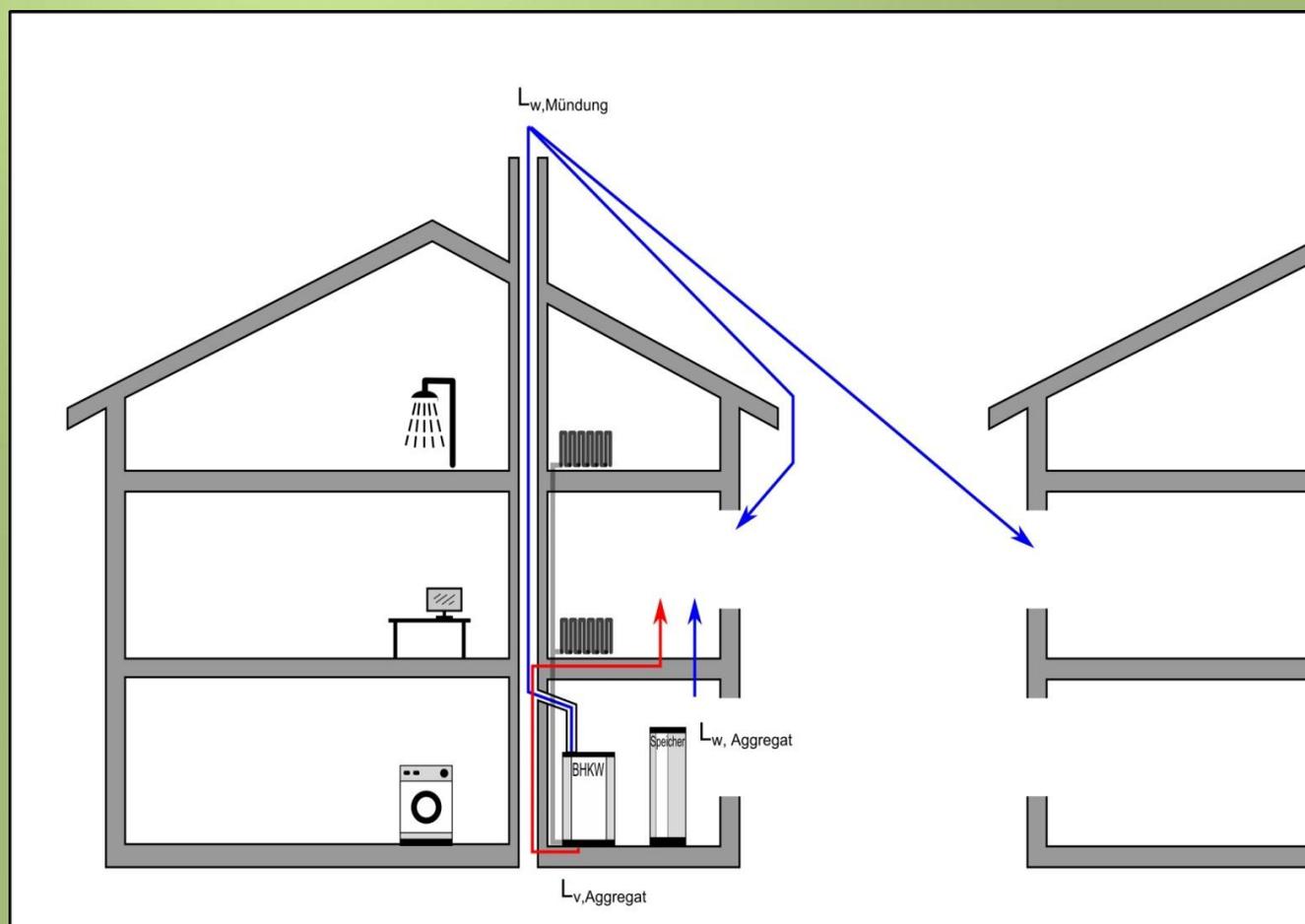


Lärminderung bei Mikro- BHKW (SILENA-Studie)

Schriftenreihe, Heft 8/2014



Stand der Lärminderungstechnik bei Mikro-BHKW (SILENA-Studie)

Jörn Hübelt, Christian Schulze

1	Einleitung	9
1.1	Problemstellung.....	9
1.2	Zielstellung	10
2	Systematisierung von BHKW	10
2.1	Funktionsprinzip	10
2.2	Energieausbeute	11
2.3	Aufstellungsbedingungen	12
2.4	Klassifizierung	13
2.4.1	Elektrische Leistung	13
2.4.2	Brennstoffe	14
2.5	Betriebsregime	15
2.5.1	Nutzung – Haustechnische Anlage oder Betriebsstätte?.....	15
2.5.2	Wirtschaftlichkeit	15
2.5.3	Betriebsarten und Zeitverlauf	15
3	Schallquellen und -ausbreitungspfade.....	17
3.1	Schallquellen	17
3.1.1	Luftschall	17
3.1.2	Körperschall	22
3.2	Schallausbreitungspfade	23
3.2.1	Luftschall	23
3.2.2	Körperschall	23
3.2.3	Schlussfolgerung.....	24
4	Schallemission	25
4.1	Messung und Bewertung der Luftschallemission am Aggregat nach DIN 45635-1/DIN EN ISO 3744.....	25
4.1.1	Messverfahren.....	25
4.1.2	Herangehensweise der Hersteller	28
4.2	Messung und Bewertung der Luftschallemission am Kamin nach DIN 45635-47	29
4.2.1	Messverfahren.....	29
4.2.2	Herangehensweise der Hersteller	30
4.3	Messung und Bewertung der Körperschallemission am Aggregat	31
4.3.1	Prüfstandsmessung.....	31
4.3.2	In situ-Messung	32
5	Schallimmission	32
5.1	BHKW als haustechnische Anlage	32
5.2	BHKW als betriebliche Anlage.....	36
5.2.1	Messung und Beurteilung nach [TA Lärm]	36
5.2.2	Messung und Beurteilung von tieffrequentem Lärm nach DIN 45680	38
5.2.3	Messung und Beurteilung nach LUNG [2009]	41
6	Möglichkeiten der Lärminderung an BHKW	42
6.1	Grundsätzliche Herangehensweise	42
6.2	Abgasschalldämpfer.....	43
6.2.1	Übersicht	43
6.2.2	Auslegung	44
6.2.3	Kommerzielle Schalldämpfersysteme.....	51
6.2.4	Schallausbreitungsszenario als Grundlage zur Auslegung von Schalldämpfern	54
6.2.5	Zusammenfassung	57
6.3	Kapselung	57
6.4	Körperschallisolation	60
6.4.1	Schwingungstechnische Entkopplung des Fundaments vom Aggregat	60

6.4.2	Körperschallentkopplung von Rohren und Leitungen	63
6.5	Trenndecken, Trennwände.....	64
6.6	Einordnung der Maßnahmen	66
7	Zusammenfassung.....	67
	Literatur.....	74

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Funktionsweise eines BHKW	11
Abbildung 2:	Energiefluss innerhalb eines BHKW-Moduls [VOIGT 2006].....	12
Abbildung 3:	Einbindung des BHKW in die Haustechnik.....	12
Abbildung 4:	Zusammenhang zwischen der elektrischen und der thermischen Leistung von BHKW (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben)	14
Abbildung 5:	Einteilung der für den Betrieb von BHKW genutzten Energieträger	14
Abbildung 6:	Exemplarische Betriebsweise eines wärmegeführten BHKW ($P_{el} = 6$ kW) aus BHKW-Forum [2012].....	16
Abbildung 7:	Betriebsweise eines stromgeführten (leistungsvariablen) BHKW ($P_{el} = 2 \dots 4,5$ kW) aus VOIGT [2006]...	17
Abbildung 8:	A-bewerteter Schalldruckpegel gemessen in 1 m Abstand zum Aggregat bzw. zur Abgasmündung ohne oder mit sekundärem Abgasschalldämpfer (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben).....	18
Abbildung 9:	Exemplarische A-bewertete Schalldruckpegelspektren, gemessen in 1 m Abstand zum Aggregat verschiedener BHKW (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers)	18
Abbildung 10:	Exemplarische A-bewertete Schalldruckpegelspektren, gemessen in 1 m Abstand zur Abgasmündung ohne sekundären Abgasschalldämpfer (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers).....	19
Abbildung 11:	A-bewerteter Schalldruckpegel, gemessen in 1 m Abstand zum Aggregat von BHKW mit verschiedenen Motoren (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben).....	21
Abbildung 12:	Mögliche Luftschallübertragungswege	23
Abbildung 13:	Mögliche Körperschallübertragungswege	24
Abbildung 14:	Dominierende Schallübertragungswege.....	25
Abbildung 15:	Exemplarische Messfläche inkl. Mikrofonpositionen bzw. Messpfade; aus DIN EN ISO 3744.....	27
Abbildung 16:	Exemplarische Messfläche inkl. Mikrofonpositionen am Schornstein mit runder Öffnung aus DIN 45635-47	29
Abbildung 17:	Mittlere Schwingschnelle des Fußbodens bei Anregung durch körperschallisoliert aufgestelltes BHKW (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers).....	31
Abbildung 18:	Schematischer Aufbau der Prüfstandsmessung des durch das BHKW eingebrachten Körperschalls in Boden oder Wand.....	32
Abbildung 19:	Links: Charakteristischer spektraler Dämpfungsverlauf verschiedener Schalldämpfer-Typen aus SCHIRMER [1996]; Rechts: Prinzipskizze der einzelnen Schalldämpfer-Typen: a) Absorptionsschalldämpfer, b) Reflexionsschalldämpfer, c) Resonanzschalldämpfer mit Helmholtz- Resonator, d) Resonanzschalldämpfer mit $\lambda/4$ -Resonator in Form eines Tannenbaum-Schalldämpfers	43
Abbildung 20:	Links: Vorhersage der spektralen Durchgangsdämpfung/Einfügungsdämpfung von komplexen Schalldämpfersystemen auf Basis von Netzwerkmodellen mit AFD 8001 – AcoustiCalc [®] der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH; Rechts: Vorhersage der spektralen Übertragungsfunktion eines Schalldämpfers – Vergleich von analytischen (AFD 8001 – AcoustiCalc [®]) und numerischen(FEM) Berechnungsergebnissen	44
Abbildung 21:	Links: Messtechnische Bestimmung der spektralen Durchgangsdämpfung von Schalldämpfern auf Basis des Übertragungsmatrix-Verfahrens mit Hilfe des Transmissionsrohres „AFD 1200 – AcoustiTube [®] “ der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH; Rechts: Vergleich der spektralen Durchgangsdämpfung aus Messung und analytischer Modellierung	45
Abbildung 22:	Grundformen von Absorptionsschalldämpfern aus SCHIRMER [1996]: a) rechteckiger, allseitig ausgekleideter Kanal, b) schlitzförmiger Querschnitt mit schallharten Schmalseiten (Kulissen- Schalldämpfer), c) kreisförmiger Querschnitt (Rohrschalldämpfer).....	45
Abbildung 23:	Links: Mechanisch bearbeitete Metallische Hohlkugelstrukturen (MHKS); Rechts: Einsatz von MHKS innerhalb von Absorptionsschalldämpfern	47
Abbildung 24:	Links: Messergebnisse des Schallabsorptionsgrads von Probekörpern der Dicke 40 mm aus MHKS und Melaminharzschaum; Rechts: Messergebnisse des Schallabsorptionsgrads von	

	unverschmutzten und verschmutzten Probekörpern der Dicke 20 mm aus MHKS für senkrechten Schalleinfall (durchgezogene Linie) und diffusen Schalleinfall (gestrichelte Linie).....	47
Abbildung 25:	Kammer-Schalldämpfer.....	48
Abbildung 26:	$\lambda/4$ -Resonatoren: a) einfache Stichelung b) Tannenbaumresonator c) Rohrschalldämpfer mit Kammern verschiedener Länge	49
Abbildung 27:	Abmessungen Helmholtz-Resonator.....	49
Abbildung 28:	a) Prinzip der Überlagerung von Lärmschallwelle und Antischall im Kanal, b) Resultierendes Schallfeld nach der Überlagerung von Lärmschallwelle und Antischall aus LIPS [2008-1]	50
Abbildung 29:	Exemplarisches A-bewertetes Schalldruckpegelspektrum, gemessen in 1 m Abstand zur Abgasmündung eines BHKW mit 4 kW-Gasmotor ohne/mit sekundären Schalldämpfer und resultierende Einfügungsdämpfung des Schalldämpfers (Datengrundlage: Messergebnisse des BHKW-Herstellers)	51
Abbildung 30:	Exemplarisches A-bewertetes Schalldruckpegelspektrum, gemessen in 1 m Abstand zur Abgasmündung eines BHKW mit 19 kW-Gasmotor ohne/mit sekundärem Schalldämpfer und resultierende Einfügungsdämpfung des Schalldämpfers (Datengrundlage: Messergebnisse des BHKW-Herstellers)	52
Abbildung 31:	Exemplarische spektrale Einfügungsdämpfung kommerziell erwerbbarer Schalldämpfersysteme; DN: Nenndurchmesser in mm; DA: Außendurchmesser in mm; L: Länge in mm (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers, ermittelt unter Laborbedingungen in Anlehnung an DIN EN ISO 7235).....	53
Abbildung 32:	Exemplarische spektrale Einfügungsdämpfung kommerziell erwerbbarer Schalldämpfersysteme; DN: Nenndurchmesser in mm; DA: Außendurchmesser in mm; L: Länge in mm (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers, ermittelt unter Laborbedingungen in Anlehnung an DIN EN ISO 7235).....	53
Abbildung 33:	Exemplarisches Szenario zur Ableitung der erforderlichen spektralen Schalldämpfung eines Schalldämpfers zur Minderung des über den Schlot emittierten Mündungsschalls eines BHKW	54
Abbildung 34:	Lineares Schalldruckpegelspektrum, A-bewerteter Gesamtschalldruckpegel sowie Differenz zwischen C-bewertetem und A-bewertetem äquivalenten Dauerschalldruckpegel in 5 m Abstand zur Mündung des Schornsteins des BHKW; rot: ohne sekundäres Abgasschalldämpfersystem; grün/orange: mit sekundärem Abgasschalldämpfersystem, Richtwerte eingehalten/nicht eingehalten	55
Abbildung 35:	Links: Auslegung eines Abgasschalldämpfersystems bestehend aus zwei Resonanz-Schalldämpfern und einem Absorptionsschalldämpfer durch schalltechnische Modellierung des gesamten Abluftsystems, beginnend beim BHKW (Schallquelle) über die Schalldämpfer und den Schornstein bis zur Schornsteinmündung (schalltechnischer Abschluss), unter realen Betriebsbedingungen; Links: Installation des Schalldämpfersystems zwischen BHKW und 8,2 m langem Schornstein (vgl. Abbildung 34, Variante 1); Rechts: Installation des Schalldämpfersystems zwischen BHKW und 5,1 m langem Schornstein (vgl. Abbildung 34, Variante 2).....	56
Abbildung 36:	Kapselung eines BHKW	57
Abbildung 37:	Möglichkeiten zur isolierten Durchführung einer Rohrleitung durch eine Kapselwand [SCHIRMER 1996]; 1: Kapselwandung bzw. Kapsel aus Stahlblech, 2: Rohrleitung, 3: Formstück aus Gummi oder elastischem Kunststoff, 4: Fasermaterial z. B. Mineral-, Basalt- oder Glaswolle, 5: Gummimanschette	59
Abbildung 38:	Links: Kraftangeregtes Feder-Masse-System; Rechts: Reales Feder-Masse-System.....	60
Abbildung 39:	Theoretisches Einfügungsdämmmaß der Körperschallisolation bei starrem Fundament, $\eta = 0,01; 0,0316; 0,1$ und $0,316$, aus MÖSER [2009].....	61
Abbildung 40:	Beispiele von Federelementen, aus MÖSER [2009]	62
Abbildung 41:	Eingabemodell für die innerhalb der Studie ausgewählte bautechnische Konstellation, Software BASTIAN	64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben)	20
Tabelle 2: Messnormen zur Bestimmung des Schalleistungspegels von Geräuschquellen	25
Tabelle 3: Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung von Bauteilen zwischen besonders lauten und schutzbedürftigen Räumen aus DIN 4109	33
Tabelle 4: Schallschutzwerte der Schallschutzstufen (SSt) in Mehrfamilienhäusern aus VDI 4100	34
Tabelle 5: Schallschutzschutzwerte der Schallschutzstufen (SSSt) in Einfamilien-Doppel- und Einfamilien-Reihenhäusern aus VDI 4100	35
Tabelle 6: Schallschutzwerte für höheren Schallschutz innerhalb von Wohnungen und Einfamilienhäusern aus VDI 4100	35
Tabelle 7: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden nach TA Lärm	37
Tabelle 8: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte innerhalb von Gebäuden nach TA Lärm	37
Tabelle 9: Beurteilungszeiten nach TA Lärm	37
Tabelle 10: Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit nach TA Lärm	37
Tabelle 11: Frequenzabhängiger Hörschwellenpegel L_{HS} aus DIN 45680	39
Tabelle 12: Anhaltswerte für deutlich hervortretende Einzeltöne aus DIN 45680, Bbl. 1	40
Tabelle 13: Korrekturwerte $K_{A,i}$ für A-Bewertung aus DIN 45680, Bbl. 1	40
Tabelle 14: Anhaltswerte ohne deutlich hervortretende Einzeltöne aus DIN 45680	40
Tabelle 15: Beurteilung der Über- bzw. Unterschreitung der Hörschwelle nach LUNG [2009]	42
Tabelle 16: Maximal erreichbare Einfügungsdämmung bei optimalem Wandaufbau in Abhängigkeit von der Fläche der Öffnungen [LIPS 2008-2]	59
Tabelle 17: Berechnung der Normschallpegeldifferenz $D_{nT,w}$, des mittleren Standard-Maximalpegels $L_{AFmax,nT}$ nach DIN EN 12354-1 und der Schalldruckpegeldifferenz $L_{Ceq} - L_{Aeq}$; - rot: Werte nach VDI 4100 ($L_{AFmax,nT}$ siehe Tabelle 4) bzw. TA-Lärm ($L_{Ceq} - L_{Aeq} < 20$ dB) überschritten; - grün: Werte nach VDI 4100 bzw. TA-Lärm eingehalten; - rosa: Werte nach Entwurf DIN 45680 überschritten ($L_{Ceq} - L_{Aeq} < 15$ dB)	65
Tabelle 18: Planungsmaßnahmen Außenlärm	66
Tabelle 19: Planungsmaßnahmen Innenlärm	67

Abkürzungsverzeichnis

ANC	Active Noise Control
BHKW	Blockheizkraftwerk
MHKS	Metallische Hohlkugelstruktur
SSt	Schallschutzstufe

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

In den letzten Jahren kommen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen immer stärker dezentrale Anlagen zum Einsatz. Diese werden in vielen Fällen direkt im Wohngebiet innerhalb von Gebäuden errichtet. Eine Form der Anlagen sind die als Mikro-Blockheizkraftwerk (Mikro-BHKW) bezeichneten Geräte. Diese Klasse der BHKW weist eine für Wohnhäuser ausreichende Heizleistung auf und kann zusätzlich zur Erzeugung von elektrischer Energie herangezogen werden. Die von den Geräten ausgehende tieffrequente Lärmemission könnte von den Anwohnern in unmittelbarer Umgebung als störend wahrgenommen werden. Daher sind grundlegende Untersuchungen zum Einsatz von Mikro-BHKW in Wohngebieten dringend erforderlich.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden von den Herstellern unterschiedliche technische Angaben gemacht. Grundsätzlich sollten im Datenblatt der Geräte neben den thermischen und elektrischen Parametern auch die Schalleistungspegel dokumentiert sein. Hier entsteht oft schon eine große Unsicherheit, weil nicht immer eindeutig zu erkennen ist, unter welchen Betriebsbedingungen diese Werte gelten. Oftmals sind nur die Schalldruckpegel bzw. Summenpegel verfügbar. Eine weitere Unsicherheit kann im Planungsverfahren entstehen, weil auch hier nicht alle für die Schallausbreitung relevanten Randbedingungen im Aufstellungsbereich verfügbar sind.

Für die Lärmessungen vor Ort kann dann die Frage nach dem Betriebszustand oft nicht eindeutig beantwortet werden. Je nach momentaner Anforderung ergibt sich ein vom Betriebsregime abhängiger Schalldruckpegel, der einer weiteren Bewertung unterzogen werden muss. An dieser Stelle sei nochmals besonders auch auf tieffrequente und tonale Anteile im Schalldruckspektrum hingewiesen, die als Dauergeräusch als sehr lästig empfunden werden können.

Für die Planung und Förderung von Mikro-BHKW in Wohngebäuden müssen somit die folgenden Punkte fixiert werden:

- Schalleistungsspektrum in Abhängigkeit von den relevanten Betriebszuständen
- akustische Randbedingungen der geplanten Aufstellung
- Schallausbreitungsbedingungen, Luftschalldämmung der Außen- und Innenbauteile
- Körperschallisolation der Ankopplungen
- Einfügungsdämpfung von Schalldämpfern im Abgasstrang

Für die Beurteilung der Schallabstrahlung vor Ort müssen die folgenden Punkte gelöst werden:

- Betriebsbedingungen, zeitlicher Verlauf
- Aufstellungssituation, Position am Bau
- Anschluss an das Gebäude
- Bewertung der Schalldruck- und Schalleistungspegel

1.2 Zielstellung

Ziel des Vorhabens war die Unterstützung der Strategie des Freistaates Sachsen und des Bundes zur Minderung des Lärms durch Mikro-BHKW. Hierzu sollten folgende Fragestellungen geklärt werden:

- Welche Arten von Mikro-BHKW werden unter welchen Betriebsbedingungen eingesetzt?
- Welche Schallquellen und Schallausbreitungspfade müssen als dominant eingestuft werden?
- Können spezielle Regelungen zur Messung und Beurteilung der Schallemission und Schallimmission von Mikro-BHKW angegeben werden? Wie ist hierbei die gegenwärtige Beurteilungspraxis?
- Gibt es Festlegungen zu maximal zulässigen Geräuschemissionen bzw. -immissionen bei Einsatz in Wohngebieten bzw. in Wohnhäusern?
- Können die für die Bauakustik festgeschriebenen Werte als ausreichend eingestuft werden?
- Welche Maßnahmen zur Lärminderung können bei der Planung von BHKW als besonders effektiv eingestuft werden? Wie ist das Verhältnis von Aufwand und Nutzen einzuschätzen?

2 Systematisierung von BHKW

2.1 Funktionsprinzip

Im Gegensatz zur konventionellen Energieversorgung, bei der Strom- und Wärmeerzeugung getrennt voneinander erfolgen, beruht ein BHKW auf dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung, das eine parallele Erzeugung von Elektrizität und Wärme ermöglicht. Die bei der Stromerzeugung entstehende Abwärme wird direkt vor Ort genutzt und Wärmeverluste werden weitgehend vermieden. Der resultierende Gesamtwirkungsgrad beträgt je nach Anlage durchschnittlich 90 % bei einem elektrischen Wirkungsgrad von ca. 30 % bis 40 % und einem thermischen Wirkungsgrad von ca. 50 % bis 60 % [ASUE 2012] (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben).

BHKW werden in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung in verschiedene Klassen eingeteilt (vgl. Abschnitt 2.4) und anhand ihrer Betriebsweise unterschieden (vgl. Abschnitt 2.5). Die Betriebsweise von BHKW kann wärmegeführt, stromgeführt oder kombiniert sein. Bei der ausschließlich wärmegeführten, der häufigsten Betriebsweise, wird der Betrieb anhand des Wärmebedarfs des Verbrauchers gesteuert. Je nachdem, ob der erzeugte Strom dem Eigenbedarf dient oder zu Teilen in das öffentliche Netz eingespeist wird, erfolgt eine unterschiedliche Bewertung bzgl. der Lärmemission (vgl. Abschnitt 2.5.1).

Zum Betrieb eines BHKW dienen fossile Brennstoffe wie Erdgas oder Diesel, aber auch biogene Energiequellen wie Biogas oder Pflanzenöl (Biodiesel) (vgl. Abschnitt 2.4.2). Diese liegen meist gasförmig oder flüssig vor. Festbrennstoffe wie z. B. Holz sind eher selten und sollen daher hier nicht weiter behandelt werden. Unabhängig von der Größe, der elektrischen und thermischen Leistung, der Betriebsweise und dem verwendeten Brennstoff lässt sich die Funktionsweise eines BHKW anhand von Abbildung 1 grundlegend erläutern.

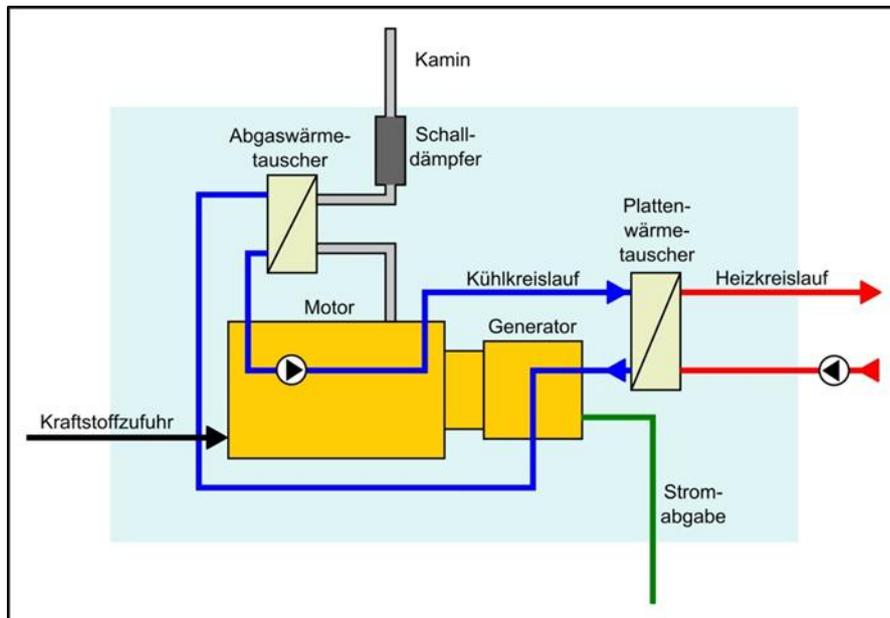


Abbildung 1: Funktionsweise eines BHKW

Der Brennstoff wird durch die Verbrennung im Motor in mechanische und thermische Energie umgewandelt. Der vom Motor angetriebene Generator erzeugt elektrische Energie und einen geringen Anteil an thermischer Energie. Der anfallende Strom steht dem Verbraucher vor Ort zur Verfügung, wobei überschüssiger Strom in der Regel in das öffentliche Netz eingespeist wird.

Zur Ausnutzung der anfallenden Abwärme wird ein BHKW-interner Kühlkreislauf betrieben, dessen thermische Energie ausgekoppelt und genutzt werden kann. Der Motor und häufig auch der Generator werden dabei direkt wassergekühlt, während die im Abgas enthaltene Wärme durch den Abgaswärmetauscher zusätzlich in den Kühlkreislauf eingebracht wird. Im Plattenwärmetauscher wird die Energie dem Heizkreislauf zugeführt, sodass sie als Nutzwärme den angeschlossenen Verbrauchern zur Verfügung steht.

2.2 Energieausbeute

Abbildung 2 veranschaulicht am Beispiel eines erdgasbetriebenen BHKW die Größenordnung der einzelnen Energieflüsse in einem BHKW-Modul. Diese können je nach verwendetem Brennstoff, Motor und Größe des BHKW variieren.

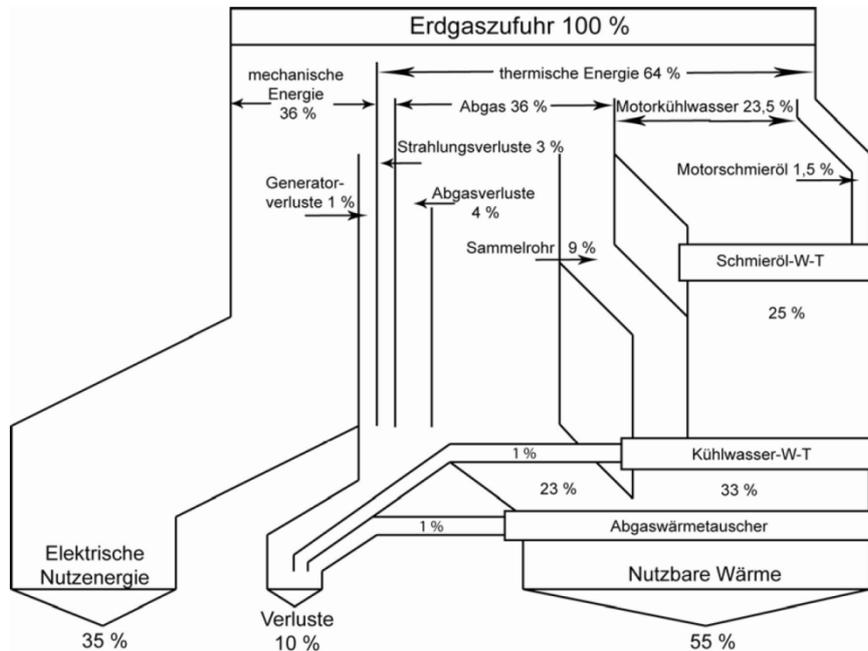


Abbildung 2: Energiefluss innerhalb eines BHKW-Moduls [VOIGT 2006]

Ausgehend von einer Erdgaszufuhr von 100 % werden nach obigem Beispiel 35 % in nutzbare elektrische Energie umgewandelt. Die thermische Energie, die bei der Verbrennung entsteht, kann zu großen Teilen genutzt werden, sodass lediglich 10 % Verluste an nutzbarer Wärme anfallen. Der Gesamtnutzungsgrad bezogen auf den Brennwert der Energiequelle beträgt hier somit 90 %. Bei Großkraftwerken ist hingegen ein Gesamtnutzungsgrad von ca. 55 % zu erwarten [ASUE 2010].

2.3 Aufstellungsbedingungen

Abbildung 3 illustriert den üblichen Standort einer BHKW-Anlage im Kellerraum eines Einfamilienhauses. Sie zeigt die Anbindung des BHKW an den Heizkreislauf mit Anschlüssen an Heizgeräte und Warmwasserspeicher sowie die Ankopplung an die Stromversorgung des Hauses und das öffentliche Stromnetz.

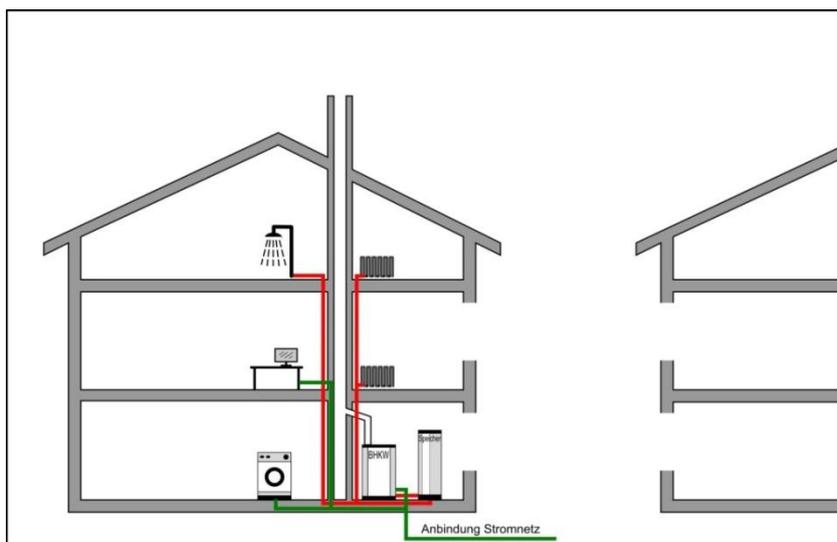


Abbildung 3: Einbindung des BHKW in die Haustechnik

Während der Planung und Installation einer BHKW-Anlage sind umfassende Regularien zu beachten, um einen langjährigen und störungsarmen Betrieb sicherzustellen:

- Für den Aufstellraum sind vorgegebene Mindestabstände von Wänden und Fenstern laut Herstellerangaben einzuhalten.
- Zur Lärminderung gegenüber schutzbedürftigen Räumen (Kinderzimmer, Schlafräume, Unterrichtsräume u. a.) sind die vorgeschriebenen Anforderungen an Bauteile der BHKW-Module und Aufstellräume zu beachten [DIN 4109], [VDI 4100].
- Um Geräuschemissionen gegenüber umliegenden Wohnhäusern zu minimieren, sind Abgas- und Abluftschalldämpfer, ggfs. gemäß vorliegender Schallgutachten, zu dimensionieren und entsprechend einzubauen. Es sollte ein körperschallentkoppelter Einbau eingeplant werden.
- Es ist für ausreichend Frischluftzufuhr zu sorgen, warme Abluft ist abzuführen und staub- und halogenfreie Kühl- und Verbrennungsluft sind sicherzustellen. Abluft-, Kondensat- und Abgasleitungen sind korrekt zu dimensionieren und entkoppelt zu verlegen. Druckprüfungen sind durchzuführen.
- Nach TA Luft sind Anforderungen an die Höhe von Schornsteinen zu beachten.

