Maschinenakustik und Psychoakustik: Analyse von Getriebegeräuschen

Joachim Bös[1], Karsten Moritz[1], Josef Schlittenlacher[2], Wolfgang Ellermeier[3], Tobias Melz[1]

[1] *TU Darmstadt, Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM, 64289 Darmstadt, E-Mail: boes@szm.tu-darmstadt.de*

[2] *University of Cambridge, Department of Psychology, Auditory Perception Group, Vereinigtes Königreich*

[3] *TU Darmstadt, Arbeitsgruppe Angewandte Kognitionspsychologie, 64283 Darmstadt*

Einleitung

Aufgrund der wachsenden Lärmsensibilisierung der Bevölkerung und gestiegener Kundenansprüche gewinnt die Akustik von Getrieben zunehmend an Bedeutung. Sie werden nicht nur in industriellen Umgebungen eingesetzt, sondern auch in unmittelbarer Nähe der bisweilen kritischen Verbraucher, z. B. für elektrische Fensterheber oder Sitzverstellungen in Fahrzeugen. Für die Beurteilung von technischen Geräuschen ist nicht nur der objektiv messbare Schalldruckpegel relevant, sondern auch die subjektiv empfundene Lästigkeit des Geräusches. Speziell die Lästigkeit von Getriebegeräuschen ist bislang jedoch wenig erforscht, weshalb hierzu grundlegende Untersuchungen erforderlich sind.

Aufgaben und Ziele

Dieser Beitrag fasst die Ergebnisse eines von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) geförderten Forschungsprojektes mit einer Gesamtlaufzeit von 2,5 Jahren zusammen. Teil- und Zwischenergebnisse wurden bereits auf vorangegangenen DAGAs [1–3] und weiteren Tagungen präsentiert [4, 5]. Im Rahmen dieses Projektes wurden die psychoakustische Wahrnehmung von Getriebegeräuschen und die Übertragbarkeit psychoakustischer Metriken, die ja eigentlich zur subjektiven Beurteilung von Luftschall konzipiert wurden, auf Körperschallsignale untersucht. Dazu wurden bereits existierende Aufnahmen von Getriebegeräuschen analysiert, aber auch eigene Prüfstandsversuche durchgeführt und messtechnisch sowie psychoakustisch ausgewertet. Wesentliches Ziel des Projektes war die Beantwortung der drei folgenden Forschungsfragen:

Welche Geräuschanteile beeinflussen die Wahrnehmung von Getriebegeräuschen und wie sehr tragen sie zur vom Menschen empfundenen Lästigkeit des Geräusches bei?

Wie ist der Einfluss von Serienstreuung, Fehlschliff oder Zahnradschäden auf die psychoakustische Wahrnehmung?

Können (relativ einfach durchführbare) Körperschallmessungen die (deutlich aufwendigeren) Luftschallmessungen ersetzen?

Dazu arbeiteten das Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik SzM des Fachbereichs Maschinenbau und die Arbeitsgruppe Angewandte Kognitionspsychologie am Institut für Psychologie, beide an der TU Darmstadt, interdisziplinär zusammen. Das Projekt wurde insbesondere von der SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG unterstützt, die zwei Prüfgetriebe sowie zusätzliche ungeschliffene Zahnradpaare beistellte, aber auch von weiteren Partnerunternehmen im FVA-Arbeitskreis „Geräusche“.

Prüfstandsaufbau und Vorversuche

Zu Beginn wurde ein Getriebeprüfstand entwickelt und im reflexionsarmen Halbraum des Fachgebiets SzM aufgebaut (Abb. 1). Das eigentliche Prüfgetriebe, ein einstufiges Stirnrad-Industriegetriebe mit einer Übersetzung von 45:23 ≈ 1,96, sowie zwei Stützlager und Drehmomentmesswellen befinden sich dabei im Inneren des Akustiklabors, während die beiden Elektromotoren, die zur Erzeugung des Antriebs- und Lastmomentes dienen, sowie das notwendige Reversiergetriebe außerhalb des Messraumes positioniert sind.

