

Getriebegeräusche im Zusammenhang einer Labor- und Fahrzeugbewertung

Björn Knöfel, Jan Troge, Welf-Guntram Drossel

Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU), 09126 Chemnitz,
E-Mail: Bjoern.Knoefel@iwu.fraunhofer.de

Einleitung

Die subjektive Beurteilung von Pkw-Getriebegeräuschen erfolgt zumeist durch akustisch erfahrene Prüfer im realen Fahrbetrieb, wobei Bewertungsnoten auf einer zehnstufigen Skala vergeben werden. Sind unterschiedliche Fahrzeuge innerhalb eines Tages zu vergleichen, so kann der Prüfer sein akustisches Urteil häufig noch präzisieren, indem er bereits beurteilte Fahrzeuge erneut fahren kann und so eine Rangfolge der getesteten Getriebegeräusche aufstellt. Schwieriger ist die Beurteilung, wenn zwischen den Prüffahrten unterschiedlicher Fahrzeuge längere Zeiträume liegen und bereits beurteilte Getriebe bzw. Fahrzeuge später nicht mehr zur Verfügung stehen. In diesen Fällen ist eine nachträgliche Korrektur der ursprünglichen Getriebegeräuscheinschätzung nicht mehr möglich. Vor allem bei akustisch ähnlichen Fahrzeuggetrieben ist dabei ein sehr gutes akustisches Gedächtnis notwendig. In Erweiterung der Prüferbenotung von Fahrzeuggetrieben wurden Hörversuche mit 24 Probanden durchgeführt, denen Geräuschbeispiele aus verschiedenen Fahrzeug-Getriebe-Kombinationen dargeboten wurden. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick zur Messmethodik und den verschiedenen Korrelationsansätzen zwischen Prüferbenotung und Probandenurteilen.

Auswahl der Getriebe und Stimuli

In ein Fahrzeug der Kompaktklasse wurden nacheinander fünf verschiedene automatisierte Schaltgetriebe einer Baureihe eingebaut. Alle Getriebe sind vorab auf einem End-of-line- (EOL-) Prüfstand auf ihre Funktion sowie akustische Qualität geprüft worden. Die ausgewählten Getriebe wiesen bei der EOL-Prüfung eine gewisse Serienstreuung auf, die wahrnehmbare Unterschiede bei der akustischen Qualität im Fahrzeug vermuten lässt. Mit jedem der Getriebe erfolgten anschließend umfangreiche akustische Messungen von Fahrzeug und Getriebe in allen Gängen, sowohl im Zug- als auch im Schubbetrieb, sowie auf einem akustischen Rollenprüfstand und bei realen Straßenfahrten. Es wurden gezielt wenig befahrene, gerade, ebene sowie mit regelmäßiger Asphaltoberfläche versehene Straßenverläufe ausgewählt. Aus den dabei aufgezeichneten Schalldruckpegeln an den Positionen des linken und rechten Fahrerohres wurden 30 Stimuli (20 x Zug, 10 x Schub) ausgewählt, die Probanden dargeboten wurden. Tabelle 1 stellt die ausgewählten Betriebspunkte der Stimuli dar.

Tabelle 1: Fahrbedingungen für jedes der fünf Getriebe

Gang	Zug (Schwachlast)	Schub (Ebene)
1	1500 rpm - 2100 rpm	6000 rpm - 1000 rpm
2	1500 rpm - 2600 rpm	-
3	1500 rpm - 2500 rpm	6000 rpm - 1000 rpm
4	1500 rpm - 2500 rpm	-