2.4 Klassifizierung

2.4.1 Elektrische Leistung

Die Einteilung von BHKW erfolgt in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung in kW_{el} . Über die Abgrenzung der einzelnen Klassen liegen jedoch abweichende Informationen vor. Die nachfolgende Unterteilung basiert auf Empfehlungen von [PEHNT 2006] und dem BHKW-Forum e. V. [BHKW-Forum 2012]:

- Nano - BHKW mit einer Leistung von $<2,5 \text{ kW}_{\text{el}}$
- Mikro - BHKW mit einer Leistung von $2,5 \dots 15 \text{ kW}_{\text{el}}$
- Mini - BHKW mit einer Leistung von $15 \dots 50 \text{ kW}_{\text{el}}$

Das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle verwendet hingegen für alle BHKW $\leq 20 \text{ kW}_{\text{el}}$ die Bezeichnung Mini-BHKW [BAFA 2012]. Der Bundesverband für Kraft-Wärme-Kopplung e. V. beschränkt die Klasse der Mikro-BHKW auf $\leq 10 \text{ kW}_{\text{el}}$, während die Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. die BHKW $< 2 \text{ kW}_{\text{el}}$ als Mikro- und diejenigen im Bereich von $2 \dots 15 \text{ kW}_{\text{el}}$ als Mini-BHKW klassifiziert [ASUE 2011-2]. Die vorliegenden Untersuchungen konzentrieren sich überwiegend auf BHKW $\leq 15 \text{ kW}_{\text{el}}$.

Neben der elektrischen Leistung geben BHKW thermische Leistung ab. Anhand von Abbildung 4 lässt sich ein direkter Zusammenhang zwischen der elektrischen und der thermischen Leistung ableiten (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben). Prinzipiell übersteigt die gewonnene thermische Energie deutlich die erzeugte elektrische Energie.

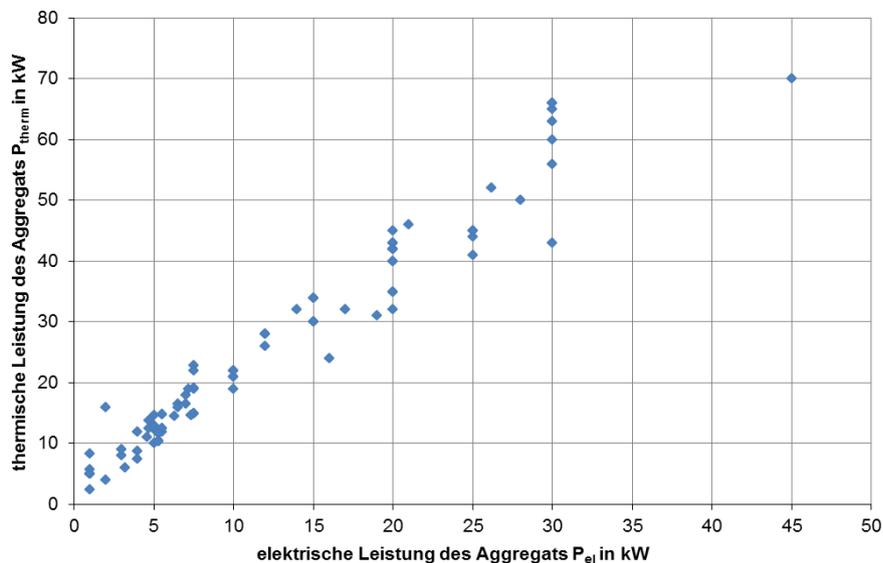


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen der elektrischen und der thermischen Leistung von BHKW (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben)

2.4.2 Brennstoffe

Eine weitere Möglichkeit der Klassifizierung von BHKW ist die Unterscheidung nach verwendetem Energieträger. Abbildung 5 gibt einen grundlegenden Überblick über die Energiequellen, die zum Betrieb einer BHKW-Anlage genutzt werden. Es kommen sowohl fossile als auch biogene (regenerative) Energieträger, jeweils in gasförmiger oder flüssiger Form, zum Einsatz.

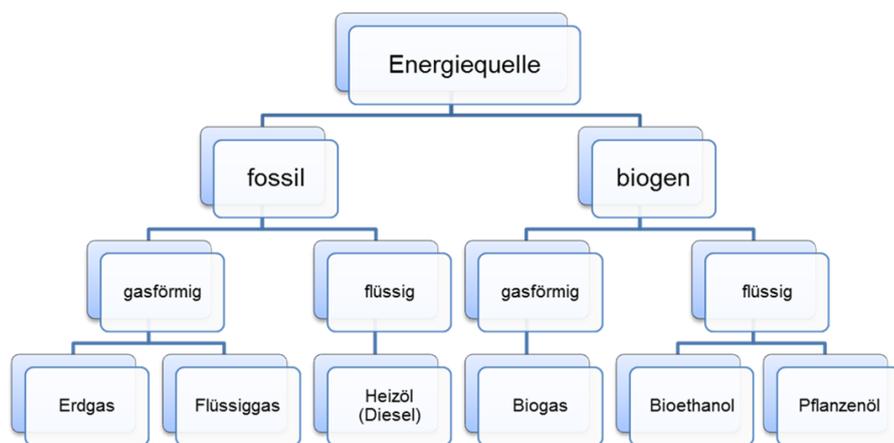


Abbildung 5: Einteilung der für den Betrieb von BHKW genutzten Energieträger

Nach Angaben der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V. [ASUE 2011-1] belief sich der Anteil an Mikro-BHKW, bei denen fossile Brennstoffe (Erdgas, Flüssiggas, Heizöl) genutzt werden, im Jahr 2011 auf 67 %. Dies wird durch die vorliegenden Untersuchungen (69 %) bestätigt. Biogene Brennstoffarten (Biogas, Bioethanol, Pflanzenöl) kommen in 13 % der BHKW zum Einsatz. In 18 % der Fälle können die BHKW sowohl mit fossilen als auch mit biogenen (gasförmigen) Energieträgern betrieben werden (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben).

2.5 Betriebsregime

2.5.1 Nutzung – Haustechnische Anlage oder Betriebsstätte?

Mikro-BHKW werden in den meisten Fällen zur Wärmeerzeugung in Gebäuden eingesetzt (siehe Abschnitt 2.5.3). Bei der Erzeugung der Wärme entsteht zusätzlich elektrische Energie, die nicht durch die im Haus wohnenden Eigner der Anlage verbraucht werden kann. Aus diesem Grund wird die elektrische Energie dem Netz zugeführt oder den Mietern des Hauses zur Verfügung gestellt. In diesem Fall muss das BHKW bezüglich der Beurteilung nach TA Lärm und nach DIN 4109 als Betriebsstätte eingestuft werden. Nur im Fall des ausschließlichen Eigenverbrauches könnte eine Einstufung des Systems als haustechnische Anlage im Sinn der DIN 4109 erfolgen.

2.5.2 Wirtschaftlichkeit

Um wirtschaftlich arbeiten zu können und eine möglichst kurze Amortisationszeit zu gewährleisten, sollte ein BHKW, unabhängig von seiner Betriebsart, eine Mindestzahl an Betriebsstunden im Jahr leisten. Das Mindestmaß von Betriebsstunden pro Jahr wird von den Herstellern zwischen 4.000 und 5.000 Stunden angegeben. Die maximale Wirtschaftlichkeit kann in Abhängigkeit von Leistung und Hersteller aber auch bei über 6.500 Betriebsstunden im Jahr liegen [Buderus 2011-2]. Dies entspricht einer jährlichen Auslastung von ca. 75 %, d. h. mit einer durchschnittlichen Betriebszeit von ca. 18 Stunden pro Tag. Je nachdem wie das BHKW betrieben wird, teilen sich die Betriebsstunden auf die verschiedenen Jahres- und Tageszeiten auf, sodass bei wärmegeführten BHKW der Anteil der täglichen Betriebsstunden z. B. im Winter deutlich größer ist als im Sommer.

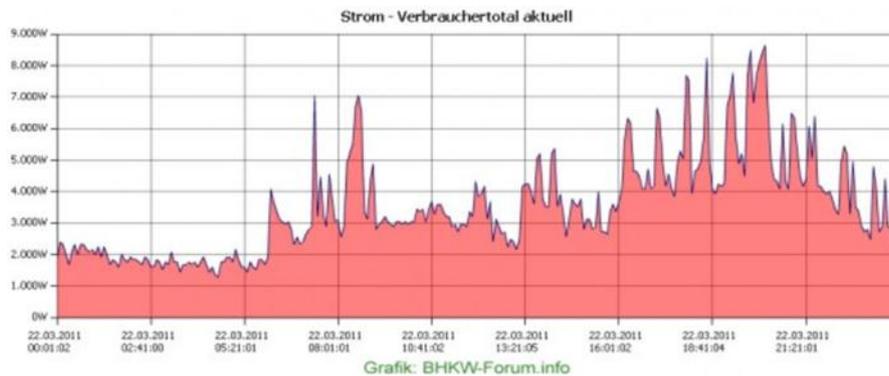
Als grober Richtwert für die Auslegung kann die erforderliche Heizleistung eines BHKW in Prozent zur Spitzenlastheizung des Objektes herangezogen werden. Für eine maximale Wirtschaftlichkeit gibt [Buderus 2011-2] diesen Wert mit 20 % an. BHKW-Info [2012] empfiehlt eine Dimensionierung von 30 %.

2.5.3 Betriebsarten und Zeitverlauf

Wärmegeführter Betrieb

Ein wärmegeführtes BHKW arbeitet heizbedarfsdeckend, d. h. es schaltet sich ein, wenn Wärmebedarf vorhanden ist. Der anfallende Strom wird entweder verbraucht oder ins Netz eingespeist. Vor allem Mikro-BHKW werden häufig wärmegeführt betrieben. Eine sinnvolle Nutzung stellt zum Beispiel das Beheizen von Ein- oder Mehrfamilienhäusern dar. Bei sehr kleinen Anlagen mit einer elektrischen Leistung von 1 kW wird auch von stromerzeugender Heizung gesprochen.

Diese sind vorrangig für den Betrieb in Einfamilienhäusern konzipiert, wobei ein zusätzlicher Brenner zur Deckung des Wärmebedarfs im Winter häufig schon im Gerät integriert ist. Die Taktung der stromerzeugenden Heizung ist höher als bei größeren BHKW, die Anzahl der Betriebsstunden mitunter geringer. Generell lassen sich anhand des berechneten Wärmeverbrauchs die Betriebsstunden vorhersagen. Eine exemplarische Betriebsweise eines Mikro-BHKW mit wärmegeführtem Betrieb ist in Abbildung 6 gezeigt.



Strombezug, Lastgang im Mehrfamilienhaus (8 WHG, 30.000 kWh Jahresverbrauch)
(Grafik: BHKW-Infothek)



Abbildung 6: Exemplarische Betriebsweise eines wärmegeführten BHKW ($P_{el} = 6 \text{ kW}$) aus BHKW-Forum [2012]

Stromgeführter Betrieb

BHKW werden äußerst selten stromgeführt betrieben [ASUE 2012]. Die Regelung richtet sich hierbei ausschließlich nach dem Strombedarf des Verbrauchers. Die dabei anfallende Wärme wird dabei entweder direkt genutzt, gespeichert oder über Notkühler ungenutzt abgeführt. Oft werden stromgeführte BHKW eingesetzt, wenn kein Netzbetrieb möglich ist. Dies wird als sogenannter Inselbetrieb bezeichnet. Der stromgeführte Betrieb ist jedoch erst ab einer gewissen Größe und einem konstanten Strombedarf bei gleichzeitigem Wärmebedarf rentabel. Im Sommer sinkt die Rentabilität deshalb häufig, weil die erzeugte Wärmeenergie nicht ausreichend genutzt werden kann. Abbildung 7 zeigt eine exemplarische Betriebsweise eines stromgeführten BHKW.

Netzgeführter Betrieb

Die Steuerung des Einsatzes mehrerer BHKW durch eine zentrale Stelle (Energieversorger) wird als netzgeführt bezeichnet. Dabei wird die Idee des virtuellen Kraftwerks, auch als Schwarmkraftwerk bezeichnet, aufgegriffen. Mehrere kleine, dezentrale Stromerzeugungseinheiten werden zusammenschaltet und bilden zentral gesteuert einen Verbund mit der Leistung eines Großkraftwerkes. BHKW könnten dabei vor allem zur Spitzenlastdeckung eingesetzt werden.

Im Bereich der Mikro-BHKW gibt es Feldversuche und erste Pilotprojekte großer Energie- und Gasversorger, wie z. B. Vattenfall in Berlin und Hamburg (Projekt: „Virtuelles Kraftwerk“, [Vattenfall 2012]). Sowohl technische Herausforderungen bei der Steuerung und Einbindung der Einzelgeräte als auch die fehlende Bereitschaft von Hausbesitzern, die Steuerung ihrer Anlagen aus der Hand zu geben, verhindern derzeit jedoch den großflächigen Einsatz netzgeführter Mikro-BHKW.

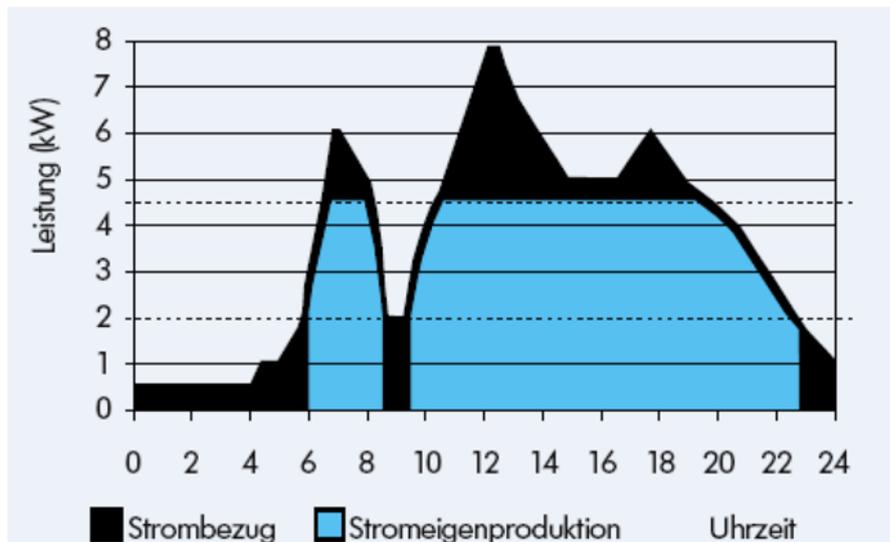


Abbildung 7: Betriebsweise eines stromgeführten (leistungsvariablen) BHKW ($P_{el} = 2 \dots 4,5 \text{ kW}$) aus VOIGT [2006]

3 Schallquellen und -ausbreitungspfade

3.1 Schallquellen

3.1.1 Luftschall

Die im Rahmen dieses Projekts durchgeführten statistischen Erhebungen belegen den in der Literatur angegebenen Zusammenhang zwischen der elektrischen Leistung und der Luftschallemission (Abbildung 8) von BHKW. Hierbei muss zwischen der Schallabstrahlung des Aggregates im Aufstellungsraum und der Schallabstrahlung an der Abgasmündung in die Umwelt unterschieden werden. Abbildung 8 zeigt den A-bewerteten Schalldruckpegel von BHKW in 1 m Abstand (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben). Die recherchierten Schalldruckpegel wurden hauptsächlich am Aggregat gemessen. Wesentlich seltener werden durch die Hersteller Angaben zur gemessenen Schallemission an der Abgasmündung gemacht. Vereinzelt Hersteller geben Daten zur schalltechnischen Wirksamkeit von sekundären Lärm-minderungsmaßnahmen im Abgastrakt an (grüne Kurve). Diese Maßnahmen werden kommerziell meist optional angeboten.

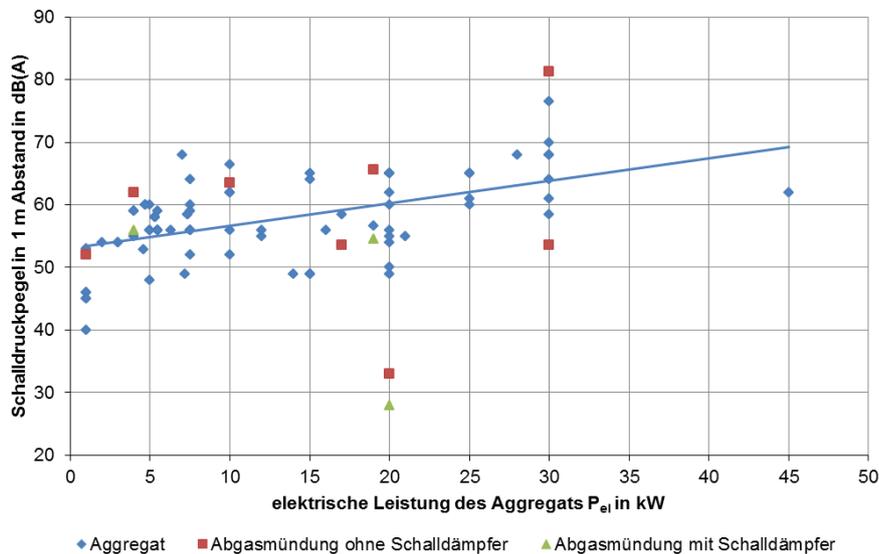


Abbildung 8: A-bewerteter Schalldruckpegel gemessen in 1 m Abstand zum Aggregat bzw. zur Abgasmündung ohne oder mit sekundärem Abgasschalldämpfer (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben)

Aggregat

Der vom Aggregat abgestrahlte Luftschall trägt maßgeblich zur Lärmbelastung innerhalb des Hauses bei, wobei eine Belastung umliegender Immissionsorte nicht ausgeschlossen werden kann. Abbildung 9 zeigt exemplarisch das A-bewertete Schalldruckpegelspektrum verschiedener BHKW mit unterschiedlicher Leistung, gemessen im Abstand von 1 m zum Aggregat (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers). Besonders auffällig sind einzelne tieffrequente Komponenten, die auf die Frequenz der ersten dominanten Ordnung des Motors und deren harmonische Vielfache zurückzuführen sind.

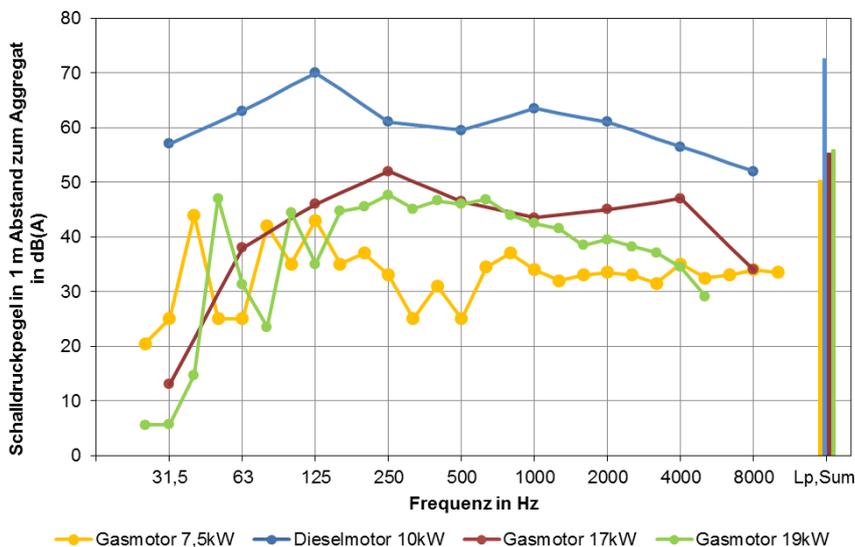


Abbildung 9: Exemplarische A-bewertete Schalldruckpegelspektren, gemessen in 1 m Abstand zum Aggregat verschiedener BHKW (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers)

Abgasmündung

Der Mündungsschall des Abgaskamins kann zur Lärmbelastung der Anwohner der umliegenden Häuser und der Bewohner des eigenen Hauses führen. In Abbildung 10 ist exemplarisch das A-bewertete Schalldruckpe-

gelspektrum verschiedener BHKW gezeigt, das im Abstand von 1 m zur Abgasmündung gemessen wurde (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers). Auch hier sind tieffrequente tonale Komponenten deutlich zu erkennen.

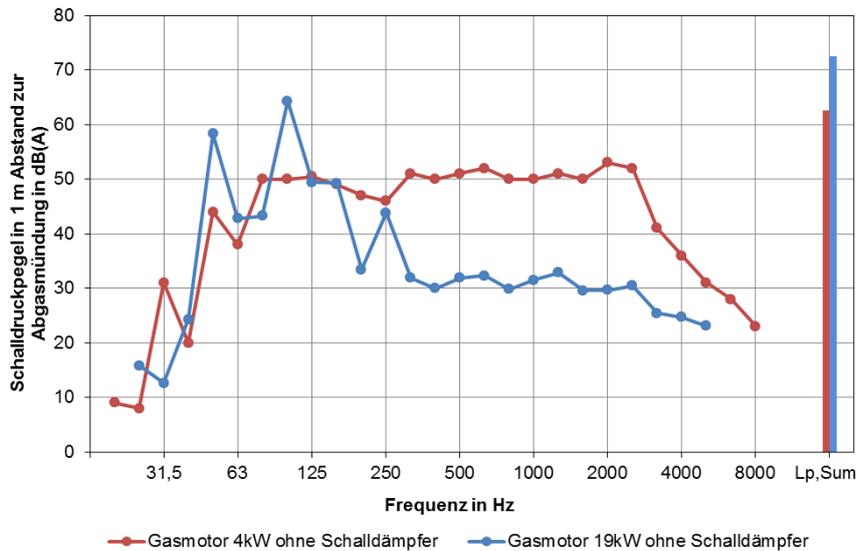


Abbildung 10: Exemplarische A-bewertete Schalldruckpegelspektren, gemessen in 1 m Abstand zur Abgasmündung ohne sekundären Abgasschalldämpfer (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers)

Luftschall verursachende Komponenten eines BHKW

In einem BHKW gibt es mehrere, den Luftschall emittierende Komponenten, die je nach Größe und Bauart des BHKW in ihrer schalltechnischen Leistung variieren. Neben dem Motor mit Generator gibt es weitere optional verbaute Komponenten, die je nach Dimensionierung und Einbau zusätzliche Schallquellen darstellen können:

- Motor mit Generator
- Getriebe, z. B. mit Direktverzahnung
- Ventilator zur Motorkühlung (optional)
- Umwälzpumpe zum Betrieb des Heizkreislaufes (optional)
- Pumpe zum Betrieb des Kühlkreislaufes
- Gebläse zum Ansaugen und Herstellen des Verbrennungsluftgemisches (optional)

Motoren

Der Motor kann bei Mikro-BHKW als Hauptschallquelle eingeordnet werden. Es gibt drei Motortypen, die sich in Aufbau und Funktionsweise, verwendetem Brennstoff, thermischem und elektrischem Wirkungsgrad und ihrer Schalleistung unterscheiden:

- Stirlingmotor
- 4-Takt-Otto-Gasmotor
- 4-Takt-Dieselmotor

In Tabelle 1 sind die Wirkungsgrade der einzelnen Motortypen im Bereich einer elektrischen Leistung von 1 kW bis 15 kW dargestellt (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben). Es ist möglich, den thermischen Wirkungsgrad bzw. den Gesamtwirkungsgrad entweder auf den Brennwert H_S oder den Heizwert H_i eines Brennstoffes zu beziehen. Während der Brennwert H_S die Wärmemenge eines Brennstoffs angibt, die bei der Verbrennung und anschließender Abkühlung auf 25 °C sowie deren Kondensation angibt, ist beim Heizwert H_i die Kondensation des Abgases nicht enthalten. Der Heizwert ist deshalb kleiner als der Brennwert. Wird daher der Wirkungsgrad auf der Basis des Heizwertes berechnet, können somit für diese Größe Werte berechnet werden, die größer als 100 % sind. Nicht alle Hersteller vermerken, ob sie den angegebenen Wirkungsgrad ihrer Produkte auf den Brennwert oder den Heizwert beziehen.

Tabelle 1: Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben)

Kenngroße	Stirlingmotor	Otto-Gasmotor	Dieselmotor
Elektrische Leistung in kW	1	1 ... 15	4 ... 15
Elektrischer Wirkungsgrad in %	12 ... 16	25 ... 35	27 ... 35
Thermischer Wirkungsgrad in %	91 ... 95	54 ... 82	53 ... 67
Gesamtwirkungsgrad in %	107 ... 108	82 ... 109	86 ... 97

Stirlingmotor

Der Stirlingmotor wird in Kleinst-BHKW, auch Nano-BHKW oder elektrische Heizung genannt, verwendet. Die auf dem Markt erhältlichen Produkte werden mit Erdgas betrieben. Ein Stirlingmotor liefert bei einer elektrischen Leistung von $P_{el} = 1$ kW eine vergleichsweise hohe thermische Leistung von ca. $P_{therm} = 5$ kW, die je nach Bedarf durch einen Zusatzbrenner noch erhöht werden kann. Dies macht ein BHKW mit Stirlingmotor für den Gebrauch in Einfamilienhäusern attraktiv. Große Volumenhersteller haben die Testphasen weitestgehend beendet und starten nunmehr die Produkteinführung solcher Geräte.

Stirlingmotoren gelten als besonders geräuscharm [ASUE 2011-2], [DIETSCH 2007], weil im Gegensatz zum konventionellen Verbrennungsmotor keine explosionsartige Verbrennung innerhalb des Arbeitszylinders stattfindet. Durch eine gleichmäßige und kontinuierliche Verbrennung außerhalb des Kolbens ist der Abgasstrom darüber hinaus nahezu frei von Pulsation. Häufig werden an Stirlingmotoren netzsynchrone Generatoren, die direkt gekoppelt sind, verwendet. Der Stirlingmotor wird dabei mit einer konstanten Drehzahl von 3.000 U/min, also bei der Begrenzung von 50 Hz, betrieben. Eine starke Lärmentwicklung aufgrund mechanischer Anregung kann daher bei 50 Hz auftreten, was sich auch als 50 Hz-Brummen oder Netzbrummen beschreiben lässt und sowohl am Gerät selbst als auch an der Abgasmündung wahrnehmbar ist.

4-Takt-Otto-Gasmotor

Der 4-Takt-Otto-Gasmotor ist bei Mikro-BHKW der am häufigsten eingesetzte Motorentyp. Die meisten Produkte benötigen Erdgas. Es werden aber auch Motoren, die mit Flüssiggas arbeiten, angeboten. Allgemein setzt sich das Geräusch beim Verbrennungsmotor aus Verbrennungsgeräusch und mechanischem Geräusch zusammen. Durch die Verbrennung in den einzelnen Zylindern kommt es zu einer periodischen Anregung und Abstrahlung durch die Motorstruktur. Darüber hinaus muss bei der schalltechnischen Auslegung eines BHKW mit 4-Takt-Otto-Gasmotor der Luftschall im Abgastrakt besondere Berücksichtigung finden, weil es sich hierbei um eine tieffrequente Schallemission handelt. Bei 4-Takt-Verbrennungsmotoren lässt sich die Frequenz der ersten dominanten Motorordnung in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Zylinderzahl wie folgt bestimmen:

$$f = \frac{n}{60} \cdot \frac{z}{2} \quad (1)$$

mit:

- f Frequenz der ersten dominanten Motorordnung in Hz
- n Drehzahl in U/min
- z Zylinderanzahl

Weil die meisten Verbrennungsmotoren in BHKW mit konstanter Drehzahl arbeiten, lässt sich die Frequenz der ersten dominanten Ordnung des Motors zuverlässig berechnen. Bei einer Drehzahl von z. B. $n = 1.530$ U/min und einer Zylinderanzahl von $z = 4$ ergibt sich eine Frequenz $f = 51$ Hz. Die Amplitude des Schalldruckpegelspektrums an Stellen der dominanten Motorordnung und der ersten Harmonischen nehmen oft vergleichbare Werte an (vgl. Abbildung 9 und 10).

4-Takt-Diesel-Motor

Im Gegensatz zum 4-Takt-Otto-Gasmotor arbeitet der 4-Takt-Dieselmotor mit Heizöl oder Pflanzenöl. Die erste dominante Motorordnung wird nach Gleichung (1) bestimmt und liegt ebenfalls häufig bei 50 Hz und 100 Hz. Begründet ist dies dadurch, dass im Leistungsbereich bis 15 kW sehr häufig 4-Zylinder-Motoren mit einer festen Drehzahl von $n = 1.500$ U/min verwendet werden. Die im Rahmen der hier vorliegenden Studie erstellte Statistik zeigt, dass Dieselmotoren bei gleicher elektrischer Leistung zum Teil lauter sind als gasbetriebene Otto-Motoren (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben).

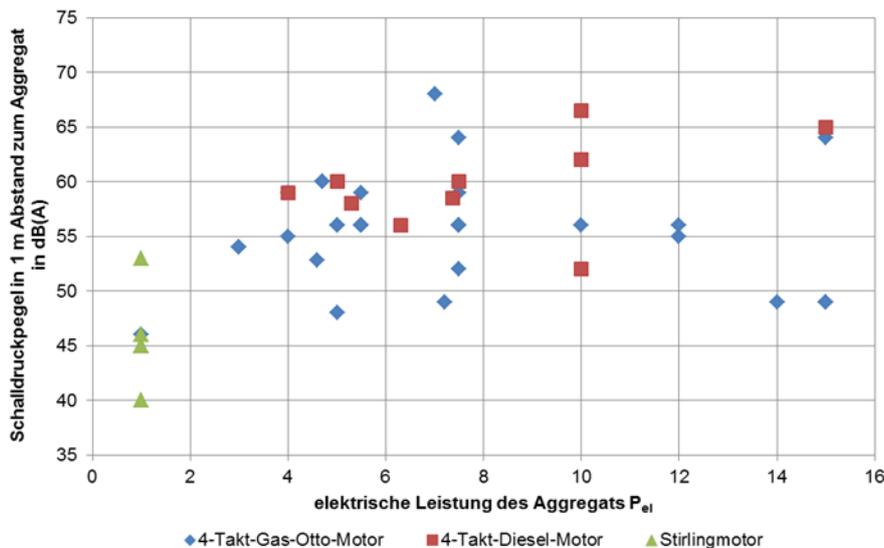


Abbildung 11: A-bewerteter Schalldruckpegel, gemessen in 1 m Abstand zum Aggregat von BHKW mit verschiedenen Motoren (Datengrundlage: innerhalb des Projekts erstellte Datenbank aus Herstellerangaben)

Weitere Luftschall verursachende Komponenten

Jedes BHKW benötigt eine Pumpe zum Betrieb des internen Kühlkreislaufes. Bei BHKW dieser Größenordnung gibt es meist einen Kühlkreislauf, der sowohl den Motor als auch den Abgaswärmetauscher durchläuft. Die Pumpe wird entweder mechanisch oder elektrisch betrieben. Für die eher seltenen Zweikreislaufsystemen, bei denen der Kühlkreislauf für Motor und Abgas getrennt ausgeführt ist, wird eine weitere elektrische Pumpe zum Betrieb des zweiten Kreislaufes verwendet. In jedem Fall handelt es sich hierbei um Kreiselpumpen mit geringer Leistung. In MÖSER [2003] werden Schalleistungspegel von Kreiselpumpen mit einer An-

triebsleistung >1 kW untersucht. Anhand einer Extrapolation der Ergebnisse zu deutlich kleineren Leistungswerten hin kann geschlussfolgert werden, dass die durch die Pumpen emittierte Schalleistung vernachlässigbar klein und somit vernachlässigbar ist.

Eine Umwälzpumpe wird zum Betrieb des Heizkreislaufes benötigt. Sie kann sowohl innerhalb als auch außerhalb des BHKW verbaut sein. In einigen Fällen ist eine Steuerung des BHKW zur Kontrolle der Rücklauf-temperatur vorgesehen. Weil es sich ebenfalls um Kreiselpumpen mit einer Leistung deutlich unter 1 kW handelt, ist die direkte Luftschallabstrahlung nicht problematisch. Voraussetzung ist jedoch der körperschallentkoppelte Einbau (vgl. [MÖSER 2003]), weil sonst Luft- und Wasserschall zu erheblicher Lärmbelästigung führen können.

