder Richtwirkungen auftreten. Wird die Luftwärmepumpe in einer Ecke aufgestellt, verteilt sich der Schall nur in einem Achtelraum und der Beurteilungspegel erhöht sich um 3 dB(A) gegenüber einer Wand-Montage.

Die Außeninstallation einer Wärmepumpe ist aus der Sicht des Lärmschutzes ungünstiger, als eine Innenaufstellung mit optimierten Luftkanälen. Luftwärmepumpen erzeugen aber auch Außenlärm, wenn sie im Hausinneren aufgestellt sind. Dies liegt daran, dass Lärm vom Kompressor und vom Ventilator durch die Zu- und Abluftschächte nach außen dringt. Ferner entstehen Strömungsgeräusche der Luft, durch die großen umgesetzten Luftmengen.

Pegelminderungen können durch eine geeignete Aufstellung der Wärmepumpe im Gebäudeinneren und die richtige Positionierung der Ab- und Zuluftschächte auf die zum Immissionsort abgewandte

Seite erzielt werden. Hierbei muss aber auf reflektierende Fassaden geachtet werden, von denen der Schall in ungünstige Richtungen gelenkt werden kann oder hin und her reflektiert, wobei er sich noch verstärkt (Mehrfachreflexionen). Wichtig ist die Berücksichtigung der Empfindlichkeit der Nutzung der betroffenen Räume an den Immissionsorten. Nach DIN 4109 sind schützenswerte Räume:

- Wohnräume, einschließlich Wohndielen
- Schlafräume, einschließlich Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten und Bettenräume in Krankenhäusern und Sanatorien
- Unterrichtsräume in Schulen, Hochschulen und ähnlichen Einrichtungen
- Büroräume (ausgenommen Großraumbüros), Praxisräume, Sitzungsräume und ähnliche Arbeitsräume.

Schützenswert ist auch der Außenwohnbereich, also Terrassen und Balkone.

Die Innenaufstellung der Luftwärmepumpe kann eine Pegelminderung um bis zu ca. 8 dB(A) bringen, die Positionierung der Luftöffnung an einer seitlichen, statt einer zum Immissionsort hin orientierten Fassade bewirkt eine Minderung um mindestens ca. 5 dB(A), für die Anordnung an einer abgewandten Fassade (Rückseite des Gebäudes) gilt als Faustwert eine Minderung um etwa 15 dB(A) bis 20 dB(A).

Auch die Aufstellung hinter Schallschirmen (z. B. Schallschutzwände) kann in Frage kommen. Diese müssen nahe an der Schallquelle platziert sein und die Sichtverbindung zum Immissionsort deutlich unterbinden, weil der Schall um die Schirmkanten gebeugt wird. Die Wirkung der Maßnahme nimmt mit der Entfernung von Quelle und Empfänger vom Schirm ab. Um Reflexionen und Mehrfachreflexionen zwischen Schirm und an umliegenden Fassaden zu vermeiden, muss geprüft werden, ob der Schallschirm zumindest einseitig hochabsorbierend ausgeführt sein muss, wobei die niedrigen Frequenzanteile leider trotzdem überwiegend reflektiert werden.

Bei ausreichender Dimensionierung und günstiger Lage der Abschirmung können Minderungen von ca. 10 dB(A) bis 15 dB(A) erreicht werden. Abschirmungen sind auch direkt der Zu- oder Abluftöffnung vorsetzbar (Abb. 38). Durch einfache, teilweise Umschließungen einer Schallquelle erreicht man Schallminderungen von 5 dB(A) bis 10 dB(A) [19].

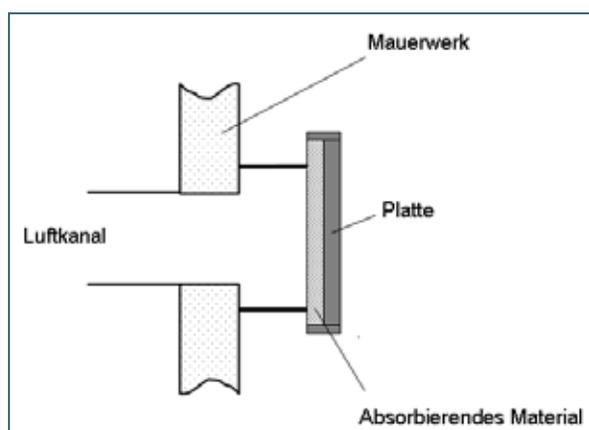


Abb. 38:
Einfache Vorsatzschale
vor einer Öffnung

Allerdings nimmt die Wirkung von Schirmen bei tiefen Frequenzen stark ab – man muss den Schall in eine unempfindliche Richtung, z. B. auch nach oben ablenken, um den immissionswirksamen Anteil zu mindern. Die Vorrichtungen sollten ein bewertetes Schalldämmmaß R'_{w} von mindestens 25 dB aufweisen. Sträucher und Jalousien haben an den betroffenen Fenstern keine pegelmindernde Wirkung.

14.1.5 Absorbierende Bekleidungen von Oberflächen

Flächen, die mit Schall beaufschlagt sind, sollten mit absorbierenden Materialien verkleidet werden. Bei der Absorption wird Schall in Wärme umgewandelt. Wichtig sind hier der Strömungswiderstand des Absorbermaterials und andere Dämpfungsmechanismen. Der Absorptionsgrad hängt von der Materialstärke ab.