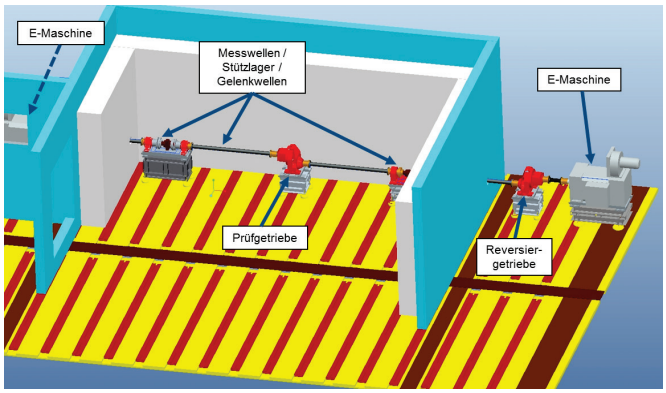

Abbildung 1: schematischer Aufbau des Getriebeprüfstandes im reflexionsarmen Halbraum des Fachgebiets SzM.

Abbildung 2 zeigt ein Foto des Getriebeprüfstandes mit einem Kunstkopf vor dem Prüfgetriebe. Deutlich zu erkennen sind die gelben Schalldämpfer für die An- und Abtriebswellen. Diese waren als eine von mehreren Störgeräuschquellen

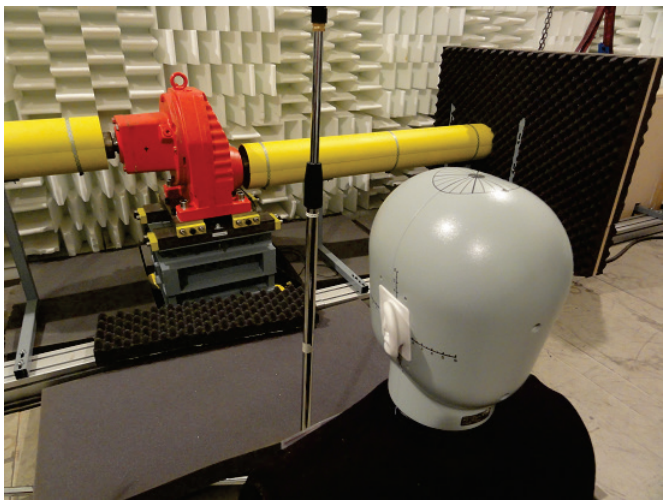

Abbildung 2: Foto des Getriebeprüfstandes mit Kunstkopf.

identifiziert worden, die zunächst eliminiert werden mussten, um brauchbare Aufnahmen für die Hörversuche und psychoakustischen Auswertungen zu erhalten. Dabei zeigte sich, dass für die Durchführung von Hörversuchen und anschließende psychoakustische Auswertungen höhere Anforderungen an die Qualität der Tonaufnahmen der Getriebegeräusche zu stellen sind als bei „rein technischen" Messungen. Ferner wurden in umfangreichen Vorversuchen der Einfluss der Getriebetemperatur auf die Messergebnisse sowie die Wiederholgenauigkeit nach Demontage und Wiedermontage des Prüfgetriebes untersucht und ein spezieller Versuchsplan entwickelt, um unbeabsichtigte Einflüsse auf die technischen und psychoakustischen Messergebnisse ausschließen oder zumindest minimieren zu können.

Hörversuche mit aufgezeichneten Geräuschen

Parallel zum oben beschriebenen Aufbau des Getriebeprüfstandes wurden Hörversuche mit 52 bereits existierenden Getriebegeräuschen durchgeführt und ausgewertet, die von Mitgliedsfirmen des FVA-Arbeitskreises „Geräusche" zur Verfügung gestellt wurden. 19 Probanden hatten dabei die 16 in Abb. 3 auf der Abszisse zu sehenden Attribute wie „laut", „scharf" oder „Dröhnen" auf einer siebenstufigen Skala von „trifft überhaupt nicht zu" bis „trifft vollkommen zu" zu bewerten. Es zeigte sich, dass die Getriebegeräusche nicht als „klopfend" empfunden wurden, aber insbesondere als „laut", „hochtönig" und „lästig".

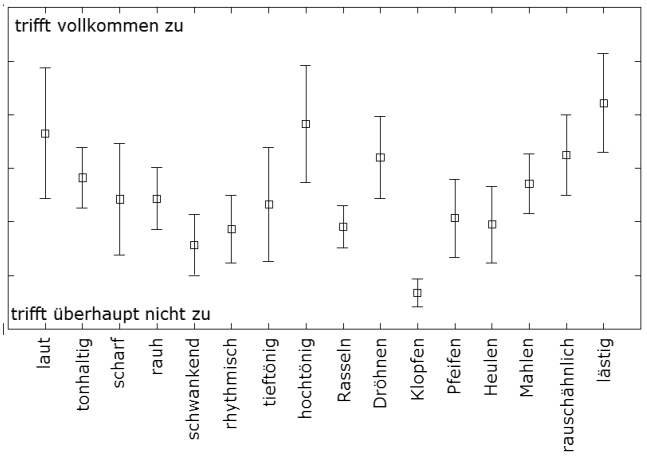

Abbildung 3: Bewertung von 52 existierenden Getriebegeräuschen durch 19 Probanden.

