

Lärminderung setzt an der Quelle an - Schallquellenidentifikation mit Hilfe der Ordnungsanalyse

Backhaus, S.

Der effizienteste Weg der Lärminderung ist die, den Lärm gar nicht erst entstehen zu lassen oder zumindest schon die Entstehung des Schalls zu vermindern. Dazu müssen die stärksten Schallquellen jedoch erst identifiziert werden. Bei Maschinen mit drehzahlabhängigen Schallquellen ist die Ordnungsanalyse dafür das Mittel erster Wahl.

The most efficient way to reduce noise is to eliminate the sound source or at least to decrease the excitation forces. But before you can do that you have to identify the loudest acoustic mechanism. For machines with speed dependent sound sources the order tracking is an outstanding tool.

1 Einleitung

Wird von Lärminderung gesprochen, denkt der Betroffene in den meisten Fällen an Lärmschutzwände, Maschinenkapselungen und Gehörschutz. Diese Maßnahmen kennt jeder aus seinem täglichen Umfeld. Es handelt sich dabei um sogenannte sekundäre Maßnahmen, die dem Lärmgeplagten zwar schnelle Linderung versprechen, aber teuer sind, viel Platz brauchen, das Gewicht erhöhen - die Liste ließe sich beliebig fortsetzen.

Die Maschinenakustik ist daher bemüht das Übel an der Wurzel zu packen und Lärm schon in der Entstehungsphase zu vermindern oder ganz zu vermeiden.

2 Quellenidentifikation

2.1 Theoretische Schallflussanalyse

Um eine Schallquelle zu identifizieren gibt es verschiedene Möglichkeiten. Der erste Ansatz ist theoretisch. Die Maschine wird gedanklich in ihre Einzelkomponenten zerlegt und dann nach ihren maschinenakustischen Eigenschaften geordnet. Die Bewertung der Quellen-, Übertragungs- und Abstrahleigenschaften nach ihrer Relevanz erfolgt

dabei aus dem Erfahrungs- und Fachwissen des Akustikers, seiner subjektiven Einschätzung und aus Richtlinien und Normen, zum Beispiel /6/.

Das Ergebnis dieser Untersuchung sind Bewertungstabellen für die Schallquellen, -übertrager und -abstrahler. Sie münden in einen Schallflussplan, der graphisch veranschaulicht, an welchen Komponenten der Maschine mit der Lärminderung begonnen werden muss. Je größer der Einfluss einer Quelle ist, oder je stärker ein Körper überträgt bzw. abstrahlt, desto eher muss an dieser Stelle eingegriffen werden. Dazu werden die Bauteile je nach Größe ihres Einflusses mit verschiedenen starken Linien gekennzeichnet. Je dicker eine solche Linie ist, desto kritischer ist die Wirkung auf das Geräusch und desto eher muss hier Lärminderung betrieben werden. Eine nähere Beschreibung der Schallflußmodellierung findet man bei /5/.

Bild 1 zeigt den Schallflussplan einer Elektromotor - Getriebeeinheit.

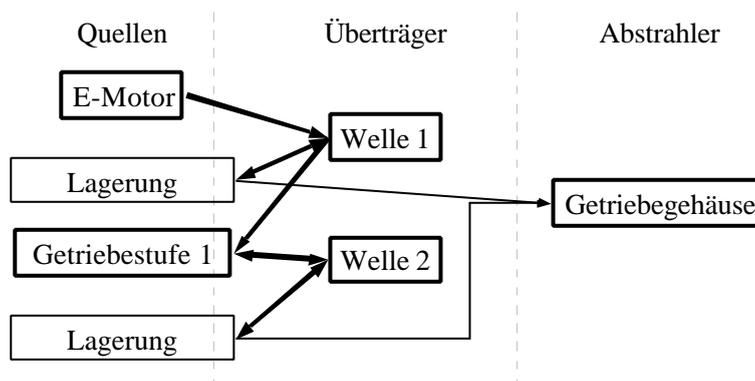


Bild 1: Schallflussplan einer Elektromotor - Getriebeeinheit

Diese Art der Analyse eignet sich sowohl für Entwürfe als auch für bestehende Maschinen. Sie zeigt, an welchen Stellen der Eingriff des Akustikers nötig und sinnvoll ist.

Treten im Schallflussplan mehrere hoch priorisierte Schallquellen auf, stellt das während der Entwurfsphase kein Problem dar, da hier noch genügend Möglichkeiten zur Planung von Lärminderungsmaßnahmen bestehen.

