

Optimierungspotential mittels oTPA am Automotive-Lenksystem

Martin Fischer¹, Tillmann Henschke², Thomas Grubmüller³

¹ thyssenkrupp Presta AG, 9492 Eschen (FL), martin.fischer1@thyssenkrupp.com

² thyssenkrupp Presta AG, 9492 Eschen (FL), tillmann.henschke@thyssenkrupp.com

³ thyssenkrupp Presta AG, 9492 Eschen (FL), thomas.grubmueller@thyssenkrupp.com

Einleitung

Die akustische Performance ist im Automotive-Bereich ein wichtiger Indikator für Qualität und Komfort. Dieser Aspekt ist besonders für Fahrzeuginnengeräusche von Bedeutung. Durch geringer werdende Fahr- bzw. Fremdgeräusche erfolgte allerdings eine Demaskierung bisher nicht auffällig in Erscheinung tretender Innengeräusche (siehe Abbildung 1). Diese Demaskierung wurde durch die Einführung neuer Antriebstechnologien (Hybrid-, Elektro- und Brennstoffzellentechnologie) weiter begünstigt. Im Gegensatz dazu stieg der Komfortanspruch der Fahrzeugnutzer, wodurch die Anzahl an Geräuschquellen im Fahrzeuginnenraum zunahm. Als Geräuschbeispiele sind zusätzliche Verstärkungs- (u.a. Brems- und Lenkkraftverstärker) und Verstellsysteme (elektromechanische Sitz- und Lenkradverstellung etc.) zu nennen.

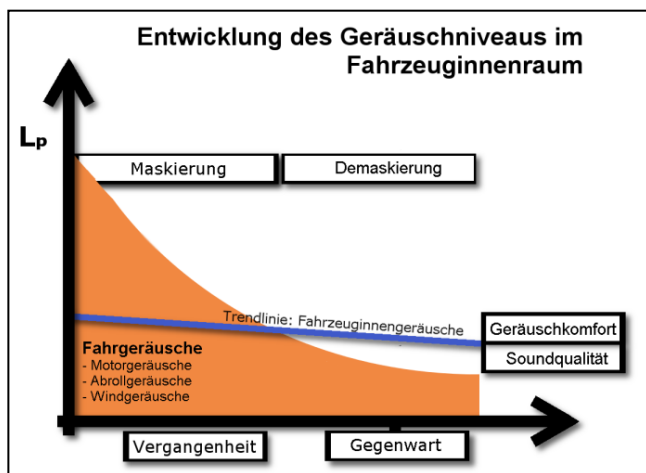


Abbildung 1: Entwicklung des Geräuschniveaus im Fahrzeuginnenraum; in Anlehnung an [1] und [2]

Um den akustischen Performance-Ansprüchen im Fahrzeuginnenraum gerecht zu werden, sind Maßnahmen zur Geräuschreduktion und/oder Geräuschoptimierung notwendig. Dies gilt besonders im Premiumbereich. Hierzu bietet sich die Einbindung leistungsfähigerer Untersuchungsmethoden (u.a. Transferpfadanalyse, Modalanalyse, Betriebsschwingungsanalyse, (inverse) Schallortung und -kartierung) an [1, 2, 3]. Damit lässt sich das Verständnis für die Geräuschentstehung, -übertragung und -abstrahlung erweitern. In diesem Beitrag soll das Geräuschoptimierungspotential durch die Einbindung einer operativen Transferpfadanalyse (oTPA) an einem akustisch relevanten Bauteil des Lenksystems dargestellt werden.

Lenksystem

Das Lenksystem ermöglicht dem Fahrer die Räder des Fahrzeuges über eine Drehbewegung am Lenkrad anzustellen. Die entstehenden Kräfte quer zum Rad geben dem Fahrer so die Möglichkeit zur Fahrzeugquerführung [4]. Das Lenksystem besteht aus Lenkrad, Lenksäule, Lenkwelle, Lenkgetriebe und Spurstangen (siehe Abbildung 2). Durch die gestiegenen Komfortansprüche haben sich u.a. aus einem rein mechanischen Lenksystem sowohl hydraulisch als auch elektrisch verstärkte Lenksysteme entwickelt. Die elektrisch verstärkten Systeme sind immer häufiger in Pkws anzufinden. Als Grund ist sowohl der geringere Energiebedarf als auch das adaptiv einstellbare Handling („Plug-In-Lösung“) zu nennen. Hydraulisch verstärkte Systeme lassen sich hingegen häufig bei Lkws vorfinden, da höhere Anforderungen an die Spurstangenkräfte aufzubringen sind.