Hörversuche

Die aufgezeichneten Stimuli wurden im stehenden Fahrzeug über das Soundsystem (CD) abgespielt. Dafür sind die Signale in ihrem Pegel und ihrer Frequenz kalibriert, um nahezu identische Hörbedingungen wie bei der realen Straßenfahrt zu erzielen. Das Fahrzeug wurde in den reflexionsarmen Halbraum des Fraunhofer IWU in Dresden gefahren, um alle störenden Geräusche während des Hörversuches zu vermeiden. In einer Einlernphase wurden den Probanden ausgewählte aufgezeichnete Geräusche probeweise abgespielt (Beschleunigung im Zug, Abtounen im Schub), wobei zum einen die Getriebegeräusche mit einem Bandpass schmalbandig gefiltert und dargeboten (dominantes, „anwesendes“ Getriebegeräusch), und zum anderen mit einer Bandsperre herausgefiltert wurden („abwesendes“ Getriebegeräusch). In dieser Einlernphase lernten die nicht mit Getriebegeräuschen vertrauten Probanden sowohl die Tonhöhe des Getriebeheulens einzuschätzen als auch die Einordnung des Getriebegeräuschpegels relativ zum Motor- und Fahrgeräusch. Der erste Teil des danach beginnenden Hörversuches bestand aus einem A/B-Vergleich mit insgesamt 20 Paaren, bei dem jeweils zwei Hörbeispiele hinsichtlich der subjektiv empfundenen Lautstärke sowie der Lästigkeit beurteilt wurden, wobei die Probanden für ein Getriebe die Urteile „lauter“ bzw. „lästiger“ treffen sollten, oder sich auch entscheiden konnten, dass beide Getriebe „gleich laut“ oder „gleich lästig“ sind. Der zweite Teil verlangte von den Probanden die Benotung der dargebotenen Getriebegeräusche (30 Stimuli) auf einer zehnstufigen Skala von Note 1 (extrem laut) bis Note 10 (nicht hörbar). Jeder Proband wurde anschließend noch zu seinem persönlichen Hörvermögen, seinen Hörgewohnheiten sowie seiner Affinität in Bezug auf Fahrzeuge befragt. Unter den 24 normalhörenden Probanden (zwischen 22 und 41 Jahre) befanden sich acht Akustik-Ingenieure.

Wiederholgenauigkeit der Bewertung

Während der Bewertung der 20 Hörbeispiele im A/B-Vergleich wurden den Probanden insgesamt fünf Paarvergleiche wiederholt dargeboten, jedoch mit geänderter Reihenfolge. Die Probanden hatten davon keine Kenntnis. Aus den Angaben der Probanden in Bezug zur subjektiv empfundenen Lautheit und Lästigkeit lässt sich abschätzen, wie „treffsicher“ die Probanden sich in einem Paarvergleich für eines der beiden Getriebe entscheiden. In Abbildung 1 sind die ähnlichen Urteile aufgetragen. Im Bereich der Lautheit und der Lästigkeit konnten jeweils max. fünf ähnliche Urteile abgegeben werden. Aufsummiert auf max. zehn ähnliche Urteile zeigt das Balkendiagramm, wieviel Prozent der Probanden jeweils zehn von zehn bzw. weniger als zehn ähnliche Urteile abgegeben haben. Dabei

zählt ein ähnliches Urteil, wenn der Proband sich entweder beide Male für dasselbe Getriebe entschieden hat („lauter“ bzw. „lästiger“) oder der Proband sich ein- bzw. zweimal für „gleich laut“ bzw. „gleich lästig“ entschieden hat. Jeder Widerspruch (einmal Entscheidung für Getriebe A, einmal Entscheidung für Getriebe B) führt zu weniger ähnlichen Entscheidungen.

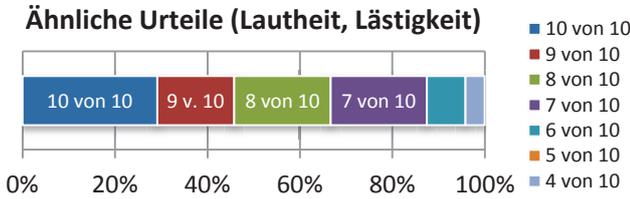


Abbildung 1: Relative Anzahl der ähnlichen Urteile (max. 10) für fünf wiederholt beurteilte A/B-Vergleiche

Aus der Abbildung wird deutlich, dass etwa 67% der Probanden max. zwei widersprüchliche Urteile (mindestens 8 von 10 ähnlich) abgegeben haben. Einerseits wird damit sichergestellt, dass die Probanden ihre Entscheidung aus der Hörgewohnheit heraus treffen (und nicht nur zufällig), andererseits zeigen die hohen Werte der Ähnlichkeit, dass die Getriebegeräusche sich hinreichend voneinander unterscheiden.

