

Physiker am Ohr des Kunden – Fahrzeugakustik im Labor

Ulrich Bernhard, Gerhard Herrmann und Gerhard Schmidt

Bei der Entwicklung eines Automobils wird auch der Klang seines Fahrgeräuschs nicht dem Zufall überlassen, sondern gezielt gestaltet. Schließlich soll etwa eine Limousine anders klingen als ein Sportwagen. Ein bestimmtes Klangbild kann auch zu einem Markenzeichen werden. Zunächst muss man den gewünschten „Zielsound“ erzeugen, und zwar durch gezielte Manipulation des im Innenraum eines Prototyps aufgezeichneten Mikrofonsignals. Hat man den Zielklang erreicht, folgt im Anschluss die Verbindung mit der so genannten Transferpfadanalyse am Fahrzeug. Hierbei gilt es, die Hauptpfade des Schalls im Auto zu ermitteln. Erst wenn so das Problem der Gestaltung des Gesamtklangbildes auf die Änderung einzelner Schallpfade „heruntergebrochen“ ist, lässt sich der Klang des Automobils gezielt ändern.

Die Bedeutung des Automobils in den Ländern Westeuropas hat sich während der letzten beiden Jahrzehnte deutlich gewandelt. Der Charakter als Freizeitgerät und Statussymbol tritt immer mehr in den Vordergrund. Dabei zählt nicht nur das Aussehen des Autos, sondern auch sein Klangbild. Hier geht es längst nicht mehr nur darum, die Lautstärke im Innenraum zu reduzieren. Vielmehr soll der fahrende Wagen einen „guten Sound“ besitzen, der auch als Markenzeichen fungieren kann. Das rasante Anfahren eines Sportwagens oder das kraftvolle Fahrgeräusch eines Geländewagens sind mittlerweile kein ursprünglich vorhandenes Charakteristikum mehr. Das Klangbild wird ganz gezielt in Experiment und Simulation entworfen. Im Rahmen der dafür erforderlichen interdisziplinären Zusammenarbeit kommt Physikern eine besondere Rolle zu, da sie ausgeprägte mathematische Kenntnisse und ein tiefgehendes Verständnis für die kontinuumsmechanischen Zusammenhänge haben. In der Abteilung *Noise & Vibration* im Inter-

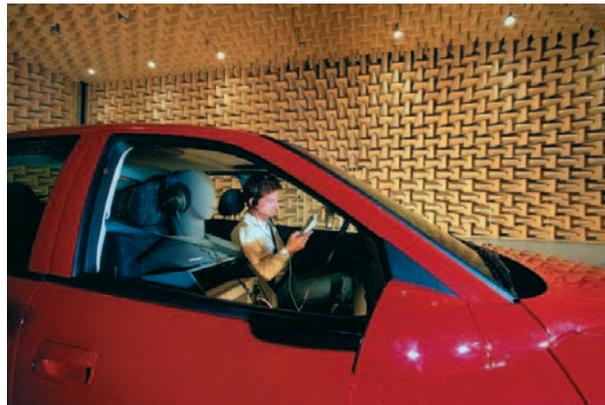


Abb. 1: Ausgangspunkt für die gezielte Klanggestaltung im Automobil ist das mit einem Kunstkopf aufgezeichnete Signal eines Prototyps.

national Technical Development Center der Adam Opel AG sind aus diesem Grund etwa ein Fünftel der Mitarbeiter diplomierte oder promovierte Physiker.

Als Ausgangspunkt dient das im Innenraum aufgezeichnete Mikrofon- oder meist Kunstkopfsignal (Abb. 1). Durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge lässt sich dieses Signal durch verschiedene Filter gezielt so manipulieren, dass es den Wünschen der Akustiker stellvertretend für den Kundenwunsch entspricht. Die verschiedenen Stufen der Entwicklung kann man sich dabei im Hörstudio jeweils vergleichend anhören. Hierbei ist es übrigens eine überaus anspruchsvolle Aufgabe, die psychoakustischen Effekte zu berücksichtigen, die das Hörempfinden des Menschen charakterisieren, physikalisch aber nur sehr schwer zu beschreiben sind (siehe Infokasten „Psychoakustische Größen“).

