

Konsequente Lärminderung durch systematische Analyse der Schallentstehungskette

Engel, K.; Jeschke, D.

Eine frühzeitige Einbindung akustischer Gesichtspunkte in den Konstruktionsprozeß ist maßgeblich für eine effektive Lärminderung. Im Rahmen dieser Veröffentlichung werden einige Lärminderungsmaßnahmen anhand der Schallentstehungskette vorgestellt.

In every step of designing a low-noise machinery the involved basic acoustic mechanisms should be found by analyzing the causal chain. Some basic acoustic mechanisms are discussed critically.

1 Einbindung akustischer Gesichtspunkte in den Konstruktionsprozeß

Wesentliche Ansätze für eine gezielte Lärminderung versprechen die Einhaltung einfacher konstruktiver Grundregeln bei der Auswahl der eingesetzten Wirkprinzipien in der Kräfteerzeugung/-leitung, der Gestaltung des Kraft- und Energieflusses und ergänzender sekundärer Maßnahmen zur Verminderung der Schallabstrahlung (z. B. VDI 3720).

In **Bild 1** ist eine anstrebenswerte frühzeitige Einbindung maschinenakustischer Normen und Vorschriften, Gestaltungsregeln, Berechnungs- und Abschätzverfahren bis hin zum Abnahmetest in den Konstruktionsprozeß dargestellt.

In den einzelnen Stufen des Konstruktionsprozesses steigt der Konkretisierungsgrad des Produktes. Das maschinenakustische Verhalten kann in der Konzeptphase nur sehr wage beurteilt werden. Hilfestellung erhält der Konstrukteur nur aus firmeninternem Know How, Erfahrungswerten von bekannten Produkten, aus zum Teil veralteten Veröffentlichungen von Emissionswerten, aus der Literatur, aus Beispielsammlungen. Abhilfe versprechen in der Entwicklung befindliche wissensbasierte Systeme.

Die Einarbeitung maschinenakustischer Gesichtspunkte in die Konstruktion erfolgt oft erst mit zunehmendem Konkretisierungsgrad im Detailing oder gar erst im Prototyping. Dies hat aber zur Folge, daß in

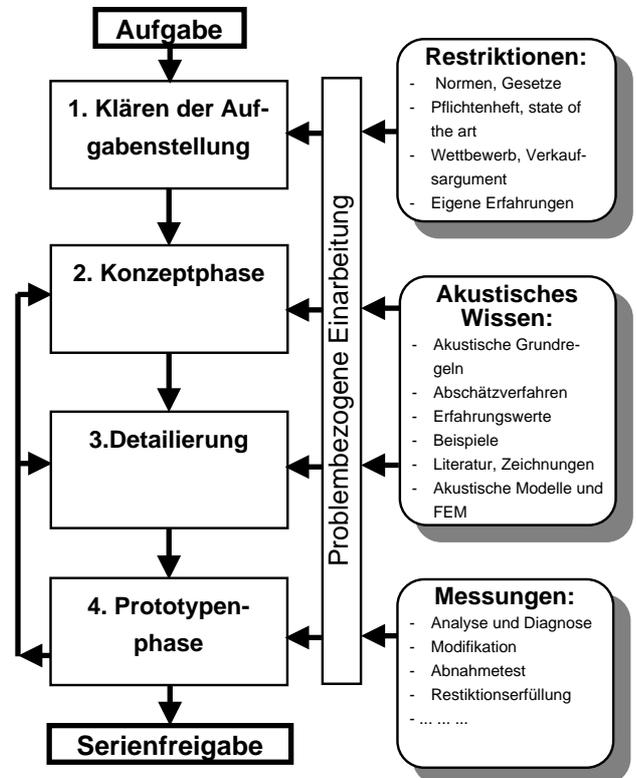


Bild 1: Einbindung maschinenakustischen Wissens in den Konstruktionsprozeß

den meisten Fällen nur sekundäre Maßnahmen zur Schallminderung eingesetzt werden.