Bei bereits ausgeführten Konstruktionen oder Serienprodukten stellt sich die Problematik aber ganz anders dar. Es gilt herauszufinden, welche Quelle den stärksten Einfluss auf den "gehörten" Schall hat. Das heisst, die Analyse des als Luftschall abgestrahlten Körperschalls und dessen Zuordnung zu den Quellen.

zu untersuchenden Struktur zeitgleich mit einem Drehzahlsignal aufgezeichnet. Von jedem Schwingungssignal werden dann Fast Fourier Transformationen (FFT) abgeleitet. Dabei wird die Amplitude in dB über der Frequenz in Hz aufgetragen. Ursprünglich wurden Quellenidentifikationen ausschließlich anhand so gewonnener Spektren durchgeführt. Der Nachteil dabei ist jedoch, dass

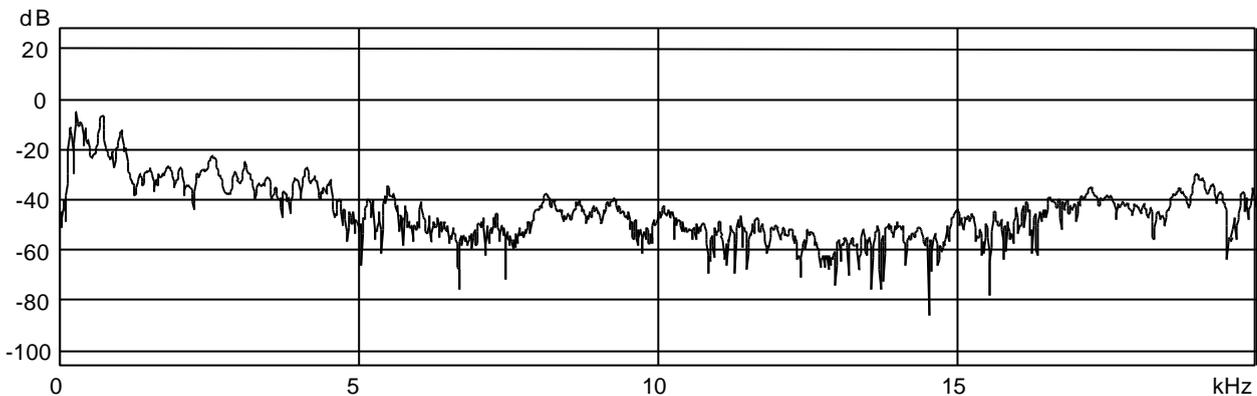


Bild 2: Fast Fourier Transformation eines Zeitsignals

2.2 Ordnungsanalyse

Ein hervorragendes Analysewerkzeug dafür ist das sogenannte Order Tracking, auch Ordnungsanalyse genannt. Hiermit können mit relativ einfachen Hilfsmitteln direkte Rückschlüsse auf drehzahlabhängige Schallquellen bei Maschinen mit rotierenden Bauteilen geschlossen werden.

Um eine Ordnungsanalyse durchzuführen werden zunächst Schwingungs- oder Luftschallsignale der

die so gewonnenen Ergebnisse nur für eine bestimmte Drehzahl gültig sind. Somit lässt sich nur schwer feststellen, ob es sich bei den besonders hervortretenden Frequenzen um Strukturresonanzen der Maschine oder um drehzahlabhängige Frequenzen der Schallquellen handelt. **Bild 2** zeigt eine solche FFT.

Wird jeweils für eine bestimmte Drehzahl oder für ein Drehzahlband eine FFT gewonnen und diese

