

Akustische Randbedingungen bei der Aufstellung von Verflüssigern und Luftkühlern*

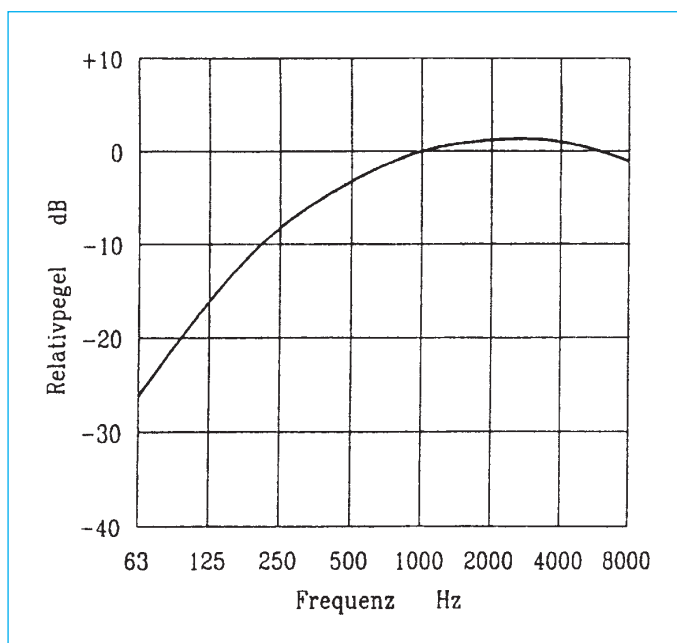
Martin Törpe, Fürstenfeldbruck

Luftgekühlte Wärmeaustauscher verursachen systembedingt Geräusche. In den folgenden Ausführungen werden schalltechnische Grundlagen erläutert und besondere Randbedingungen bei der Aufstellung von Verflüssigern im Freien sowie von Luftkühlern in Kühlräumen beschrieben. Neben der allgemeinen Gesetzeslage seitens des Geräuschimmissionsschutzes wird auch auf das subjektive Empfinden der Geräusche eingegangen.

Allgemeine schalltechnische Grundlagen

Der Wechselschalldruck im Hörbereich umfaßt einen Bereich von mehr als 6 Dekaden. Aus diesem Grund wird in der Akustik mit einer logarithmischen Maßeinheit dem Schalldruckpegel (L_p) oder dem Schalleistungspegel (L_W), angegeben in Dezibel (dB) gerechnet. In der Praxis der Lärmbekämpfung und Beurteilung hat sich dabei international der A-bewertete Schallpegel, angegeben in dB(A), durchgesetzt. Hierbei wird durch die definierte Frequenzbewertungskurve A die Frequenzabhängigkeit der menschlichen Lautstärkeempfindung grob nachgebildet. Es wird dabei berücksichtigt, daß Geräusche mit tiefen Frequenzen bei gleicher Amplitude leiser und damit weni-

Bild 1 Bewertungs-kurve A in Abhängigkeit der Frequenz



zum Autor

Martin Törpe,
Technischer
Leiter der Hans
Güntner GmbH,
Fürstenfeld-
bruck



ger lästig sind als solche mit hohen Frequenzen.

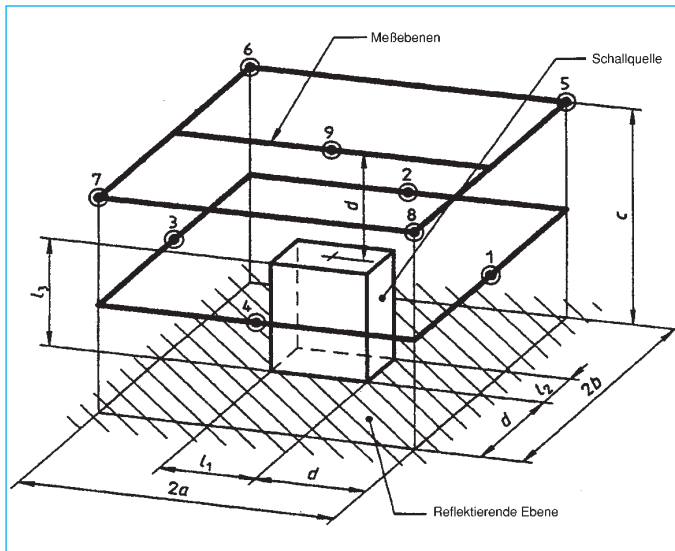
In der Akustik wird die Stärke einer Schallquelle üblicherweise mit dem Schalleistungspegel, der die abgestrahlte Schalleistung in Watt beschreibt, angegeben. Als Einheit wird hierfür auch das Maß Dezibel unter Einbeziehung der A-Bewertung verwendet. Der A-Schalleistungspegel L_{WA} ist somit ein Maß für die Stärke der Schallquelle und wird als Ausgangsgröße für vielerlei akustische Berechnungen verwendet.