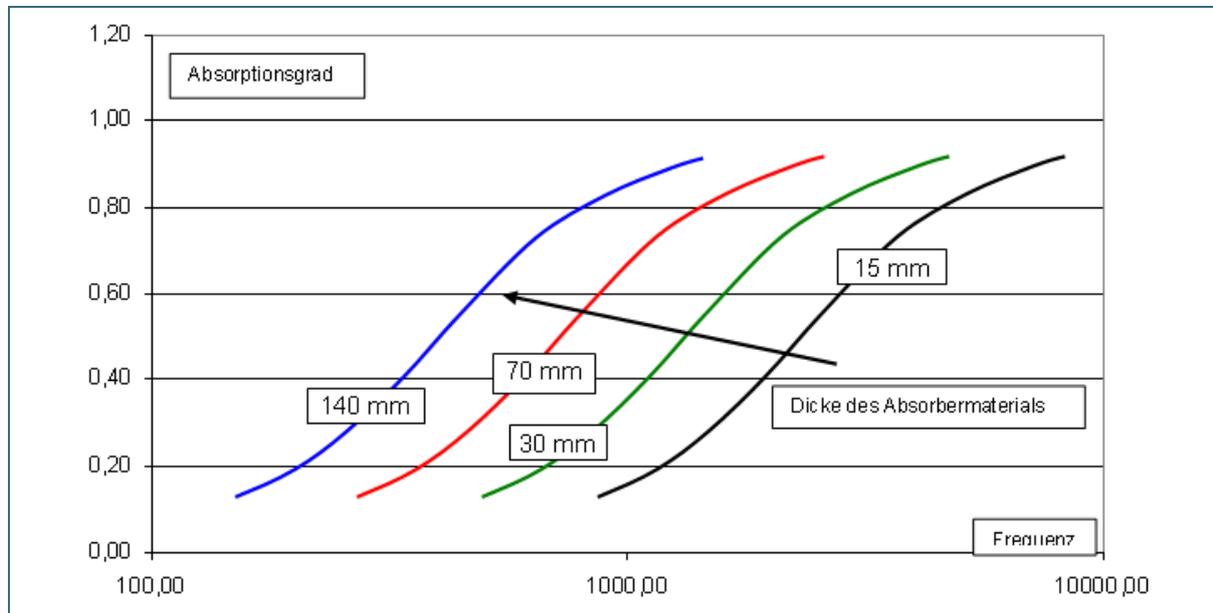


Abb. 39: Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Materialstärke

Man sieht in Abb. 39, dass für tiefe Frequenzen große Materialstärken erforderlich sind und trotzdem keine gute Lärminderung eintritt. Es ist also von vornherein auf eine geringe Entstehung und Ausbreitungsfähigkeit solcher tiefen Frequenzen in den Gehäusen und in den Luftkanälen zu achten. Als abdeckendes Material können Lochbleche zum Einsatz kommen mit einem Lochflächenverhältnis von mindestens 30 %. Darunter gibt es Resonanzeffekte. Hinweise für geeignetes Material geben Hersteller von Akustikbauteilen und Akustikmaterialien.

14.1.6 Ventilatoren

90 % des Lärms von Luftwärmepumpen erzeugen die Ventilatoren. In Wärmepumpen werden überwiegend Axial- und Radial-Ventilatoren eingesetzt. Sie können rückwärts oder vorwärtsgekrümmte Schaufeln haben. Diese Ventilatorarten haben zwar unterschiedliche Strömungs- und Lärmeigenschaften, vergleicht man aber den Gesamtlärm, so unterscheiden sich diese Bauarten bei vergleichbarer Luftleistung kaum. Die Lärmentwicklung eines Ventilators hängt vom Betriebspunkt, also dem Förderdruck und dem Volumenstrom ab. Zu achten ist auf den Frequenzverlauf. Bei tieffrequentem Lärm, müssen Schallschirme und Schalldämpfer aufwendiger sein.

Haupteinflussgröße beim Ventilatorlärm ist der Volumenstrom und damit die Drehzahl. Halbiert man den Volumenstrom auf 50 % des Nennwertes durch Halbierung der Drehzahl, vermindern sich die Geräusche nach praktischen Erfahrungen um ca. 15 dB(A) bis 18 dB(A) [16]. Theoretisch nimmt der Schallleistungspegel um ca. 0,25 dB(A) pro 1% Drehzahlsteigerung zu, bei freien Wirbelquellen noch mehr, nämlich um 0,34 dB(A) [17]. Somit erscheint die Reduktion der Drehzahl als geeignetes Mittel zur Lärminderung. Verwendet man z. B. zwei Ventilatoren um einen bestimmten Volumenstrom zu erreichen, kann man rechnerisch eine Lärminderung von insgesamt ca. 12 dB(A) bis 15 dB(A) erwarten. Dann sind aber größere Verdampfer und Kanalquerschnitte erforderlich, was sich günstig auf die Strömungsgeschwindigkeit und die Geräusche auswirkt.

Setzt man größere Ventilatoren ein, ist ein höherer Volumenstrom bei kleinerer Strömungsgeschwindigkeit erzielbar. Ein gegenläufiger Aspekt ist hier aber die steigende Umfangsgeschwindigkeit der Ventilatorschaufelspitzen. Bei selber Drehzahl hat zum Beispiel nach [17] ein Ventilator mit einem Schaufeldurchmesser von 560 mm einen um ca. 8 dB(A) höheren Schallleistungspegel, als ein Ventilator mit einem Durchmesser von 450 mm.

Wichtig ist es also Baugröße, Drehzahl und Betriebspunkt (Förderdruck und Volumenstrom) aufeinander abzustimmen und den Punkt für die minimale Lärmentwicklung zu finden. Die erzeugte Schallleistung ist im Übrigen auch proportional zur Nennleistung des Ventilators, sodass eine Überdimensionierung vermieden werden muss. Die Ventilatorhersteller haben in der Regel sehr ausführliche Informationen über die Geräuschentwicklung ihrer Produkte und geben auch Empfehlungen für die Typenwahl und zu den Einbauverhältnissen. Die Schallleistung wird i. d. Regel auf 3 dB(A) genau garantiert.

An Aufhängungen und Schutzgittern an denen die Ventilatorschaufeln vorbeilaufen, entstehen Störungen – Luftzonen mit Strömungs- und Druckschwankungen und regelmäßige Druckimpulse, die ein tonhaltiges Geräusch hervorrufen können. Auch eine ungünstige Kanalgestaltung mit Stellen mit lokalen Wirbeln im Luftstrom kann solche Geräusche verursachen. Diese sollte auf alle Fälle vermieden oder minimiert werden.

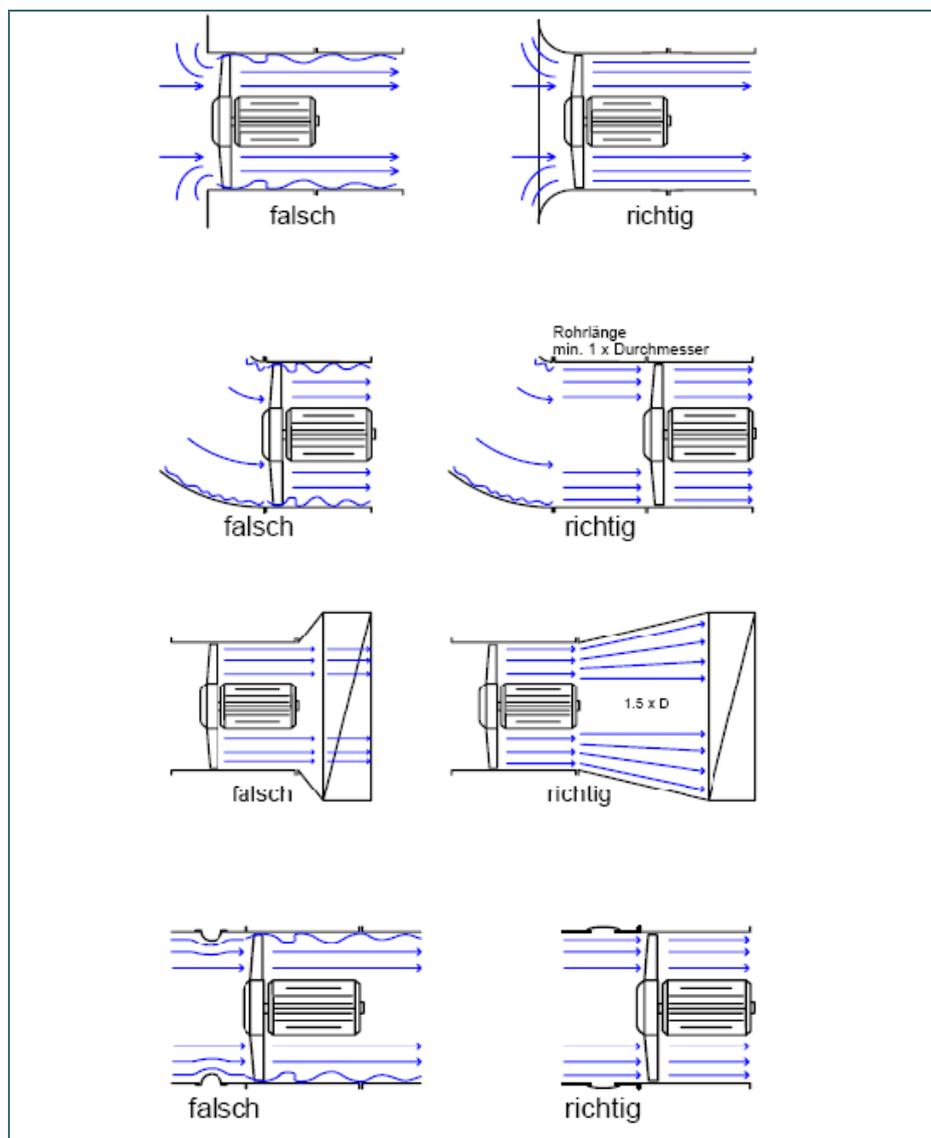


Abb. 40:
An- und Umströmung
des Ventilators [22]

