

DIN EN ISO 11688-1

ICS 17.140.20; 21.020

Ersatz für
DIN EN ISO 11688-1:1998-10

**Akustik –
Richtlinien für die Konstruktion lärmarmer Maschinen und Geräte –
Teil 1: Planung (ISO/TR 11688-1:1995);
Deutsche Fassung EN ISO 11688-1:2009**

Acoustics –
Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment –
Part 1: Planning (ISO/TR 11688-1:1995);
German version EN ISO 11688-1:2009

Acoustique –
Pratique recommandée pour la conception de machines et d'équipements à bruit réduit –
Partie 1: Planification (ISO/TR 11688-1:1995);
Version allemande EN ISO 11688-1:2009

Gesamtumfang 46 Seiten

Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik (NALS) im DIN und VDI



Nationales Vorwort

Der der Europäischen Norm EN ISO 11688-1:2009 zugrunde liegende Internationale Technische Report ISO/TR 11688-1:1995 wurde im Technischen Komitee ISO/TC 43/SC 1 „Noise“ (Sekretariat: DS, Dänemark) auf Antrag von CEN/TC 211 „Akustik“ (Sekretariat: DS, Dänemark) unter intensiver deutscher Mitarbeit erstellt.

Für die deutsche Mitarbeit ist der Arbeitskreis NA 001-02-01 AA „Maschinenakustik — Konstruktion lärmarmen Maschinen und Anlagen“ im Normenausschuss „Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik“ (NALS) im DIN und VDJ zuständig.

Durch die Novellierung der EG-Maschinenrichtlinie wurde die formale Anpassung der Anhänge ZA und ZB zur Bezugnahme auf die bisherige Richtlinie 98/37/EG und die neue Richtlinie 2006/42/EG erforderlich. Die technischen Inhalte von DIN EN ISO 11688-1:1998-10 wurden nicht geändert.

Für die in diesem Dokument zitierten Internationalen Normen wird im Folgenden auf die entsprechenden Deutschen Normen hingewiesen:

ISO 3744	siehe DIN EN ISO 3744
ISO 3746	siehe DIN EN ISO 3746
ISO 4871	siehe DIN EN ISO 4871
ISO 9611	keine Deutsche Norm
ISO 9614-1	siehe DIN EN ISO 9614-1
ISO 9614-2	siehe DIN EN ISO 9614-2
ISO 11200	siehe DIN EN ISO 11200
ISO 11689	siehe DIN EN ISO 11689

Diese Deutschen Normen sind im Anhang NA aufgeführt.

Änderungen

Gegenüber DIN EN ISO 11688-1:1998-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Änderung und Ergänzung der Anhänge ZA und ZB, die den Bezug zur bisherigen Maschinenrichtlinie (98/37/EG) und zur neuen Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) herstellen;
- b) Anpassung an die neue deutsche Rechtschreibung.

Frühere Ausgaben

DIN EN ISO 11688-1:1998-10

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN EN ISO 3744, *Akustik — Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen — Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene*

DIN EN ISO 3746, *Akustik — Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen — Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene*

DIN EN ISO 4871, *Akustik — Angabe und Nachprüfung von Geräuschemissionswerten von Maschinen und Geräten*

DIN EN ISO 9614-1, *Akustik — Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen — Teil 1: Messungen an diskreten Punkten*

DIN EN ISO 9614-2, *Akustik — Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schallintensitätsmessungen — Teil 2: Messung mit kontinuierlicher Abtastung*

DIN EN ISO 11200, *Akustik — Geräuschabstrahlung von Maschinen und Geräten — Leitlinien zur Anwendung der Grundnormen zur Bestimmung von Emissions-Schalldruckpegeln am Arbeitsplatz und an anderen festgelegten Orten*

DIN EN ISO 11689, *Akustik — Vorgehensweise für den Vergleich von Geräuschemissionswerten für Maschinen und Geräte*

— Leerseite —

Deutsche Fassung

**Akustik —
Richtlinien für die Konstruktion lärmarmen
Maschinen und Geräte —
Teil 1: Planung
(ISO/TR 11688-1:1995)**

Acoustics —
Recommended practice for the design of low-noise
machinery and equipment —
Part 1: Planning
(ISO/TR 11688-1:1995)

Acoustique —
Pratique recommandée pour la conception de machines et
d'équipements à bruit réduit —
Partie 1: Planification
(ISO/TR 11688-1:1995)

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 3. August 2009 angenommen.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

Seite

Vorwort	3
Einleitung	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe	5
4 Konstruktionsmethodik und akustische Aspekte	7
5 Entwurfs- und Detailkonstruktion	9
5.1 Allgemeines	9
5.2 Grundlegende Arbeitsschritte	9
5.3 Verminderung der Geräuschenstehung.....	15
5.4 Geräuschübertragung	21
5.5 Geräuschabstrahlung.....	25
6 Untersuchungen am Prototyp	26
6.1 Allgemeines	26
6.2 Ermittlung der Schallquellen	26
6.3 Bewertung der Schallquellen	27
6.4 Veränderungen am Prototyp	27
7 Abschlussprüfung	28
Anhang A Zusammenfassung der Konstruktionsregeln	29
Anhang B Anforderungen für die Konstruktion lärmarmen Maschinen	34
Anhang C Ergebnisbericht	37
Anhang D (informativ) Literaturhinweise	40
Anhang ZA (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der EG-Richtlinie 98/37/EG	41
Anhang ZB (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der EG-Richtlinie 2006/42/EG	42

Vorwort

Der Text von ISO/TR 11688-1:1995 wurde vom Technischen Komitee ISO/TC 43 „Acoustics“ der Internationalen Organisation für Normung (ISO) erarbeitet und als EN ISO 11688-1:2009 durch das Technische Komitee CEN/TC 211 „Akustik“ übernommen, dessen Sekretariat von DS gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Januar 2010, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Januar 2010 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. Das CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt EN ISO 11688-1:1998.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen von EG-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EG-Richtlinien siehe informative Anhänge ZA und ZB, die Bestandteil dieses Dokuments sind.

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

Anerkennungsnotiz

Der Text von ISO/TR 11688-1:1995 wurde vom CEN als EN ISO 11688-1:2009 ohne irgendeine Abänderung genehmigt.

Einleitung

Mit diesem Internationalen Fachbericht wird eine Leitlinie für die Konstruktion lärmarmen Maschinen zur Verfügung gestellt. Die Mehrzahl der veröffentlichten Internationalen Normen, die im ISO/TC 43/SC 1 erarbeitet wurden, beschreiben Verfahren für die Messung und/oder Bewertung von Geräuschen. Das Ziel dieses Internationalen Fachberichtes ist jedoch die Lärminderung an vorhandenen Maschinen und in der Konstruktionsphase.

Es ist wichtig, dass sich Ingenieure, die nicht über ein akustisches Spezialwissen verfügen, mit der Lärminderungspraxis beschäftigen. Für diese Ingenieure ist es bedeutsam, über ein Grundwissen zur Geräuschenstehung und zum Ausbreitungsverhalten zu verfügen, um die grundlegenden Verfahren von Lärminderungsmaßnahmen zu verstehen. Somit stellt dieser Internationale Fachbericht eine Einführung in die akustischen Grundbegriffe dar und kann als Grundlage für die weitere Aneignung von Wissen auf dem Gebiet der Lärminderung dienen.

Es ist erforderlich, die Verbreitung der hier angegebenen Konstruktionsregeln auf dem Wege der Normung zu unterstützen.

Diese Überlegungen haben zur Ausarbeitung von Internationalen Fachberichten auf dem Gebiet der Lärminderung geführt.

1 Anwendungsbereich

Dieser Internationale Fachbericht unterstützt das Verständnis der Grundlagen der Lärminderung bei Maschinen und Anlagen.

Die hier vorgestellten Richtlinien sollen den Konstrukteur in allen Konstruktionsphasen bei der Lärminderung am Endprodukt unterstützen. Das methodische Vorgehen bei der Produktentwicklung wurde als Grundlage für die Strukturierung dieses Dokumentes gewählt (siehe Abschnitt 4).

Die Zusammenstellung der Konstruktionsregeln, die in diesem Internationalen Fachbericht angegeben werden, erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Andere technische Maßnahmen zur konstruktiven Lärminderung können eingesetzt werden, wenn sie die gleiche oder eine bessere Wirksamkeit aufweisen.

Zur Lösung von Problemen, die über den Anwendungsbereich dieses Internationalen Fachberichtes hinausgehen, kann sich der Konstrukteur auf die im Anhang D zusammengestellte Literatur stützen, die einen allgemeinen Überblick der akustischen Literatur zum Zeitpunkt der Veröffentlichung gibt. Außerdem wird auf zahlreiche technische Veröffentlichungen hingewiesen, die sich mit akustischen Problemen beschäftigen.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

ISO 3744:1994, *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound pressure — Engineering method in an essentially free field over a reflecting plane*

ISO 3746, *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources — Survey method employing an enveloping measurement surface over a reflecting plane*

ISO 4871, *Acoustics — Declaration and verification of noise emission values of machinery and equipment*

ISO 9611, *Acoustics — Characterization of sources of structure-borne sound with respect to airborne sound radiation of connected structures — Measurement of velocity at the contact points of machinery when resiliently mounted*

ISO 9614-1:1994, *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity — Part 1: Measurement at discrete points*

ISO 9614-2, *Acoustics — Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity — Part 2: Measurement by scanning*

ISO 11200, *Acoustics — Noise emitted by machinery and equipment — Guidelines for the use of basic standards for the determination of emission sound pressure levels at the work station and at other specified positions*

ISO 11689, *Acoustics — Systematic collection and comparison of noise emission values for machinery and equipment*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Internationalen Fachberichtes gelten die folgenden Begriffe.

3.1

Luft-, Flüssigkeits- und Körperschall

Schall, der sich jeweils in Luft, einer Flüssigkeit oder einer festen Struktur ausbreitet

3.2

Geräuscherzeugende Komponenten

Maschinenkomponenten, die Schall erzeugen. In vielen Fällen sind dies Aggregate, in denen Energie umgewandelt wird, die mechanische Arbeit aus den Energiequellen wie z. B. elektrischer, mechanischer oder magnetischer Energie, hydraulischem Druck, inneren Kräften oder aus Reibung erzeugen. Andere „Geräuscherzeuger“ können Gebiete instationärer Strömung oder Kontaktflächen zwischen sich bewegenden Teilen sein

3.3

Geräuschübertragende Komponenten

diese Komponenten übertragen Lärm, Schall, der von den geräuscherzeugenden Komponenten erzeugt wird. Sie enthalten keine Schallquellen, aber sie können als dominierende Schallstrahler fungieren. Typische geräuschübertragende Komponenten sind Teile der Maschinenstruktur und Verkleidungsbleche

3.4

Periodisches Geräusch

Geräusch, das sich periodisch wiederholt. Typische Quellen für periodische Geräusche sind Getriebe oder Kolbenmaschinen. Charakteristisch für periodische Geräusche ist, dass sie ein Linienspektrum aufweisen.

3.5

Tonales Geräusch

Geräusch, das durch einen oder mehrere klar unterscheidbare Töne bestimmt wird.