Der Schalleistungspegel selbst kann nicht direkt gemessen werden, sondern nur aus der Meßgröße, dem Schalldruck in einem bestimmten Abstand, errechnet werden. Bei einer ungerichteten Schallausbreitung über einer reflektierenden Fläche breitet sich die Schalleistung halbkugelförmig aus. Dieses trifft im wesentlichen auf luftgekühlte Verflüssiger und Rückkühler zu, die auf einer freien Dachfläche stehen.

In der DIN 45 635 sowie der ISO 3744 wird das Meßverfahren zur Bestimmung des Schalleistungspegels beschrieben. Dabei wird eine halbkugel- oder quaderförmige Meßfläche um die Schallquelle gelegt und die Einzelpegel werden an festen Punkten in einer definierten Entfernung z. B. 0,5 oder 1,0 m gemessen. Anschließend werden die Meßwerte entsprechend aufsummiert.

* Als Vortrag gehalten anlässlich des BIV-Lehrtreffens am 11. Mai 1999 in München

Bild 2 Meßverfahren zur Schalleistungsbestimmung einer Schallquelle mittels einer quaderförmigen Hüllfläche



enthaltensbereich der Mitarbeiter einzuhalten. In Abhängigkeit der Tätigkeiten an Arbeitsplätzen gelten grundsätzlich folgende Grenzen in den Beurteilungspegeln:

- Überwiegend geistige Tätigkeiten max. 55 dB(A)
- Einfache und überwiegend mechanisierte Bürotätigkeiten max. 70 dB(A)
- Sonstige Tätigkeiten max. 85 dB(A)

An Arbeitsplätzen mit dauerndem A-Schalldruckpegeln über 85 dB(A) besteht die Gefahr bleibender Gehörschäden und es muß ein Gehörschutz getragen werden. Bei den Beurteilungspegeln handelt es sich hierbei um gemittelte Summschallpegel, bei denen einzelne Pegelspitzen zulässig sind. Für bestimmte Industriezwei-

Die Genauigkeit solcher Messungen betragen unter Verwendung von Präzisions-schallpegel-Meßgeräten ± 2 dB(A). Bei diesen Messungen sollten die Hintergrundgeräusche mindestens 10 dB(A) niedriger liegen als der eigentliche Meßwert selbst, damit keine Verfälschungen durch Umgebungsgeräusche auftreten, andernfalls muß eine Korrektur der Meßwerte vorgenommen werden.

In der neuen prEN 13 487 (März 1997) werden Hinweise speziell für Messungen an luftgekühlten Verflüssigern genannt.

Gesetzliche Anforderungen an Schallemissionen

Eine Vielzahl von gesetzlichen Vorschriften regeln die Schallimmissionen einzelner Schallquellen.

In der TA Lärm (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm) sowie in der VDI Richtlinie 2058 T1 (Beurteilung von Arbeitslärm in der Nachbarschaft) sind einzuhaltende Schallimmissionsrichtwerte festgelegt.

Da in der Regel mehrere Schallquellen auf einen Ort einwirken, kann der Schallimmissionspegel einer einzigen Quelle, z. B. eines Verflüssigers, den Immissionsrichtwert meist nicht vollständig aus-



Bild 3 Rückkühleranlage für eine EDV-Klimatisierung

schöpfen. Häufig werden daher von Genehmigungsbehörden reduzierte Immissionsanteile für einzelne Schallquellen oder Flächenanteile, auf denen die Geräte installiert werden sollen, festgelegt.

Nachts müssen dabei teilweise deutlich geringere Schallpegel eingehalten werden.

