

Wahrnehmung von Getriebegeräuschen – Übertragung psychoakustischer Analysen auf Körperschallsignale

Karsten Moritz¹, Steffen Ochs¹, Josef Schlittenlacher², Joachim Bös¹, Tobias Melz¹

¹ TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt

E-Mail: moritz@szm.tu-darmstadt.de

² TU Darmstadt, Institut für Psychologie, 64289 Darmstadt, Germany

Einleitung

Die steigende Wichtigkeit der Psychoakustik (PA) bei der Beurteilung von Maschinen zeigt sich immer mehr auch bei Industrieanwendungen. Im Rahmen eines von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) geförderten Projektes wurde daher am Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM der Technischen Universität Darmstadt ein Getriebeakustikprüfstand (GAP) in Betrieb genommen, mit dem Geräuschbeispiele für Hörversuche sowie die rechnergestützte Auswertung psychoakustischer Metriken aufgezeichnet werden können. Dieser wurde hinsichtlich Wiederholbarkeit der Versuche und Minimierung von Störgeräuschen optimiert [1]. Dabei zeigte sich, dass im Betriebskennfeld des Getriebes verschiedenen Störgrößen unterschiedliche Einflüsse auf das abgestrahlte Getriebe-geräusch ausüben [2]. Daher wird der Ansatz verfolgt, für die psychoakustische Auswertung im Getriebebereich weniger störanfällige Körperschallsignale zu verwenden. Dabei wird das Augenmerk, ausgehend von bereits durchgeführten Vorversuchen zur Beurteilung von Getriebe-geräuschen [3], zunächst auf die Größen Lautheit, Schärfe und Rauigkeit gelegt. Die Berechnung der psychoakustischen Kenngrößen erfolgt mit der Software ArtemiS.

Aufbau und Störgrößeneinfluss im Luftschall

Für die Untersuchung von Getriebe-geräuschen im schallreflexionsarmen Labor des Fachgebietes SzM wird ein einstufiges, schrägverzahntes Stirnradgetriebe der Firma SEW-EURODRIVE in der Leistungsklasse bis 40 kW verwendet. Der Aufbau beinhaltet mehrere prinzipbedingte Störgrößen, die im Folgenden kurz beschrieben werden:

1. Die Lüfter der außerhalb des Labors montierten E-Maschinen emittieren ein breitbandiges Rauschen. Als Maßnahme wurde für die Dauer der Messung eine Lüfterabschaltung (LÜ) realisiert.
2. Die Gelenkwelle wird unter Last zu Schwingungen angeregt und strahlt Luftschall ab. Als Maßnahme wurden Wellendämpfer (WD) montiert, die den abgestrahlten Schall minimieren.
3. Die Stützlager innerhalb des Labors verursachen Lagergeräusche, die je nach Lastpunkt wahrnehmbar sind. Als Maßnahme wurden die Lager komplett akustisch gekapselt (LK).
4. Die Wellendurchbrüche in der Wand des Messraumes lassen Störgeräusche von außerhalb in das Labor dringen. Als Maßnahme wurden Durchgangsdämpfer (DD) realisiert, die durch ihre geometrischen Abmessungen aber erst oberhalb von 600 Hz wirksam sind.

In Abbildung 1 und Abbildung 2 werden exemplarisch die Einflüsse auf die Lautheit und in Abbildung 3 auf die Schärfe bei Deaktivierung der zuvor erwähnten Maßnahmen dargestellt. Der niedrige Lastpunkt entspricht einem Drehmoment von 0 Nm bei 240 U/min, der hohe Lastpunkt einem Drehmoment von 250 Nm bei 960 U/min.

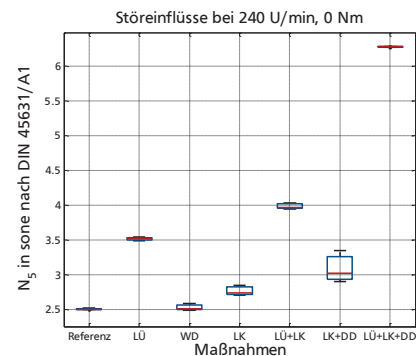


Abbildung 1: Einfluss der Störgrößen auf die N5-Lautheit im Luftschall (niedriger Lastpunkt) [2]