Da Ventilatoren infolge ihrer bewegten Teile, insbesondere bei zu leichten Gerätekonstruktionen, Vibrationen erzeugen, ist auf eine vibrationsfreie, Körperschall entkoppelte und ausreichend steife Lagerung zu achten. Auch das 50 Hz-Brummen des Elektromotors, das sich auf die Ventilatorschaufeln übertragen kann, muss minimiert werden. Dasselbe gilt natürlich für Unwuchten.

Da die Dämpfung stark vom Frequenzspektrum des Lärms abhängt, muss jeder Schalldämpfer der Situation angepasst werden. Es kann aber auch sinnvoll sein, das Geräusch dem Schalldämpfer anzupassen, was z. B. bei Ventilatoren möglich wäre.

14.1.7 Luftkanalgestaltung

Bei den Luftkanälen helfen z. B. eckige Kanalumlenkungen, mit denen bereits gute Schallpegelminderungen erzielt werden können. Die ungehinderte Durchstrahlung des Luftkanals in Längsrichtung wird unterbunden. Absorbierende Auskleidungen und eine günstige Luftkanalgestaltung reduzieren den Lärm weiter.

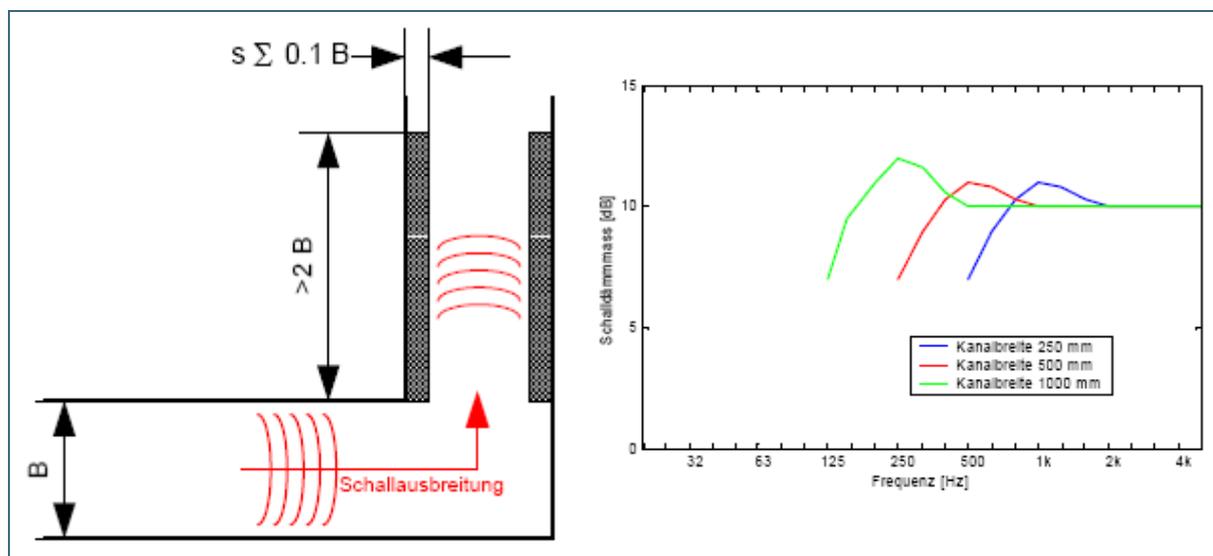


Abb. 41: Eckige Kanalumlenkungen [24]

Wie das Diagramm rechts zeigt, nimmt das Schalldämmmaß bei niedrigen Frequenzen stark ab, so dass diese leider nur schwach gedämpft werden.

Auch der Luftkanal muss optimiert werden. Kritische Stellen in den Luftkanälen sind Kanalkrümmen, Querschnittsprünge, Lüftungsgitter und sonstige Strömungshindernisse. Im Kanal muss eine wirbelarme Strömung vorherrschen. Eine Verdoppelung oder Halbierung der Strömungsgeschwindigkeit durch Einflüsse, die einer Drossel- oder Drallklappe entsprechen, kann zum Beispiel einer entsprechenden Veränderung des Lärmpegels um 5 dB(A) bedeuten [16], an Kanalcomponenten, wie dem Wetterschutzgitter können auch Differenzen von mehr als 20 dB(A) auftreten. Diese Einflüsse sind stark gestaltungsabhängig. In [17] werden Geschwindigkeiten von ca. 4 m/sec an diesen Bauteilen empfohlen. Hierfür sind größere Kanalquerschnitte erforderlich.

14.1.8 Luftkanaleinbauten und -auskleidungen

Die Ausbreitungsfähigkeit von Schallwellen (sogenannte Grundmoden und Oberwellen), und damit die akustischen Eigenschaften der Gesamtanlage, können mit Einbauten in die Luftkanäle beeinflusst werden. Die Kanäle wirken dann ähnlich wie Schalldämpfer und behindern die Schallweiterleitung. Abb. 42 zeigt solche Einbauten.