Notenverteilung

Werden alle von den Probanden vergebenen Noten in einem Histogramm aufgetragen, erhält man die Notenverteilung in Abbildung 2. Für die 20 Stimuli der langsamen Beschleunigung (Zug) verteilen sich die Noten annähernd gaußförmig mit dem Trend zur Note 6 bzw. 7. Für die zehn Schub-Stimuli bevorzugen die Probanden die Noten 7 bis 9, wobei es einen geringfügigen Trend zu schlechteren Bewertungen (Noten 2 bis 4) gibt.

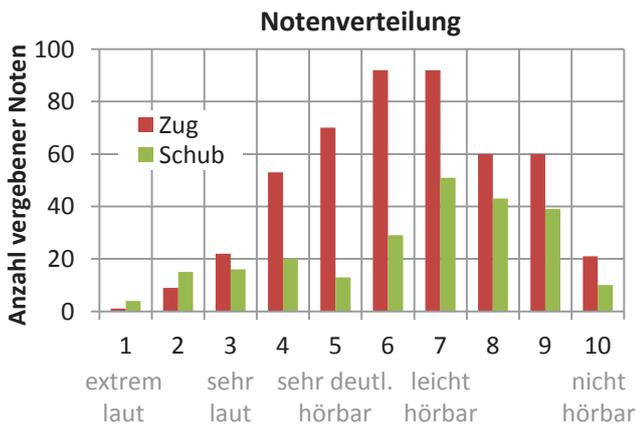


Abbildung 2: Notenübersicht (absolut) aller 24 Probanden für 30 Stimuli

Schaut man auf die Benotung der 30 Stimuli und die Streubreiten der jeweils 24 vergebenen Noten, erhält man die Boxdiagramme in Abbildung 3.

Probandenstreuung

Nachdem die unterschiedlichen Bewertungen aller 30 Stimuli durch die Probanden betrachtet wurden, werden

anschließend die subjektiven Beurteilungsskalen aller Probanden miteinander verglichen.

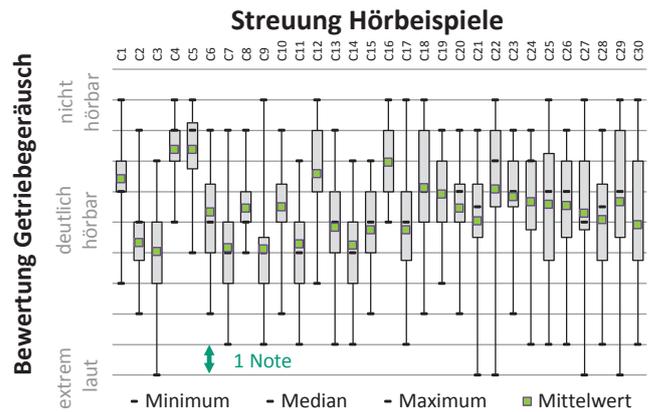


Abbildung 3: Streubreiten der Probandenbeurteilung für die Stimuli C1 bis C20 (Zug) und C21 bis C30 (Schub)