Sekundäre Schallminderungsmaßnahmen haben neben dem konstruktiv höheren Aufwand einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß auf die Material-, Fertigungs- und Montagekosten. Umweltaspekte fordern zunehmend eine recycling- und entsorgungsgerechte Gestaltung der Produkte mit einer Rückführung der eingesetzten Werkstoffe in Ressourcen schonende geschlossene Wiedergewinnungskreisläufe. Hierin ist eine der Schwachstellen vieler sogenannter "lärm-ärmer" Produkte zusehen, die hauptsächlich durch sekundäre Maßnahmen "beruhigt" wurden.

1.1 Die Schallentstehungskette

Systematische Untersuchungen zur Erfassung und gezielten Veränderung des akustischen Verhaltens von Maschinen und Anlagen müssen die Entstehung von Schall, die Leitung in Maschinenstrukturen und

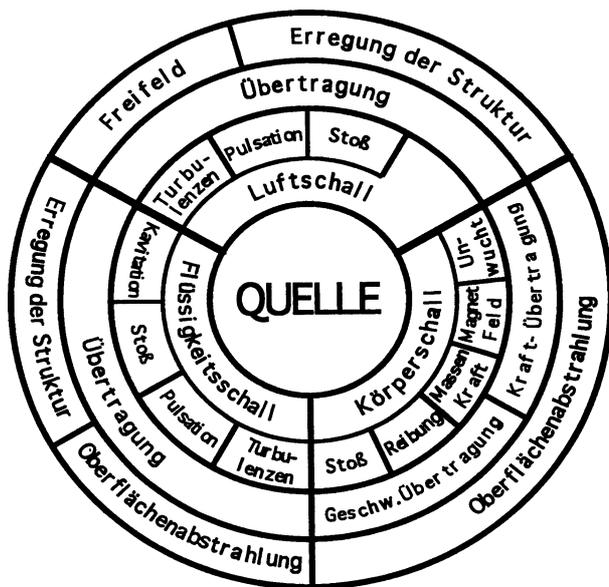


Bild 2: Abstrahierte Schallentstehungskette /9/

Bauteilen und die Abstrahlung einbeziehen. Ziel muß es sein, den Mechanismus der Schallerzeugung ("Schallentstehungskette") an der für das jeweilige Produkt wirtschaftlichsten Stelle zu durchbrechen, und die Abstrahlung von hörbarem Luftschall gemäß der wirkenden Restriktionen einzuhalten (Abnahmetest).

Für die Beurteilung des maschinenakustischen Verhaltens und die Ausarbeitung sinnvoller Verbesserungsmaßnahmen ist daher ein maschinenakustisches Ersatzmodell der Konstruktion zu erstellen. Ausgehend von den Schallquellen, ist die Schalleitung und -abstrahlung zu abstrahieren (Bild 2).

Bild 3 zeigt exemplarisch die Schallentstehungskette eines Getriebes. Zahnradgetriebe wandeln einen Teil der übertragenen mechanischen Leistung durch Stö-

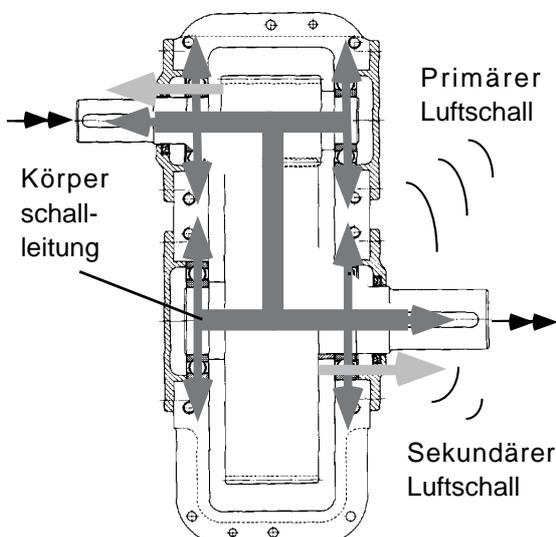


Bild 3: Schallentstehungskette eines Getriebes

rungen im Zahneingriff in Schwingungsenergie. Diese Energie wird durch Körperschalleitung über die Zahnradkörper, die Wellen, die Lager auf das abstrahlungsfähige Getriebegehäuse und das Fundament übertragen und wird hier hörbar. Der Zahneingriff bewirkt aber auch direkt eine Abstrahlung von Luftschall in das schallharte Getriebegehäuse, der über Nebenwege (Gehäusebelüftungen, Wellenabdichtungen) nach außen gelangen kann.