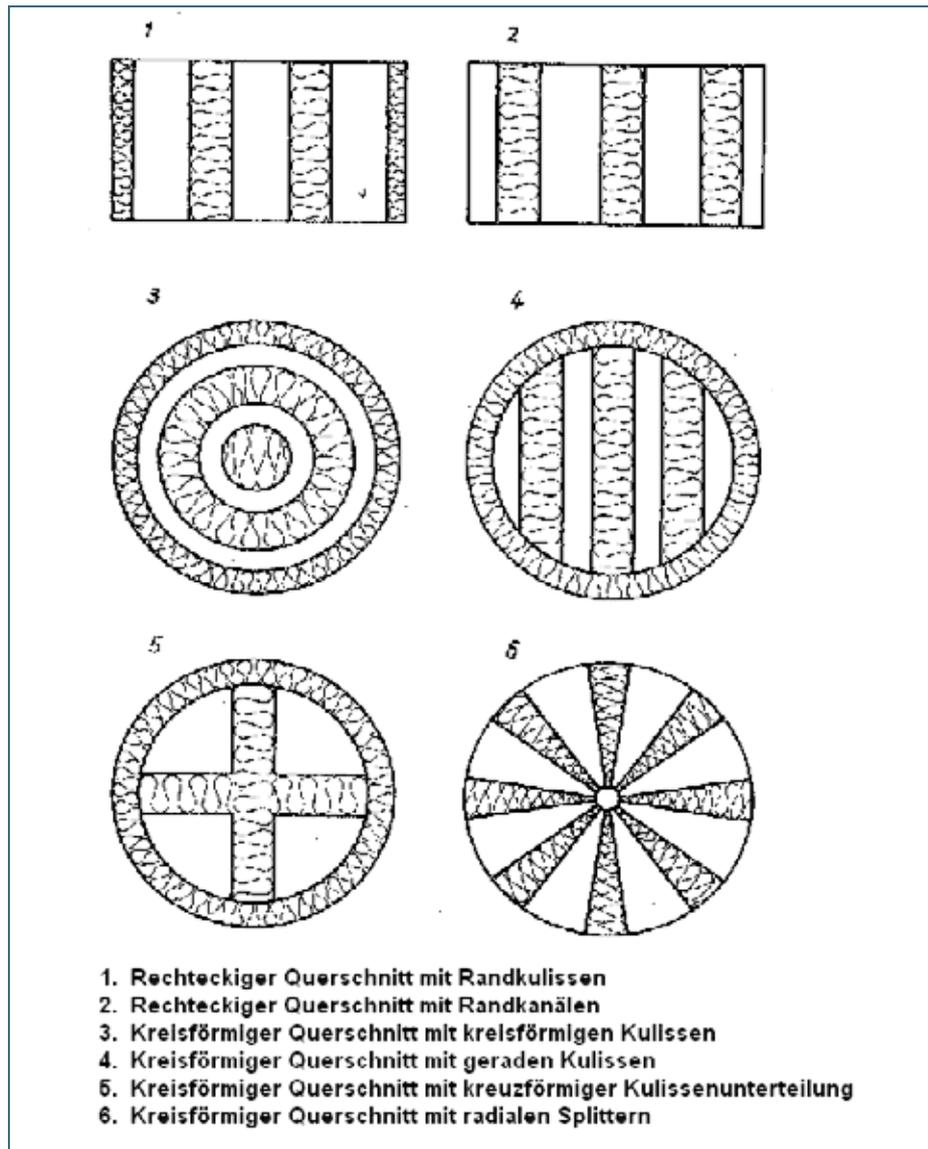


Abb. 42:
Möglichkeiten zur Unterteilung des Kanalquerschnitts [16]

Die Einbauten erhöhen die Kanallängsdämpfung. Es muss aber auf den Druckverlust, durch den erhöhten Strömungswiderstand geachtet werden. Die Schalldämmung der Kanalwände muss mindestens ebenso groß sein wie die Schalldämpfung des Kanals.

14.1.9 Schalldämpfer

Als weitere Lärmschutzmaßnahmen kommen Schalldämpfer in den Zu- und Abluftöffnungen in Frage. Der austretende Schall wird dadurch wesentlich verringert. Es gibt verschiedene Versionen von Schalldämpfern, z. B. Kulissenschalldämpfer oder zylindrische Absorptionsschalldämpfer. Ein weiterer Typ ist der Relaxationsschalldämpfer. Die akustische Wirkung entsteht meist durch eine Kombination aus Absorption und Reflexion in den Dämpfergehäusen. Es sind also entsprechende Einbauten vorzusehen.

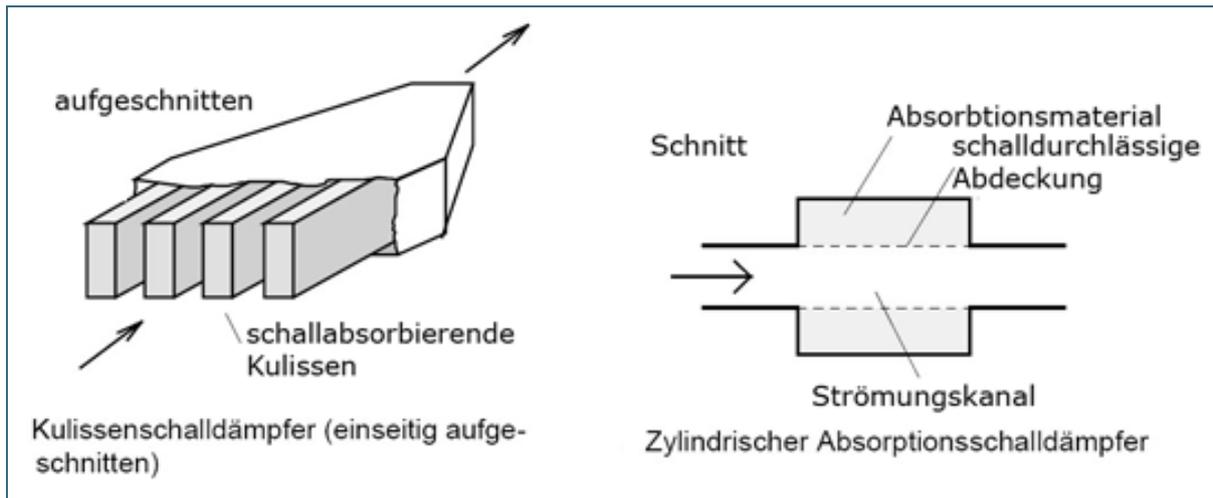


Abb. 43: Kulissen- und Absorptionsschalldämpfer [15]

Bei größeren Strömungsgeschwindigkeiten entstehen im Schalldämpfer selbst wieder Geräusche. Unter 10 m/s braucht nach [16] das Strömungsgeräusch bei der Schalldämpferbemessung aber i. d. R. nicht berücksichtigt werden.

14.1.10 Resonatorschalldämpfer

Für tiefe Frequenzen eignen sich bei genügend großen Luftschächten Resonatorschalldämpfer, die auf das tieffrequente Brummen des Kompressors oder den Ventilatorklang abgestimmt sind. Bei der festgelegten Frequenz wird er zum Schwingen angeregt und dämpft mit einer Art Masse-Feder-System die Schwingungen. Die Wechselwirkung zwischen einem Hohlraum und einer bewegten Luftmasse ist hierbei ausschlaggebend.

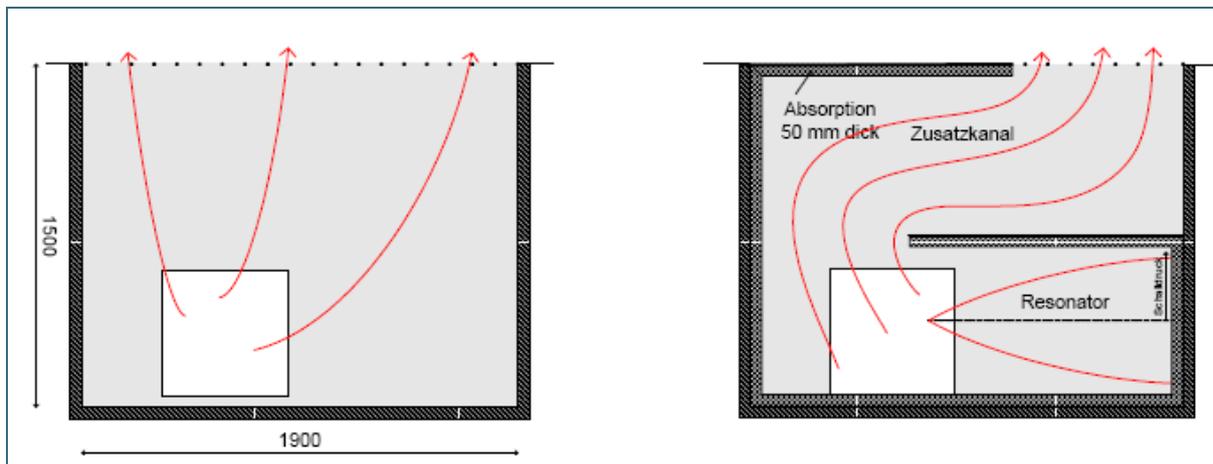


Abb. 44: Absorptionsresonator [17]