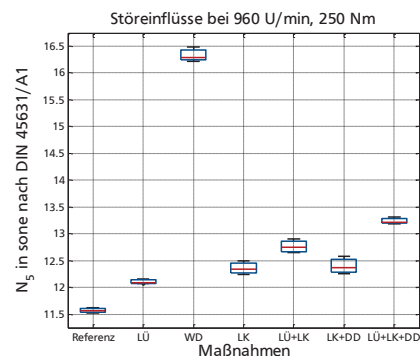


Abbildung 2: Einfluss der Störgrößen auf die N5-Lautheit im Luftschall (hoher Lastpunkt) [2]

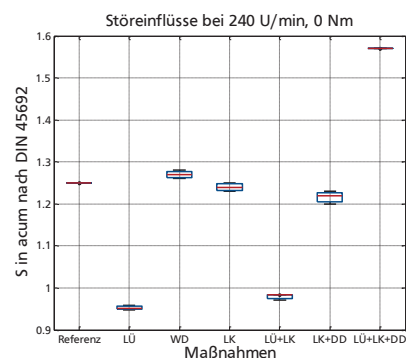


Abbildung 3: Einfluss der Störgrößen auf die Schärfe im Luftschall (niedriger Lastpunkt) [2]

Dabei sind auf der x-Achse der Referenzzustand und im Weiteren die Zustände mit deaktivierten Maßnahmen und deren Kombinationen (entsprechend der bereits erwähnten Abkürzungen) aufgetragen. Der Median wird als rote Linie dargestellt, die blaue Box entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50% der Messdaten liegen. Die äußeren schwarzen Grenzstriche geben den Bereich an, in dem 99,3% der Messdaten liegen. Direkt zu sehen ist, dass die Störung durch die Gelenkwelle (WD) nur bei hoher Last auftritt, während die Lüftergeräusche (LÜ) nur bei geringer Last und dementsprechend geringer Schallabstrahlung des Getriebes hervortreten. Der tieffrequente Einfluss der Lüfter zeigt sich auch sehr deutlich in der Verringerung der Schärfe.

Zwar können die dokumentierten Störgrößen mit den bereits beschriebenen Maßnahmen ausreichend gemindert werden (siehe jeweilige Referenzmessung), jedoch ist dies im Vorfeld mit einem hohen finanziellen und zeitlichen Aufwand verbunden. Auch müssen einzelne Einrichtungen für einen Getriebewechsel teilweise demontiert werden, was einen erneuten Zeitaufwand bedeutet. Für Anwendungen in der Serienfertigung (z. B. als End-of-Line-Prüfung) ist dies gar nicht und in der Entwicklung nur bedingt hinnehmbar. Im Hinblick auf das steigende Interesse an psychoakustischen Versuchen wird daher die Nutzung weniger störanfälliger Körperschallsignale erwogen.

Anwendung der PA auf Körperschallsignale

Für Körperschallmessungen können sowohl die Schwinggeschwindigkeit als auch die Schwingbeschleunigung herangezogen werden. Beide Möglichkeiten wurden für die Auswertung in Betracht gezogen. Jedoch fallen die Frequenzverläufe bei einer Verwendung der Oberflächenschnelle (durch Integration der gemessenen Beschleunigungen) mit zunehmender Frequenz stark ab und bilden dadurch nicht den Charakter der Luftschallsignale ab. Gerade die Lautheitsberechnung würde in erster Näherung nur noch von der ersten und zweiten Zahneingriffsharmonischen dominiert. Die Wahl für die weitere Auswertung des Körperschalls fällt daher auf die Beschleunigungssignale, da diese den Klangcharakter der Luftschallsignale im Versuch besser widerspiegeln. Dennoch gibt es deutliche Unterschiede zwischen Luft- und Körperschall, die im Abstrahlgrad des Getriebes begründet liegen. Für die hier gezeigten Ergebnisse wurde der Abstrahlgrad nicht berücksichtigt, und somit wurden die Metriken für Luftschallsignale (LS) direkt auf die Körperschallsignale (KS) angewendet.

Der Vergleich der Kennfelder für Lautheit und Rauigkeit zeigt deutliche Übereinstimmungen im Verlauf der jeweiligen Größe. Die Korrelation zwischen Luftschall und Beschleunigungssignalen ist bei der Lautheit (Abbildung 4) hoch ($r > 0,9$) und bei der Rauigkeit immer noch deutlich ($r \approx 0,8$). Allerdings zeigt sich gerade bei der Rauigkeit ein starker Einfluss der Sensorposition. Die höchsten Korrelationswerte werden an den Lagerstellen erreicht. Für Positionen am Gehäuse, die fern des Kraftflusses liegen, sinkt der Korrelationswert ab. Deutlich sind jedoch die stark verfälschten Absolutwerte (in der Lautheit ca. eine Größenordnung), die in der Nutzung der metrikfremden Einheiten begründet liegen. Nutzt ArtemiS üblicherweise Luftschall-

signale der Größenordnung 1 Pa, so nehmen Beschleunigungswerte leicht ein Zifaches der Absolutwerte (in m/s^2) an.