Ferner wurden Korrelationen zwischen verschiedenen Attributen ermittelt. Anschaulich einsichtig ist, dass „laut" stark mit „lästig" korreliert (r = 0,87) oder „hochtönig" mit „scharf" (r = 0,86). Wesentlich erstaunlicher ist, dass „scharf" überraschend wenig mit „laut" korreliert (nur r = 0,56) und dass „rau" sogar negativ mit „lästig" korreliert (r = –0,23), d.h. ein raueres Getriebegeräusch wird sogar als angenehmer empfunden als ein weniger raues.

Mit sechs ausgewählten Getriebegeräuschen wurden sog. Tripelvergleiche durchgeführt. Hierbei mussten 20 Probanden die Frage beantworten: „Was haben Geräusch A und Geräusch B gemeinsam, was Geräusch C *nicht* hat?" Das Ergebnis in Abb. 4 zeigt, dass Geräusch 2 als das lauteste, lästigste und dröhnendste der sechs Getriebegeräusche empfunden wurde, während die Geräusche 1 und 9 offenbar für heulender, aber weniger dröhnend, mahlend und rau angesehen wurden als der Rest.

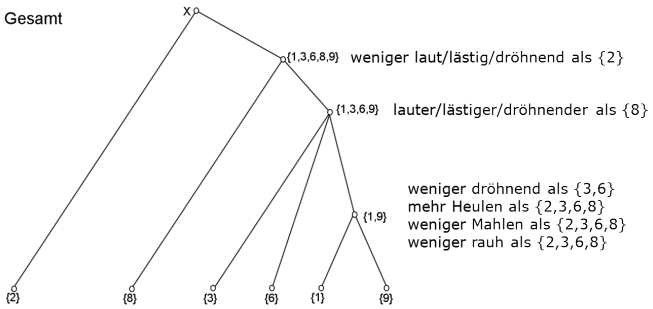

Abbildung 4: Auswertung von Tripelvergleichen mit 20 Probanden und 6 ausgewählten Getriebegeräuschen.

Vergleich zwischen Luft- und Körperschall

Ein wichtiger Aspekt des Projektes war die Klärung der Frage, ob auch gemessene Körperschallsignale sinnvoll psychoakustisch ausgewertet werden können, obwohl menschliche Hörempfindungen ja durch Luftschall ausgelöst werden. Hierzu wurden einerseits Hörversuche mit ausgewählten selbst aufgezeichneten Luft- und Körperschallsignalen der Getriebe durchgeführt, andererseits aber auch mittels einer Software berechnete psychoakustische Metriken miteinander verglichen. Dazu wurden am Prüfstand Drehzahlen von ca. 0, ±240, ±480, ±600, ±720, ±840 und ±960 U/min sowie Lastmomente von 0, ±100, ±150, ±200 und ±250 Nm eingestellt, um Kennfelder der psychoakustischen Metriken in Abhängigkeit von Drehzahl und Lastmoment zu erhalten.

Hörversuche mit Luftschall- und Körperschallsignalen

Zunächst wurde untersucht, ob Laien-Probanden, die keinerlei Erfahrungen mit Getriebegeräuschen haben, die Geräusche ggf. anders wahrnehmen und bewerten als Experten, die bei Getriebe- und Verzahnungsmaschinenherstellern täglich mit Getriebegeräuschen zu tun haben. Wie man Abb. 5 entnehmen kann, sind zwischen beiden Probandengruppen keine wesentlichen Unterschiede festzustellen; die Experten erkennen lediglich eine Gruppe mehr als die Laien.

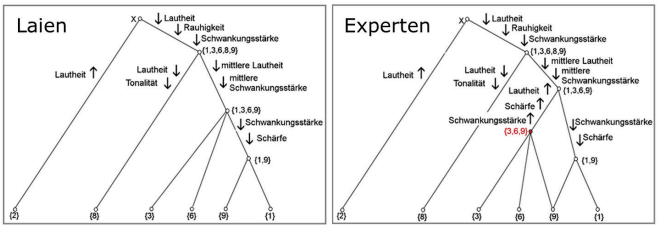

Abbildung 5: Tripelvergleiche – fast keine Unterschiede zwischen Laien- (links) und Experten-Probanden (rechts).

