

12

Methoden für die Entwicklung lärmarmen Maschinen

Zielsetzung und Inhalt dieses Kapitels:

- Besprechung der Anforderungen an konstruktive Maßnahmen zur Lärminderung (Abschn. 12.2)
- Angabe von Werkzeugen für die Entwicklung lärmarmen Maschinen (Abschn. 12.3)
- Methodisches Vorgehen beim Ableiten und Umsetzen von Maßnahmen zur Lärminderung (Abschn. 12.4)
- Allgemeine Maßnahmen für die Lärminderung von Maschinen (Abschn. 12.5)
- Regeln für die Minderung von Schall differenziert nach Beeinflussung der Erregerkräfte, des Körperschallmaßes und des Abstrahlgrades unter Berücksichtigung der gegenseitigen Abhängigkeiten (Abschn. 12.6)

12.1 Einführung

In der industriellen Praxis kommt der Lärminderung an bestehenden oder neu zu entwickelnden Maschinen eine wachsende Bedeutung zu. Dies ist bedingt durch strengere gesetzliche Verordnungen aber auch durch die Komfortwünsche der Kunden. Eine sich verschärfende Wettbewerbssituation auf dem globalen Absatzmarkt und die daraus resultierenden Forderungen nach lärmarmen und zugleich kostengünstigen Konstruktionen, kurzen Entwicklungszeiten, einem sparsamen Umgang mit Werkstoffen sowie hohen Leistungsdichten an Maschinen erfordern eine systematische Vorgehensweise zum Erreichen dieser Ziele.

Tatsächlich sind die Grundvoraussetzungen für eine systematische Entwicklung lärmarmen Maschinen heute in höherem Maße gegeben als noch vor zehn Jahren, und es ist mit einer weiteren Verbesserung zu rechnen. Dies hängt mit der Verfügbarkeit leistungsfähigerer und zugleich kostengünstiger Werkzeuge zusammen, die den Konstrukteur unterstützen, die oben genannten Forderungen zu erfüllen.

Aufgrund der unübersichtlichen Vielzahl auf dem Markt verfügbarer experimenteller und numerischer Werkzeuge ist es eine entscheidende Aufgabe des Konstrukteurs, geeignete Hilfsmittel auszuwählen und eine angepaßte Strategie zu formulieren. Natürlich hängt die Auswahl der geeigneten Hilfsmittel sowie deren koordinierter Einsatz im Rahmen einer Strategie von der individuellen Aufgabenstellung ab. Eine allgemeingültige Lösung kann nicht angeboten werden. Doch bieten die Abschnitte 12.2 bis 12.4 im Rahmen einer systematischen Betrachtung Hilfestellungen, um Lösungen zu finden.

Der von Maschinen abgestrahlte Luftschall wird allgemein von folgenden Einflußgrößen bestimmt:

- *Anregungskräfte* (Spektrum und Anregungsort)
- *Übertragungsverhalten der Maschine* (Umsetzung der Anregungskräfte in Körperschall)
- *Abstrahlung* (Umsetzung von Körperschall in Luftschall)

Die gezielte Beeinflussbarkeit dieser Größen im Rahmen der Ableitung von konstruktiven Maßnahmen zur Lärminderung ist jedoch sehr unterschiedlich. In Abschn. 12.5 werden für die genannten Einflußgrößen in allgemeiner Form ausgewählte Regeln und Maßnahmen für die konstruktive Geräuschminderung besprochen.

12.2 Anforderungen an konstruktive Maßnahmen zur Lärminderung

Konstruktive Maßnahmen zur Lärminderung bedingen immer eine Gestaltungsänderung von einer oder mehreren Maschinenkomponenten. Dabei werden sowohl die anzuwendenden Untersuchungsverfahren als auch die konstruktiven Maßnahmen durch eine Vielzahl von Anforderungen und Restriktionen im Sinne der Konstruktionslehre [56] beeinflusst. Diese lassen sich in drei Gruppen aufgliedern:

Technische Anforderungen

- Große akustische Wirksamkeit der Maßnahmen. Häufig wird z.B. die Einhaltung von Grenzwerten für die abgestrahlte Schalleistung gefordert.
- Einfache Umsetzbarkeit der Maßnahmen an Neukonstruktionen oder bestehenden Produkten.
- Die Hauptfunktion der Maschine darf nicht negativ beeinflusst werden.
- Keine oder eine möglichst geringe Zunahme der Masse.
- Einhalten von geometrischen Restriktionen (z.B. Haupt- und Anschlußmaße).
- Beachtung thermischer Randbedingungen (z.B. Wärmetransport, Kühlung).

Finanzielle Anforderungen

- Möglichst geringe Kosten für akustische Untersuchungen, Simulationen und Ableitung von Maßnahmen zur Lärminderung.
- Keine bzw. möglichst geringe zusätzliche Herstellkosten des Produkts infolge konstruktiver Maßnahmen.

Zeitliche Anforderungen

- Möglichst geringer Zeitaufwand für akustische Untersuchungen, Simulationen und Ableitung von Maßnahmen zur Lärminderung.
- Schnelle Umsetzbarkeit gewählter konstruktiver Maßnahmen am Produkt.
- Geringer administrativer Aufwand bei Arbeit an Baugruppen (Abstimmung mit anderen Abteilungen, Fremdfirmen oder Kunden).

Zwischen den *technischen Anforderungen* einerseits und den *finanziellen und zeitlichen Anforderungen* andererseits besteht ein *Interessenkonflikt*. Wird der einen Seite eine hohe Priorität eingeräumt, geschieht dies zwangsläufig auf Kosten der anderen

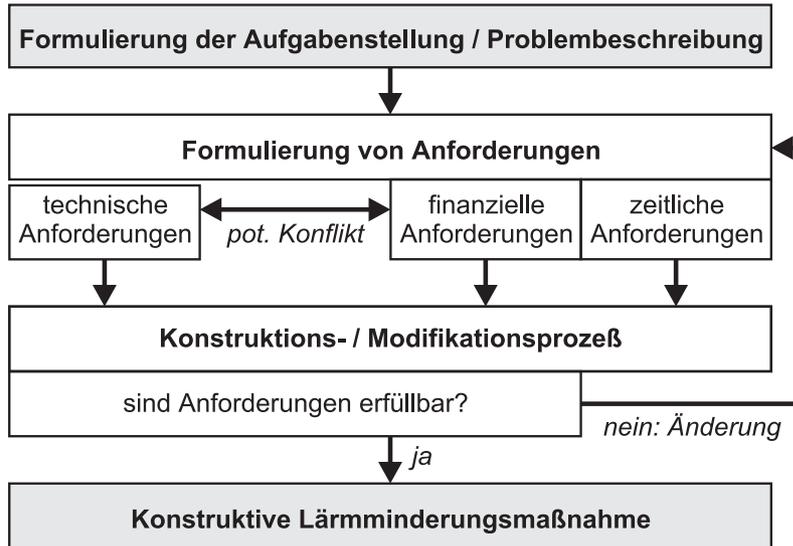


Abb. 12.1. Berücksichtigung von Anforderungen beim Ableiten von Lärminderungsarbeiten