3.6

Breitbandiges Geräusch

Geräusch, das entweder durch einzelne Stöße entsteht, z. B. kurze Druckimpulse oder mechanische Stöße, oder das durch Turbulenzen in einer Luft- oder Flüssigkeitsströmung hervorgerufen wird. Kennzeichnend für breitbandige Geräusche ist, dass die Frequenzanalyse ein kontinuierliches Spektrum über einen weiten Frequenzbereich zeigt

3.7

Kraftanregung

die Anregungskraft ist unabhängig von den Eigenschaften der angeregten Struktur; ein Beispiel hierfür ist die Einwirkung einer leichten, beweglichen Quelle auf eine relativ steife und schwere Struktur

3.8

Geschwindigkeitsanregung

die Anregungsgeschwindigkeit ist unabhängig von den Eigenschaften der angeregten Struktur; ein Beispiel hierfür ist eine leichte bewegliche Struktur, die von einer relativ schweren Quelle angeregt wird

3.9

Quasistatisches Verhalten

Übertragungseigenschaften der Maschine bei Frequenzen unterhalb der niedrigsten Eigenfrequenz

3.10

Resonanzverhalten

Übertragungseigenschaften im Bereich diskreter Eigenfrequenzen

3.11

Verhalten bei hoher Eigenfrequenzdichte

Übertragungseigenschaften im Frequenzbereich zahlreicher Eigenfrequenzen

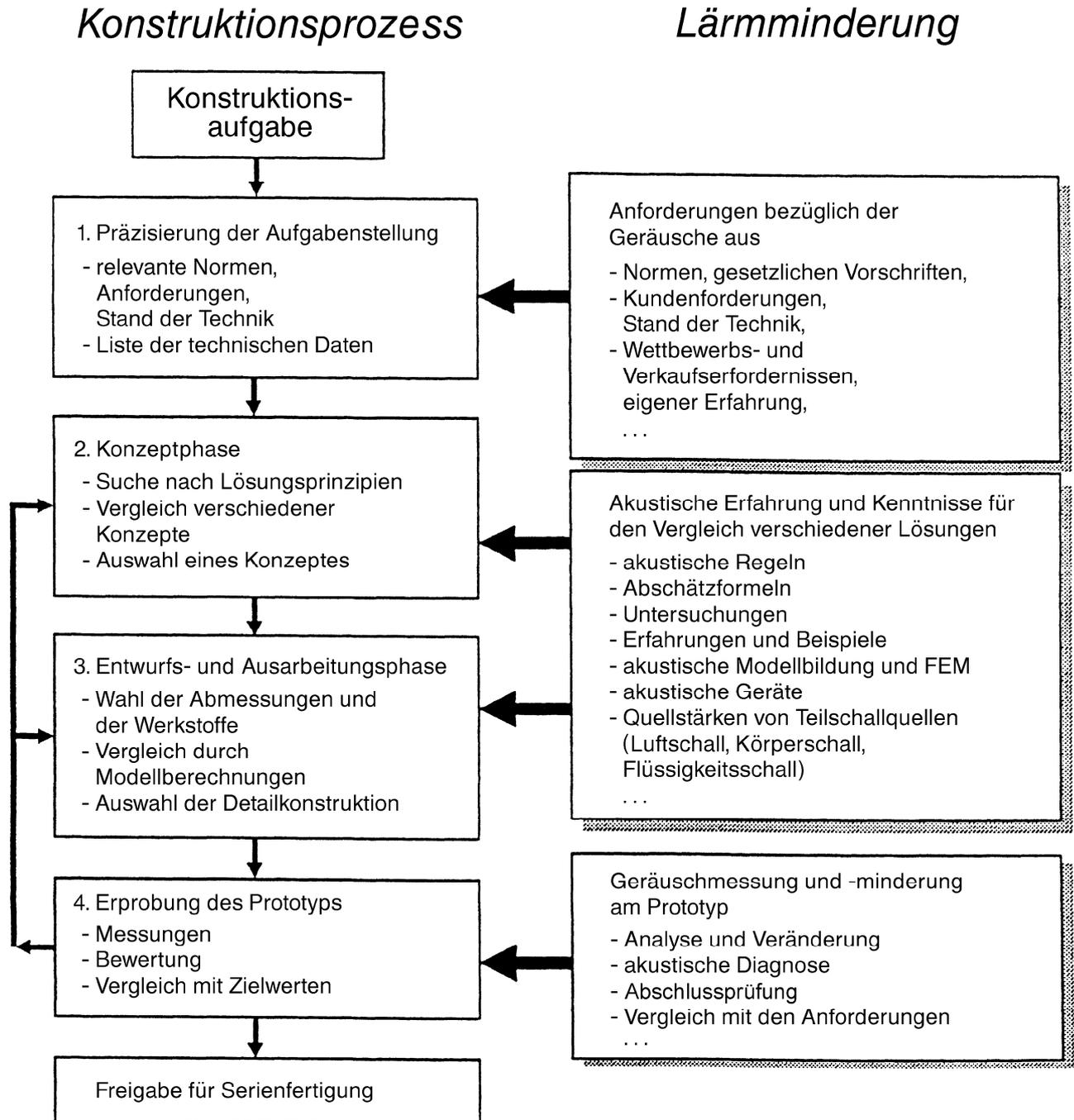


Bild 1 — Die Phasen des Konstruktionsprozesses; Unterstützung der konstruktiven Entwicklung durch Lärminderungsverfahren

4 Konstruktionsmethodik und akustische Aspekte

Die Konstruktionsmethodik ist ein operatives Konzept, das Informationen aus zahlreichen Disziplinen, z. B. der Maschinenakustik nutzt. Auf dieser Grundlage ist es möglich, Konstruktionsziele zu erreichen und Entscheidungen während der Konstruktion und Entwicklung zu treffen.

Der Konstruktionsprozess kann in die vier (unten aufgezählten) Phasen unterteilt werden, die eine zunehmende Spezifizierung beinhalten (siehe Bild 1). Der Zuwachs an Information von Stufe zu Stufe ermöglicht es, alternative Lösungen nach spezifischen Konstruktionsanforderungen, wie z. B. nach geringem Schallpegel, herauszufinden.

Die Stufen der systematischen Konstruktion sind:

1. Klärung der Aufgabenstellung: Es wird eine Anforderungsliste aufgestellt, die den gesamten Konstruktionsprozess regelt. In diese Liste werden auch Anforderungen bezüglich des Geräusches aufgenommen, die sich aus Gesetzen, dem Stand der Technik, dem Wettbewerb, Kundenforderungen oder der Bewertung des Maschinengeräusches als Verkaufsargument ergeben (siehe Anhang B).

2. Konzeptphase: Diese Phase des Konstruktionsprozesses konzentriert sich im Wesentlichen auf die Hauptfunktionen. Da in dieser Phase üblicherweise nur wenige Informationen über das Endprodukt zur Verfügung stehen, wird das Geräuschverhalten meistens durch einen Vergleich mit bestehenden Produkten abgeschätzt.

3. Entwurfs- und Ausarbeitungsphase: Mit fortschreitender Konstruktion und der Auswahl der einzelnen Aggregate können quantitative Abschätzungen des Geräuschverhaltens durch die Auswahl von Konstruktionsvarianten gemacht werden.

4. Messungen am Prototyp: Messungen am Prototyp gestatten eine quantitative Abschätzung der wichtigsten Schallquellen und Übertragungswege. Daraus können spezifische Maßnahmen abgeleitet werden, die zu Konstruktionsänderungen führen. Die Erfüllung der gestellten Anforderungen kann durch Messungen bestätigt werden.

Das folgende Verfahren kann in jeder der beschriebenen Konstruktionsphasen angewendet werden. Für die Methodik ist es entscheidend, die dominierenden Geräuschprobleme in einer möglichst frühen Konstruktionsphase zu eliminieren:

- Der erste Schritt ist die Bestimmung der wichtigsten Schallquellen der Maschine und die Aufstellung einer Rangfolge (siehe 5.2).
- Nach Feststellung der wichtigsten Schallquellen muss eine detailliertere Analyse der Geräuschenstehungsmechanismen vorgenommen werden (siehe 5.3).
- Der nächste Schritt ist die Analyse und Beschreibung der direkten Geräuschabstrahlung von den Quellen zu den Empfangspunkten und eine Analyse der Schallübertragung durch die Struktur zu den abstrahlenden Flächen (siehe 5.4).
- Der letzte Schritt ist die Untersuchung der Abstrahlung von diesen Flächen und die Bestimmung der unterschiedlichen Anteile am Schalldruckpegel am Empfangspunkt.
- Bestimmung der optimalen Kombination von Lärminderungsmaßnahmen.

Bei der Konstruktion lärmarmen Maschinen sollte stets versucht werden, mit Hilfe der Wirkungskette der Geräuschenstehung (siehe Bild 2) die vorkommenden akustischen Grundmechanismen zu bestimmen.

Sämtliche Konstruktionsprozesse besitzen eine Rückführung. In jeder Phase muss eine Entscheidung getroffen werden, ob zur nächsten Stufe übergegangen werden kann oder ob der vorhergehende Schritt wiederholt werden muss.

In Bild 3 ist dargestellt, wie verschiedenartig die Geräuschmechanismen miteinander verbunden sind. Höchste Priorität bei der Lärminderung hat die Identifizierung der Quelle. Im ersten und zweiten Ring sind unterschiedliche Schallquellenarten mit Stichworten angegeben, die mit den Überschriften der folgenden Abschnitte korrespondieren.

Wenn die Art der Schallquelle feststeht, findet die Übertragung durch das betreffende Medium statt, wie im dritten Ring dargestellt. Letztlich wird der Schall in die freie Umgebung abgestrahlt, oder es wird eine Struktur angeregt. Das Bild zeigt, dass jede Schallquelle ihre charakteristischen Merkmale und ihren spezifischen Übertragungsweg durch die Struktur bis zur Anregung einer abstrahlenden Fläche besitzt. Zur Lärm-minderung an einer Maschine mit vielen unterschiedlichen Schallquellenarten ist es erforderlich, jede Quelle, jeden Übertragungsweg und jede abstrahlende Fläche zu analysieren, um ihre jeweilige Bedeutung bewerten zu können. Im nächsten Abschnitt ist ein Beispiel für eine solche Maschine dargestellt.

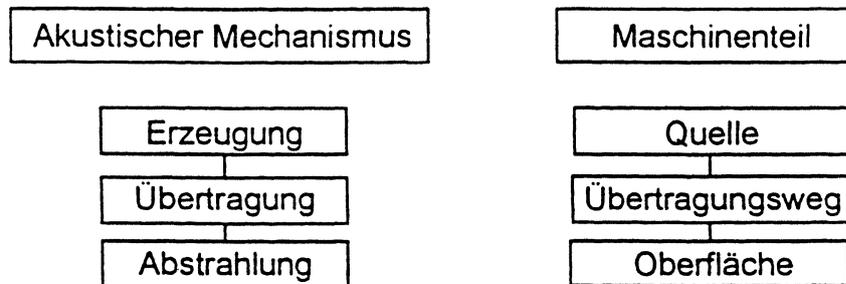


Bild 2 — Wirkungskette der Geräusentstehung

5 Entwurfs- und Detailkonstruktion

5.1 Allgemeines

Da eine konstruktive Lösung immer die Wahl eines physikalischen Funktionsprinzips und die Gestaltung der ausführenden Elemente beinhaltet, können die folgenden allgemeinen Hinweise für die Wahl des konstruktiven Konzeptes gegeben werden.

- Mit großer Wahrscheinlichkeit wird das Prinzip mit dem geringsten Energieumsatz, den kleinsten Geschwindigkeiten und den kleinsten Beschleunigungen aus akustischer Sicht die beste Lösung darstellen.
- Bei gegebenem Funktionsprinzip kann das Maschinengeräusch durch Variation der Masse, der Steifigkeit und der Dämpfung der Struktur verändert werden. Konstruktionsparameter wie Material, Form, Lage, Anzahl der Elemente, Abmessungen, Ausführung und Art von Verbindungselementen können einen wichtigen Einfluss auf die Geräuschemission haben. Die richtige Wahl dieser Parameter kann die Schwingungen und/oder die Schallabstrahlung der Maschine reduzieren.
- Eine gleichmäßige Strömung von Gasen und Flüssigkeiten erzeugt weniger Geräusch als eine unstetige Strömung.

Das für die Konzeptphase und für die Entwurfskonstruktion im Abschnitt 4 beschriebene und in den folgenden Abschnitten weiterentwickelte Verfahren kann auch für die Diagnose und Lärm-minderungsmaßnahmen angewendet werden. In der Konzeptphase sind nur grobe Abschätzungen, die Anwendung allgemeiner Konstruktionsregeln oder ein Vergleich mit existierenden Lösungen möglich. In der Entwurfsphase können die Ergebnisse detaillierter Berechnungen, Modellbetrachtungen und orientierender Experimente angewendet werden.

5.2 Grundlegende Arbeitsschritte

5.2.1 Akustische Modellbildung und Bildung einer Rangfolge

Das Geräuschverhalten einer Maschine mit verschiedenen Geräuschquellen kann mit Hilfe eines akustischen Modells der Maschine dargestellt werden (siehe Bild 2). Um dieses Modell ausarbeiten zu können, muss der Konstrukteur die Maschine zunächst in geräuscherzeugende und geräuschübertragende Komponenten unterteilen.

Geräuscherzeugende und geräuschübertragende Komponenten können die Eigenschaft besitzen, Luft-, Flüssigkeits- und Körperschall zu erzeugen, zu übertragen und abzustrahlen. Deshalb ist es notwendig, die Komponenten für diese drei Arten des Schalls zu analysieren. Der Zweck der Unterteilung der Geräusche ist die Bestimmung der dominierenden Schallquellen, Schallübertragungswege und schallabstrahlenden Flächen.