An Arbeitsplätzen gilt bezüglich des Arbeitsschutzes gegen Lärm die Arbeitsstättenrichtlinie sowie die UVV Lärm. So ist z. B. in gekühlten Kommissionierräumen oder Kühlräumen in denen Fleisch zerlegt wird ein Grenzwert von 85 dB(A) im Auf-



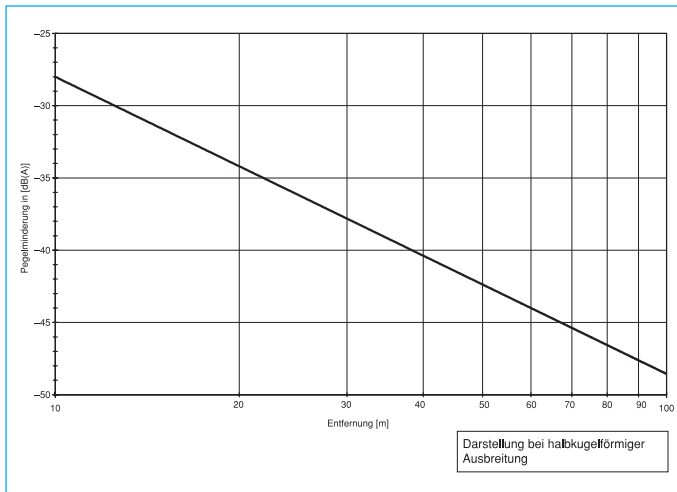
Bild 4 Luftkühler in einem fleischverarbeitenden Betrieb

Tabelle 1 Immissionsrichtwerte

Flächen nach Nutzung	Grenzwerte Tag*/Nacht
Industriegebiete (GI)	70/70 dB(A)
Gewerbegebiet (GE)	65/50 dB(A)
Mischgebiete (MI)	60/45 dB(A)
Allgemeine Wohngebiete (WA)	55/40 dB(A)
Reine Wohngebiete (WR)	50/35 dB(A)
Sondergebiete wie z. B. Kurgebiete (SO)	45/35 dB(A)

* Tag bedeutet 6.00 Uhr–22.00 Uhr

Bild 5 Schallpegelreduzierung bei halbkugelförmiger Ausbreitung im Freien



ge wie z. B. Fleischzerlegeabteilungen gibt es zusätzlich spezielle Anforderungen an die Arbeitsmittel selbst.

Luftgekühlte Verflüssiger und Rückkühler – Besonderheiten bei der Schallausbreitung im Freien

In der VDI-Richtlinie 2714 sind Berechnungsverfahren zur Schallausbreitung im Freien beschrieben. Für eine genaue Schallausbreitungsrechnung müssen folgende Einflußparameter berücksichtigt werden:

- Richtwirkung der Schallquelle und Raumwinkel der Abstrahlung
- Pegelminderung durch Schallabsorption in der Luft in Abhängigkeit der Entfernung (s. Grafik)
- Zusätzliche Dämpfung durch Boden, Bewuchs und Bebauung
- Einfügungsdämpfung von Schallwänden

Üblicherweise wird bei der Schallausbreitung im Freien von einer halbkugelförmigen Abstrahlung über einer reflektierenden Fläche ausgegangen. Das grundsätzliche Meßverfahren wurde bereits unter Punkt A) beschrieben. Im Nahbereich z. B. bis 10 m Entfernung haben sich in den Katalogangaben von Schalldruckpegeln bei luftgekühlten Verflüssigern und Rückkühlern die Angaben bezogen auf eine quaderförmige Hüllfläche durchgesetzt. Diese Angaben lassen sich leicht mathematisch aus dem Schalleistungspegel und den Geräteabmessungen errechnen und sind für eher länglich gestaltete Geräte gut geeignet.

Überschlägig ergeben sich dabei folgende entfernungsabhängige Abschläge vom Schalleistungspegel bei einer quaderförmigen Hüllfläche:

Gerätebauweise	Abschläge vom Schalleistungspegel in 5 m Entfernung
kleine Geräte bis ca. 2 m ³	-26 dB(A)
mittlere Geräte bis ca. 6 m ³	-28 dB(A)
sehr große Geräte	-30 dB(A)

Lage der Geräuschquelle	Korrektur für die erhöhte Schallreflexion in dB(A)
Über einer reflektierenden Ebene	0
Vor zwei aufeinander senkrecht stehenden Flächen, z. B. auf dem Boden vor einer Wand	+3
Vor drei aufeinander senkrecht stehenden Flächen, z. B. auf dem Boden vor einer Innenecke	+6

Tabelle 2 Korrekturfaktoren zur Bestimmung einer erhöhten Schallreflexion

Ausgehend von einem Schalleistungspegel läßt sich für einen größeren Abstand die entfernungsabhängige Schallpegelminderung **D** nach folgenden Formeln berechnen:

$$D = 20 \cdot \lg(sm) + 8 \quad \text{gültig für Abstände bis } sm \leq 50 \text{ m} \quad (1)$$

$$D = 27 \cdot \lg(sm) - 4 \quad \text{gültig für Abstände } 50 \text{ m} \leq sm \leq 50 \text{ m} \quad (2)$$

Diese Berechnungsgrundlagen gelten ausschließlich für eine halbkugelförmige Abstrahlung über einer reflektierenden Fläche.