Seite. Die gewählten Maßnahmen zur Lärminderung müssen deshalb das Ergebnis eines Kompromisses zwischen den konkurrierenden Anforderungen sein. Der Konstrukteur soll sich zur Erfüllung der finanziellen und zeitlichen Anforderungen immer vergegenwärtigen, daß *keine Verbesserung der akustischen Eigenschaften über die Forderungen des Lastenheftes hinaus erbracht werden muß*. Daher müssen die *akustischen Ziele vor Beginn des Konstruktionsprozesses* bei neuen Maschinen bzw. vor Beginn der Untersuchungen an bestehenden Produkten präzise formuliert werden.

Nicht immer kann zu Beginn des Konstruktionsprozesses abgeschätzt werden, ob die gestellten Anforderungen erfüllbar (technische Anforderungen) oder miteinander vereinbar sind (Interessenkonflikt). Es kann deshalb während des Konstruktionsprozesses eine Änderung von Anforderungen erforderlich sein.

12.3 Werkzeuge für die Entwicklung lärmarmen Maschinen

Unter dem Begriff Werkzeuge werden für die Konstruktion lärmarmen Maschinen unerläßliche Hilfsmittel und Fähigkeiten zusammengefaßt. Diese Werkzeuge können unterteilt werden in

- *Maschinenakustisches Expertenwissen.*
- *Experimentelle Werkzeuge.*
- *Numerische Werkzeuge.*

Im Interesse einer möglichst effizienten Entwicklung lärmarmen Maschinen und der Einhaltung der in Abschn. 12.2 genannten Anforderungen kann auf den Einsatz dieser

Werkzeuge nicht verzichtet werden, zumal sich diese in vorteilhafter Weise ergänzen. Der Erfolg bei der Entwicklung lärmarmen Maschinen beruht deshalb heutzutage zu einem wesentlichen Teil auf dem koordinierten Einsatz dieser Werkzeuge. Als problematisch kann sich erweisen, daß nur wenige Konstrukteure umfangreiches Wissen und Erfahrung in der Nutzung all dieser Werkzeuge besitzen. Die Beschäftigung von Experten für all dieser Teilgebiete ist insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen nicht rentabel.

Die aktuelle Entwicklungstendenz im Bereich der experimentellen und numerischen Werkzeuge führt jedoch dahin, die Meßtechnik- und Softwaresysteme anwenderfreundlicher zu gestalten sowie Meß- und Analyseverfahren soweit möglich zu automatisieren. Auf diese Weise soll auch dem Gelegenheitsanwender die (eingeschränkte) Nutzung dieser Werkzeuge ermöglicht werden.

Nachfolgend werden die Merkmale dieser Werkzeuge und die Einsatzmöglichkeiten während des Konstruktionsprozesses besprochen:

1. Maschinenakustisches Expertenwissen

Merkmale

- Kenntnis der relevanten physikalischen Zusammenhänge für die Anregung, Körperschallausbildung und Schallabstrahlung an Maschinen.
- Fachwissen und Erfahrungswissen (empirisches Wissen) über die Anwendbarkeit und Wirkung von Modifikationsmaßnahmen.
- Erfahrungswissen über die akustischen Eigenschaften vergleichbarer Maschinen.
- Kenntnis der Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen von Abschätzverfahren für das Körperschall- und Abstrahlverhalten.
- Nutzung moderner Kommunikationsmittel (Netzwerke, Internet-Recherche).
- Verfügbarkeit von Datenbanken und von Expertensystemen (Konservieren von Expertenwissen)

Einsatzmöglichkeit

- *Im frühen Stadium des Konstruktionsprozesses*, um statistisch wirksame Lärminderungsmaßnahmen abzuleiten und um diese in das Gesamtkonzept der Konstruktion frühestmöglich einfließen zu lassen. Vermeiden von in akustischer Hinsicht gravierenden, später nicht mehr korrigierbaren Konstruktionsmängeln. (Abschätzverfahren, allgemeine Gestaltungsregeln, Erfahrungswissen).
- *Im fortgeschrittenen Produktentwicklungsstadium und am Serienprodukt*, um maßgeschneiderte Lärminderungsmaßnahmen für eine gezielte Beseitigung detektierter Mängel zu erarbeiten.

Anwendungsgrenzen / Einschränkungen

- Die Akquisition bzw. das Erarbeiten von Experten- und Erfahrungswissen ist sehr zeitaufwendig.
- Es sind ausgehend vom Expertenwissen und unter Verwendung einfacher Abschätzverfahren nur sehr allgemeine Aussagen über die akustischen Eigenschaften von Maschinen möglich (die Lage von Eigenfrequenzen bzw.

Körperschall und Luftschallamplituden neuer Maschinen lassen sich nicht hinreichend genau abschätzen).

- Prognosen über die Wirksamkeit von Lärminderungsmaßnahmen an komplexen Strukturen sind mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Es kann nur die Tendenz der Wirkung prognostiziert werden.
- Die Anwendung stark vereinfachender Modelle (einfache Abschätzverfahren) für eine Abbildungen realer Strukturen ist ohne an ähnlichen Strukturen gewonnene Anwendungserfahrung mit einer hohen Unsicherheit behaftet.

2. Experimentelle Werkzeuge

Merkmale

- Moderne Datenerfassungsgeräte, Sensoren und Anregungsgeräte; Meßräume bzw. Prüfstände für die Messung von Anregungskräften sowie Körperschall- und Luftschallfeldgrößen.
- Einfach bedienbare, an die Problemstellung angepaßte Auswertungssoftware (z.B. experimentelle Modalanalyse, Betriebsschwingformanalyse, Ordnungsanalyse, Schallintensitätsanalyse usw.).
- Software zur Ergebnisvisualisierung und Präsentation; Datenexport und Datenaustausch.
- An die Aufgabenstellung angepaßte Meßprozeduren (Strategie für experimentelle Analyse). Erfahrungswissen über die Auswahl von Meßprozeduren.
- Expertenwissen über Anwendungsbereiche und Grenzen der Meß- und Analyseverfahren sowie über die Auswertung von Meßergebnissen und die Ergebnisinterpretation.
- Moderne Kommunikationsmittel (Ergebnisaustausch, Diskussion in der Arbeitsgruppe oder mit auswärtigen Experten).

