

Klopfen, Streichen, Kratzen – Messmethoden zur Bestimmung der akustischen Berührungsempfindlichkeit von Bauteilen für den Fahrzeug-Innenraum

Michael Haverkamp

Ford Werke GmbH, 50735 Köln, E-Mail: mhaverka@ford.com

Einleitung

Die multisensorische Qualitätsanmutung von Bauteilen im Fahrzeuginnenraum ist von großem Einfluss auf die Attraktivität und die wahrgenommene Zuverlässigkeit des Produktes. Geräusche, die beim Berühren von Oberfläche entstehen, beeinflussen dabei auch die visuelle und taktile Wahrnehmung. Aus diesem Grund prüfen Kaufinteressierte die Materialqualität nicht selten durch Geräusche, die sie beim Streichen mit den Fingern oder durch Klopfen anregen.

Obwohl die erzeugten Geräusche in der Regel eine geringe Lautheit von wenigen *Sone* aufweisen, vermitteln sie Merkmale guter oder schlechter Qualität von Material, Bauteilstruktur und Textur. Hinzu kommen Aspekte der Befestigung und die Interaktion mit benachbarten Strukturen, die zu sekundärem Störschall und zur Schallabstrahlung über weitere Bauteile führen können.

Standardisierte Messverfahren für Berührungsgerausche sind bislang nicht verfügbar. Schwierigkeiten bereitet insbesondere die individuelle Variabilität beim manuellen Überstreichen von Oberflächen. Zur mechanischen Anregung solcher Geräusche sind verschiedene Verfahren denkbar. Die geringe Intensität des zu messenden Schalls erschwert allerdings den Einsatz elektromechanischer Vorrichtungen. Darüber hinaus ist eine standardisierte Normalkraft aufzubringen. Besondere Schwierigkeiten ergeben sich für Messungen an gekrümmten Flächen beliebiger Orientierung, wie sie in Fahrzeugen typisch sind.

Etwas einfacher gestaltet sich die Beurteilung der Klopfempfindlichkeit über die Bestimmung von Noise Transfer Functions (NTFs). Dazu existieren bereits Verfahren mit guter Reproduzierbarkeit.

Im Folgenden werden Messverfahren zur Bestimmung der akustischen Sensitivität von Oberflächen diskutiert. Anhand verschiedener Projekte ergibt sich ein Überblick über Möglichkeiten und Grenzen vorhandener Methoden und den zukünftigen Entwicklungsbedarf.

Streichen über Oberflächen

In der Vergangenheit konnten die Geräuschanteile zahlreicher Schallquellen im Fahrzeug deutlich reduziert werden. Dies ist vermehrten Anstrengungen im Bereich der Fahrzeugakustik ebenso zu verdanken wie technologischen Änderungen, z.B. der Umstellung des Antriebs von Verbrennungsmotoren hin zu elektrischen Antrieben. Dies hat auch zur Folge, dass relativ leise Geräusche nun stärker in den Vordergrund treten. Damit gewinnen auch die Geräusche an Bedeutung, die beim Berühren von Oberflächen entstehen. Diese Geräusche können die

haptische bzw. multisensorische Qualitätsanmutung beeinträchtigen, wenn sie etwa rau oder unangenehm klingen, oder eine auffällige Lautheit aufweisen [1, 2, 3]. Geräusche angehobener Lautheit entstehen unter anderem beim Streichen über das Lenkrad. Die taktile empfundene Rauheit von Oberflächen wird durch ein Berührungsgerausche großer auditiver Rauigkeit verstärkt [4, 5]. Generell wird die wahrgenommene Authentizität von Materialien und Bauteilen durch Sinneseindrücke beeinträchtigt, die als unpassend empfunden werden [6].