Anschließend wurden den Probanden 120 aufgezeichnete Luft- und Körperschallsignale über Kopfhörer dargeboten. Exemplarisch sind in Abb. 6 die Ergebnisse für die Lautheit, die Tonhaltigkeit, die Schärfe und die Lästigkeit angegeben, wobei die Bewertungen der Luftschallsignale jeweils auf der Abszisse und die der Körperschallsignale auf der Ordinate

abgetragen sind. Wie man erkennen kann, korrelieren die Urteile für Lautheit, Tonhaltigkeit und Lästigkeit sehr stark (r = 0,92, 0,8 bzw. 0,82) zwischen Luftschall- und Körperschallsignalen, während sich die Schärfe wesentlich schlechter aus Körperschallsignalen bestimmen lässt (r = 0,66).

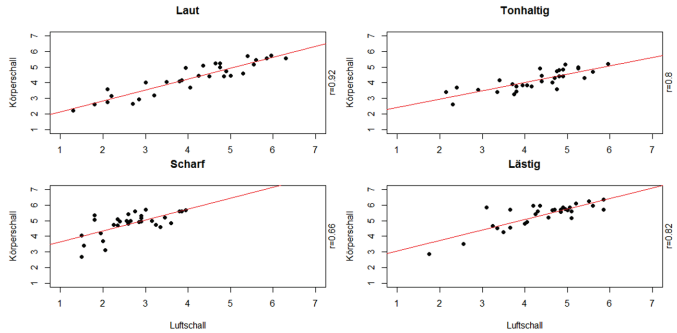

Abbildung 6: Korrelation zwischen Luftschall- und Körperschallsignalen in den Hörversuchen.

Aus Luftschall- und Körperschallsignalen berechnete psychoakustische Metriken

Die selbst am Getriebeprüfstand aufgezeichneten Luftschall- und Körperschallsignale wurden auch mit der Software ArtemiS ausgewertet. Hierbei wurden die berechneten psychoakustischen Metriken Lautheit, Rauhigkeit und Schärfe betrachtet. Abbildung 7 zeigt exemplarisch das Kennfeld der nach DIN 45631 [6] aus Luftschallsignalen (links) und aus Körperschallsignalen (rechts) berechneten Lautheit für verschiedene Drehzahlen und Lastmomente. In beiden Fällen zeigt sich ein prinzipiell sehr ähnliches Verhalten mit r > 0,9. Allerdings ist eine Skalierung der Körperschallsignale erforderlich, da diese in der Einheit m/s² eine andere Größenordnung aufweisen als die Luftschallsignale in der Einheit Pa, welche die Software ArtemiS als Eingangssignal erwartet. Hierbei hat sich der Skalierungsfaktor 1 m/s² ≈ 0,01 Pa als praktikabel und sinnvoll erwiesen.

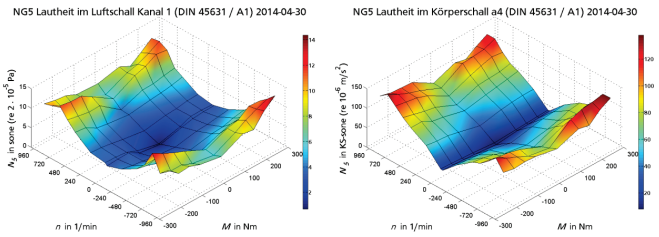

Abbildung 7: Vergleich der aus Luftschall- (links) und Körperschall (recht) berechneten Lautheitskennfelder.

Auch die Kennfelder für die Rauhigkeit und die Schärfe nach DIN 45692 [7] weisen für Luftschall- und Körperschallsignale qualitativ ein sehr ähnliches Verhalten auf. Bei der Schärfe nach Aures [8] gibt es hingegen sehr deutliche Abweichungen, weil in deren Berechnung die Lautheit eingeht, die, wie oben gezeigt, recht große Abweichungen zwischen Luftschall- und Körperschallsignalen aufweist und daher erst geeignet skaliert werden muss, damit auch die Schärfe nach Aures wieder qualitativ ähnlich ist.