Einsatzmöglichkeiten

- *Im frühen Entwicklungsstadium* für Messungen an Maschinen vergleichbarer Bauart, um problematische Betriebszustände und prinzipielle akustische Probleme frühzeitig erkennen zu können.
- *Bei Vorhandensein eines serienrelevanten Prototyps*, um den akustischen Istzustand zu analysieren. Identifikation von akustisch problematischen Betriebszuständen und Strukturbereichen. Schaffung einer Datenbasis für die Ableitung detaillierter, problemspezifischer Modifikationsmaßnahmen. Überprüfung der Wirksamkeit von am Prototyp umgesetzten Maßnahmen, experimentelle Iteration. Verwendung der Datenbasis für die Nutzung durch numerische Berechnungsverfahren (FEM-Updating, Randbedingungen für BEM).
- *Am Serienprodukt* kann die Einhaltung der vorgegebenen Grenzwerte für Körper- und/oder Luftschall überprüft werden. Detektieren von akustisch problematischen Betriebszuständen und Strukturbereichen. Benchmarking mit vergleichbaren Serienprodukten. Sammeln von statistischen Daten, Messung der Streuung akustischer Eigenschaften des Produkts.

Anwendungsgrenzen / Einschränkungen

- Für die Anwendung experimenteller Werkzeuge wird ein Prototyp oder eine Serienmaschine benötigt.

- Messungen an nicht seriennahen Prototypen liefern keine brauchbare Datenbasis für eine Detailoptimierung der akustischen Eigenschaften.
- Das Vermeiden von Meß- und Auswertungsfehlern erfordert Expertenwissen und Erfahrung.
- Die Anwendung moderner experimenteller Werkzeuge sowie die Ergebnisauswertung ist oft zeit- und kostenintensiv. Für manche Meßverfahren ist eine umfangreiche Ausstattung an Meßgeräten und Meßräumen sowie die Verfügbarkeit erfahrener Meßingenieure erforderlich.

3. Numerische Werkzeuge

Merkmale

- Verwendung moderner CAD-Software, Verfügbarkeit parametrisierter 3D-Modelle, Verfügbarkeit geeigneter Schnittstellen (Datenexport).
- Numerische Berechnungssoftware (FEM und BEM) für das Körperschall- und Abstrahlproblem (s. Kap. 8 und 9), Ausführung von Parameterstudien, numerische Optimierungsalgorithmen, Schnittstellen für Updating-Verfahren (Modellanpassung / Abgleich von FE-Modellen mit Ergebnissen experimenteller Untersuchungen).
- Ergebnisvisualisierung und Präsentation, Datenexport und Datenaustausch.
- Expertenwissen über die Einsatzmöglichkeiten und Grenzen der numerischen Berechnungsverfahren, Expertenwissen über die Modellabbildung technischer Strukturen.
- Moderne Kommunikationsmittel (Ergebnisdiskussion in der Arbeitsgruppe oder mit auswärtigen Experten).

Einsatzmöglichkeit

- Die CAD-Software kann *während des gesamten Konstruktionsprozesses* für die Entwicklung lärmarmen Maschinen genutzt werden. Sie ermöglicht eine Flexibilisierung des Konstruktionsprozesses, Vereinfachung der Variantenbildung und Prüfung der fertigungstechnischen Umsetzbarkeit. Automatische oder manuelle Vernetzung der parametrisierten Modelle für die Nutzung numerischer Berechnungsverfahren.
- *Einsatz numerischer Berechnungssoftware im frühen Konstruktionsstadium* zu dem noch keine Prototypen verfügbar sind, um die Auswirkungen statistisch breitbandig wirksamer Lärminderungsmaßnahmen an Gestaltungsvarianten bewerten zu können, Ausführung von Parameterstudien.
- Einsatz numerischer Berechnungssoftware im fortgeschrittenen Konstruktionsstadium, um den Einfluß von detaillierten Gestaltungsmodifikationen abzuschätzen und um Aussagen zur Änderung des Körperschall- und Luftschallverhaltens infolge Parametervariationen ermitteln zu können. Gestaltungsvarianten können mit relativ geringem Zeitaufwand hinsichtlich ihrer akustischen Eigenschaften beurteilt werden. Einsatz von Optimierungsverfahren.
- *Bei Problemen am Serienprodukt* können durch den Einsatz numerischer Berechnungssoftware sensitive Strukturbereiche ermittelt und die Auswirkungen von Abhilfemaßnahmen auf das akustische Verhalten prognostiziert werden.

Anwendungsgrenzen / Einschränkungen

- Das Vermeiden von Modellierungsfehlern bei der Vernetzung von Strukturen (Modellabbildung) erfordert Expertenwissen und Erfahrung.
- Das Modellieren und Berechnen (numerische Berechnungsverfahren) von vollständigen Maschinen erfordert einen hohen Zeit- und Kostenaufwand.
- Berechnungsergebnisse an komplexen Strukturen sind mit Unsicherheiten behaftet.
- Problematik bei der Modellierung von Füge- und Trennstellen, bei der Vorgabe der Strukturdämpfung, inhomogenen Werkstoffen (z.B. Grauguß-Werkstoffe) und überall dort, wo die realen Zustände nicht hinreichend genau bekannt sind, um entsprechend modelliert werden zu können. Derartige Modellierungsfehler führen zu Ergebnisabweichungen, die eine Detailoptimierung der akustischen Eigenschaften auf Basis der Berechnungsergebnisse erschweren.

Aus diesen Informationen ist leicht ersichtlich, daß im Rahmen der Entwicklung lärmarmen Maschinen ein koordinierter Einsatz dieser Werkzeuge erforderlich ist, um die Anforderungen aus Abschn. 12.2 zu erfüllen:

- Der Maschinenakustik-Experte benötigt für eine Beurteilung der akustischen Eigenschaften einer Maschine Meß- oder Berechnungsergebnisse über den Istzustand bzw. den Modifikationszustand.
- Konstruktive Modifikationen können vom Experten nur auf der Grundlage gesicherter Ergebnisse aus Messung und/oder Berechnung abgeleitet werden.
- Die Kenntnisse und Erfahrungen des Akustik-Experten werden benötigt, um Meßergebnisse auf Plausibilität prüfen und geeignet interpretieren zu können.
- Die Qualität von Ergebnissen numerischer Berechnungen an Maschinen kann nur durch einen Vergleich mit Meßergebnissen bzw. durch eine Plausibilitätsprüfung des Experten beurteilt werden.
- Numerische Berechnungsverfahren benötigen aus Meßergebnissen gewonnene Parameter (z.B. modale Dämpfungsgrade) um realitätsnahe Berechnungsergebnisse zu liefern.