Für die Produktgestaltung im Automobilbereich ist darüber hinaus bedeutsam, dass Berührungsgerausche von potentiellen Kunden zum Prüfen der Qualität von Oberflächen und Baugruppen bewusst angeregt werden. Die Ikonizität des Geräusches dient dabei der Materialidentifizierung [7] und zur Detektion möglicher Schwachstellen. Bei Bedienelementen können neben funktionalen auditiven Feedbacks auch die Berührungsgerausche die wahrgenommene Verlässlichkeit der Funktion unterstützen. Alle im Fahrzeug wahrnehmbaren Geräusche müssen sich harmonisch („passend“) und plausibel in den multisensorischen Gesamtzusammenhang einfügen [8]. Im Idealfall ist daher die systematische Gestaltung aller Schallquellen essentieller Teil eines kundenbezogenen Produktdesigns [9].

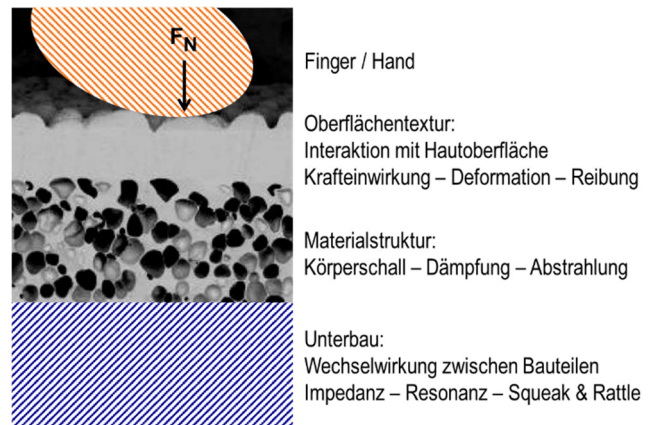


Abbildung 1: Wechselwirkung zwischen Finger/Hand und Bauteil. Dargestellt ist ein mikroskopischer Schnitt durch ein Vinyl-Material.

Abbildung 1 verdeutlicht die Entstehung von Schall beim Überstreichen einer Oberfläche. Die Anregung erfolgt über die Interaktion zwischen Finger bzw. Hand und Textur. Die Normalkraft bewirkt eine Deformation der Haut sowie – bei weichen Strukturen – der Oberfläche. Bei Bewegung in Flächenrichtung wirkt eine Gleitreibung, die von Material und Textur beeinflusst wird. Dabei entsteht im Material Körperschall, der am Ort der Anregung und in benachbarten

Bereichen des Bauteils abgestrahlt wird. Der Grad der Schallausbreitung wird durch die Materialdämpfung wesentlich mitbestimmt. Hinzu treten Wechselwirkungen mit dem Unterbau, angekoppelten Luftschallfeldern (wie Hohlraumresonanzen) und benachbarten Bauteilen.

Neben der Geräuschabstrahlung am Anregungsort selbst sind die Abstrahleigenschaften in der Umgebung der Anregung bedeutsam.

Die Aufnahme der Messdaten von Berührungsgeräuschen ist einfach möglich. Hierzu genügt häufig ein einzelnes Mikrofon oder ein Kunstkopf. Ein niedriger Pegel des Hintergrundgeräusches ist dabei Voraussetzung. Die Problematik liegt in der Erzeugung einer genau definierten und reproduzierbaren Anregung. Dazu wird eine Testmechanik benötigt, die mit konstanter Normalkraft einwirkt und reproduzierbare Reibung bei gleichmäßiger Streichgeschwindigkeit erzeugt.

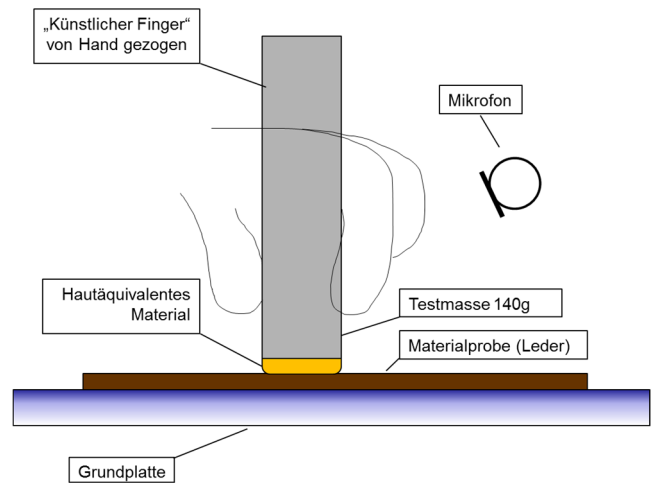


Abbildung 2: Einfache Vorrichtung zur Anregung von Berührungsgeräuschen [11].

