

Das Ganze und seine Teile

Komponentenentwicklung versus Gesamtfahrzeug-Akustik

Michael Haverkamp

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

Einleitung

Für die Akustikentwicklung von Fahrzeugen ist es wesentlich, die Geräuschsituation am Gesamtfahrzeug kundenorientiert zu optimieren. Mit Hilfe detaillierter Berechnungen und Messungen auf Komponentenprüfständen gelingt es, das isolierte Verhalten einzelner Aggregate recht genau zu bestimmen. Im nächsten Schritt gilt es, die akustische Interaktion innerhalb von Baugruppen sowie nach dem vollständigen Zusammenbau vorherzusagen und möglichst frühzeitig in die Entwicklung einzubeziehen. Das Vorgehen wird jedoch durch den *Holismus* des Gesamtsystems erschwert: während das Fahrzeug aus dem Zusammenbau einer Summe von Teilen entsteht, können die akustischen Eigenschaften des Ganzen keineswegs als simple Zusammenstellung der isolierten Eigenschaften aller Komponenten abgeleitet werden. Dies wird u. a. verursacht durch variable und/oder unbekannte Anschlussimpedanzen zwischen Bauteilen, Nichtlinearitäten, Instabilitäten, äußere Einflüsse sowie die Interaktionen räumlich entfernter Komponenten. Betrachtet man zusätzlich die Wirkung des Systems Fahrzeug auf den Kunden, so stehen sich zwei holistische Systeme gegenüber: das physikalisch-technische System und das der menschlichen Wahrnehmung. Auch die Wahrnehmung weist ein Holismusproblem der objektiven Beschreibung auf, denn auch das, was wahrgenommen wird, ist nicht als einfache Summe der aufgenommenen Reize erklärbar.

Holismus komplexer technischer Systeme

Der Begriff Holismus (von gr. *hólos* = ganz) wurde von Jan Christian Smuts mit Bezug auf naturphilosophische Systembetrachtungen gebildet [1]. Die Grundthese findet sich bereits bei Aristoteles: *Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile*. Der Begriff wurde auf verschiedene Fachbereiche übertragen: wie z.B. auf soziologische, wirtschaftliche und linguistische Systeme. In diesem Beitrag wird die Übertragbarkeit des Begriffs auf technische Systeme an Beispielen untersucht. Der Holismus komplexer technischer Systemen bewirkt, dass das Ganze (das Produkt) grundsätzlich mehr oder zumindest etwas anderes darstellt als die reine Summe seiner Komponenten und deren Beiträge. Abbildung 1 verdeutlicht das holistische Prinzip: Mehrere Körper bilden hier mehr als nur eine Gruppe von Menschen. Sollte ein System dagegen genau aus der Summe der Beiträge seiner Elemente erklärbar sein, wäre sein Verhalten *reduktionistisch*. Ein Fahrzeug stellt ein in sich geschlossenes Gesamtsystem dar, das jedoch seinerseits Teil größerer Systeme ist, wie des Verkehrssystems, der Volkswirtschaft und des sozialen Gefüges. Es bildet im größeren Zusammenhang ein *Holon* – ein Begriff, der von Arthur Koestler geprägt wurde [2].

Wird die Akustik des Fahrzeugs als Bündel von Eigenschaften eines holistischen Systems verstanden, so ist die beobachtete Ambivalenz zwischen Komponenten und Gesamtsystem erklärbar: Weder lässt sich das Ganze anhand seiner Teile allein vollständig beschreiben (Komponentenakustik \Rightarrow Gesamtfahrzeug), noch das Gesamtverhalten einfach auf die Teile herunterbrechen (Fahrzeug-NVH \Rightarrow Komponenten). Nichtlinearitäten, nicht bekannte Störgrößen, nicht erwartete Einflüsse sowie nicht messbare Kombinationswirkungen tragen zum Holismus der Fahrzeugakustik bei [3].



Abbildung 1: Visuelles Beispiel eines Holismus. Graphik von Ichiyusai Kuniyoshi (1797-1861).