Steht die Schallquelle vor einer Wand, sind +3 dB(A) auf den errechneten Schalldruckpegel aufzuschlagen. Ist das Gerät in einer Nische oder Ecke aufgestellt, müs-

sen +6 dB(A) auf den Schalldruckpegel aufgeschlagen werden, um die erhöhte Reflexion zu berücksichtigen (s. Tabelle 2).

Stehen mehrere Schallquellen (n) gleicher Lautstärke nebeneinander, so sind Sie nach folgender Formel zu addieren:

$$L_{ges.} = L_{Quelle} + 10 \log n \quad (3)$$

Zur Vereinfachung kann man diese Funktion auch tabellarisch (s. Tabelle 3) darstellen.

Anzahl gleicher Schallquellen					
1	2	3	4	5	6
Korrektur f. Summenpegel dB(A)					
+0	+3	+5	+6	+7	+8

Tabelle 3 Korrekturfaktor für addierte Schallquellen

Oft wird bei der Auslegung von Verflüssigern und Rückkühlern die verschiedenen Außentemperaturbedingungen während der Tag- bzw. Nachtperiode einbezogen, um hier die unterschiedlichen Grenzwerte bei den zulässigen Schalldruckpegeln einzuhalten. Die Auslegung und Geräteauswahl erfolgt hier nach dem ungünstigsten Betriebszustand. Als Bei-

spiel soll diese gängige Verfahrensweise Tabelle 4 verdeutlichen.

Hieraus ergibt sich eine um ca. 30 % geringere notwendige Leistung am Verflüssiger in Folge der niedrigeren Außentemperatur in der Nacht. Durch Drehzahlerhöhung der Ventilatoren mittels Stern – Dreieck Umschaltung oder einer stufenlosen Drehzahlanpassung der Ventilatoren am Tag gegenüber dem Nachtbetrieb kann man auf diese Art und Weise die Grenzwerte im Schalldruckpegel einhalten.

Bei der Drehzahlanpassung der Ventilatoren von luftgekühlten Verflüssigern bzw. Rückkühlern gibt es verschiedene Sy-

Notwendige Verflüssigerleistung (kW)	Außentemperatur zur Auslegung (°C)/ Verflüssigungstemperatur (°C)	Zulässiger Schalldruckpegel in 5 m (allgemeines Wohngebiet)
Tag 100 kW	32 °C; (t _c = 42 °C)	55 dB(A)
Nacht 100 kW **	27 °C; (t _c = 42 °C)	40 dB(A)

** bei Verbundanlagen kann unter Umständen die Verflüssigerleistung im Nachtbetrieb auch geringer sein.

Tabelle 4 Zulässiger Tag/Nacht-Schalldruckpegel

steme, die allerdings zu unterschiedlichen Ergebnissen im Schallpegel führen. Es ist deshalb unerlässlich, das geeignetste Regelverfahren für die Regelaufgabe zu wählen.

Die beiden klassischen Verfahren basieren auf der Abschaltung einzelner Ventilatoren oder in einer Stern-Dreieckumschaltung. Als modernes Regelverfahren wird häufig auch eine stufenlose Anpassung der Ventilatordrehzahl eingesetzt.

Für das in Tabelle 4 genannte Beispiel führen die unterschiedlichen Regelverfahren zu verschiedenen hohen Schallpegeln.

Fall 1: Die Leistungsanpassung erfolgt durch Abschaltung einzelner Ventilatoren

Gewählt wird ein Gerät mit 6 Ventilatoren (100 kW Verflüssigerleistung). Der Schalldruckpegel in 5 m Entfernung eines einzelnen Ventilators beträgt 48 dB(A). Der gesamte Schalldruckpegel des Gerätes beträgt gemäß der Formel zur Addition gleicher Schallquellen:

$$48 \text{ dB(A)} + 8 \text{ dB(A)} = 56 \text{ dB(A)}$$

Für den Nachtbetrieb können bedingt durch die geringere Außentemperatur 2 der 6 Ventilatoren abgeschaltet werden. Somit verringert sich der Schalldruckpegel des Gerätes auf:

$$48 \text{ dB(A)} + 6 \text{ dB(A)} = 54 \text{ dB(A)}$$

Fazit: Das Gerät erreicht mit dieser Regelmethode eine Verringerung im Schallpegel von 2 dB(A) beim Nachtbetrieb, kann aber den geforderten Grenzwert von 40 dB(A) nicht einhalten.