Konzepte zur standardisierten Anregung

Das wichtigste Element eines Messverfahrens für Berührungsgeräusche ist eine Vorrichtung zur definierten und reproduzierbaren Anregung des Geräusches auf der zu prüfenden Oberfläche. Dazu wird ein Prüfkörper mit einem geeigneten Kontaktmaterial über die Oberfläche bewegt. Die folgenden Grundvoraussetzungen sind dabei zu erfüllen:

- Konstante Normalkraft zur Erzeugung definierter Reibung
- Kontaktmaterial mit reproduzierbarer Reibung
- Konstante Streichgeschwindigkeit
- Sehr geringes Nebengeräusch beim Bewegen des Prüfkörpers
- Gute Reproduzierbarkeit der Anregung

Die genannten Anforderungen sind auf ebenen, waagerechten Flächen erfüllbar. Wenn die Anregung allerdings im Fahrzeuginnenraum einsetzbar sein soll, kommen diffizile Bedingungen hinzu. Ein geeignetes Verfahren muss dann:

- an gekrümmten Proben anwendbar sein,
- für beliebige Orientierung der Oberfläche geeignet sein, sowie
- in verwinkelten Bereichen einsetzbar sein.

Ein erster Ansatz zur Anregung ebener, waagerechter Flächen wurde mit Hilfe des in Abbildung 2 dargestellten „künstlichen Fingers“ realisiert [10, 11]. Die konstante Normalkraft entsteht durch eine Masse, die von Hand über die zu prüfende Oberfläche gezogen wird. Als Kontaktmaterial eignet sich Nubukleder, das Eigenschaften aufweist, die der menschlichen Haut entsprechen.

Obwohl von alltäglicher Relevanz, ist das reproduzierbare Anregen von Berührungsgeräuschen keine simple Aufgabe. Es sind jedoch verschiedene Prinzipien denkbar, mit denen das definierte Überstreichen einer Oberfläche realisierbar erscheint. Um einen Überblick über Wirkmechanismen, Realisierungsaufwand und Designkonzepte zu gewinnen, wurden mögliche Lösungen im Rahmen eines Hochschulprojekts erarbeitet. Das Projekt wurde im Wintersemester 2016/17 von Studenten des Studiengangs Produktdesign und Prozessentwicklung an der TH Köln durchgeführt [12]. Abbildung 3 zeigt als Beispiel für die konstruktiven Möglichkeiten ein Pendel, das eine definierte, allerdings kurzzeitige Anregung bewirkt. Die Vorrichtung benötigt keinen Antrieb, vermeidet daher auch entsprechende Nebengeräusche. Mit dem Ausschwingen des Pendels reduziert sich die Geschwindigkeit jedoch kontinuierlich. Darüber hinaus stellt die Justierung der Normalkraft eine besondere Herausforderung dar. Trotz dieser Einschränkungen wurde die Vorrichtung praktisch realisiert – sie befindet sich zurzeit im Probetrieb.

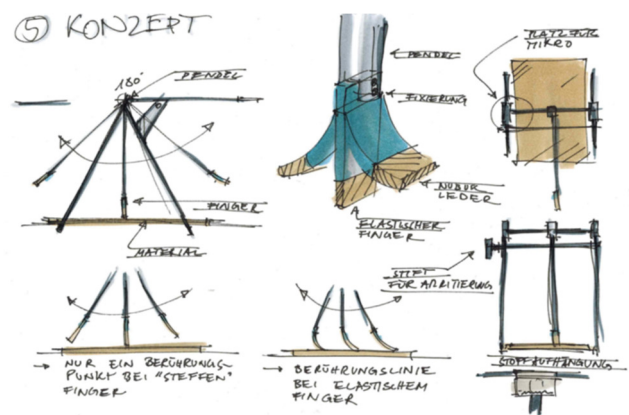
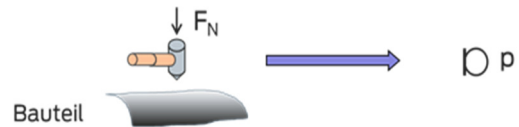


Abbildung 3: Konstruktiver Entwurf für die Streichgeräusch-anregung mit einem Pendel [12].