Diese Aufzählung umfaßt nur einige Beispiele für Abhängigkeiten zwischen den Werkzeugen und könnte erheblich erweitert werden. *Es zeigt sich, daß diese Werkzeuge nicht in Konkurrenz zu einander stehen, sondern koordiniert für die Entwicklung lärmarmen Maschinen eingesetzt werden müssen.*

12.4 Methodisches Vorgehen beim Ableiten und Umsetzen von Maßnahmen zur Lärminderung

Anhand der in Kapitel 7 besprochenen maschinenakustischen Grundgleichung (7.2) können die Einflußgrößen für den von der Maschine abgestrahlten Luftschall identifiziert werden. Setzt man voraus, daß das Umgebungsmedium der Maschine Luft ist, stehen folgende Einflußgrößen zur Verfügung:

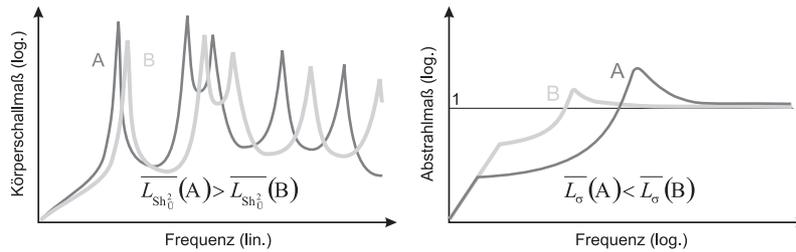


Abb. 12.2. Beeinflussung des Körperschall- und Abstrahlmaßes einer Platte bei Variation der Dicke ($h_A < h_B$)

- *Anregungskräfte* (Spektrum und Anregungsort).
- *Übertragungsverhalten der Maschine* (Umsetzung der Anregungskräfte in Körperschall).
- *Abstrahlung* (Umsetzung von Körperschall in Luftschall).

Diese Größen können mittelbar durch eine Veränderung des Betriebszustandes (z.B. Last, Drehzahl, Arbeitstakt, Funktionsweise) und eine Änderung der Gesamt- oder Detailgestaltung der Maschine bzw. von Komponenten (z.B. ändern der Abmessungen und des Materials, hinzufügen oder entfernen von Elementen) beeinflusst werden. Um die Auswirkung einer Modifikationsmaßnahme abschätzen zu können, genügt es nicht, nur eine Einflußgröße zu betrachten. Folgendes ist zu beachten:

- An manchen Maschinen besteht die Möglichkeit, die anregenden Kräfte ohne Rückwirkung auf die Übertragungseigenschaft und den Abstrahlgrad zu beeinflussen. Häufig sind die anregenden Kräfte durch den Arbeitsprozeß bedingt. Eine Beeinflussung der Anregungskräfte führt in solchen Fällen zu einer Änderung des Betriebszustandes und damit zu einer Beeinflussung der Hauptfunktion. Dies ist in der Regel unerwünscht bzw. erfordert weiterführende (und damit kostenintensive) Modifikationen.
- Gestaltungsänderungen, die das Übertragungsverhalten der Maschine beeinflussen, wirken sich auch auf den Abstrahlgrad aus. Diese gekoppelte Einflußnahme führt in akustischer Hinsicht oft zu gegensätzlichen Auswirkungen, wodurch das Gesamtergebnis beeinträchtigt wird.

Ein Beispiel: Aus der Dickenreduktion einer rechteckigen Stahlplatte resultiert nach Abschn. 5.5 eine Absenkung des Abstrahlgrades (Verminderung der abstrahlbaren Schalleistung), doch zugleich eine Erhöhung der Eigenfrequenzdichte im betrachteten Frequenzbereich (erhöhender Einfluß auf die abgestrahlte Schalleistung). In Abb. 12.2 wird dieser Zusammenhang qualitativ dargestellt.

- Zahlreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß Maßnahmen, durch welche das Körperschallverhalten günstig beeinflusst wird, das größte Potential zur Minderung des abgestrahlten Luftschalls aufweisen.

Maßnahmen zur Reduktion des Körperschalls beinhalten immer eine Einflußnahme auf Maschinenkomponenten, welche an jenen Schwingungsformen der Maschine teilhaben, die einen wesentlichen Beitrag zum abgestrahlten Luftschall lei-

sten. Auch für den Fall, daß eine Körperschallreduktion erreicht werden soll, hängt die geeignete Auswahl von Modifikationsmaßnahmen nicht nur vom Übertragungs- und Abstrahlverhalten der Maschine ab. In jedem Fall muß der relevante Betriebszustand berücksichtigt werden, für den die Lärmreduzierung erfolgen soll. Dieser muß mit den Anforderungen (s. Abschn. 12.2) formuliert werden. *Ohne eine Definition der relevanten Betriebszustände ist die Ausführung einer Strukturmodifikation nicht sinnvoll.*

In Abhängigkeit der Struktureigenschaften der Maschine, der relevanten Betriebszustände und der Zielsetzung kann man zwei Arten der Modifikation unterscheiden:

1. Statistisch breitbandig wirksame konstruktive Maßnahmen

Merkmale

- Statistisch wirksame Modifikationsmaßnahmen sollen zu einer *möglichst breitbandigen Reduktion des Körperschallmaßes* einer Maschine führen. Es werden dabei sogenannte globale Maßnahmen ergriffen, die in weiten Strukturbereichen zu einer Erhöhung der Steifigkeit oder der Massenbelegung führen.
- Als weitere Maßnahme bietet sich eine *Erhöhung der Eingangsimpedanzen* (z.B. Applikation von Vorschaltmassen an den Krafteinleitungsstellen) oder an schwach gedämpften Strukturen eine *Erhöhung der Strukturdämpfung* an.
- Nutzung von Expertenwissen und Abschätzverfahren, ggf. numerische Simulation bei der Ableitung, Abstimmung und ersten Verifikation der Maßnahmen. Später experimentelle Verifikation am Objekt (Prototyp), ggf. weitere Feinabstimmung.