Körperschall & Luftschall

Um die Entstehung und Ausbreitung von Körperschall im Fahrzeug genauer verstehen und optimieren zu können, wäre es notwendig, die Ausbreitung akustischer Energie genau zu erfassen. Dazu genügen Messungen der Beschleunigung jedoch nicht, denn neben einer Bewegungsgröße muss auch eine Kraftgröße exakt bestimmt werden. Es ist notwendig, die mechanische Struktur an wichtigen *Schnittstellen* aufzutrennen und einen Kraftsensor einzufügen. Dabei ändert sich die gesamte Geometrie, und die Schallübertragung findet nur noch punktuell statt. Der verwendete Sensor muss es zudem erlauben, eine realistische Vorspannung aufzubringen. Die Messung von Beschleunigung und Kraft muss in drei Raumrichtungen exakt phasenrichtig erfolgen, da andernfalls die Wirkleistung nicht präzise bestimmbar ist. Aus den genannten Gründen ist es nahezu unmöglich, die übertragene Körperschallleistung annähernd genau zu bestimmen. In einfachen Fällen ist die Energiemessung allerdings nützlich, insbesondere, wenn der anregende Körperschall in Relation zum abgestrahlten Luftschall gesetzt wird. Die von Aggregaten abgestrahlte Luftschallleistung lässt sich in geeigneten Messräumen im Fernfeld recht genau bestimmen. Die Richtcharakteristik wird dabei jedoch nur grob erfasst, oder ganz vernachlässigt. Zudem verändert die Einbausituation im Fahrzeug die

Verhältnisse der Abstrahlung wesentlich. Das Gleiche gilt für die Bestimmung der Luftschalleistung, die durch Karosseriebauteile übertragen wird. Das Problem der Übertragbarkeit von Bauteilergebnissen auf das ganze Fahrzeug wird durch Verfahren wie Transfer Path Analysis (TPA) und Panel Contribution Analysis (PCA) umgangen, die unmittelbar am Gesamtsystem ansetzen. Die Auflösung wird jedoch durch die naturgemäß endliche Zahl von Messaufnehmern begrenzt. Hier besteht die Herausforderung in der Rückbrechung der Ergebnisse auf das Verhalten isolierter Komponenten.

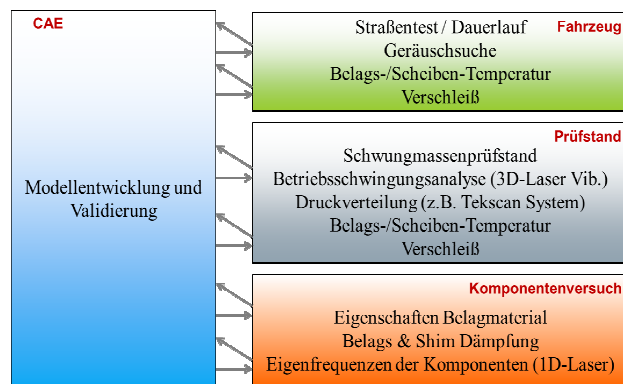


Abbildung 2: Relation der Methoden zur Minimierung von Bremsengeräuschen (Beispiele).

Instabilität – Bremsengeräusch

Durch vollständige Eliminierung der Systemdämpfung bzw. aktive Verstärkung kann eine Instabilität an der Bremse zu sehr hohen Geräuschpegeln führen. Wegen der physikalischen Komplexität der Phänomene können Bremsengeräusche nur im Zusammenspiel von Komponentenmessung (modal), Prüfstand und Fahrzeug mit rechnerischer Simulation (CAE, CEA) minimiert werden (Abb. 2). Schon die Bestimmung und Separation der Eigenmoden der Bauteile einer Trommelbremse kann nur sehr bedingt zu einer Beschreibung des Gesamtverhaltens dienen. Dies wird durch zahlreiche Betriebsparameter und deren Kombinationen beeinflusst, die auf Prüfstand und Straße über mehrere tausend Bremsungen durchzuspielen sind. Es gilt, dem System alle im praktischen Betrieb möglichen Kombinationen von Parametern zu präsentieren, um Robustheit vor Instabilitäten nachzuweisen. Auch die langfristige Vorgeschichte des Systems (Verschleiß, Verschmutzung etc.) sowie die momentane Änderung, wie die auf- oder absteigende Flanke des Temperaturverlaufs, beeinflussen das Auftreten von Geräuschen. Daher lassen sich Moden, die zu Instabilitäten neigen, rechnerisch mittels einer nichtlinearen, Komplexen Eigenwertanalyse (CEA) nur dann realistisch vorhersagen, wenn das Eigenverhalten der Komponenten hinreichend genau beschrieben ist und z.B. auch thermische Verformungen und ungleichmäßigen Verschleiß berücksichtigt.