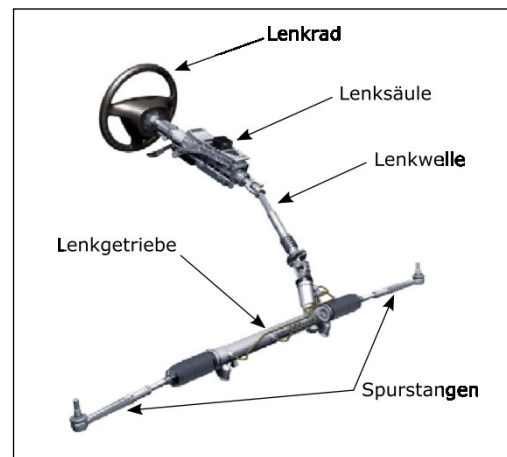


Abbildung 2: Das Lenksystem [4]

In diesem Beitrag erfolgt eine Konzentration auf die Lenksäule. Dieses Bauteil stellt eine mechanische Verbindung zw. Lenkwelle und Lenkrad zur Drehmomentübertragung sicher. Neben der Drehmomentübertragung bestimmen insbesondere die Energieabsorption im Crashverhalten, der Diebstahlschutz und die Lagerung des inneren Stranges die konstruktive Gestaltung der Lenksäule. Zum inneren Strang werden alle Drehmoment übertragenden Baukomponenten gezählt.

Der Trend zu mehr Komfort konnte auch bei der Entwicklung von einer starren zu einer verstellbaren Lenksäule beobachtet werden. Im Premiumsegment wird der Verstellmechanismus mittels Elektromotoren umgesetzt. Dies bietet sich insbesondere bei „Easy-Entry-Funktionen“ an. Der Verstellmechanismus lässt sich dabei in Höhen- und

Längsverstellung untergliedern. Hierzu kommen i.d.R. zwei Aktuatoren (Elektromotor mit Getriebe) zum Einsatz (siehe Abbildung 3).

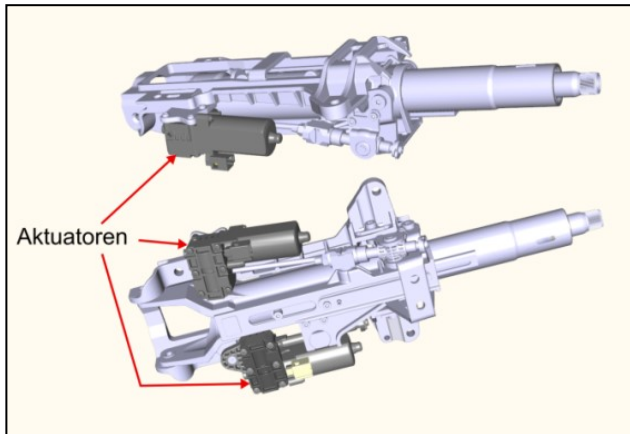


Abbildung 3: Aktuatoren der elektromechanisch verstellbaren Lenksäule

Durch das elektromechanische Verstellsystem wurden zusätzliche Geräusche (aktiv) direkt am Lenksystem erzeugt. Diese Geräusche können sich mit den Fahrgeräuschen (passiv) überlagern, welche u.a. vom Fahrwerk und über das Lenksystem in den Fahrzeuginnenraum gelangen. Um den Einfluss des elektromechanischen Verstellsystems auf die akustische Performance zu minimieren, sind Optimierungsmaßnahmen notwendig. Diese sollen durch die Einbindung leistungsfähiger „Akustiktools“ gefunden werden. Bei einer Prüfung der Optimierungsmaßnahmen sind Steifigkeitsanforderungen, Bauraumvorgaben und Kosten zu berücksichtigen.