Ein Ventilator zur Motorkühlung wird dann benötigt, wenn die vorhandene Wasserkühlung des Motors nicht ausreicht, um die Wärme vollständig abzuführen. Dies ist bei Mikro-BHKW jedoch sehr selten der Fall. Bei stromgeführten BHKW wird eine Notkühlung notwendig, wenn das BHKW betrieben werden soll, obwohl kein Wärmebedarf und keine Speichermöglichkeit bestehen (vgl. Abschnitt 2.5.3).

Ein Ventilator kann je nach Größe und benötigter Leistung zur maßgeblichen Lärmquelle werden. Vor allem der strömungsoptimierte Einbau ist bei der Vermeidung unnötiger Lärmquellen entscheidend (vgl. [AFD 2014]). Ein Gebläse zur Ansaugung und Herstellung von Verbrennungsluft kann in einem BHKW mit Stirlingmotor Anwendung finden. Darüber hinaus können Getriebegeräusche auftreten. Dies gilt insbesondere für Getriebe mit Direktverzahnung.

3.1.2 Körperschall

Motor

Der Motor stellt die Hauptkörperschallquelle eines BHKW dar. Die Frequenz der ersten dominanten Motorordnung lässt sich nach Gleichung (1) berechnen. Diese Schwingungen werden nicht nur als Luftschall abgestrahlt, sondern auch auf umliegende Strukturen übertragen. Besonders kritisch ist die Übertragung von Körperschall in das Fundament bzw. die Wand, weil so eine Ausbreitung über Wände und Decken im ganzen Haus stattfinden kann. Außerdem gilt es, das Einbringen von Körperschall auf die Kapselwand und Rohrleitungen zu verhindern. Der Eintrag von Körperschall ist jedoch in den meisten Fällen mit Hilfe einer fachgerechten schalltechnischen Auslegung zu vermeiden (vgl. Abschnitt 6.4).

Pumpen

Neben dem Motor können interne und externe Pumpen Körperschallquellen darstellen. Zum Betrieb des Kühl- und Heizkreislaufes werden meist Kreiselpumpen verwendet (vgl. Abschnitt 3.1.1). Als Hauptkörperschallquellen können die Pulsation und die Strömung der Flüssigkeit eingestuft werden.

3.2 Schallausbreitungspfade

3.2.1 Luftschall

Luftschall kann auf verschiedenen Ausbreitungswegen in das eigene Haus oder in benachbarte Häuser übertragen werden (vgl. Abbildung 12). Wie bereits erwähnt, sind die beiden Hauptquellen für Luftschall die Abgasmündung (Kamin) und das Aggregat selbst. Die häufigere Ursache für eine Lärmbelastigung in der Nachbarschaft ist dabei der Mündungsschall.

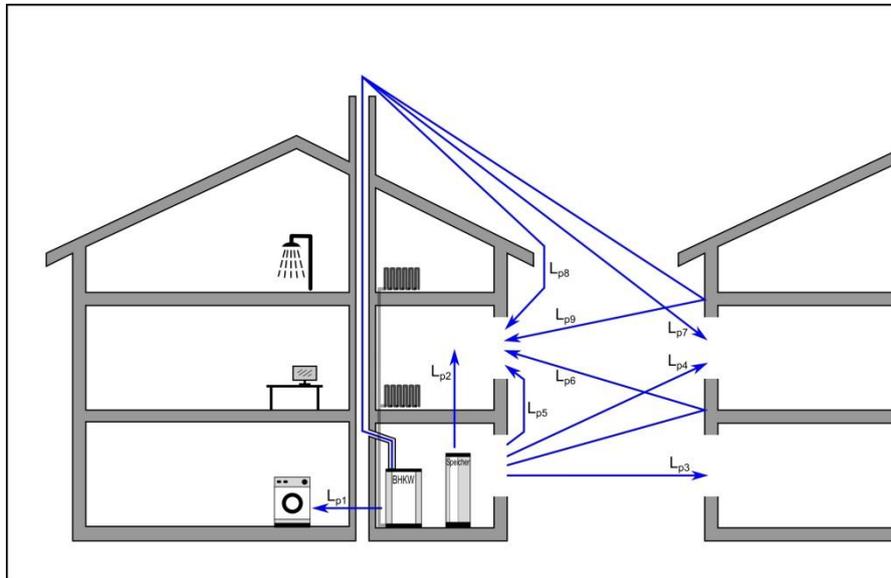


Abbildung 12: Mögliche Luftschallübertragungswege

■ Luftschallübertragung das eigene Haus betreffend:

- L_{p1}, L_{p2} : Übertragung der vom Aggregat emittierten Schalleistung über Decken und Wände
- L_{p5}, L_{p6} : Ausbreitung der vom Aggregat emittierten Schalleistung über Fenster und Ausbreitung zu anderen Fenstern
- L_{p8}, L_{p9} : Übertragung und Abstrahlung der vom Aggregat emittierten Schalleistung über Schornstein und Ausbreitung zu Fenstern

■ Luftschallübertragung das Nachbarhaus betreffend:

- L_{p3}, L_{p4} : Ausbreitung der vom Aggregat emittierten Schalleistung über Fenster und Ausbreitung zu anderen Fenstern
- L_{p7} : Übertragung und Abstrahlung der vom Aggregat emittierten Schalleistung über Schornstein und Ausbreitung zu Fenstern

3.2.2 Körperschall

Im Gegensatz zum Luftschall wird Körperschall fast ausschließlich ins eigene Haus übertragen. Dabei wird der Körperschall des BHKW-Aggregats über die Bodenplatte oder über Anschlussleitungen übertragen. Eine Übersicht der möglichen Körperschallwege in Abbildung 13 gegeben.

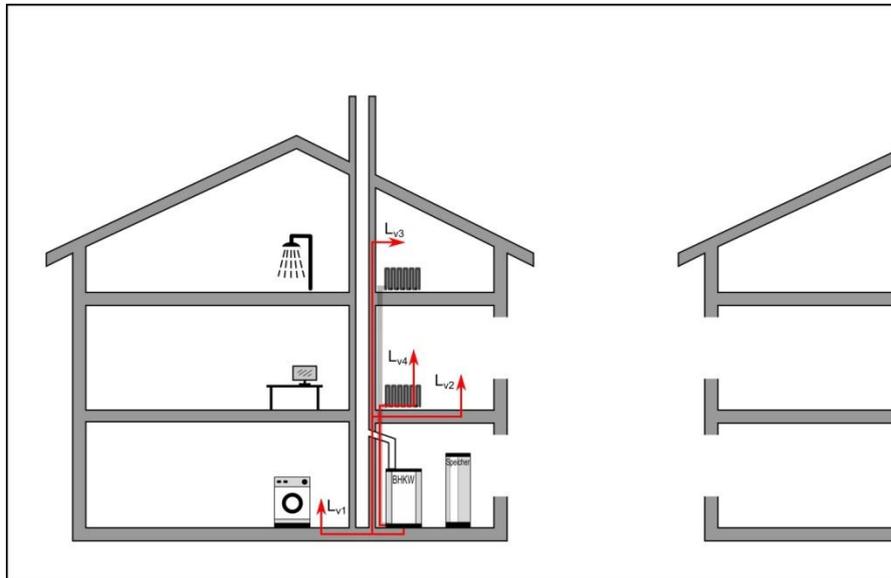


Abbildung 13: Mögliche Körperschallübertragungswege

■ Körperschallübertragung das eigene Haus betreffend:

■ Eintrag der vom Aggregat erzeugten Schwingungen in Fundament

- L_{v1} : Übertragung der eingetragenen Schwingungen über Massivbauteile und Luftschallabstrahlung durch Fundament in benachbarten Räumen
- L_{v2} : Übertragung der eingetragenen Schwingungen über Massivbauteile und Luftschallabstrahlung durch Decke in benachbarten Räumen
- L_{v3} : Übertragung der eingetragenen Schwingungen über Massivbauteile und Luftschallabstrahlung durch Wand in benachbarten Räumen

■ Eintrag der vom Aggregat erzeugten Schwingungen in Rohrleitungen

- L_{v4} : Übertragung der eingetragenen Schwingungen über Rohrleitungen und Luftschallabstrahlung durch Heizkörper und Rohrleitungen in benachbarten Räumen

3.2.3 Schlussfolgerung

Anhand der Erfahrungen dieser Studie lassen sich aus Abbildung 12 und Abbildung 13 drei, die Schallimmission durch BHKW dominierende Schallübertragungswege zusammenfassen.

■ Übertragung der vom Aggregat emittierten Schalleistung über Schornstein

- Abstrahlung von Schalleistung $L_{w,Mündung}$ an der Mündung des Schornsteins
- Schallausbreitung zu Fenstern

■ Eintrag der vom Aggregat erzeugten Schwingungen in Bodenplatte oder Wand

- Erzeugung einer Schwingschnelle $L_{v,Aggregat}$ auf Bodenplatte oder Wand
- Übertragung der eingetragenen Schwingungen über Massivbauteile
- Luftschallabstrahlung durch Massivbauteile in benachbarten Räumen

■ Übertragung der vom Aggregat emittierten Schalleistung $L_{w,Aggregat}$ über Decken und Wände

- Luftschallabstrahlung durch Massivbauteile in benachbarten Räumen

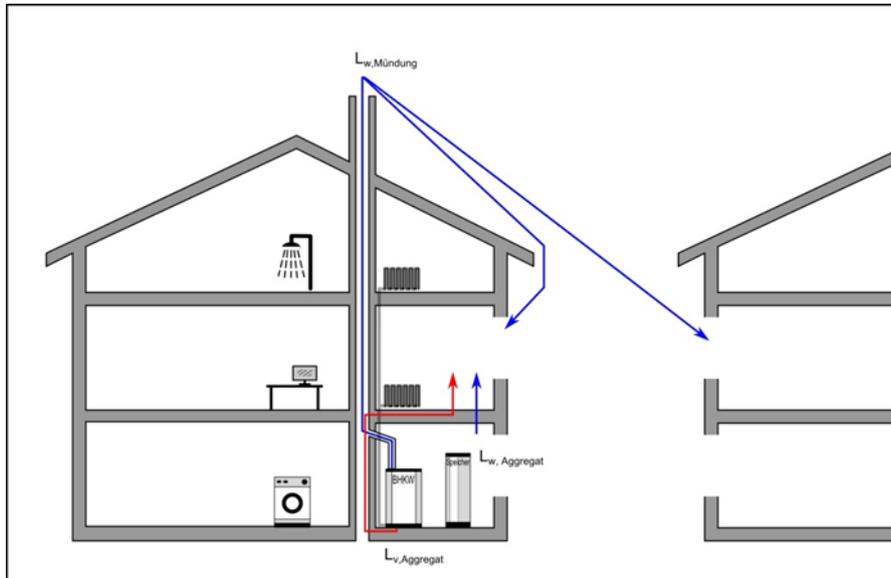


Abbildung 14: Dominierende Schallübertragungswege

4 Schallemission

4.1 Messung und Bewertung der Luftschallemission am Aggregat nach DIN 45635-1/DIN EN ISO 3744

4.1.1 Messverfahren

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die verschiedenen Messverfahren, mit denen die abgestrahlte Schallleistung eines Gerätes ermittelt werden kann.

Tabelle 2: Messnormen zur Bestimmung des Schallleistungspegels von Geräuschquellen

Norm	Genauigkeitsklasse	Messverfahren	Frequenzbereich in Hz
DIN EN ISO 3741	1	Hallraumverfahren	100 ... 10.000
DIN EN ISO 3741-1	2	Vergleichsverfahren	
DIN EN ISO 3743-2	2	Hallraumverfahren	
DIN EN ISO 3744	2		
DIN EN ISO 3745	1	Freifeldverfahren	
DIN EN ISO 3746	3		
DIN EN ISO 3747	2	Vergleichsverfahren	
DIN EN ISO 9614-1	1, 2, 3		50 ... 6.300
DIN EN ISO 9614-2	2, 3	Intensitätsverfahren	
DIN EN ISO 9614-3	1		

BHKW-Aggregate werden hauptsächlich mittels Hüllflächenverfahren nach DIN 45635-1, insbesondere nach DIN EN ISO 3744, vermessen. Im Folgenden wird die wesentliche Vorgehensweise der DIN EN ISO 3744 zur „Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene“ zusammengefasst. Der gültige Frequenzbereich dieses Verfahrens mit einer Standardabweichung von 1,5 dB beträgt 100 ... 10.000 Hz. Es ist hierbei üblich und sinnvoll, den Schalleistungspegel in Terzbändern anzugeben. Demzufolge sind auch die Messungen und alle Zwischenrechnungen in Terzbändern auszuführen.

Die Norm erlaubt die messtechnische Bestimmung der Schalleistung im Freien und auch in geeigneten Räumen für ein im Wesentlichen freies Schallfeld. Die von einer Schallquelle abgestrahlte Schalleistung P ergibt sich aus der Schallintensität \vec{I} , die durch eine die Schallquelle einhüllende Messfläche S hindurchtritt, nach:

$$P = \oint \vec{I} \cdot dS. \quad (2)$$

Befindet sich die Messfläche im Fernfeld der Quelle und ist deren Form so gestaltet, dass die Schallschnelle \vec{v} diese senkrecht durchsetzt, kann die Messung der Schallintensität auf eine Schalldruckmessung an vielen Messpunkten auf der Messfläche nach

$$P = \oint \frac{\tilde{p}^2}{\rho \cdot c} \cdot dS \quad (3)$$

mit:

- \tilde{p}^2 Effektivwert des Schalldruckes in Pa
- $\rho \cdot c$ Schallkennimpedanz der Luft in kg/(m²·s)

zurückgeführt werden. Abbildung 15 zeigt die gemäß DIN EN ISO 3744 im Abstand d um den Bezugsquader des Messobjektes definierte Hüllfläche S und die Positionen der N Mikrofone bzw. der Messpfade zur Bestimmung des Schalldrucks auf der Hüllfläche.

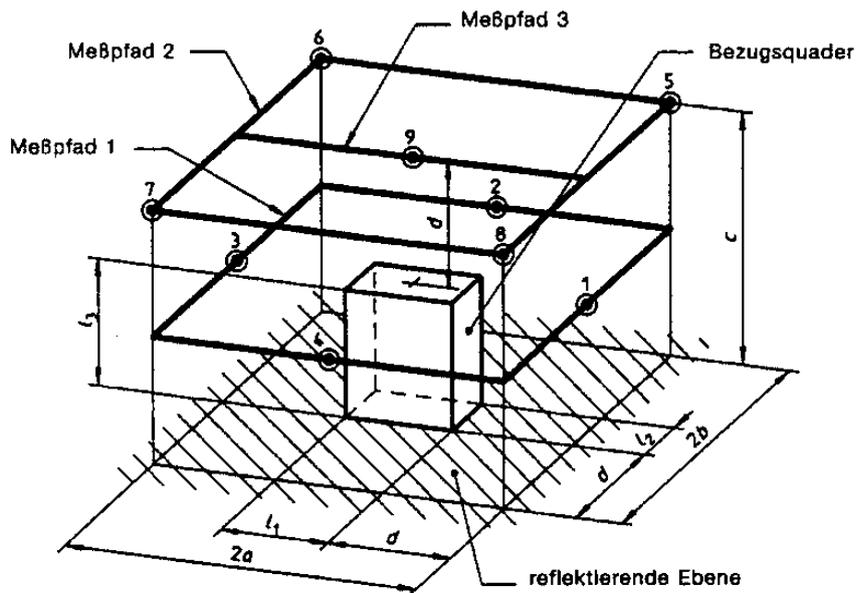


Abbildung 15: Exemplarische Messfläche inkl. Mikrofonpositionen bzw. Messpfade; aus DIN EN ISO 3744

Der über die gesamte Messfläche gemittelte A-bewertete Schalldruckpegel $\overline{L'_{pA}}$ ergibt sich aus der Mittelung der A-bewerteten Schalldruckpegel an den Einzelmikrofonen bei Betrieb der Maschine in definiertem Betriebszustand:

$$\overline{L'_{pA}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L'_{pA,i}}{10}} \right) \text{ dB} \quad (4)$$

mit:

- $L'_{pA,i}$ durch Schallquelle an i -ter Mikrofonposition verursachter A-bewerteter Schalldruckpegel in dB
- N Anzahl der Mikrofonpositionen bzw. Messpfade
- i Nummer der Mikrofonposition bzw. des Messpfades.

Die Messung bei abgeschalteter Maschine ergibt den über die Messfläche gemittelten Fremdgeräuschpegel $\overline{L''_{pA}}$:

$$\overline{L''_{pA}} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L''_{pA,i}}{10}} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

mit:

- $L''_{pA,i}$ Schalldruckpegel durch Fremdgeräusch an i -ter Mikrofonposition/ i -tem Messpfad in dB
- N Anzahl der Mikrofonpositionen/Messpfade
- i Nummer der Mikrofonposition/des Messpfades.

Mittels der Fremdgeräuschkorrektur K_1 und der Umgebungskorrektur K_2 wird aus dem gemittelten Schalldruckpegel $\overline{L'_{pA}}$ ein korrigierter Pegel, der sogenannte Messflächen-Schalldruckpegel

$$\overline{L_{pfA}} = \overline{L'_{pA}} - K_1 - K_2 \text{ dB} \quad (6)$$

berechnet. K_1 ergibt sich aus der Fremdgeräuschmessung zu:

$$K_1 = -10 \cdot \lg \left(1 - 10^{-\frac{\overline{L'_{pA}} - L''_{pA}}{10}} \right) \text{ dB} \quad (7)$$

K_2 resultiert aus der Messumgebung, also den räumlichen Gegebenheiten (Absorptionsvermögen):

$$K_2 = 10 \cdot \lg \left(1 + 4 \cdot \frac{S}{A} \right) \text{ dB} \quad (8)$$

mit:

- S Hüllfläche
- A äquivalente Absorptionsfläche.

Die äquivalente Absorptionsfläche kann mit Hilfe einer Nachhallzeitmessung bestimmt werden. Die Hüllfläche S lässt sich bei einer Aufstellung gemäß Abbildung 15 wie folgt berechnen:

$$S = 4 \cdot (a \cdot b + b \cdot c + c \cdot a) \quad (9)$$

mit:

- a, b, c Abmessungen der Messfläche S in m^2 (vgl. Abbildung 15).

Neben der freien Aufstellung ist auch eine Aufstellung der Maschine vor einer Wand oder in einer Ecke möglich. Die Definition der Hüllfläche erfolgt den Aufstellungsbedingungen entsprechend. Auf der Basis des mittleren Messflächen-Schalldruckpegels $\overline{L_{pfA}}$ und der Hüllfläche S berechnet sich der Schalleistungspegel nach:

$$L_{WA} = \overline{L_{pfA}} + 10 \cdot \lg \frac{S}{S_0} \text{ dB} \quad (10)$$

mit:

- $S_0 = 1 \text{ m}^2$.

4.1.2 Herangehensweise der Hersteller

Die meisten Hersteller geben Werte für den direkt von der Oberfläche der Maschine abgestrahlten Schall an, weil dieser relevant für den Lärmpegel im Aufstellungsraum ist. Bei näherer Betrachtung und beim Vergleich der Herstellerangaben ergeben sich folgende drei Probleme:

- Einige Hersteller machen bei der Beschreibung der Schallpegelwerte ungenaue oder unvollständige Angaben, sodass unklar bleibt, ob es sich bei der Angabe um einen Schalleistungs- oder einen Schalldruckpegel handelt.
- Bei der Darstellung der Messwerte wird z. T. der Einfluss von reflektierenden Flächen und von Quell-Empfänger-Abständen auf den Schalldruckpegel unberücksichtigt gelassen oder deren Berücksichtigung nicht eindeutig gekennzeichnet. Aus diesem Grund ist ein Vergleich von Schalldruckpegelwerten teilweise nur schwer durchführbar.

■ Die Hersteller wenden zur Beurteilung unterschiedliche Messverfahren an. Diese werden jedoch nur in wenigen Fällen klar angegeben. Auf Nachfrage bei den Herstellern ergaben sich vier verschiedene Vorgehensweisen zur Erhebung der Messwerte:

- Messung nach Schalleistungsnorm DIN 45635-1/DIN EN ISO 3744, Angabe des Schalldruckpegels in 1 m Entfernung
- Messung nach Hüllflächenverfahren ohne Verweis auf eine Norm, Angabe des Schalldruckpegels in 1 m Entfernung
- Messung des bezüglich der Hüllfläche maximalen Schalldruckpegels in 1 m Entfernung mit Schallpegelmessgerät (Handgerät)
- Messung des mittleren Schalldruckpegels (Herumgehen) in 1 m Entfernung mit Schallpegelmessgerät (Handgerät)

Sollen die Angaben verschiedener BHKW-Hersteller eindeutig vergleichbar sein, so ist eine einheitliche Messung nach DIN 45635-1/DIN EN ISO 3744 notwendig. Dabei ist es sinnvoll, den quellbezogenen Schalleistungspegel anstatt des Schalldruckpegels in 1 m Entfernung anzugeben.

4.2 Messung und Bewertung der Luftschallemission am Kamin nach DIN 45635-47

4.2.1 Messverfahren

Der durch ein BHKW verursachte Mündungsschall kann mit Hilfe des in DIN 45635-47 beschriebenen Hüllflächenverfahrens zur Messung der Luftschallemission an Schornsteinen erfolgen. Der innerhalb der Norm angegebene Frequenzbereich beträgt 100 ... 10.000 Hz. Analog zum Hüllflächenverfahren an Maschinen werden die Schalldruckpegel L'_{pAi} an der i -ten Position am Schornstein gemessen. Bei Schornsteinen mit runder Öffnung sind hierbei aus Gründen der Symmetrie nur zwei Messpunkte erforderlich. Die Mikrofone sollen seitlich vom Kamin in einem Abstand von 1 m und unter den Winkeln von $70^\circ \leq \vartheta_1 \leq 80^\circ$ und $100^\circ \leq \vartheta_2 \leq 110^\circ$ positioniert werden (vgl. Abbildung 16).

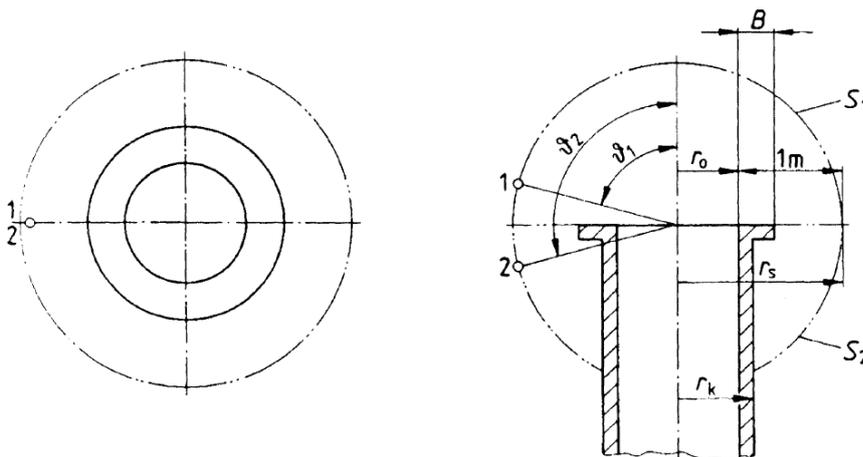


Abbildung 16: Exemplarische Messfläche inkl. Mikrofonpositionen am Schornstein mit runder Öffnung aus DIN 45635-47

Der Messpunkt 1 unter dem Winkel ϑ_1 wird der Teilfläche S_1 , der Messpunkt 2 unter dem Winkel ϑ_2 der Teilfläche S_2 zugeordnet. Die Messflächen berechnen sich wie folgt:

$$S_1 = 2 \pi r_S^2 \quad (11)$$

mit

$$r_S = r_0 + 1 \text{ m} \quad (12)$$

und

$$S_2 = 2 \pi r_S \sqrt{r_S^2 - r_k^2}. \quad (13)$$

Der Fremdgeräuschpegel L'_{pA} soll nicht an denselben Punkten bei ausgeschalteter Maschine ermittelt, sondern einige Meter unterhalb des Schlotes bei eingeschalteter Maschine aufgenommen werden. Die Berechnung der Fremdgeräuschkorrektur K_1 erfolgt wie in Abschnitt 4.1.1, die Umgebungskorrektur K_2 entfällt. Der Messflächen-Schalldruckpegel L_{pAi} der einzelnen Teilfläche S_i berechnet sich nach:

$$L_{pAi} = L'_{pA} - K_1 \text{ dB} \quad (14)$$

Die A-bewerteten Schalleistungspegel der Einzelflächen L_{WAi} ergeben sich anhand von:

$$L_{WAi} = L_{pAi} + 10 \cdot \lg \frac{S_i}{S_0} \text{ dB} \quad (15)$$

mit:

$$S_0 = 1 \text{ m}^2.$$

Der gesamte Schalleistungspegel

$$L_{WA} = 10 \cdot \lg(10^{0.1 \cdot L_{WA1}} + 10^{0.1 \cdot L_{WA2}}) \text{ dB} \quad (16)$$

setzt sich aus den Schalleistungen der beiden Einzelflächen zusammen.

4.2.2 Herangehensweise der Hersteller

Nur sehr wenige der befragten Hersteller geben einen Schalldruckpegel oder eine Schalleistung an der Abgasmündung an. Keiner der befragten Hersteller hat eine Messung nach DIN 45635-47 durchgeführt, sodass die Messergebnisse nur bedingt vergleichbar sind. Darüber hinaus sind einige Hersteller der Meinung, dass das emittierte Geräusch sehr leise sei, und dementsprechend nicht angegeben werden müsse. Einen messtechnischen Beleg für eine solche Aussage hat keine der angesprochenen Firmen liefern können.

Der Mündungspegel ist jedoch die entscheidende Größe in Bezug auf die Schallemission eines BHKW in die umliegende Nachbarschaft. Messergebnisse könnten mit Hilfe einer Schalleistungsmessung am Schornstein in Anlehnung an das in DIN 45635-47 beschriebene Messverfahren verglichen werden. Dazu ist zu prüfen, ob der nach der Norm festgelegte Messabstand von 1 m ausreichend ist, um auch bei tiefen Frequenzen die Abstrahlung der Schalleistung in Form einer Fernfeldmessung zu gewährleisten.

Des Weiteren müsste ein standardisierter Abgaskamin, dessen Verlauf und Länge klar definiert sind, eingeführt werden. Ebenso sollte eine Position für den nachträglichen Einbau von Schalldämpfern definiert werden. Dies würde die Vergleichbarkeit der bei der Beurteilung der Schallemission von BHKW gewonnenen Ergebnisse gewährleisten.

4.3 Messung und Bewertung der Körperschallemission am Aggregat

4.3.1 Prüfstandsmessung

Um den Körperschalleintrag eines BHKW auf Wände und Decken des Gebäudes zu bestimmen, ist es notwendig, die Schwingungen auf der das BHKW tragenden Bodenplatte messtechnisch zu bestimmen.

Abbildung 17 zeigt exemplarisch die durch ein körperschallisoliert aufgestelltes BHKW erzeugten Schwingungen einer Bodenplatte. Hierbei wurde ein über die Bodenplatte gemittelter Effektivwert der Schwingschnelle von ca. $1,5 \mu\text{m/s}$ im Terzband von 100 Hz ermittelt. Deutlich erkennbar ist dabei die Übertragung der dominanten Motorordnungen auf die Bodenplatte. Wird nunmehr die Bodenplatte als biegesteif und aufgestützt angenommen und eine Fläche der Bodenplatte von 10 m^2 vorausgesetzt, kann im Terzband von 100 Hz ein Wert für die nur von der Bodenplatte abgestrahlte Schalleistung von ca. 40 dB abgeschätzt werden.

Sollen die Messungen verschiedener BHKW-Hersteller vergleichbar gemacht werden, wäre es erforderlich, die Aufstellung des BHKW, den Messaufbau und die Beschaffenheit des Fundaments mit der dazugehörigen Bodenplatte zu definieren. Denkbar ist ein standardisierter Messaufbau. Aus diesem Grund sollen an dieser Stelle einige Festlegungen vorgeschlagen werden (Abbildung 18):

Die Beschaffenheit, das Gewicht und die Abmessungen der auf dem Fundament befindlichen Bodenplatte müssen klar definiert sein. Sinnvoll ist es, eine „Norm-Bodenplatte“ festzulegen, die der Normung in der Bauakustik entspricht. Das BHKW sollte für die Messung mit den im Lieferumfang enthaltenen Schwingungsisolatoren aufgestellt werden. Des Weiteren muss die Anzahl und die Position der Sensoren definiert werden, wobei hier vor allem einer körperschallenergieproportionalen Messung Rechnung getragen werden sollte. Ähnliche Festlegungen und Definitionen wären für wandmontierte BHKW (Abbildung 18) zu treffen. Eine Bestimmung von zulässigen Maximalwerten der von BHKW eingetragenen mittleren Schwingschnelle könnte auf Grundlage von Messungen und genaueren Untersuchungen im Gebäude stattfinden.

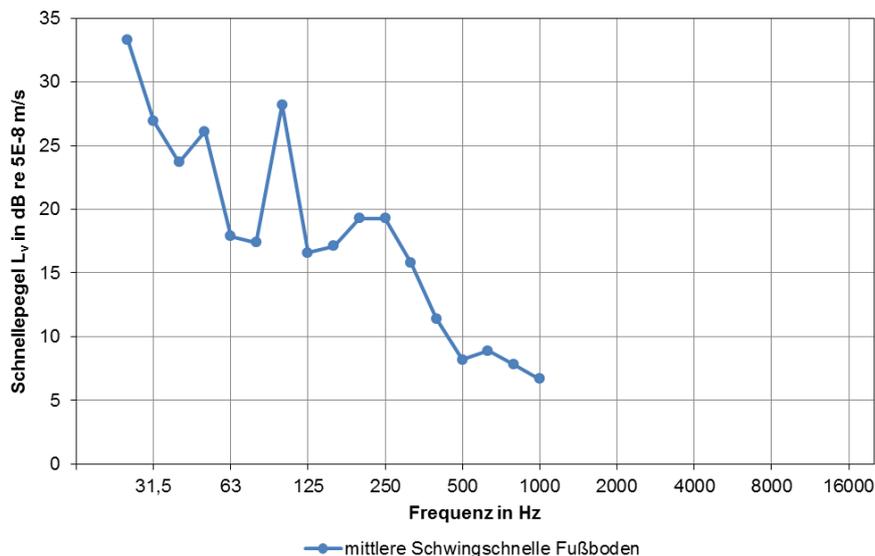


Abbildung 17: Mittlere Schwingschnelle des Fußbodens bei Anregung durch körperschallisoliert aufgestelltes BHKW (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers)

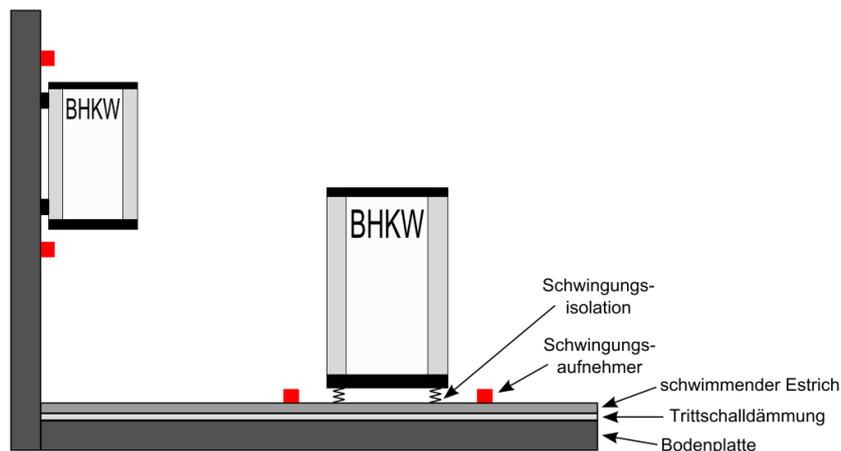


Abbildung 18: Schematischer Aufbau der Prüfstandsmessung des durch das BHKW eingebrachten Körperschalls in Boden oder Wand

4.3.2 In situ-Messung

Soll bei einem bereits installierten BHKW der Einfluss der Körperschallemission auf den in den angrenzenden Raum abgestrahlten Luftschall bestimmt werden, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Messung der Luftschallemission im angrenzenden Raum bei Betrieb des BHKW
- Aufzeichnung des vom BHKW emittierten Geräusches im Senderraum
- Betrieb einer künstlichen, körperschallentkoppelt aufgestellten Schallquelle im Senderraum mit aufgezeichnetem Geräusch bei gleichzeitiger Messung der Luftschallemission im angrenzenden Empfangsraum. Während der Messung soll der Schalldruckpegel im Senderraum dem Schalldruckpegel bei Betrieb des BHKW entsprechen.