Veränderungen durch Schädigungen und Fehlschliff

Das Getriebe wurde demontiert und es wurden gezielt beschädigte und gezielt fehlgeschliffene Zahnräder eingebaut, um den Einfluss dieser Zahnschädigungen und Fehlschliffe auf die psychoakustischen Metriken untersuchen zu können. Dabei zeigte sich, dass diese Modifikationen, entgegen den Erwartungen, nur einen sehr geringen Einfluss auf die berechnete Lautheit (siehe Abb. 8), aber einen deutlichen Einfluss auf die Rauhigkeit (siehe Abb. 9) haben.

In Abb. 8 links ist im Vergleich zweier Messungen mit einem unbeschädigten Zahnradpaar die gute Reproduzierbarkeit erkennbar (je nach Betriebspunkt r ≈ 0,997). Wird die Lautheit für ein unbeschädigtes Zahnradpaar mit der für ein beschädigtes Zahnradpaar verglichen (Abb. 8 rechts), so zeigt sich, dass sowohl die Lautheit selbst als auch deren Streuung nur sehr geringfügig ansteigen (immer noch r ≈ 0,95). Die Lautheit ist somit offenbar kein geeigneter Parameter zur Identifikation von Zahnradschäden.

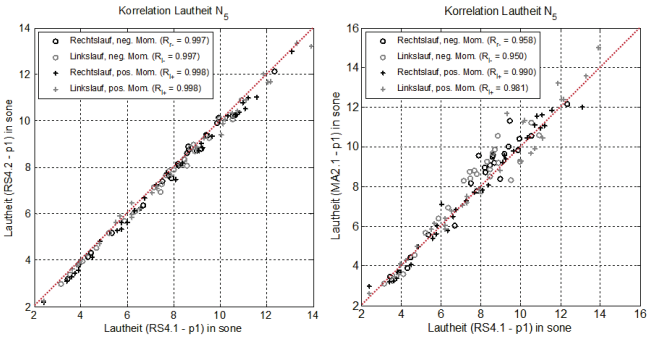

Abbildung 8: Einfluss von Zahnschäden auf die Lautheit (Luftschall). links: wiederholte Messung mit demselben unbeschädigten Zahnradpaar, rechts: Vergleich zwischen dem unbeschädigten und einem beschädigten Zahnradpaar.

Im Gegensatz dazu ist bei der Rauhigkeit ein deutlicher Einfluss einer Zahnschädigung zu erkennen: Sowohl die Rauhigkeit selbst als auch insbesondere deren Streuung steigen infolge des Zahnschadens deutlich an (vgl. Abb. 9 rechts mit Abb. 9 links), die Korrelation sinkt von r ≈ 0,97 auf nur noch r ≈ 0,83 (je nach Betriebspunkt). Die Rauhigkeit könnte daher potenziell zur Schadensdiagnose geeignet sein.

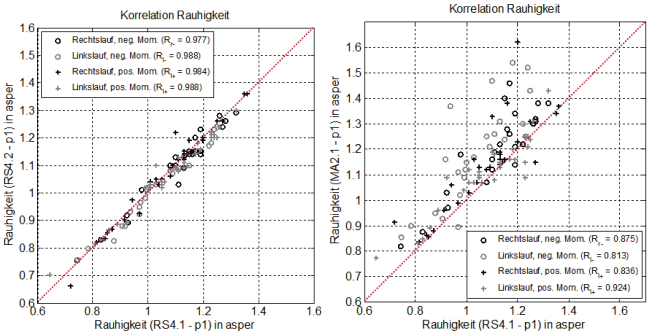

Abbildung 9: Einfluss von Zahnschäden auf die Rauhigkeit (Luftschall). links: wiederholte Messung mit demselben unbeschädigten Zahnradpaar, rechts: Vergleich zwischen dem unbeschädigten und einem beschädigten Zahnradpaar.

Beschleunigung *a* oder Schnelle *v*?

Aufgrund der üblichen Praxis bei den Getriebeherstellern wurden die Körperschallsignale als Oberflächenbeschleunigungen *a* gemessen, und mit diesen gemessenen Beschleunigungen wurden sowohl die Hörversuche als auch die Software-gestützten Psychoakustik-Berechnungen durchgeführt. Nach der maschinenakustischen Grundgleichung [9] ist die abgestrahlte Schallleistung *P* allerdings abhängig von der über die Oberfläche gemittelten Schnelle *v*:

$$P(f) = \overline{v^2}(f) \cdot S \cdot \sigma(f) \cdot Z'_{\text{Medium}} \qquad (1)$$

mit dem Flächeninhalt *S* der Schall abstrahlenden Oberfläche, dem Abstrahlgrad σ und der Schallkennimpedanz des Ausbreitungsmediums Z'_{Medium}. Daher wäre es theoretisch/ physikalisch eigentlich naheliegender, für die Hörversuche und Berechnungen statt der gemessenen Beschleunigung *a* die daraus durch zeitliche Integration gewonnene Schnelle *v* zu verwenden. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse zeigt jedoch, dass auch mit der Beschleunigung *a* sehr gute Ergebnisse für die Lautheit und noch gute Ergebnisse für die Rauhigkeit erzielt werden können. Lediglich die mit der Beschleunigung *a* ermittelte Schärfe ist nicht aussagekräftig. Diese Zusammenhänge werden derzeit noch eingehender untersucht.