Die auftreffende Schallenergie wird in kinetische Energie umgewandelt. Die maximale Minderung tritt im Bereich der Eigenfrequenz auf, bei der die umgebende Masse am stärksten schwingt. Hierfür können sowohl Platten, z. B. aus Sperrholz, Gipskarton, Pressspan, Kunstleder, Folie, etc. (Plattenschwinger) zum Einsatz kommen, als auch die im Loch schwingende Luft bei gelochten Platten (Lochplattenschwinger und Helmholtz-Resonatoren). Mit einer schallabsorbierenden Auskleidung werden zusätzlich auch höhere Frequenzen gedämpft.

Da Luftwärmepumpen lastabhängig meist in verschiedenen Betriebsstufen laufen und beim Hochfahren die Lärmmaxima bei unterschiedlichen Frequenzen liegen, ist eine Abstimmung schwierig oder sogar unmöglich. Es kann auch der Effekt auftreten, dass einzelne Frequenzbänder durch Reflexionen verstärkt werden.

14.1.11 Lichtschächte

Als (Resonanz-) Schalldämpfer können auch die Lichtschächte dienen. Der Schacht wirkt durch die Verlängerung nach unten, wie ein Resonator, der allerdings nur sehr schmalbandig wirkt. Nach [17] ist es auch möglich unten am Schachtende einen (Helmholtz-) Resonator einzubauen (rechte Darstellung).

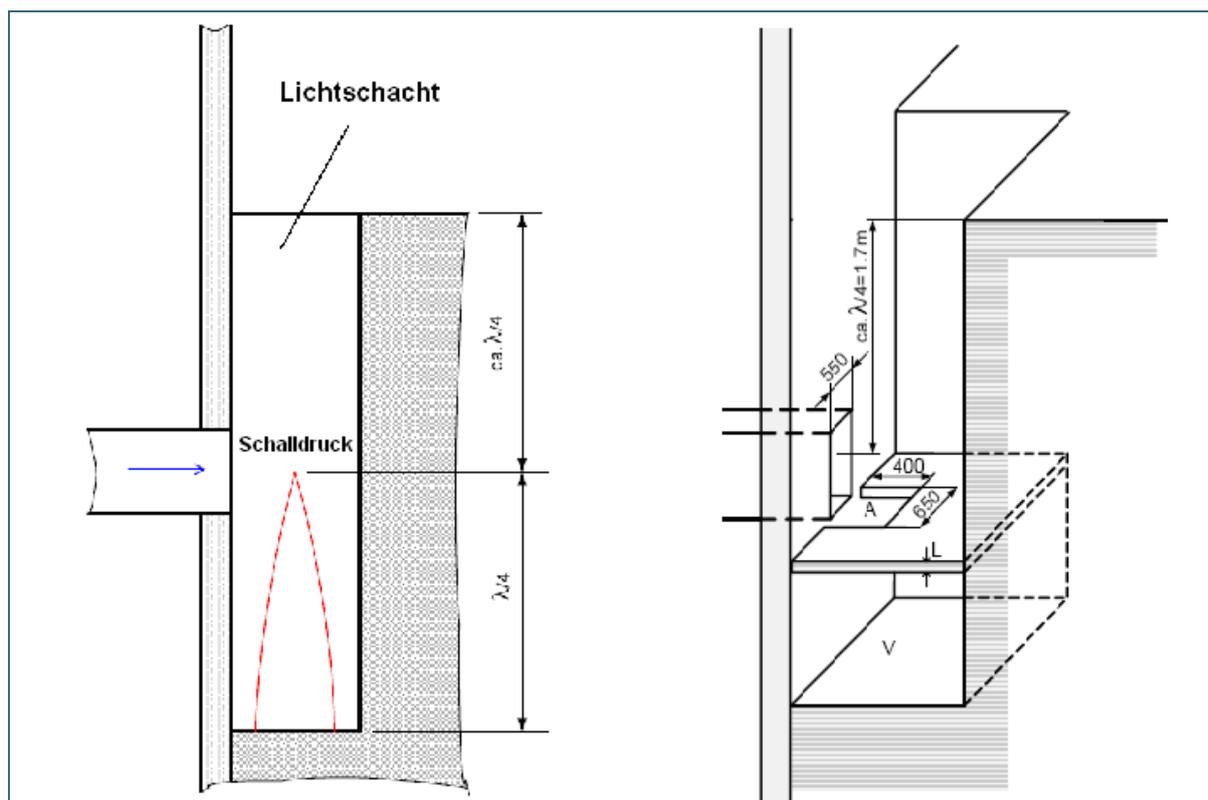


Abb. 45: Lichtschächte mit Resonatoren und absorbierender Auskleidung für die Dämpfung [17]

Der Schacht kann durch Sand oder Kiesfüllung aufgefüllt und abgestimmt werden, wenn er etwas tiefer ausgeführt wird und darüber hinaus absorbierend verkleidet, um Resonanzen zu verhindern. Die Abmessungen werden allerdings für niedrige zu dämpfende Frequenzen relativ groß. Beim linken Schacht beträgt die erforderliche Länge eine halbe Wellenlänge, zum Beispiel für 100 Hz:

$$\lambda/2 = c / (2 * f) = 340 \text{ m/sec} / (2 * 100 \text{ Hertz}) = 1,7 \text{ Meter}$$

Das bedeutet 85 cm nach unten und 85 cm nach oben, bei mittigem Luftkanalzutritt. Der (Helmholtz-) Resonator am Schachtboden muss wie folgt berechnet werden:

Die wirksame Länge L' der Öffnung (mit der Fläche A) des Resonators beträgt

$$L' \cong L + 8,0 \sqrt{A}$$

Das benötigte Volumen

$$V = \frac{A}{L'} * \left(\frac{c}{2\pi * f} \right)^2 \quad [17]$$

In Tabelle 9 ist das erforderliche Resonatorvolumen dargestellt [17].

Frequenz	Erforderliches Resonatorvolumen (bei einer Öffnung von 650 x 400 mm)
50 Hz	0,69 m ³
63 Hz	0,44 m ³
80 Hz	0,27 m ³
100 Hz	0,17 m ³

Tab. 9:
Erforderliches Resonatorvolumen [17]

Wie bereits erwähnt, ist die Abstimmung schwierig, weil die Luftwärmepumpen ihre Maxima, je nach Stufe in der sie laufen, bei anderen Frequenzen aufweisen.