5 Schallimmission

5.1 BHKW als haustechnische Anlage

Treten innerhalb von Gebäuden Luftschall- oder Körperschallübertragungen auf, so waren zumindest bis zu den BGH-Urteilen aus den Jahren 2007 [BGH 2007] und 2009 [BGH 2009] die in DIN 4109 festgelegten Schalldämmmaße und Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen einzuhalten (vgl. [VDI 4100-z2]). Auf der Basis der Urteile sollten nunmehr in den letzten Jahren die Mindestanforderungen über die Schallschutzstufen II und III der VDI 4100-z1 aus dem Jahr 1994 und einer Novellierung aus dem Jahr 2007 [VDI 4100-z2] abgeleitet werden. In unterschiedlichen Abhandlungen wurde seitdem die Unsicherheit über die Festlegung verbindlicher Schallschutzwerte diskutiert, z. B. JANSEN [2010] oder WOLFF [2012]. Im Jahr 2012 ist die VDI 4100 nochmals einer Novellierung unterzogen worden. Eine wesentliche Neuerung stellt hierbei die Einführung neuer Beurteilungsgrößen dar. Waren in der bisherigen VDI bauteilspezifische Größen wie z. B. R'_w zur Beurteilung heranzuziehen, werden nunmehr auf die Nachhallzeit bezogene Schalldruckpegeldifferenzen zur Beurteilung der schalltechnischen Situation zugrunde gelegt. Darüber hinaus wurde der Begriff schutzbedürftiger Raum auf alle Räume mit einer Grundfläche größer als 8 m^2 ausgeweitet. Die Verwendung von Schalldruckpegeldifferenzen wird auch im Normentwurf für DIN 4109 aus dem Jahr 2006 verfolgt. Wesentliche Motivation für den Übergang von bauteilbezogenen Größen zu Schalldruckpegeldifferenzen ist die gewünschte Berücksichtigung der Größe eines trennenden Bauteils. So ist unter der Voraussetzung einer konstanten

Intensität (diffuses Schallfeld) im Empfangsraum der Eintrag an Schallenergie in den schutzbedürftigen Raum direkt proportional zur Größe der Fläche des trennenden Bauteils. Durch die Neudefinition der Bewertungsgrößen ergibt sich für die Schalldämmung eine Verschärfung des Anforderungsniveaus für Räume mit einer Raumtiefe kleiner 3,1 m. Für Installationspegel wird das Niveau für Raumvolumina von kleiner als 30,7 m³ verschärft. In WOLFF [2012] wurden hierzu Berechnungen zur Abschätzung der zu erwartenden Verschärfung für typische Raumgrößen gemacht. Für die Schalldämmung ergab sich dabei eine Erhöhung von ca. 1 ... 3 dB, die Anforderungen an den Installationspegel steigen maximal um 2 dB.

Werden BHKW als haustechnische Anlage betrieben (vgl. Abschnitt 2.5.1), waren bisher die Werte nach DIN 4109 bindend. Die Anforderungen in Tabelle 3 wurden im Allgemeinen eingehalten (mittlerer Maximalpegel kleiner 25 dB(A)), wenn die zusätzlich in DIN 4109 definierten Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung von Bauteilen zwischen besonders lauten und schutzbedürftigen Räumen gemäß Tabelle 3 eingehalten waren. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Anforderungen auf Lärmquellen basierten, deren Hauptschallemission oberhalb von 100 Hz auftritt. Dies ist nach Angaben der Hersteller und den Erfahrungen der hier durchgeführten Untersuchungen für BHKW nicht der Fall (Abbildung 9).

Die innerhalb der Studie von den Herstellern angegebenen Werte für den Schalldruckpegel in 1 m Entfernung vom BHKW (Aggregat) im Freifeld über reflektierender Ebene (Abbildung 11) sind kleiner als 70 dB(A). Aus dem Zusammenhang zwischen Schalleistung und Schalldruckpegel im Freien und im diffusen Schallfeld lässt sich ein Schalldruckpegel im Hausanschlussraum (fiktiver Aufstellungsort des BHKW) von ca. 75 dB(A) abschätzen. Dabei wurde unterstellt, dass die äquivalente Absorptionsfläche in etwa der Grundfläche des Raumes entspricht (3 dB Minderung). Für die Schalldämmung nach DIN 4109 wäre somit ein Wert nach Tabelle 4, Zeile 2, Spalte 3 von $R'_w = 57$ dB gefordert. Dies übersteigt die Anforderung an eine normale Wohnungstrennendecke nach dieser Norm. Es muss darüber hinaus davon ausgegangen werden, dass ein trennendes Bauteil, trotz Einhaltung des geschuldeten Schalldämmwertes, bei tiefen Frequenzen (30 Hz bis 80 Hz) einen zu geringen Wert der Schalldämmung aufweisen könnte.

Tabelle 3: Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung von Bauteilen zwischen besonders lauten und schutzbedürftigen Räumen aus DIN 4109

Art der Räume	Bauteile	Bewertetes Schalldämm-Maß für Schalldruckpegel $L_{AF} = 75 \dots 80$ dB(A)	Bewertetes Schalldämm-Maß für Schalldruckpegel $L_{AF} = 81 \dots 85$ dB(A)	Bewerteter Normtrittschallpegel erf. $L'_{n,w}{}^{1,2}$ (Trittschallschutzmaß erf. TSM)
Räume mit besonders lauten haustechnischen Anlagen oder Anlageteilen	Decken, Wände	57 dB	62 dB	-
	Fußböden	-	-	43 ³ (20) ³ dB
Betriebsräume von Handwerks- und Gewerbebetrieben; Verkaufsstätten	Decken, Wände	57 dB	62 dB	-
	Fußböden	-	-	43 ³ (20) ³ dB

¹ jeweils in Richtung der Lärmausbreitung

² Die für Maschinen erforderliche Körperschalldämmung ist mit diesem Wert nicht erfasst; hierfür sind ggf. weitere Maßnahmen erforderlich. Ebenso kann je nach Art des Betriebes ein niedrigeres erf. $L'_{n,w}$ (beim Trittschallschutzmaß ein höheres erf. TSM) notwendig sein, dies ist im Einzelfall zu überprüfen.

³ Nicht erforderlich, wenn geräuscherzeugende Anlagen ausreichend körperschallgedämmt aufgestellt werden

Mit Bezug auf die bereits erwähnten BGH-Urteile werden spätestens seit Oktober 2012 in VDI 4100 neue Richtwerte nach den Schallschutzstufen II und III empfohlen, die in Tabelle 4 bis Tabelle 6 zusammengefasst dargestellt sind. Je nach Schallschutzstufe können hier bei der Beurteilung von Einfamilien-Doppel- und Einfamilien-Reihenhäusern Werte für den mittleren Standard-Maximalpegel von 25 dB(A) oder 22 dB(A) gefordert sein (vgl. Tabelle 6). Für die Schalldruckpegeldifferenz $D_{nT,w}$ können nach Tabelle 6 Werte von bis zu 73 dB geschuldet sein. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die nach VDI 4100 geforderten Werte nicht für tieffrequenten Lärm nach DIN 45680 gelten. Ein BHKW wird jedoch nur in den seltensten Fällen ausschließlich als haustechnische Anlage betrieben werden (vgl. Abschnitt 2.5.1). Aus diesem Grund sind, wie im folgenden Kapitel beschrieben, die Anforderungen nach TA Lärm mit Bezug auf die DIN 45680 zur Beurteilung eines BHKW heranzuziehen.

Grundlegend muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass für den Einsatz eines BHKW innerhalb von Gebäuden hohe Anforderungen an das Schalldämmmaß der trennenden Bauteile gemacht werden. Bei der Planung eines Gebäudes sollte der Einsatz eines BHKW vorzeitig Berücksichtigung finden.

Tabelle 4: Schallschutzwerte der Schallschutzstufen (SSt) in Mehrfamilienhäusern aus VDI 4100

Schallschutzkriterium			Kennzeichnende akustische Größe in dB	SSt I	SSt II	SSt III
Luftschallschutz	Mehrfamilienhaus		$D_{nT,w}$	≥ 56	≥ 59	≥ 64
Luftschallschutz	Mehrfamilienhaus	Treppenraumwand mit Tür	$D_{nT,w}^1$	≥ 45	≥ 50	≥ 55
Trittschallschutz	Mehrfamilienhaus	vertikal, horizontal oder diagonal	$L'_{nT,w}^2$	≤ 51	≤ 44	≤ 37
Gebäudetechnische Anlagen (einschließlich Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen gemeinsam)	Mehrfamilienhaus		$L_{AFmax, nT}^3$	≤ 30	≤ 27	≤ 24
Luftschallschutz gegen Außenlärm in schutzbedürftigen Räumen	Mehrfamilienhaus		res. R'_w ⁶ (res. $D_{nT,w}$) ⁵	4	4	4

¹ Die Empfehlungen beziehen sich auf den Schallschutz vom Treppenraum zum nächsten Aufenthaltsraum; wohnungsinterne Türen dürfen im Falle eines dazwischen liegenden Raums mit einem pauschalen Normschallpegeldifferenz-Abschlag von 10 dB berücksichtigt werden.

² gilt auch für die Trittschallübertragung von Balkonen, Loggien, Laubengängen und Terrassen in fremde schutzbedürftige Räume

³ Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen, die beim Betätigen (Öffnen; Schließen, Umstellen, Unterbrechen u. Ä.) der Armaturen und Geräte der Wasserinstallation entstehen, sollen die Kennwerte der SSt II und SSt III um nicht mehr als 10 dB übersteigen. Dabei wird eine bestimmungsgemäße Benutzung vorausgesetzt.

⁴ siehe Regelungen in DIN 4109: 1989-11, Abschnitt 5

⁵ ohne Korrektur nach DIN 4109: 1989-11, Abschnitt 5.2., Tabelle 9

⁶ mit Bezug auf Außenbauteile, die aus mehreren Teilflächen unterschiedlicher Schalldämmung bestehen

Tabelle 5: Schallschutzschutzwerte der Schallschutzstufen (SSt) in Einfamilien-Doppel- und Einfamilien-Reihenhäusern aus VDI 4100

Schallschutzkriterium			Kennzeichnende akustische Größe in dB	SSt I	SSt II	SSt III
Luftschallschutz	Einfamilien-, Doppel- und Einfamilien-Reihenhäuser		$D_{nT,w}$	≥ 65	≥ 69	≥ 73
Trittschallschutz	Einfamilien-, Doppel- und Einfamilien-Reihenhäuser	horizontal diagonal	oder $L'_{nT,w}$ ¹	≤ 46	≤ 39	≤ 32
Gebäudetechnische Anlagen (einschließlich Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen gemeinsam)	Einfamilien-, Doppel- und Einfamilien-Reihenhäuser		$L_{AFmax,nT}$ ²	≤ 30	≤ 25	≤ 22
Luftschallschutz gegen Außenlärm in schutzbedürftigen Räumen	Einfamilien-, Doppel- und Einfamilien-Reihenhäuser		res. R'_w ⁵ (res. $D_{nT,w}$) ⁴	3	3	³ +5 dB

¹ gilt auch für die Trittschallübertragung von Balkonen, Loggien, Laubengängen und Terrassen in fremde schutzbedürftige Räume

² Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen, die beim Betätigen (Öffnen; Schließen, Umstellen, Unterbrechen u. Ä.) der Armaturen und Geräte der Wasserinstallation entstehen, sollen die Kennwerte der SSt II und SSt III um nicht mehr als 10 dB übersteigen. Dabei wird eine bestimmungsgemäße Benutzung vorausgesetzt.

³ siehe Regelungen in DIN 4109: 1989-11, Abschnitt 5

⁴ ohne Korrektur nach DIN 4109: 1989-11, Abschnitt 5.2., Tabelle 9

⁵ mit Bezug auf Außenbauteile, die aus mehreren Teilflächen unterschiedlicher Schalldämmung bestehen

Tabelle 6: Schallschutzschutzwerte für höheren Schallschutz innerhalb von Wohnungen und Einfamilienhäusern aus VDI 4100

Schallschutzkriterium			Kennzeichnende akustische Größe in dB	SSt EB I	SSt EB II
Luftschallschutz	Horizontal (Wände ohne Türen) und vertikal		$D_{nT,w}$	48	52
Luftschallschutz	bei offenen Grundrissen Wand mit Tür zum getrennten Raum		$D_{nT,w}$	26	31
Trittschallschutz	Decken, Treppen im abgetrennten treppenraum ²		$L'_{nT,w}$	53	46
Gebäudetechnische Anlagen (einschließlich Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen gemeinsam für die Ver- und Entsorgung des eigenen Bereichs)			$L_{AFmax,nT}$ ^{1,3}	35	30

¹ Dies gilt nicht für Geräusche von im eigenen Bereich fest installierten technischen Schallquellen (Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage), die – im üblichen Betrieb – vom Bewohner beeinflusst, das heißt, selbst betätigt bzw. in Betrieb gesetzt werden. Bei offenen Grundrissen kann nicht sichergestellt werden, dass im schutzbedürftigen Raum $L_{AFmax,nT} = 35$ dB eingehalten werden.

² oben und unten abgeschlossen

³ Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen, die beim Betätigen (Öffnen; Schließen, Umstellen, Unterbrechen u. Ä.) der Armaturen und Geräte der Wasserinstallation entstehen, sollen die Kennwerte der SSt II und SSt III um nicht mehr als 10 dB übersteigen. Dabei wird eine bestimmungsgemäße Benutzung vorausgesetzt.

5.2 BHKW als betriebliche Anlage

5.2.1 Messung und Beurteilung nach [TA Lärm]

Werden BHKW als betriebliche Anlage eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.5.1), sind neben den Anforderungen gemäß DIN 4109 bzw. VDI 4100 die Richtwerte nach TA Lärm und somit auch die Anforderungen an tieffrequenten Lärm nach DIN 45680 einzuhalten.

In der TA Lärm ist die Messung und Bewertung von Geräuschen genehmigungsbedürftiger Anlagen zum Schutz der Allgemeinheit definiert. Dabei ist der gesamte Hörfrequenzbereich relevant. Eine Schallimmissionsmessung wird bei bebauten Flächen in einem Abstand von 0,5 m außerhalb des Gebäudes vor der Mitte des geöffneten Fensters des vom Geräusch am stärksten betroffenen schutzbedürftigen Raumes durchgeführt. Handelt es sich um unbebaute Flächen oder bebaute Flächen ohne schutzbedürftige Räume, so ist die Messung an dem am stärksten betroffenen Rand der Fläche, wo nach dem Bau- und Planungsrecht Gebäude mit schutzbedürftigen Räumen erstellt werden dürfen, durchzuführen. Erhoben werden folgende Messgrößen:

- äquivalenter Dauerschalldruckpegel L_{Aeq}, L_{Ceq}
- maximaler Schalldruckpegel L_{AFmax}, L_{CFmax}
- Wirkpegel (Taktmaximalpegel) L_{AFTeq} .

Um eine Bewertung durchführen zu können, wird der A-bewertete Beurteilungspegel

$$L_r = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T_r} \sum_i T_i 10^{0,1(L_{Aeq,i} + K_{T,i} + K_{I,i})} \right) \text{ dB(A)} \quad (17)$$

ermittelt mit:

- $L_{Aeq,i}$ äquivalenter Terz-Dauerschalldruckpegel in dB
- T_i Teilzeit in h
- T_r Beurteilungszeit in h
- $K_{T,i}$ Zuschlag für Ton- und Informationshaltigkeit in dB
- $K_{I,i}$ Zuschlag für Impulshaltigkeit in dB
- i Terzband-Index.

Eine Bewertung ist anhand eines Vergleichs des Beurteilungspegels L_r mit den Immissionsrichtwerten nach Tabelle 7 möglich. Der Beurteilungszeitraum T_r ist Tabelle 9 zu entnehmen. Die Vergabe eines Zuschlages für Ton- und Informationshaltigkeit in Höhe von 3 dB oder 6 dB wird je nach Auffälligkeit vor Ort durchgeführt. Alternativ kann die Bestimmung der Tonhaltigkeit auch nach DIN 45681 erfolgen. Für Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit (vgl. Tabelle 10) ist für die Gebiete d-f (vgl. Tabelle 7) ein Zuschlag von 6 dB zu vergeben. Das Vorhandensein einer erhöhten Störwirkung durch tieffrequente Komponenten ist gemäß DIN 45680 zu prüfen, wenn die Differenz zwischen C-bewertetem und A-bewertetem äquivalenten Dauerschalldruckpegel $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ einen Wert von 20 dB überschreitet.

Tabelle 7: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte außerhalb von Gebäuden nach TA Lärm

#	Gebietseinstufung	Beurteilungspegel L_r tags in dB(A)	Beurteilungspegel L_r nachts in dB(A)
a	Industriegebiet	70	70
b	Gewerbegebiet	65	50
c	Kern-, Dorf- und Mischgebiet	60	45
d	Allgemeine Wohn- und Kleinsiedlungsgebiete	55	40
e	Reine Wohngebiete	50	35
f	Kurzegebiete, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten	45	35

Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Immissionsrichtwerte tags um nicht mehr als 30 dB, nachts um nicht mehr als 20 dB überschreiten.

Tabelle 8: Immissionsrichtwerte für Immissionsorte innerhalb von Gebäuden nach TA Lärm

Beurteilungszeitraum	Richtwert in dB(A)
tags	35
nachts	25

Einzelne kurzzeitige Geräuschspitzen dürfen die Immissionsrichtwerte um nicht als 10 dB überschreiten.

Tabelle 9: Beurteilungszeiten nach TA Lärm

Beschreibung	Zeitraum	Beurteilungszeit T_r
tags	06:00 Uhr–22:00 Uhr	16 h
nachts	22:00 Uhr–06:00 Uhr	1 h ¹

¹ Berücksichtigung der ungünstigsten kritischsten Stunde

Tabelle 10: Tageszeiten mit erhöhter Empfindlichkeit nach TA Lärm

Beschreibung	Zeitraum
werktags	06:00 Uhr–07:00 Uhr 20:00 Uhr–22:00 Uhr
sonn- und feiertags	06:00–09:00 Uhr 13:00–15:00 Uhr 20:00–22:00 Uhr

5.2.2 Messung und Beurteilung von tieffrequentem Lärm nach DIN 45680

DIN 45680 soll an dieser Stelle nur in Kurzform beschrieben werden. Eine ausführliche Beschreibung aus Sicht der Autoren kann dem Bericht der Studie AFD [2014] entnommen werden. An dieser Stelle sei darauf verwiesen, dass sich die DIN 45680 zum Zeitpunkt der hier beschriebenen Arbeiten wieder in Überarbeitung befindet [KUBICEK 2012]. Dazu sei ebenfalls auf eine detailliertere Beschreibung in AFD [2014] hingewiesen.

■ Frequenzbereich:

- Terzbänder mit Mittenfrequenzen von 10 Hz bis 80 Hz

■ Messort/Messbedingung:

- innerhalb des Gebäudes in dem am stärksten betroffenen Aufenthaltsraum
- maßgeblicher Immissionsort ist die Stelle mit höchster Belastung, an der sich die Person regelmäßig aufhält
- wenn maßgeblicher Immissionsort in Wandnähe, dann etwa 0,5 m vor Wand messen
- Raum mit geschlossenen Fenstern und Türen und üblicher Raumausstattung

■ Messgrößen:

- äquivalente Dauerschalldruckpegel L_{Aeq} , L_{Ceq}
- maximaler Schalldruckpegel L_{AFmax} , L_{CFmax}
- äquivalenter Terz-Dauerschalldruckpegel $L_{Terz,eq}$
- maximaler Terz-Schalldruckpegel $L_{TerzFmax}$

■ Vorerhebung:

- Prüfung des zu beurteilenden Geräusches auf tieffrequente Anteile
- $L_{Ceq} - L_{Aeq} > 20 \text{ dB} \rightarrow$ Terzanalyse erforderlich
- $L_{CFmax} - L_{AFmax} > 20 \text{ dB} \rightarrow$ Terzanalyse erforderlich

■ Bewertung:

- Bestimmung des Terz-Beurteilungspegels

$$L_{Terz,r} = L_{Terz,eq} + 10 \lg\left(\frac{T_e}{T_r}\right) \text{dB} \quad (18)$$

mit:

- $L_{Terz,r}$ Terz-Beurteilungspegel in dB
- $L_{Terz,eq}$ äquivalenter Terz-Dauerschalldruckpegel in dB
- T_e Gesamteinwirkdauer in h
- T_r Beurteilungszeit in h

- Bestimmung der Überschreitung des Hörschwellenpegels

$$\Delta L = L_{\text{Terz},r} - L_{\text{HS}} \text{ dB} \quad (19)$$

mit:

- L_{HS} Hörschwellenpegel nach Tabelle 7 in dB
- Bei einer Überschreitung des Hörschwellenpegels ΔL in einem der Terzbänder von 10 Hz–80 Hz kann von einer tieffrequenten Belästigung ausgegangen werden.

Tabelle 11: Frequenzabhängiger Hörschwellenpegel L_{HS} aus DIN 45680

Terzmittenfrequenz in Hz	Hörschwellenpegel L_{HS} in dB
10,0	95,0
12,5	87,0
16,0	79,0
20,0	71,0
25,0	63,0
31,5	55,5
40,0	48,0
50,0	40,5
63,0	33,5
80,0	28,0

- Beurteilungszeiten:

- richten sich nach Festlegungen in einschlägigen Regelwerken (z. B. TA Lärm)

- Tonhaltigkeit:

- Differenz $L_{\text{Terz},eq}$ benachbarter Terzen > 5 dB → Beurteilung nach DIN 45680, Bbl. 1 erforderlich

- Bewertung nach DIN 45680, Bbl. 1:

- deutlich hervortretende Einzeltöne:

$$\Delta L_1 = L_{\text{Terz},r} - L_{\text{HS}} \text{ dB} \quad (20)$$

$$\Delta L_2 = L_{\text{Terz},F_{\text{max}}} - L_{\text{HS}} \text{ dB} \quad (21)$$

- Vergleich der Werte ΔL_1 und ΔL_2 mit den Anhaltswerten nach Tabelle 13. Für die Beurteilung ist der jeweils größere Wert maßgeblich. Bei einer Überschreitung der Anhaltswerte kann von einer tieffrequenten Belästigung ausgegangen werden.

Tabelle 12: Anhaltswerte für deutlich hervortretende Einzeltöne aus DIN 45680, Bbl. 1

Beurteilungszeit	ΔL_1 10 ... 63 Hz	ΔL_1 80 Hz	ΔL_2 10 bis 63 Hz	ΔL_2 80 Hz
Tagesstunden	5	10	15	20
Nachtstunden	0	5	10	15

- ohne hervortretende Einzeltöne
- energetische Addition der Terz-Beurteilungspegel $L_{Terz,r}$ von 10 Hz bis 80 Hz zu

$$L_{A,r} = 10 \cdot \lg \sum_i 10^{\frac{L_{Terz,r,i} + K_{A,i}}{10}} \text{ dB} \quad (22)$$

mit:

- $L_{A,r}$ A-bewerteter Beurteilungspegel in dB
- $K_{A,i}$ Korrekturwerte der A-Bewertung nach Tabelle 9 in dB

Analog dazu erfolgt die Beurteilung der maximalen Terz-Schalldruckpegel nach

- Tabelle 14. Bei einer Überschreitung der Anhaltswerte kann von einer tieffrequenten Belästigung ausgegangen werden.

Tabelle 13: Korrekturwerte $K_{A,i}$ für A-Bewertung aus DIN 45680, Bbl. 1

Terzmittenfrequenz in Hz	$K_{A,i}$ in dB
10,0	-70,4
12,5	-63,4
16,0	-56,7
20,0	-50,0
25,0	-44,7
31,5	-39,4
40,0	-34,6
50,0	-30,2
63,0	-26,2
80,0	-22,5

Tabelle 14: Anhaltswerte ohne deutlich hervortretende Einzeltöne aus DIN 45680

Beurteilungszeit	$L_{A,r}$ in dB	$L_{AF,max}$ in dB
Tagesstunden	35	45
Nachtstunden	25	35

5.2.3 Messung und Beurteilung nach LUNG [2009]

Die Immissionsprognose zu den von BHKW abgestrahlten Geräuschen wird besonders dann erschwert, wenn die Geräusche nach DIN 45680 beurteilt werden sollen. In diesem Fall müsste die Prognose die tieffrequente Schalldämmung von Fassadenbauteilen, z. B. Fenstern, und die Schalldruckpegelverteilung in schutzbedürftigen Räumen (Beschreibung der Eigen-Formen bei den entsprechenden Eigenfrequenzen) beinhalten. Diese Prognose gestaltet sich als sehr aufwändig und darüber hinaus als zu ungenau, weil zum einen eine Vielzahl von verschiedenen Raumgeometrien zu erwarten und zum anderen die Schalldämmwerte der Fassadenbauteile im tieffrequenten Bereich und deren Ankopplung an das Raumschallfeld nur mit großer Unsicherheit vorhersagbar sind. Einen Ausweg stellt hier der Erlass aus Mecklenburg-Vorpommern [LUNG 2009] dar. In diesem Erlass wird ein Schalldruckpegel außerhalb des Gebäudes auf der Basis eines Schalleistungswertes an der Kaminmündung berechnet. Zum Vergleich mit Richtwerten wurde dazu ein verschärftes Kriterium (vgl. Tabelle 15) entwickelt.

Basierend auf DIN ISO 9613-2 ist unter Nr. A.2 der TA Lärm eine entsprechende Schallausbreitungsrechnung zur „Ermittlung der Geräuschimmission durch Prognose“ aufgeführt. Diese bezieht sich allerdings nur auf die Schallausbreitung im Freien mit Oktavmittenfrequenzen im Bereich von 63 Hz bis 8 kHz.

Für tieffrequente Schallimmissionen an BHKW-Abgaskaminen (hauptsächlich 40 Hz, 50 Hz, 63 Hz, 80 Hz, 100 Hz) ergibt sich der äquivalente Dauerschallpegel aus der Schalleistung je Terzband in der Entfernung d außerhalb schutzbedürftiger Räume nach:

$$L_{\text{Terz,eq,außen}} = L_{\text{WTerz,eq}} - A_{\text{div}} - A_{\text{gr}} - A_{\text{bar}} \quad (23)$$

mit:

- $L_{\text{Terz,eq,außen}}$ Mittelungspegel
- $L_{\text{WTerz,eq}}$ Schalleistungspegel je Terz des BHKW im bestimmungsmäßigen Betrieb (Volllast), über die Einwirkzeit gemittelt (Herstellerangabe oder Messung an vergleichbarer Anlage)
- A_{div} geometrische Ausbreitung (Abstandsmaß)
 $A_{\text{div}} = \left[20 \lg \left(\frac{d}{d_0} \right) + 11 \right]$ dB mit $d_0 = 1$ m
- d Abstand von der Schlotöffnung des BHKW-Kamins zum Immissionsort nach TA Lärm in m
- A_{gr} Im Bodeneffekt $A_{\text{gr}} = -3$ dB ist das geometrische Richtwinkelmaß für die Schallausbreitung in den Halbraum enthalten („worst case“).
- A_{bar} Die schallmindernde Abschirmung durch große Hindernisse/Gebäude, die sich auf dem Ausbreitungsweg befinden, kann in der Berechnung erfasst werden.

Tabelle 15 gibt einen Überblick über die Beurteilung und sich daraus ergebende Maßnahmen bei Über- bzw. Unterschreitung der Hörschwelle L_{HS} . Nach Inbetriebnahme der BHKW-Anlage kann eine Überprüfung gemäß § 28 BImSchG nach Angaben zur „Geräuschmessung an Maschinen – Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren, Schornsteine“ unter Abschnitt 6.2. der DIN 45635 erfolgen. Danach werden Schalleistungspegel und Schalldruckpegel je Terzband an der entsprechenden Position im Nahbereich der Abgasmündung für die jeweiligen Terzbänder ermittelt. Werden an mehreren Punkten des Nahbereichs Messungen vorgenommen, müssen insbesondere bei tonalen Geräuschen die Auswirkungen der tieffrequenten Interferenzen direkter und reflektierter Schallwellen (gleiche Frequenz bei unterschiedlicher Phase) eliminiert werden [LUNG 2009]. Darüber hinaus sollte in einer weiteren Untersuchung dringend geprüft werden, ob der im Abstand von 1 m ge-

gemessene Schalldruckpegel (Nahfeld der Quelle) tatsächlich proportional zur ins Fernfeld (Abstände bei 30 Hz von mehr als 20 m) abgestrahlten Schalleistung ist.

Tabelle 15: Beurteilung der Über- bzw. Unterschreitung der Hörschwelle nach LUNG [2009]

#	Prüfkriterium in dB	Beurteilung	Aktion
1	$L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}} \leq -10$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden mit großer Sicherheit unterschritten.	Die Anlage ist ohne weitere Auflagen genehmigungsfähig. Eine Herstellerbescheinigung ist vorzulegen.
2	$-10 \leq L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}} \leq -3$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden unterschritten.	Die Schalleistungspegel je Terz $L_{w\text{Terz,eq}}$ sind durch Messung nach Inbetriebnahme zu überprüfen.
3	$L_{\text{Terz,eq,außen}} - L_{\text{HS}} > -3$	Die Anhaltswerte der DIN 45680 werden möglicherweise überschritten.	Weitere schallmindernde Maßnahmen zur Absenkung der Schalleistungspegel je Terz $L_{w\text{Terz,eq}}$ sind zwingend erforderlich und im Genehmigungsverfahren nachzuweisen.

Hinweis: an besonders sensiblen Standorten (z. B. unmittelbare Nähe Wohnbebauung-Anlage) kann im Einzelfall die Einhaltung des Prüfkriteriums #1 verlangt werden

6 Möglichkeiten der Lärminderung an BHKW

6.1 Grundsätzliche Herangehensweise

Grundsätzlich kann zwischen primären und sekundären Schallschutzmaßnahmen unterschieden werden, wobei die primären Maßnahmen maßgeblich Maßnahmen des Schallschutzes an der Quelle entsprechen. Am Beispiel des BHKW wäre dies z. B. die Auswahl des schalltechnisch günstigsten Motors. Sekundäre Maßnahmen setzen hingegen am Schallausbreitungsweg, z. B. Schalldämpfer, oder am Immissionsort, z. B. Gehörschutz, an. Den primären Maßnahmen ist in der Regel der Vorzug zu geben, weil sie zum einen am wirksamsten und zum anderen zumindest kostengünstigster als nachträgliche Maßnahmen sind. Das hier durchgeführte Projekt behandelt die schalltechnische Beurteilung handelsüblicher Mikro-BHKW mit einem Leistungsbereich von 2,5 ... 15 kW_{el} hinsichtlich ihres Einsatzes in Wohngebäuden. Aus diesem Grund konzentriert sich die Studie maßgeblich auf die für den Einbau notwendigen schalltechnischen Maßnahmen, d. h. auf sekundäre Maßnahmen. Anmerkungen zur schalltechnischen Optimierung von Motoren, Getrieben und Pumpen können jedoch z. B. den ausführlichen Hinweisen in ZELLER [2009] entnommen werden. Anhand der Daten der hier durchgeführten Arbeiten kann aber geschlossen werden, dass Stirling-Motoren im Vergleich zu Diesel- und Gasmotoren eine deutlich geringere Schallemission aufweisen können (Abbildung 11). Weiterhin bescheinigen die Ergebnisse den untersuchten BHKW mit Gas-Motoren z. T. eine geringere Schallemission im Vergleich zu BHKW mit Dieselmotoren bei gleicher Leistung. An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass von den Herstellern keine Angaben zur schalltechnischen Wirksamkeit der an den untersuchten BHKW eingesetzten Kapselungen gemacht worden sind.

Inbetriebnahme BHKW

Nach dem Einbau und vor Inbetriebnahme eines BHKW und dem daran angeschlossenen Heizkreislauf erfolgt in der Regel ein sogenannter „hydraulischer Abgleich“. Die Volumenströme des Heizwassers werden dabei auf den maximalen Wärmebedarf begrenzt. Geschieht dies nicht, können neben einem erhöhten Energiever-

brauch und teils überhitzten oder zu kühlen Räumen Strömungsgeräusche auftreten. Heizkörperventile und Rohrleitungen geben Geräusche ab, weil die Strömungsgeschwindigkeit und der Differenzdruck im Ventil zu groß sind. Tritt darüber hinaus Luft in die Heizungsanlage ein, macht sich dies als Gluckern oder Plätschern bemerkbar.