Methodik

Für die Untersuchungen wurde exemplarisch eine elektromechanisch verstellbare Lenksäule (inkl. Lenkrad) ausgewählt. Diese Lenksäule wurde sowohl auf einem Prüfbock, als auch in einem ausgewählten Fahrzeug untersucht. Mittels Prüfbock wurde eine reale Fahrzeug-einbaulage sichergestellt. Im Mittelpunkt der Untersuchungen standen die Geräusche während einer Höhen- und Längsverstellung. Die Verstellbewegung erfolgte automatisiert (kein Bedienerinfluss). Die Verstelldauer betrug 3 – 5 Sekunden pro Bewegungsrichtung. Eine Gleichspannung von ca. 14 Volt wurde an den Elektromotoren sichergestellt. Neben Grundlagenuntersuchungen wurde eine oTPA durchgeführt. Die Anknüpfungspunkte der oTPA auf das allgemeine Modell der Geräusentstehung sind nachfolgend dargestellt (siehe Abbildung 4).

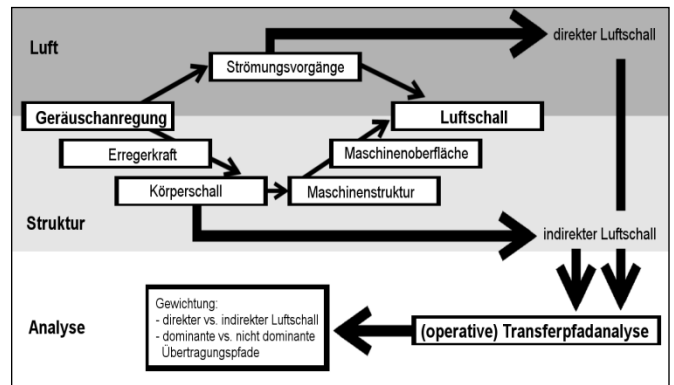


Abbildung 4: Modell der Geräusentstehung, Anknüpfungspunkte der oTPA

Grundlagenuntersuchungen

Die Grundlagenuntersuchungen fanden auf einem Prüfbock statt. Während der Verstellbewegung der Lenksäule wurde neben dem Luft- und Körperschall auch der Aufnahmestrom der Elektromotoren aufgezeichnet. Für die Luftschallmessungen wurde jeweils ein Kondensatormikrophon in Fahrerposition (linkes und rechtes Fahrerrohr) eingebunden. Körperschall wurde an unterschiedlichen Messpunkten mit axialen/triaxialen Beschleunigungsaufnehmern erfasst. Mess- und Analysetechnik wurde von der Fa. PCB und der Fa. HEAD Acoustics verwendet. Der Aufnahmestrom konnte mittels Strommesszange der Fa. LEM aufgezeichnet werden.

Operative Transferpfadanalyse

Bei einer Transferpfadanalyse wird ein Modell generiert, welches anhand von Eingangssignalen und Übertragungsfunktionen (FRF) die Signale am Empfänger synthetisiert [5]. Anhand der Transferpfadanalyse kann sowohl eine Quantifizierung bzw. ein Ranking der einzelnen Transferpfade als auch eine Unterteilung in direkten und indirekten Luftschall erfolgen. Die Bestimmung der FRF erfolgt dabei im physikalisch entkoppelten/isolierten Zustand („load-response relationship“). Die Eingangssignale werden direkt im Betrieb der entsprechenden Geräuschquelle erfasst. Eine TPA bietet sich insbesondere bei einer geringen und limitierten Anzahl von Übertragungspfaden an.

Bei einer oTPA erfolgt keine gesonderte Erfassung der FRF. Die FRF werden anhand von Betriebsdaten („response-response relationship“) abgeschätzt, d.h. es werden die Empfindlichkeiten (Schalldruck zu Schalldruck bzw. Beschleunigung zu Schalldruck) berücksichtigt. Damit mindert sich der Zeitaufwand bzw. Kostenfaktor z.T. erheblich. Zusätzlich können Interaktionen zwischen einzelnen Übertragungspfaden erfasst und berücksichtigt („Cross-Talk-Cancellation“) werden. Die Ergebnisse einer TPA und oTPA sind allerdings nicht zwangsläufig identisch [5, 6]. Zur Prüfung der Anwendbarkeit einer oTPA soll das abgeleitete Geräuschminderungspotential anhand von Versuchen nachgewiesen werden.