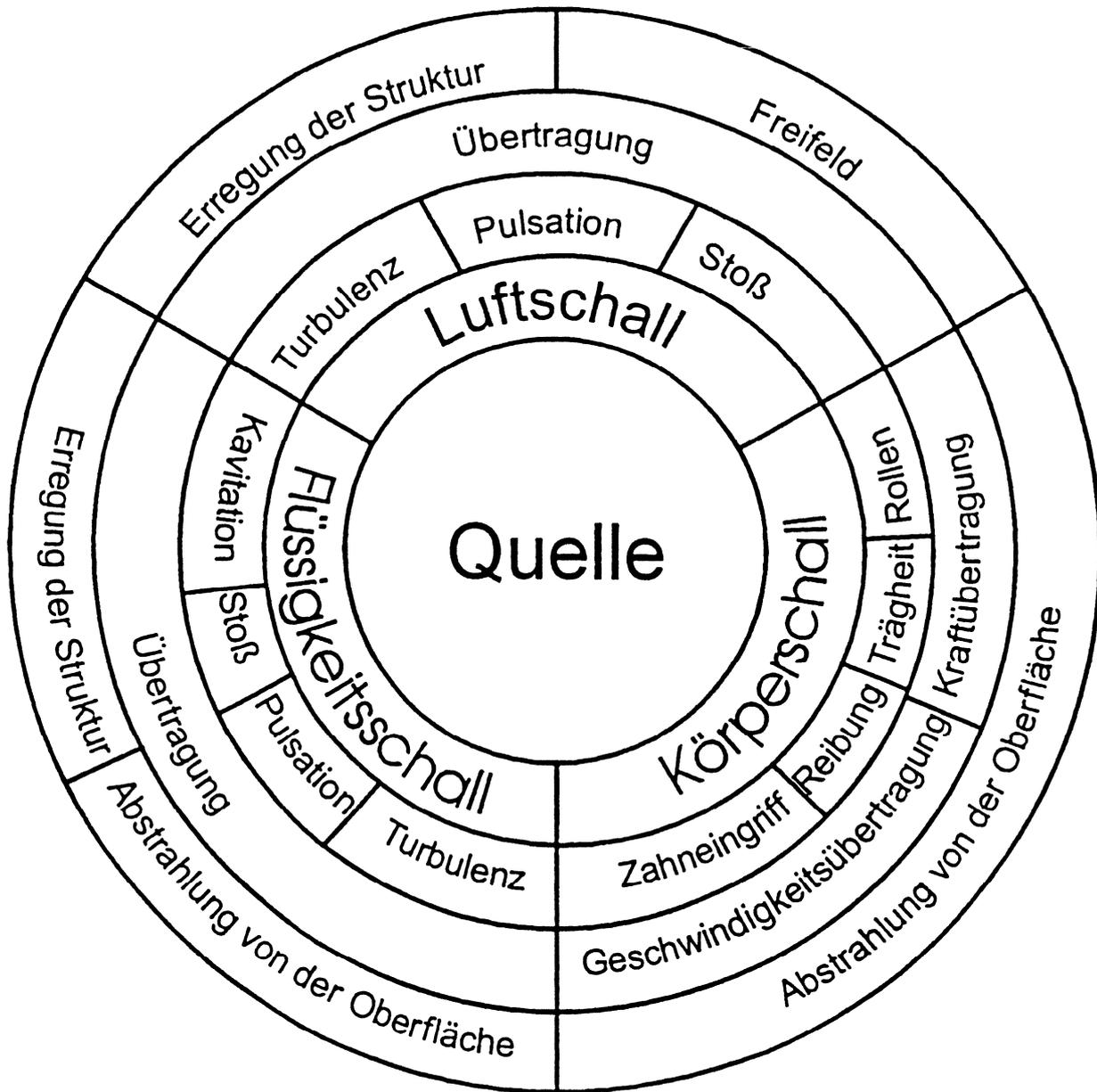


Bild 3 — Grundlegendes Modell der Geräuscherzeugung in Maschinen

Anschließend muss der Konstrukteur analysieren, auf welchen Wegen sich der Schall ausbreiten kann. Körperschall-, Flüssigkeitsschall- und Luftschallausbreitungswege müssen in Betracht gezogen werden. Außerdem muss die Möglichkeit der direkten Abstrahlung von Luftschall von einzelnen geräuscherzeugenden Komponenten berücksichtigt werden.

Zuletzt müssen die schallabstrahlenden Flächen der Maschine ermittelt werden.

Nach der Bestimmung der wichtigsten Schallquellen mit ihren Übertragungswegen erfolgt die Analyse der Betriebsparameter. Dominierende Geräuschanteile müssen zuerst behandelt werden. Es wird empfohlen, zuerst an den Schallquellen einzugreifen, bevor die Übertragungswege und die abstrahlenden Flächen betrachtet werden.

Schwerwiegende Lärmprobleme können durch das Zusammenfallen von Antriebsfrequenzen und Resonanzen in den geräuscherzeugenden und geräuschübertragenden Komponenten hervorgerufen werden.

Allgemeine Konstruktionsregeln:

- Aufteilung der Maschine in geräuscherzeugende und geräuschübertragende Komponenten;
- Ermittlung von Luft-, Flüssigkeits- und Körperschallquellen;
- Verfolgung von Luft-, Flüssigkeits- und Körperschallübertragungswegen;
- Bestimmung von schallabstrahlenden Flächen;
- Bestimmung der stärksten Anteile an der Geräuscherzeugung (Quellen, Übertragungswege, abstrahlende Flächen).

5.2.2 Beispiel

Anhand eines Beispiels soll dargestellt werden, wie die akustische Modellbildung und die Zuordnung von Prioritäten an Schallquellen durchgeführt werden können.

Bild 4 zeigt ein Hydraulikaggregat, das geräuscherzeugende Komponenten besitzt (z. B. Elektromotor, Hydraulikpumpe und Ventil).

Diese Komponenten sind untereinander und mit dem Behälter verbunden.

Das Hydraulikaggregat umfasst geräuscherzeugende Komponenten, die Luft-, Körper- und Flüssigkeits-schallquellen darstellen.

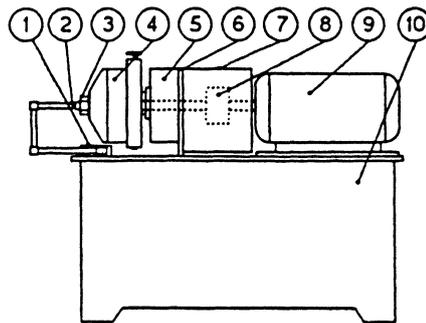
Um die Übertragung der Geräusche von den verschiedenen Schallquellen in die Maschinenstruktur darzustellen, wird ein Blockdiagramm (siehe Bild 5) gezeichnet, das auf grafischem Wege die akustischen Mechanismen im Hydraulikaggregat veranschaulicht.

Eine Zusammenstellung der Schallquellen, Schallübertragungswege und schallabstrahlenden Flächen ist in den Tabellen 1 bis 3 aufgeführt.

Tabelle 1 — Hydraulikaggregat; Geräuschquellen

Baugruppe	Schallquelle	L	K	F
Elektromotor	Magnetfeld		–	
	Lüfter	+		
	Unwucht		–	
Hydraulikpumpe	Pumpen		+	+
	Unwucht		–	
Druckbegrenzungsventil	Strömungswiderstand			–
	Ventil-Instabilität		–	–

Legende
 L Luftschall
 K Körperschall
 F Flüssigkeitsschall
 + Wesentlicher Anteil
 – Geringer Anteil



Legende

- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| 1 Druckbegrenzungsventil | 6 Montageflansch |
| 2 Druckleitung (12 mm) | 7 Abdeckung |
| 3 Verjüngung (25 mm–12 mm) | 8 Schwingungsisolierte Kupplung |
| 4 Pumpe | 9 Elektromotor |
| 5 Schwingungsisolierender Flansch | 10 Vorratsbehälter |

Bild 4 — Hydraulikaggregat

Tabelle 2 — Hydraulikaggregat; Übertragungswege

Baugruppe	Übertragungsweg	L	K	F
Elektromotor	Befestigungspunkte		+	
	Welle		-	
Hydraulikpumpe	Befestigungspunkte		+	
	Welle		-	
	Rohrverbindungen		-	
Druckbegrenzungsventil	Befestigungspunkte		-	
	Rohrverbindungen		-	
Kupplung	Kupplungselemente		+	
Rohre	Stahlrohre		-	
	Flüssigkeit			-
Behälter	Befestigungspunkte		+	
	Bleche		-	
	Flüssigkeit			-
Legende				
L Luftschall				
K Körperschall				
F Flüssigkeitsschall				
+ Wesentlicher Anteil				
- Geringer Anteil				

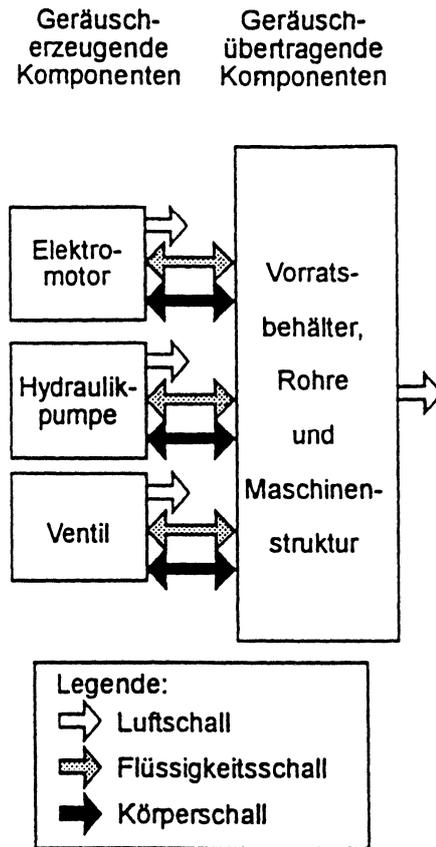


Bild 5 — Akustisches Modell des Hydraulikaggregates

Tabelle 3 — Hydraulikaggregat; abstrahlende Flächen

Baugruppe	Abstrahlende Fläche	L	K	F
Elektromotor	Gehäuse	+		
Hydraulikpumpe	Gehäuse	-		
Rohre	Rohrwandungen	-		
Behälter	Behälterwandungen	+		
Legende				
L Luftschall				
K Körperschall				
F Flüssigkeitsschall				
+ Wesentlicher Anteil				
- Geringer Anteil				

An dem Hydraulikaggregat wurden verschiedene Experimente ausgeführt, um die verschiedenen Schallquellen, Schallübertragungswege und schallabstrahlenden Flächen zu bestimmen. Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengestellt; sie ergeben sich aus Schalleistungsmessungen in einem Hallraum. Sämtliche Experimente wurden unter gleichen Betriebsbedingungen durchgeführt.

Tabelle 4 — Hydraulikaggregat; Wirkung der Lärminderungsmaßnahmen

Lärminderungsmaßnahmen am Hydraulikaggregat 1 500 min ⁻¹ ; 180 bar		<i>L</i> _{WA} dB
1	Sämtliche Schallübertragungswege sind wirksam, siehe Bild 5.	90
2	Ein getrennter Rahmen, auf dem Motor und Hydraulikpumpe befestigt sind, ist über Schwingungsisolatoren auf dem Behälter montiert. Die Verminderung der Körperschallübertragung zum Behälter und zur Maschinenstruktur ergibt eine geringe Verminderung der Schalleistung.	89
3	Der Rahmen mit Motor und Pumpe ist separat vom Behälter aufgestellt. Die Verbindung zwischen Pumpe und Ventil erfolgt über einen 2 m langen Hydraulikschlauch. Dieser Schritt gibt eine weitere Lärminderung von 3 dB aufgrund der Verminderung der Körperschallübertragung zum Behälter.	86
4	Der Hydraulikbehälter wird aus dem Hallraum entfernt, um die von ihm ausgehende Luftschallabstrahlung zu unterbinden. Da dieser Schritt zu keiner weiteren Lärminderung führt, wird angenommen, dass der Behälter schon in Schritt 3 ausreichend entkoppelt wurde.	86
5	Die Hydraulikpumpe wird über einen konischen Flansch einschließlich einer Schwingungsisolierung am Elektromotor befestigt. Die Luftkühlung des Elektromotors wird gegen eine Wasserkühlung ausgetauscht. Das Ergebnis ist eine Lärminderung um 1 dB.	85
6	Letztendlich wird der Elektromotor gekapselt, um die Abstrahlung von Luftschall von seiner Oberfläche zu vermindern.	81

Aus diesen Experimenten können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Der Schalleistungspegel des von der Hydraulikpumpe allein abgestrahlten Luftschalls war um 9 dB geringer als der Schalleistungspegel des gesamten Aggregates.
- Die hauptsächlichen Schallquellen waren Körperschall- und Flüssigkeitsschallanteile der Hydraulikpumpe.
- Die dominierenden Körperschallübertragungswege lagen zwischen Pumpe und Motor sowie zwischen Pumpe und Behälter.
- Die dominierenden schallabstrahlenden Flächen befanden sich am Elektromotor und am Behälter.