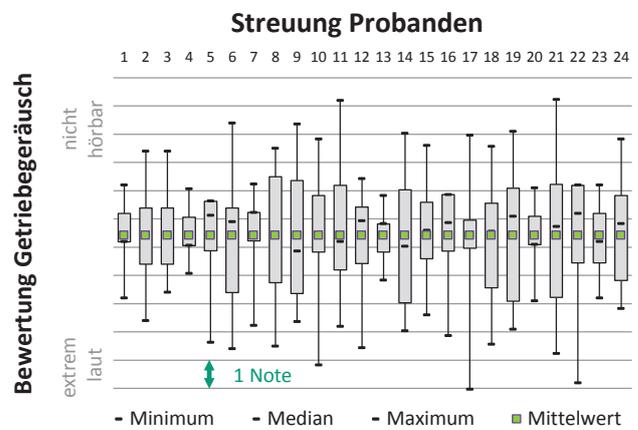


Abbildung 4: Streubreiten der 24 Probanden für je 30 Stimuli

Den Probanden wurden die verbalen Beschreibungen für die zu vergebenen Noten 1 bis 10 erläutert, es erfolgte jedoch keine „Normierung“ mittels Ankerschall. Zwischen den beiden Probanden mit der höchsten und der niedrigsten mittleren Bewertungsnote entstehen dadurch Offsets von max. vier Noten. In Abbildung 4 ist für alle 24 Probanden deren Bewertungsprofil gegenübergestellt. Aus Gründen der besseren Übersicht wurden die Mittelwerte jeweils aufeinander angeglichen. Es gibt zwei Probanden, die nur einen Bewertungsraum von max. drei Noten ausschöpfen, während zwei weitere Probanden ihre Bewertung auf alle zehn möglichen Noten verteilen. Proband 1 und 13 besitzen eine hohe Erfahrung bei der Beurteilung von Getriebegeräuschen und neigen zu ähnlich streuenden Urteilen.

Bewertungsvektoren der Probanden

Indem jeder der 24 Probanden für die 30 Hörbeispiele seine persönlichen Noten vergibt, erhält man insgesamt 24 Probandenbewertungsvektoren mit jeweils 30 Noten. Aus dem Vergleich der Vektoren untereinander kann geschlossen werden, inwieweit es Probanden gibt, die in ihrer Bewertungswahrnehmung mit anderen Probanden übereinstimmen. Die lineare Abhängigkeit wird in Form des Korrelationskoeffizienten berechnet.

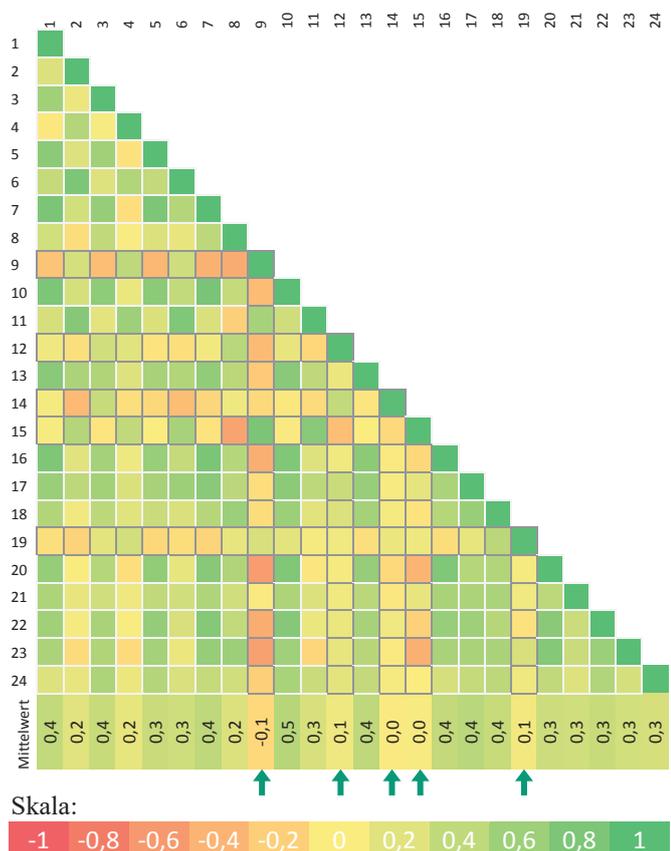


Abbildung 5: Korrelationskoeffizienten-Matrix aller Probandenbewertungs-Kombinationen. Je näher der Wert an 1 liegt, um so mehr stimmen zwei Probanden in ihrem Beurteilungsraum überein. Ein Wert von -1 schließt auf gegenläufige Bewertungen von zwei Probanden, während Werte um 0 auf unabhängige Wahrnehmungen von zwei Probanden schließen lässt.