Fall 2: Die Leistungsanpassung erfolgt durch Stern-Dreieckumschaltung aller Ventilatoren

Der Schallpegel im Tagbetrieb bleibt bei 56 dB(A). Während der Nachtperiode werden alle Ventilatoren auf die niedrigere

Sterndrehzahl umgeschaltet. Dies bedeutet eine Reduzierung der Verflüssigerleistung um ca. 30 % und entspricht dem notwendigen Bedarf. Im Sternbetrieb hat jeder Ventilator einen Schallpegel von 38 dB(A). Somit errechnet sich ein Gesamtschalldruckpegel in 5 m von:

$$38 \text{ dB(A)} + 8 \text{ dB(A)} = 46 \text{ dB(A)}$$

Fazit: Mit dieser Regelmethode erreicht man eine Verringerung im Schallpegel von 10 dB(A) im Nachtbetrieb für diese Geräteauswahl. Nachteilig ist, daß die Pegelminderung konstant bleibt, auch wenn die Außentemperaturen weiter sinken.

Der geforderte Schallpegel wird noch nicht erreicht. Hier muß die Geräteauswahl derart verändert werden, daß Geräte eingesetzt werden, die im Sternbetrieb bei der erforderlichen Leistung 40 dB(A) aufweisen.

Fall 3: Die Leistungsanpassung erfolgt durch eine stufenlose Ventilator-Drehzahlregelung

Durch eine stufenlose Anpassung der Ventilatordrehzahl (Leistungsanpassung) läßt sich unter Einbeziehung der sich über das Jahr ständig ändernden Außentemperaturbedingungen und des ggf. geringeren Kältebedarfs im Nachtbetrieb ein wesentlich größerer Effekt auf den Schalldruckpegel erzielen. Da der Verflüssiger immer auf den Maximalbedarf auszulegen ist, wird sich in vielen Perioden abhängig von der Außentemperatur ein noch geringerer Leistungsbedarf am Verflüssiger ergeben. Die Ventilatordrehzahl und damit der Schallpegel wird sich nochmals deutlich reduzieren.

Bei den stufenlosen Regelverfahren für die Ventilatoren unterscheidet man drei verschiedene Möglichkeiten, die jedoch alle Vor- und Nachteile aufweisen.

- Drehzahlanpassung der Ventilatoren über Transformator
- Drehzahlanpassung der Ventilatoren über Frequenzumrichter
- Drehzahlanpassung der Ventilatoren über Phasenanschnittregelungen

Traforegelung

Absolut geräuschlos ohne jegliche Erzeugung von Motorgeräuschen lassen sich Ventilatoren regeln, bei denen die Versorgungsspannung transformatorisch angepaßt wird. Hierbei bleibt die Versorgungsspannung sinusförmig ohne Oberwellen. Neben stufenlosen Systemen sind auch Systeme mit mehreren festen Stufen am Markt erhältlich. Der Nachteil dieses Regelsystems liegt allerdings im Preis und bei den noch vorhandenen mechanischen Bauteilen zur Verstellung des Transformators. Es sind keinerlei Probleme zur Einhaltung der Anforderungen an die elektromechanische Verträglichkeit zu erwarten. Diese Art der Regelung ist immer bei höchsten Anforderungen an die Schall-emission luftgekühlter Verflüssiger einzusetzen. Pegelminderungen bis zu 30 dB(A) bei z. B. 30 % Last sind möglich (s. Bild 6).

Regelung mit Frequenzumrichter

Eine weitere Variante zur Drehzahlveränderung an Ventilatoren ist die Verwendung hoch getakteter Frequenzumrichter. Hierbei entstehen Motorgeräusche, die aber weitgehend außerhalb des Hörbereiches des menschlichen Ohres liegen. Somit erreicht dieses Regelverfahren nicht ganz die akustische Qualität eines Traforeglers, hat aber wesentliche Nachteile durch die hohen Aufwendungen zur Einhaltung der Vorschriften zur Störaussendung. Auch gibt es keinerlei Erkenntnisse über die Auswirkungen der hochfrequenten Geräusche auf Tiere. Unsachgemäße Installationen können zur Zerstörung der Motorwicklung bei den Ventilatoren führen.