Die in diesem Beispiel verwendete Hydraulikpumpe ist nicht repräsentativ für gegenwärtig verfügbare Aggregate dieser Art. Durch einen Austausch der Hydraulikpumpe gegen eine Pumpe mit geringerer Körperschall- und Flüssigkeitsschallemission hätte der Gesamtschalleistungspegel vermindert werden können.

5.3 Verminderung der Geräusentstehung

5.3.1 Luftschallquellen

Alle strömenden Gase (z. B. Luft) können aufgrund von Turbulenzen, Stößen und Pulsationen direkt Schall erzeugen.

Turbulenz

Turbulenzen erzeugen Schall auf verschiedenste Art und Weise. Turbulenzen können tonale Geräusche beim Umströmen eines Zylinders, wie z. B. eines Schornsteines, hervorrufen. Töne werden auch beim Überströmen von Hohlräumen erzeugt, wie es z. B. bei einer Pfeife oder an den Messern von Holzbearbeitungsmaschinen beobachtet werden kann. Bei Kanalströmungen werden Geräusche durch scharfe Umlenkungen, Streben oder Ventile erzeugt.

Strömungen mit hohen Geschwindigkeiten an einem Düsenaustritt oder an den Blattspitzen von Ventilatoren erzeugen aufgrund der Scherkräfte in der Vermischungszone zwischen der ruhenden Luft in der Nähe der Düse und der erregenden Strömung Wirbel. Dadurch wird breitbandiges Geräusch erzeugt. Der Pegel und das Spektrum des Geräusches hängen von der Strömungsgeschwindigkeit, der Viskosität des Mediums und der Düsengeometrie ab.

Geräuschminderungen können durch eine Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit in der Vermischungszone erreicht werden. Das kann durch eine Verminderung der Druckdifferenz, durch größere Durchmesser oder durch den Einsatz einer Bypass-Strömung z. B. an Düsen oder an Rohrenden erreicht werden.

Schallquellen werden geortet, indem das Strömungssystem mit Blick auf mögliche Hindernisse analysiert wird. Eine Lärminderung wird durch Änderung des Durchmessers von Streben, durch Einführung von Leiteinrichtungen an Schornsteinen, durch aerodynamisch günstige Gestaltung oder durch die Herabsetzung der Strömungsgeschwindigkeit erreicht.

Ein Ventilator sollte so konstruiert werden, dass er mit der niedrigsten möglichen Blattspitzengeschwindigkeit betrieben werden kann. Anstelle der Drosselung von Strömungen sollte eine Drehzahländerung vorgesehen werden. Zu geringe Abstände zwischen Rotor und Gehäuse können Geräusche erzeugen.

Turbulenzen hinter Hindernissen können durch das Entfernen der Hindernisse, durch die Minimierung der Anzahl oder durch aerodynamisch günstige Formgebung (Vermeidung scharfer Kanten) vermieden werden.

Geometrische Änderungen an Düsen oder Ventilen durch den Einsatz von Labyrinth- oder Schlitzsystemen verschieben den Frequenzbereich der erzeugten Geräusche zu höheren Frequenzen hin; das erleichtert Schallabsorptions- und Schalldämm-Maßnahmen.

Konstruktionsregeln für die Verminderung von Turbulenzen in Gasen:

- Verminderung des Arbeitsdruckes;
- Verminderung von Druckänderungen;
- Minimierung der Strömungsgeschwindigkeit;
- Optimierung von Freistrahlauslässen mit dem Ziel, die Geschwindigkeitsänderungen im Freistrahlschnitt zu minimieren;
- Minimierung der Umfangsgeschwindigkeit von Rotoren;
- Vermeiden von Hindernissen in der Strömung;
- Verbesserung der Strömungsführung.

Stoß und Pulsation

In Kolbenmaschinen treten Volumen- und Druckpulsationen aufgrund eines ungleichmäßigen Volumenflusses auf. Da diese Maschinen rotierende Teile enthalten, treten die Pulsationen bei Frequenzen auf, die proportional zur Drehfrequenz sind; es entstehen tonale Geräusche. Verminderungen sind auf folgende Weise möglich: Durch eine Verminderung der Drehzahl und bei Hochdruckmaschinen — wenn möglich — durch eine Verminderung des Arbeitsdruckes.

Stöße entstehen durch die schnelle Freisetzung eines unter Druck stehenden Mediums in eine Umgebung mit niedrigerem Druck. Dies geschieht während des Öffnens und Schließens von Ventilen in Druckluftmotoren oder Pumpen. Stoßgeräusche können durch eine Dehnung der Druck-Zeit-Funktion vermindert werden; dies kann entweder durch eine Verringerung der Druckdifferenz oder durch eine Vergrößerung der Anstiegszeit erreicht werden. Quasistationäre Stöße werden in Überschallströmungen erzeugt, z. B. in Auslassventilen. Sie können durch eine Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit herabgesetzt werden.

Ventilgeräusche können verringert werden, wenn die Ventile so konstruiert werden, dass sich beim Öffnen die Querschnittsfläche zeitlich nur langsam ändert. Die Verdichtung eines eingeschlossenen Fluids, z. B. in Kolben- oder Zahnrumpen, sollte durch Einfügen von Ausgleichskanälen vermindert werden.

Einzelne Stöße in Ventilen stellen breitbandige Geräuschquellen dar (Erzeugung vieler Frequenzen). Wenn dagegen Stöße periodisch auftreten, z. B. in Hochdruckpumpen und Motoren, werden periodische Geräusche erzeugt, deren Frequenzen bei der Drehfrequenz und deren Harmonischen liegen.

Stationäre Stöße entstehen in Auslassventilen, wenn die Geschwindigkeiten die normale Schallgeschwindigkeit in Luft übersteigen; dabei entstehen laute, breitbandige Geräusche. Sie können durch eine Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit vermieden werden.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von Stößen und Pulsationen in Gasen:

- Verminderung der Druckgradienten;
- Vermeidung von Hindernissen in der Nähe eines Rotors.

5.3.2 Flüssigkeitsschallquellen

Ebenso wie in Luft können in Flüssigkeiten Geräusche durch Turbulenzen, Pulsationen und Stöße entstehen. Deshalb können auch die in 5.3.1 aufgeführten Regeln angewendet werden.

Konstruktionsregeln für die Beeinflussung von Flüssigkeitsschallquellen:

- Verminderung von Druckänderungen;
- Minimierung der Strömungsgeschwindigkeit;
- Vermeiden von Hindernissen in der Strömung;
- Verbesserung der Strömungsführung;
- Verminderung der Druckänderungsgeschwindigkeit.

Kavitation

Kavitation tritt in Flüssigkeiten auf, wenn der statische Druck unter den Dampfdruck absinkt. Das kann z. B. in Ventilen oder Pumpen auftreten. In dem Bereich, wo der Druck unter den Dampfdruck absinkt, entstehen Kavitationsblasen. Bei der Wiederverdichtung implodieren diese Blasen, was zu einem sehr hohen örtlichen Druckanstieg führt. Da diese Verdichtung oft beim Stillstand der Strömung an einer Oberfläche auftritt, kann Kavitation nicht nur Geräusche erzeugen, sondern führt auch zu einer starken Materialerosion.

Kavitation kann z. B. vermieden werden, wenn der Druckabfall in jeder Ventilstufe verringert wird. Die Einführung mehrerer Stufen führt dann zur gewünschten Gesamtdruckdifferenz.

Kavitation stellt eine breitbandige Geräuschquelle dar.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von Kavitation:

- Verminderung von Druckänderungen;
- Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit;
- Erhöhung des statischen Drucks;
- Verbesserung der Strömungsführung, um Kavitation zu vermeiden;
- Vermeidung von Strömungsgeschwindigkeiten über 1,5 m/s;
- Verwendung kurzer Saugleitungen;
- Anordnung des Flüssigkeitsbehälters höher als der Pumpeneinlass;
- Verwendung von Armaturen mit geringem Strömungswiderstand, z. B. Siebe, Ventile usw.

5.3.3 Körperschallquellen

Stöße

Stoßgeräusche sind häufig die dominierenden Lärmquellen in Maschinen. Zahlreiche Geräusentstehungsmechanismen können als periodische Stöße betrachtet werden. Die wichtigsten Parameter bei der Entstehung von Stoßgeräuschen sind die Masse und die Geschwindigkeit der aneinander schlagenden Körper sowie die Dauer des Stoßes.

Die Frequenzanalyse eines Stoßgeräusches zeigt, dass es sich um ein breitbandiges Geräusch handelt, das aufgrund der kurzen Stoßdauer von hohen Frequenzen bestimmt wird. Periodisch auftretende Stöße erzeugen periodische Geräuschanteile. Das Spektrum zeigt die Stoßfrequenz und ihre Harmonischen.

Konstruktionsregeln für die Verminderung von Stoßgeräuschen:

- Vergrößerung der Stoßdauer;
- Verminderung der Stoßgeschwindigkeit;
- Verringerung der Masse des frei beweglichen stoßenden Körpers;
- Vergrößerung der Masse des feststehenden Körpers;
- Vermeidung von Spiel zwischen Teilen mit wechselnden Lasten.

Zahnräder

Zahnradgeräusche sind eine spezielle Form der Stoßgeräusche und kommen z. B. in Getrieben und Kettenantrieben vor. Wichtige Parameter sind die Eingriffsdauer der Zähne, der Kraft-Zeit-Verlauf während des Eingriffs und die Steifigkeit der Kontaktelemente (Zähne). Zahnfehler können eine zusätzliche Kraftänderung bewirken und dadurch die Geräusche verstärken. Zahnradgeräusche machen sich meistens als tonales Geräusch bemerkbar (Vielfache der Eingriffsfrequenz).

Maßnahmen zur Beeinflussung von Zahnradgeräuschen sind Änderungen der Zahngeometrie und der Kontaktflächen (Flankenrücknahme am Kopf und an den Enden der Verzahnung, Schrägverzahnung), um die Eingriffsdauer zu vergrößern. Eine Verbesserung der Verzahnungsgenauigkeit und -anpassung sowie die Erhöhung der Zahnzahl beeinflussen ebenfalls die Zahnradgeräusche. Die Zahnzahl zweier im Eingriff stehender Räder sollte so gewählt werden, dass das gleiche Zahnpaar so selten wie möglich Kontakt hat (z. B. durch Zahnzahlen, die keinen gemeinsamen Teiler haben). Verformungen in den Zähnen und Wellen müssen bezüglich geometrischer Änderungen berücksichtigt werden. Die Zahnprofile können für einen eingeschränkten Belastungsbereich optimiert werden, jedoch nicht für alle auftretenden Belastungen.

Im Falle geringer Belastungen (z. B. in Getrieben von Haushaltgeräten) kann Kunststoff als Zahnradmaterial eingesetzt werden. Bei sehr hohen Belastungen hat die Änderung des Materials keinen entscheidenden Einfluss auf die Geräuscherzeugung.

Konstruktionsregeln für die Verminderung von Körperschall, hervorgerufen durch Zahneingriff:

- Erhöhung der Eingriffsdauer;
- Verwendung von schrägverzahnten Getrieben;
- Erhöhung der Zahnzahl;
- Verbesserung der Qualität (Ausrichtung, Genauigkeit der Verzahnung);
- Verwendung von Kunststoff bei geringen Belastungen.

Rollgeräusche

Geräusche, die durch Abrollen entstehen, werden durch Rauheiten oder Unrundheit im Kontaktbereich abrollender Flächen verursacht. Rollgeräusche treten in Walzen und Kugellagern, in Transportsystemen sowie bei Schienen- und Straßenfahrzeugen auf. Rollgeräusche hängen auch von der Steifigkeit in der Kontaktzone ab.