Holismus der Produktwahrnehmung

Verschiedene Phänomene der Schallwahrnehmung weisen ebenfalls auf holistische Systemeigenschaften hin.

Schwebungen, Kombinationstöne und Maskierungseffekte können bereits auf der sensorischen Ebene als Summe einzelner Reaktionen auf Reize nicht erklärt werden. Interaurale Einflüsse können so auch als binauraler Holismus gedeutet werden. Temporal Masking zeigt, dass reine Additivität auch für zeitlich nachgeordnete Reize nicht vorausgesetzt werden kann.

Holismus zeigt sich auch darin, dass Wahrnehmung stets multisensuell erfolgt: Ein Phänomen der Wahrnehmung ist nicht einfach die Summe aller Beiträge der Sinnesorgane [4]. Hingegen bestimmen Verbindungen zwischen den Sinnen das, was wahrgenommen wird. Die visuelle Anmutung und das Tastgeräusch modifizieren z.B. die taktile Wahrnehmung, wie auch das Tastgefühl die visuelle Anmutung beeinflusst. Erwartungen und Wahrnehmungserfahrung sind zudem Aspekte, die aus momentanen Reizen nicht ableitbar sind. Multisensorische Aspekte dürfen in Versuchen nicht ausgeklammert werden. Bei Studien zur Produktwahrnehmung gilt es in der Regel, die Qualität des Materials (z.B. beim Hören von Berührungsgläuschen) zu beurteilen, nicht jedoch die Qualität isolierter Reize (z.B. die Geräuschqualität) [5].

Schlussfolgerung

Ein Fahrzeug stellt mit seinen akustischen Eigenschaften ein holistisches System dar. Es widerspricht damit Annahmen vollständiger Berechenbarkeit, die in den Ingenieurbereichen üblich sind. Auch das Wahrnehmungssystem ist holistischer Natur - entgegen der Annahmen der Psychophysik, die von klar getrennten Sinnen und quantitativer Beschreibbarkeit ausgeht. Das Gesamtverhalten auf Fahrzeugebene kann stets nur in Grenzen aus den Eigenschaften der Komponenten abgeleitet werden. Dieses Faktum ist nicht Folge vorhandener, jedoch - im Rahmen technischer Weiterentwicklung - überwindbarer Mängel der Messung und Berechnung. Es ist vielmehr Ergebnis systemimmanenter, d.h. in den Eigenschaften des Systems fest verankerter Bedingtheiten. Daraus folgt, dass ein Nebeneinander von Komponenten-messung, CAE und Analyse des Gesamtfahrzeugs auch in Zukunft grundsätzlich nicht vermeidbar sein wird. Im Detail und in Hinblick auf die Interaktion zwischen dem Ganzen und seinen Teilen werden jedoch weitere Verbesserungen möglich sein.

Literatur

- [1] Smuts, J.C.: Holism and Evolution. MacMillan, London, 1926
- [2] Koestler, A.: The Ghost in the Machine. Hutchinson, London, 1967
- [3] Literatur zu den NVH-Beispielen unter http://www.michaelhaverkamp.de/Technische_Akustik.htm (26.2.2014)
- [4] Haverkamp, M.: Synesthetic Design. Birkhäuser, Basel, 2012
- [5] Haverkamp, M., Erdmann, S.: Ein Beurteilungsverfahren für den Einfluss von Berührungsgläuschen auf die Wahrnehmung der Materialqualität. DAGA 2014