Aus Abbildung 5 kann entnommen werden, dass die meisten Probanden sich im Mittelwert um 0,3 bis 0,4 ähneln, d. h. trotz aller subjektiver Unterschiede sind die Bewertungsprofile der Probanden in mittlerer Übereinstimmung. Bei den Probanden 9, 12, 14, 15 und 19 fallen allerdings stärkere Abweichungen gegenüber allen anderen Probanden auf. Möglicherweise weisen diese Probanden entweder signifikant unterschiedlich ausgeprägte Hörgewohnheiten auf, oder bezieht sich ihr akustisches Urteil nicht immer auf das gesuchte Geräuschmerkmal.

Straßenfahrt und Laborbewertung

Das Urteil, das der Fahrer den Getrieben während des realen Fahrbetriebes gibt, ist mit den mittleren Probandenurteilen (nach ihrer Wiederholgenauigkeit gewichtet) in Abbildung 6 zusammen aufgetragen. Trotz eines Offsets von ca. einer Note (die Probanden beurteilen tendenziell besser) wird der prinzipielle Notenverlauf der Fahrerbewertung (rote Kurve) durch die Probanden (blaue Kurve) im Mittel sehr gut wiedergegeben. Lediglich im Schub (Stimuli 21 bis 30) bewerten die Probanden nicht so differenziert wie der Fahrer des Fahrzeuges. Die Untergruppe der acht Akustikingenieure hingegen (grüne Kurve) bewertet auch die Geräuschunterschiede im Schub ähnlich wie der Fahrer bei der Straßenbewertung. Da die tonalen Getriebegeräuschanteile im Schub teilweise vom Abtounen des Motors verdeckt werden, haben hier vermutlich einige

Probanden im Schub unbewusst einen Teil des Motorgeräusches mit bewertet.

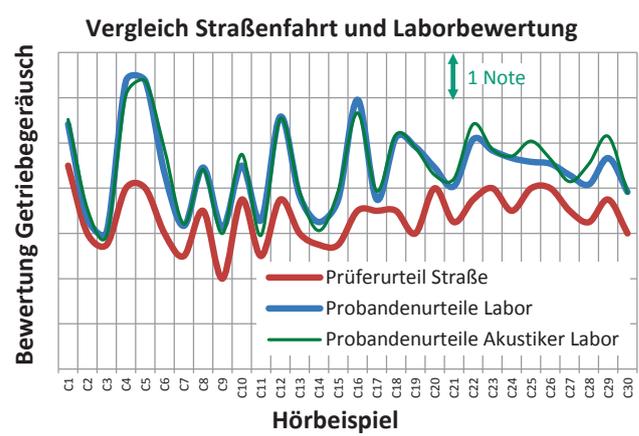


Abbildung 6: Prüferurteil bei realer Straßenfahrt und mittleres Probandenurteil (nach ihrer Wiederholgenauigkeit gewichtet) im Labor

Wird die Straßen- und Laborbewertung in Form eines x-y-Diagrammes gegenübergestellt, erhält man Abbildung 7. Man sieht wieder, dass die Unterschiede im Schub nicht so stark ausfallen wie bei den Stimuli im Zug.

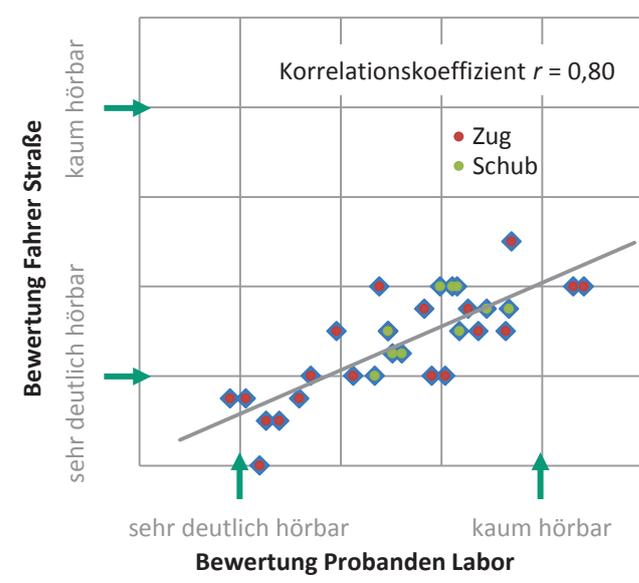


Abbildung 7: Prüferurteil bei realer Straßenfahrt und mittleres Probandenurteil (nach ihrer Wiederholgenauigkeit gewichtet) im Labor, x-y-Darstellung

