

## Ansätze zur Schallminderung am Beispiel einer elektrisch angetriebenen Transporteinheit

Gummersbach, F.; Käferstein, B.

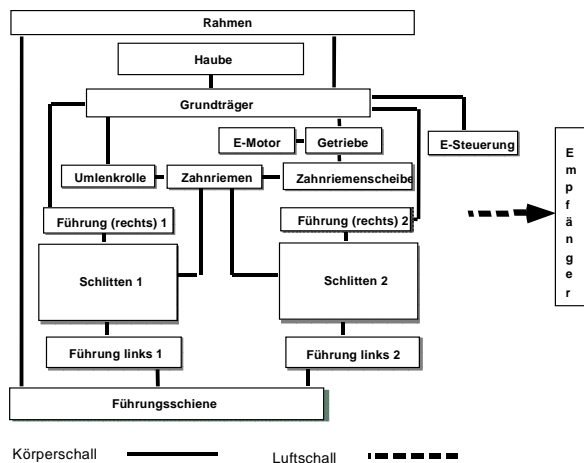
*Am Institut für Maschinenwesen wurden Untersuchungen zur Lärminderung an einer linearen elektrisch angetriebenen Transporteinheit durchgeführt. Dazu wurde nach ISO 11688-1 vorgegangen und mithilfe von Luft- bzw. Körperschallmessungen die stärksten Schallquellen identifiziert. Entsprechende Maßnahmen wurden erarbeitet und konnten erfolgreich durchgeführt werden.*

*At the IMW research on an electrical driven linear motion unit were carried out to reduce noise emission. The well known technical rules in ISO 11688-1 were applied as working to identify the main noise sources by air and structure borne noise measurements. Appropriate methods to decrease sound emission were suggested and successfully applied.*

### 1 Einleitung und Problemstellung

Neben wirtschaftlichen und mechanischen Produktanforderungen gewinnen auch maschinenakustische Ansprüche aufgrund verschärfter gesetzlicher Bestimmungen des Arbeits- und Immissions-schutzes sowie steigender Marktanforderungen an Bedeutung.

Zur Erweiterung der Produktpalette elektrisch angetriebener Transporteinheiten wurde eine kleine und leichtere Variante entwickelt. Nach Fertigung des Prototypen stellte sich heraus, daß diese im Betrieb einen um 5 dB(A) höheren Schalldruckpegel aufwies als die größte Variante.



**Bild 1:** Schallflußmodell der Transporteinheit

Daher wurde eine schalltechnische Untersuchung durchgeführt, die eine Geräuschminimierung am Antrieb der Transporteinheit zum Ziel hatte.

Vereinbart wurde folgende Vorgehensweise:

- Theoretische Untersuchungen der Schallerzeugung, -weiterleitung und -abstrahlung aufbauend auf der „Schallentstehungskette“
- Akustische Analyse des Ist-Zustandes an der Transporteinheit auf Basis von Körper- und Luftschallmessungen und Erarbeitung von primären und sekundären Schallminderungsmaßnahmen.

### 2 Analyse der Transporteinheit

In einer schalltechnischen Analyse wurde die Transporteinheit einer qualitativen und quantitativen Betrachtung unterzogen. Die qualitative Analyse erfolgte, entsprechend ISO 11688-1 /1/, anhand eines Schallflußmodells, welches komponentenorientiert aufgebaut ist und die Sichtweise des Konstrukteurs repräsentiert. Es entspricht somit einer abstrahierten Darstellung seines Konstruktionsobjektes und enthält keine quantitativen maschinenakustischen Angaben, sondern bildet die gesamte Schallentstehungskette (Quelle, Übertragungswege und Abstrahlung) ab. Eine quantitative Beurteilung des akustischen Verhaltens der Transporteinheit erfolgt anhand der durchzuführenden Körper- und Luftschallmessungen.

#### 2.1 Schallflußmodell

Die Erstellung eines Schallflußmodells erfolgt durch die Auswahl der vorhandenen Komponenten, z.B. mittels einer Stückliste, und der möglichen Schallübertragungswege, die sich im vorliegenden Fall in Körperschall und Luftschall untergliedern. Den „Empfänger“ repräsentiert letztendlich der Mensch, auf den der Luftschall einwirkt, siehe **Bild 1**.