Der hydraulische Abgleich erfolgt durch Einsatz von Thermostatventilen und Einstellung eines zuvor berechneten Durchflusskennwerts. Weiterhin können mittels Rücklaufverschraubung die Durchflusswiderstände reguliert werden. Der erforderliche Volumenstrom kann ebenfalls durch Heizstromventile mit integriertem Regler eingestellt werden. Ein Thermostat regelt danach bis zum eingestellten maximalen Volumenstrom. Entlüften und Sicherstellen des optimalen Vordrucks in der Heizungsanlage während regelmäßiger Heizungswartung wirkt Fehlfunktionen und Schäden entgegen [BZM 2008].

6.2 Abgasschalldämpfer

Schalldämpfer stellen eine effektive Möglichkeit dar, um den an der Mündung von Schornsteinen emittierten Abgasschall von BHKW zu mindern. Im Allgemeinen besitzen BHKW bereits einen integrierten Primär-Schalldämpfer im Abgasstrang. Viele Hersteller bieten ebenfalls Sekundär-Schalldämpfer für die Installation im Keller außerhalb des BHKW oder auf dem Schornstein an.

6.2.1 Übersicht

Um den sich in einem Kanal ausbreitenden Schall zu mindern, kommen verschiedene Prinzipien für die Konstruktion eines Schalldämpfers in Frage. Entscheidend bei der Wahl des Schalldämpfer-Typs ist zum einen die geforderte frequenzabhängige Minderung, zum anderen der zulässige Druckverlust des Schalldämpfers. Darüber hinaus spielen Haltbarkeit, Verschmutzung und Temperaturfestigkeit eine Rolle. Abbildung 19 zeigt den charakteristischen spektralen Verlauf des Dämpfungsverhaltens verschiedener Schalldämpfer-Typen:

- a) Absorptionsschalldämpfer
- b) Reflexionsschalldämpfer
- c) Schalldämpfer mit Helmholtz-Resonatoren (Resonator aus einem Volumen und einem Röhrrchen)
- d) Schalldämpfer mit $\lambda/4$ -Resonatoren (hier: abzweigendes Röhrrchen)

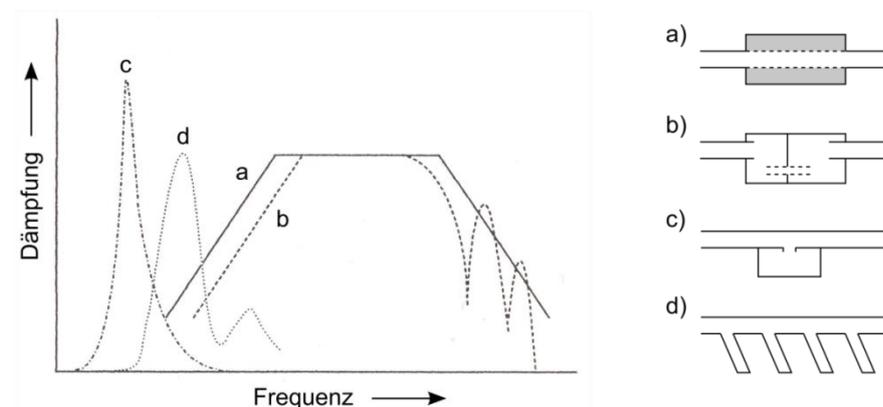


Abbildung 19: Links: Charakteristischer spektraler Dämpfungsverlauf verschiedener Schalldämpfer-Typen aus SCHIRMER [1996]; Rechts: Prinzipskizze der einzelnen Schalldämpfer-Typen: a) Absorptionsschalldämpfer, b) Reflexionsschalldämpfer, c) Resonanzschalldämpfer mit Helmholtz-Resonator, d) Resonanzschalldämpfer mit $\lambda/4$ -Resonator in Form eines Tannenbaum-Schalldämpfers

6.2.2 Auslegung

Die schalltechnische Auslegung von Schalldämpfern wie Absorptionsschalldämpfern oder Resonanzschalldämpfern werden von verschiedenen Akustikbüros angeboten. Dabei kommen oft analytische Verfahren, z. B. Netzwerkanalysenmodelle, und numerische Werkzeuge zum Einsatz (vgl. Abbildung 20).

Die messtechnische Überprüfung der Wirksamkeit von Schalldämpfern in Kanälen ist in DIN EN ISO 7235 festgelegt, wobei Einfügungsdämpfung, Strömungsgeräusch und Gesamtdruckverlust ermittelt werden. Häufig vermessen Schalldämpferhersteller ihre Produkte nach oder in Anlehnung an diese Norm und geben die frequenzabhängige Einfügungsdämpfung an. Alternativ ermöglicht die Anwendung des Übertragungsmatrix-Verfahrens im Transmissionsrohr die messtechnische Bestimmung der spektralen Durchgangsdämpfung von Schalldämpfern (Bestimmung der schalltechnischen Wirkung des Schalldämpfers ohne Berücksichtigung des Rohrsystems, vgl. Abbildung 21, links). Exemplarische Messergebnisse zeigen, dass die durch Schalldämpfer praktisch erreichbare spektrale Durchgangsdämpfung durch die modellbasierte Auslegungssoftware hinreichend genau berechnet werden kann (vgl. Abbildung 21, rechts).

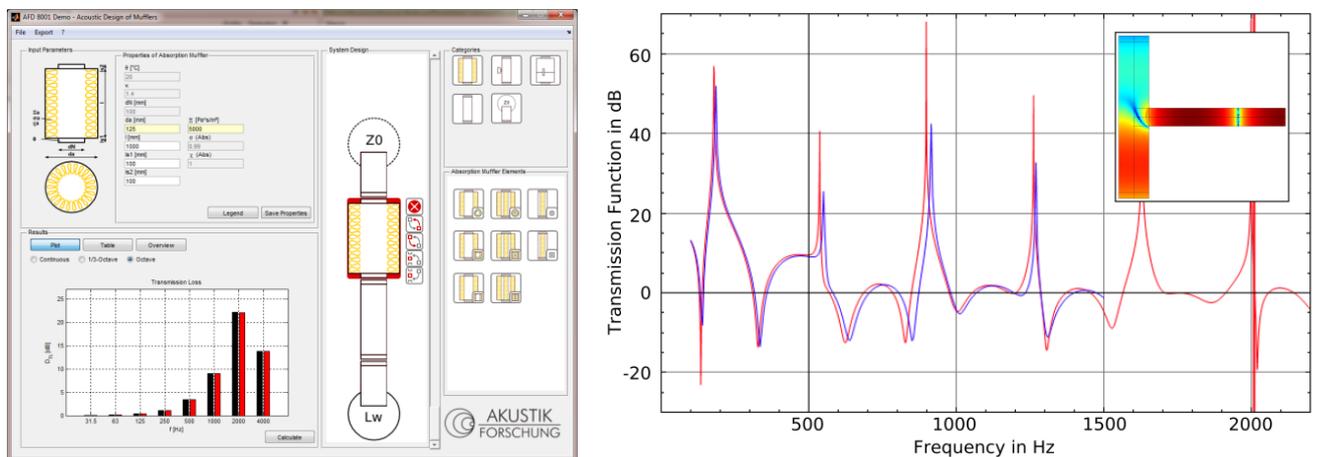


Abbildung 20: Links: Vorhersage der spektralen Durchgangsdämpfung/Einfügungsdämpfung von komplexen Schalldämpfersystemen auf Basis von Netzwerkmodellen mit AFD 8001 – AcoustiCalc® der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH; Rechts: Vorhersage der spektralen Übertragungsfunktion eines Schalldämpfers – Vergleich von analytischen (AFD 8001 – AcoustiCalc®) und numerischen(FEM) Berechnungsergebnissen

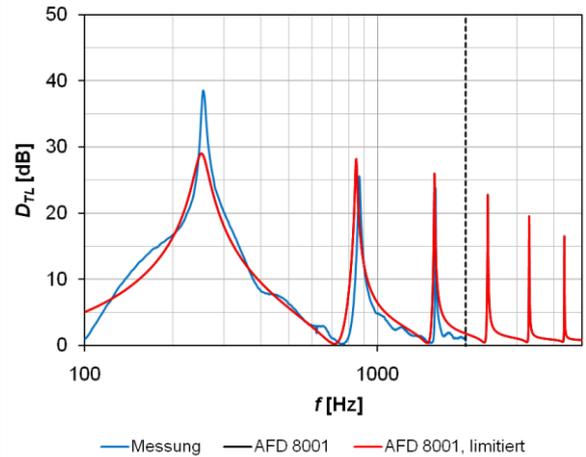
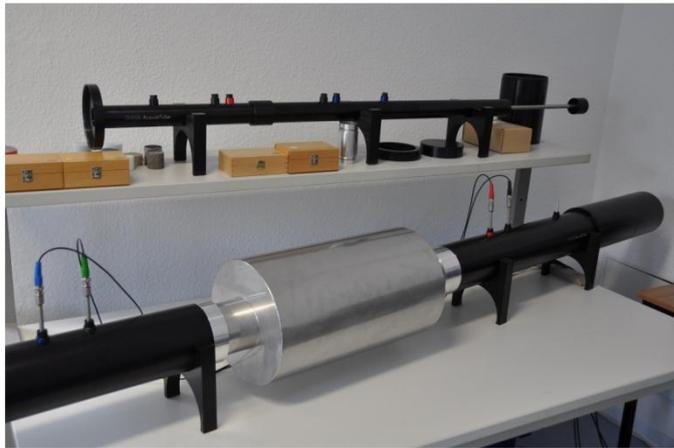


Abbildung 21: Links: Messtechnische Bestimmung der spektralen Durchgangsdämpfung von Schalldämpfern auf Basis des Übertragungsmatrix-Verfahrens mit Hilfe des Transmissionsrohres „AFD 1200 – AcoustiTube®“ der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH; Rechts: Vergleich der spektralen Durchgangsdämpfung aus Messung und analytischer Modellierung

Absorptionsschalldämpfer

Absorptionsschalldämpfer sind breitbandig wirksame Schalldämpfer mit einer hohen Dämpfung im mittleren und hohen Frequenzbereich. Die Dämpfung wird durch Einbringen von porösem Material in den Randbereich des Kanals erreicht. Absorptionsschalldämpfer eignen sich für den Einsatz an BHKW, weil sie breitbandig wirken und gleichzeitig einen geringen Druckverlust aufweisen. Für die Minderung des tieffrequenten Lärms sind sie aufgrund der in diesem Fall geforderten großen Bauteilabmessung weniger geeignet.

Die Dämpfung D_L eines Absorptionsschalldämpfers der Länge L wird von seinen Abmessungen und dem Schallabsorptionsgrad α des eingebrachten Absorbermaterials bestimmt. Der Schallabsorptionsgrad eines Materials ist eine frequenzabhängige Größe zwischen Null und Eins, wobei Null keine Absorption und Eins eine vollständige Absorption des einfallenden Schalls bedeutet. Abbildung 22 zeigt verschiedene Möglichkeiten des Aufbaus eines Absorptionsschalldämpfers und dessen Abmessungen.

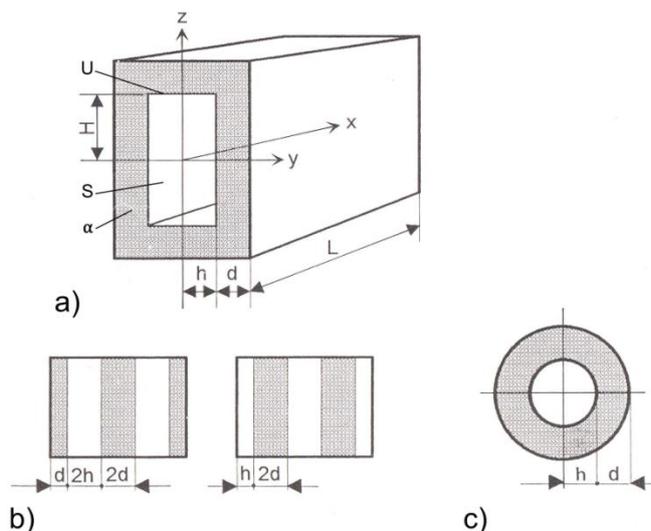


Abbildung 22: Grundformen von Absorptionsschalldämpfern aus SCHIRMER [1996]: a) rechteckiger, allseitig ausgekleideter Kanal, b) schlitzförmiger Querschnitt mit schallharten Schmalseiten (Kulissen-Schalldämpfer), c) kreisförmiger Querschnitt (Rohrschalldämpfer)

Eine einfache Methode zur Abschätzung der Dämpfung eines Absorptionsschalldämpfers ist das Modell nach PIENING. Der Frequenzbereich wird dabei in drei Abschnitte unterteilt, wobei das Dämpfungsmaximum im mittleren Bereich zwischen der unteren Grenzfrequenz f_u und der oberen Grenzfrequenz f_o liegt (vgl. Abbildung 19, Kurve a)). Nach PIENING [SCHIRMER 1996], [FUCHS 2007] lässt sich die längenbezogene Dämpfung D_L eines Absorptionsschalldämpfers wie folgt abschätzen:

$$D_L = \begin{cases} 1,5 \cdot \alpha \cdot \frac{U \cdot L}{S} \cdot \left(\frac{f}{f_u}\right)^{1,75} \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{-0,12} & | f < f_u \\ 1,5 \cdot \alpha \cdot \frac{U \cdot L}{S} & | f_u \leq f \leq f_o \\ 1,5 \cdot \alpha \cdot \frac{U \cdot L}{S} \cdot \left(\frac{f_o}{f}\right)^2 & | f > f_o \end{cases} \quad \text{dB} \quad (24)$$

mit

$$f_u = 0,19 \cdot \left(\frac{d}{h}\right)^{-0,72} \cdot \frac{c}{2 \cdot h} \quad (25)$$

und

$$f_o = 1,5 \cdot \frac{c}{2 \cdot h} \quad (26)$$

sowie

- U Umfang der mit Absorbermaterial ausgekleideten inneren Querschnittsfläche in m
- S freie Querschnittsfläche in m^2
- f Frequenz in Hz
- d Auskleidungstiefe in m
- h halbe Kanalbreite in m
- c Schallgeschwindigkeit in m/s (bei $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$: $c = 343 \text{ m/s}$)

Oberhalb der Frequenz f_o nimmt die Wirksamkeit von Absorptionsschalldämpfern trotz eines hohen Absorptionsgrades des Absorbermaterials wieder ab. Dieser Effekt wird als Durchstrahleffekt bezeichnet und beschreibt die ungehinderte Ausbreitung der Schallwellen im Kanal in axialer Richtung ab einer bestimmten Frequenz. Die obere Grenzfrequenz wird daher auch als Durchstrahlfrequenz bezeichnet.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die Reflexionen am Schalldämpfer-Ein- und Auslass beim Piening-Modell nicht berücksichtigt werden. Sowohl bei Querschnittssprüngen als auch bei eingefügten Kulissen kann dies eine Rolle spielen. Prinzipiell stellt das Piening-Modell nur eine Abschätzung der Dämpfung dar. Eine genauere Auslegung und Berechnung der schalltechnischen Wirksamkeit von Absorptionsschalldämpfern kann durch Anwendung der Modellierung durch Lösung der charakteristischen Gleichung (z. B. durch Kettenbruchzerlegung) in Kombination mit spezifischen Absorbermodellen erfolgen (z. B. mit Analysesoftware AFD 8001 – AcustiCalc[®] der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH, vgl. Abbildung 20) [MECHEL 1998].

Im Hinblick auf die Optimierung der spektralen Dämpfung von Absorptionsschalldämpfern im tieffrequenten Bereich und in der Umgebung heißen Abgases können optimierte Schallabsorptionsmaterialien zum Einsatz kommen. Dazu zählt z. B. die sogenannte metallische Hohlstruktur (MHKS, vgl. Abbildung 23). Diese ist selbsttragend, formstabil und mit Hilfe standardmäßig in der Metallverarbeitung eingesetzter Verfahren mechanisch bearbeitbar.



Abbildung 23: Links: Mechanisch bearbeitete Metallische Hohlkugelstrukturen (MHKS); Rechts: Einsatz von MHKS innerhalb von Absorptionsschalldämpfern

Abbildung 24, links zeigt den spektralen Schallabsorptionsgrad einer 40 mm starken MHKS im Vergleich zu dem eines Melaminharzschaums (Basotect) gleicher Stärke. Darin ist zu erkennen, dass die MHKS zur Minderung tieffrequenter Geräusche besser geeignet sind als herkömmliche Absorber. Ursache für das bessere Schallabsorptionsvermögen der MHKS ist die höhere Tortuosität der Struktur bedingt durch deren kugelförmigen Gitteraufbau.

Wie in Abbildung 24, rechts zu erkennen ist, behält die MHKS in verschmutzten Umgebungen gegenüber herkömmlichen Absorptionsmaterialien weitgehend ihre schallabsorbierenden Eigenschaften. Bei staubartiger Verschmutzung wird der Schallabsorptionsgrad bei tiefen Frequenzen u. U. sogar noch verbessert. Nicht zuletzt besitzt die MHKS gegenüber Mineralwollabsorber die Vorteile der mechanischen Festigkeit, der Feuchtigkeitsresistenz und der Reinigbarkeit des Absorbers ohne Zerstörung der schallabsorbierenden Eigenschaften.

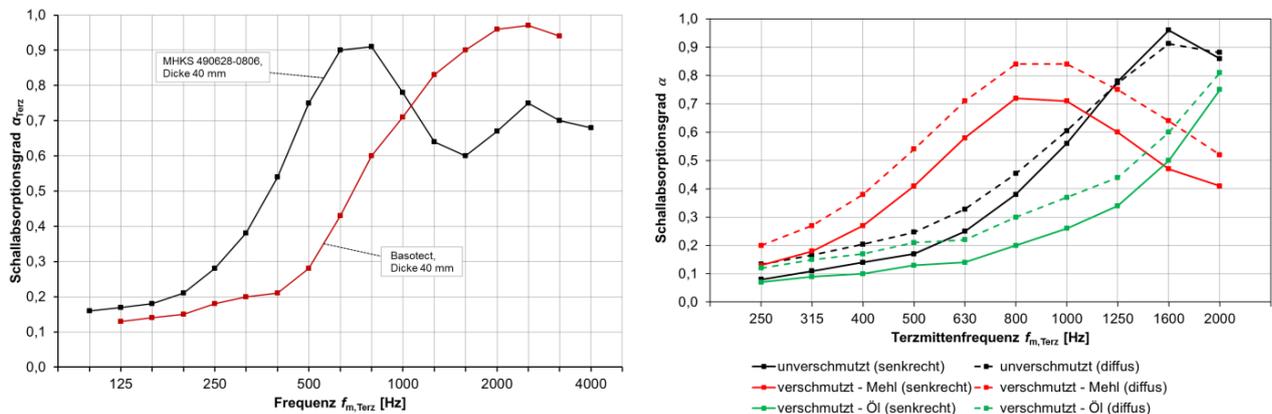


Abbildung 24: Links: Messergebnisse des Schallabsorptionsgrads von Probekörpern der Dicke 40 mm aus MHKS und Melaminharzschaum; Rechts: Messergebnisse des Schallabsorptionsgrads von unverschmutzten und verschmutzten Probekörpern der Dicke 20 mm aus MHKS für senkrechten Schalleinfall (durchgezogene Linie) und diffusen Schalleinfall (gestrichelte Linie)

Reflexionsschalldämpfer

Reflexionsschalldämpfer weisen eine breitbandige hohe Minderung des Luftschalls auf. Die Minderung wird hierbei, vereinfachend ausgedrückt, durch Schallfelddiskontinuitäten (Impedanzsprünge, z. B. durch Querschnittsprünge) hervorgerufen erzielt. Reflexionsschalldämpfer sind häufig komplexe Strukturen mit mehreren Kammern und Röhren, um eine möglichst hohe Wirkung zu erzielen. Dies verursacht jedoch auch einen hohen Druckverlust, sodass sie je nach Motor und maximal zulässigem Gegendruck des BHKW bedingt für den Einsatz als Sekundär-Schalldämpfer am Abgasstrang eines BHKW geeignet sind. Als Beispiel soll hier kurz ein einfacher Kammer-Schalldämpfer beschrieben werden. Der Dämpfungsverlauf eines Kammer-Schalldämpfers setzt sich aus periodisch auftretenden, sich abwechselnden Minima und Maxima zusammen. Die minimale und maximale Einfügungsdämpfung berechnen sich nach MÖSER [2009] über:

$$D_{e,\min} = 0 \text{ dB} \quad \text{für} \quad kl = 0, \pi, 2\pi, \dots \quad (27)$$

$$D_{e,\max} = 10 \cdot \lg \left\{ 1 + \frac{1}{4} \left(\frac{S_1}{S_2} - \frac{S_2}{S_1} \right)^2 \right\} \text{ dB} \quad \text{für} \quad kl = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad (28)$$

mit

■ k Wellenzahl in m^{-1} , $k = \frac{2\pi f}{c}$

■ l Länge der Kammer in m.

Dabei wird die maximale Einfügungsdämpfung des Reflexionsschalldämpfers vom Verhältnis der Flächen S_2 und S_1 bestimmt. Zum Beispiel sind $D_{e,\max} = 7 \text{ dB}$ für $S_2/S_1 = 4$ und $D_{e,\max} = 18 \text{ dB}$ für $S_2/S_1 = 16$. Die Resonanzfrequenzen

$$f_n = \frac{c}{4l} (2n - 1) \quad \text{mit} \quad n = 1, 2, 3, \dots, \quad (29)$$

an deren Position die spektralen Maxima des Dämpfungsverhaltens auftreten, sind von der Länge der Kammer l abhängig. Der einfache Kammer-Schalldämpfer besitzt, ähnlich wie ein $\lambda/4$ -Resonator, seine Dämpfungsmaxima, wenn ein ungerades Vielfaches einer Viertel-Wellenlänge der Länge der Schalldämpfer-Kammer entspricht. Vor allem die erste Resonanz (vgl. Gleichung (28), $n = 1$) ist von praktischer Bedeutung. Abbildung 25 zeigt den Aufbau eines Kammer-Schalldämpfers mit den Querschnitten S_1 und S_2 und der Kammerlänge l . Eine detaillierte Herleitung und Beispiele zur Berechnung der spektralen Einfügungsdämpfung komplexerer Reflexionsschalldämpfer sind in MÖSER [2009] aufbereitet.

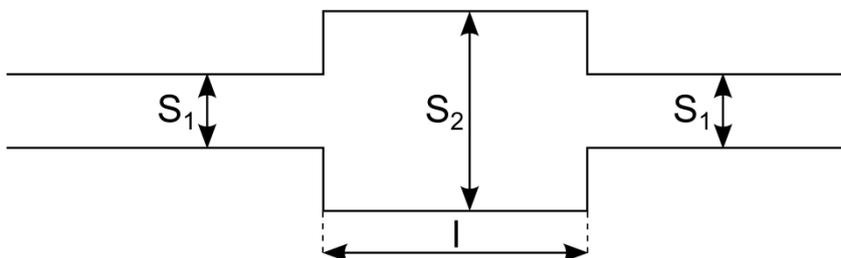


Abbildung 25: Kammer-Schalldämpfer

$\lambda/4$ -Resonatoren

Schalldämpfer mit $\lambda/4$ -Resonatoren wirken schmalbandig und eignen sich für die Minderung einzelner tonaler Geräuschkomponenten im tiefen und mittleren Frequenzbereich. Das Prinzip der Minderung basiert auf dem Eintrag einer Schallfelddiskontinuität (Impedanzsprung) an einer Stelle im Abgasstrang. Diese Diskontinuität wird durch eine Stehwelle in einem Abzweig (Abbildung 26) erzwungen. Die Resonanzfrequenzen

$$f_n = \frac{c}{4l}(2n - 1) \quad \text{mit} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (30)$$

sind abhängig von der Länge des Resonators l (vgl. FUCHS 2007). Abbildung 26 zeigt verschiedene Ausführungen von $\lambda/4$ -Resonatoren der Länge l .

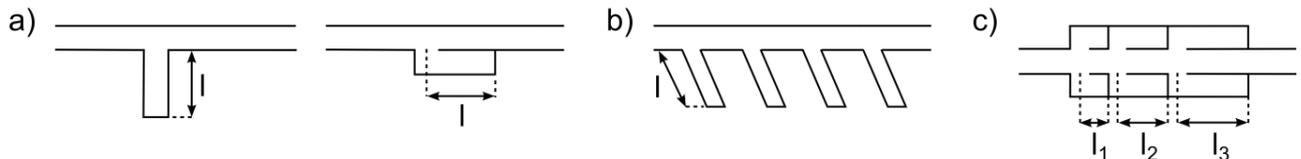


Abbildung 26: $\lambda/4$ -Resonatoren: a) einfache Stichleitung b) Tannenbaumresonator c) Rohrschalldämpfer mit Kammern verschiedener Länge

Abbildung 19, Kurve d) zeigt einen charakteristischen Dämpfungsverlauf eines $\lambda/4$ -Resonators. Die Breite des spektralen Dämpfungsmaximums wird vom Verhältnis der Querschnitte von Resonator und Rohrleitung bestimmt. Je größer der Querschnitt des Resonators ist, umso breiter ist das spektrale Dämpfungsmaximum. Durch mehrere Resonatoren gleicher Länge (Tannenbaumresonator, vgl. Abbildung 26 b)) kann die schmalbandige Wirksamkeit des Systems erhöht werden. Mit einer Konstruktion mehrerer $\lambda/4$ -Resonatoren verschiedener Länge (vgl. Abbildung 26 c)) ist es möglich, breitbandige Dämpfungen zu erzielen.

Helmholtz-Resonatoren

Schalldämpfer mit Helmholtz-Resonatoren (Volumen und Röhrrchen) wirken ebenfalls schmalbandig und eignen sich somit auch für die Minderung einzelner tonaler Geräuschkomponenten im tiefen und mittleren Frequenzbereich. Das Prinzip der Minderung entspricht dem Schalldämpfer mit $\lambda/4$ -Resonatoren. Die Diskontinuität wird hier jedoch durch das in Resonanz betriebene Feder-Masse-System (Volumen und Röhrrchen) erzwungen. Der Druckverlust dieser Schalldämpferart ist gering. Zum Teil wird Schallenergie durch den Einsatz von porösen Materialien und durch Strömungsverluste dissipiert. Die Resonanzfrequenz f_0 des Feder-Masse-Systems bestimmt sich aus dem Querschnitt des Resonatorhalses S , der Länge des Resonatorhalses L und dem Luftvolumen V in der Resonator kammer (vgl. Abbildung 27).

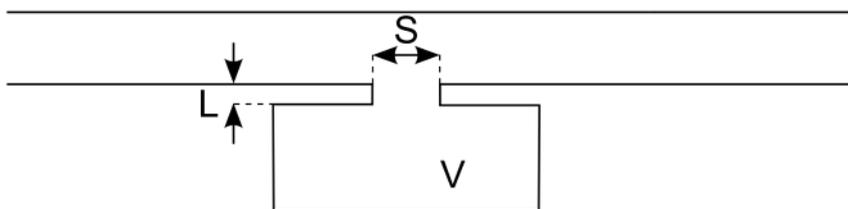


Abbildung 27: Abmessungen Helmholtz-Resonator

Handelt es sich bei der Abdeckung des Luftvolumens lediglich um eine gelochte Platte, so entspricht die Dicke der Platte der Länge des Resonatorhalses. Weil die schwingende Luftsäule im Resonatorhals Teile der Luft innerhalb und außerhalb der Kammer zum Schwingen anregt, wird dieser Effekt in Form einer sogenannten Mündungskorrektur $2\Delta L$ in die Berechnung der Resonanzfrequenz des Masse-Feder-Systems

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V \cdot (L + 2\Delta L)}} \quad (31)$$

mit

$$2\Delta L \cong 0,8 \cdot \sqrt{S} \quad (32)$$

einbezogen (vgl. FASOLD 2003).

Aktive Schalldämpfer

Systeme mit aktiver Minderung, auch bezeichnet als ANC Systeme (Active Noise Control), können vor allem im tieffrequenten Bereich hohe Minderungen erzielen. Im Gegensatz zu Resonatoren ist ein ANC-System nicht an eine diskrete Resonanzfrequenz gekoppelt, sodass auch breitbandige Minderungen bis in den mittleren Frequenzbereich erzielt werden können. Ein grundlegendes einfaches ANC-System besteht aus einem Mikrophon, einem Regler und einem Lautsprecher, der in den Kanal eingebaut ist (vgl. Abbildung 28 a)). Ein mit Hilfe des Reglers berechnetes, um 180° phasengedrehtes Signal wird vom Lautsprecher erzeugt und als sogenannter Antischall zusätzlich zur vorhandenen Lärmschallwelle in den Kanal eingebracht. Die Interferenz aus Lärmschallwelle und dem Antischall ergibt ein Signal, das eine gegenüber dem Original um ein Vielfaches verminderte Amplitude (Idealfall: Auslöschung) besitzt (vgl. Abbildung 28 b)). Aktive Systeme benötigen eine Stromversorgung. Der Vorteil eines solchen Systems liegt jedoch in der hohen breitbandigen Wirkung im tieffrequenten Bereich, bei gleichzeitig geringem Platzaufwand und geringem Druckverlust.

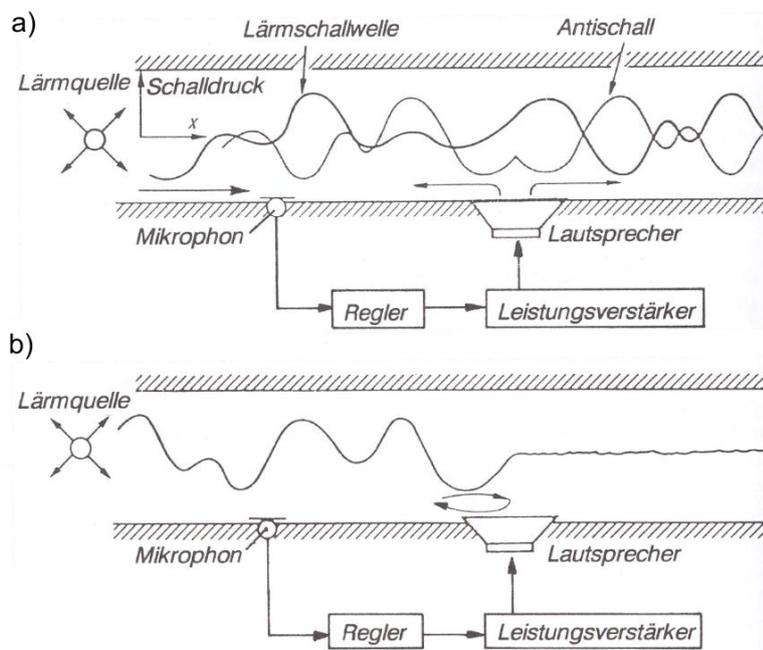


Abbildung 28: a) Prinzip der Überlagerung von Lärmschallwelle und Antischall im Kanal, b) Resultierendes Schallfeld nach der Überlagerung von Lärmschallwelle und Antischall aus LIPS [2008-1]

6.2.3 Kommerzielle Schalldämpfersysteme

Kommerziell erhältliche BHKW sind in den meisten Fällen bereits mit einem primären Abgasschalldämpfer ausgestattet. Aus diesem Grund muss der Druckverlust, der durch einen sekundären Schalldämpfer erzwungen wird, möglichst gering gehalten werden. Weil Absorptions- und Resonanzschalldämpfer einen erheblich geringeren Druckverlust als Reflexionsschalldämpfer aufweisen, sollen diese Schalldämpferprinzipien in den Mittelpunkt der weiteren Untersuchungen gerückt werden. Aufgrund ihrer breitbandigen Wirksamkeit werden häufig Absorptionsschalldämpfer eingesetzt und dementsprechend von verschiedenen Herstellern als fertige Bauteile angeboten. Einige Hersteller bieten zusätzlich Resonanzschalldämpfer als installierbare Systemkomponenten für Abgaskanäle an. Weil es notwendig ist, die tieffrequenten Komponenten eines BHKW wirksam zu mindern, ist der Einsatz eines Resonanzschalldämpfers sinnvoll. Sind die störenden Frequenzen bekannt, ist es möglich, den Schalldämpfer auf das BHKW genau abzustimmen. Einzelne BHKW-Hersteller bieten bereits optionale zusätzliche Schalldämpfer an, die auf die Zündfrequenz ihrer Produkte abgestimmt sind.

Abbildung 29 und Abbildung 30 zeigen exemplarisch die Reduzierung des spektralen Schalldruckpegels an der Mündung des Kamins durch zusätzlich installierte Schalldämpfer, die von den Herstellern der ausgewählten BHKW angeboten werden.