Rollgeräusche haben ein breitbandiges Frequenzspektrum. Wenn (wie z. B. in Wälzlagern) periodische Elemente im Anregungsmechanismus vorkommen — was häufig der Fall ist —, können auch tonale Komponenten auftreten.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von Rollgeräuschen:

- Erhaltung glatter Rollflächen;
- Einsatz der richtigen Schmierung;
- Verwendung von Präzisionswälzlagern;
- Minimierung von Toleranzen im Gehäuse (Lagersitz);
- Verwendung von Gleitlagern;
- Erhöhung der Nachgiebigkeit in der Kontaktzone.

Massenkräfte

Die Beschleunigung einer Masse ruft Kräfte hervor, die über verschiedene Effekte, wie z. B. Stoß, Rollen, Reibung oder Pulsation, Geräusche erzeugen können. Massenkräfte werden durch schwingende Massen oder Unwuchten in rotierenden Teilen hervorgerufen. In einigen Fällen (z. B. bei einem Kurbelantrieb) können Massenkräfte Teile der Maschinenstruktur mit einem Vielfachen der Rotationsfrequenz anregen. Wenn Wälzlager mit Massenkräften belastet werden, muss auf Rollgeräusche geachtet werden.

Massenkräfte können durch Massenausgleich, Verringerung der Drehzahl, Verkleinerung der beschleunigten Massen oder der Beschleunigung selbst vermindert werden. In einigen Fällen ist ein eindimensionales Auswuchten bei scheibenförmigen Rotoren ausreichend, in allen anderen Fällen ist ein dynamisches Auswuchten notwendig.

Konstruktionsregeln für die Verminderung von durch Massenkräfte verursachten Körperschall:

- Verkleinerung der Massenkräfte durch Auswuchten der Rotoren oder Massenausgleich der verschobenen Massen;
- Verkleinerung der beschleunigten Massen;
- Erhöhung der Stetigkeit der Bewegung.

Reibung, Selbsterregung

Mechanismen, bei denen Reibung eine Stick-Slip-Bewegung (Ruckgleiten) hervorruft, sind potentielle Geräuschquellen. Die dabei auftretenden Kraftänderungen haben dieselbe Wirkung wie eine Stoßbelastung, sie können Resonanzen der Struktur anregen und bestimmen die Form der selbsterregten Resonanzen. Durch Reibung hervorgerufene Geräusche, wie z. B. an Bremscheiben, Gelenken usw., sind sehr stark von der Materialpaarung und der Schmierung abhängig.

Prinzipiell verursacht Gleitreibung breitbandige Geräusche, aber durch die Anregung von Struktureigenfrequenzen treten oft starke tonale Komponenten in den erzeugten Geräuschen hervor.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von durch Reibung und Selbsterregung verursachtem Körperschall:

- Verminderung der Reibung durch richtige Materialauswahl;
- Verminderung der Reibung durch richtige Schmierung;
- Erhöhung der Dämpfung derjenigen Struktur, bei der Selbsterregung auftreten kann.

Magnetfelder

Magnetfelder werden z. B. in Elektromotoren benutzt, um die Antriebskräfte für die Rotation zu erzeugen. Die Ungleichförmigkeit des Momentes während einer Umdrehung, die zu Kraftänderungen an den Lagern und am Stator führt, ruft Schwingungen hervor.

Durch Magnetfelder erzeugte Geräusche sind lastabhängig. Diese Geräusche können dominieren, wenn der Elektromotor über ein lärmarmes Kühlsystem und lärmarme Lager verfügt. Bei Antrieben mit variabler Drehzahl, die durch Wandler gesteuert werden, können hochfrequente Geräusche entstehen.

Transformatorgeräusche enthalten Anteile bei der doppelten Netzfrequenz (50 Hz) und deren Vielfachen bis etwa 600 Hz. Körperschall, der im Transformatorenkern aufgrund magnetischer Phänomene (z. B. Magnetostraktion, abhängig von der Materialauswahl) entsteht, wird durch das Kühlmittel und die Befestigungspunkte übertragen und vom Gehäuse abgestrahlt.

Die Windungen elektrischer Transformatoren müssen sorgfältig befestigt werden, um Schwingungen zu vermeiden, die niederfrequente Geräusche verursachen.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von durch Magnetfelder verursachtem Körperschall:

- Auswahl der Anzahl der Ankernuten, so dass keine Eigenschwingungen in Stator und Rotor angeregt werden;
- Ankernuten sollten nicht parallel zu den Polen verlaufen;
- Minimierung von Toleranzen in Form und Lage des Magnetkernes, um ein möglichst symmetrisches Magnetfeld aufzubauen;
- Optimierung der Polform;

- Berücksichtigung der durch Wandler magnetisch induzierten Geräusche an Antrieben mit veränderlicher Drehzahl;
- Auswahl des Kernmaterials bei Transformatoren mit dem Ziel, Körperschallanregungen zu vermindern.

5.4 Geräuschübertragung

5.4.1 Luftschallübertragung

Luftschall, der in verschiedenen Teilen der Maschine entsteht, wird in die Umgebung abgestrahlt. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die diese Übertragung vermindern:

- Schallschutzkapseln;
- Schallschirme;
- Schalldämpfer;
- Schallabsorption.

Die physikalischen Mechanismen, die bei diesen Lärminderungsmaßnahmen genutzt werden, sind Reflexion und Absorption.

Schallschutzkapseln

Schallschutzkapseln sind geschlossene schalldämmende Verkleidungen. Auch kleine Öffnungen müssen abgedichtet werden. Die Wände werden üblicherweise aus dünnen Blechen hergestellt, um eine Reflexion des Schalls zu erreichen. Um die Geräuschminderung einer Schallschutzkapsel zu verbessern, ist eine schallabsorbierende Auskleidung mit porösem Material notwendig (die Dicke ist abhängig von der niedrigsten interessierenden Frequenz).

Die Grundkonstruktion von Maschinen wird entweder durch Schallschutzkapseln vervollständigt, oder es werden bereits vorhandene Maschinenverkleidungen so konstruiert, dass sie als Schallschutzkapseln fungieren können. Wenn Öffnungen notwendig sind (Belüftung, Materialtransport, Kabel usw.), so müssen diese mit Schalldämpfern versehen werden. Öffnungen für Instandhaltungszwecke müssen während des Betriebes sorgfältig verschlossen werden.

Um eine Körperschallübertragung in die Verkleidungsbleche zu verhindern, ist eine schwingungsisierte Befestigung notwendig (siehe 5.4.3).

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Luftschallübertragung durch Verwendung von Schallschutzkapseln:

- geschlossene Ausführung von Schallschutzkapseln; auch kleine Spalte oder Löcher (z. B. Schlitze, Fugen) sind von Bedeutung und müssen abgedichtet werden;
- Verwendung von festen Blechen (schalldämmendem Material) für die äußere Hülle der Schallschutzkapsel;
- Verwendung von schallabsorbierendem Material im Inneren der Schallschutzkapsel;
- Verwendung von Schalldämpfern an Öffnungen für Lüftung, Kabel, Rohre, Materialtransport usw.;
- Vermeidung von festen Verbindungen zwischen der Schallschutzkapsel und der Maschine; Verringerung der Anzahl von Befestigungspunkten;
- die Kapselung von einzelnen Aggregaten kann ebenfalls wirkungsvoll sein.

Schallschirme

Schallschirme können in der Nähe kleiner Maschinen-Aggregate mit hoher Geräuschemission montiert werden. Ihre Wirksamkeit ist wesentlich geringer als die von Schallschutzkapseln und hängt stark von der Richtung und der Entfernung ab. Sie sind jedoch geeignet, in einem eingeschränkten Bereich (Bedienerposition) eine Lärminderung zu erzielen.

Ihre Wirksamkeit ist auf Frequenzen beschränkt, bei denen die Wellenlänge in der Größenordnung der Schirmabmessung liegt oder kleiner ist.

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Luftschallübertragung durch Verwendung von Schallschirmen:

- Verwendung von festen Blechen (schalldämmendem Material) für den Schallschirm;
- Verwendung von Schallschirmen am Bedienerplatz;
- Die der Maschine zugewandte Seite sollte mit schallabsorbierendem Material verkleidet werden.

Schalldämpfer

Schalldämpfer sind Einrichtungen, die die Übertragung von Luftschall durch Öffnungen vermindern.

Absorptionsschalldämpfer gehören zum Typ „porös ausgekleideter Kanal“. Sie werden häufig mit Schallschutzkapseln und Lüftern kombiniert, um den Abtransport von Wärme sicherzustellen, ohne die Wirksamkeit der Schallschutzkapseln zu vermindern. Das Wirkprinzip von Reflexionsschalldämpfern ist die Schallreflexion an plötzlichen Querschnittsänderungen von Rohrleitungen (häufig angewandt bei Verbrennungsmotoren, Einlass- und Auslassschalldämpfer). Meistens bestehen Schalldämpfer aus einer Kombination von Absorptions- und Reflexionstyp.

Entspannungsgeräusche an Druckluftventilen werden durch Entspannungsschalldämpfer vermindert.

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Luftschallübertragung durch Verwendung von Schalldämpfern:

- Verwendung von Absorptionsschalldämpfern für breitbandige Geräusche;
- Vermeiden von Strömungsgeschwindigkeiten des Mediums von mehr als 20 m/s in Absorptionsschalldämpfern;
- Verwendung von Reflexionsschalldämpfern für tieffrequente Geräusche;
- Verwendung von pneumatischen Entspannungsschalldämpfern für Druckluftauslässe.

5.4.2 Flüssigkeitsschallübertragung

Die Übertragung von Flüssigkeitsschall erfolgt üblicherweise in Rohren und Kanälen. Lärminderungsmaßnahmen können am Eingang des Systems, im System selbst oder an dessen Ausgang vorgesehen werden. Die zur Lärminderung eingesetzten Mittel sind Reflexion und Absorption. Reflexion tritt am Ende des Systems durch Änderung der Querschnittsfläche des Rohres oder Schlauches oder durch Änderung der Steifigkeit der Rohrwandungen durch Einsatz einer Kombination aus Schläuchen und Rohren auf. Absorption von Flüssigkeitsschall wird durch Schläuche oder durch Akkumulatoren erzielt, die mit Stahlwolle oder Gas gefüllt sind. Schläuche vermindern den Flüssigkeitsschall, erhöhen jedoch den abgestrahlten Luftschall.

Konstruktionsregeln für die Verminderung der Flüssigkeitsschallübertragung:

- Verwendung von Kombinationen aus Rohren und Schläuchen;
- Verwendung von Schalldämpfern.

5.4.3 Körperschallübertragung

Die Übertragung von Körperschall von den Quellen zu abstrahlenden Flächen kann durch Änderung der Masse, der Steifigkeit und Dämpfungsverteilung der übertragenden Struktur beeinflusst werden. Die gewählte Vorgehensweise ist von verschiedenen Umständen abhängig, z. B.:

- Ist eine Erhöhung des Gewichtes möglich oder nicht?
- Handelt es sich um Kraft- oder Geschwindigkeitsanregung (oder um eine gemischte Anregung)?
- Liegt eine schmal- oder breitbandige Anregung vor?
- Werden tiefe, mittlere oder hohe Frequenzen angeregt? Diese Frequenzbereiche können jeweils dem quasistatischen Verhalten, dem Resonanzverhalten bzw. dem Verhalten der Struktur bei hoher Eigenfrequenzdichte zugeordnet werden.

Wenn eine Erhöhung des Gewichtes möglich ist, kann eine Anbringung zusätzlicher Masse vor allem in der Nähe des Anregungsgebietes sehr wirksam sein, vor allem im Bereich einer hohen Eigenfrequenzdichte und bei Kraftanregung.

Wenn Kraftanregung vorliegt, ist die Erhöhung der Eingangsimpedanz durch Vergrößerung der Masse im Anregungsgebiet sehr wirkungsvoll, vor allem im Bereich einer hohen Eigenfrequenzdichte.

Wenn Geschwindigkeitsanregung vorliegt, ist eine Vergrößerung der Masse am Anregungspunkt wenig hilfreich. In diesem Falle stellt die Isolierung der Quelle eine sinnvollere Maßnahme dar. Wenn es sich bei der Anregung um eine begrenzte Anzahl schmaler Frequenzbänder handelt, z. B. um ein periodisches Signal, kann die Änderung einzelner Resonanzfrequenzen durch eine Umverteilung von Masse und Steifigkeit zum Ziel führen, vorausgesetzt, dass das Problem im Bereich diskreter Eigenfrequenzen auftritt. Eine Erhöhung der Dämpfung kann in diesem Falle auch wirkungsvoll sein.