Die oTPA-Untersuchungen fanden in einem Pkw statt, um reale Rahmenbedingungen zu gewährleisten. Passive Geräuschquellen (u.a. Verbrennungsmotor) waren nicht aktiv.

Die untersuchte Lenksäule war durch vier Anbindungs-
punkte (AP) an die Karosserie charakterisiert. An diesen
Punkten wurden triaxiale Beschleunigungssensoren ange-
bracht. Außerdem wurde ein triaxialer Beschleunigungs-
aufnehmer an der Lenkspindel (SPL) angebracht, um die
Geräuschübertragung auf das Lenkrad zu ermitteln. Drei
Kondensatormikrophone wurden in unmittelbarer Nähe zur
Lenksäule positioniert, um den Luftschall (LS) vor der
Lenksäulenblende bzw. -verkleidung zum Fahrzeuginnen-
raum zu erfassen. Zusätzlich wurde am linken (LS li) und
rechten (LS re) Fahrerohr ein Mikrophon positioniert. Alle
Messungen fanden zeitsynchron statt. Das sich daraus
ergebende oTPA-Modell ist nachfolgend dargestellt (siehe
Abbildung 5). Für die Untersuchungen wurde Hard- und
Software von der Fa. Müller-BBM genutzt.

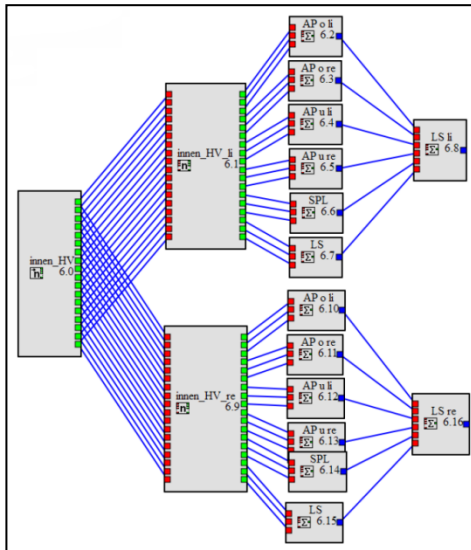


Abbildung 5: oTPA-Modell

Ergebnisse

Ein Zusammenhang zwischen elektrischem Aufnahmestrom
sowie Körper- und Luftschall während einer Verstell-
bewegung ist erkennbar (siehe Abbildung 6). Alle drei
Campbell-Plots waren durch bestimmte Harmonische der
Drehfrequenz (ca. 50 – 60 Hz) charakterisiert. Vom Auf-
nahmestrom, über den Körperschall bis zum Luftschall nahm
allerdings die Deutlichkeit der Harmonischen ab. Dieser
Effekt ist u.a. den Struktureigenschaften, des Einflusses der
Messumgebung und der Messdurchführung zuzuordnen.

Die Ursachen der dominanten Ordnungen konnte insbe-
sondere mit der Unwucht, der Anzahl der Polpaare und der
Zahn-Eingriffs-Frequenz (Motor-Getriebe) erklärt werden.
Insbesondere die Polpaare generierten eine dominante
Ordnung anhand des elektrischen Aufnahmestromes
(ca. 400 Hz). Weiterhin war in allen drei Campbell-Plots
eine Modulation erfassbar. Die Modulationsfrequenz betrug
3 Hz. Diese Modulation kann als Schwankungsstärke
psychoakustisch beschrieben werden. Dieser Parameter hat
Einfluss auf die Geräuschempfindung.