#### 2.2 Qualitative schalltechnische Beurteilung der Schallentstehungskette

Zur weiteren Detaillierung und Beurteilung der im Schallflußmodell enthaltenen Schallquellen, Schallleitungswege und der Abstrahlungsmöglichkeiten erfolgte eine komponentenorientierte Auflistung mit den zugehörigen Schallentstehungsmechanismen.

Schallentstehungsmechanismus	Komponente / Bauteil	Bewertung	Kommentar
Zahneingriff (K)	1. Übersetzungsstufe (Getriebe)	A	Zahneingriff (bei Zahnradern) stellt in der Regel immer einen starken Körperschallerreger dar. Geräuschverhalten hängt stark von Zahnform, -breite, Riemengeschwindigkeit und der zu übertragenden Leistung ab.
	2. Übersetzungsstufe (Getriebe)	A	
	Zahnriemen-Zahnriemenscheibe (Getriebe)	A/B	
	Zahnriemen-Zahnriemenscheibe (Umlenkung)	A/B	
Stoß (Spiel) (K)	Reversiervorgang (Getriebe)	A	Stellt in der Regel starke Körperschallerreger dar, gerade dann wenn dabei hohe Kräfte entstehen.
Rollgeräusche (K)	Rollenführung (oben)	A	Stark abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit und der Materialsteifigkeit.
	Lagerung 1 (Getriebe)	B	
	Lagerung 2 (Getriebe)	B	
	Lagerung (Umlenkung)	B	
Lagerung (oben)	B		
...	...	...	...

(L: Luftschall, K: Körperschall) / A : sehr relevant; B: weniger relevant; C: vernachlässigbar

**Tabelle 1** Auflistung (ausschnittsweise) der Schallentstehungsmechanismen

Dies soll im weiteren nicht näher dargelegt werden, da nur primäre Lärminderungsmaßnahmen im Vordergrund stehen sollen. Diesbezüglich sei nur abschließend das Ergebnis in Form eines Schallflußmodells gezeigt, **Bild 2** Die hervorgehobenen Komponenten und Schalleitungspfade geben die relevantesten Ansatzmöglichkeiten zur Ermittlung von Lärminderungsmaßnahmen an.

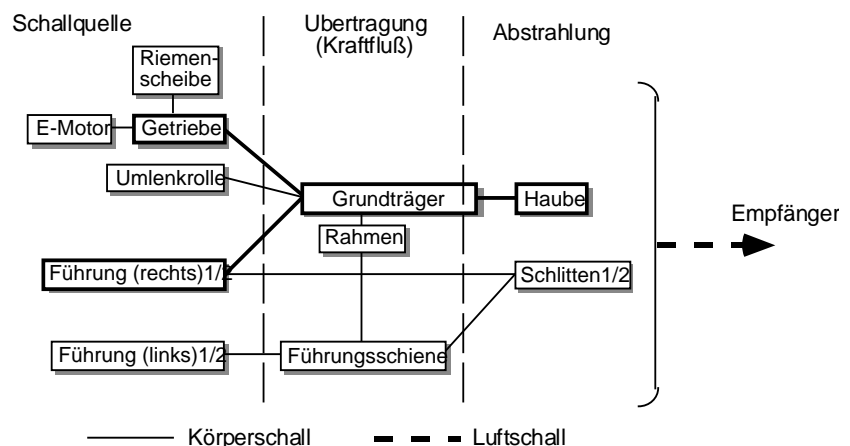
**Tabelle 1** gibt eine subjektive Einschätzung des Beitrags zum Gesamtgeräusch wieder.

Die Auflistung zeigt, daß bis auf zwei Luftschallquellen nur Körperschallquellen im System vorhanden sind. Als Luftschallquellen können der Zahnriemen wegen der pulsierenden Luftverdrängungsprozesse während des Zahneingriffs, sowie Turbulenzen aufgrund von Relativbewegungen zwischen Luft und Festkörpern gesehen werden, die aber aufgrund der relativ geringen Geschwindigkeiten zu vernachlässigen sind.