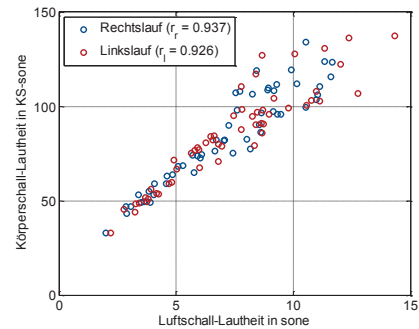


Abbildung 4: Korrelation zwischen den berechneten N5-Lautheiten von Luft- und Körperschall

Dies wird im Laufe der Auswertung auch an den Kennfeldern für die Schärfe sichtbar.

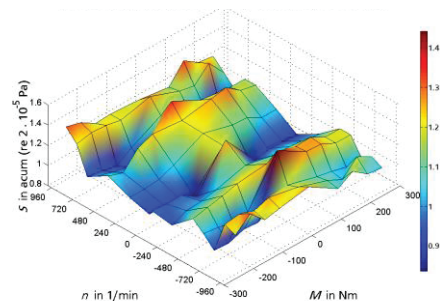


Abbildung 5: Kennfeld der Schärfe nach DIN für Luftschall

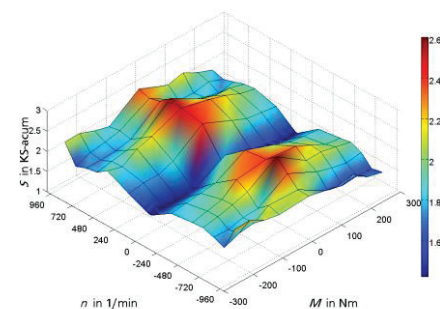


Abbildung 6: Kennfeld der Schärfe nach DIN für Körperschall

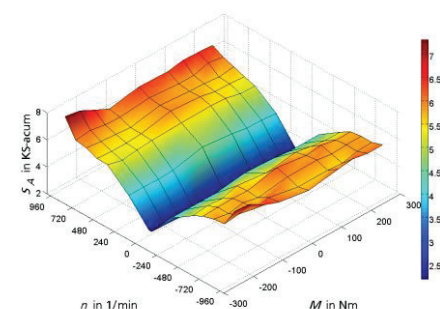


Abbildung 7: Kennfeld der Schärfe nach Aures für Körperschall

Während die KS-Schärfe nach DIN (Abbildung 6) zwar nur gering mit der LS-Schärfe korreliert, aber doch immerhin eine optische Ähnlichkeit zum Verlauf der Luftschallmessung (Abbildung 5) aufweist, zeigt die KS-Schärfe nach Aures ein komplett abweichendes Verhalten (Abbildung 7).

Die Ursache dafür liegt in der bereits erwähnten Abweichung der eingelesenen Absolutwerte. Nach DIN 45692 [4] lässt sich die Schärfe (S) nach DIN und Aures wie folgt beschreiben:

$$S_{DIN|A} = k_{DIN|A} \cdot \frac{\int_{z=0}^{z=24 \text{ Bark}} N'(z) \cdot g_{DIN|A}(z) / \text{Bark} dz}{\int_{z=0}^{z=24 \text{ Bark}} N'(z) dz} \text{ acum}, \quad (1)$$

wobei die Unterschiede lediglich in der Normierungskonstanten $k_{DIN|A}$ und der Gewichtsfunktion $g(z)_{DIN|A}$ liegen. Erstgenannte kann dabei vernachlässigt werden, da k_{DIN} zwischen 0,105 und 0,115 liegt und k_A mit 0,11 angegeben wird.

Die Gewichtsfunktion wird nach DIN abschnittsweise definiert und ist für Tonheiten $z \leq 15,8$ Bark konstant „1“, Oberhalb wird sie mit einer e -Funktion angenähert, die die Tonheit im Exponenten beinhaltet:

$$g_{DIN}(z) = 0,15 \cdot e^{0,42(z/\text{Bark} - 15,8)} + 0,85 \quad \text{für } z > 15,8 \text{ Bark}. \quad (2)$$

Die Gewichtsfunktion nach Aures hingegen beinhaltet auch noch die Gesamtlautheit des Signals:

$$g_A(z) = 0,078 \cdot \frac{e^{0,171 \cdot z/\text{Bark}}}{z/\text{Bark}} \cdot \frac{N/\text{sone}}{\ln(0,05 \cdot N/\text{sone} + 1)} \quad (3)$$

Dieser Einfluss der Gesamtlautheit fällt bei Luftschallsignalen relativ gering aus, führt hingegen bei fehlender Anpassung der Beschleunigungswerte zu einer deutlichen Verfälschung der berechneten Schärfe nach Aures.

