

Untersuchungen zur Korrelation auditiver und
instrumenteller Messergebnisse für die Bewertung
von Fahrzeuginnenraumgeräuschen als Grundlage
eines Beitrags zur Klassifikation von Hörereignissen



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme
Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, Berlin, Techn. Univ., 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2001

ISBN 3-8316-0069-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	V
Vorwort	VII
I Zur Korrelation instrumenteller und verbaler Deskriptoren am Beispiel der Bewertung von Kraftfahrzeuginnenraumgeräuschen	13
1 Allgemeines	15
1.1 Kraftfahrzeuggeräusche	15
1.1.1 Geschichtliches zu Kraftfahrzeuggeräuschen	15
1.1.2 Geräuschquellen beim heutigen Kraftfahrzeug	17
1.1.3 Maßnahmen zur Geräuschreduzierung beim Kraftfahrzeug	19
1.1.4 Schlussfolgerungen	20
1.1.5 Zusammenfassung	21
1.2 Von der Pegelreduzierung zu Sound-Quality	21
1.3 Von Sound-Quality zur auditiven Systemqualität	22
1.3.1 Der Qualitätsbegriff	23
1.3.2 Auditive Systemqualität	24
1.3.3 Zusammenfassung	27
1.4 Auswahl der Stimuli	27
1.4.1 Fahrsituationen	27
1.4.2 Die Auswahl der Fahrzeuge	29
1.4.3 Zusammenfassung	29
1.5 Zur Angleichung der Lautheit	30
1.5.1 Einleitung	30
1.5.2 Experiment	31
1.5.3 Ergebnisse	33
1.5.4 Schlussfolgerungen	35
1.5.5 Zusammenfassung	35
1.6 Binaurale Vorarbeiten	36

1.6.1	Einfluss der Schalleinfallrichtung auf die auditive Systemqualität . . .	36
1.6.2	Einfluss binauraler Geräuscharbeitung bei der Produktgeräusch- bewertung	39
2	Instrumentelle Deskriptoren	43
2.1	Verwendete instrumentelle Deskriptoren	43
2.1.1	Lautheit	43
2.1.2	Rauigkeit	45
2.1.3	Schwankungsstärke	46
2.1.4	Schärfe	46
2.1.5	Klanghaftigkeit	47
2.1.6	Prominence Ratio	48
2.1.7	Artikulationsindex	49
2.1.8	Impulshaltigkeit	49
2.1.9	Exzess	49
2.1.10	Sensorischer Wohlklang	50
2.1.11	Sonstige	50
2.2	Zusammenfassung	51
3	Verbale Deskriptoren	52
3.1	Das Semantische Differential	52
3.1.1	Zum Verfahren	52
3.2	Auswahl der Adjektive	53
3.3	Bezug der Adjektive zum Objekt	55
3.3.1	Problem	55
3.3.2	Experiment	56
3.3.3	Ergebnisse	57
3.3.4	Zusammenfassung	57
4	Durchführung und Auswertung auditiver Messungen der Fahrzeuggeräusche mit Hilfe des evaluierten Semantischen Differentials	61
4.1	Motivation	61
4.2	Experiment	62
4.3	Auswertung des Einflusses der Lautheitsangleichung	63
4.4	Auswertung der Faktorenanalyse	64
4.5	Auswertung der Korrelationen zwischen instrumentellen und verbalen Deskriptoren	71
4.6	Auswertung der Korrelationen zwischen auditiven Globalurteilen und verbalen Deskriptoren	72