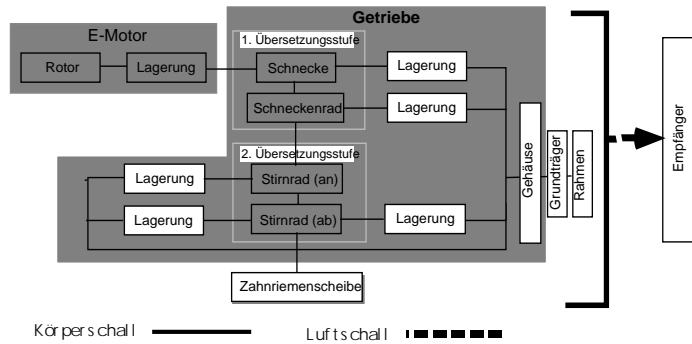
Als wesentliche Schallquellen können unter Berücksichtigung der Bewertung, die Übersetzungsstufen des Getriebes, der beim Reversiervorgang auftretende Stoß, die Rollgeräusche der Lastenführung sowie prinzipiell die Verfahrwegbegrenzungen des Schlittens genannt werden. Des weiteren muß beim Zahnriemen der Zahneingriffsstoß in Betracht gezogen werden. Die Steuereinheit kann mittel- und unmittelbarer Schallerzeuger sein. So können einige Bauteile der Steuerung aufgrund von Schaltprozessen Geräusche abgeben (z.B. Relais) und sie ist auch für die auftretenden Massenkkräfte beim Reversiervorgang der Schlitten verantwortlich, welche die Drehmomente des Motor vorgeben. Entsprechend der Auflistung und Beurteilung der Schallquellen erfolgte analog die Betrachtung der Schalleitungswege und der luftschallabstrahlenden Komponenten.

### 3 Nähere Betrachtung der Antriebseinheit

Nach einer quantitativen schalltechnischen Analyse der Transporteinheit konnte eindeutig die Hauptschallquelle ermittelt werden. Aus den aufgelisteten aktiven Komponenten mit deren Schallentstehungsmechanismen stellte sich die zugekaufte Antriebseinheit (Getriebemotor) als der hauptsächliche Geräuschverursacher heraus. In einem Versuch wurde die Antriebseinheit vom großflächigen Grundträger komplett entkoppelt, so daß die Körperschallübertragung unterbunden wurde. Der Erfolg der Maßnahme zeigte sich durch eine Schalldruckpegelminderung von  $L_{pA} = 17 \text{ dB(A)}$ . So konnte klar gezeigt werden, daß für eine effiziente Geräuschminderung als sekundäre Maßnahme die Schwingungsisolierung und für den primären Bereich weitere schalltechnische Betrachtungen der involvierten Schallentstehungsmechanismen der Antriebseinheit notwendig wurden.



**Bild 2:** Schallflußmodell entsprechend der Schallentstehungskette



**Bild 3:** Schallflußmodell der Antriebseinheit (E-Motor und Getriebe im Detail)

**3.1 Schallflußmodell der Antriebseinheit**

In **Bild 3** wurde die Antriebseinheit näher betrachtet und in Form eines Schallflußmodells dargestellt, das die Schallübertragungswege als Körper- und Luftschall enthält.

Das detaillierte Schallflußmodell des Antriebs stellt schalltechnisch gesehen auch den Versuchsaufbau dar. Zur Analyse der Schallquelle (Getriebe) reichte ein vereinfachter Versuchsaufbau aus, der aus schalltechnischer Sicht die wesentlichen Komponenten (Motor mit Getriebe, Grundträger bzw. Kämpfer und Haube) beinhaltet.

Eine nähere Betrachtung des Schallflußmodells läßt als grundsätzliche Geräuschquellen die Zahneingriffsverhältnisse sowie die Rollgeräusche der Lagerungen erkennen, wobei die 2. Übersetzungsstufe des Getriebes (Stirnradverzahnung) als hauptsächli-

cher Geräuschverursacher angesehen werden kann.

**4 Lärminderungsmöglichkeiten**

Basierend auf den vorherigen Betrachtungen erfolgte eine nähere Berücksichtigung der Maßnahmen zur Beeinflussung des Zahneingriffs.