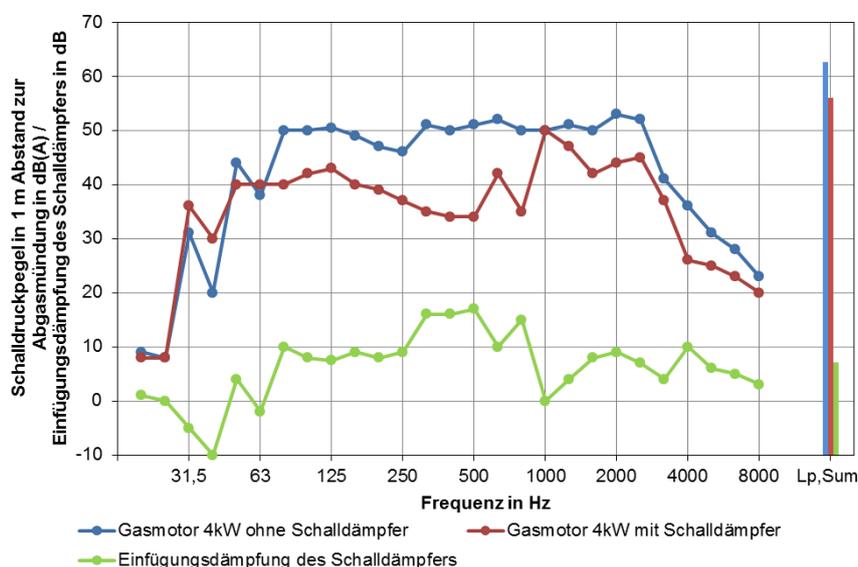


Abbildung 29: Exemplarisches A-bewertetes Schalldruckpegelspektrum, gemessen in 1 m Abstand zur Abgasmündung eines BHKW mit 4 kW-Gasmotor ohne/mit sekundären Schalldämpfer und resultierende Einfügungsdämpfung des Schalldämpfers (Datengrundlage: Messergebnisse des BHKW-Herstellers)

In Abbildung 29 ist das Schalldruckpegelspektrum eines BHKW mit Gasmotor einer elektrischen Leistung P_{el} von 4 kW abgebildet. Das im Abstand von 1 m zur Mündung des Kamins des BHKW ohne zusätzlichen Schalldämpfer gemessene Schalldruckpegelspektrum (blaue Kurve) zeigt im Frequenzbereich von 80 ... 2.500 Hz ein energetisch dominierendes breitbandiges Verhalten. Die in den Terzbändern von 31,5 Hz und 50 Hz auftretenden tonalen Komponenten tragen nicht maßgeblich zum A-bewerteten Gesamtschalldruckpegel bei. Eine effektive Minderung des A-bewerteten Gesamtpegels des emittierten Abgasgeräusches erfordert daher besonders eine breitbandige Dämpfung im energetisch dominierenden Frequenzbereich von 80 ... 2.500 Hz.

Bei Betrachtung der Schallemission mit zusätzlich installiertem Schalldämpfer (rote Linie) muss festgehalten werden, dass die oben formulierte Forderung an die Einfügungsdämpfung des Schalldämpfers im mittleren

Frequenzbereich nur zum Teil erfüllt wird. Im Frequenzbereich um 1.000 Hz kann der installierte Schalldämpfer die an der Kaminmündung emittierte Schalleistung nicht verringern. Der um 8 dB reduzierte A-bewertete Gesamtschalldruckpegel könnte ohne diesen spektralen Dämpfungseinbruch weiter reduziert werden. Ein weiteres Problem wird im tieffrequenten Bereich bei 31,5 Hz und 40 Hz sichtbar. In diesem Frequenzbereich führt der installierte, vom Hersteller angebotene Schalldämpfer am vorhandenen Schlot zu einer Verstärkung der emittierten Schalleistung. Dies ist u. U. auf die Änderung der Gesamtlänge des Abgasstranges zurückzuführen. Durch diese Maßnahme kann die Lage der Stehwelle im Frequenzbereich ungünstig beeinflusst worden sein, sodass die dazugehörige Eigenfrequenz nunmehr stärker abgestrahlt wird. Die tieffrequenten Anteile des Mündungsgeräuschs könnten somit nach der Installation des Schalldämpfers im Immissionsort als störender wahrgenommen werden.

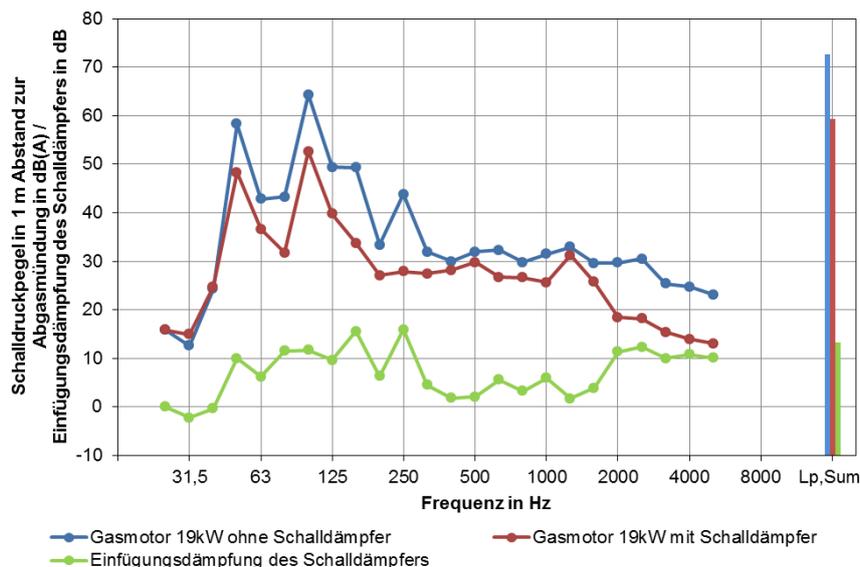


Abbildung 30: Exemplarisches A-bewertetes Schalldruckpegelspektrum, gemessen in 1 m Abstand zur Abgasmündung eines BHKW mit 19 kW-Gasmotor ohne/mit sekundärem Schalldämpfer und resultierende Einfügungsdämpfung des Schalldämpfers (Datengrundlage: Messergebnisse des BHKW-Herstellers)

Abbildung 30 zeigt das Schalldruckpegelspektrum eines BHKW mit Gasmotor einer elektrischen Leistung P_{el} von 19 kW. Das im Abstand von 1 m zur Mündung des Kamins des BHKW ohne zusätzlichen Schalldämpfer gemessene Schalldruckpegelspektrum (blaue Kurve) weist vor allem in den tieffrequenten Terzbändern von 50 Hz und 100 Hz deutlich hervortretende energetisch dominante Komponenten auf, die auf die Zündfrequenz des Motors (erste dominante Motorordnung) und deren Vielfache (höhere Motorordnungen) zurückzuführen sind. Eine effektive Minderung des Gesamtpegels und die Einhaltung der Anforderungen nach DIN 45680 erfordert daher insbesondere eine Minderung im Frequenzbereich von 50 ... 250 Hz. Ein zusätzlich installierter Schalldämpfer (rote Linie) verbessert die Situation nicht wesentlich. Besonders die tieffrequenten Anteile des Mündungsgeräuschs bleiben nach der Installation des Schalldämpfers am Immissionsort erhalten.

Basierend auf ingenieurtechnischen Erfahrungen können durch fachgerechte Auslegung von problemangepassten Schalldämpfertypen sowohl im tiefen Frequenzbereich (Resonanzschalldämpfer) als auch mittleren und hohen Frequenzbereich (Absorptionsschalldämpfer) in der Praxis größere als die in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellten Einfügungsdämpfungen erzielt werden. Exemplarische Messergebnisse optimierter, kommerziell erwerbbarer Schalldämpfersysteme eines Schalldämpfer-Herstellers belegen dies (vgl. Abbil-

Abbildung 31 und Abbildung 32). Die Messergebnisse in Abbildung 32 zeigen ebenfalls, dass durch Kombination von Resonanz- und Absorptionsschalldämpfern über den gesamten relevanten Frequenzbereich hohe Einfügungsdämpfungen erreicht werden können. Dabei ist zu beachten, dass diese Messergebnisse, im Gegensatz zu denen in Abbildung 29 und Abbildung 30, unter Laborbedingungen und nicht am Abgassystem vor Ort gewonnen wurden. Bei Installation des Schalldämpfers in den Schlot könnte es daher wiederum durch die Änderung der Gesamtlänge des Systems zur Veränderung der spektralen Einfügungsdämpfung des Gesamtsystems kommen.

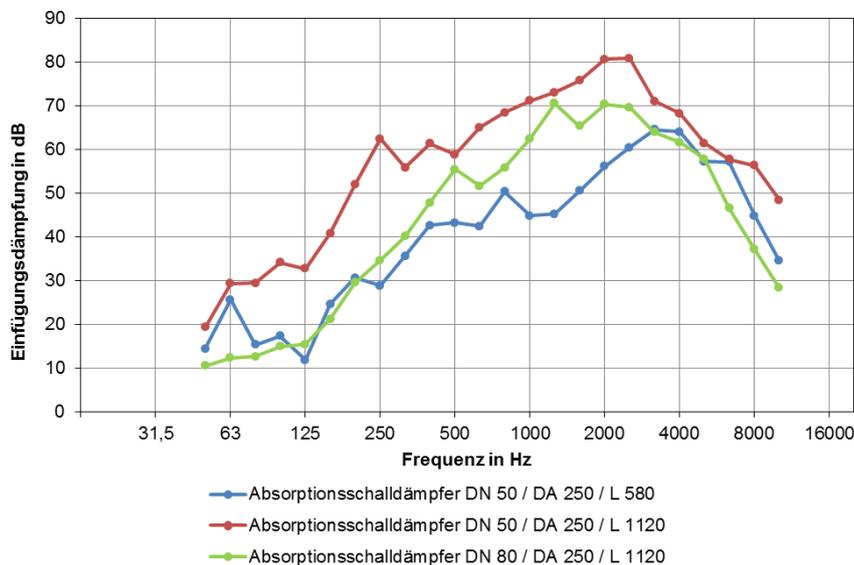


Abbildung 31: Exemplarische spektrale Einfügungsdämpfung kommerziell erwerbbarer Schalldämpfersysteme; DN: Nenndurchmesser in mm; DA: Außendurchmesser in mm; L: Länge in mm (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers, ermittelt unter Laborbedingungen in Anlehnung an DIN EN ISO 7235)

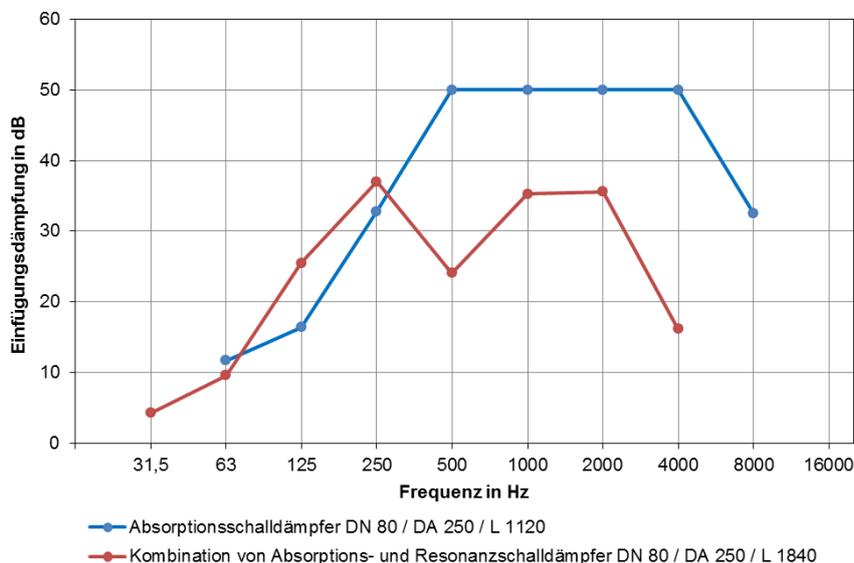


Abbildung 32: Exemplarische spektrale Einfügungsdämpfung kommerziell erwerbbarer Schalldämpfersysteme; DN: Nenndurchmesser in mm; DA: Außendurchmesser in mm; L: Länge in mm (Datengrundlage: Messergebnisse des Herstellers, ermittelt unter Laborbedingungen in Anlehnung an DIN EN ISO 7235)

6.2.4 Schallausbreitungsszenario als Grundlage zur Auslegung von Schalldämpfern

Innerhalb dieses Abschnitts soll eine exemplarische Auslegung eines sekundären Abgasschalldämpfersystems für einen 8,2 m langen Schornstein eines BHKW erläutert werden. Grundlage dieser Auslegung stellt das in Abbildung 33 definierte Schallausbreitungsszenario dar, in dem beispielhaft die Luftschallausbreitung von der Schornsteinmündung des BHKW über eine Strecke von 5 m bis zu 0,5 m vor das geöffnete Fenster des eigenen Hauses bzw. des benachbarten Hauses erfolgt. Dies kann als „worst case“-Szenario betrachtet werden.

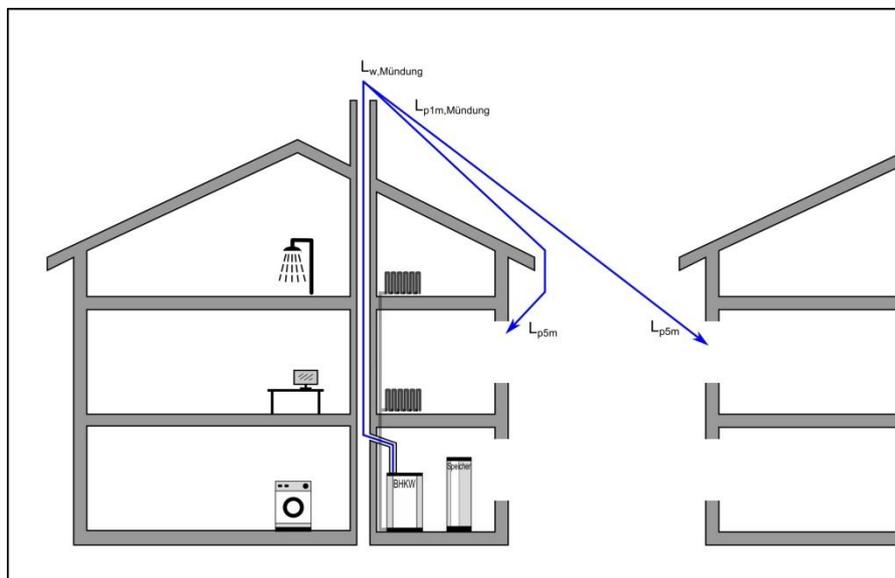


Abbildung 33: Exemplarisches Szenario zur Ableitung der erforderlichen spektralen Schalldämpfung eines Schalldämpfers zur Minderung des über den Schlot emittierten Mündungsschalls eines BHKW

Befindet sich das immissionsortbezogene Gebäude innerhalb eines reinen Wohngebiets, ist gemäß TA Lärm (vgl. Abschnitt 5.2.1, Tabelle 7, Zeile e) nachts (kritischste Stunde) ein Beurteilungspegel L_T von 35 dB(A) nicht zu überschreiten. Des Weiteren ist eine maximale Differenz zwischen C-bewertetem und A-bewertetem äquivalenten Dauerschalldruckpegel $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ von 20 dB einzuhalten. Zur Berücksichtigung der erhöhten Störwirkung durch tieffrequente Komponenten soll zur Auslegung zusätzlich der vom Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern vorgeschlagene Entwurf des Erlasses [LUNG 2009] Anwendung finden (vgl. Abschnitt 5.2.3). Dieser besagt, dass der lineare Terzband-Schalldruckpegel $L_{Terz,eq}$ in den Terzbändern von 40 Hz bis 100 Hz um 10 dB unterhalb der Hörschwelle L_{HS} liegen sollte ($L_{Terz,eq,außen} \leq L_{HS} - 10$ dB, vgl. Abbildung 34, schwarze Kurve).

Die Auslegung des Abgasschalldämpfersystems erfolgte exemplarisch für das in Abbildung 29 (blaue Kurve) dargestellte Schalldruckpegelspektrum im Abstand von 1 m zur Mündung des Schornsteins des BHKW ohne sekundären Abgasschalldämpfer. Anhand von Gleichung (23) ergibt sich gemäß LUNG [2009] das in Abbildung 34 (rote Kurve) dargestellte tieffrequente Schalldruckpegelspektrum im Abstand von 5 m zur Schornsteinmündung. Zur Einhaltung der geforderten Richtwerte nach TA Lärm und LUNG [2009] wurde mit Hilfe der Analysesoftware AFD 8001 – AcustiCalc® der Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH (vgl. Abbildung 20) eine Kombination bestehend aus zwei Resonanz-Schalldämpfern und einem Absorptionsschalldämpfer ausgelegt, die als Sekundärschalldämpfer zwischen das BHKW und den 8,2 m langen Schornstein installiert werden (vgl.

Abbildung 35, links). Das daraus resultierende lineare Schalldruckspektrum für die Terzbänder 40 Hz bis 100 Hz, der A-bewertete Gesamtschalldruckpegel sowie die Differenz zwischen C-bewertetem und A-bewertetem äquivalenten Dauerschalldruckpegel sind in Abbildung 34 (Variante1, grüne Kurve) dargestellt.

Besonders im tieffrequenten Bereich kommt es im Gesamtsystem durch Schallreflexionen an Impedanzsprüngen zur Ausbildung von Stehwellen. Diese Stehwellen können die schalltechnische Wirkung des installierten Schalldämpfers beeinflussen. Innerhalb der Auslegung wurde daher das gesamte Abluftsystem, beginnend beim BHKW (Schallquelle) über die Schalldämpfer und den Schornstein bis zur Schornsteinmündung (schalltechnischer Abschluss), unter realen Betriebsbedingungen modelliert. Wird der exemplarisch ausgelegte Schalldämpfer an einer anderen Position des Gesamtsystems (z. B an der Mündung des Schornsteins) oder in Verbindung mit einem Schornstein anderer Länge installiert, ist es im ungünstigen Fall möglich, dass die geforderten Immissionsrichtwerte nicht eingehalten werden können. Dieser Sachverhalt ist beispielhaft in Abbildung 34 (Variante 2, orange Kurve) aufgezeigt. Dabei wurde das ausgelegte Schalldämpfersystem bei der Modellierung zwischen das BHKW und einen 5,1 m langen Schornstein installiert (vgl.

Abbildung 35, rechts), was dazu führt, dass der lineare Terz-Schalldruckpegel im Terzband von 80 Hz den maximal zulässigen Schalldruckpegel (schwarze Kurve) übersteigt und tieffrequente Lärmprobleme verursacht. Wird jedoch die Auslegung von Schalldämpfern auf der Basis des kompletten spezifischen Abluftsystems unter realen Betriebsbedingungen, insbesondere bei Berücksichtigung der spezifischen Schornsteinlänge, durchgeführt, können die schallimmissionsbezogenen Richtwerte eingehalten und tieffrequente Lärmprobleme dieser Art vermieden werden.

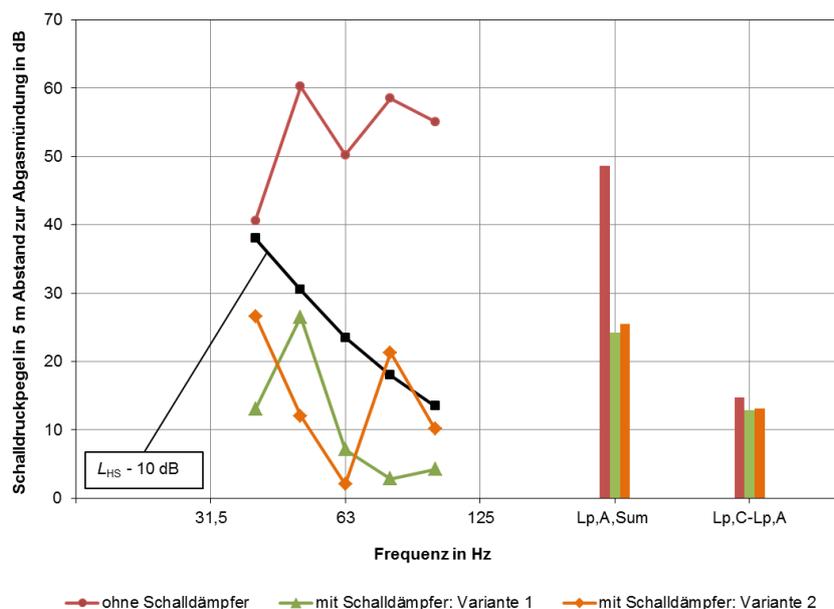


Abbildung 34: Lineares Schalldruckpegelspektrum, A-bewerteter Gesamtschalldruckpegel sowie Differenz zwischen C-bewertetem und A-bewertetem äquivalenten Dauerschalldruckpegel in 5 m Abstand zur Mündung des Schornsteins des BHKW; rot: ohne sekundäres Abgasschalldämpfersystem; grün/orange: mit sekundärem Abgasschalldämpfersystem, Richtwerte eingehalten/nicht eingehalten

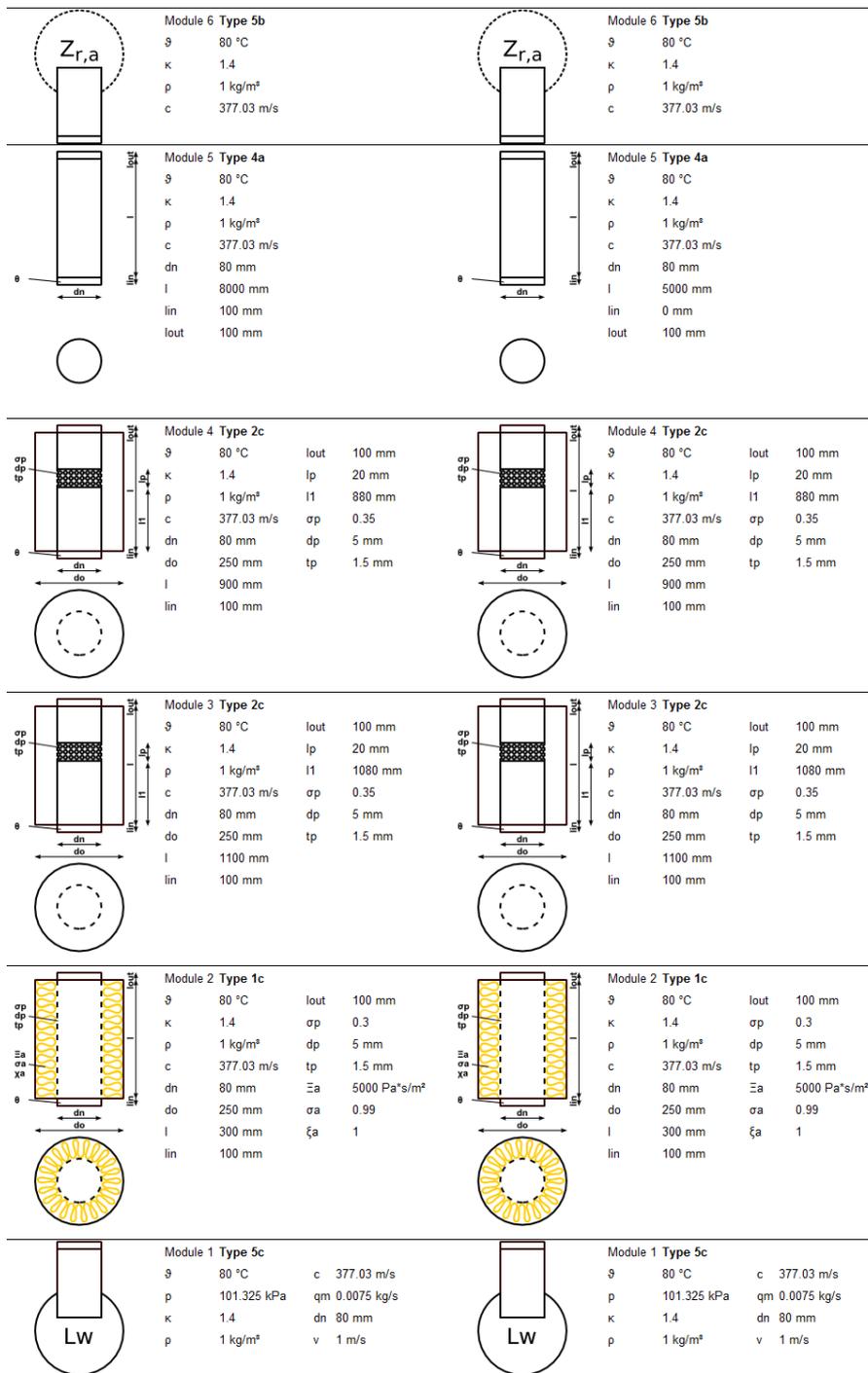


Abbildung 35: Links: Auslegung eines Abgasschalldämpfersystems bestehend aus zwei Resonanz-Schalldämpfern und einem Absorptionsschalldämpfer durch schalltechnische Modellierung des gesamten Abluftsystems, beginnend beim BHKW (Schallquelle) über die Schalldämpfer und den Schornstein bis zur Schornsteinmündung (schalltechnischer Abschluss), unter realen Betriebsbedingungen; Links: Installation des Schalldämpfersystems zwischen BHKW und 8,2 m langem Schornstein (vgl. Abbildung 34, Variante 1); Rechts: Installation des Schalldämpfersystems zwischen BHKW und 5,1 m langem Schornstein (vgl. Abbildung 34, Variante 2)

6.2.5 Zusammenfassung

Die an der Mündung des Schornsteins von BHKW emittierte Schalleistung kann durch Schalldämpfer effektiv reduziert werden. Dazu ist es erforderlich, den Schalldämpfer auf das Spektrum des vom BHKW verursachten Mündungsschalls fachgerecht auszulegen. Während eine breitbandige Dämpfung mit Absorptionsschalldämpfern realisiert werden kann, ist die gezielte Dämpfung einzelner tieffrequenter Komponenten ohne Verursachung eines zu hohen Druckverlusts mittels Resonanzschalldämpfer möglich. Bei der Auslegung muss unbedingt das Gesamtsystem betrachtet werden. Es hat sich gezeigt, dass der Einsatz eines Schalldämpfers bei gleichzeitiger Änderung der Länge des Gesamtsystems auch zu einer Verringerung der Minderungswirkung im tieffrequenten Bereich führen kann.

Es ist zu bedenken, dass Schalldämpfer mit einer hohen schalltechnischen Wirkung im tieffrequenten Bereich („worst case-Szenario“) große Dimensionen erreichen können (vgl. Abbildung 32). Eine platzsparende Alternative zu konventionellen passiven Schalldämpfern stellen hier aktive Systeme dar. Diese eignen sich besonders zur Minderung tiefer Frequenzen, sind jedoch u. U. etwas kostenintensiver als passive Systeme.

6.3 Kapselung

Mit Hilfe einer schalldämmenden Kapsel ist es möglich, die Schallausbreitung einer Lärmquelle einzuschränken. Die Lärmquelle wird dafür von schalldämmend und schalldämpfend ausgebildeten Kapselwänden umschlossen. Der vom Motor des BHKW erzeugte Lärm kann durch eine Kapselung wirkungsvoll reduziert werden. Abbildung 36 zeigt schematisch die Kapselung eines Motors, wobei der Motor stellvertretend für alle Komponenten eines BHKW steht.

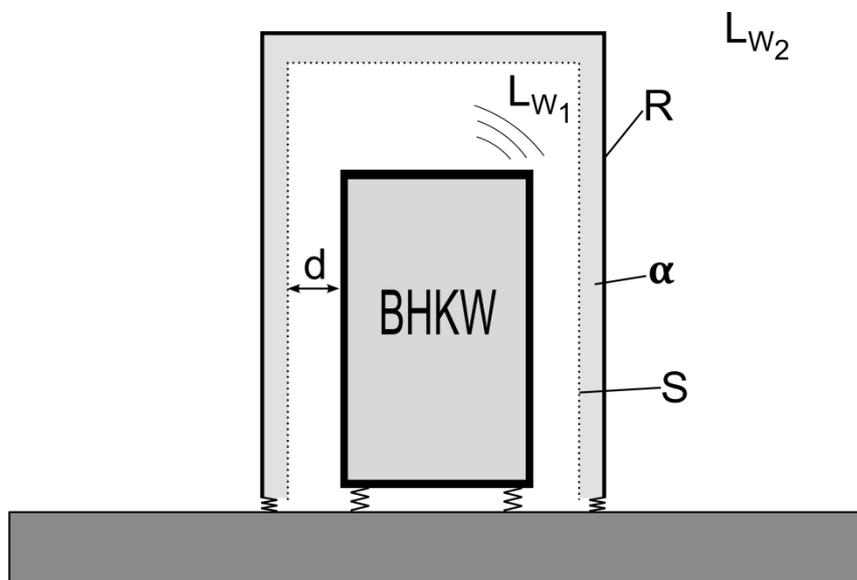


Abbildung 36: Kapselung eines BHKW

Ein Maß für die schalltechnische Wirksamkeit einer Kapsel ist das Einfügungsdämmmaß

$$D_{eK} = L_{W1} - L_{W2}, \quad (33)$$

das sich aus der Differenz des abgestrahlten Schalleistungspegels der Quelle ohne Kapsel L_{W1} und des abgestrahlten Schalleistungspegels der Quelle mit Kapsel L_{W2} ergibt. Um ein möglichst hohes Einfügungsdämmmaß der Kapsel zu erreichen, müssen alle Wege einer möglichen Übertragung ausreichend körperschallisoliert werden. Die Pegelsenkung ΔL_K durch die Kapselwand berechnet sich zu

$$\Delta L_K = R - 10 \cdot \lg\left(\frac{S_K}{\alpha \cdot S_A}\right) \text{ dB}, \quad \alpha \gg \tau \quad (34)$$

mit:

- R Luftschalldämmmaß der Kapselwände
- α Absorptionsgrad der schallabsorbierend ausgekleideten Kapselwände
- τ Transmissionsgrad der Kapselwände
- S_A Oberfläche der schallabsorbierend ausgekleideten Kapselwände ($S_A \leq S_K$)
- S_K Oberfläche aller Kapselwände (ohne Öffnungen)

Wie aus Gleichung (34) ersichtlich ist, erfordert eine hohe Pegelsenkung durch die Kapselwand sowohl eine hohe Luftschalldämmung als auch einen hohen Schallabsorptionsgrad der Kapselinnenwände. Wird die schalltechnische Wirksamkeit der Kapselwand nicht durch unzureichende Körperschallisolation oder durch Undichtigkeiten herabgesetzt, so entspricht die Pegelsenkung durch die Kapselwand der Einfügungsdämpfung der Kapsel:

$$D_{eK} = \Delta L_K. \quad (35)$$

Die wichtigsten Einflussfaktoren für die Konstruktion einer wirksamen Kapsel sind dementsprechend:

- Luftschalldämmung der Kapselwand R und deren Biege-Verlustfaktor
- Absorptionsgrad α des Absorptionsmaterials auf der Kapselinnenseite (dissipativer Anteil)
- Körperschallisolation der Kapselwand
- Anteil der Öffnungen und Undichtigkeiten der Kapselfläche

Die Luftschalldämmung R ist eine frequenzabhängige Größe und sollte an die Schalleistung der Maschine L_{W1} angepasst sein. Eine wirksame Kapselwand hat ein hohes Flächengewicht, geringe Biegesteifigkeit und einen hohen Biegeverlustfaktor. Modelle zur Berechnung der Luftschalldämmung von Kapselwänden sind u. a. in SCHIRMER [1996] zu finden. Weil es sich bei Kapselwänden z. T. um Bleche mit begrenzten Abmessungen handelt, ist eine Entdröhnung notwendig. Meist ist jedoch schon die schallabsorbierende Kapselinnenauskleidung ausreichend. Ist dies nicht der Fall, so ist eine zusätzliche Entdröhnung mittels Spritzmasse oder Schwerfolie mit hohem Flächengewicht möglich. Weil bei BHKW tieffrequente Anteile im Spektrum als besonders kritisch behandelt werden müssen, sei an dieser Stelle angemerkt, dass u. U. eine gezielt ausgelegte Doppelwandkonstruktion zum Ziel führen kann. Maßgeblich ist hierbei jedoch, dass die Masse-Feder-Masse-Resonanz der Doppelwand sehr tieffrequent ausgelegt werden muss.

Der Schallabsorptionsgrad α des Absorptionsmaterials auf der Kapselinnenseite beschreibt die frequenzabhängige schalltechnische Wirksamkeit des Absorbers. Ohne Absorber oder ohne Entdröhnung kommt es zur maßgeblichen Verschlechterung der Wirksamkeit der Kapsel.