Die Analyse der Schallentstehungskette hat zu einer Reihe von Ansatzpunkten für eine gezielte Lärmreduzierung geführt /4, 2, 8, 9/. Die Schwingungs- und Körperschallisolierung von Antriebsaggregaten und Systemkomponenten von der Maschinenstruktur wird in /2, 8/ dargelegt. Maßnahmen zur Reduktion der Körperschalleitung werden in /1, 3, 9/ behandelt. Die Abstrahlung von Luftschall wird in einer Vielzahl von Veröffentlichungen behandelt /5, 6/.

Im Rahmen dieser Veröffentlichung sollen im Folgenden kurz einige wesentliche Möglichkeiten zu Beeinflussung der Schallentstehungskette vorgestellt und kritisch erläutert werden.

2 Primäre Maßnahmen

Der Begriff primäre Schallminderung umreißt alle Maßnahmen die auf eine Verminderung der direkten Geräuschanregung ausgerichtet sind.

Derartige Maßnahmen sind am effektivsten, haben aber auch oftmals grundsätzlichen Einfluß auf die einzusetzenden Wirkprinzipien (z.B. translatorische oder rotatorische Bewegung), die Art der Kraftübertragung (z.B. formschlüssige Verzahnungsgetriebe).

2.1 Geräuschanregung

Alle Maschinengeräusche lassen sich auf folgende Entstehungsprinzipien zurückführen /7/:

- Stoßvorgänge mit und ohne Anregung einer Struktur (Lagerspiel)
- Periodische Krafteinwirkung auf eine Struktur (Magnetostriktion, Verbrennungsdrücke, Zahneingriff beim Evolventengetriebe)
- Aeropulsive Quellen (Ansaug- und Auspuffgeräusch), aerodynamische Quellen (gestörte Luftströmung) und thermodynamische Quellen (Explosion) /4/.

Die Anregungscharakteristik ist bestimmend für das

angeregte Frequenzspektrum und damit neben der absoluten Höhe der Anregung maßgeblich für den zu betreibenden konstruktiven Aufwand. Typische Zeitverläufe mit ihren zugehörigen Frequenzspektren sind in der VDI 3720 Blatt 7 aufgelistet.

2.2 Direkter Luftschall

Bei luftschallerregten Geräuschen wird die Luft direkt zum Schwingen angeregt und dringt ohne weiteren Umweg an das menschliche Ohr. Typische Anregungen sind Schallemissionen durch Ventilatoren, durch Verwirbelungen in Luftströmungen oder durch Auspuffvorgänge. Der Konstrukteur ist aufgefordert schon bei der Festlegung eines Funktionsprinzips dessen akustisches Verhalten, also typische Frequenzen und deren Pegel, anhand des bestehenden maschinenakustischen Wissens (siehe **Bild 1**) abzuschätzen. Dadurch ist es dem Konstrukteur schon frühzeitig möglich, "laute" Konstruktionslösungen von vornherein zu verwerfen. Das Frequenzspektrum einer typischen tonalen Luftschallquelle durch einen Ventilator ist in **Bild 4** dargestellt. Das breitbandige Rauschen durch die Luftströmung tritt gegenüber dem Drehgeräusch des gleichmäßig geteilten Ventilators in den Hintergrund. Für gängige Produkte wie z.B. Ventilatoren oder Elektromotoren existieren bereits umfangreiche Maßnahmenkataloge und Empfehlungen. Ist dies nicht der Fall, so muß der Konstrukteur bestehende Regeln und Empfehlungen auf "seine" Konstruktion übertragen und beim Prototyp deren Wirksamkeit nachprüfen. Für einen Stiftrotor einer Universalmühle mit stark ausgeprägter Luftschallemission, siehe **Bild 5**, ist dies beispielsweise:

- Vermeidung gleichmäßiger Teilungen und Abstände der Stifte
- asymmetrische Anordnungen