H. E. sollten zunächst einfachere Ausführungen geprüft werden, z. B. eine dickere Schotteraufschüttung am Boden (ähnlich Gleisschotter bei der Eisenbahn), absorbierende Schachtwände und einfache absorbierende Einbauten, die die direkte Durchstrahlung des Zu- oder Abluft-Lichtschachtes mit Schall unterbinden, wobei Strömungsgeräusche an den Einbauten vermieden werden müssen. Dazu muss der Schachtquerschnitt genügend groß sein, damit die Strömungsgeschwindigkeit an den Einbauten nicht zu hoch wird. Auch Schalldämmkulissen kommen in Frage.

14.2 Innenlärm und Körperschall

14.2.1 Aufstellung und elastische Lagerung

Bei der Aufstellung von Wärmepumpen in Gebäuden entsteht sowohl Körper- als auch Luftschall, der eventuell über die Fenster, die Luftschächte und die Rohrleitungen nach außen oder über Wände und Boden in benachbarte Räume oder Häuser dringen kann. Der Schwerpunkt liegt meist beim Körperschall. Um diesen Lärm zu vermindern, müssen die Geräteteile durch entsprechende Lagerung schwingungstechnisch entkoppelt werden. Die Gebäudefundamentplatte (Kellerboden) ist für die Lagerung wesentlich günstiger als eine Geschossdecke, da diese leichter zum Schwingen angeregt werden kann. Die unmittelbare Nähe von Büro-, Wohn- und Schlafräumen ist zu vermeiden.

Die wichtigste Maßnahme gegen Körperschall ist die elastische Lagerung. Dazu wird die Wärmepumpe auf eine Platte mit Gummifüßen gestellt. Um eine optimale Minderung zu erzielen, müssen sowohl Platte, als auch Füße schwingungstechnisch richtig dimensioniert werden. Wechselwirkungen mit schwimmenden Estrichen dürfen nicht zu einer Erhöhung aufgrund von Resonanzen führen. Eine Entkopplung kann z. B. durch eine umlaufende Nut im Estrich unter der Wärmepumpe erfolgen.

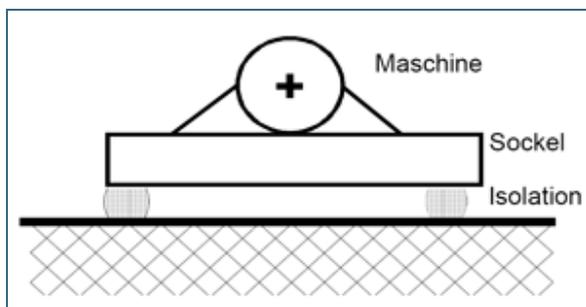


Abb. 46:
Schallisolierende Lagerung [15]

14.2.2 Installation, Rohrleitungen und Luftkanallagerung

Bei Verschraubungen ist darauf zu achten, dass keine Schallbrücken durch Schrauben entstehen. Auch wenn die Wärmepumpe elastisch gelagert ist, kann Körperschall immer noch durch die abgehenden Leitungen übertragen werden. Um das zu verhindern, lassen sich zur Entkopplung so genannte Kompensatoren in die Leitungen einsetzen. Das sind flexible Schläuche, die um 90° bis 360° Grad gebogen sind. Die Leitungen sollten elastisch gelagert oder aufgehängt werden.

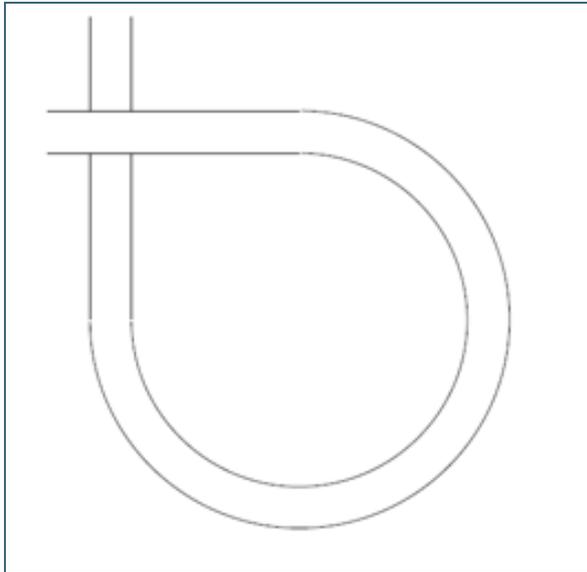


Abb. 47:
Kompensator:
Schlauchleitung um
270° gebogen [15]

Durchführungen durch Gehäuse müssen schalldicht sein. Die richtige Installation ist dabei unumgänglich, denn die elastische Lagerung kann – zum Beispiel durch zu fest angezogene Schrauben – wirkungslos gemacht werden. Es empfiehlt sich daher, die Installation durch einen Fachmann ausführen zu lassen.

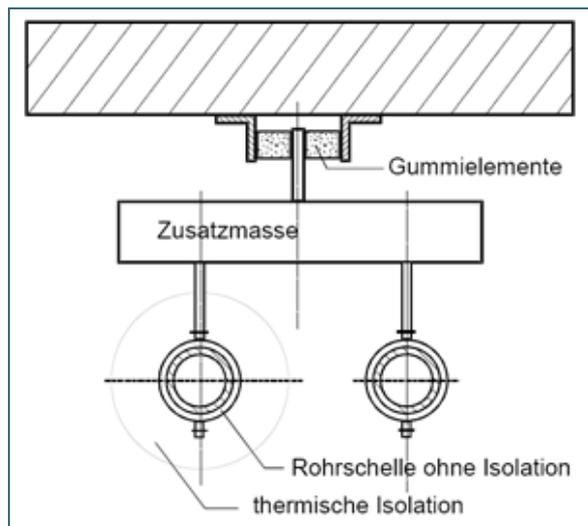


Abb. 48:
Körperschalldämmung bei
der Installation von vibrie-
renden Rohren [15]

14.2.3 Einhausung und Kapselung

Der von den Betriebsaggregaten der Wärmepumpe abgegebene Luftschall kann sowohl bei der Aufstellung im Gebäudeinneren, als auch bei einer Außenaufstellung durch vollständige und fugendichte Einhausung bzw. Kapselung [20] gemindert werden. Die Zu- und Abluftöffnungen sind mit ausreichend dimensionierten Schalldämpfern auszurüsten.

In Kapseln trifft der von der Schallquelle ausgehende Luftschall auf die Kapselinnenwand und wird von dort je nach Größe des Schallabsorptionsgrades mehr oder weniger reflektiert. Dadurch erhöht sich eigentlich der Pegel, somit ist eine schallabsorbierende Auskleidung der Kapsel von großer Bedeutung. Abgehende Rohre und sonstige Durchführungen müssen schalldicht abgeschlossen werden, sonst erfolgt eine Luftschallübertragung durch diese Undichtigkeiten. Die Körperschallübertragung begrenzt in der Regel die erreichbare Minderung. Die akustischen Eigenschaften kennzeichnen das Einfügungsdämm-Maß - die Differenz des mit und ohne Kapsel gemessenen Schallpegels einer Schallquelle.