Anpassung der Beschleunigungswerte

Für eine Auswertung in Anlehnung an Luftschallwerte müssen die Beschleunigungswerte folglich mit einem Korrekturfaktor skaliert werden, der im Folgenden mit k_{KS-PA} bezeichnet wird. Dieser wird durch zwei unterschiedliche Ansätze bestimmt. Im ersten Ansatz werden die Amplituden der Luftschall- und Beschleunigungssignale verschiedener Messpunkte miteinander verglichen. Aus dem Vergleich von Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigt sich, dass die Beschleunigungswerte (in m/s^2) in erster Näherung dem ca. 100-fachen Wert der Luftschallamplituden (in Pa) entsprechen.

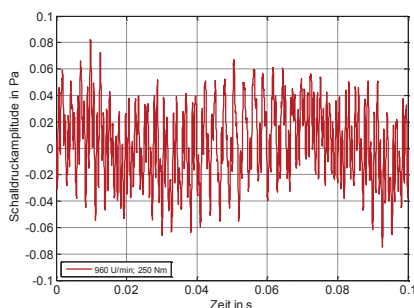


Abbildung 8: Zeitsignal des Luftschalls

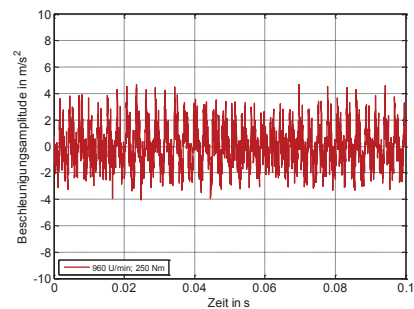


Abbildung 9: Zeitsignal des Körperschalls (Sensor an Ausgangslager)

Die zweite Methode der Skalierung nutzt die Anpassung im Hörversuch. Hier werden Probanden Luftschallsignale dargeboten und die dazu korrespondierenden Körperschallsignale im Vergleich dazu solange abgeschwächt, bis ein Eindruck gleicher Lautheit entsteht. Auch hier erhält man einen Korrekturfaktor in der gleichen Größenordnung. Für die weiteren Versuche wurde daher $k_{KS-PA} = 0,01$ gesetzt. Dieser Wert ist für die vorliegende Untersuchung gewählt und nicht als allgemeingültig anzusehen. Hier spielen der Abstrahlgrad und somit der Frequenzverlauf und natürlich auch der Messabstand der Mikrofone zum Messobjekt (im vorliegenden Fall 1 Meter) in das Verhältnis der Signalamplituden ein.

Störgrößeneinfluss im Körperschall

Die Betrachtung der Störgrößeneinflüsse in den Körperschalldaten zeigt die erwartete Minderung der Streubreiten. Schwankte die Lautheit der Luftschallaufnahmen (Abbildung 1 und Abbildung 2) im niedrigen Lastpunkt um 60% bis 140% und im hohen Lastpunkt um ca. 40% (in Bezug zur Referenzmessung), so konnte dieser Wert auf ca. 10% (Abbildung 10) bzw. ca. 3% (Abbildung 11) gesenkt werden. Die Lautheiten weichen dabei allerdings leicht ab und werden in beiden Lastpunkten gegenüber den Werten der Luftschallmessung unterschätzt.

Auch bei der Schärfe (Abbildung 12) zeigt sich eine deutliche Minderung der Streubreite durch die Nutzung der Beschleunigungssignale. Die Werte der Körperschallschärfe werden im Vergleich zur Luftschall-Schärfe überschätzt, was auf eine bereits beschriebene Abweichung im Frequenzverlauf von Luft- und Körperschall hindeutet. Hier könnte die Einbeziehung eines frequenzabhängigen Abstrahlgrades eine Verbesserung bringen. Die vorhandenen Abweichungen der Absolutwerte werden zum derzeitigen Stand jedoch als wenig kritisch angesehen, da bisher nur relative Einflüsse im Getriebekennfeld betrachtet werden. Die relative Vergleichbarkeit und die Aussage über das Verhältnis verschiedener Lastpunkte zueinander bleiben somit erhalten. Daher kann der Vorteil der geringen Störeinflüsse im Körperschall trotz der leicht verfälschten Absolutwerte als Erfolg in der Nutzung von Körperschall in der Psychoakustik angesehen werden.