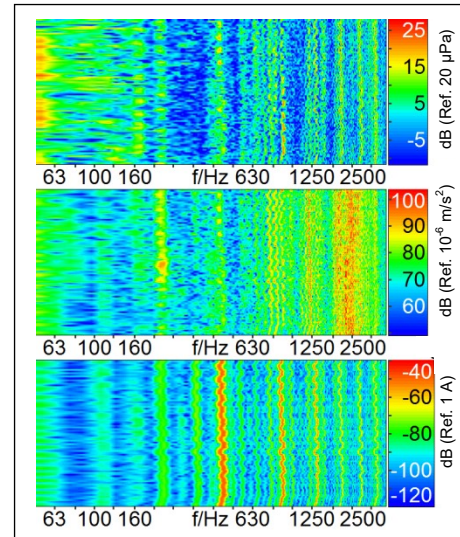


Abbildung 6: Elektr. Aufnahmestrom (unten), Körper-
schall (mittig) und Luftschall (oben) während exem-
plarischer Verstellbewegung

Anhand der oTPA konnten zwei dominante Körperschall-
übertragungspfade ermittelt werden. Die weiteren Übertra-
gungspfade zeigten einen deutlich geringeren Anteil am
Gesamtgeräusch (Geräuschimmission am Fahrerohr) auf.
Unterschiede wurden insbesondere anhand der Harmo-
nischen der Drehzahl der Elektromotoren deutlich. Dies kam
vor allem bei einer Gegenüberstellung von Campbell-Plots
zum Vorschein (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). Die
Campbell-Plots stellten dabei den Geräuschanteil der
Anbindungspunkte zum Gesamtgeräusch für zwei Verstell-
bewegungen dar. Qualitative Drehzahlunterschiede zu den
Grundlagenuntersuchungen sind auf die untersuchte
Lenksäule zurückzuführen.

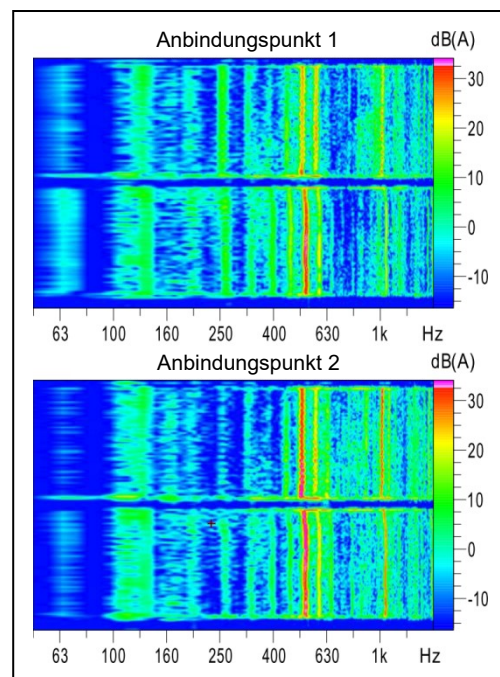


Abbildung 7: Luftschallanteil von Anbindungspunkt 1 und
2 in Bezug zum Gesamtgeräusch während der Verstell-
bewegung

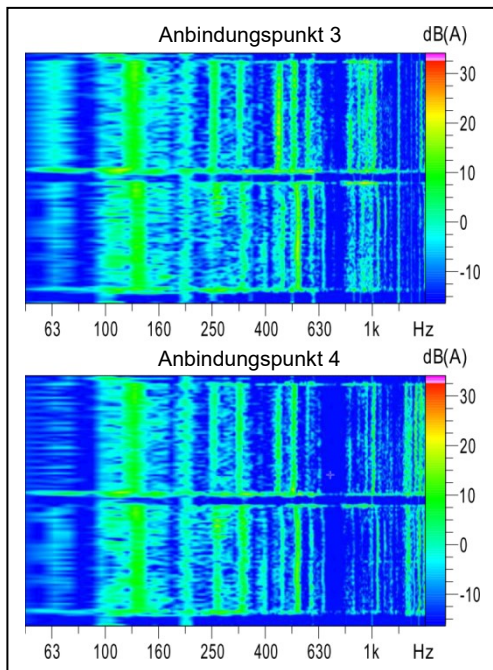


Abbildung 8: Luftschallanteil von Anbindungspunkt 3 und 4 in Bezug zum Gesamtgeräusch während der Verstellbewegung