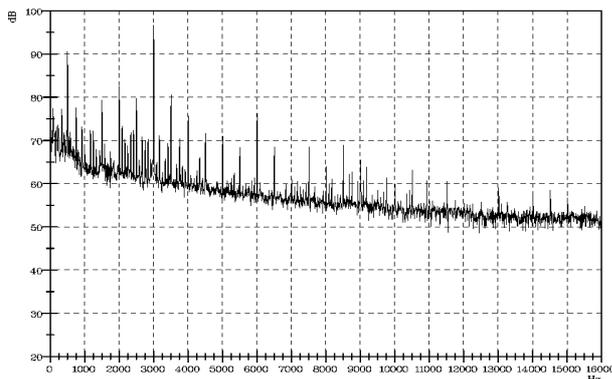


Bild 4: Ventilator mit 36 Flügeln bei 5000 1/min /5/

- Funktionstrennung Partikel zerschlagen/transportieren
- Vermeidung von Hohlräumen

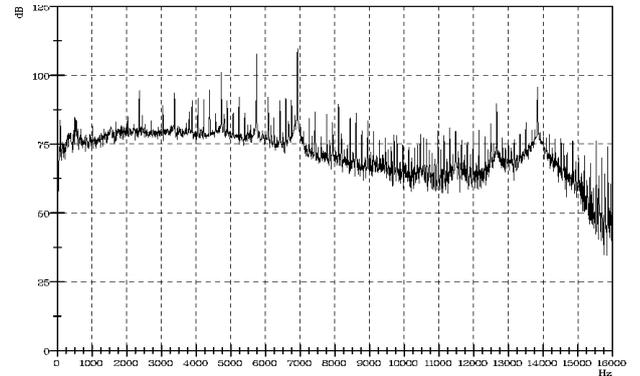


Bild 5: Universalmühle mit Stiftrotor, 98 m/s Umfangsgeschwindigkeit /5/

3 Sekundäre Maßnahmen

Ist eine alleinige Verringerung der Geräuschenerregung nicht erfolgreich durchführbar, so können Sekundärmaßnahmen eingesetzt werden.

3.1 Körperschall

Eine bedeutende Gruppe technischer Geräusche entsteht aus der Anregung der Struktur durch mechanische Schwingungen und der Umsetzung in Luftschall. Bei der Betrachtung ist zwischen krafterregtem Körperschall (Bauteile im Kraftfluß) und geschwindigkeitserregtem Körperschall (Anbauteile an schwingender Struktur) zu unterscheiden.

Der Vorgang der Körperschalleitung basiert im Gegensatz zur Luftschall auf komplizierteren wellenphysikalischen Vorgängen /1, 4/. Eine Abschätzung und Beurteilung der abgestrahlten Schalleistung wird daher ausgehend von der Anregungsfunktion, über die Transferfunktion und den Abstrahlgrad der Struktur vorgenommen (**Bild 6**).

In der technischen Akustik werden vier grundlegende Maßnahmen zur Verminderung der Körperschallei-

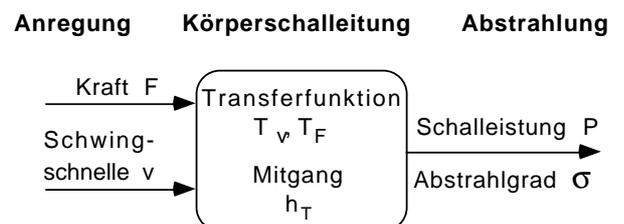


Bild 6: Entstehung von Körperschall

tung bei gegebener äußerer Anregung angewandt. **Bild 7** zeigt die Maßnahmen und ihre Kombinationsmöglichkeiten. Alle Maßnahmen bewirken eine frequenzselektive Beeinflussung der Transferfunktion. Die Bestimmung der Transferfunktion ist in einfachen Fällen durch Linearisierung möglich, in der Regel jedoch nur meßtechnisch bestimmbar.

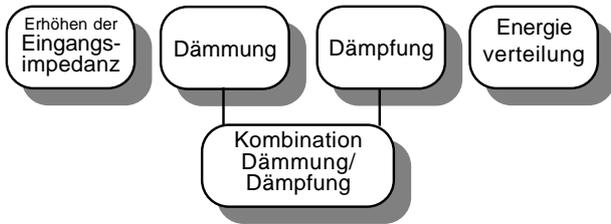


Bild 7: Maßnahmen zur Körperschallminderung

3.1.1 Erhöhen der Eingangsimpedanz

Die Eingangsimpedanz beschreibt den Widerstand einer Struktur gegen eine äußere Anregung. Eine Erhöhung der Eingangsimpedanz verringert die in die Struktur eintretende Körperschallenergie.