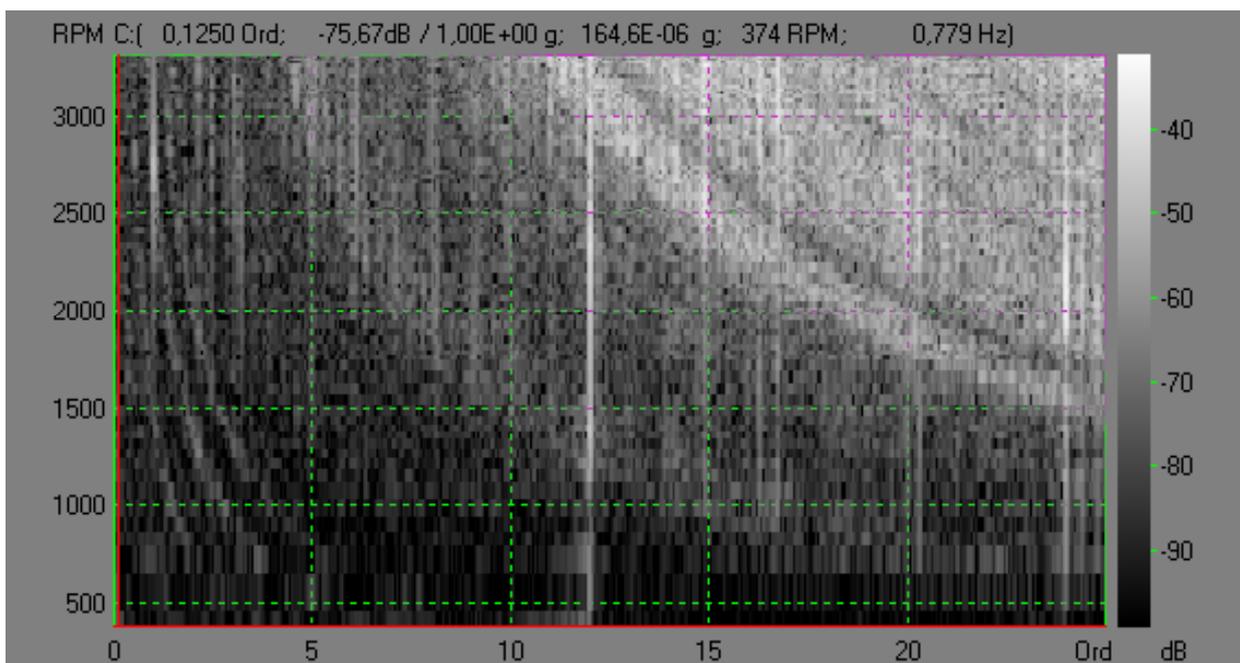


Bild 3: Ordnungsanalyse einer Elektromotor - Getriebeeinheit

übereinandergeschichtet, erhält man ein Farbspektrum bei dem die Amplitude durch die Farbe kodiert ist. Für eine Ordnungsanalyse wird dieses Farbspektrum dann auf die zugehörige Drehzahl, in der Regel die Hauptdrehzahl (die erste Ordnung), durch Division der Frequenzachse normiert. Die Hauptdrehzahl liegt zum Beispiel bei Getrieben am Eingang, bei Motoren an der Kurbelwelle etc. an. Anhand dieses Ordnungsspektrums kann untersucht werden, bei welcher Harmonischen der Bezugsdrehzahl Anregungen auftreten und ob festfrequente Geräuschanteile (z.B. Eigenfrequenzen) vorhanden sind.

Bild 3 zeigt die Ordnungsanalyse einer Elektromotor - Getriebeeinheit. Auf der Abszisse sind die Ordnungen, auf der Ordinate die Drehzahl dargestellt. Die Farbe (hier Graustufen) gibt die Amplitude der Signale an.

Die in der Senkrechten auftretenden Linien sind die sogenannten Ordnungen. Es handelt sich dabei um Signale deren Frequenz sich direkt proportional mit der Drehzahl ändert. In **Bild 3** sind die 1., 12. und 24. Ordnung besonders stark ausgeprägt.

Die von links oben nach rechts unten verlaufenden Hyperbeln sind dagegen Linien gleicher Frequenz und stellen drehzahlunabhängige Geräuschanteile, zum Beispiel Eigenfrequenzen der Struktur, dar.

Eigenfrequenzen sind vom Aufbau der Maschine abhängig und können durch Modalanalysen einzelnen Bauteilen oder Gehäuseflächen zugeordnet werden.

Die Ordnungen lassen sich den drehenden Bauteilen zuordnen, da jedes drehende Bauteil charakteristische Schwingungen induziert. Eine Welle erzeugt Unwuchtschwingungen, die direkt proportional zur Motordrehzahl sind. Getrieberäder erzeugen unter anderem Schwingungen, die von der Ritzelzähnezahl und der jeweiligen Drehzahl abhängen. Bei Wälz- und Gleitlagern kann eine ähnliche Zuordnung vorgenommen werden. **Tabelle 1** zeigt dazu einen Auszug der Tabelle "Diagnose zur Fehlererkennung aus dem Schwingungsspektrum" aus /1/ mit den für das genannte Beispiel wichtigsten Schallquellen.

Die in **Bild 3** dargestellte Ordnungsanalyse zeigt besondere Auffälligkeiten bei der 1., 12. Und 24.