Drehzahlveränderung mittels Phasenanschnittregelung

Diese Art der Regelung ist preiswert, erzeugt aber hörbare Motorgeräusche und wird deshalb heute hauptsächlich zur Verflüssigungsdruckhaltung eingesetzt. Die Ursache für die Motorgeräusche liegt in der nicht sinusförmigen Ausgangsspannung des Reglers. Diese Geräuschbildung ist stark vom Ventilatortyp abhängig und läßt sich durch angepaßte elektronische Geräuschfilter minimieren. Die im Motor entstehenden Geräusche liegen im Bereich von 300 Hz und werden vom mensch-

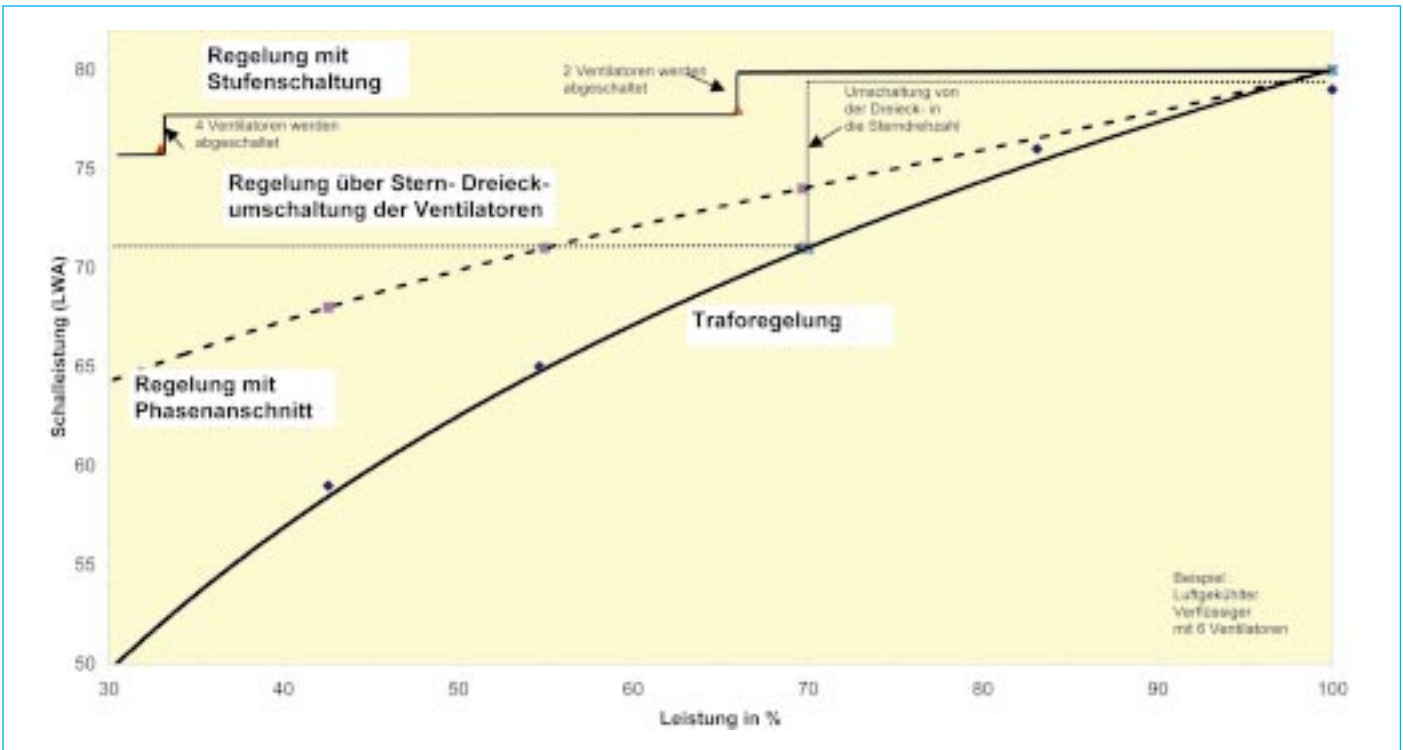


Bild 6 Einfluß der Leistungsanpassung bei luftgekühlten Wärmeaustauschern über eine Ventilator Drehzahlregelung

lichen Ohr als lästig empfunden, obwohl der Summenschallpegel sich im Regelbetrieb reduziert.

In Bild 6 wird noch einmal der mögliche Einfluß der Regelverfahren auf den Gesamtschalldruckpegel verdeutlicht.