Die einflußnehmenden Parameter auf das frequenzabhängige Impedanzverhalten bilden

- die mitbewegte Masse,
- die Steifigkeit und
- die Dämpfung.

Montagepunkte für körperschallerregende Aggregate sollten daher nicht an biegeweichen Stellen der Struktur, sondern in longitudinalsteifen Zonen in Nähe der Fußpunkte gewählt werden. Das Einbringen von Sperrmassen bildet oftmals die einzige wirksame Maßnahme, kollidiert hingegen mit Leichtbauforderungen.

3.1.2 Dämmung

Grundprinzip der Körperschalldämmung ist die Reflexion von Körperschallwellen an Störungsstellen der mechanischen Impedanz im Ausbreitungsweg mit dem Ziel der Eingrenzung der Körperschallenergie auf einen beschränkten Bauteilbereich. Hierbei gilt:

- Die Art und die Dimensionierung der Störungsstelle sind maßgebend für den Anteil der von der Störungsstelle zurückreflektierten Energie.
- Die räumliche Anordnung der Störungsstellen

beeinflußt die Energieverteilung in der Struktur, das Reflexions- und Interferenzverhalten und die Länge des Ausbreitungsweges.

- Die Dämmwirkung ist abhängig von der Änderung der mechanischen Impedanz an der Störstelle und der Wiederholhäufigkeit im Körperschalleitungsweg.

Reflexionen von Körperschallwellen treten an Unstetigkeitsstellen in der mechanischen Struktur z. B. an Querschnittsänderungen, Massenanhäufungen, elastischen Zwischenschichten und Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Medien auf. Reflexionen bewirken aber auch stets Umwandlungen der einen in eine andere Körperschallwellenart.

Eine Übersicht der bekannten Dämmmaßnahmen bei longitudinaler Anregung und der zugeordneten Transmissionsgrade gibt **Tab. 1**.

Elastische Zwischen-schicht		$\tau = \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot f \cdot h_1 \sqrt{E_1 \rho_1}}{E_2 \cdot A \cdot s} \right)^2 \right]^{-1}$
Sperrmasse		$\tau = \left[1 + \left(\frac{\pi \cdot f \cdot m}{h_1 \sqrt{E_1 \rho_1}} \right)^2 \right]^{-1}$
Querschnittswechsel		$\tau = 4 \left[\left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{1/2} + \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{-1/2} \right]^{-2}$
Materialwechsel		$\tau = 4 \left[\left(\frac{E_1 \rho_1}{E_2 \rho_2} \right)^{1/2} + \left(\frac{E_1 \rho_1}{E_2 \rho_2} \right)^{-1/2} \right]^{-2}$

Tabelle 1: Dämmung von Longitudinalwellen /10/

Von großer Bedeutung in der Körperschall- und Schwingungsisolation ist die elastische Lagerung. Alle anderen Dämmmaßnahmen (Sperrmassen, Querschnittsübergänge, etc.) erzielen vergleichbare Dämmwerte nur bei unrealistisch großer Dimensionierung.

3.1.3 Dämpfung

Ohne das Vorhandensein von Dämpfung verursacht eine beliebige Dämmungsmaßnahme in Bauteilen endlicher Größe einen Anstieg der Körperschallenergie vor der Maßnahme, der exakt der Dämmwirkung

der Maßnahme entspricht. Für eine zu betrachtende Stelle hinter der Dämmungsmaßnahme tritt daher keine Änderung des Körperschallniveaus ein. Nur in Kombination mit Dämpfung ist für die im Maschinenbau anzutreffenden Bauteilgrößen eine Abnahme des Körperschallpegels zu erzielen.

Dämpfung bezeichnet alle Arten der Energiedissipation in andere dem System nicht mehr zur Verfügung stehende Energieformen.

Eine mögliche Berechnung der schalltechnischen Effizienz einer Werkstoffänderung hat in der Praxis nur eingeschränkte Bedeutung, sinnvoller ist eine Verstärkung der an der jeweiligen Konstruktion wirksamen Mechanismen durch die Gestaltung selbst (Dämpfung an Trennflächen und Einspannungen), sowie der gezielte Einsatz zusätzlicher Dämpfungsmaßnahmen. **Bild 8** zeigt exemplarisch die am Zahnradkörper wirksamen Mechanismen.