Bei Breitbandanregung ist eine Verschiebung einzelner Eigenfrequenzen nicht wirkungsvoll; in diesem Falle muss eine breitbandige Verminderung der Übertragung angestrebt werden.

Im Bereich tiefer Frequenzen (bei quasistatischem Verhalten) ist eine Schwingungsisolierung die einzig wirksame Maßnahme (siehe rechte Spalte).

Im mittleren Frequenzbereich (mit diskreten Eigenfrequenzen) können die folgenden Maßnahmen wirkungsvoll sein (in Abhängigkeit von der Art der Anregung):

- Erhöhung der Masse im Anregungspunkt;
- Erhöhung der Dämpfung;
- Schwingungsisolierung der Quelle;
- Reflexion an Unstetigkeitsstellen (siehe Bild 6).

Im Bereich hoher Frequenzen (bei hoher Eigenfrequenzdichte) können die folgenden Maßnahmen wirksam sein:

- Erhöhung der Masse oder Steifigkeit im Anregungsbereich;
- Schwingungsisolierung der Quelle;
- Unstetigkeiten (siehe Bild 6) in Verbindung mit zusätzlicher Dämpfung an der Quellenseite.

Eine alleinige Erhöhung der Dämpfung ist in diesem Falle nicht sehr wirksam.

Es ist zweckmäßig, zwei der oben erwähnten Maßnahmen detaillierter zu behandeln:

- Schwingungsisolierung;
- Dämpfung.

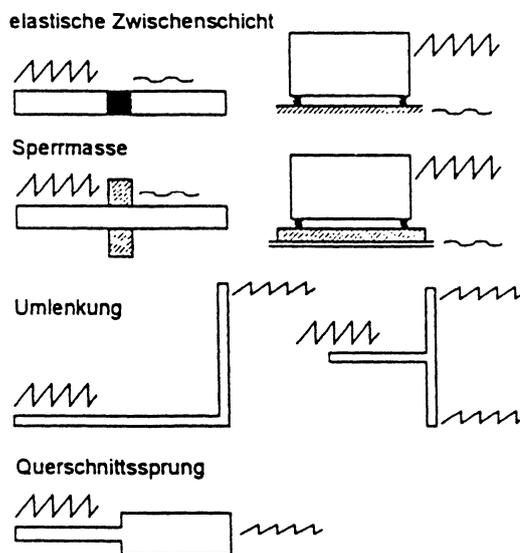


Bild 6 — Körperschallreflexion an Unstetigkeitsstellen der Struktur

Schwingungsisolierung

Eine Schwingungsisolierung ist mit dem lokalen Einfügen einer relativ geringen Steifigkeit identisch. Sie kann mit Hilfe von Isolatoren (elastische Elemente, die aus Gummi, Luftpolstern, Stahlschraubenfedern oder ähnlichem bestehen) oder mit Hilfe von elastischen Zwischenschichten (aus Gummi, Kork oder anderen weichen Materialien) ausgeführt werden.

Eine spürbare Isolationswirkung kann nur erreicht werden, wenn ein ausreichender Impedanzsprung an der Empfängerseite vorhanden ist, das heißt, wenn die Struktur auf der Empfangsseite des Isolators oder der Isolierschicht ausreichend steif oder schwer ist. Die Vergrößerung der Fundamentimpedanz ist genauso wichtig wie die Verminderung der Steifigkeit des Isolators oder der Zwischenschicht.

Eine Schwingungsisolierung kann auf verschiedene Art und Weise angewandt werden:

- Isolierung der Quelle;
- Unstetigkeit in einem Übertragungsweg (siehe Bild 6);

- Isolierung der äußeren Verkleidungsstruktur von der übrigen Maschine; eine derartige Struktur könnte eine Schallschutzkapsel sein, die dazu dient, die Luftschallabstrahlung von der eigentlichen Oberfläche zu reduzieren.

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Körperschallübertragung durch Schwingungsisolierung:

- Verwendung von Elementen oder Zwischenschichten, die ausreichend nachgiebig sind;
- Verwendung einer ausreichend steifen und schweren Grundstruktur.

Dämpfung

Eine Erhöhung der Dämpfung wird angewandt, um mehr Körperschallenergie in Wärme umzuwandeln. Dies ist vor allem im Bereich diskreter Eigenfrequenzen in Verbindung mit Strukturunstetigkeiten und bei Anwendung an der Anregungsstelle (nahe an der Quelle) wirkungsvoll.

Die Anwendung einer zusätzlichen Dämpfung ist nur wirksam, wenn die ursprüngliche Dämpfung der Struktur relativ niedrig ist, was meistens nicht gegeben ist. Aufgrund verschiedener Mechanismen sind komplizierte Maschinenstrukturen meist schon ohne spezielle Dämpfungsmaßnahmen relativ stark bedämpft.

Die Dämpfung einer Struktur kann auf verschiedene Art und Weise erhöht werden, z. B. durch

- spezielle dämpfende Beschichtung;
- bedämpfte Sandwichplatten anstelle von einzelnen Blechen;
- Vorsatzschalen mit einer geringen Anzahl von Verbindungspunkten (die Dämpfung wird durch die Strömung in der dünnen Luftschicht zwischen den zwei Platten hervorgerufen);
- Verwendung von Material mit einer höheren inneren Dämpfung;
- abgestimmte Dämpfer in Form von bedämpften Masse-Feder-Systemen.

Die letztgenannte Dämpfungsart ist nur dann sinnvoll, wenn nur eine begrenzte Anzahl von Resonanzen zu bedämpfen ist.

Konstruktionsregeln für die Verminderung der Körperschallübertragung durch Dämpfung:

- Zusätzliche Dämpfung, wenn die ursprüngliche Dämpfung gering ist;
- Anwendung von Dämpfung zur Verminderung der Körperschallübertragung im Bereich diskreter Eigenfrequenzen;
- Anwendung von Dämpfung in der Nähe der Anregung;
- Zusätzliche Dämpfung an dünnen Platten (es ist schwierig, steife und schwere Strukturen zu bedämpfen).

5.5 Geräuschabstrahlung

5.5.1 Abstrahlung von Luftschall aus Öffnungen

Luftschall kann durch Ein- oder Auslassöffnungen abgestrahlt werden, z. B. aus einer Schallschutzkapsel oder am Ende einer Leitung. Die Geräusche besitzen eine bestimmte Richtcharakteristik. Im Normalfall entstehen die höchsten Pegel entlang der Rohrachse. In offenen Räumen oder im Freifeld können derartige Öffnungen verändert werden, um die Schallabstrahlung in einer bestimmten Richtung zu vermindern.

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Luftschallabstrahlung:

- Anordnung von Öffnungen an der günstigen Seite (Richtcharakteristik der Schallabstrahlung);
- Verwendung von Schalldämpfern oder von Schallschirmen vor der Öffnung.

5.5.2 Abstrahlung von Körperschall

Die Schallabstrahlung von Außenflächen einer Maschine ist von der Größe der Fläche, der Form, der Steifigkeit, der Masse und der Dämpfung der betreffenden Struktur abhängig. Bezüglich der Schallabstrahlung ist es von Vorteil, die belasteten Teile der Maschine so kompakt wie möglich zu gestalten, da geringe Abmessungen, hohe Steifigkeit und Masse die Schallabstrahlung vermindern.

Um die Schallabstrahlung zu verringern, ist die abstrahlende Fläche zu verkleinern oder die Steifigkeit, Masse oder Dämpfung des betrachteten Teils der Struktur zu verändern.

Die Schallabstrahlung einer Fläche kann auch durch den Einsatz von Platten mit geringem Abstrahlgrad vermindert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Anwendung von biegeweichen Vorsatzschalen, die aus einer elastischen Zwischenschicht und einer dünnen Platte bestehen.

Konstruktionsregeln für die Verminderung der Körperschallabstrahlung:

- Verkleinerung der abstrahlenden Fläche;
- Anwendung von Verkleidungen mit geringem Abstrahlgrad für die dominierenden Frequenzen:
 - dünne Platten anstelle von dicken Platten (Vorsicht, wenn diese Verkleidung kraftherregt ist);
 - gelochte Platten;
 - Verkleidungen mit Dämpfungsbelägen.

6 Untersuchungen am Prototyp

6.1 Allgemeines

Messungen am Prototyp ermöglichen die Erkennung der wichtigsten Schallquellen und spezifische Maßnahmen, die zu Konstruktionsänderungen in der Ausarbeitungs- und Konzeptphase führen (siehe Bild 1). Die Einhaltung von Grenzwerten, die in der Anforderungsliste (siehe Abschnitt 4 und Anhang B) enthalten sind, kann durch Messungen bestätigt werden.

6.2 Ermittlung der Schallquellen

Der erste Schritt enthält eine messtechnische Analyse, die mit dem Ziel durchgeführt wird,

- die hauptsächlichen Schallquellen zu erkennen und sie entsprechend den Mechanismen der Geräuschentstehung zuzuordnen;
- die Schallübertragungswege von der Quelle zum Empfänger oder durch die Struktur zu den abstrahlenden Flächen zu bestimmen;
- die schallabstrahlenden Maschinenteile (Öffnungen, Platten) zu erkennen.

Im Allgemeinen beginnt die Analyse mit relativ einfachen Verfahren, um eine grobe Identifizierung der Schallquellen und ihre räumliche, zeitliche und spektrale Zuordnung vornehmen zu können. Tiefergehende Untersuchungen, die mit der Bestimmung der Schallquellen und der Übertragungswege verbunden sind, werden nur für ausgewählte Aggregate der Maschine durchgeführt.

Eine Zusammenstellung der Messverfahren für akustische Untersuchungen an Prototypen ist in ISO 11688-2 enthalten. Die Auswahl geeigneter Messverfahren ist von verschiedenen Kriterien abhängig:

- Die Messverfahren sind teilweise speziell auf die Analyse des Modells der Geräusentstehung (siehe Bild 3) zugeschnitten:
 - innere Schallquellen;
 - Schallübertragungswege innerhalb der Maschine;
 - Schallabstrahlende Teile der Maschine.
- Bestimmte Messverfahren können nur angewendet werden, wenn die Betriebsbedingungen der Maschine (z. B. Drehzahl) verändert oder wenn konstruktive Änderungen vorgenommen werden können (teilweise Außerbetriebsetzung oder Abschirmung, Veränderung der elastischen Lagerung, Austausch von Teilschallquellen usw.).
- Die meisten Prüfverfahren liefern qualitative Ergebnisse, die das akustische Verhalten des Maschinenprototyps beschreiben und die die Grundlagen für vergleichende Untersuchungen liefern (Trennung verschiedener Geräuschursachen, Bestimmung grundlegender Übertragungswege). Einige Verfahren erlauben die quantitative Abschätzung der abgestrahlten Schalleistung einer einzelnen Schallquelle und/oder eines Außenbauteils der Maschine.

6.3 Bewertung der Schallquellen

Eine Bewertung der ermittelten Schallquellen wird vorgenommen, indem eine Rangfolge der wichtigsten Schallquellen aufgestellt wird. Dazu werden die Schallquellen aufgelistet und ihre wesentlichen Eigenschaften festgehalten (Schalleistungspegel, Schalldruckpegel am Bezugsmesspunkt, Zeitfunktion, Frequenzspektrum, Lage in der Maschine).

Die Aufstellung der Schallquellen-Rangfolge kann mit Hilfe von Messungen am Prototyp vorgenommen werden, oder es werden die Geräuschemissionsdaten verwendet, auf denen die Konstruktion beruht. Die Erstellung dieser Rangfolge ist nicht nur erforderlich, um weitere Lärminderungsmaßnahmen an der Maschine zu planen, sondern auch, um alle ausgeführten Veränderungen und ihre Auswirkung auf die gesamte Geräuschemission der Maschine zu verfolgen.

Bei der Planung von Lärminderungsmaßnahmen an Teilschallquellen mit dem Ziel einer Senkung des Gesamtschallpegels müssen eine Reihe von Besonderheiten beachtet werden:

- Es ist nicht notwendig, eine dominierende Schallquelle vollständig zu beseitigen, da das Gesamtgeräusch dann von den verbleibenden Teilschallquellen bestimmt wird. Im Allgemeinen ist es ausreichend, eine dominierende Komponente um etwa 5 dB unter das verbleibende Geräusch zu senken. Eine weitere Beeinflussung dieser Teilschallquelle hat nur noch eine geringe Auswirkung auf den Gesamtschallpegel.
- Wenn verschiedene Teilschallquellen mit näherungsweise gleicher Geräuschemission vorkommen, müssen die Lärminderungsmaßnahmen auf alle diese Schallquellen angewendet werden. Eine Minderung einzelner Lärmquellen hat nur einen unwesentlichen Einfluss auf den Gesamtschallpegel.
- Die o. g. Beziehungen sind nur gültig für inkohärente Teilschallquellen, d. h. Schallquellen, die nicht durch dieselbe Erregungsquelle angeregt werden.