Anwendungsbereiche

- Bei hoher Eigenfrequenzdichte der Struktur im relevanten Frequenzbereich.
- Stark variierende Betriebszustände, breitbandige Strukturanregung bzw. stark veränderliches Anregungskraftspektrum im gesamten (bzw. in einem weiten) Frequenzband.
- Als Basismaßnahme in einem sehr frühen Konstruktionsstadium bei der Neukonstruktion von Maschinen (wesentliche Gestaltungsparameter sind noch änderbar).
- Anwendbar auch bei großen Toleranzen der Bauteileigenschaften der Maschine.
- Die Auslegung kann ggf. durch Abschätzverfahren oder durch den Einsatz numerischer Berechnungsverfahren (FEM) erfolgen.

Anwendungsgrenzen / Einschränkungen

- Müssen aufgrund der erforderlichen Gestaltungsfreiheitsgrade in einem sehr frühen Konstruktionsstadium angewendet werden. Können beim Auftreten spezifischer akustischer Probleme im späten Konstruktionsstadium bzw. bei Nachbesserungen aufgrund des hohen Aufwandes (und der damit verbundenen Kosten) kaum mehr angewendet werden.
- Hoher Umsetzungsaufwand am Serienprodukt.
- Können zu signifikanter Massenerhöhung führen.

- Statistisch wirksame Maßnahmen können bei schmalbandigen Anregungen bzw. bei spezifischen, bandbegrenzten Betriebszuständen auch zu einer Verschlechterung der akustischen Eigenschaften führen, sofern sie nicht speziell auf diese Betriebszustände abgestimmt wurden.

2. Bandbegrenzt wirksame konstruktive Maßnahmen

Merkmale

- Modifikationsmaßnahmen bleiben auf lokale Strukturbereiche beschränkt.
- Gezielte Einflußnahme auf einzelne Eigenfrequenzen der Maschine durch steifigkeitserhöhende oder -vermindernde Maßnahmen.
- Auswahl von zu beeinflussenden Eigenfrequenzen unter Berücksichtigung der Strukturanregung im relevanten Betriebszustand. Die Identifikation der relevanten Eigenfrequenzen erfordert eine schmalbandige experimentelle Analyse des Betriebs- und Übertragungsverhaltens der Maschine.
- Gezielte Verbesserung der akustischen Eigenschaften ausschließlich für den relevanten Betriebszustand (und Frequenzbereich).

Anwendungsbereich

- Geeignet für Strukturen mit geringer und mittlerer Dichte der Eigenfrequenzen.
- Geräuschminimierung für definierte Betriebszustände mit eng bandbegrenzter Anregung.
- Die Ableitung von bandbegrenzt wirksamen Lärminderungsmaßnahmen erfolgt im fortgeschrittenem Konstruktionsstadium oder am Serienprodukt. Auf lokale Strukturbereiche beschränkte Modifikationsmaßnahmen können mit vertretbarem Aufwand noch in einem späten Entwicklungsstadium am Produkt umgesetzt werden.
- Lokale Modifikationsmaßnahmen sind häufig schnell umsetzbar und mit nur geringen Mehrkosten verbunden.

Anwendungsgrenzen / Einsatzmöglichkeiten

- Die Wirksamkeit der Maßnahmen ist nur für spezifische Betriebszustände gegeben, unter deren Berücksichtigung die Modifikationsmaßnahmen abgeleitet wurden. Für andere Betriebszustände kann eine Verschlechterung der akustischen Eigenschaften resultieren.
- An Maschinen mit hoher Eigenfrequenzdichte im relevanten Frequenzbereich versprechen lokale, eigenfrequenzselektive Modifikationsmaßnahmen wenig Erfolg.
- Die Wirksamkeit der Modifikationsmaßnahmen am Serienprodukt erfordert geringe Toleranzen der Bauteil- /Materialeigenschaften (erhöhte Anforderungen an das Qualitätsmanagement).
- Geringfügige Modifikationen der Konstruktion zu späterem Zeitpunkt (z.B. nach Serieneinführung) können die Wirksamkeit der Maßnahmen aufheben bzw. eine Neuanpassung der Maßnahmen erfordern.

12.5 Allgemeine Maßnahmen für die Lärminderung von Maschinen

Wertvolle Hinweise für allgemeine Lärminderungsmaßnahmen an Maschinen enthalten [14, 50]. Ausgangspunkt für allgemeine Überlegungen zur praktischen Geräuschminderung ist die maschinenakustische Grundgleichung (7.2). Sie zeigt, daß es in der Maschinenakustik grundsätzlich drei Ansätze für Maßnahmen zur Geräuschminderung gibt:

- Verringerung der Erregerkräfte: Reduzierung des Pegels der Erregerkraft,
- Verringerung des Körperschalls auf den abstrahlenden Oberflächen einer Maschine: Reduzierung des Körperschallmaßes,
- Verringerung der Abstrahlung: Reduzierung des Abstrahlgrades.

Nach der akustischen Grundgleichung (7.3) in Pegelschreibweise addieren sich der Pegel der erregenden Kraft, das Körperschallmaß und das Abstrahlmaß zum Pegel der abgestrahlten Luftschalleistung.

Grundsätzlich müssen die Auswirkungen der oben genannten Maßnahmen zur Geräuschminderung in ihrem Zusammenwirken betrachtet werden. Maßgeblich ist immer das Produkt aus den spektralen Anteilen der Erregerkraft, der mittleren flächengewichteten quadratischen Übertragungsadmittanz und dem Abstrahlgrad bzw. die Summe der Pegel dieser drei Größen. Aus der maschinenakustischen Grundgleichung folgt der nachstehende wesentliche Merksatz 1:

Merksatz 1

Konstruktive Maßnahmen zur Geräuschminderung müssen immer hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Erregerkräfte, Körperschallmaß und Abstrahlmaß betrachtet werden.

Im allgemeinen kann die Wirkung von konstruktiven Maßnahmen zur Reduzierung des spektralen Anteils der Erregerkraft getrennt von solchen zur Verminderung der flächengewichteten mittleren quadratischen Übertragungsadmittanz und des Abstrahlgrades betrachtet werden. Dagegen beeinflussen konstruktive Maßnahmen zur Verminderung des Körperschall- oder Abstrahlmaßes in der Regel auch die jeweils andere maschinenakustische Kenngröße.

Aus der maschinenakustischen Grundgleichung folgt weiter der Merksatz 2.