Grundsätzlich werden vom menschlichen Ohr besonders herausragende Frequenzbereiche als lästig und unangenehm empfunden. Die Entwicklung moderner Ventilatoren für luftgekühlte Verflüssiger und Rückkühler zielen darauf, daß man ein möglichst ausgeglichenes Geräuschspektrum ohne herausragende Einzelfrequenzen erreicht. Die Ventilatorflügel moderner Ventilatoren weisen daher ein sichelförmiges Profil auf und erfüllen diese Aufgaben. Diese Geräuschoptimierten Ventilatoren werden zunehmend auf allen luftgekühlten Wärmeaustauschern eingesetzt. Bild 7 zeigt die Pegelüberhöhung bei 300 Hz in Verbindung mit einer Phasenanschnitt Drehzahlregelung im Vergleich zu einer Traforegelung.

fernungsabhängige Schallpegelminderung entsprechend den vorher hier angeführten Formeln unter Punkt C) hier nicht. Die Schallausbreitung in Räumen ist vielmehr stark vom Verhältnis der Raumabmessungen und der Eigenschaft der Schallabsorption im Raum abhängig. Für Kühlräume typisch findet man annähernd kubische Räume und eher flache Raumformen mit einer nur geringen Deckenhöhe.

Die von Luftkühlern abgestrahlte Schallenergie wird zu einem großen Teil an den Kühlhaus-Begrenzungswänden reflektiert. Auf Grund dieser Eigenschaft kann man beobachten, daß der Schallpegel in genügender Entfernung von der Schallquelle ortsunabhängig erscheint. Die Höhe des Schallpegels wird im Wesentlichen von den akustischen Raumeigenschaften bestimmt. Dabei spielt der Schallabsorptionsgrad α , d. h. das Verhältnis der absorbierten Schalleistung zur gesamten auffallenden Schalleistung, eine große Rolle. Der Schallabsorptionsgrad kann Werte

zwischen 0 und 1 annehmen und ist frequenzabhängig. Ein Absorptionsgrad α von 0 bedeutet, daß die auf eine Wand auftreffende Schalleistung hierbei vollständig reflektiert wird. Der Absorptionsgrad kann für Wände, Deckenteile, Boden und andere Einbauteile unterschiedlich sein. Deshalb verwendet man für Berechnungen einen mittleren Schallabsorptionsgrad α_m als räumlichen Mittelwert. Man errechnet nach folgender Gleichung eine sogenannte äquivalente Schallabsorptionsfläche A für den Raum:

$$A = \alpha_m \cdot S_{ges} \tag{4}$$

α_m mittlerer Schallabsorptionsgrad des Raumes
 S_{ges} Oberfläche des Raumes

Für Kühlräume typische mittlere Schallabsorptionsgrade α_m wurden durch Versuche ermittelt und zeigt die nachfolgende Tabelle 4.

Luftkühler – Besonderheiten bei der Schallausbreitung in Kühlräumen

Die Schallausbreitung in Räumen unterscheidet sich gegenüber der Schallausbreitung im Freien durch eine starke Reflexion der Schallenergie an den Raumschließungsflächen. Somit gilt die ent-

Tabelle 4
Schallabsorptionsgrad α_m für Kühlräume

Art des Kühlraumes	α_m
Leere Kühlräume	0,10
Kühlräume mit einigen sog. Streukörpern (Regale, Gitterboxen, usw.)	0,12
Kühlräume mit vielen Streukörpern (z. B. gefüllte Regale, Schweine- bzw. Rinderhälften)	0,15