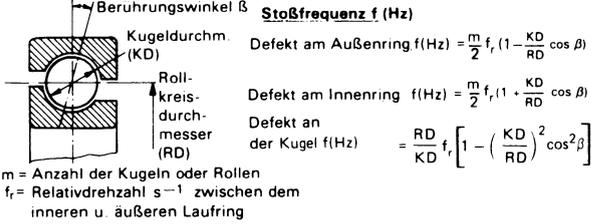
Schadensursache	Dominante Frequenz	Richtung	Bemerkung
Unwucht an rotierenden Teilen	1 x n	Radial	Gewöhnlich die Ursache bei stärkeren Schwingungen an der Maschine
Fluchtfehler & verbogene Welle	Gewöhnlich n Oftmals 2 n Manchmal 3 & 4 x n	Radial & Axial	Eine übliche Fehlerquelle
Beschädigte Wälzlager	Stoßimpulse für die individuellen Lagerkomponenten* Auch Schwingungen bei sehr hohen Frequenzen (20 bis 60kHz)	Radial & Axial	Ungleiche Schwingungspegel, oftmals mit Stößen. *Stoßimpulse:  $\text{Defekt am Außenring } f(\text{Hz}) = \frac{m}{2} f_r \left(1 - \frac{KD}{RD} \cos \beta\right)$ $\text{Defekt am Innenring } f(\text{Hz}) = \frac{m}{2} f_r \left(1 + \frac{KD}{RD} \cos \beta\right)$ $\text{Defekt an der Kugel } f(\text{Hz}) = \frac{RD}{KD} f_r \left[1 - \left(\frac{KD}{RD}\right)^2 \cos^2 \beta\right]$ <small>m = Anzahl der Kugeln oder Rollen f_r = Relativedrehzahl s⁻¹ zwischen dem inneren u. äußeren Lauftring</small>
Beschädigte oder verschlissene Zahnräder	Zahneingriffsfrequenzen (Wellendrehzahl x Zähnezahl) und deren Harmonische	Radial & Axial	Seitenbänder um die Zahneingriffsfrequenzen deuten auf Modulation (z.B. infolge Exzentrizität) mit Frequenzen hin, die den Abständen der Seitenbänder entsprechen. Normalerweise mit sehr schmalbandigen Analysen auffindbar.
Mechanisches Spiel	2 x n		Auch Sub- und Interharmonische

Tabelle 1: Auszug der Tabelle "Diagnose zur Fehlererkennung aus dem Schwingungsspektrum" aus /1/

Motorordnung. Die erste Ordnung lässt auf eine Unwucht des Motorläufers schließen. Die 12. Ordnung ist charakteristisch für die Drehmoment-schwankungen des hier eingesetzten Gleichstrom - Elektromotors. Sie ergibt sich aus den hier eingesetzten Läufer mit sechs Polpaaren und der Kommutierung wodurch es zu einem mit dem zweifachen der Polpaarzahl pulsierendem Drehmoment kommt. Die 24. Ordnung ist die 2. Harmonische der bei der 12. Ordnung auftretenden Schwingung.

Somit lassen sich aus der obigen Analyse die Unwucht des Läufers und dessen Drehmoment-schwankungen als Hauptschallquellen identifizieren.

3 Zusammenfassung

Bevor mit Lärminderungen direkt an den Schallquelle begonnen werden kann, müssen diese zunächst identifiziert werden. Dabei reicht es allerdings nicht aus nur alle Schallquellen aufzuzählen, sie müssen auch bezüglich ihrer Stärke klassifiziert werden. Eine Möglichkeit dafür ist die theoretische Schallflussanalyse bei der mit Hilfe von Erfahrungswissen und Abschätzhilfen jede Einzelkomponente einer Maschine untersucht wird. Werden allerdings zwei Quellen gleich bewertet, gilt es herauszufinden welche denn tatsächlich die stärkere von beiden ist. Bei Maschinen mit drehzahlabhängigen Schallquellen bietet sich dafür die Ordnungsanalyse als hervorragendes Werkzeug an.

4 Literatur

- /1/ Kolerus, J.: Zustandsüberwachung von Maschinen, 3., erweiterte Auflage, Renningens-Malmsheim, expert - Verlag, 2000
- /2/ Fasold, W.; Kraak, W.; Schirmer, W.: Taschenbuch Akustik Teil 1, 1. Auflage, Berlin, VEB Verlag Technik, 1984
- /3/ Oros: OR25 Operating manual Version 4.0, Meylan (Frankreich), Oros France, 2000
- /4/ Beck, H.-P.; Wolf, A.: Manuskript zur Vorlesung: Elektrische Energietechnik: eine Einführung in die Energiewandlung, Clausthal-Zellerfeld, Institut für Elektrische Energietechnik, 1998
- /5/ Gummersbach, Frank: Lärmarm konstruieren XIX; Schalltechnische Informationen unter konstruktiven Gesichtspunkten, - Ein Beitrag zum systematischen Zugriff auf konstruktive Lärminderungsmaßnahmen-; Dissertation TU Clausthal; April 2000 (Erscheint in der

Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin)

- /6/ DIN EN ISO 11688-1; Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer Maschinen und Geräte - Teil 1: Planung, 1998; (ISO/TR 11688-1; 1995); Deutsche Fassung EN ISO 11688-1; 1998; Teil 2: (Norm-Entwurf) DIN 45685-2, Ausgabe:1998-11 Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmer Maschinen und Geräte - : Einführung in die Physik der Lärminderung durch konstruktive Maßnahmen (ISO/TR 11688-2:1998) Organisation. Genf, Dez. 1996.