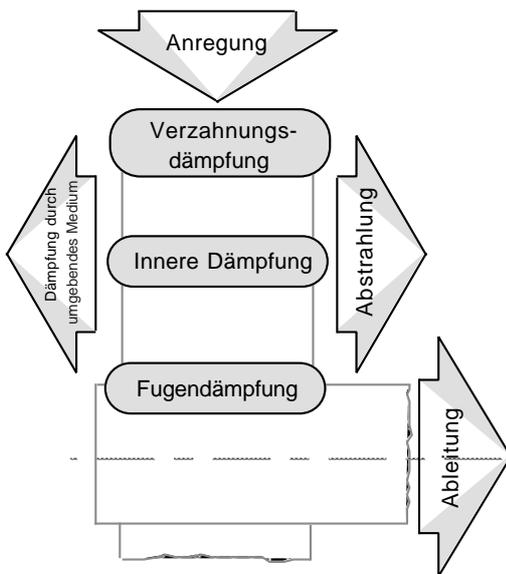


Bild 8: Dämpfungsmechanismen am Zahnradkörper

Der Einfluß zusätzlicher Dämpfungsmaßnahmen auf die Transferfunktion auf ist in **Bild 9** dargestellt.

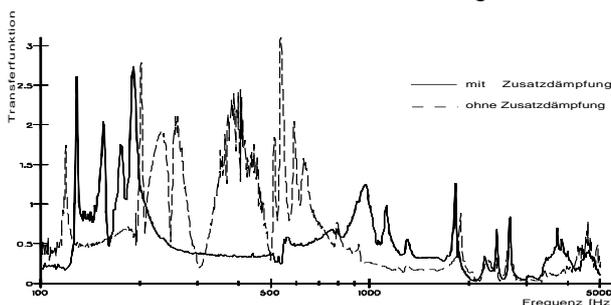


Bild 9: Transferfunktion mit und ohne Zusatzdämpfung

Dämpfung kann aber auch umgekehrt im Fall der Körperschallisolation mit niederfrequent abgestimmten Federelementen zu einer gegenüber dem ungedämpften Fall verringerten Körperschallminderung führen.

3.2 Luftschall

3.2.1 Schalldurchlässigkeit

Sekundäre Schallminderungsmaßnahmen dienen dazu, einmal entstandenen Luftschall durch Dämpfung oder Dämpfung und Dämmung in seiner Ausbreitung zu behindern und dadurch zu mindern. Dazu dienen Schalldämpfer, Teil- und Vollkapseln für Schallquellen aber auch raumakustische Maßnahmen. Sekundärmaßnahmen sind immer auch nachträglich durchführbar, verursachen aber immer Zusatzkosten. Da die zu beeinflussenden Schallquellen im allgemeinen bekannt sind, kann die Sekundärmaßnahme gezielt getroffen werden.

Die Schalldurchlässigkeit von Gehäuseteilen aus Blech bildet einen weiteren Ansatzpunkt für eine akustische Optimierung. Bislang werden zur Reduzierung der Luftschalldurchlässigkeit spezielle Absorptionsmaterialien zur Auskleidung von Gehäusen und Kapselungen eingesetzt.

Diese Materialien wandeln einen Teil der auftretenden Energie und absorbieren diesen Anteil meist durch Umwandlung in innere Reibung. Charakterisiert wird dieses Verhalten durch den Absorptionsgrad α . Den höchsten Absorptionsgrad weisen poröse Fasern, geschlossen porige und offenzellige Schäume auf. Die geringe chemische und abrasive Resistenz dieser Werkstoffe setzt den Einsatzmöglichkeiten enge Grenzen, so ist z.B. der Einsatz in lebensmitteltechnischen Anlagen ausgeschlossen.

Die hohe schalltechnische Absorption dieser Werkstoffe ist aber auch auf die gute isolierende Wirkung des Mediums Luft, die in all diesen Materialien eingebettet ist, zurückzuführen. Aufwendige Doppelkammergehäuse erreichen vergleichbare oder gar bessere Isolationsgrade, bei erheblich höheren Material- und Fertigungskosten.