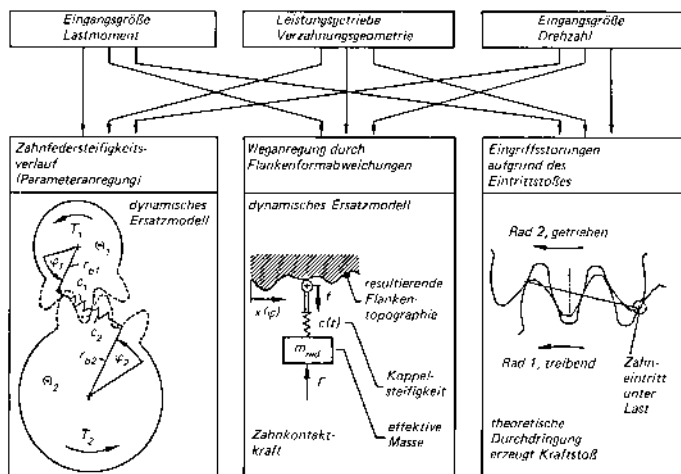
**Bild 4** verdeutlicht die Anregungsmechanismen beim Zahneingriff und unterteilt diese in 3 Kategorien.

So können der Zahnfedersteifigkeitsverlauf, die Weganregung durch Flankenformabweichungen und Störungen aufgrund des Eingriffsstoßes als die wesentlichen Anregungsmechanismen angesehen werden

	Beeinflussung der Quelle	Kurzbeschreibung der Maßnahme	Bewertung
1	Erhöhung der Eingriffsdauer	Erhöhung der Gesamtüberdeckung durch Hoch- und/oder Schrägverzahnung	A
2	Verwendung von Schrägverzahnung	Einsatz einer Schrägverzahnung mit möglichst ganzzahliger Sprungüberdeckung	A
3	Erhöhung der Zähnezahl	z.B. durch Verkleinerung des Moduls	B
4	Verbesserung der Qualität	Zahnform, Zahnteilung etc. mit sehr geringen Fehlern anfertigen, da diese auch bei schwachen Belastungen zu hohen Geräuschanteilen führen können	A
5	Verwendung von Kunststoffzahnradern bei geringen Belastungen	Ersatz des Stahlzahnrades durch ein Kunststoffzahnrad	A/B
6	Kopf- und Fußrücknahme	Flankenkorrektur	B
7	Verringerung der spezifischen Zahnkraft	Verwendung von breiteren Zähnen (nur bei geringen Teilungsfehlern sinnvoll)	B
8	Verwendung weicherer Zähne zur deutlichen Verringerung des Eingriffstoßes	Höhere Zähne und Verwendung von Kunststoffzahnradern	A/B

A : sehr relevant; B: weniger relevant; C: vernachlässigbar

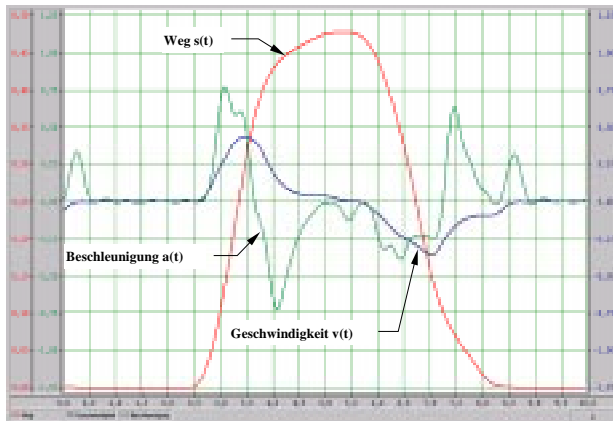
**Tabelle 2:** Maßnahmen zur Beeinflussung des Zahneingriffs



**Bild 4** Wesentliche Anregungsmechanismen beim Zahneingriff /2/

Für die Beeinflussung der Körperschallquelle (Zahneingriff) ergeben sich nach ISO/TR 11688-1 /1/ die in **Tabelle 2** aufgeführten Maßnahmen. Unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Randbedingungen, können die möglichen Maßnahmen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten einer Bewertung unterzogen werden, um somit die günstigste Lösung auszuwählen. Hierzu ist eine quantitative Analyse der Zahneingriffsverhältnisse notwendig um den genauen Grund der Geräuschregung zu ermitteln.

Dazu wird in den folgenden Kapiteln auf die schallmeßtechnische Analyse eingegangen.