Merksatz 2

Maßnahmen zur Schall Minderung besitzen dann die größte Wirksamkeit, wenn sie zur

- *Minderung des Luftschalls im Frequenzbereich der größten Amplituden des Schalleistungsspektrums beitragen.*
- *Minderung des Körperschalls im Frequenzbereich der größten Amplituden des Körperschallspektrums beitragen.*

Bei der Anwendung des Merksatzes 2 ist ferner zu berücksichtigen, ob die absolute oder die A-bewertete Schalleistung vermindert werden soll. Ist die A-bewertete Schalleistung zu vermindern, so müssen die Amplitudenmaxima der A-bewerteten Spektren als Grundlage der Maßnahmen dienen.

Eine Minderung des Schalleistungspegels kann auch dadurch erreicht werden, daß die im gleichen Frequenzbereich liegenden Maxima des Pegels der Erregerkraft und des Körperschallmaßes frequenzmäßig getrennt werden. Eine derartige frequenzmäßige Trennung kann z.B. dadurch erreicht werden, daß die erste Eigenfrequenz der Struktur verändert (i.a. erhöht) wird. In der Regel läßt sich das Erregerspektrum nur schwierig beeinflussen, weil es meistens von der festgelegten Funktion der Maschine bestimmt wird. Der Verlauf des Körperschallmaßes läßt sich aber durch Verändern der ersten Eigenfrequenz der Struktur beeinflussen. So ist es im allgemeinen erfolgversprechend, die Eigenfrequenzen durch geeignete konstruktive Maßnahmen (z.B. Verrippen) zu erhöhen. Diese Maßnahme ist insofern günstig, als der körperschallarme quasistatische Frequenzbereich zu höheren Frequenzen hin ausgeweitet wird.

In der Praxis tritt häufig der Fall auf, daß eine Maschine aus mehreren Schallquellen besteht (z.B. Verbrennungsmotor mit Nebenaggregaten wie Ölpumpe, Lichtmaschine usw.). Aus (1.12) folgt der Merksatz 3.

Merksatz 3

Umfaßt eine Maschine mehrere Schallquellen, so müssen Maßnahmen zur Verminderung der Schalleistung stets an derjenigen Schallquelle einsetzen, welche den größten Einzelpegel der Schalleistung aufweist.

Die Bedeutung dieses Merksatzes wird durch Beispiel 12.5 verdeutlicht.

Beispiel 12.1

Gegeben: Eine Maschine besteht aus drei Schallquellen mit folgenden Schalleistungspegeln:

Quelle 1 = Quelle 2 : L_P dB Quelle 3: $L_P + A$ dB

Gesucht: Gesamtpegel und Auswirkung der Pegeldifferenz A auf den Gesamtpegel.

Lösung:

Aus (1.12) folgt

$$L_{P_{\text{ges}}} = 10 \log (2 \cdot 10^{L_P/10} + 10^{(L_P+A)/10}) \text{ dB} = L_P + \Delta L_P,$$

mit

$$\Delta L_P = 10 \log (2 + 10^{A/10}) \text{ dB}.$$

Tabelle 12.1 zeigt die Auswirkung der Pegeldifferenz A auf den Gesamtpegel der drei Schallquellen. ■

Tabelle 12.1. Auswirkungen einer Pegeldifferenz auf den Gesamtpegel von drei Schallquellen gemäß Beispiel 12.5

A dB	ΔL_p dB
0	4,8
5	7,1
10	10,8
15	15,3
20	20,1

Das Beispiel zeigt deutlich (vgl. Tabelle 12.1), daß die Absenkung des Überschusses A des Pegels der Quelle 3 praktisch linear auf den Gesamtpegel durchschlägt, sofern dieser Überschuß um 10 dB oder mehr über dem Grundpegel L_p liegt.

12.6 Regeln für die Minderung von Schall

In der Konstruktionspraxis haben sich einige allgemein anwendbare Regeln für die Minderung von Maschinenschall herausgebildet. Sie lassen sich anhand der maschinenakustischen Grundgleichung wie folgt strukturieren:

- Maßnahmen zur Beeinflussung der Erregerkräfte
- Maßnahmen zur Beeinflussung des Körperschallmaßes
- Maßnahmen zur Beeinflussung des Abstrahlmaßes

Sie werden im folgenden getrennt besprochen.

12.6.1 Beeinflussung der Erregerkräfte

Die Beeinflussung von Erregerkräften ist insofern problematisch, als sie häufig Rückwirkungen auf den Prozeß und damit die Leistung einer Maschine verursacht. Jede konstruktive Maßnahme, durch die Erregerkräfte vermindert werden sollen, muß daher im *Gesamtzusammenhang des Konstruktionsprozesses* betrachtet werden. Jedoch gibt es einige allgemein gültige Regeln für die Verminderung von Erregerkräften, die im folgenden vorgestellt werden.

Regel 12.1

Abrupte Übergänge im zeitlichen Verlauf der Betriebskräfte sind zu vermeiden. Ein stetiger Anstieg und Abfall des zeitlichen Verlaufes der Betriebskräfte mit geringen Gradienten und stetigen höheren Zeitableitungen ist anzustreben. Konstruktive Maßnahmen hierfür sind:

- Bei Nockentrieben sind für das Erhebungsgesetz Kurven mit stetigem Verlauf der Krümmung vorzusehen anstelle von aneinandergefügten

Kurvenstücken mit un stetigen Änderungen der Krümmung (z.B. Kreisbögen mit unterschiedlichen Radien). Derartige Erhebungsgesetze mit stetiger Krümmung führen zu einem stetigen Verlauf des sog. Rucks \ddot{w} , was sich günstig auf das Kraftspektrum auswirkt.

- In Getrieben sorgen Zahnflankenkorrekturen (insbesondere bei Schrägverzahnungen) für eine stetige Übertragung des Drehmoments. Solche Korrekturen sind Breitenballigkeit und Kopfrücknahme.
- Bei hydraulischen Aggregaten lassen sich Druckpulsationen durch Ausgleichschlitze und -bohrungen vermindern.

Regel 12.2

Hochtourig laufende Maschinen sind auf möglichst kleine Restunwucht auszuwuchten.

Regel 12.3

Spiele zwischen bewegten Teilen sind unbedingt zu vermeiden, da sie immer zu einem breitbandigen Kraftspektrum mit relativ großer Amplitudendichte führen. Spiele lassen sich durch Vorspannung der bewegten Teile vermeiden.

Regel 12.4

Lassen sich Spiele zwischen den bewegten Teilen nicht vermeiden, so sind die Aufprallgeschwindigkeiten klein zu halten, z.B. durch:

- Anordnen elastischer Zwischenglieder,
- Vergrößern der Nachgiebigkeiten der bewegten Teile.