3.2.2 Abstrahlung von Luftschall

Bei Verminderung der Schallabstrahlung sind zwei unterschiedliche Problemkreise in die Überlegungen einzubeziehen. Die Abstrahlung von direktem Luftschall durch einzelne Aggregate kann wirkungsvoll durch Kapselungen verringert werden. Hierbei ist allerdings die Wirkung von Löchern in der Kapsel zu beachten. Häufig müssen aus funktionalen Gründen Durchbrüche für Antriebswellen, Beschickung, Luftzu- und -abfuhr vorgesehen werden. Bei 1% Lochfläche in Relation zur Gesamtoberfläche steigt der Schallpegel um 3 dB.

Die abgestrahlte Schalleistung kann von den Parametern

- Abstrahlgrad
- Körperschallmaß
- anregende Kraft

entscheidend beeinflusst werden.

In das Körperschallmaß fließen die Parameter Systemoberfläche und Transferadmittanz mit ein. Die Transferadmittanz abstrahlungsfähiger Gehäuseoberflächen kann durch versteifende Gehäuserippen, zusätzliche Massebelegung und entdröhnende Zusatzbeläge entscheidend verändert werden.

Die Abstrahlung von BiegeWellen wird durch die BiegeWellengrenzfrequenz der Platte bestimmt. Oberhalb der Grenzfrequenz erfolgt eine ungehinderte Abstrahlung. Unterhalb wird die Abstrahlung durch den akustischen Kurzschluß geschwächt. Durch die Einflußgrößen Federsteifigkeit oder Massenbelegung kann die Plattengrenzfrequenz zu tieferen Frequenzen verschoben werden. Die Maschinenoberfläche strahlt umso weniger Schall ab, je schwerer und biegeWeicher sie konstruiert ist.

In /7, 8/ werden die Ausbreitung und Abstrahlung des Körperschalls unter besonderer Berücksichtigung von Maschinenbaustrukturen beschrieben und hieraus allgemeine Regeln zur Konstruktion lärmarmen Maschinen abgeleitet.

Unter Berücksichtigung der Anregungs- und Abstrahlungsmechanismen ist durch eine Unterteilung des Gehäuses in kraftführende Stege und schalltechnisch entkoppelte Verkleidungsbleche eine erhebliche Geräuschminderung zu erzielen.

4 Zusammenfassung

Die Analyse der Schallentstehungskette bildet einen wesentlichen Ansatzpunkt für die lärmarme Konstruktion von Maschinen und Anlagen. Nur bei genauer Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge ist eine Unterbrechung der Wirkmechanismen zu erzielen.

5 Literatur

/1/ Dietz, P.; Engel, K.: FVA Forschungsreport 1995, Bad Soden

/2/ Dietz, P.; Engel, K.; Haje, D.: Forschungsprojekt "Maschinenakustik" auf europäischer Ebene EQUIP-Work Methodology for Development of Quiet Products
Institutsmitteilung Nr. 17, IMW Clausthal 1992

/3/ Dietz, P.; Engel, K.; Schmidt, A: Maschinenakustische Maßnahmen zur Reduktion der Körperschallübertragung
Institutsmitteilung Nr. 19, IMW Clausthal 1994

/4/ Cremer, L.; Heck, M.I:
Körperschall
Springer-Verlag Berlin 1967

/5/ SFB 180: "Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen bei besonderen thermischen, chemischen oder mechanischen Belastungen", Teilprojekt A15: Konstruktive Maßnahmen zur Schallminderung an Hochleistungs-Prallzerkleinerungsmühlen und -windsichtern

/6/ Barth, H.-J.: Maschinenakustik, Vorlesungsskript TU-Clausthal, 1994

/7/ VDI Richtlinie 3720 Blatt 1, Lärmarm konstruieren, Beuth Verlag, Berlin, Köln 1980

/8/ Savoir International Course on Systematic Low Noise Design of Machinery and Equipment
23-26 Feb. 1994 Berlin, Germany

/9/ Dietz, P.; Konstruktion lärmarmen Maschinen, Vorlesung IMW Clausthal 1993

/10/ Heckl, M.; Müller, H. A.:
Taschenbuch der Technischen Akustik, 2. Auflage
Berlin 1994