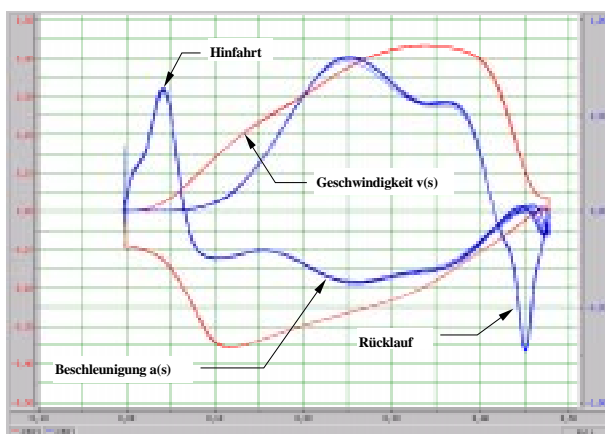


**Bild 6:** Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung des Schlittens in Abhängigkeit von der Zeit während eines Transportzyklus

## 5 Mögliche Messungen zur Identifikation von Körperschallquellen

### 5.1 Fahrbewegung und Beschleunigungskurven

Es ist allgemein bekannt, daß eine unstetige Beschleunigungskurve aufgrund der wirkenden Kraftsprünge zu Geräuschanregungen führt. Deshalb ist man bestrebt, eine Bewegung stoß- und ruckfrei auszuführen um die zeitliche Änderung der Kräfte stetig zu gestalten. Zur Beurteilung der Dynamik der Transporteinheit, wurden Wegmessungen über den Fahrzyklus vorgenommen und diese nach der Zeit differenziert, **Bild 6**. Man erkennt deutlich die Spitzen in der Beschleunigungskurve,



**Bild 7:** Geschwindigkeit und Beschleunigung über den Weg aufgetragen

die man glätten muß, indem man das Motorverhalten oder die Kinematik ändert. Im vorliegenden Fall ist der Motor schon aus anderen Gründen geregelt, so daß man die notwendigen Einstellungen ohne Zusatzaufwand vornehmen kann.

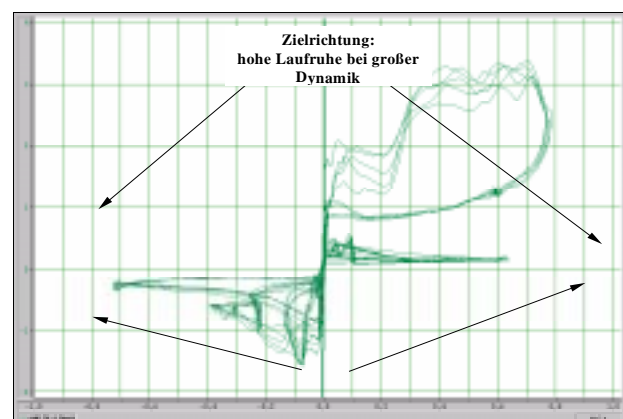
Da eine Interpretation der Beschleunigungskurve meist einfacher ist, wenn man nicht zeitliche Verläufe betrachtet, sondern sich auf die jeweilige Po-

sition bezieht, wurde die Geschwindigkeit und die Beschleunigung auch über den Weg aufgetragen, **Bild 7**. Dort sind lokale Ereignisse wie z.B. das Fahren an einen Anschlag oder Erhöhung der Transportkraft leichter zu erkennen und mit den Meßdaten in Beziehung zu setzen.

### 5.2 Luftschallpegel in Abhängigkeit von kinematischen Kenngrößen

Zur weiteren Analyse wurde der Luftschallpegel aufgenommen und über Bewegungskenngrößen aufgetragen:

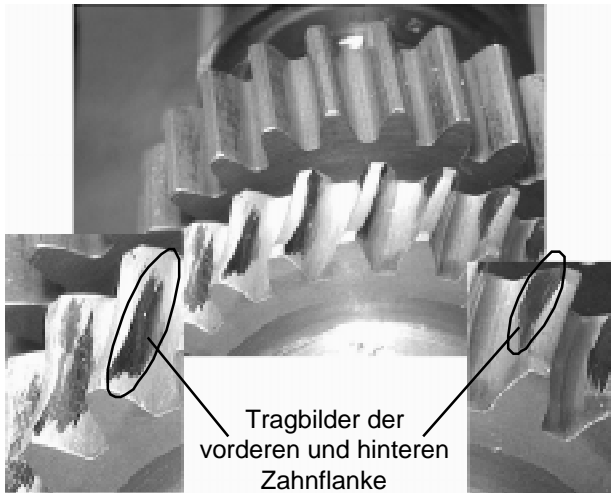
- Aus der Darstellung über den Weg können positionsabhängige Schallereignisse erkannt werden wie z.B. Stick-Slip-Effekte, Rattern, Anfahren an einen Anschlag, Einrasten von Sperrklinken etc.
- Die Abhängigkeit des Pegels von der Geschwindigkeit läßt Aussagen über Geräusche zu, die mit steigender Drehzahl lauter werden, z.B. Lüftergeräusche, unwuchterregte Geräusche oder Strömungsgeräusche.
- Durch ein Luftschallpegel-Beschleunigungsdiagramm, **Bild 5**, lassen sich bei Maschinen mit dynamischen Massen, wie bei der untersuchten Lineartransporteinheit, trägheitskraftabhängige Geräusche auffinden, z.B. leistungsabhängige Schallereignisse beim Hochfahren und Abbremsen, Kupplungsgeräusche, Spiel oder Anfahrgeräusche in Elektromotoren. Dabei ist es immer das Ziel, bei möglichst hoher Dynamik eine geringe Geräusentwicklung hervorzurufen, so daß beim Vergleich unterschiedlicher Varianten die Kurven für die bessere Lösung breiter und flacher werden müssen.



**Bild 5:** Schallpegel über die Beschleunigung aufgetragen.

### 5.3 Tragbildanalyse des Antriebsgetriebes

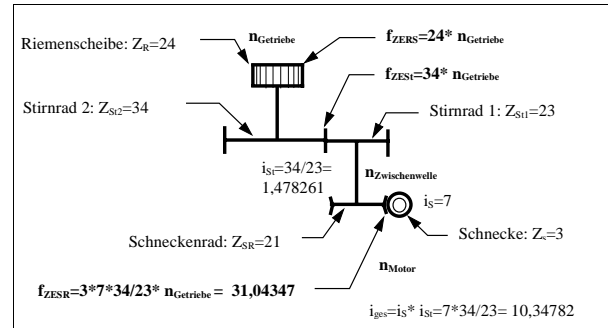
Wie schon in Kapitel 3 erläutert, hat sich schnell die Antriebseinheit als relativ starke Schallquelle herauskristallisiert. Neben der Analyse der idealen Verzahnungsdaten hinsichtlich Sprungüberdeckung, Gesamtüberdeckung und Fertigungsqualität kann anhand einer Tragbildanalyse zumindest qualitativ auf die Schallentstehungsmechanismen durch den Zahneingriff geschlossen werden, **Bild 8**. Abweichungen im Tragbild können durch folgende Störgrößen auftreten und Körperschallquellen bilden /2/:



**Bild 8:** Tragbilder der Schnecken- und Stirnradstufe der Antriebseinheit

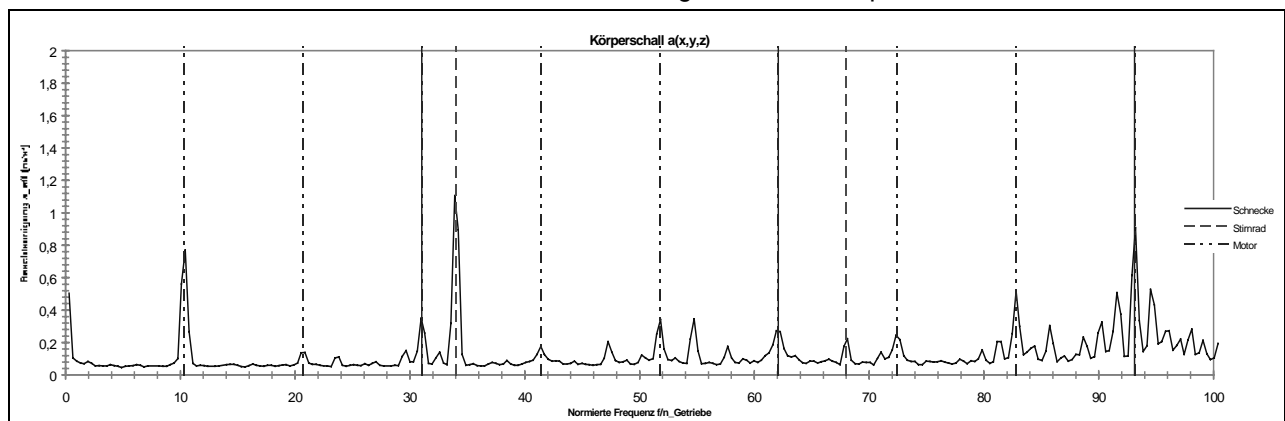
- lastbedingte Deformationen der im Eingriff befindlichen Zahnpaare
- lastbedingte Deformationen und Verlagerungen der im Kraftfluß liegenden Wellen-, Lager- und Gehäuseteile
- fertigungsbedingte Verzahnungsabweichungen,
- fertigungs- und montagebedingte Einbau- und Einstellabweichungen
- betriebsbedingte thermische Deformationen und Verlagerungen.