Regel 12.5

Erregerkräfte können durch das „Prinzip der Schrägung“ verringert werden. Beispiele hierfür sind:

- Schrägverzahnungen anstelle von Geradverzahnungen.
- Drallmesserwellen anstelle von Messerwellen mit geraden Schneidkanten.
- Ziehender Schnitt durch Abschrägen der Messerkanten anstelle eines zeitlich gleichen „Hackschnitts“.

Regel 12.6

Wenn möglich, sind die Dauern impulsartiger Vorgänge zeitlich zu strecken. Dadurch wird im höherfrequenten Bereich die spektrale Amplitudendichte der Erregung verringert.

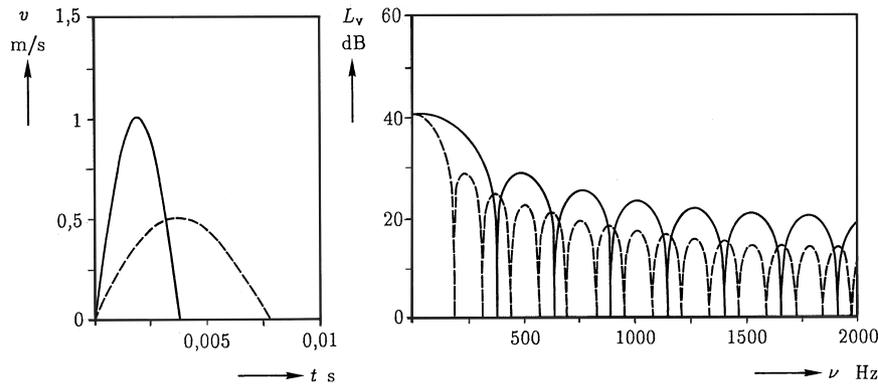


Abb. 12.3. Vergleich von zwei Impulsen gleicher Impulsfläche im Zeit- und Frequenzbereich

Ein Beispiel zu Regel 12.6.1 gibt Abb. 12.3. Im linken Teil der Abbildung sind zwei sinusförmige Impulse gleichen „Impulsinhaltes“ dargestellt. Der eine Impuls besitzt genau die doppelte Dauer und die halbe Amplitude wie der andere. Im rechten Teil von Abb. 12.3 findet sich der Pegel des Spektrums. Es ist gut zu erkennen, wie beim länger dauernden Impuls der erste Abfall des Spektrums bei einer deutlich kleineren Frequenz erfolgt. Im gesamten höherfrequenten Bereich liegt die spektrale Amplitudendichte deutlich niedriger als beim Impuls mit der kurzen Impulsdauer.

Regel 12.7

Stoßartig verlaufende Kräfte sind zu vermeiden. Eine Begründung für diese Regel wird in Abschnitt 2.3 (insbesondere S. 31) gegeben.

Einen wichtigen Beitrag zur Verminderung der Kraftspektren können auch *fertigungstechnische* Maßnahmen leisten. Grundsätzlich werden die zwischen Wirkflächenpaaren übertragenen dynamischen Kräfte um so kleiner, je höher die Oberflächengüte der Wirkflächen gewählt wird (z.B. Schleifen statt Feindreihen oder Fräsen, geringe Rauigkeitswerte vorschreiben). Des Weiteren ist auf hohe Präzision (Maß- und Formtoleranzen) zu achten.

12.6.2 Beeinflussung des Körperschallmaßes

Von den Strukturkenngrößen Körperschallmaß und Abstrahlmaß läßt sich das Körperschallmaß durch konstruktive Maßnahmen wesentlich einfacher beeinflussen als das Abstrahlmaß. Es gelten folgende Regeln :

Regel 12.8

Die Kräfte sind auf möglichst kompakten, geradwandigen Strukturen zu übertragen. Sie sollen „nicht spazierengeführt“ werden.

Regel 12.9

Der Kraftfluß soll möglichst nicht über schallabstrahlenden Flächen geführt werden (Prinzip der Funktionstrennung). Die kraftführenden Strukturen sind von den Schall abstrahlenden Außenteilen zu trennen und daher als steife, im Inneren der Maschine liegende Bauteile auszuführen. Die Schall abstrahlenden Außenteile sind von den tragenden Strukturen körperschallmäßig abzukoppeln (z.B. dämmende Zwischenlagen großer Nachgiebigkeit).

Regel 12.10

An den Einleitungsstellen der Kräfte in die schallabstrahlenden Flächen sind die Impedanzen möglichst groß zu halten. Konstruktive Möglichkeiten sind:

- Rippen sind an die Krafteinleitungsstellen heranzuführen. Rippen ohne Anbindung an die Krafteinleitungsstellen erhöhen meistens nur das Gewicht, ohne das Körperschallmaß ausreichend abzusenken.
- Rippen müssen an den Gehäusekanten abgestützt werden, sie dürfen nicht „in der Luft hängen“.
- Die für Rippen zur Verfügung stehende Masse ist in Form von Höhe und nicht von Breite einzubringen.
- Sog. Vorschaltmassen an den Krafteinleitungsstellen erhöhen breitbandig die Eingangsimpedanz. Ein ausgeführtes Beispiel zeigt Abb. 12.4.
- Die Aufnahmen für das Anbinden einer Maschinenstruktur sind möglichst nahe an die Ecken des Maschinengehäuses zu legen. Die Ecken des Gehäuses stellen lokale Erhöhungen der Steifigkeit und damit der Impedanz dar.
- Im allgemeinen sind ungeteilte Gehäuse (bei gleichen Massen und Abmessungen) günstiger als geteilte. Bei geteilten Gehäusen sind kräftige Flansche vorzusehen.
- In Abstimmung mit den Spektren der erregenden Kräfte können Eigenfrequenzen verändert werden. Höhere Eigenfrequenzen (i.a. günstig) lassen sich durch Verrippen und durch größere Biegesteifigkeit (bei möglichst gleich bleibender Masse) erreichen (vgl. Abb. 12.5).