Die wesentlichen Schallquellen, die der Kunde beim Fahren registriert, sind neben dem Motor-Ge-

triebe-Verband vor allem die luftführenden Systeme (Ansaug- und Abgasanlage). Ihre Bedeutung in der Wahrnehmung durch die Fahrzeuginsassen hängt merklich vom Fahrzustand, aber auch von der Sitzposition im Fahrzeug ab. Außerdem treten noch Reifen- und Windgeräusche auf. Sie eignen sich jedoch nicht für eine gezielte Klanggestaltung. Der Schall breitet sich von der Quelle bis zum Ohr des Kunden über eine Vielzahl von Schallpfaden aus, die man zwei Grundmechanismen, dem Luftschall und dem Körperschall zuordnen kann (Abb. 2). Unter Luftschall fasst man einerseits die Pfade zusammen, bei denen der Schall sich vom Ort der Abstrahlung bis zum Ohr nur noch über das Medium Luft fortpflanzt. Typisches Beispiel ist der Schalldurchtritt vom Motorraum über Öffnungen in der Stirnwand in den Innenraum. Andererseits gehören auch die Anteile zum Luftschall, bei denen die Luftschwingungen im Motorraum die größeren Blechteile wie die Stirn-

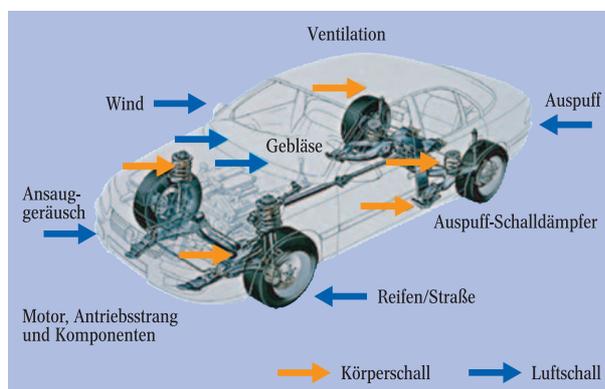


Abb. 2: Körperschall und Luftschall sind die zwei Grundmechanismen der Schallübertragung von der Quelle zum Ohr.

Prof. Dr. Ulrich
Bernhard, Gerhard
Herrmann, Gerhard
Schmidt, Adam Opel
AG Rüsselsheim,
PKZ 8583, 65423
Rüsselsheim

wand zu Schwingungen anregen, die auf der gegenüberliegenden Seite der Fahrgastzelle wiederum als Luftschall abgestrahlt werden. Unter Körperschall versteht man diejenigen Geräuschanteile, die z. B. durch die schwingenden Oberflächen des Motors über die Motorlagerung als Schwingungen in die Karosserie eingeleitet werden. Dort pflanzen sie sich weiter fort und regen die großflächigen Bauteile zu Schwingungen an, die das Geräusch in den Innenraum abstrahlen.

Wesentlich dabei ist, dass den Fahrzeuginsassen praktisch keine Zuordnung zu den Pfaden gelingt. Die Aufgabe des Akustikers besteht indes darin, den Gesamtklang in die Anteile der einzelnen Pfade zu zerlegen, also beispielsweise den Weg des Schalls von einer der Motoraufhängungen zum Lenkrad oder der Sitzschiene etc. zu verfolgen. Das Verfahren, das hierbei eingesetzt wird, ist die so genannte Transferpfadanalyse (Übertragungspfadanalyse). Damit wird am Fahrzeug die Bedeutung der einzelnen Pfade getrennt nach Körper- und Luftschall ermittelt. Im Falle etwa des Körperschalls werden zunächst mit so genannten Impulshämmern oder „Shakern“ die Anbindungspunkte angeregt. Diese sind z. B. die Lagerstellen des Motor-Getriebe-Verbandes sowie die Anbindung