### 5.4 Körperschallmessungen am Getriebe

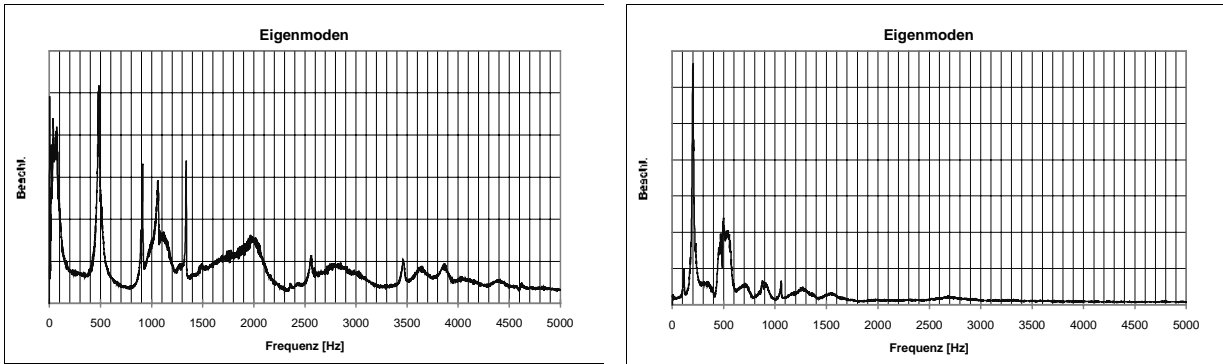


**Bild 10:** Vielfache der Eingriffsfrequenzen für ein zweistufiges Getriebe mit Zahnriemenantrieb und Elektroantrieb

Zur Beurteilung der Getriebegeräusche werden Körperschallmessungen mit Beschleunigungsaufnehmern durchgeführt und in einer Selektivanalyse mit Hilfe einer Fouriertransformation das Frequenzspektrum untersucht. Da verschiedene Betriebspunkte angefahren werden, wird die Drehzahl mit aufgenommen, und die Frequenzachse durch sie geteilt und so normiert, **Bild 9**. Sollten drehzahlabhängige Geräusche im Signal vorhanden sein, so sind diese auf der normierten Frequenzachse ortsfest. Überrollgeräusche in Lagern oder aus dem Zahneingriff treten fast immer als Harmonische des Produktes aus Drehzahl und Überrollfrequenz bzw. Zahneingriffsfrequenz auf. Zu einer einfachen Beurteilung eines formschlüssigen Getriebes kann man dann die Summenpegel der einzelnen Harmonischen für eine Körperschallquelle bei verschiedenen Betriebsdrehzahlen bilden und vergleichende Betrachtungen anstellen, wenn die Verzahnungs- und Lagerdaten bekannt sind, **Bild 10**. Die akustischen Eigenschaften, für die im wesentlichen auch für das Eigenschwingungsverhalten der Struktur verantwortlich ist, müssen immer unter Beachtung der Randbedingungen interpretiert werden. Diese sind durch die Impedanz festgelegt, also den Teilgrößen Steifigkeit und Masse des angrenzenden Körpers. Durch sie wird bestimmt, wie