Bildet man noch verschiedene Untergruppen der Probanden und korreliert diese jeweils mit dem Fahrerurteil der Straße, verändert sich die Korrelation im Bereich von $r = 0,68$ bis $0,84$. Abbildung 8 zeigt, dass die 24 ungewichteten Probandenurteile mit $r = 0,76$ zum Fahrerurteil korrelieren, während die 21 Probanden, die mindestens 7 von 10 Hörbeispielen im A/B-Vergleich konsistent beurteilen, mit $r = 0,80$ korrelieren. Die Gruppe der acht Akustikingenieure liegt ebenfalls näher am Fahrerurteil ($r = 0,78$) als die Gruppe der 16 Nicht-Akustikingenieure ($r = 0,68$). Interessant ist auch, dass die sechs Probanden, die bereits Getriebegeräusche beanstandet hatten, mit $r = 0,84$ die höchste Korrelation zum Fahrerurteil aufweisen. Bewertet der Fahrer im Labor und korreliert man dessen

Laborbewertung zur Straßenbewertung, so erhält man den zweithöchsten Wert von $r = 0,81$.

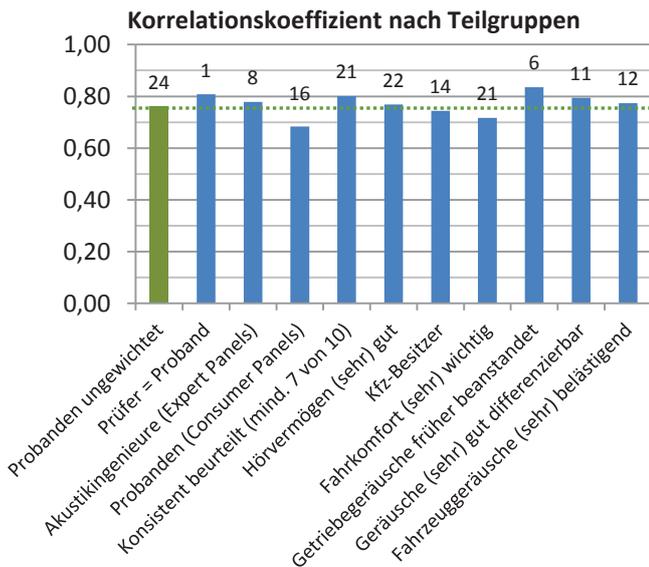


Abbildung 8: Korrelationskoeffizient zwischen Fahrerurteil (reale Straßenfahrt) und Untergruppen von Probanden. Die Größe der Untergruppe (1 bis 24) ist über den Balken aufgeführt.

Werden die Korrelationskoeffizienten getrennt nach den Betriebsbedingungen (Tabelle 1) aufgetragen, so erhält man eine differenzierte Gegenüberstellung der jeweils fünf Getriebe. In Abbildung 9 sind sich sowohl Prüfer als auch Probanden einig, dass Getriebe 4 die höchste akustische Qualität hat, während die Getriebe 1 und 3 am lautesten sind. Die im Labor bzw. auf der Straße vergebenen fünf Noten korrelieren mit $r = 0,84$.

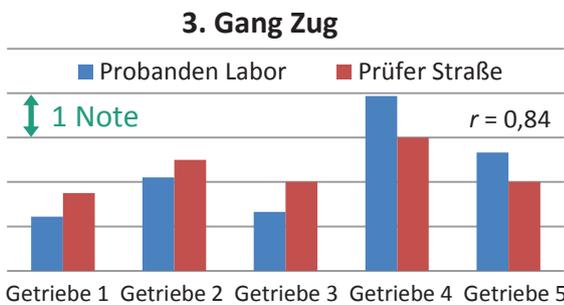


Abbildung 9: Probandenurteil (Labor) und Prüferurteil (Straße) für 3. Gang Zug (Offset der Laborbewertung auf Straße angeglichen)

Sind Betriebsbedingungen sehr ähnlich (z. B. im 1. Gang Zug mit einer mittleren Labor-Notendifferenz von 0,3), so können aus den sehr geringen Bewertungsunterschieden keine aussagekräftigen Rangfolgen der Getriebe aufgestellt werden.