der Abgasanlage. Um die Übertragungsfunktionen zu ermitteln, wird die Antwort mit Beschleunigungsaufnehmern gemessen (Abb. 3). Beim Luftschall werden dagegen spezielle Schallquellen und Mikrofone eingesetzt. Das Ergebnis sind spektrale Übertragungsfunktionen, welche z. B. die Charakteristik vom Eingang Karosserie bis zum Ohr des Insassen beschreiben. Diese Funktionen stellen den Zusammenhang zwischen den wirkenden Kraftgrößen an den Stellen von Eingangs- und Ausgangssignal her. Die Beschleunigungen werden an den Verbindungsstellen zeitgleich in drei Richtungen sowohl vor als auch nach den elastischen Verbindungselementen gemessen. Im Falle des Motor-Getriebe-Verbandes also vor und nach den Gummi-Metall-Lagern. Nach der Differenzbildung der jeweilig zusammengehörenden Komponenten im Zeitbereich erhält man durch zweimalige Integration im Frequenzbereich die Differenzschwingwege an den Einleitungsstellen in drei Richtungen. Indem man diese mit den dynamischen Steifigkeiten des zugehörigen Motorlagers in den Richtungen multipliziert, ergeben sich die für die Pfade wirkenden Kräfte in spektraler Form. Die Steifigkeit eines Motorlagers wird ausgedrückt als Verhältnis der aufgetragenen Kraft

bezogen auf den infolge Verformung zurückgelegten Weg (N/mm). Unter dynamischer Last steigt diese Steifigkeit gegenüber dem statischen/quasistatischen Wert an. Diese Abhängigkeit hängt natürlich vom Hub oder aber vom Nullpunkt, sprich der statischen Vorlast des Bauteils ab. Aber auch die Gummimischung, Geometrie etc. beeinflussen diese Charakteristik. Ab einem Frequenzbereich von ca. 300 bis 400 Hz kommen dann typischerweise die ersten Eigenfrequenzen der Lager hinzu.

Natürlich wäre es viel zu aufwändig, alle existierenden Pfade zu berücksichtigen. Deshalb be-



Abb. 3: Zur Analyse der Pfade, die Körperschall übertragen, werden einzelne Punkte mit speziellen Hämmern angeregt. Die Antwort wird mit Beschleunigungsaufnehmern gemessen.

Psychoakustische Größen

Die Einbindung des menschlichen Hörempfindens in die Klanggestaltung ist für die Fahrzeugakustiker eine Grundvoraussetzung für das Gelingen ihres Projektes. Denn anders als bei einem Mikrofon, das im Idealfall einen linearen Frequenzgang und ein weitgehend neutrales Verhalten im Zeitbereich aufweist, kommen im menschlichen Hörsystem weitere komplizierte Effekte zum Tragen. Als Beispiel hierfür sind der Verdeckungseffekt, die Richtcharakteristik, die das räumliche Hören ermöglicht, sowie der nichtlineare Frequenzgang zu nennen.^{*)} Um diesen Besonderheiten gerecht zu werden, wurden durch aufwändige Versuche mit Testpersonen so genannte psychoakustische Größen entwickelt, die das subjektive akustische Empfinden des Menschen erfassen und möglichst mit objektiven Messgrößen beschreiben:

► Bewertungskurven

Die bekannteste Größe ist die Pegelbewertung der linear erfassten Messgrößen, die den Lautstärkeindruck des menschlichen Gehörs in Abhängigkeit von der Frequenz nachbilden soll. Von den verschiedenen Bewertungskurven hat sich die sog. A-Bewertung durchgesetzt und findet sich in nahezu allen bestehenden Vorschriften und Richtlinien wieder. Die A-Bewertung ist von verschiedenen Bewertungskurven diejenige, deren Annäherung im Automobilbau den menschlichen Frequenzgang am besten trifft. Man erhält den bewerteten Pegel jeweils durch Addition/Subtraktion von dB-Werten zu den gemessenen Werten.