**Bild 9:** Drehzahlnormiertes FFT-Spektrum mit Linien der Harmonischen für unterschiedliche Schallquellen



**Bild 11:** Eigenschwingungsformen der Antriebseinheit frei hängend (links) und an einem großen Betonklotz befestigt (rechts) bei Impulsanregung

die Glieder im Schallflußmodell bei Kraft- oder Geschwindigkeitserregung reagieren und welche Frequenzen besonders gut angeregt werden. Die Beeinflussung der Randbedingungen kann meist durch Änderung an der Einspannung vorgenommen werden, **Bild 11**. Impedanzsprünge durch Querschnittsänderungen oder Steifigkeitsänderungen bieten die Möglichkeit die Eigenfrequenzen eines Systems soweit zu verlagern, daß sie nicht mehr mit den Anregungsfrequenzen zusammentreffen und eine ungünstige Verstärkung auftritt, **Bild 13**.

Dabei ist zu beachten, daß im Gegensatz zu Maßnahmen zur Dämpfungserhöhung Impedanzänderungen als sogenannte Dämmmaßnahmen immer nur frequenzselektiv nutzbar sind, da die Schallenergie zwar reflektiert, aber nicht dissipiert wird. Ein entsprechender Abgleich ist daher immer für jedes System individuell auszuarbeiten, **Bild 12**.

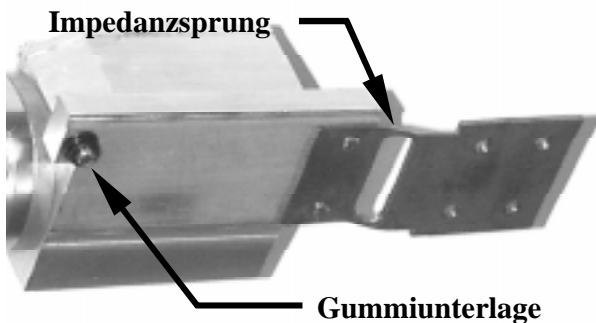
**6 Zusammenfassung**

Die Vorgehensweise nach ISO 11688-1 erweist sich für den Praxiseinsatz als hervorragendes Mittel, Lärminderungsaufgaben strukturiert und geordnet durchzuführen. Sie bietet nicht nur die Mög-

lichkeit anhand des Schallflußplans die Übertragungswege zu verbildlichen, sondern vereinfacht auch die Vorgehensweise zur Aufstellung eines übersichtlichen Meßplans. Die Suche nach der Hauptschallquelle gestaltet sich messtechnisch nicht immer einfach, und der Erfolg von durchgeführten Maßnahmen zur Schallminderung hängt von Randbedingungen ab, die meist nur schwer zu erfassen sind. Letztendlich entscheidet nicht die absolute erreichte Pegelminderung über eine Realisierung der Maßnahmen, sondern das Verhältnis aus Aufwand und Erfolg.

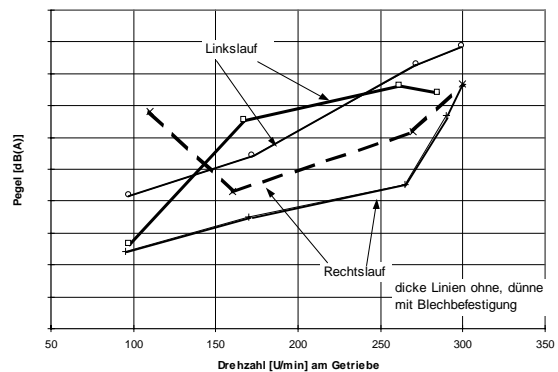
**7 Literaturverzeichnis**

- /1/ ISO/TR 11688: Acoustics - Recommended practice for the design of low-noise machinery and equipment. Part 1: Planning, International Standardisation Organisation. Genf, März 1995.
- /2/ VDI-Richtlinie VDI 3720-9 Lärmarm Konstruieren -Zahnradgeräusche-; Blatt 9.1 VDI-Verlag Düsseldorf 1990



**Bild 13:** S-förmig gebogenes Blech mit Nut als Impedanzsprung

Luftschallpegel in Abhängigkeit vom Betriebszustand mit Zusatzblech



**Bild 12:** Pegeländerung durch Eingangsimpedanzänderung