Psychoakustische Größen

Während des Hörversuches haben alle Probanden für die 30 Stimuli zusätzlich zur Geräuschqualität („Lautheit“) die subjektiv empfundenen psychoakustischen Größen Tonalität, Schärfe und Rauigkeit eingeschätzt. Speziell bei der Tonalität haben die Probanden einmal mehr indirekt nachgewiesen, dass sie auch das tonale Getriebeheulen

benoten haben: Sehr tonale Geräusche weisen durchweg geringe Bewertungsnoten auf, während weniger tonale Geräusche höhere Bewertungsnoten erhalten. Tonalität und Bewertungsnote korrelieren bei 30 Stimuli hier sehr hoch mit $r = -0,92$.

Abschließend werden die von den Probanden beurteilten psychoakustischen Größen mit den standardisiert berechneten psychoakustischen Größen gegenübergestellt. In Tabelle 2 zeigen die ersten drei farbigen Spalten jeweils den Vergleich zwischen der Probandeneinschätzung und der Berechnung für Tonalität, Rauigkeit und Schärfe. Die vierte Spalte stellt die von den Probanden vergebene Labornote der berechneten Lautheit, die fünfte Spalte die Probanden-Labornote dem berechneten Schalldruckpegel gegenüber. Für jeden Arbeitspunkt werden in jeder Zeile wiederum die Korrelationskoeffizienten berechnet (jeweils 5 Getriebe).

Tabelle 2: Psychoakustische Größen im Vergleich von Rechnung und Probandeneinschätzung. Angegeben ist jeweils der Korrelationskoeffizient.

Gang	Betriebsbedingung	Tonalität	Rauigkeit	Schärfe	Lautheit & Note Labor	L_p & Note Labor
1	Zug	0,33	0,91	0,78	-0,29	0,24
2	Zug	0,47	0,16	0,11	-0,86	-0,16
3	Zug	0,71	0,54	0,92	-0,96	-0,86
4	Zug	0,78	0,69	0,20	-0,92	-0,77

Wie bereits erwähnt, ist es im ersten Gang nicht möglich, eine detaillierte Bewertung vorzunehmen, da die Getriebegeräusche hier zu ähnlich sind. In den Gängen zwei bis vier korreliert die berechnete Lautheit sehr hoch mit den von den Probanden vergebenen Noten, während der Schalldruckpegel nur beim dritten und vierten Gang ähnlich gut korreliert.

Ergebnis

Mit den 24 unterschiedlichen Probandenurteilen kann die Spannweite der möglichen Kundenurteile deutlich differenzierter eingeschätzt werden, als es ein Fahrer bei der realen Straßenfahrt vermag. Akustisch sensible Probanden korrelieren dabei etwas höher mit dem Fahrerurteil der Straße. Aus den wiederholt durchgeführten A/B-Vergleichen können die Bewertungen der Probanden zudem validiert und differenziert in die Korrelationsberechnung einbezogen werden. Die durchgeführten Laboruntersuchungen ermöglichen es, das Fahrerurteil der Straße kritisch zu hinterfragen und vor allem bei akustisch unterschiedlichen Getriebequalitäten eine eindeutige Rangfolge der Getriebe zu erstellen. Sind die Getriebegeräusche hingegen sehr ähnlich, kann auch die Laborbewertung keine neuen Erkenntnisse zur Straßeneinschätzung liefern.

Literatur

[1] Knöfel, B.; Linke, M.; Drossel, W.-G.: Acoustic End-of-line-Testing of Gearboxes and its Correlation to the human acoustic Perception of Gearbox Noise in Vehicles. 22nd International Congress on Sound and Vibration, Florence, Italy, 12 - 16 July 2015