► Lautheit

Anders als die A-Bewertung berücksichtigt das Modell der Lautheit neben der Frequenzabhängigkeit zusätzlich noch weitere Effekte, wie die

Pegelhöhe oder die Maskierung von Geräuschanteilen. Die Lautheit stellt somit ein präziseres Maß für das menschliche Lautstärkeempfinden dar, ist jedoch auch aufwändiger zu ermitteln. Das bekannteste Verfahren ist die Ermittlung der Lautheit nach Zwicker.

► Rauigkeit

Die Rauigkeit beschreibt ein Phänomen, das bei periodischen Hüllkurvenschwankungen mit einer bestimmten Geschwindigkeit (Modulation) auftritt. Der Eindruck der Rauigkeit ist von der Modulationsfrequenz abhängig. Im Gegensatz zur klassischen Definition der Rauigkeit hat man in der Fahrzeugtechnik festgestellt, dass sowohl Träger- als auch Modulationsfrequenzen hier spektral verschoben sind.

► Schwankungsstärke

Wie auch die Rauigkeit, beschreibt die Schwankungsstärke zeitliche Eigenschaf-

ten eines Geräusches. Sie ist ein Maß für periodische Lautstärkeänderungen und wird bei einer Schwankungsfrequenz von etwa 4 Hz am stärksten wahrgenommen.

► Schärfe

Die Schärfe eines Geräusches ist vor allem von dessen Anteil an hochfrequenten Tönen abhängig. Sie ist eine der maßgebenden Größen bei der Bestimmung der Lästigkeit von Störgeräuschen.

► Tonhaltigkeit

Mit der Tonhaltigkeit wird beschrieben, inwiefern ein Geräusch von Einzeltönen dominiert wird, die aus dem Spektrum herausragen. Bei hoher Tonhaltigkeit kann der Zuhörer im Gegensatz zum Rauschen deutlich einen oder mehrere Töne heraus hören, die Lästigkeit des Geräusches wird dadurch im Allgemeinen verstärkt.

^{*)} siehe auch Physik Journal, April 2002, S. 39

schränkt man sich bei diesem Verfahren auf die dominanten Pfade, die sich je nach Fragestellung allerdings unterscheiden können. Für den Gesichtspunkt der Klanggestaltung im Fahrzeuginnenraum kann man sich auf die Luft- und Körperschallpfade von Motor, Getriebe, Ansaug- und Abgasanlage be-