Regel 12.11

Schließlich gibt es noch die Möglichkeit, das Körperschallmaß durch die Dämpfung zu beeinflussen. Wirksam ist hier vor allem die Fugendämpfung (vgl. Abschn. 3.1 und Tabelle 3.2). Sie kann durch folgende konstruktive Maßnahmen beeinflusst werden:

- Auf den Gehäusen können sogenannte „Scheuerleisten“ angebracht werden. Die für eine große Strukturdämpfung optimale Vorspannkraft der Befestigungsschrauben muß durch Versuche ermittelt werden. Ein

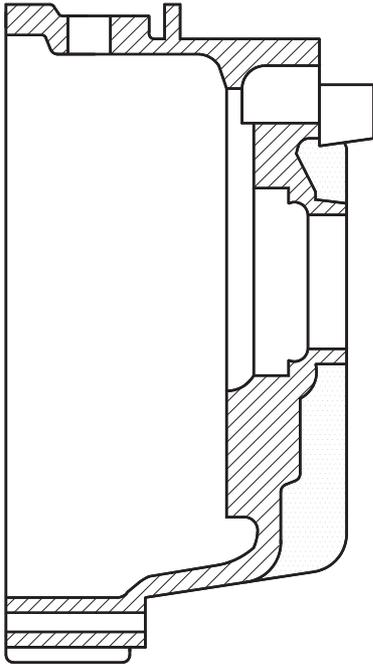


Abb. 12.4. Anordnung einer Vorschaltmasse in einem Getriebegehäuse

Nachteil der Scheuerleisten ist, daß sich die Vorspannung der Schrauben im Betrieb verringern kann, wodurch auch die Strukturdämpfung absinkt. Eine Abhilfe besteht darin, in festzulegenden Intervallen ein Nachspannen der Befestigungsschrauben mit vorgegebenem Drehmoment vorzuschreiben (zusätzlicher Wartungsaufwand für den Betreiber).

- Bei geteilten Gehäusen kann die Strukturdämpfung ebenfalls durch versuchsmaßig zu ermittelnde Vorspannung der Schrauben maximal gehalten werden.

12.6.3 Beeinflussung des Abstrahlgrades

Grundsätzlich gilt folgende Regel:

Regel 12.12

Um einen kleinen Abstrahlgrad zu erreichen, ist die Maschine möglichst kompakt zu konstruieren. Dadurch verhält sich die Maschine im wesentlichen wie ein Kugelstrahler. Durch kompakte Abmessungen steigt nach (5.9) die Kugelstrahler-Eckkreisfrequenz, und damit sinkt gemäß (5.8) der Abstrahlgrad im tieffrequenten Bereich.

Bei Strukturen, die entweder plattenförmig oder aus Platten zusammengesetzt sind, spielt die Koinzidenzfrequenz (vgl. Abschn. 5.5.2) eine wichtige Rolle bei der

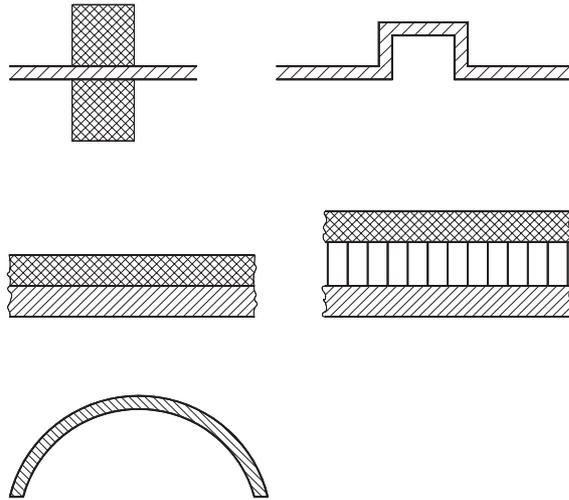


Abb. 12.5. Konstruktive Maßnahmen zur Erhöhung der Biegesteifigkeit

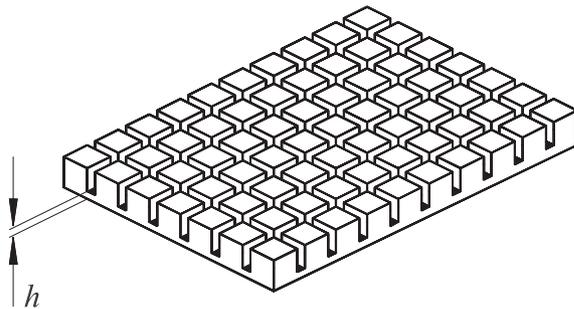


Abb. 12.6. Biege weiche Platte hoher Massenbelegung (nach Müller u.a.)

Beurteilung der zu erwartenden Schallabstrahlung. Die Koinzidenzfrequenz hängt bei Platten gemäß (5.16) von der Massenbelegung m' und der Biegesteifigkeit B ab. Eine große Massenbelegung bei geringer Biegesteifigkeit erhöht die Koinzidenzfrequenz. Z.B. wird eine Erhöhung der Koinzidenzfrequenz durch Belegen der abstrahlenden Oberfläche mit einer Schicht aus Blei erreicht. Eine konstruktive Möglichkeit zeigt Abb. 12.6. Für die Beeinflussung des Abstrahlgrades entscheidend ist die Lage der dominanten Frequenzen zur Koinzidenzfrequenz. Folgende Fälle sind zu unterscheiden:

- Die dominante Frequenz liegt deutlich unterhalb der Koinzidenzfrequenz ($\nu \ll \nu_c$) und der Kolbenstrahler-Eckfrequenz nach (5.17). Dann kann die Abstrahlung durch kompakte Bauweise verringert werden.
- Liegt die dominante Frequenz in der Größenordnung der Koinzidenzfrequenz ($\nu \approx \nu_c$), so soll versucht werden, die Koinzidenzfrequenz durch Vergrößern der Massenbelegung bei möglichst konstanter Biegesteifigkeit zu erhöhen.

- Liegt die dominante Frequenz deutlich oberhalb der Koinzidenzfrequenz ($\nu \gg \nu_c$), so ist es nicht möglich, die letztere so weit anzuheben, daß der Abstrahlgrad durch Ausbilden des akustischen Kurzschlusses vermindert wird. In diesem Fall bestehen keine Möglichkeiten, den Abstrahlgrad zu verringern.

Regel 12.13

Bei Strukturen mit plattenförmigen Wänden ist eine geringe Wandstärke vorteilhaft (vgl. hierzu Abschnitt 5.3 S. 104). Sie wirkt sich aber i.a. ungünstig auf das Körperschallmaß aus.

Zusammenfassung

Die für die Anwendungen wesentlichen Ergebnisse sind in Form knapp gefaßter Regeln in Abschn. 12.6 enthalten.



<http://www.springer.com/978-3-540-20094-9>

Praktische Maschinenakustik

Kollmann, F.G.; Schösser, Th.F.; Angert, R.

2006, X, 363 S. 166 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-540-20094-9