Die Summe der Fläche aller Öffnungen und Undichtigkeiten stellt bei sonst optimalem Wandaufbau den begrenzenden Faktor dar. Die Kapsel sollte daher möglichst wenig und wenn, dann nur kleine Öffnungen haben (vgl. Tabelle 16). Besonders kritisch in Bezug auf Undichtigkeiten sind Rohrdurchführungen, weil sie zusätzlich Körperschallentkoppelt von der Kapselwand eingebracht werden müssen. Einige prinzipielle Möglichkeiten von isolierenden Rohrdurchführungen werden in Abbildung 37 gezeigt.

Tabelle 16: Maximal erreichbare Einfügungsdämmung bei optimalem Wandaufbau in Abhängigkeit von der Fläche der Öffnungen [LIPS 2008-2]

Summe der Fläche aller Öffnungen in Prozent der Gesamtkapsel­fläche	Erzielbares Einfügungsdämmmaß bei optimalem Wandaufbau
0,01 %	ca. 40 dB
0,1 %	ca. 30 dB
1 %	ca. 20 dB
10 %	ca. 10 dB

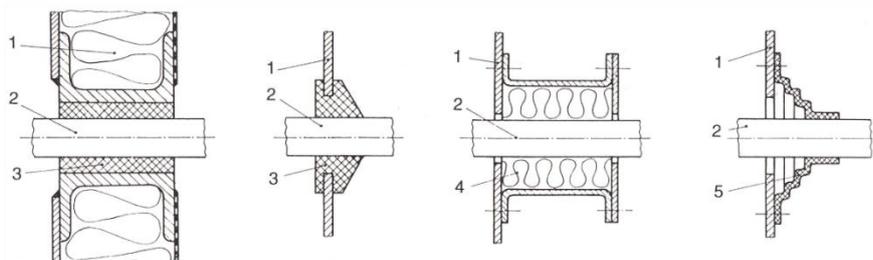


Abbildung 37: Möglichkeiten zur isolierten Durchführung einer Rohrleitung durch eine Kapselwand [SCHIRMER 1996]; 1: Kapselwandung bzw. Kapsel aus Stahlblech, 2: Rohrleitung, 3: Formstück aus Gummi oder elastischem Kunststoff, 4: Fasermaterial z. B. Mineral-, Basalt- oder Glaswolle, 5: Gummimanschette

Ebenso sollten Klappen und Türen mit Dichtungen versehen sein; um Undichtigkeiten der Kapsel am Boden zu vermeiden, empfiehlt sich die Aufstellung der Kapsel auf vollständig abschließenden, weichen Gummielementen.

Zur Verringerung der direkten Körperschallübertragung von der Maschine auf die Kapselwände sollte ein Mindestabstand d zwischen Motor und Kapselwand eingehalten werden:

$$d \geq \frac{10^7}{m'' \cdot f^2} \text{ mm} \quad (36)$$

mit:

■ m'' Flächengewicht der Kapselwand in kg/m^2

■ f niedrigste Frequenz in Hz, bei der noch Anforderung an Schalldämmmaß aufgestellt werden kann

Die Kapselwand muss vollständig vom Motor und anderen schwingenden Teilen entkoppelt sein, weil sonst Körperschall von der Kapseloberfläche als Luftschall in die Umgebung abgestrahlt wird. Der indirekte Weg der Körperschallübertragung über den Boden muss ebenfalls unterbunden werden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass alle innerhalb der Studie berücksichtigten BHKW bereits mit einer Kapselung herstellerseitig ausgestattet waren.

Eine ausführliche und praxisnahe Betrachtung des Themas Kapselung mit diversen Dimensionierungsbeispielen wird in LIPS [2008-2] gegeben. Eine vertiefende Ausführung zu verschiedenen schalldämmenden Wandaufbauten und Schallschutzkapseln ist SCHIRMER [1996] zu entnehmen.

6.4 Körperschallisolation

6.4.1 Schwingungstechnische Entkopplung des Fundaments vom Aggregat

Die Kraftanregung des Motors eines BHKW führt zu einer Übertragung der Schwingungen in das Fundament, die durch den Einsatz einer Körperschallisolation reduziert werden muss. Eine Körperschallisolation kann als Feder-Masse-System beschrieben werden. Federnde Elemente sind durch die Federsteifigkeit s und die Dämpfungskonstante r charakterisiert. Die Masse m_1 wird durch die Kraft F angeregt und überträgt die Energie auf eine zweite Masse m_2 . Genau diese Übertragung soll durch die Körperschallisolation minimiert werden.

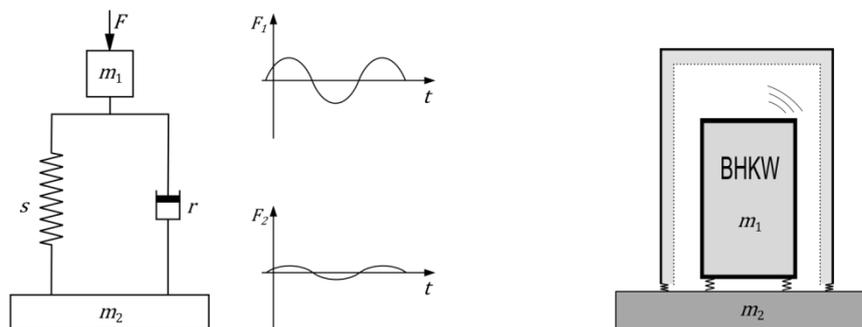


Abbildung 38: Links: Kraftangeregtes Feder-Masse-System; Rechts: Reales Feder-Masse-System

Als Ausgangssituation liegt ein schwingendes System mit einem bestimmten Anregungsspektrum vor. Jedes Feder-Masse-System besitzt eine Resonanzfrequenz f_{res} , an deren Stelle die Schwingungsübertragung ihr Maximum aufweist. Entscheidend für die Körperschallisolation ist das Verhältnis der Erregerfrequenz f zur Eigenfrequenz f_{res} des Feder-Masse-Systems. Die elastische Lagerung kann dabei so ausgelegt werden, dass die Erregerfrequenzen über der Resonanzfrequenz f_{res} des Systems liegen. Diese Abstimmung wird auch als überkritische Abstimmung bezeichnet.

Die Resonanzfrequenz f_{res} ergibt sich aus der Federsteifigkeit s des Dämpfungselementes, der Gesamtmasse des schwingenden Systems m_1 (BHKW) und der Gesamtmasse des Fundaments m_2 nach BFE [2002] zu:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{s \cdot \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (37)$$

Bei optimaler Aufstellung auf einem festen Fundament mit sehr großer Masse kann die Masse m_2 vernachlässigt werden, sodass:

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m_1}} \quad \text{für} \quad m_2 = 10m_1. \quad (38)$$

Nach MÖSER [2009] ergibt sich die Federsteifigkeit s aus dem Elastizitätsmodul (E-Modul) E des Materials und den Abmessungen des Elementes, wobei davon ausgegangen wird, dass der Elastizitätsmodul eine konstante Größe der Feder ist:

$$s = \frac{E \cdot S}{L_0} \quad (39)$$

mit:

- S Fläche des Dämmmaterials
- L_0 Länge der Feder (Dicke des Materials)

Die Dämpfungskonstante r lässt sich wie folgt in einen dimensionslosen Verlustfaktor umrechnen:

$$\eta = \frac{r \cdot 2\pi \cdot f_{\text{res}}}{s} \quad (40)$$

Ein Maß für die Körperschallisolation ist das Einfügungsdämmmaß R_E , das die Dämmung durch die eingefügte elastische Lagerung beschreibt. Das Einfügungsdämmmaß R_E einer Körperschallisolation ist maßgeblich vom Verhältnis der Erregerfrequenz f zur Eigenfrequenz des Systems f_{res} und dem Verlustfaktor η abhängig. Abbildung 39 zeigt den frequenzabhängigen Verlauf des Einfügungsdämmmaßes R_E für verschiedene Verlustfaktoren η .

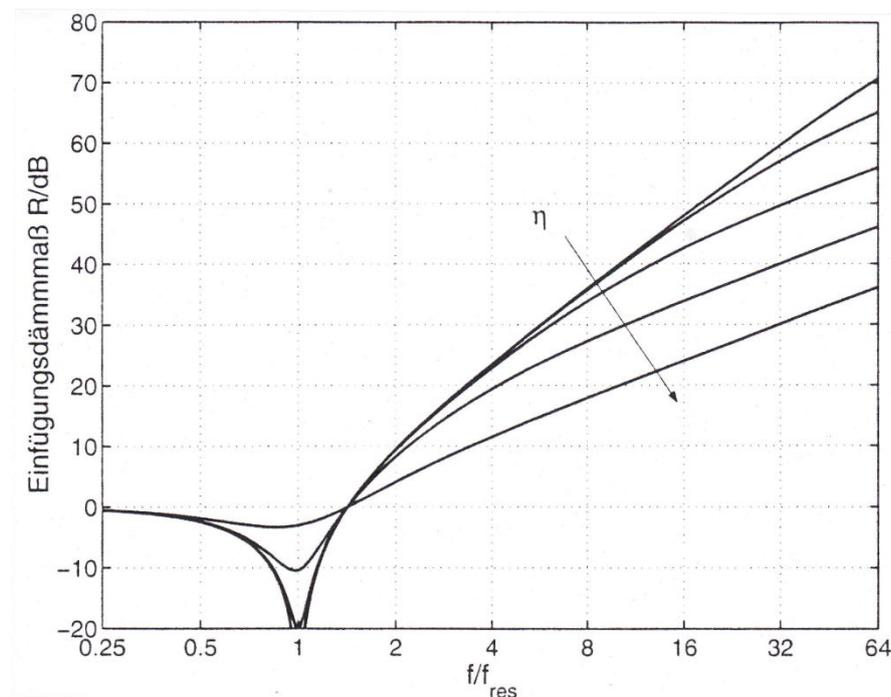


Abbildung 39: Theoretisches Einfügungsdämmmaß der Körperschallisolation bei starrem Fundament, $\eta = 0,01; 0,0316; 0,1$ und $0,316$, aus MÖSER [2009]

Unterteilt man den Frequenzgang von R_E in vier Bereiche, so lässt sich der Verlauf wie folgt zusammenfassen:

- $f < f_{res}$ keine Wirkung unterhalb der Resonanz
- $f \approx f_{res}$ Verstärkung der Körperschallübertragung, steigender Verlustfaktor η bewirkt geringere Verstärkung
- $f > f_{res}$ Anstieg von R_E mit 12 dB/Oktave, steigender Verlustfaktor verkleinert diesen Bereich
- $f \gg f_{res}$ Anstieg von R_E mit 6 dB/Oktave

Es wird deutlich, dass es erforderlich ist, die Körperschallisolation so zu dimensionieren, dass die Resonanzfrequenz unter den Frequenzen des Anregungsspektrums liegt. Die Körperschallisolation wirkt sich für $f/f_{res} < \sqrt{2}$ sogar negativ aus. Ein steigender Verlustfaktor stellt im Bereich $f/f_{res} > \sqrt{2}$ eine Verschlechterung der Körperschallisolation dar. Materialien bzw. Federn mit geringen Verlustfaktoren können in diesem Bereich die Wirkung also deutlich erhöhen. Liegen Frequenzen des Anregungsspektrums jedoch im Bereich der Resonanzfrequenz, kommt es bei geringeren Verlustfaktoren zu einer größeren Verstärkung.

Praktische Auslegung der Dämpfungselemente

Aus schalltechnischer Sicht ist die Auslegung von Dämpfungselementen unkompliziert. Dämpfungselemente können z. B. aus Gummi (Elastomere) gefertigt sein, ebenso ist der Einsatz von Stahlfedern, Stahlseitenelementen oder Luftfedern möglich.

Abbildung 40 zeigt Beispiele verschiedener Federelemente.

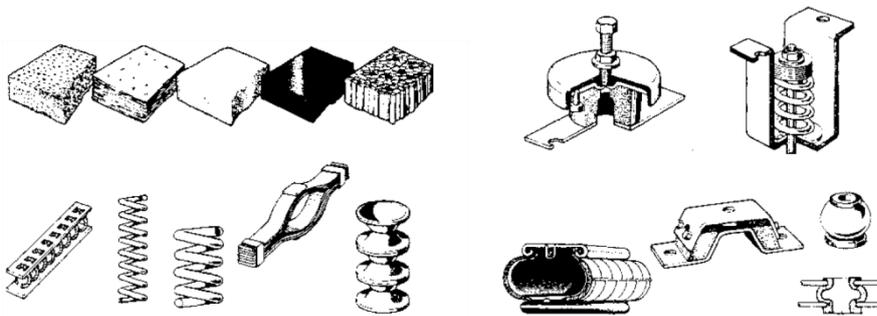


Abbildung 40: Beispiele von Federelementen, aus MÖSER [2009]

Die Nennlast bzw. der statische Druck p_{stat} der zu isolierenden Maschine, also des BHKW, berechnet sich wie folgt:

$$p_{stat} = \frac{m_1 \cdot g}{S} \quad (41)$$

mit:

- m_1 Masse des BHKW
- g Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- S Auflagefläche der Maschine in m^2 .

Ist die Forderung der maximalen Nennlast erfüllt, ist eine Berechnung der Federsteifigkeit s nach Gleichung (39) möglich, woraus sich nach Gleichung (37) bzw. (38) die Resonanzfrequenz des Systems ergibt. Der für die Berechnung der Federsteifigkeit erforderliche E-Modul wird von den Herstellern in der Regel angegeben. Einige Hersteller geben die Resonanzfrequenz ihrer Dämpfer direkt an. Prinzipiell ist es empfehlenswert, die

berechneten Ergebnisse bzw. die vom Hersteller angegebenen Werte anhand von Messungen zu überprüfen, vgl. Abschnitt 4.3.

Die sehr tieffrequenten Anregungsfrequenzen der BHKW erfordern Isolatoren mit geringer Steifigkeit. Mit Verringerung der Steifigkeit vermindert sich bei Elastomeren auch die Tragfähigkeit. Aus diesem Grund empfehlen sich für den sehr tieffrequenten Einsatz Stahl- und Luftfedern, weil sie trotz geringer Steifigkeit noch über eine ausreichende Tragfähigkeit verfügen. Bei der Auslegung sollte außerdem beachtet werden, dass der Motor beim Hochlauf die Resonanzfrequenz des Systems durchfährt. Daher ist eine ausreichende Dämpfung des Systems erforderlich.

Der Einsatz von Schwingungsisolatoren ist nur dann wirksam, wenn alle Übertragungswege vollständig unterbrochen sind. Ungewollte Übertragungswege von Körperschall werden auch als Körperschallbrücken bezeichnet. Sie sind unbedingt zu vermeiden. Ist die Quelle aus schwingungstechnischer Sicht nicht vollständig von ihrer Umgebung getrennt, ist die Entkopplung vollständig oder teilweise wirkungslos. Körperschallbrücken sind harte, metallische Verbindungen, dazu zählen z. B. Schrauben, Niete, Schweißnähte, starre Rohre.

Die Wirkung der Schwingungsisolation ist darüber hinaus von der mechanischen Eingangsimpedanz des Blockfundaments oder auch der Bodenplatte abhängig. Für eine exakte Angabe zu Betrag und Phase dieser Impedanz müssten Daten zur Quellimpedanz eines BHKW vorliegen. Dazu konnten die Hersteller jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine Angaben machen. Aufgrund dieses Kenntnisstandes muss daher auf eine ingenieurtechnische Regel zurückgegriffen werden, wonach die Masse des steifen Unterbaus in etwa dem 10-Fachen des Gerätes entsprechen soll. Bei einer Masse von 500 kg für ein BHKW ist daher für ein Blockfundament oder eine Bodenplatte aus Beton (Dichte von 2.300 kg/m^3) mit einem Volumen von ca. $2,2 \text{ m}^3$ zu rechnen. Dabei ist zu beachten, dass die unterste Eigenfrequenz des Bauteiles oberhalb des Frequenzbereichs der dominanten Anteile der Schwingungsanregung durch das BHKW liegt.

6.4.2 Körperschallentkopplung von Rohren und Leitungen

Der Eintrag von Körperschall auf Rohrleitungen durch Körperschallquellen kann durch das Einbringen einer körperschallweichen Rohrleitung verhindert werden. Sogenannte Kompensatoren wie Kunststoffmanschetten, Gummikompensatoren oder flexible Gummischläuche stellen eine Möglichkeit der Entkopplung dar.

Eine weitere Möglichkeit der Körperschalldämmung ist das Anbringen sogenannter Sperrmassen. Sperrmassen sind zusätzliche, außen am Rohr angebrachte Massen, die eine Reflexion der Körperschallwellen verursachen. Es ist wichtig, dass die gegenüber der Rohrmasse relativ große Sperrmasse möglichst rings um das Rohr starr befestigt ist.

Um Körperschallübertragung von Rohren auf Wände, Decken und andere Träger zu vermeiden, ist die körperschallisolierende Befestigung von Rohrleitungen notwendig. Elastische Befestigungen können aus Gummi, Federn oder deren Kombination gefertigt sein. Eine elastische Lagerung des Rohrs in der Schelle durch Filz, Kork, Vollgummi oder Zahngummi ist ebenso körperschallmindernd. Für Decken- und Wanddurchführungen sind spezielle Muffen in verschiedenen Ausführungen erhältlich, die neben der Körperschallisolation auch den direkten Übertragungsweg des Luftschalls verhindern. Eine ausführliche Erläuterung des Themas ist u. a. in LIPS [2008-1] zu finden.

6.5 Trenndecken, Trennwände

Eine Berechnung der trennenden Elemente erfolgt zum heutigen Zeitpunkt nach den Beiblättern der DIN 4109 oder nach DIN EN 12354-1 bzw. DIN EN 12354-2. Die in der Norm DIN 4109 und der VDI 4100 geforderten Luftschalldämmwerte können mit einem etwas höheren bautechnischen Aufwand durchaus erzielt werden. Ein für die Auslegung von trennenden Bauteilen in der Umgebung von BHKW spezifisches Problem stellt jedoch die Transmission tieffrequenten Lärms dar. Die eingangs genannten Normen zur Berechnung der Schalldämmung beruhen auf der Berücksichtigung eines den beteiligten Bauteilen zugeordneten Leistungsflusses und der Annahme eines diffusen Schallfeldes in den angrenzenden Räumen. Diese Annahme gilt dann, wenn im Schallfeld des Raumes innerhalb der betrachteten Terz eine ausreichende Anzahl von Eigenfrequenzen im Raum angeregt worden ist. Für die Transmission tieffrequenten Lärms in einen benachbarten Raum verliert die Annahme jedoch ihre Gültigkeit, weil in diesem Frequenzbereich, z. B. 30 Hz, und für die zu erwartenden Raumdimensionen nur eine sehr geringe Anzahl von angeregten Eigenfrequenzen zu erwarten ist. Ein Ausweg stellt hier die Berechnung der Schalldämmung mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente dar. Dazu wurden u. a. innerhalb der Arbeiten von JERUSEL [2010] und LINDENMANN [2011] Untersuchungen durchgeführt. Hierbei zeigte sich jedoch, dass, neben einer deutlichen Erhöhung des Rechenaufwandes, zum gegenwärtigen Zeitpunkt die Genauigkeit der Aussagen nicht verbessert werden konnte. Dies ist maßgeblich auf nur unzureichend bekannte Randbedingungen bei der Beschreibung der Quelle und des Wandaufbaus zurückzuführen.

Für eine Verbesserung der Qualität der Aussagen müssten nunmehr unter Berücksichtigung der Norm zur Bewertung tieffrequenten Lärms [DIN 45680] entsprechende weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Studie sollte aber dennoch zur Abschätzung des in dem zum BHKW benachbarten Raum zu erwartenden mittleren Standard-Maximalpegels $L_{AFmax,nT}$ auf das Verfahren nach DIN EN 12354-1 zurückgegriffen werden.

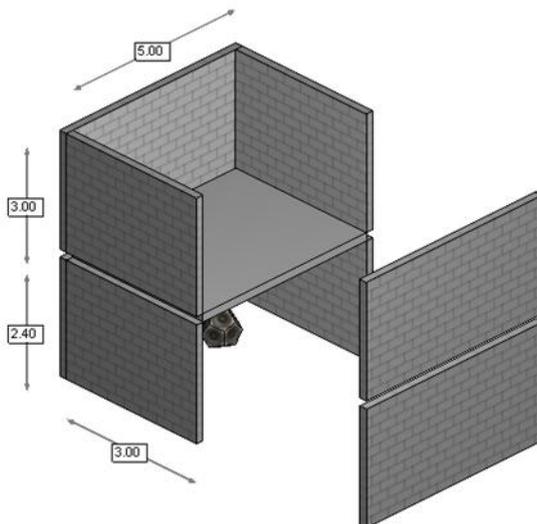


Abbildung 41: Eingabemodell für die innerhalb der Studie ausgewählte bautechnische Konstellation, Software BASTIAN

Die Berechnung wurde beispielhaft nur für eine Raum-zu-Raum-Konstellation vorgenommen. Die Abmessungen der hierbei betrachteten Räume sind der Abbildung 41 zu entnehmen. Anhand der Berechnung der „Schröderfrequenz“ konnte abgeschätzt werden, dass in den Räumen ein ausreichend diffuses Schallfeld erst oberhalb einer Frequenz von 235 Hz gegeben ist. Als trennendes Bauteil ist innerhalb der Modellierung eine Betondecke mit einer Dichte von 2.400 kg/m^3 betrachtet worden. Die flankierenden Bauteile sind derart gewählt, dass die Schallübertragung maßgeblich über die Trenndecke erfolgt. Zur Beurteilung der schalltechnischen Wirksamkeit sind die Empfehlungen nach VDI 4100 der Schallschutzstufen SSt I bis III in Mehrfamilienhäusern (Tabelle 4) herangezogen worden. Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurde die Dicke der Decke fiktiv variiert. Für die Schallschutzstufe SSt I beträgt die Dicke der Decke somit 180 mm, für die SSt II 230 mm und für die SSt III 290 mm.

Tabelle 17: Berechnung der Normschallpegeldifferenz $D_{nT,w}$, des mittleren Standard-Maximalpegels $L_{AFmax,nT}$ nach DIN EN 12354-1 und der Schalldruckpegeldifferenz $L_{Ceq} - L_{Aeq}$;

- rot: Werte nach VDI 4100 ($L_{AFmax,nT}$ siehe Tabelle 4) bzw. TA-Lärm ($L_{Ceq} - L_{Aeq} < 20 \text{ dB}$) überschritten;
- grün: Werte nach VDI 4100 bzw. TA-Lärm eingehalten;
- rosa: Werte nach Entwurf DIN 45680 überschritten ($L_{Ceq} - L_{Aeq} < 15 \text{ dB}$)

	1			2			3			4		
	Gasmotor $P_{el} = 17 \text{ kW}$			Gasmotor $P_{el} = 19 \text{ kW}$			Gasmotor $P_{el} = 7,5 \text{ kW}$			Dieselmotor $P_{el} = 10 \text{ kW}$		
	SST I	SST II	SST III	SST I	SST II	SST III	SST I	SST II	SST III	SST I	SST II	SST III
$D_{nT,w} [\text{dB}]$	56,5	59,1	64,7	56,5	59,1	64,7	56,5	59,1	64,7	56,5	59,1	64,7
$L_{Aeq} [\text{dB(A)}]$	16,5	13,9	8,2	18,0	15,8	9,6	10,2	5,0	-0,5	33,7	30,8	24,7
$L_{Ceq} [\text{dB(C)}]$	30,1	27,8	19,8	36,5	37,3	26,8	30,2	22,4	16,4	52,8	50,5	41,7
$L_{Ceq} - L_{Aeq} [\text{dB}]$	13,6	13,9	11,6	18,5	21,5	17,2	20,0	17,4	16,9	19,1	19,7	17,0

Zur Berechnung der Schalleistungsspektren sind die in Abbildung 9 angegebenen Daten (Schalldruckpegel in 1 m Entfernung) für die in Tabelle 17, Zeile 2 angegebenen BHKW verwendet worden (nur Dieselmotor $P_{el} = 10 \text{ kW}$ und Gasmotor $P_{el} = 7.5 \text{ kW}$ zählen zu Mikro-BHKW). In Zeile 4 dieser Tabelle ist zunächst ersichtlich, dass die Anforderungen der jeweiligen Schallschutzstufen durch die gewählte Deckenkonstruktion erfüllt werden kann. Zur Berechnung des Standard-Maximalpegels $L_{AFmax,nT}$ ist im Empfangsraum eine Nachhallzeit von $T = 0.5 \text{ s}$ gewählt worden. Weil die von den BHKW im Modell emittierten Geräusche als stationär bezüglich des Effektivwertes eingeordnet werden können und in den Räumen keine Eigenformen berücksichtigt werden, entsprechen in diesem Beispiel die in Tabelle 17, Zeile 5 angegebenen Werte für den äquivalenten Dauerschalldruckpegel L_{Aeq} denen des mittleren Standard-Maximalpegels $L_{AFmax,nT}$. Ein Vergleich der in der Zeile 5 der Tabelle angegebenen Ergebnisse mit den Empfehlungen nach VDI 4100 für Mehrfamilienhäuser in Tabelle 4 zeigt, dass für den Dieselmotor ($P_{el} = 10 \text{ kW}$) für jede Schallschutzstufe eine Überschreitung der empfohlenen Werte beobachtet werden muss (rote Kennzeichnung). Die für die weiteren BHKW berechneten Werte des äquivalenten Dauerschalldruckpegels L_{Aeq} sind zum Teil sehr gering ($< 15 \text{ dB(A)}$). Diese Pegelwerte sind in der Realität messtechnisch nicht nachweisbar.

Die Überschreitungen der empfohlenen Werte betragen im hier diskutierten Beispiel in etwa 4 dB. Bei einer Reduzierung der Schalleistung des BHKW mit Dieselmotor ($P_{el} = 10 \text{ kW}$) um diesen Wert könnten die empfohlenen Werte nach VDI 4100 gerade eingehalten werden. Die eingangs geführte Diskussion über die Unzulänglichkeiten der hier angewendeten Modellierung im Bereich tiefer Frequenzen und die unterschiedliche spektrale Verteilung der dominanten Energieanteile für die verschiedenen BHKW führt zu dem Schluss, dass eine weitaus stärkere Reduzierung der vom Aggregat abgestrahlten Schalleistung erfolgen müsste. Der am Dieselmotor ($P_{el} = 10 \text{ kW}$) gemessene Aggregatschall in 1 m Entfernung beträgt ca. 73 dB(A). Abbildung 11 zeigt den in 1 m Entfernung gemessenen A-bewerteten Schalldruckpegel der in der hier vorliegenden Studie

erfassten Mikro-BHKW. Aus dieser Zusammenfassung ist ersichtlich, dass nur eine geringe Anzahl von BHKW den Wert von 60 dB(A) überschreitet. Die Einführung eines Grenzwerts bei diesem Wert wäre daher auf der Basis der Betrachtung des Standes der Technik durchaus gerechtfertigt.

Grundsätzlich sei jedoch an dieser Stelle angemerkt, dass die Berücksichtigung eines derartigen Grenzwerts nicht automatisch zur Einhaltung der bauakustischen Anforderungen führen muss. Hierzu sollten in einer weiterführenden Studie vertiefende Untersuchungen zur Schalldämmung der Bauteile im Bereich tiefer Frequenzen durchgeführt werden.

In der Zeile 7 der Tabelle 17 ist abschließend die Differenz $L_{Ceq} - L_{Aeq}$ dargestellt. Nimmt diese Differenz den Wert von größer oder gleich 20 dB an, soll nach DIN 45680 geprüft werden, ob das aufgenommene Geräusch als tieffrequent eingeordnet (Kennzeichnung in Tabelle 17: „rot“) werden muss. Dieser Grenzwert wurde aktuell im Entwurf von DIN 45680 auf 15 dB reduziert (Kennzeichnung in Tabelle 17: „rosa“). Auf die exakte Prüfung nach DIN 45680 wurde hier verzichtet, weil, wie eingangs beschrieben, die Genauigkeit der Berechnung besonders im tieffrequenten Bereich stark abnimmt. Jedoch soll anhand der Kennzeichnung „rot“ und „rosa“ in Zeile 7 verdeutlicht werden, dass die in den Empfangsraum transmittierten Geräusche durchaus als tieffrequent eingestuft werden könnten.

6.6 Einordnung der Maßnahmen

Zum Vergleich der verschiedenen Lärminderungsmaßnahmen soll eine qualitative Gegenüberstellung der schalltechnischen Wirksamkeit und der für die Anschaffung und Installation erforderlichen Kosten erfolgen. Tabelle 18 und Tabelle 19 zeigen diese Gegenüberstellung für die Planungsmaßnahmen bzgl. des Außenlärms und des Innenlärms.

Tabelle 18: Planungsmaßnahmen Außenlärm

Problem	Maßnahme	Kosten	Nutzen
von der Mündung des Schornsteins des BHKW in Umgebung abgestrahlter Luftschall mit überwiegend tonalen tieffrequenten Komponenten	Absorptionsschalldämpfer	mittel	mittel
	Resonanzschalldämpfer	mittel	hoch
	Aktiver Schalldämpfer	hoch	hoch
von der Mündung des Schornsteins des BHKW in Umgebung abgestrahlter Luftschall ohne auffallende tonale Komponenten	Absorptionsschalldämpfer	mittel	hoch
	Resonanzschalldämpfer	mittel	mittel
	Aktiver Schalldämpfer	hoch	gering
von Hauswand oder Fenstern abgestrahlter Luftschall mit überwiegend tonalen tieffrequenten Komponenten	Verbesserung nach außen Schalldämmung	mittel - hoch	mittel - hoch

Tabelle 19: Planungsmaßnahmen Innenlärm

Problem	Maßnahme	Kosten	Nutzen
von Aggregat des BHKW eingetragener Körperschall, der in benachbarten Räumen zur Luftschallabstrahlung von massiven Bauteilen führt	Aufstellung Aggregat auf Gummifedern	gering	mittel
	Aufstellung Aggregat auf Stahlfedern	mittel	hoch
	Aufstellung Aggregat auf Luftfedern	mittel	hoch
	Entkopplung Rohrleitungen vom Aggregat (Kompensatoren)	gering	hoch
	Entkopplung Rohrleitungen vom Gebäude (Rohraufhängung)	gering	mittel
	massives Fundament	mittel	hoch
von Aggregat des BHKW emittierter Luftschall, der in benachbarten Räumen zur Erhöhung des Innenraumpegels führt	zusätzliche Kapselung des Aggregats	hoch	hoch
	abgehängte Decke	mittel	mittel
	Einbau Tür mit hoher Schalldämmung	hoch	mittel - hoch

7 Zusammenfassung

Einsatz von BHKW in Wohngebieten

In den meisten Fällen werden zum gegenwärtigen Zeitpunkt Mikro-BHKW wärmegeführt betrieben. Ein wärmegeführtes BHKW arbeitet heizbedarfsdeckend, d. h. es schaltet sich ein, wenn Wärmebedarf vorhanden ist. Der anfallende Strom wird entweder verbraucht oder ins Netz eingespeist. BHKW dieser Art sind vorrangig für den Betrieb in Einfamilienhäusern konzipiert, wobei ein zusätzlicher Brenner zur Deckung des Wärmebedarfs im Winter häufig schon im Gerät integriert ist. Für zukünftige Anwendungen ist jedoch durchaus zu erwarten, dass BHKW netzgeführt arbeiten. Dabei wird die Idee des virtuellen Kraftwerks, auch als Schwarmkraftwerk bezeichnet, aufgegriffen. Mehrere kleine, dezentrale Stromerzeugungseinheiten werden zusammengeschaltet und bilden zentral gesteuert einen Verbund mit der Leistung eines Großkraftwerkes. BHKW könnten dabei vor allem zur Spitzenlastdeckung eingesetzt werden. Sowohl technische Herausforderungen bei der Steuerung und Einbindung der Einzelgeräte als auch die fehlende Bereitschaft von Hausbesitzern, die Steuerung ihrer Anlagen aus der Hand zu geben, verhindern derzeit den großflächigen Einsatz. Grundsätzlich muss jedoch davon ausgegangen werden, dass sich der Betrieb von BHKW in Wohngebieten durchsetzen könnte. Weil die Anlagen in wärmegeführter, aber auch netzgeführter Betriebsart zur Stromerzeugung und zum Stromverkauf herangezogen werden, müssen sie nach den Maßgaben des Bundesimmissionsgesetzes nach TA Lärm beurteilt werden.