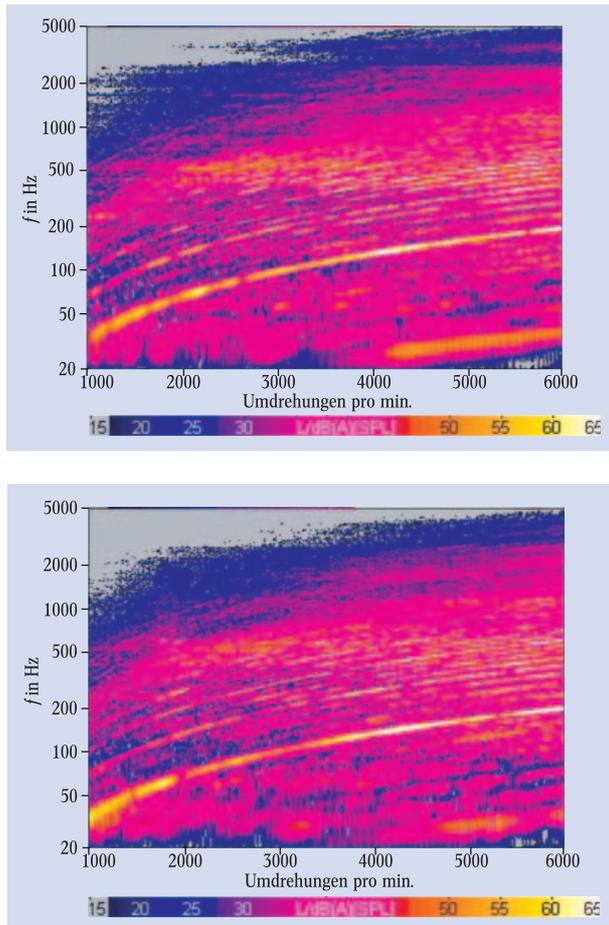


Abb. 4: Die Transferpfadanalyse ermöglicht es, die im Auto wahrgenommenen Geräusche in die Beiträge von einzelnen Übertragungswegen zu zerlegen und im Detail zu reproduzieren, wie der Vergleich von gemessenem (oben) und simuliertem Geräusch (unten) zeigt.

schränken. Wind- und Rollgeräusch müssen bereits in vorhergehenden Entwicklungsschritten auf ein Maß abgesenkt worden sein, dass sie keine entscheidende Rolle mehr spielen.

Alle derzeit angewendeten Verfahren besitzen allerdings noch Schwachstellen: Um etwa den Körperschall untersuchen zu können, muss zumindest ein Teil des Motor-Getriebe-Verbandes von der Karosserie gelöst (manchmal sogar ausgebaut) werden, damit die Anregung mit Hammer oder Shaker an der Verbindungsstelle erfolgen und man an die eigentliche Kraftangriffsstelle gelangen kann. Dies führt aber gleichzeitig zu einer Veränderung

des realen statischen Belastungszustandes. Beim Luftschallanteil kann der Motorraum allenfalls für tiefe Frequenzen idealisierend als Druckkammer betrachtet werden. Für höhere Frequenzen dagegen gewinnen die Positionen der Teilschallquellen, die zugehörigen Übertragungsfunktionen, Nahfeldeffekte und Schwingungsmoden im Motorraum an Bedeutung. Neben der Schwierigkeit, die dynamische Steifigkeit der Bauteile im Bereich oberhalb 200 Hz aussagekräftig zu ermitteln, fehlen zudem bei den ganzen Betrachtungen derzeit die Kopplungen und Rückwirkungen der Raumrichtungen ebenso wie die der verschiedenen Lagerstellen untereinander. Trotz der Schwachstellen ist die Übereinstimmung und die Aussagekraft der Ergebnisse so hoch, dass sich die Transferpfadanalyse als Verfahren durchgesetzt hat. Beim Körperschall wendet man die Methode bis ca. 2 kHz, beim Luftschall bis ca. 8 kHz an, was für beide Mechanismen die wesentlichen akustischen Bereiche abdeckt.

Abbildung 4 demonstriert die Aussagekraft der Methode. Die als Campbell-Diagramm bezeichnete Art der Darstellung zeigt das Spektrum über der Drehzahl, wobei die farbliche Abstufung als dritte Dimension den Pegel charakterisiert. Die Abbildung zeigt oben das mit einem Kunstkopf gemessene Signal im Innenraum eines Fahrzeugs für das linke Ohr. Im unteren Bildteil sind zum Vergleich die Innengeräusche als Ergebnis der Überlagerung aller gemessenen Körper- und Luftschallpfade im Vergleich dargestellt. In diesem Fall handelt es sich um die Körperschallanteile über die Lagerung des Motor-Getriebe-Verbandes und der Abgasanlage, sowie die Luftschallanteile über die sechs Motorseiten, die beiden Mündungen von Ansaug- und Abgasanlage, die Schallabstrahlungen von Luftfilter, Katalysator, Mittel- und Nachschalldämpfern. Wie deutlich zu

erkennen ist, wird die wesentliche Charakteristik des real vorliegenden Geräuschmusters (oben) durch die Überlagerung der gemessenen Anteile (unten) wiedergegeben, das heißt, zunächst hat man das ursprünglich gemessene Geräusch nur reproduziert. Doch damit ist das Problem der Gestaltung des Gesamtklangbildes auf die gezielte Änderung einzelner Schallpfade „heruntergebrochen“. Nun lässt sich der Klang des Automobils in Richtung des Zielklanges manipulieren.