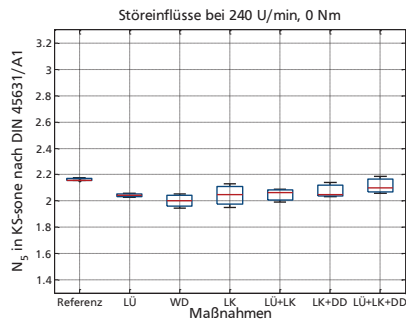


Abbildung 10: Einfluss der Störgrößen auf die N_5 -Lautheit im Körperschall (niedriger Lastpunkt)

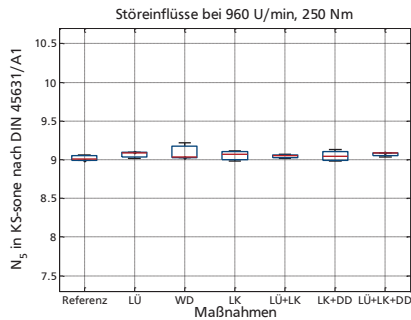


Abbildung 11: Einfluss der Störgrößen auf die N_5 -Lautheit im Körperschall (hoher Lastpunkt)

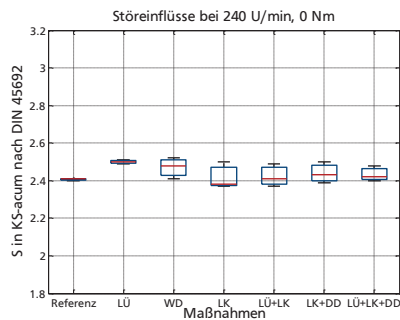


Abbildung 12: Einfluss der Störgrößen auf die Schärfe im Körperschall (niedriger Lastpunkt)

Fazit

Die Versuche mit Getriebegeräuschen zeigen, dass eine Anwendung psychoakustischer Metriken auf Körperschall-signale generell möglich ist. Auch korrelieren im vorliegenden Fall die Beschleunigungswerte der Lautheit gut mit den Luftschalldaten ($r > 0,9$). Die Rauigkeit korreliert je nach Sensorposition noch zufriedenstellend ($r \approx 0,8$), während die Schärfe mit Werten $r < 0,5$ nicht mehr zufriedenstellend korreliert. Wichtig ist eine Anpassung der Absolutwerte durch einen Korrekturfaktor k_{KS-PA} . Dies ist sowohl hilfreich für die Berechnung einiger psychoakustischer Größen wie auch notwendig für die Nutzung der Körperschallsignale im Hörversuch. Ein allgemeingültiger Wert für diesen Korrekturfaktor kann nicht gegeben werden, da sich die Werte des Schalldrucks mit dem Messabstand ändern und sich durch den individuellen Abstrahlgrad der Struktur verschiedene Frequenzen unterschiedlich ausgeprägt im Luftschall wiederfinden. Für Messobjekte mit

ähnlicher Struktur und Größe wird jedoch $k_{KS-PA} \approx 0,01$ als erste Näherung empfohlen. Das gezeigte Verfahren ermöglicht so Relativvergleiche im Kennfeld. Zukünftig soll die Einbeziehung der Abstrahlung zur genaueren Vorhersage der Luftschalldaten vorgenommen werden.

Danksagung

Die Autoren möchten sich bei der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.) und bei SEW-EURODRIVE für die Finanzierung und die Unterstützung während des Projektes bedanken.



Literatur

- [1] Moritz, K. et al.: Wahrnehmung von Getriebegeräuschen – Einflüsse und Störgrößen bei Prüfstandsversuchen. Tagungsband DAGA 2014, S. 341-342, Oldenburg, 2014
- [2] Moritz, K. et al.: Variation, Erfassung und Auswertung von Getriebegeräuschen im Hinblick auf die Kundenakzeptanz. VDI-Berichte Nr. 2229, S. 185-196, Düsseldorf, 2014
- [3] Schlittenlacher, J. et al.: Psychoacoustic evaluation of gear noise using category ratings of multiple attributes. Inter-Noise 2013, ID-0472, Innsbruck, 2013
- [4] DIN 45692: Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009