Zusammenfassung und Ausblick

Aus den hier vorgestellten Untersuchungen lässt sich schlussfolgern, dass bei der psychoakustischen Bewertung der Lästigkeit von Getriebegeräuschen die Lautheit gegenüber anderen Klangattributen wie z. B. Rauhigkeit oder Tonhaltigkeit deutlich dominiert, ggf. kann aber eine Berücksichtigung der Schärfe sinnvoll sein.

Ferner hat sich gezeigt, dass Zahnradschäden und fehlerhaft gefertigte Zahnräder nur überraschend geringen Einfluss auf die Lautheit, aber deutlichen Einfluss auf die Rauhigkeit haben. Diese Zusammenhänge sind aber noch nicht ausreichend untersucht, um daraus bereits eine Methode zur automatisierten Überwachung oder Qualitätsbeurteilung von Getrieben ableiten zu können.

Schließlich konnte gezeigt werden, dass Körperschallsignale unter bestimmten Bedingungen in der Tat zur Prognose der subjektiv empfundenen Lästigkeit genutzt werden können. Allerdings ist dazu ggf. eine spezielle Konditionierung der Messsignale erforderlich.

Noch zu untersuchen wäre u. a. die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Getriebetypen, z. B. mehrstufige Getriebe, Kegelrad- oder Kegelstirnradgetriebe oder Schaltgetriebe.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der FVA (Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.) für die Förderung des Projektes (Förderkennzeichen 679). Ferner sind sie der Firma SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG für die Beistellung zweier Prüfgetriebe sowie zusätzlicher ungeschliffener Zahnradpaare, der Firma HEAD acoustics für die Beistellung der Akustikanalyse-Software ArtemiS, der Firma KAPP GmbH & Co. KG für die Möglichkeit des bewussten Fehlschliffs von Zahnrädern sowie allen weiteren Mitgliedsfirmen des FVA-Arbeitskreises „Geräusche“ für deren engagierte Mitwirkung und Unterstützung zu Dank verpflichtet.

Literatur

[1] Schlittenlacher, J., Ellermeier, W., Chen, J., Moritz, K.: Psychoakustische Lästigkeit von Getriebegeräuschen. DAGA 2014, 10.–13.03.2014, Oldenburg

[2] Moritz, K., Ochs, S., Schlittenlacher, J., Bös, J., Melz, T.: Wahrnehmung von Getriebegeräuschen – Einflüsse und Störgrößen bei Prüfstandsversuchen. DAGA 2014, 10.–13.03.2014, Oldenburg

[3] Moritz, K., Ochs, S., Schlittenlacher, J., Bös, J., Melz, T.: Wahrnehmung von Getriebegeräuschen – Übertragung psychoakustischer Analysen auf Körperschallsignale. DAGA 2015, 17.–19.03.2015, Nürnberg

[4] Schlittenlacher, J., Ellermeier, W.: Psychoacoustic evaluation of gear noise using category ratings of multiple attributes. Inter-Noise 2013, 15.–18.09.2013, Innsbruck

[5] Moritz, K., Ochs, S., Bös, J., Melz, T.: Variation, Erfassung und Auswertung von Getriebegeräuschen im Hinblick auf die Kundenakzeptanz; Nutzung von Psychoakustik und statistischer Versuchsplanung in der Maschinenakustik. 6. VDI-Fachtagung „Maschinenakustik“, 12./13.11.2014, Karlsruhe

[6] DIN 45631/A1: Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Verfahren nach E. Zwicker – Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche, 2010

[7] DIN 45692: Messtechnische Simulation der Hörempfindung Schärfe, 2009

[8] Aures, W.: Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale, ein Beitrag zur gehörbezogenen Schallanalyse, Dissertation TU München, 1984

[9] Kapitel „O3 Maschinenakustik“ in „Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau“, 24. Auflage, Springer-Verlag, 2014