Der Motor-Getriebe-Verband, der im Allgemeinen den Hauptanteil am Innengeräusch trägt, ist so zu konstruieren, dass er einerseits leise und auf jeden Fall frei von Störgeräuschen wie Heulen, Pfeifen oder Klopfen ist. Andererseits sollte er die Klangkomponenten im Geräusch besitzen, die dem Fahrzeug die gewünschte Grundcharakteristik verleihen. So haben z. B. mechanische Klanganteile, die primär vom Kurbeltrieb und vom Ventiltrieb herrühren, aufgrund der zugrunde liegenden Stoßcharakteristik ein überaus breitbandiges Spektrum. Kann man sie in der Anregung zeitlich strecken und an den Anregestellen so gut als möglich dämpfen, um insbesondere für den lastfreien Betrieb (Fuß vom Gas, schieben lassen), wo der mechanische Geräuschanteil dominiert, ein angenehmes Klangbild zu erzielen, so hat man eines der wesentlichen Kernelemente der Klanggestaltung

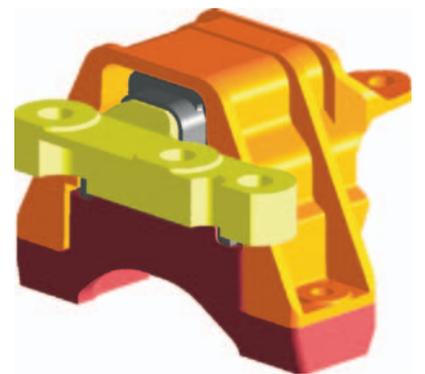
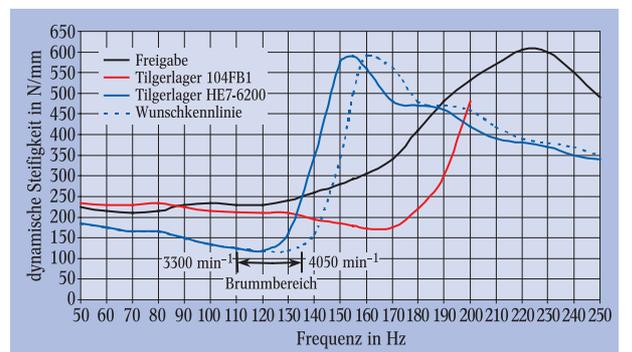


Abb. 5: Durch Änderungen an der Gummifeder eines Motorlagers (oben) lassen sich die elastischen Eigenschaften des Lagers und damit sein Beitrag zum Gesamtgeräusch gezielt modifizieren (unten).



am Motor-Getriebe-Verband erfüllt.

Den luftführenden Ansaug- und Abgasanlagen kommt neben dem Motor-Getriebe-Verband die dominante Rolle zu, um auf der Klaviatur der Klanggestaltung zu spielen. Etwa mit gezielt eingesetzten Resonatoren, die bei ihrer Eigenfrequenz eine deutlich überhöhte Abstrahlung verursachen, je nach Motordrehzahl angeregt durch die verschiedenen Grundordnungen des Motors, die sich in dem dynamischen Luftstrom als akustische Wellen wiederfinden. Aber auch semiaktive Systeme, primär Schaltklappen, die über Unterdruck oder elektrisch angesteuert werden, sind heute im Einsatz – entweder innerhalb von Schalldämpfern oder extern, um Endrohre zu- oder abzuschalten. Auch bietet sich der Weg einer Modifikation z. B. an einem Motorlager, sprich seiner dynamischen Steifigkeit an (Abb. 5). Die Abbildung zeigt einen deutlichen Steifigkeitsabfall im gekennzeichneten Frequenzbereich, der durch eine Änderung der Gummifeder erreicht wurde. Dies hat zur Folge, dass die Kräfte, die in die Karosserie eingeleitet werden, um den gleichen Faktor absinken – da die Weggrößen nahezu unverändert bleiben – und damit der Innengeräuschpegel der zweiten Motorordnung dieses Pfades deutlich abfällt. Handelt es sich beim modifizierten Körperschallpfad um einen der dominanten Pfade, lässt sich damit die zweite Ordnung im Innenraum deutlich beeinflussen.