6.4 Veränderungen am Prototyp

Das Ziel von Lärminderungsmaßnahmen ist die Verminderung der Geräuschemission von Teilschallquellen in der Rangfolge, die in der Bewertungsphase festgelegt wurde. Teilschallquellen bestehen jeweils aus der inneren Quelle, einem Übertragungsweg und schallabstrahlenden Maschinenteilen, so dass diese drei Komponenten beeinflusst werden können.

Für einzelne Teilschallquellen kann es unter bestimmten Umständen notwendig sein, die Wechselwirkungen bezüglich der Anregung, Übertragung oder Abstrahlung detaillierter zu untersuchen (Teilbilanz), um die inneren Schallquellen bestimmen und Maßnahmen auf allen drei Stufen der Geräuschenstehung ansetzen zu können. Dabei sind die maschinenakustischen Konstruktionsregeln anwendbar (siehe Abschnitt 5).

Im Allgemeinen sind Lärminderungsmaßnahmen am wirksamsten, wenn sie nahe an der inneren Schallquelle ansetzen.

Im Prinzip ist folgende Rangfolge anzuwenden:

- 1) Innere Lärmquellen
- 2) Übertragungsstruktur
- 3) Abstrahlende Maschinenteile

In der Praxis können die Maßnahmen mit technischen und wirtschaftlichen Argumenten in Verbindung gebracht werden.

Die Rangfolge der wesentlichen Geräuschprobleme (siehe 6.3) muss jeweils aktualisiert werden, um die durchgeführten Lärminderungsmaßnahmen zu berücksichtigen.

7 Abschlussprüfung

Zweck einer Abschlussprüfung ist die Bestätigung der bei der Maschine erreichten Lärminderung. Diese Prüfung schließt die Erfassung aller Parameter ein, die vor Beginn der Konstruktionsaufgabe festgelegt wurden (siehe Abschnitt 4 und Anhang B).

Die Messverfahren für die Schalleistungsmessung von Maschinen sind in Internationalen Normen (siehe Abschnitt 2) und in Geräuschemessverfahren für spezielle Maschinen beschrieben. Außerdem können Schallpegelmessungen an speziellen Positionen ausgeführt werden.

Während der Abschlussprüfung muss die Maschine

- mit den zugehörigen Zusatzaggregaten betrieben werden;
- so betrieben werden, dass der Betriebszustand mit den Konstruktionsanforderungen übereinstimmt;
- von anderen Aggregaten entkoppelt sein (z. B. von Verbindungskanälen oder Rohrsystemen, die ebenfalls Schall abstrahlen).

Anhang A

Zusammenfassung der Konstruktionsregeln

Allgemeine Konstruktionsregeln:

- Unterteilung der Maschine in geräuscherzeugende und geräuschübertragende Komponenten;
- Ermittlung von Luft-, Flüssigkeits- und Körperschallquellen;
- Verfolgung von Luft-, Flüssigkeits- und Körperschallübertragungswegen;
- Bestimmung von Schallabstrahlungsflächen;
- Bestimmung der stärksten Anteile an der Geräuscherzeugung (Quellen, Übertragungswege, abstrahlende Flächen).

Luftschallquellen:

Konstruktionsregeln für die Verminderung von Turbulenzen in Gasen:

- Verminderung des Arbeitsdruckes;
- Verminderung von Druckänderungen;
- Minimierung der Strömungsgeschwindigkeit;
- Optimierung von Freistrahlauslässen mit dem Ziel, die Geschwindigkeitsänderungen im Freistrahlschnitt zu minimieren;
- Minimierung der Umfangsgeschwindigkeit von Rotoren;
- Vermeiden von Hindernissen in der Strömung;
- Verbesserung der Strömungsführung.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von Stößen und Pulsationen in Gasen:

- Verminderung der Druckänderungsgeschwindigkeit;
- Vermeidung von Hindernissen in der Nähe eines Rotors.

Flüssigkeitsschallquellen:

Konstruktionsregeln für die Beeinflussung von Flüssigkeitsschallquellen:

- Verminderung von Druckänderungen;
- Minimierung der Strömungsgeschwindigkeit;
- Vermeiden von Hindernissen in der Strömung;

- Verbesserung der Strömungsführung;
- Verminderung der Druckänderungsgeschwindigkeit.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von Kavitation:

- Verminderung von Druckänderungen;
- Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit;
- Erhöhung des statischen Drucks;
- Verbesserung der Strömungsführung, um Kavitation zu vermeiden;
- Vermeidung von Strömungsgeschwindigkeiten über 1,5 m/s;
- Verwendung kurzer Saugleitungen;
- Anordnung des Flüssigkeitsbehälters höher als der Pumpeneinlass;
- Verwendung von Armaturen mit geringem Strömungswiderstand, z. B. Siebe, Ventile usw.

Körperschallquellen:

Konstruktionsregeln für die Verminderung von Stoßgeräuschen:

- Vergrößerung der Stoßdauer;
- Verminderung der Stoßgeschwindigkeit;
- Verringerung der Masse des freibeweglichen stoßenden Körpers;
- Vergrößerung der Masse des feststehenden Körpers;
- Vermeidung von Spiel zwischen Teilen mit wechselnden Lasten.

Konstruktionsregeln für die Verminderung von Körperschall, hervorgerufen durch Zahneingriff:

- Erhöhung der Eingriffsdauer;
- Verwendung von schrägverzahnten Getrieben;
- Erhöhung der Zähnezahl;
- Verbesserung der Qualität (Ausrichtung, Genauigkeit der Verzahnung);
- Verwendung von Kunststoff bei geringen Belastungen.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von Rollgeräuschen:

- Erhaltung glatter Rollflächen;
- Einsatz der richtigen Schmierung;
- Verwendung von Präzisionswälzlagern;
- Minimierung von Toleranzen im Gehäuse (Lagersitz);

- Verwendung von Gleitlagern;
- Erhöhung der Nachgiebigkeit in der Kontaktzone.

Konstruktionsregeln für die Verminderung von Körperschall, hervorgerufen durch Massenkräfte:

- Verminderung der Massenkräfte durch Auswuchten der Rotoren oder Massenausgleich der verschobenen Massen;
- Verminderung der beschleunigten Massen;
- Erhöhung der Stetigkeit der Bewegung.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von Körperschall, hervorgerufen durch Reibung und Selbsterregung:

- Verminderung der Reibung durch richtige Materialauswahl;
- Verminderung der Reibung durch richtige Schmierung;
- Erhöhung der Dämpfung derjenigen Struktur, die selbst erregt werden kann.

Konstruktionsregeln zur Verminderung von Körperschall, hervorgerufen durch Magnetfelder:

- Auswahl der Anzahl der Ankernuten, so dass keine Eigenschwingungen in Stator und Rotor angeregt werden;
- Ankernuten sollten nicht parallel zu den Polen verlaufen;
- Minimierung von Toleranzen in Form und Lage des Magnetkernes, um ein möglichst symmetrisches Magnetfeld aufzubauen;
- Optimierung der Polform;
- Berücksichtigung der durch Wandler magnetisch induzierten Geräusche an Antrieben mit veränderlicher Drehzahl;
- Auswahl des Kernmaterials bei Transformatoren, um Körperschallanregungen zu vermindern.

Luftschallübertragung:

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Luftschallübertragung durch Schallschutzkapseln:

- Geschlossene Ausführung von Schallschutzkapseln; auch kleine Spalten oder Löcher (z. B. Schlitze, Fugen) sind von Bedeutung und müssen abgedichtet werden;
- Verwendung von festen Blechen (schalldämmendes Material) für die äußere Hülle der Schallschutzkapsel;
- Verwendung von schallabsorbierendem Material im Inneren der Schallschutzkapsel;
- Verwendung von Schalldämpfern an Öffnungen für Lüftung, Kabel, Rohre, Materialtransport usw.;
- Vermeidung von festen Verbindungen zwischen der Schallschutzkapsel und der Maschine; Minimierung der Anzahl von Befestigungspunkten;
- Die Kapselung von einzelnen Aggregaten kann ebenfalls wirkungsvoll sein.

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Luftschallübertragung durch Schallschirme:

- Verwendung von festen Blechen (schalldämmendes Material) für die Abschirmung;
- Verwendung von Schallschirmen am Bedienerplatz;
- Die der Maschine zugewandte Seite sollte mit schallabsorbierendem Material verkleidet werden.

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Luftschallübertragung durch Schalldämpfer:

- Verwendung von Absorptionsschalldämpfern für Breitbandlärm;
- Vermeiden von Strömungsgeschwindigkeiten des Mediums von mehr als 20 m/s in Absorptionsschalldämpfern;
- Verwendung von Reflexionsschalldämpfern für tieffrequenten Lärm;
- Verwendung von pneumatischen Entspannungsschalldämpfern für Druckluftauslässe.

Flüssigkeitsschallübertragung:

Konstruktionsregeln für die Verminderung der Flüssigkeitsschallübertragung:

- Verwendung von Kombinationen aus Rohren und Schläuchen;
- Verwendung von Schalldämpfern.

Körperschallübertragung:

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Körperschallübertragung durch Schwingungsisolierung:

- Verwendung von Elementen oder Zwischenschichten, die ausreichend nachgiebig sind;
- Verwendung einer ausreichend steifen und schweren Grundstruktur.

Konstruktionsregeln für die Verminderung der Körperschallübertragung durch Dämpfung:

- Zusätzliche Dämpfung, wenn die ursprüngliche Dämpfung gering ist;
- Anwendung von Dämpfung zur Verminderung der Körperschallübertragung im Bereich diskreter Eigenfrequenzen;
- Anwendung von Dämpfung in der Nähe der Anregung;
- Zusätzliche Dämpfung an dünnen Platten (es ist schwierig, steife und schwere Strukturen zu bedämpfen).

Luftschallabstrahlung:

Konstruktionsregeln zur Verminderung der Luftschallabstrahlung:

- Anordnung von Öffnungen an der richtigen Seite (Richtcharakteristik der Schallabstrahlung);
- Verwendung von Schalldämpfern oder von Schallschirmen vor der Öffnung.

Körperschallabstrahlung:

Konstruktionsregeln für die Verminderung der Körperschallabstrahlung:

- Verkleinerung der abstrahlenden Fläche;
- Anwendung von Verkleidungen mit geringem Abstrahlgrad für die dominierenden Frequenzen:
 - dünne Platten anstelle von dicken Platten (Warnung: Vorsicht, wenn diese Verkleidung kratterregt ist);
 - gelochte Platten;
 - Verkleidungen mit Dämpfungsbelägen.

Anhang B

Anforderungen für die Konstruktion lärmarmen Maschinen

B.1 Geräuschemissionsgrößen

Die folgenden Größen werden zur Kennzeichnung der Geräuschemission von Maschinen verwendet:

- Hauptgrößen
 - A-bewerteter Schalleistungspegel L_{WA}
 - A-bewerteter Emissions-Schalldruckpegel an einem festgelegten Ort L_{pA} (am Arbeitsplatz oder an einem anderen festgelegten Punkt)
 - andere Größen, die in ISO-Normen oder Verordnungen definiert sind;
- Zusatzgrößen
 - A-bewerteter Messflächenschalldruckpegel \bar{L}_{pAf} in einer bestimmten Entfernung von der Maschine
 - C-bewerteter Spitzenschalldruckpegel \bar{L}_{pCpeak}
- Zusatzinformationen können aus folgenden Angaben gewonnen werden:
 - Schalldruckspektrum (z. B. in Terzbändern) an ausgewählten Messpunkten
 - Impulshaltigkeit
 - Richtwirkungsmaß DI , wenn erforderlich.

Die Messverfahren für diese Größen sind in Internationalen Normen beschrieben (z. B. Normen der Reihen ISO 3740 und Reihen ISO 11200 sowie ISO 9614-1 und ISO 9614-2).

Wenn verschiedene Versionen einer Konstruktion als Prototypen miteinander verglichen werden müssen (siehe Abschnitt 6), ist es möglich, vereinfachte Verfahren anzuwenden, z. B. Messung an nur einer Mikrofonposition anstelle von vielen Positionen um die Maschine.