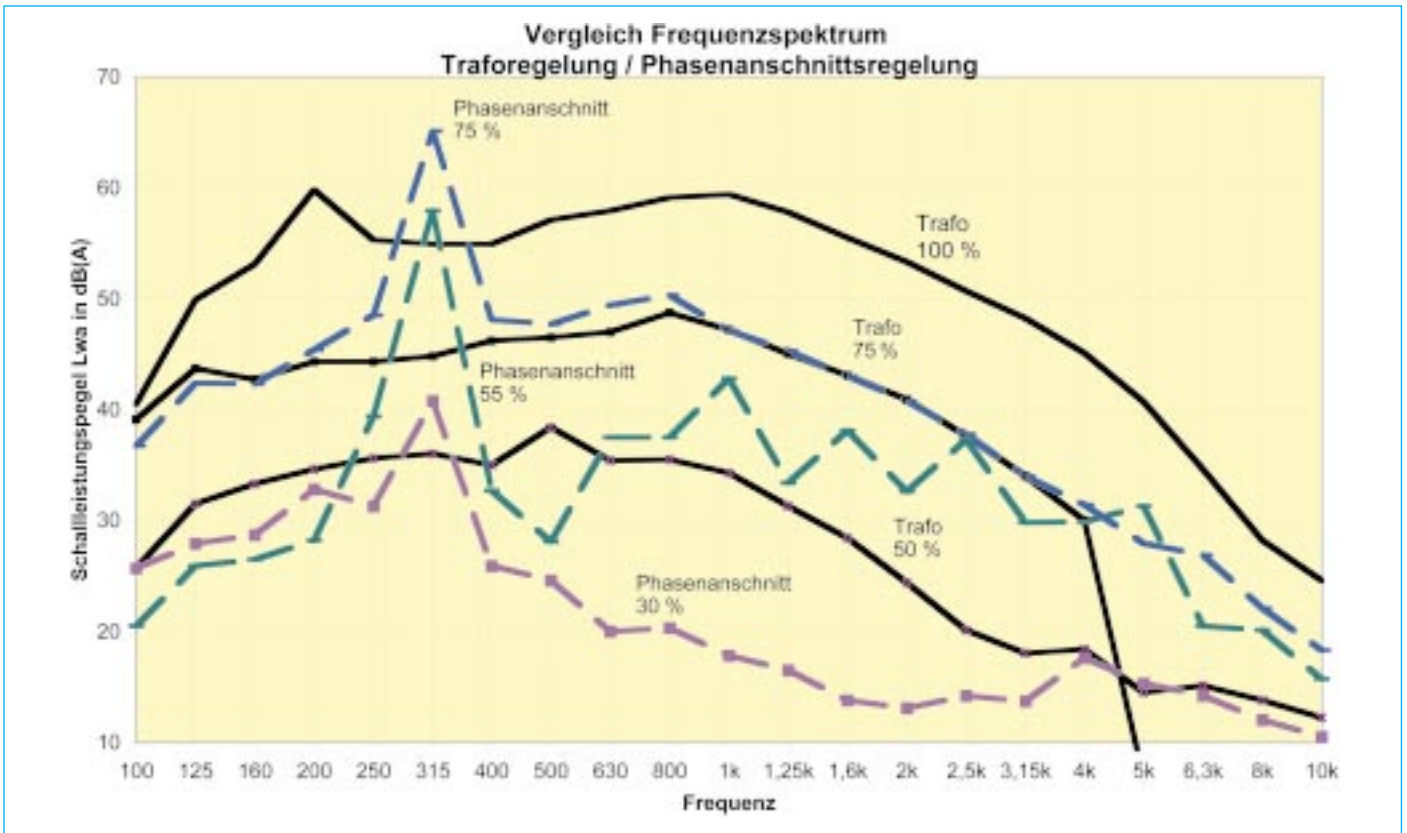


Bild 7 Frequenzspektrum Trafo-Drehzahlregelung im Vergleich zu Drehzahlregelung mit Phasenanschnitt

Für die Berechnung des Schalldruckpegels im Raum kann näherungsweise folgende Beziehung verwendet werden:

$$L_{PA}(\text{Kühlraum}) = L_{WA} - 10 \text{ Log} \left(\frac{1}{2} \pi r^2 + \frac{4}{A} \right) \quad (5)$$

L_{PA} Mittlerer A-bewerteter Schalldruckpegel im Kühlraum in dB(A)

L_{WA} Gesamter A-bewerteter Schalleistungspegel der betriebenen Luftkühler in dB(A)

A Äquivalente Absorptionsfläche des Kühlraumes in m^2 nach Gleichung (4)

r mittlerer Abstand der Personen von den Luftkühlern in m

Beispiel: Kühlraum mit folgenden Abmessungen:

- Länge 18,0 m
- Breite 18,0 m
- Höhe 4,5 m
- Raumvolumen 1458 m^3
- Raumoberfläche 972 m^2



Bild 8 Logistikzentrum einer großen Lebensmittelkette

2 Stück Luftkühler mit einem Gesamt-Schalleistungspegel von 80 dB(A) sind in einem Abstand von 4 m untereinander an der Decke montiert.

Angenommener mittlerer Schallabsorptionsgrad $\alpha_m = 0,12$

Gemäß Gleichung (5) ergibt sich hier eine Schallpegelminderung von ca. 14 dB(A) in einer Entfernung von ca. 6 m von der Schallquelle. Der Raumschalldruckpegel wird bei ca. 66 dB(A) liegen. □