Schallquellen

Als Hauptquellen der Luftschallemission konnte an den innerhalb dieser Studie untersuchten Mikro-BHKW klar der vom Aggregat und der von der Kaminmündung abgestrahlte Schall identifiziert werden. Hierbei sind an Aggregaten im Leistungsbereich von 15 kW_{el} im akustischen Halbraum Schalldruckpegel in einer Entfernung

von 1 m von maximal ca. 70 dB(A) und minimal von ca. 50 dB(A) ermittelt worden. Für den Mündungsschall am Abgaskamin wurden in unmittelbarer Nähe (1 m) des Schornsteins im gleichen Leistungsbereich Werte zwischen 30 dB(A) und 65 dB(A) angegeben. Dabei ist zu beachten, dass besonders im tieffrequenten Bereich (30 Hz bis 125 Hz) deutliche energetisch dominante Anteile im Frequenzspektrum zu beobachten sind. Anhand der Daten der hier durchgeführten Arbeiten kann geschlossen werden, dass Stirling-Motoren im Vergleich zu Diesel- und Gasmotoren eine deutlich geringere Schallemission aufweisen können. Weiterhin bescheinigen die Ergebnisse den untersuchten BHKW mit Gasmotoren z. T. eine geringere Schallemission im Vergleich zu BHKW mit Dieselmotoren bei gleicher Leistung. An dieser Stelle muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass von den Herstellern keine Angaben zur schalltechnischen Wirksamkeit der an den untersuchten BHKW eingesetzten Kapselungen gemacht worden sind.

Die Hauptquelle für den Körperschall stellt der Motor dar. In die Studie sind lediglich exemplarisch die durch ein körperschallisoliert aufgestelltes BHKW erzeugten Schwingungen einer Bodenplatte aufgenommen und dargestellt worden. Hierbei wurde ein über die Bodenplatte gemittelter Effektivwert der Schwingschnelle von in ca. $1,5 \mu\text{m/s}$ im Terzband von 100 Hz ermittelt. Deutlich erkennbar ist dabei die Übertragung dominanter Motorordnungen auf die Bodenplatte. Wird nunmehr die Bodenplatte als biegesteif und aufgestützt angenommen und eine Fläche der Bodenplatte von 10 m^2 vorausgesetzt, kann im Terzband von 100 Hz ein Wert für die nur von der Bodenplatte abgestrahlte Schalleistung von ca. 40 dB geschätzt werden.

Ausbreitungspfade

Luftschall kann auf verschiedenen Ausbreitungswegen in das eigene Haus oder in benachbarte Häuser übertragen werden. Wie bereits erwähnt, sind die beiden Hauptquellen für Luftschall die Abgasmündung (Kamin) und das Aggregat selbst. Die häufigere Ursache für eine Lärmbelästigung in der Nachbarschaft ist dabei der Mündungsschall. Im eigenen Haus kann jedoch die Übertragung von tieffrequenten Komponenten durchaus zum Problem werden. Im Gegensatz zum Luftschall wird Körperschall fast ausschließlich ins eigene Haus übertragen. Dabei wird der Körperschall des BHKW-Aggregats über die Bodenplatte bzw. die Wand oder über Anschlussleitungen übertragen. Anhand der Erfahrungen dieser Studie lassen sich drei, die Schallimmission durch BHKW dominierende Schallübertragungswege angeben.

- Übertragung der vom Aggregat emittierten Schalleistung über Schornstein
 - Abstrahlung von Schalleistung $L_{w,Mündung}$ an der Mündung des Schornsteins
 - Schallausbreitung zu Fenstern
- Eintrag der vom Aggregat erzeugten Schwingungen in Bodenplatte oder Wand
 - Erzeugung einer Schwingschnelle $L_{v,Aggregat}$ auf Bodenplatte oder Wand
 - Übertragung der eingetragenen Schwingungen über Massivbauteile
 - Luftschallabstrahlung durch Massivbauteile in benachbarten Räumen
- Übertragung der vom Aggregat emittierten Schalleistung $L_{w,Aggregat}$ über Decken und Wände
 - Luftschallabstrahlung durch Massivbauteile in benachbarten Räumen

Schallemission

Schallabstrahlung vom Aggregat: Die meisten Hersteller geben Werte für den direkt von der Oberfläche der Maschine abgestrahlten Schall an, weil dieser relevant für den Lärmpegel im Aufstellungsraum ist. Bei näherer Betrachtung und beim Vergleich der Herstellerangaben ergeben sich folgende Probleme:

- Einige Hersteller machen bei der Beschreibung der Schallpegelwerte ungenaue oder unvollständige Angaben, sodass unklar bleibt, ob es sich bei der Angabe um einen Schalleistungs- oder einen Schalldruckpegel handelt.
- Bei der Darstellung der Messwerte bleibt z. T. der Einfluss von reflektierenden Flächen und von Quell-Empfänger-Abständen auf den Schalldruckpegel unberücksichtigt oder deren Berücksichtigung wird nicht eindeutig gekennzeichnet. Aus diesem Grund ist ein Vergleich von Schalldruckpegelwerten teilweise nur schwer durchführbar.
- Die Hersteller wenden zur Beurteilung unterschiedliche Messverfahren an. Diese werden jedoch nur in wenigen Fällen klar angegeben. Auf Nachfrage bei den Herstellern ergaben sich vier verschiedene Vorgehensweisen zur Erhebung der Messwerte:
 - Messung nach Schalleistungsnorm [DIN 45635-1]/[DIN EN ISO 3744], Angabe des Schalldruckpegels in 1 m Meter Entfernung
 - Messung nach Hüllflächenverfahren ohne Verweis auf eine Norm, Angabe des Schalldruckpegels in 1 m Entfernung
 - Messung des bezüglich der Hüllfläche maximalen Schalldruckpegels in 1 m Entfernung mit Schallpegelmessgerät (Handgerät)
 - Messung des mittleren Schalldruckpegels (Herumgehen) in 1 m Entfernung mit Schallpegelmessgerät (Handgerät)

Sollen die Angaben verschiedener BHKW-Hersteller eindeutig vergleichbar sein, so ist eine einheitliche Messung nach DIN 45635-1/DIN EN ISO 3744 notwendig. Dabei ist es sinnvoll, den Schalleistungspegel anstatt des Schalldruckpegels in 1 m Entfernung anzugeben.

Schallabstrahlung von der Abgasmündung: Nur sehr wenige der befragten Hersteller geben einen Schalldruckpegel oder eine Schalleistung an der Abgasmündung an. Keiner der befragten Hersteller hat eine Messung nach DIN 45635-47 durchgeführt, sodass die Messergebnisse nur bedingt vergleichbar sind. Darüber hinaus sind einige Hersteller der Meinung, dass das emittierte Geräusch sehr leise sei und dementsprechend nicht angegeben werden müsse. Einen messtechnischen Beleg für eine solche Aussage hat keine der angesprochenen Firmen liefern können.

Der Mündungspegel ist jedoch die entscheidende Größe in Bezug auf die Schallemission eines BHKW in die umliegende Nachbarschaft. Messergebnisse könnten mit Hilfe einer Schalleistungsmessung am Schornstein in Anlehnung an das in DIN 45635-47 beschriebene Messverfahren verglichen werden. Dabei ist zu prüfen, ob der nach der Norm festgelegte Messabstand von 1 m ausreichend ist, um auch bei tiefen Frequenzen die Abstrahlung der Schalleistung in Form einer Fernfeldmessung zu gewährleisten.

Des Weiteren müsste ein standardisierter Abgaskamin, dessen Verlauf und Länge klar definiert sind, eingeführt werden. Ebenso sollte eine Position für den nachträglichen Einbau von Schalldämpfern definiert werden. Dies würde die Vergleichbarkeit der bei der Beurteilung der Schallemission von BHKW gewonnenen Ergebnisse gewährleisten.

Körperschalleintrag: Sollen die Messungen verschiedener BHKW-Hersteller vergleichbar gemacht werden, müsste die Aufstellung des BHKW, der Messaufbau und die Beschaffenheit des Fundaments mit der dazugehörigen Bodenplatte definiert werden. Hierzu werden innerhalb des Berichtes einige Festlegungen zur Ausle-

gung eines solchen Prüfstandes vorgeschlagen. Die Beschaffenheit, das Gewicht und die Abmessungen der auf dem Fundament befindlichen Bodenplatte müssen klar definiert sein. Sinnvoll ist es, eine „Norm-Bodenplatte“ festzulegen, die der Normung in der Bauakustik entspricht. Das BHKW sollte für die Messung mit den im Lieferumfang enthaltenen Schwingungsisolatoren aufgestellt werden. Des Weiteren muss die Anzahl und die Position der Sensoren definiert werden, wobei hier vor allem einer körperschallenergieproportionalen Messung Rechnung getragen werden sollte. Ähnliche Festlegungen und Definitionen wären für wandmontierte BHKW zu treffen. Eine Bestimmung von zulässigen Maximalwerten der von BHKW eingetragenen mittleren Schwingschnelle könnte auf Grundlage von Messungen und genaueren Untersuchungen im Gebäude stattfinden. Soll bei einem bereits installierten BHKW der Einfluss der Körperschallemission auf den in den angrenzenden Raum imitierten Luftschall bestimmt werden, wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Messung der Luftschallemission im angrenzenden Raum bei Betrieb des BHKW
- Aufzeichnung des vom BHKW emittierten Geräusches im Senderaum
- Betrieb einer künstlichen körperschallentkoppelt aufgestellten Schallquelle im Senderaum mit aufgezeichnetem Geräusch bei gleichzeitiger Messung der Luftschallemission im angrenzenden Empfangsraum. Während der Messung soll der Schalldruckpegel im Senderaum dem Schalldruckpegel bei Betrieb des BHKW entsprechen.

Schallimmission

Bauakustik: Treten innerhalb von Gebäuden Luftschall- oder Körperschallübertragungen auf, so waren zumindest bis zu den BGH-Urteilen aus den Jahren 2007 [BGH 2007] und 2009 [BGH 2009] die in DIN 4109 festgelegten Schalldämmmaße und Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen einzuhalten. Auf der Basis der Urteile sollten nunmehr in den letzten Jahren die Mindestanforderungen über die Schallschutzstufen II und III der VDI 4100-z1 aus dem Jahr 1994 und einer Novellierung aus dem Jahr 2007 [VDI 4100-z2] abgeleitet werden. In unterschiedlichen Abhandlungen wurde seitdem die Unsicherheit über die Festlegung verbindlicher Schallschutzwerte diskutiert, z. B. JANSEN [2010] oder WOLFF [2012]. Im Jahr 2012 ist die VDI 4100 nochmals einer Novellierung unterzogen worden. Eine wesentliche Neuerung stellt hierbei die Einführung neuer Beurteilungsgrößen dar. Waren in der bisherigen VDI bauteilspezifische Größen, z. B. R'_w , zur Beurteilung heranzuziehen, werden nunmehr auf die Nachhallzeit bezogene Schalldruckpegeldifferenzen zur Beurteilung der schalltechnischen Situation zugrunde gelegt. Durch die Neudefinition der Bewertungsgrößen ergibt sich für die Schalldämmung eine Verschärfung des Anforderungsniveaus für Raum mit einer Grundfläche kleiner $3,1 \text{ m}^2$. Für Installationspegel wird das Niveau für Raumvolumina von kleiner als 30 m^3 verschärft (Schalldämmung ca. 1 ... 3 dB, Installationspegel 2 dB).

Werden BHKW als haustechnische Anlage betrieben, waren bisher die Werte nach DIN 4109 bindend. Dabei ist jedoch zu beachten, dass diese Anforderungen auf Lärmquellen basierten, deren Hauptschallemission oberhalb von 100 Hz auftritt. Dies ist nach Angaben der Hersteller für BHKW nicht der Fall. Als Ergebnis der hier durchgeführten Arbeiten muss festgehalten werden, dass ein trennendes Bauteil trotz Einhaltung des geschuldeten Schalldämmwertes bei tiefen Frequenzen (30 Hz bis 80 Hz) einen zu geringen Wert der Schalldämmung aufweisen könnte.

Mit Bezug auf die bereits erwähnten BGH-Urteile werden spätestens seit Oktober 2012 in VDI 4100 neue Richtwerte nach den Schallschutzstufen II und III empfohlen. Je nach Schallschutzstufe können hier bei der Beurteilung von Einfamilien-Doppel- und Einfamilien-Reihenhäusern Werte für den mittleren Standard-Maximalpegel von 25 dB(A) oder 22 dB(A) gefordert sein. Für die Schalldruckpegeldifferenz $D_{nT,w}$ können Werte von bis zu 73 dB notwendig sein. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die nach VDI 4100 geforderten Werte nicht für tieffrequenten Lärm nach DIN 45680 gelten. Ein BHKW wird jedoch nur in den

seltensten Fällen ausschließlich als haustechnische Anlage betrieben werden. Aus diesem Grund sind die Anforderungen nach TA Lärm mit Bezug auf die DIN 45680 zur Beurteilung der tieffrequenten Emission eines BHKW heranzuziehen.

Grundlegend muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass für den Einsatz eines BHKW innerhalb von Gebäuden sehr hohe Anforderungen an das Schalldämmmaß der trennenden Bauteile gemacht werden. Bei der Planung eines Gebäudes sollte der Einsatz eines BHKW vorzeitig Berücksichtigung finden.

TA Lärm und tieffrequenter Lärm: Die Immissionsprognose zu den von BHKW abgestrahlten Geräuschen wird besonders dann erschwert, wenn die Geräusche nach DIN 45680 beurteilt werden sollen. In diesem Fall müsste die Prognose die tieffrequente Schalldämmung von Fassadenbauteilen, z. B. Fenstern, und die Schalldruckpegelverteilung in schutzbedürftigen Räumen (Beschreibung der Eigenformen bei den entsprechenden Eigenfrequenzen) beinhalten. Diese Prognose gestaltet sich als sehr aufwändig und darüber hinaus als zu ungenau, weil zum einen eine Vielzahl von Raumgeometrien zu erwarten sind und zum anderen die Schalldämmwerte der Fassadenbauteile im tieffrequenten Bereich und deren Ankopplung an das Raumschallfeld nur mit großer Unsicherheit vorhersagbar sind. Einen Ausweg stellt hier der Erlass aus Mecklenburg-Vorpommern [LUNG 2009] dar. In diesem Erlass wird ein Schalldruckpegel außerhalb des Gebäudes auf der Basis eines Schalleistungswertes an der Kaminmündung berechnet. Zum Vergleich mit Richtwerten wurde dazu ein verschärftes Kriterium entwickelt. Aus der Sicht der Autoren wird dieses Verfahren zur Beurteilung von BHKW als sehr streng eingestuft. Werden zukünftig die Schallschutzmaßnahmen an BHKW mit Hilfe dieses Verfahrens ausgelegt oder beurteilt, ist mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Verträglichkeit der Anlage mit den Belangen der umliegenden Anwohner zu erwarten.

Lärmminderungsmaßnahmen

Grundsätzlich kann zwischen primären und sekundären Schallschutzmaßnahmen unterschieden werden. Wobei die primären Maßnahmen maßgeblich Maßnahmen des Schallschutzes an der Quelle entsprechen. Am Beispiel des BHKW wäre dies z. B. die Auswahl des schalltechnisch günstigsten Motors. Sekundäre Maßnahmen setzen hingegen am Schallausbreitungsweg, z. B. Schalldämpfer, oder am Immissionsort, z. B. Gehörschutz, an. Den primären Maßnahmen ist in der Regel der Vorzug zu geben, weil sie zum einen am wirksamsten und zum anderen zumindest kostengünstigster als nachträgliche Maßnahmen sind. Das hier durchgeführte Projekt behandelt die schalltechnische Beurteilung handelsüblicher Mikro-BHKW mit einem Leistungsbereich von 2,5 ... 15 kW_{el} hinsichtlich ihres Einsatzes in Wohngebäuden. Aus diesem Grund konzentriert sich die Studie maßgeblich auf die für den Einbau notwendigen schalltechnischen Maßnahmen, d. h. auf sekundäre Maßnahmen.

Mündungsschall: Schalldämpfer stellen eine effektive Möglichkeit dar, um den an der Mündung von Schornsteinen emittierten Abgasschall von BHKW zu mindern. Im Allgemeinen besitzen BHKW bereits einen integrierten Primär-Schalldämpfer im Abgasstrang. Viele Hersteller bieten ebenfalls Sekundär-Schalldämpfer für die Installation im Keller außerhalb des BHKW oder auf dem Schornstein an. Die messtechnische Überprüfung der Wirksamkeit von Schalldämpfern in Kanälen ist in DIN EN ISO 7235 festgelegt, wobei Einfügungsdämpfung, Strömungsgeräusch und Gesamtdruckverlust ermittelt werden. Häufig vermessen Schalldämpferhersteller ihre Produkte nach oder in Anlehnung an diese Norm und geben die frequenzabhängige Einfügungsdämpfung an. Exemplarische Messergebnisse zeigen, dass die durch Schalldämpfer praktisch erreichbare spektrale Durchgangsdämpfung durch modellbasierte Auslegungssoftware hinreichend genau berechnet werden kann.

Die fachgerechte Planung macht es erforderlich, den Schalldämpfer auf das Spektrum des vom BHKW verursachten Mündungsschalls auszulegen. Während eine breitbandige Dämpfung mit Absorptionsschalldämpfern realisiert werden kann, ist die gezielte Dämpfung einzelner tieffrequenter Komponenten ohne Verursachung eines zu hohen Druckverlusts mittels Resonanzschalldämpfer möglich. Bei der Auslegung muss unbedingt das Gesamtsystem betrachtet werden. Es hat sich durch Berechnungen innerhalb der Studie gezeigt, dass der Einsatz eines Schalldämpfers bei gleichzeitiger Änderung der Länge des Gesamtsystems auch zu einer Verringerung der Minderungswirkung im tieffrequenten Bereich führen kann. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass Schalldämpfer mit einer hohen Wirkung im tieffrequenten Bereich ("worst case-Szenario") große geometrische Dimensionen erfordern können. Eine platzsparende Alternative zu konventionellen passiven Schalldämpfern stellen hier aktive Systeme dar. Diese eignen sich besonders zur Minderung tiefer Frequenzen, sind jedoch u. U. etwas kostenintensiver als passive Systeme.

Aggregatschall und trennende Elemente der Bauakustik: Mit Hilfe einer schalldämmenden Kapsel ist es möglich, die Schallausbreitung einer Lärmquelle einzuschränken. Die Lärmquelle wird dafür von schalldämmend und schalldämpfend ausgebildeten Kapselwänden umschlossen. Der vom Motor des BHKW erzeugte Lärm kann durch eine Kapselung, zumindest im mittleren und hohen Frequenzbereich, wirkungsvoll reduziert werden. Weil bei BHKW tieffrequente Anteile im Spektrum als besonders kritisch behandelt werden müssen, sei an dieser Stelle angemerkt, dass u. U. eine gezielt ausgelegte Doppelwandkonstruktion zum Ziel führen kann. Maßgeblich ist hierbei jedoch, dass die Masse-Feder-Masse-Resonanz der Doppelwand sehr tieffrequent ausgelegt werden muss.

Die Berechnung der trennenden Elemente der Bauakustik, wie Wände und Decken innerhalb von Gebäuden, erfolgt zum heutigen Zeitpunkt nach DIN 4109, Bbl. 1 oder nach DIN EN 12354-1 bzw. DIN EN 12354-2. Die in DIN 4109 und VDI 4100 geforderten Luftschalldämmwerte können mit einem etwas höheren bautechnischen Aufwand durchaus erzielt werden. Ein für die Auslegung von trennenden Bauteilen in der Umgebung von BHKW spezifisches Problem stellt jedoch die Emission tieffrequenten Lärms dar. Die die Bauakustik betreffenden Normen und Richtlinien DIN 4109 und VDI 4100 und ihre Beiblätter beruhen auf der Annahme eines diffusen Schallfeldes im Raum. Diese Annahme gilt dann, wenn innerhalb der betrachteten Terz eine ausreichende Anzahl von Eigenfrequenzen im Raum angeregt worden ist. Für die Transmission tieffrequenten Lärms in einen benachbarten Raum verliert die Annahme jedoch ihre Gültigkeit, weil in diesem Frequenzbereich, z. B. 30 Hz, und für die zu erwartenden Raumdimensionen nur eine sehr geringe Anzahl von angeregten Eigenfrequenzen zu erwarten ist.

Im Rahmen dieser Studie sollte aber dennoch zur Abschätzung des in dem zum BHKW benachbarten Raum zu erwartenden mittleren Standard-Maximalpegels $L_{AFmax,nT}$ auf das Verfahren nach DIN EN 12354-1 zurückgegriffen werden. Anhand der Zusammenfassung der Ergebnisse ist ersichtlich, dass bei einem beispielhaft verwendeten BHKW mit einer elektrischen Leistung von 10 kW trotz Einhaltung der Anforderungen an die Schalldämmung des trennenden Bauteils (hier Decke) für die jeweiligen Schallschutzstufen I bis III eine Überschreitung des mittleren Standard-Maximalpegels $L_{AFmax,nT}$ zu erwarten sein könnte. Dieser Grenzwert kann für das hier behandelte Beispiel bei gleicher bautechnischer Situation nur eingehalten werden, wenn der abgestrahlte Schalleistungspegel des Aggregats verringert werden würde. Eine Betrachtung aller in der Studie berücksichtigten Mikro-BHKW zeigt darüber hinaus, dass nur eine geringe Anzahl von BHKW den Wert von 60 dB(A) überschreitet. Die Einführung eines Grenzwerts für den Aggregatschalldruckpegel bei diesem Wert auf der Basis des aktuellen Standes der Technik wäre daher durchaus gerechtfertigt.

Grundsätzlich sei jedoch an dieser Stelle angemerkt, dass die Berücksichtigung eines derartigen Grenzwerts nicht automatisch zur Einhaltung der bauakustischen Anforderungen führen muss. Hierzu sollten in einer wei-

terführenden Studie vertiefte Untersuchungen zur Schalldämmung der Bauteile im Bereich tiefer Frequenzen unter Berücksichtigung der Norm zur Bewertung tieffrequenten Lärms [DIN 45680] durchgeführt werden.

Körperschall: Die Kraftanregung des Motors eines BHKW führt zu einer Übertragung der Schwingungen in das Fundament. Dies muss durch den Einsatz einer Körperschallisolation reduziert werden. Die sehr tieffrequenten Anregungsfrequenzen der BHKW erfordern Isolatoren mit geringer Steifigkeit. Mit Verringerung der Steifigkeit vermindert sich bei Elastomeren auch die Tragfähigkeit. Aus diesem Grund empfehlen sich für den sehr tieffrequenten Einsatz Stahl- und Luffedern, weil sie trotz geringer Steifigkeit noch über eine ausreichende Tragfähigkeit verfügen. Bei der Auslegung sollte außerdem beachtet werden, dass der Motor beim Hochlauf die Resonanzfrequenz des Systems durchfährt. Daher ist eine ausreichende Dämpfung des Systems erforderlich. Der Einsatz von Schwingungsisolatoren ist nur dann wirksam, wenn alle Übertragungswege vollständig unterbrochen sind. Ist die Quelle aus schwingungstechnischer Sicht nicht vollständig von ihrer Umgebung getrennt, ist die Entkopplung vollständig oder teilweise wirkungslos.

Die Wirkung der Schwingungsisolation ist darüber hinaus von der Eingangsimpedanz des Blockfundaments oder auch der Bodenplatte abhängig. Für eine exakte Angabe zur Größe der Impedanz dieser die Unterkonstruktionen bildenden Bauteile müssten Daten zur Quellimpedanz der BHKW vorliegen. Dazu konnten die Hersteller zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch keine Angaben machen. Aus ingenieurtechnischer Sicht muss daher auf eine Regel zurückgegriffen werden, wonach die Masse des Unterbaus in etwa dem 10-Fachen des Gerätes entsprechen soll. Bei einer Masse von 500 kg für ein BHKW ist daher für ein Blockfundament oder eine Bodenplatte aus Beton bei Unterstellung einer Dichte von 2.300 kg/m^3 mit einem Volumen von ca. $2,2 \text{ m}^3$ zu rechnen. Dabei ist zu beachten, dass die unterste Eigenfrequenz des Bauteiles größer als die Resonanzfrequenz der Schwingungsisolation ist.

Literatur

- AFD (2014): Gesellschaft für Akustikforschung mbH: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag des Bundesumweltamts "GZ: Z 6 – 60 427/152, FKZ: 3711 53 101 - Geräuschemission und Lärminderung bei Luft-Wasser-Wärme-Pumpen". voraussichtliche Veröffentlichung 2014
- ASUE (2010): Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V.: BHKW-Grundlagen. 2010
- ASUE (2011-1): Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V.: BHKW-Kenndaten. 2011
- ASUE (2011-2): Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e. V.: Die stromerzeugende Heizung. 2011
- BAFA (2012): Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle: Mini-KWK-Anlagen - Liste förderfähiger Anlagen einschließlich 20 kWel. 2012
- BFE (2002): Bundesamt für Energie: Lärmreduktion bei Luft/Wasser-Wärmepumpenanlagen Grundlagen und Maßnahmen. Oberburg, Schweiz, 2002
- BGH (2007): Bundesgerichtshof: Grundsatzentscheid BGH VII ZR 45/06. 14.06.2007
- BGH (2009): Bundesgerichtshof: Grundsatzentscheid BGH VII ZR 54/07. 04.06.2009
- BHKW-Forum e. V. (2012): <http://www.bhkw-infothek.de>, 2012
- BHKW-Info (2012): BHKW-Infozentrum GbR Rastatt:
http://www.bhkw-infozentrum.de/erlaeuter/planung_kwk.html
- BMU (2012): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Richtlinie zur Förderung von KWK-Anlagen bis 20 kWel. Januar 2012
- Buderus (2011-1): Buderus: Planungsunterlage Loganova BHKW-Module, Nr. 6 720 640 360, Ausgabe März 2011
- Buderus (2011-2): Buderus: Blockheizkraftwerke - Leistungsbereich 19 bis 240 kWel - Loganova BHKW, Februar 2011
- BZM (2008): Bauzentrum München: Die effiziente Heizungsanlage. 2008
- DBU (2009): Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Projektkennblatt, Mess-, Auswerte- und Visualisierungsgeräte für das BHKW-Ausbildungszentrum Travemünde. Stand 2009
- DIETSCHKE, K. H. & KLINGEBIEL, M. (2007): Kraftfahrtechnisches Taschenbuch. 26. Auflage, Robert Bosch GmbH, 2007
- DIN EN ISO 3744: Akustik - Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene. 2010
- DIN 4109: Schallschutz im Hochbau – Anforderungen und Nachweise. November 1989; Berichtigung 1: August 1992; Änderung A1: Januar 2001
- DIN 4109, Bbl. 1: Schallschutz im Hochbau – Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren. November 1989; Änderung A1: September 2003; Änderung A2: Februar 2010
- DIN 4109, Bbl. 2: Schallschutz im Hochbau – Hinweise für Planung und Ausführung; Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz; Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- oder Arbeitsbereich. November 1989;
- DIN 45635-1: Geräuschemessung an Maschinen – Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren, Rahmenverfahren für 3 Genauigkeitsklassen, April 1984
- DIN 45635-47: Geräuschemessung an Maschinen, Luftschallemission, Hüllflächen-Verfahren; Schornsteine, Juni 1985
- DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschmissionen in der Nachbarschaft. März 1997

- DIN 45680, Bbl. 1: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft – Hinweise zur Beurteilung bei gewerblichen Anlagen. März 1997
- DIN 45681: Akustik – Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen. März 2005; Berichtigung 2: August 2006
- DIN EN 12354-1: Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 1: Luftschalldämmung zwischen Räumen. Dezember 2000
- DIN EN 12354-2: Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften, Teil 2: Trittschalldämmung zwischen Räumen. September 2000
- DIN EN ISO 7235: Akustik – Labormessung an Schalldämpfern in Kanälen, Einfügungsdämpfung, Strömungsgeräusch, Gesamtdruckverlust. Januar 2010
- DIN ISO 9613-2: Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien, Teil 2: Allgemeines Berechnungsverfahren. Oktober 1999
- E DIN 45680: Messung und Bewertung tieffrequenter Geräuschimmissionen. Entwurf; August 2011
- FUCHS, H. (2007): Schallabsorber und Schalldämpfer. 2. wesentlich erweiterte und bearbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2007
- FASOLD, W. (2003): Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. 2. Auflage, Huss-Medien GmbH, Berlin, 2003
- HPI (2002): Universität Hannover, Heinz-Piest-Institut für Handwerkstechnik: Rahmenlehrplan. 2002
- JANSEN, G. (2010): Auswirkungen der BGH-Entscheidungen VII ZR 45/06 und VII ZR 54/07 auf die Rechtsprechung. Fachkommission Schall im Verband der Materialprüfungsämter VMPA, September 2010
- JERUSEL, D. (2010): Analytische, numerische und messtechnische Bestimmung der Schalldämmung von ein- und mehrschaligen Bauteilen. Diplomarbeit Hochschule Mittweida, 2010
- KUBICEK, R. (2012): Konsultation, 15. Oktober 2012
- KOLLMANN, F. (2006): Praktische Maschinenakustik. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2006
- LIBOR, S. (2005): Abgasschalldämpfer in der Praxis. Kutzner und Weber GmbH, IKZ-Haustechnik, Heft 22/2005
- LINDEMANN, J. (2011): Berechnung der Luftschalldämmung von Bauteilen mittels FE-Methode. Diplomarbeit Hochschule Mittweida, 2010
- LIPS, W. (2005): Elastische Lagerung von Maschinen. SUVA Arbeitssicherheit, 6. Auflage, Luzern, 2005
- LIPS, W. (2008-1): Strömungsakustik in Theorie und Praxis. 4. überarbeitete Auflage, Expert Verlag, 2008
- LIPS, W. (2008-2): Lärmbekämpfung durch Kapselung. SUVA Arbeitssicherheit, 9. Auflage, Luzern 2008
- LOB, C. (2012): Neubau von BHKW – Maßnahmenumsetzung und Fördermöglichkeiten. Jahreskonferenz 30 Pilot-Netzwerke, KfW Bankengruppe, Oktober 2012
- LUNG (2009): Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommern: Überschlägige Prognose und Beurteilung der tieffrequenten Schallemission des BHLW-Abgaskamins im Freien – Hinweise für die Genehmigung und Überwachung. Entwurf Juni 2009.
- MECHEL, F. (1998): Schallabsorber – Band III – Anwendungen. S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1998
- MÖSER, M. (2003): Taschenbuch der Technischen Akustik. 3. erweiterte und überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, 2003
- MÖSER, M. (2009): Technische Akustik. 8. aktualisierte Auflage, Springer-Verlag, 2009
- PEHNT, M. (2006): Micro Cogeneration. Springer Verlag, Berlin, 2006
- SCHIRMER, W. (1996): Technischer Lärmschutz. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2006
- TA Lärm: Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA Lärm. August 1998
- TA Luft: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft. Juli 2002
- Vattenfall (2012): Das virtuelle Kraftwerk – Windstrom trifft Wärme. Mai 2012

- VDI 4100: Schallschutz im Hochbau, Wohnungen, Beurteilung und Vorschläge für erhöhten Schallschutz, Oktober 2012
- VDI 4100-z1: Schallschutz von Wohnungen - Kriterien für Planung und Beurteilung, September 1994, zurückgezogenes Dokument
- VDI 4100-z2: Schallschutz von Wohnungen - Kriterien für Planung und Beurteilung, August 2007, zurückgezogenes Dokument
- VOIGT, F. (2006): Mini-Blockheizkraftwerke für die dezentrale Energieversorgung – Funktionsweise, ökologische und ökonomische Auswirkungen. Bachelorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar (BUW), Lehrstuhl Verfahren und Umwelt, 2006
- WOLFF, O. & SCHÄFERS, M. (2012): Die Neufassung der Richtlinie VDI 4100 und ihre Auswirkung auf Endkunden und Industrie. Lärmbekämpfung, Bd. 6, Nr. 5, September 2012
- ZELLER, P. (2009): Handbuch Fahrzeugakustik - Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch. Vieweg und Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.smul.sachsen.de/lfulg

Autoren:

Prof. Dr. Jörn Hübelt, Christian Schulze
Gesellschaft für Akustikforschung Dresden mbH
Blumenstraße 80, 01307 Dresden
Telefon: +49 351 811309-42
Telefax: +49 351 811309-50
E-Mail: christian.schulze@akustikforschung.de

Redaktion:

Dr. Johannes Herhold
LfULG, Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/
Referat Anlagenbezogener Immissionsschutz, Lärm
Söbrigener Str. 3a, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-5209
Telefax: +49 351 2612-5099
E-Mail: johannes.herhold@smul.sachsen.de

Redaktionsschluss:

30.09.2013

ISSN:

1867-2868

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.