Andere Wirkmechanismen, wie etwa Anregungen über rotierende Scheiben oder Rollen, benötigen einen elektromechanischen Antrieb. Dieser Antrieb muss extrem geräuscharm arbeiten; Auswahl und Schallisolierung stellen eine besondere Herausforderung dar.



Manuelle Anregung

Wenn eine Vorrichtung zur reproduzierbaren Anregung von Berührungsgläuschen nicht verfügbar ist - dies ist zurzeit für gekrümmte sowie vertikal orientierte Flächen der Fall, kann die Schallerzeugung natürlich auch durch reale Berührungen mit Finger oder Hand erfolgen. Dabei ist jedoch die große interindividuelle Variabilität zu beachten. So unterscheiden sich die von verschiedenen Personen aufbrachten Normalkräfte und Streichgeschwindigkeiten ebenso wie das Reibungsverhalten und die Feuchtigkeit der Haut. Daher müssen mehrere Testpersonen eingesetzt werden, um den zu erwartenden Streubereich der Anregung abzudecken. Somit ist das Vorgehen hier entgegengesetzt zu psychometrischen Versuchen, bei denen die Stimulierung konstant, die Reaktionen im Versuchspersonenkollektiv jedoch variabel ist.

Im Gegensatz zur Anregung ist die Messung einfach und sehr gut reproduzierbar – sie kann mit einem herkömmlichen Messsystem erfolgen. Die aufgezeichneten Geräusche werden hinsichtlich der Lautheit sowie weiterer psychoakustischer Größen, wie Rauigkeit und Schärfe, ausgewertet und statistisch analysiert. Varianz und Reproduzierbarkeit der Anregung lassen sich durch ein Training der Testpersonen sowie die standardisierte Vorbereitung der Hände verbessern.



Abbildung 4: Messung der NTF für den Klopfest. Anregung mit Impulshammer, Messung an vier Ohrpositionen und mit dem Kunstkopf.

Die Auswertung erfolgt schmalbandig, in Terzen, oder als Einzahlwert, der durch energetische Summierung aller Frequenzanteile gebildet wird. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis der Untersuchung des Dachhimmels zweier Fahrzeuge an fünf Orten der Anregung für jeweils vier Mikrofonpositionen. Der Einzahlwert bietet den Vorteil schneller Vergleichbarkeit der Gesamtempfindlichkeit der Bauteile. Resonanzeffekte müssen zusätzlich durch schmalbandige Analyse erfasst werden.

Bei der Anwendung des Verfahrens zeigte sich, dass die Bestimmung der Klopfempfindlichkeit der Bauteile des Innenraums über NTFs eine geeignete Methode für Optimierung und Vergleich von Fahrzeugen darstellt. Das Verfahren ist daher auch für das Benchmarking interessant.

Klopfest

Die akustische Antwort eines Innenbauteils auf ein Klopfen mit Fingern oder Fingerknöcheln kann als *Noise Transfer Function NTF* bestimmt werden. Dazu wird ein Impulshammer verwendet, der mit Hilfe einer eingebauten Kraftmessdose eine Messung der anregenden Normalkraft erlaubt (Abb. 4). Mit dem Impulshammer lässt sich eine Anregung erzeugen, die zum Klopfen mit der Fingerspitze vergleichbar ist.

Die Messung des abgestrahlten Schalls erfolgt mit Mikrofonen an der jeweils äußeren Ohrposition von Fahrer und Fahrgästen, oder mit dem Kunstkopf.