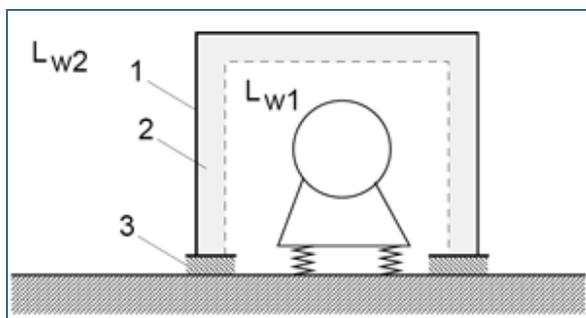


Abb. 49:
Kapsel (1 = Kapselwand,
2 = schallabsorbierende Innenverkleidung, 3 = körperschalldämmende, dichte Auflage) [15]

14.2.4 Entdröhnung von Blechen

Bei Luftwärmepumpen ist insbesondere auch den Luftkanälen genügend Beachtung zu schenken. Da diese einiges größer sind als die anderen Leitungen, lassen sie sich leichter in Schwingung versetzen. Wenn dies zu Problemen führt, sollten die Luftkanalbleche entkoppelt von den Körperschallquellen montiert werden. Vibrierende Bleche muss man zur Ruhe bringen, sie sollten entdröhnt werden.



Abb. 50:
Entdröhnung von Blechen [17]

15 Schallschutzmaßnahmen

Im Folgenden sind Schallschutzmaßnahmen für Luftwärmepumpen aufgelistet, die je nach Situation zu verwirklichen sind:

- **Schallleistungspegel $L_{WA} \leq 50 \text{ dB(A)}$**
- **ausreichende Abstände zu betroffenen Immissionsorten gemäß TA Lärm**
- **abgeschirmte Aufstellung der Luftwärmepumpe**
- **Vermeidung von Reflexionen und Mehrfachreflexionen**
- **Kapselung von Aggregaten**

- **langsam laufende Ventilatoren**
- **Entdröhnung der Luftkanäle**
- **strömungsgünstige Wetterschutzgitter**
- **geringe Strömungsgeschwindigkeiten in den Luftkanälen (größere Luftkanalquerschnitte)**
- **Luftkanalumlenkungen**
- **absorbierende Verkleidungen in Luftkanälen und Lichtschächten**
- **luftwirbelreduzierende Luftkanalgestaltung (laminare Strömung)**
- **Schalldämpfer (Kulissen-, Absorptions-, Resonatorschalldämpfer) in Luftkanälen**
- **Schallschirme, Vorsatzschalen vor Luftöffnungen**
- **Lichtschachteinbauten (Zuluft- und Abluftschächte)**
- **körperschallisolierte Geräteaufstellung einschließlich der Befestigung von Rohren und Blechen**
- **Kompensator-Schlauchleitungen**

16 Zusammenfassung

Die Mehrzahl der Luftwärmepumpen, insbesondere Kompaktgeräte, ist heute zu laut und für die Aufstellung in der Nähe von Wohnhäusern nicht geeignet. Es gibt aber bereits Geräte, die niedrige immissionswirksame Schalleistungspegel von etwa 50 dB(A) emittieren. Schon beim Kauf einer Luftwärmepumpe sollte auf tieffrequente Emissionen und auf einen möglichst niedrigen Schalleistungspegel geachtet werden.

Lärmarm sind vor allem Luftwärmepumpen mit langsam laufenden Ventilatoren. Auch größere, günstig gestaltete Luftkanäle, die die Strömungsgeräusche vermindern, können die Lärmemissionen wirksam reduzieren. Häufig sind der Einbau von Schalldämpfern in die Luftkanäle oder Schalldämpfereinsätze erforderlich.

Bereits bei der Planung und Errichtung sollte darauf geachtet werden, dass die Anlage möglichst auf der zu den Immissionsorten abgewandten Gebäudeseite aufgestellt wird.

Um die Innenpegel zu mindern, sind die Aggregate zu kapseln und schwingungsisoliert aufzustellen. Dies reduziert auch den im Luftstrom nach außen abgestrahlten Lärm. Günstige Verschraubungen, Gummipufferlagerungen, gebogene Schlauchleitungen und entdröhnte Bleche sind weitere mögliche Maßnahmen.

Die vorgenannten Maßnahmen können dazu beitragen, dass der Einsatz von alternativen Energiequellen nicht auf Kosten der Nachbarschaft geht.

17 Literatur

- [1] „Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge“; (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG), vom 15. März 1974 i. d. F. d. Bek. v. 26.09 2002, (BGBl. I S. 3830)
- [2] 6. Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm) vom 26.08.1998, GMBI. 1998, S. 503
- [3] DIN 45680, 03/1997, „Messung und Bewertung tieffrequenter Geräusche in der Nachbarschaft“, mit Beiblatt 1
- [4] DIN ISO 9613-2, 10/1999, „Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien - Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren“
- [5] DIN 45 641, 06/1990, „Mittelung von Schallpegeln“
- [6] DIN EN 61260 [6], 03/2003, „Bandfilter für Oktaven und Bruchteile von Oktaven“
- [7] DIN ISO 226, 04 2006, „Normalkurven gleicher Lautstärkepegel“
- [8] Biogashandbuch Bayern;
<http://www.lfu.bayern.de/abfall/fachinformationen/biogashandbuch/index.htm>
- [9] „Physik und Technik der Lärmbekämpfung“, Kurtze, Schmidt, Westphal, 2. Auflage, Verlag G. Braun Karlsruhe
- [10] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, Internet-Angebot
- [11] Johannes Reichelt (Hrsg.): Wärmepumpen - Stand der Technik, C. F. Müller-Verlag, 2008
- [12] Bayerisches Landesamt für Umwelt: Leitfaden für effiziente Energienutzung, November 2009
- [13] Wärmepumpen-Testzentrum Töss (Schweiz): (Internetbeitrag); (Selidat-Nr. 6128, Bayerisches Landesamt für Umwelt)
- [14] 10. Tagung des BFE-Forschungsprogramms Umgebungswärme: Wärmepumpen - noch effizienter und leiser; S. 33ff: Leisere Luft-Wasser-Wärmepumpen, Hans Rudolf Graf, Fa. Sulzer Innotec (Schweiz), (Internetbeitrag); (Selidat- Nr. 6142, Bayerisches Landesamt für Umwelt)
- [15] Kanton-Zürich: Fachstelle Lärm (<http://www.laerm.zh.de>), ERFA-Seminar 25. Februar 2002, Zur lärmarmen Konstruktion von Wärmepumpenanlagen, K. Baschnagel, EMPA Dübendorf
- [16] Werner Schirmer (Hrsg.), Lärmbekämpfung, Verlag Tribüne Berlin 1989
- [17] Lärmreduktion bei Luft/Wasser-Wärmepumpen, Grundlagen und Maßnahmen (Schlussbericht, November 2002), Hans Rudolf Graf, Fa. Sulzer Innotec (Schweiz), Im Auftrag des Bundesamtes für Energie der Schweiz
- [18] Musterantwort bei Bürgeranfragen des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und des Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie mit Stand vom 20.05.2010
- [19] VDI 2720, Blatt. 3 (Entwurf) „Schallschutz durch Abschirmung im Nahfeld“
- [20] VDI 2711, „Schallschutz durch Kapselung“ (gültig für einen offenen Anteil im Gehäuse von weniger als 10 %)
- [21] „Geräte- und Maschinenlärmschutzverordnung - 32. BImSchV“, vom 29. August 2002