Manipulationen sind allerdings nur in einem bestimmten Rahmen möglich. So setzen gesetzliche Vorschriften für das Außengeräusch einer beliebigen Steigerung der Luftschallanteile eine Grenze – auch wenn man dies im täglichen Leben bei dem einen oder anderen Fahrzeug nicht glauben würde. Und im Zuge von Montagevorgaben sind Modifikationen oft nur in bestimmtem Rahmen möglich. Auch die Kosten und die hohen Lebensdauerforderungen der Automobilindustrie begrenzen häufig die Umsetzung in ein Serienprodukt, weshalb viele Ideen heute noch im Laborstatus verharren.

Mit den auf dem Markt befindlichen Kunstkopfaufnahme- und -analysesystemen stehen den Akustikern heute hervorragende Werkzeuge zur Verfügung. Ein Großteil der Akustikanforderungen lässt sich hiermit im Labor bearbeiten. Mit

der Transferpfadanalyse besitzen die Akustiker darüber hinaus ein Verfahren, um die das Innengeräusch eines Fahrzeugs dominierenden Geräuschpfade messtechnisch zu erfassen und somit das Innengeräusch in seine Einzelanteile zu zerlegen. Durch die Kombination beider Werkzeuge ist fast eine beliebige Veränderung der Klänge im Labor möglich, womit eine gezielte Klanggestaltung für das Innengeräusch sowie eine Aussage, welche Auswirkungen das auf die einzelnen Anteile hat, möglich wird. In nahezu allen Firmen und in gemeinsamen Forschungsprojekten wird an einer weiteren Verbesserung der Vorgehensweise gearbeitet. So beschäftigt sich ein Vorhaben mit der messtechnischen Erfassung der hochfrequenten Steifigkeiten von Gummi-Metall-Teilen. In einem anderen Projekt wird versucht, die Kopplungen und Rückwirkungen quantitativ und qualitativ zu erfassen. Für die Zukunft ist eine stärkere Einbindung der Computersimulation in die Thematik erforderlich, um einen möglichst großen Teil der Betrachtungen schon in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung durchführen zu können, in der noch keine „Hardware“ zur Verfügung steht. Mittelfristiges Ziel ist die komplette Einbindung der Geräuschgestaltung in den Prozess der Virtual Reality.

Literatur

- [1] *Zwicker/Fastl*, Psychoacoustics – Facts and Models, (Springer 1990)
- [2] *Ernster*, A Case Study: Allocation of Structure Borne Coarse Road Noise, GM internal Report (1998)
- [3] *Wyckaert/Brughmans/Zhang/Du-pont*, Hybrid Substructuring for Vibro-Acoustical Optimization, SAE 971944 (1997)
- [4] *Wiesner/Bernhard/Kessner*, Powertrain Noise Allocation & Synthesis Model, ACC Congress (2001)
- [5] *Sottek*, Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichen Gehör, Dissertation RWTH Aachen (1993)
- [6] *Genuit/Xiang*, Binaural 'Hybrid' Model for Simulation of Engine and Wind Noise in the Interior of Vehicles (SAE 1997)
- [7] *Bernhard/Hermann/Schmidt*, Gestaltung des Powertrains für den Opel Brand Sound unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Positionierung der Fahrzeugpalette, 23. Wiener Motorensymposium 2002, Band 1, S. 179–196