Die NTF wird als Quotient des gemessenen Schalldrucks p und der anregenden Normalkraft F_N gemäß Gleichung (1) bestimmt:

$$NTF = p / F_N \quad [\text{Pa} / \text{N}] \quad (1)$$

So wird der abgestrahlte bzw. gemessene Schall auf die anregende Kraft normiert. Das Messergebnis ist daher sehr gut reproduzierbar, solange sich die mitschwingenden Bauteile annähernd linear verhalten.

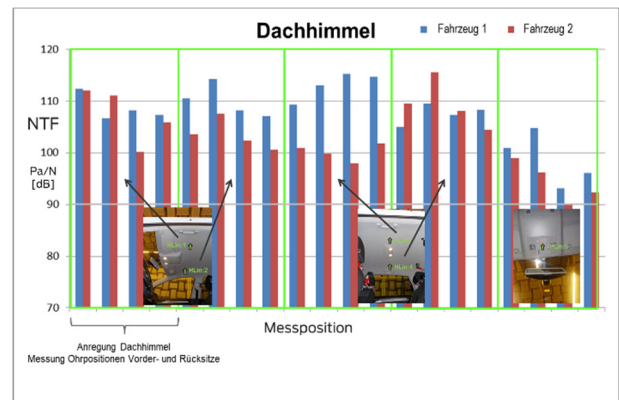


Abbildung 5: Ergebnisse des Klopfests am Dachhimmel. Vergleich der NTFs zweier Fahrzeuge als energetische Summe im Frequenzbereich 22-1780 Hz.

Die Ergebnisse der Messung beinhalten:

- Empfindlichkeit der Bauteile gegenüber Anregung von Körperschall
- Schallabstrahlung und Ausbreitung zum Ohr
- Bauteil- und Hohlraumresonanzen
- Sekundärschall

Zusätzlich werden die ikonischen Geräuschanteile subjektiv über das Abhören der Kunstkopfsignale beurteilt.

Ein Nachteil des Verfahrens ist die Forderung nach weitgehender Linearität der angeregten Strukturen. Gerade das hörbar nichtlineare Verhalten ist für den potentiellen Kunden, der eine Oberfläche durch Klopfen untersucht, ein besonderes Indiz für unzureichende Qualität. Dazu gehören

- das Aneinanderschlagen benachbarter Bauteile,
- trockene Reibung, sowie
- Stick-Slip-Verhalten als periodischer Wechsel zwischen Haft- und Gleitreibung.

Zur Entdeckung derartiger, sekundärer Störeffekte müssen die Mikrofon-signale abgehört und nach charakteristischen Merkmalen untersucht werden. Hinweise auf nichtlineare Eigenschaften liefert auch ein Vergleich der NTFs, die sich an einer Position bei Anregung mit unterschiedlicher Normalkraft ergeben.

Schlussfolgerung

Berührungsgerausche sind alltägliche Phänomene, die die Wahrnehmung allgegenwärtig beeinflussen. Obwohl auch Aspekte von Produkten, insbesondere die haptische Anmutung, dadurch beeinflusst werden, sind diese Geräusche in Schallphysik und Psychoakustik bislang weitgehend unbeachtet geblieben. Aus diesem Grund gibt es bislang kein marktreifes Messsystem, das eine reproduzierbare Anregung ermöglicht, die dem realen Überstreichen mit Hand oder Fingern entspricht. Für Oberflächen im Fahrgastraum mit beliebiger Orientierung und vielfachen Krümmungen empfiehlt sich nach wie vor die Messung realer Berührungsvorgänge. Aufgrund der starken interindividuellen Streuung ist zur Anregung allerdings ein Versuchspersonenkollektiv erforderlich. Die Messergebnisse erfordern statistische Analysen.

Einfache Verfahren für flache, waagerechte Materialproben können mit einer manuell bewegten Prüfmasse realisiert werden. So ist eine konstante Normalkraft realisierbar; Antriebsgeräusche entfallen.