[22] Fa. Wolter GmbH Maschinen- und Apparatebau, 76316 Malsch

[23] Taschenbuch der technischen Akustik, Hrsg. Gerhard Müller, Michael Möser; 3. erweiterte und überarbeitete Auflage; Springer Verlag, 2004

[24] Strömungsakustik in Theorie und Praxis; Dipl.-Ing. HTL Walter Lips; expert verlag, 1995

18 Abbildungen

Abb. 1:	Normalkurven gleicher Lautstärkepegel für reine Töne nach DIN ISO 226 [7], mit den Bewertungskurven A bei 30 dB und C bei 80 dB	8
Abb. 2:	Maximale zulässige Pegel nach DIN 45680 Beiblatt 1 [3] für Tag- und Nachtzeitraum	13
Abb. 3:	Schema einer Biogasanlage aus dem „Biogashandbuch Bayern“, S. 11, [[8]	14
Abb. 4:	Blockheizkraftwerks-Gebäude/Container von Biogasanlagen; Bereich Energieerzeugung	15
Abb. 5:	Typische Konfiguration eines BHKW-Gebäudes; SD: Schalldämpfer	16
Abb. 6:	Geräuschrelevante Komponenten einer Biogasanlage	16
Abb. 7:	Terz- Innenpegel L_{eq} im Gasmotorraum, LfU-Messung	17
Abb. 8:	Summen- Innenpegel L_{eq} im Gasmotorraum, LfU-Messung	18
Abb. 9:	Immissionswirksame Terzschallleistungspegel L_{Weq} von BHKW- Gebäuden, LfU-Messung	18
Abb. 10:	Schallleistungspegel L_{Weq} von BHKW-Gebäuden, LfU-Messung	19
Abb. 11:	Emissionsspektren von BHKW-Gebäuden mit Gasmotoren mit 6 und 8 Zylindern bei 1500 U/min und den dominanten Frequenzen bei 80 Hz und 100 Hz (Anlage C und J), LfU-Messung	20
Abb. 12:	Schallleistungspegel L_{Weq} von Radladern und Teleskopladern beim Beschicken des Substratdosierers, kW-Angaben entsprechen der Motorleistung des Fahrzeugs, LfU-Messung	20
Abb. 13:	Schallleistungspegel L_{Weq} von Traktoren bei der Substrataufnahme im Fahrsilo bzw. Dosiererbeschickung, kW-Angaben entsprechen der Motorleistung des Fahrzeugs, LfU-Messung	21
Abb. 14:	Terz- Schallleistungspegel der Anlage H mit einer elektrischen Leistung von 250 kW, 1 Gasmotor, 6 Zylinder, LfU-Messung	22
Abb. 15:	Für die Biogasanlage H nach DIN ISO 9613-2 berechnete Immissionspegel L_{Zeq} mit der Hörschwellenpegelkurve HS nach DIN 45680 an Immissionsorten in Abständen von 50 – 400 Meter	23
Abb. 16:	An der Biogasanlage H nach TA Lärm gemessene Immissionspegel L_{Zeq} mit der Hörschwellenpegelkurve HS nach DIN 45680 an Immissionsorten in Abständen von 50 – 400 Meter, LfU-Messung	23
Abb. 17:	Überschlägig berechnete Terz-Schallimmissionspegel $L_{eq, Terz, Innen}$ für $f = 80$ Hz im Innenraum bei freier Schallausbreitung	25

Abb. 18: Beispiel für ungedämpfte Abgas-Schalleistungspegel eines 12 Zylinder-Gasmotors bei 370 kW _{eL} , Herstellerangabe; L _{WZ} = 121 dB, L _{WA} = 114 dB(A)	26
Abb. 19: Einfügungsdämpfung von Reflexionsschalldämpfern, Herstellerangabe	27
Abb. 20: Reflexionsschalldämpfer (Pfeil) an einer einmotorigen Biogasanlage	27
Abb. 21: Terz- Schalldruckpegel einer zweimotorigen Biogasanlage mit 530 kW _{eL} in 22 m Entfernung mit alten und neuen Reflexionsschalldämpfern, LfU-Messung	28
Abb. 22: Biogasmotor im Massivgebäude mit schallabsorbierender Wandverkleidung	29
Abb. 23: Kulissenschalldämpfer mit Lamellen an einer Lüftungsöffnung eines BHKW-Gebäudes	30
Abb. 24: Fugendichte Überführung der Abgasleitung vom BHKW-Gebäude ins Freie	30
Abb. 25: Beispiel für einen abgeschirmten Luftkühler am BHKW-Gebäude	30
Abb. 26: Von der Gebäudewand entkoppelte Abgaskamine, Luftkühler befindet sich im Schacht unterhalb des Gitters	31
Abb. 27: Gekapseltes Fermenter-Rührwerk	31
Abb. 28: Beispiel für einen abgeschirmten Substratdosierer	32
Abb. 29: Beispiel für ein BHKW- Gebäude einer Biogasanlage mit geringer Schallemission (L _{WA} 85 dB(A)). Die Schalldämpfergehäuse (Pfeil) sind gekapselt.	32
Abb. 30: Funktionsprinzip der Wärmepumpe [12]	35
Abb. 31: Aufbau einer Luftwärmepumpe und Schallübertragungspfade [14]	36
Abb. 32: Wärmepumpe (Schalleistungspegel laut Datenblatt 62 dB(A))	37
Abb. 33: Stand der Technik bei Luftwärmepumpen	38
Abb. 34: Typisches Frequenzspektrum einer Luftwärmepumpe [14]	38
Abb. 35: Gleichzeitige Innen- und Außenmessung aufgeteilt nach Terzen an einer Luftwärmepumpe	40
Abb. 36: Terzanalyse einer Raum- Innenmessung nach DIN 45680 wegen einer Luftwärmepumpe mit tonhaltigen Frequenzverlauf bei tiefen Frequenzen und Überschreitungen	41
Abb. 37: Rasterberechnung mit Immissionspunkten an zwei Gebäuden (Schallstrahlen grau)	43
Abb. 38: Einfache Vorsatzschale vor einer Öffnung	44
Abb. 39: Absorptionsgrad in Abhängigkeit von der Materialstärke	45
Abb. 40: An- und Umströmung des Ventilators [22]	46
Abb. 41: Eckige Kanalumlenkungen [24]	47
Abb. 42: Möglichkeiten zur Unterteilung des Kanalquerschnitts [16]	48
Abb. 43: Kulissen- und Absorptionsschalldämpfer [15]	49
Abb. 44: Absorptionsresonator [17]	49

Abb. 45: Lichtschächte mit Resonatoren und absorbierender Auskleidung für die Dämpfung [17]	50
Abb. 46: Schallisolierende Lagerung [15]	51
Abb. 47: Kompensator: Schlauchleitung um 270° gebogen [15]	52
Abb. 48: Körperschalldämmung bei der Installation von vibrierenden Rohren [15]	52
Abb. 49: Kapsel (1 = Kapselwand, 2 = schallabsorbierende Innenverkleidung, 3 = körperschalldämmende, dichte Auflage) [15]	53
Abb. 50: Entdröhnung von Blechen [17]	53