Neben den Körperschallanteilen wurde auch ein dominanter Luftschallübertragungspfad erfasst. Die Luftschallübertragung erfolgte hierbei von der Lenksäule über die Lenksäulenblende in den Fahrzeuginnenraum. Der breitbandige Anteil am Gesamtgeräusch war insbesondere im Frequenzbereich <600 Hz relevant. Im höheren Frequenzbereich sank der Einfluss. Als Ursache ist die Absorbereigenschaft der Lenksäulenblende bzw. -verkleidung aufzuführen. Nachfolgend ist der Geräuschanteil des Luftschalles in Bezug auf das Gesamtgeräusch dargestellt (siehe Abbildung 9).

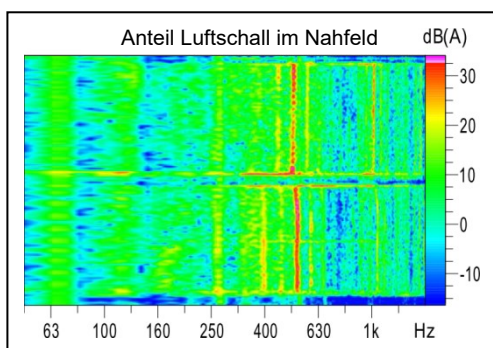


Abbildung 9: Anteil der Luftschallübertragung (über Blende) am Gesamtgeräusch während der Lenksäulenverstellung

Durch eine gezielte Entkopplung beider dominanter Körperschallübertragungspfade wurde eine z.T. deutliche Minderung der Körperschallübertragung erzielt. Pegelreduktionen von bis zu 12 dB konnten umgesetzt werden! Durch eine Einbindung von Luftschallabsorbern wurde

ebenfalls eine Geräuschreduktion erzielt. Der Luftschallabsorber wurde dabei unter der Lenkradverkleidung angebracht. Das Reduktionspotential war geringer als bei der Entkopplung. Eine Kombination beider Geräuschreduktionsmaßnahmen erzielte die größten Pegelreduktionen. Anhand der Geräuschreduktionen konnte die Wirksamkeit der oTPA für diesen Anwendungsfall verdeutlicht werden. Damit eignet sich dieses Verfahren um gezielte und effiziente Geräuschminderungen umzusetzen.

Fazit

Die Grundlagenuntersuchungen können durch eine oTPA erweitert werden. Anhand der Analyseergebnisse einer oTPA konnten dominante Schallübertragungspfade ermittelt werden. Somit war eine Quantifizierung möglich. Weiterhin konnten anhand der Ergebnisse gezielt Maßnahmen zur Geräuschreduktion umgesetzt werden. Diese führten auch zu einer nachweisbaren Pegelreduktion. Durch die oTPA konnte somit schnell und effizient die Akustik-Performance der Verstellakustik verbessert werden.

Die Optimierungsmaßnahmen fokussierten sich hauptsächlich auf sekundäre Minderungsmaßnahmen. Dennoch konnte durch eine Reduktion der hoch- oder tieffrequenter Schallanteile auch die Geräuschqualität verändert werden (z.B. Schärfe). Eine Veränderung der Modulationsfrequenz war indes mittels der Optimierungsmaßnahmen nicht möglich.

Literatur

- [1] Genuit, K.: Sound-Engineering im Automobilbereich, Springer Verlag, 2010
- [2] Zeller, P.: Handbuch Fahrzeugakustik, Vieweg + Teubner Verlag, 2009
- [3] Guyader, J.-L.; Buisson, Q.; Guyader, G.: Time reversal applications: source detection, defect localization, and perceptive structures, Automotive Acoustics Conference, 2015
- [4] Pfeffer, P.: Lenkungsbandbuch, Springer Verlag, 2013
- [5] Philippen, B.; Sottek, R.: OTPA vs. TPA – Comparison of Transfer Path Analysis methods, Aachen Acoustic Colloquium 2011, Aachen
- [6] Gajdatsy, P.; Janssens, K.; Giele, L.; Mas, P.; Van der Auweraer, H.: Critical assesment of operational path analysis: effect of coupling between path inputs, EAA, 2008, Paris