Generell können Streichgeräusche auf Grundlage sehr verschiedener Prinzipien realisiert werden, so z.B. durch longitudinal bewegte, rotierende oder pendelnde Prüfkörper. Ein elektromechanischer Antrieb dazu muss extrem geräuscharm arbeiten. Im Rahmen akustischer Untersuchungen ist es auch möglich, ein Robotersystem zum Abtasten der Oberflächen im Fahrzeuginnenraum einzusetzen. Derartige System werden bereits zum Ermitteln haptischer Messgrößen vielfach verwendet. Die Antriebsgeräusche stellen jedoch auch dabei das Hauptproblem dar. Eine geräuschmindernde Ummantelung des Roboterarms muss flexibel sein, um Bewegungsfreiheit zu gewährleisten. Zudem dürfen keine zusätzlichen Störgeräusche auftreten. Der Aufwand für den Einsatz speziell lärmgeminderter Roboter ist generell sehr hoch.

Wenig messtechnische Probleme bereitet die Simulation von Klopfgeräuschen mit dem Impulshammer. Über NTFs kann die Sensitivität von Innenbauteilen in Bezug auf die

Schallabstrahlung einfach und reproduzierbar bestimmt werden. So lassen sich sowohl die Lautheit der Klopfgeräusche, als auch nichtlineare Effekte und Sekundärschall zielgerichtet minimieren.

In Zukunft werden Berührungsgerausche zunehmendes Interesse finden und im Entwicklungsprozess systematische Optimierung erfahren, so wie es ihnen als wichtiges Element der multisensorischen Anmutung von Produkten zukommt.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Stefan Erdmann, den Kolleginnen Anja Moos, Nora Wolfsheim und Bettina Fricke (Ford Werke GmbH - Multisensuelle Harmonisierung bzw. Vehicle NVH) sowie den beteiligten Studentinnen und Studenten im Studiengang Produktdesign und Prozessentwicklung der TH Köln unter Leitung der Professoren Hans Rühmann und Wolfgang Laubersheimer.

Literatur

- [1] Klatzky, R.L., Pai, D.K., Krotkov, E.P.: Perception of Material from Contact Sounds. *Presence*, Vol. 9, No. 4, 2000, 399-410, doi:10.1162/105474600566907
- [2] Spence, C., Zampini, M.: Auditory Contribution to Multisensory Product Perception. *Acta Acustica united with Acustica* 92 (2006), 1009-1025
- [3] Haverkamp, M.: Effects of Material Touch Sounds on Perceived Quality of Surfaces. *SAE Technical Paper 2017-01-0495*
- [4] Guest, S., Catmur, C., Lloyd, D., Spence, C.: Audiotactile Interactions in Roughness Perception. *Experimental Brain Research*, 146, 2002, 161-171
- [5] Altinsoy, E. *Auditory-Tactile Interaction in Virtual Environments*. Shaker, Aachen, 2006
- [6] Haverkamp, M., Moos, A.: Multisensory Contributions to Perceived Quality and Authenticity of Materials for the Vehicle Interior. *SAE Technical Paper 2017-01-0494*
- [7] Chion, M. *Audio-Vision. Sound on Screen*. Columbia University Press, New York, 1994
- [8] Haverkamp, M.: Advanced Description of Noise Perception by Analysis of Cross-sensory Interactions within Soundscapes. *Noise Control Eng. J.* 58 (5), 2010, 540-550
- [9] Haverkamp, M. *Synesthetic Design. Handbook for a Multi-Sensory Approach*. Birkhäuser, Basel, 2012
- [10] Erdmann, S. *Entwicklung eines Messverfahrens zur Optimierung von Berührungsgerauschen*. Cologne University of Applied Science, 2013
- [11] Haverkamp, M., Erdmann, S.: Ein Beurteilungs-verfahren für den Einfluss von Berührungsgerauschen auf die Wahrnehmung der Materialqualität. *Fortschritte der Akustik, DAGA 2014*, 519-520
- [12] TH Köln: *Multisensorische Wahrnehmung von Oberflächen und Bedienelementen*. Projekt-Dokumentation, Produktdesign und Prozessentwicklung, 2017