B.2 Geräuschspezifikationen

B.2.1 Emissionswerte

Geräuschemissionswerte, die die Geräuschminderungsanforderungen für die Konstruktion darstellen, sollten entsprechend den folgenden Prinzipien festgelegt werden:

- Feststellung, ob eine spezifische ISO-Norm für die Geräuschmessung an der betrachteten Maschinenart existiert oder nicht; falls nicht, Festlegung, welcher ISO-Leitfaden für die Geräuschmessung angewendet werden sollte;
- Ermittlung der Geräuschemissionsgrößen, für die Emissionswerte entsprechend der zutreffenden Norm festgelegt werden müssen.

Die Emissionswerte zur Geräuschbeschreibung können mit Hilfe folgender Angaben bestimmt werden:

- Lärmgrenzwerte (oder empfohlene Lärmgrenzwerte) entsprechend den Anforderungen des Käufers der Maschine;
- Lärmgrenzwerte (oder empfohlene Lärmgrenzwerte), die in Verordnungen Internationaler Organisationen (z. B. ECE-Verordnung für Automobile, ICAO-Anhang 16 für Flugzeuge, ICE-Festlegungen für umlaufende elektrische Maschinen) oder in nationalen Normen enthalten sind;
- Emissionswerte ähnlicher Maschinen anderer Hersteller, gemessen durch Hersteller, Bediener, Messlabors usw., ermittelt aus
 - Maschinendokumentationen,
 - Datenbanken oder ähnlichen Datensammlungen, wo die neuesten Angaben als Einzelwerte oder gemittelte Werte mit Angaben zur Streuung gewonnen werden können (ISO 11689 enthält Detailinformationen).

Diese Emissionsdaten können verwendet werden, um Emissionsgrenzwerte festzulegen, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Werte wurden nach der gleichen Norm gemessen oder nach ein und derselben Regel gemittelt;
- Die Werte können umgerechnet werden, um sie vergleichbar zu machen, falls die Messungen nach unterschiedlichen Normen ausgeführt wurden (z. B. Messverfahren mit verschiedenen Genauigkeitsstufen, verschiedenen Betriebsbedingungen der Maschinen);
- Die Daten müssen vergleichbar sein bezüglich des Zeitraums, in dem sie erfasst wurden, und sie müssen aktuell sein;
- Die Messungen müssen an neuen Maschinen vorgenommen worden sein, die repräsentativ auf dem Markt sind.

Es ist üblich, zwischen gewünschten und höchstzulässigen Werten (z. B. eine Differenz von 5 dB) während der Konstruktionsphase zu unterscheiden.

Wenn die Geräuschemission durch Lärmgrenzwerte an Immissionspunkten, z. B. L_{pA} , festgelegt wird, können die folgenden Verfahren angewendet werden:

- Messungen an vergleichbaren Immissionspunkten;
- Berechnung auf der Grundlage von Schallausbreitungsregeln.

Wenn der Schalldruckpegel zeitlich schwankt (z. B. intermittierend arbeitende Maschinen), muss der äquivalente A-bewertete Schalldruckpegel, L_{pAcc} , bestimmt werden (durch Messung oder durch Berechnung aus dem Zeitverlauf).

B.2.2 Zusätzliche Anforderungen

Wenn der gesamte Konstruktionsprozess auf verschiedene Konstruktionsgruppen aufgeteilt ist oder wenn Zulieferer einbezogen werden, kann der Emissionswert des Endproduktes aus den Emissionswerten der Aggregate, z. B. Motoren, Getriebe, Pumpen, Ventilatoren, bestimmt werden. Das kann nach den Regeln der Schallenergieaddition ausgeführt werden.

Zusätzlich zu den Werten für den Luftschall kann es notwendig sein, Werte für den Körperschall und den Flüssigkeitsschall festzulegen.

Es kann ebenfalls erforderlich sein, eine Begrenzung des Frequenzspektrums für einzelne Maschinenaggregate festzulegen. In speziellen Fällen, z. B. bei Büro- oder Haushaltgeräten, können auch Anforderungen zur Charakterisierung des Geräusches vereinbart werden, z. B. „keine hörbaren Geräuschkomponenten“ für schalltechnisch verbesserte Geräte.

Eine andere Art von Anforderungen bezieht sich auf Einschränkungen bei der Konstruktion, die die Lärmminde- rung beeinflussen, z. B. das Verbot für die Anwendung von Schallschutzkapseln.

B.2.3 Anforderungsliste

Die Anforderungen müssen in einer Anforderungsliste entsprechend dem Formblatt (siehe Tabelle B.1) zusammengefasst werden.

Es ist wichtig, dass gekennzeichnet wird, ob es sich bei den jeweiligen Einträgen um Forderungen (F) oder Wünsche (W) handelt.

Forderungen sind Festlegungen, ohne deren Erfüllung die Lösung der Konstruktionsaufgabe nicht akzeptiert wird. Maximalforderungen müssen als solche formuliert werden (z. B. Schalleistungspegel).

Wünsche sind Festlegungen, die berücksichtigt werden sollten, wenn es möglich ist, z. B. mit der Einschränkung, dass sie nur durch eine Kostensteigerung möglich sind. Diese Wünsche können in verschiedenen Stufen des Konstruktionsprozesses berücksichtigt werden, wenn eine Bewertung und Auswahl von unterschiedlichen Lösungen notwendig ist. Die Auswahl von Lösungen ist abhängig von der Erfüllung der Forderungen, bis die Bewertung zu solchen Varianten führt, die schon die Forderungen erfüllen.

Allgemeine Aussagen bezüglich der Körperschallübertragung müssen möglichst vermieden werden. In diesem speziellen Fall stellen sie ein Bewertungskriterium dar.

Tabelle B.1 — Liste der akustischen Anforderungen (Beispiel)

		Spezifikation Hydraulikaggregat	Seite 1 von 1 Seite(n)
Änderungen	F/W	Anforderungen	verantwortlich
		...	
	F	Maximaler Schalleistungspegel $L_{WA} = 85$ dB gemessen nach ISO 3744	
	W	Maximaler Schalleistungspegel $L_{WA} = 80$ dB	
	F	C-bewerteter Spitzenschalldruckpegel $L_{pCpeak} < 97$ dB	
	W	Minimierung der Körperschallübertragung in das Fundament	
	W	Minimierung der Körperschallübertragung zwischen Pumpe und Motor	
		...	

Anhang C

Ergebnisbericht

Dieser Anhang ist ein informativer Teil dieses Internationalen Fachberichtes und kann als Unterstützung für den Ergebnisbericht benutzt werden.

Die folgende Zusammenstellung (siehe Tabelle C.1) kann als Bericht über Lärminderungsmaßnahmen, die an einer Maschine nach diesem Internationalen Fachbericht aufgeführt wurden, für betriebsinterne oder externe Zwecke eingesetzt werden.

Für jeden Schritt der einzelnen Konstruktionsphasen (Konzeptphase, Entwurfs- und Ausarbeitungsphase, Messungen am Prototyp) kann die folgende Liste für die gesamte Maschine oder für Einzelaggregate angewendet werden.

Für jedes Aggregat der Maschine kann die Tabelle verwendet werden, um die auftretenden Geräuschmechanismen zu erfassen. Durch Ankreuzen kann vermerkt werden, dass der jeweilige Mechanismus auftritt; Prioritäten können gesetzt werden, wenn bestimmte Mechanismen dominant sind. Die Tabelle kann auch für Messberichte oder andere spezielle Informationen bezüglich der von der Maschine ausgehenden Geräusche angewendet werden.

Tabelle C.1 — Kontrollliste für den Ergebnisbericht über die Lärminderung nach diesem Internationalen Fachbericht

Teile-Nr. in der Maschine (wie in beigefügter Liste der Aggregate festgelegt)		1	2	...
Anforderungen	Schallleistungspegel (dB)			
	Schalldruckpegel am Arbeitsplatz (dB)			
	C-bewerteter Spitzenschalldruckpegel (dB)			
	Messflächenschalldruckpegel (dB)			
	Spektrum			
	Impulshaltigkeit			
	Richtwirkung			
	andere			
Analyse der Schallquellen	Luftschall			
	— Turbulenz			
	— Pulsation			
	— Stoß			
	Flüssigkeitsschall			
	— Turbulenz			
	— Pulsation			
	— Stoß			
	— Kavitation			
	Körperschall			
	— Stoß			
	— Zahneingriff			
	— Rollen			
	— Massenträgheit			
	— Reibung			
	— Magnetische Effekte			

Tabelle C.1 (fortgesetzt)

Teile-Nr. in der Maschine (wie in beigefügter Liste der Aggregate festgelegt)		1	2	...
Analyse der Übertragungswege	Luftschall			
	— Schallschutzkapsel			
	— Schalldämpfer			
	— Schallschirm			
	Flüssigkeitsschall			
	— Schalldämpfer			
	— andere			
	Körperschall			
	— Kraftanregung			
	— Geschwindigkeitsanregung			
	— quasistatisches Verhalten			
	— Resonanzverhalten			
	— Verhalten bei hoher Eigenfrequenzdichte			
	— Masse			
	— Steifigkeit			
	— Dämpfung			
— Schwingungsisolierung				
Analyse der schallabstrahlenden Flächen	Luftschall			
	— Öffnungen			
	Körperschall			
	— abstrahlende Flächen			
	— Abstrahlgrad			

Eine Stückliste der Maschinenaggregate muss zusammen mit dieser Kontrollliste zur Verfügung gestellt werden.

Anhang D (informativ)

Literaturhinweise

- [1] Harris, *Handbook of noise control*, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1979
- [2] *Noise control*, Bruel & Kjaer, Denmark, 1986
- [3] Beranek, *Noise and vibration control*, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1971
- [4] Lyon, *Machinery noise and Diagnostics*, Butterworths, Boston, USA, 1987
- [5] Walker, White, *Noise and Vibration*, Ellis Horwood Limited, Chichester, UK, New York, 1988
- [6] Cremer, Heckl, *Structureborne sound*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1988
- [7] Kurze, U. J. und Dietz, P., *Lärmarm Konstruieren XIII — Schalltechnische Regeln und Konstruktionsmethodik*, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, 1985
- [8] Heckl, M. und Müller, H. A., *Taschenbuch der Technischen Akustik*, Springer-Verlag, Berlin, 1975

Anhang ZA (informativ)

Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der EG-Richtlinie 98/37/EG

Diese Europäische Norm wurde im Rahmen eines Mandats, das dem CEN von der Europäischen Kommission und der Europäischen Freihandelszone erteilt wurde, erarbeitet, um ein Mittel zur Erfüllung der grundlegenden Anforderungen der Richtlinie nach der neuen Konzeption 98/37/EG, geändert durch 98/79/EG, über Maschinen bereitzustellen.

Sobald diese Norm im Amtsblatt der Europäischen Union im Rahmen der betreffenden Richtlinie in Bezug genommen und in mindestens einem der Mitgliedstaaten als nationale Norm umgesetzt worden ist, berechtigt die Übereinstimmung mit den normativen Abschnitten dieser Norm innerhalb der Grenzen des Anwendungsbereiches dieser Norm zu der Annahme, dass eine Übereinstimmung mit den grundlegenden Anforderungen dieser Richtlinie und der zugehörigen EFTA-Vorschriften gegeben ist.

WARNHINWEIS — Für Produkte, die in den Anwendungsbereich dieser Norm fallen, können weitere Anforderungen und weitere EG-Richtlinien anwendbar sein.

Anhang ZB (informativ)

Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der EG-Richtlinie 2006/42/EG

Diese Europäische Norm wurde im Rahmen eines Mandats, das dem CEN von der Europäischen Kommission und der Europäischen Freihandelszone erteilt wurde, erarbeitet, um ein Mittel zur Erfüllung der grundlegenden Anforderungen der Richtlinie nach der neuen Konzeption 2006/42/EG über Maschinen bereitzustellen.

Sobald diese Norm im Amtsblatt der Europäischen Union im Rahmen der betreffenden Richtlinie in Bezug genommen und in mindestens einem der Mitgliedstaaten als nationale Norm umgesetzt worden ist, berechtigt die Übereinstimmung mit den normativen Abschnitten dieser Norm innerhalb der Grenzen des Anwendungsbereiches dieser Norm zu der Annahme, dass eine Übereinstimmung mit den grundlegenden Anforderungen dieser Richtlinie und der zugehörigen EFTA-Vorschriften gegeben ist.

WARNHINWEIS — Für Produkte, die in den Anwendungsbereich dieser Norm fallen, können weitere Anforderungen und weitere EG-Richtlinien anwendbar sein.