4.7	Auswertung der Korrelationen zwischen den auditiven Globalurteilen und instrumentellen Deskriptoren	74
4.8	Auswertung der Korrelation zwischen auditiven Globalurteilen und binauralen Differenzen instrumenteller Deskriptoren	75
4.9	Zusammenfassung	76
5	Zum Vergleich der Aussagekraft instrumenteller psychoakustischer Deskriptoren für weitere Geräuschklassen	79
5.1	Geräuschbeispiele	80
5.2	Deskriptoren	81
5.3	Versuchsdurchführung	83
5.4	Ergebnisse	83
5.5	Schlussfolgerungen	86
5.6	Zusammenfassung	86
6	Schlussfolgerungen aus Teil I	87
7	Zusammenfassung von Teil I	89
II	Systemische Betrachtungen zur Produktgeräuschqualität	91
8	Die Rolle der Akustik zwischen den Disziplinen	93
9	Diskussionsbeiträge anderer Disziplinen	94
9.1	Geräuschwirkungen und Public Health	94
9.2	Musikwissenschaft	95
9.2.1	Musikrezeption	99
9.2.2	Zusammenfassung: Musikwissenschaft	105
9.3	Kommunikationswissenschaft und Musik	106
9.3.1	Zum Kommunikationsbegriff	106
9.3.2	Musik als Beispiel eines Kommunikationsmediums	106
9.3.3	Schlussfolgerungen und Zusammenfassung	108
9.4	Soundscapes/Klanglandschaften	108
9.4.1	Musikalische Imitation von Klanglandschaften	109
9.4.2	Gestaltung neuer Soundscapes: Klanginstallationen	109
9.5	Musik und Geräusche im Film	111
9.5.1	Filmmusik	111
9.5.2	Geräusche im Film	113
9.5.3	Zusammenfassung	114
9.6	Semiotik	115

9.6.1	Zum Begriff der Semiotik	115
9.6.2	Semiotische Zeichenmodelle	116
9.6.3	Anwendung der Semiotik am Beispiel der Musik	120
9.7	Zusammenfassung: Diskussionsbeiträge anderer Disziplinen	124
10	Modellbildung zur Klassifikation von Hörereignissen	126
11	Schlussfolgerungen aus Teil II	131
12	Zusammenfassung von Teil II	132
13	Zusammenfassung der Arbeit	134
	Literaturverzeichnis	137

Kapitel 1

Allgemeines

1.1 Kraftfahrzeuggeräusche

1.1.1 Geschichtliches zu Kraftfahrzeuggeräuschen

«*The early automobiles were [...] noisy [...] as compared with the present automobiles. The automotive engineers have done a remarkable work in reducing the noise made by these mechanisms ...*»

Dieser Satz entstammt nicht aktuellen Konferenzbeiträgen von Konstrukteuren der Automobilindustrie sondern dem Aufsatz «Automotive Quieting» von R. F. Norris (1936), erschienen im *Journal of the Acoustical Society of America*. Der Verfasser beschreibt darin konstruktive Maßnahmen, die in den Vereinigten Staaten zu einer seinerzeit deutlichen Verringerung des Schalldruckpegels bei der Schallemission von Kraftfahrzeugen im Beobachtungszeitraum von 1911 bis 1936 geführt haben. Dabei lesen sich manche Abschnitte des Aufsatzes gerade so, als ob sie einer aktuellen Publikation zur Problematik des Sounddesigns entnommen sind. So beschreibt Norris bereits, welche Probleme durch eine konsequente Reduktion des Schallpegels im Fahrzeuginnenraum auftreten: Es werden im Innenraum mit einem Mal Geräusche hörbar und als lästig empfunden, die vorher schlichtweg durch lautere Geräusche maskiert waren. Dieses Problem stellt sich Sounddesignern und Konstrukteuren damals wie heute, momentan besonders im Bereich stark schallgedämmter Fahrzeuge der Oberklasse. Bei Norris (1936) liest sich das so:

«*With the quieting of the engines and the present predominance of closed bodies, particularly of the new all-steel construction, a new noise has cropped up, termed 'body rumble'. This of course was undoubtedly present in earlier cars but was so masked by the mechanical noises and minimized by the preponderance of open bodies that it has not been recognized until recently. The new all-steel tops have aggravated it to a certain extent but particularly the extremely quiet running motors now used bring it out in such prominence that it has become a major concern of the automotive manufacturers.*»

Erst in den späten 50er Jahren rückte im deutschsprachigen Raum verstärkt das Pro-

blem der Fahrzeuggeräusche wieder ins Bewusstsein der Akustiker — unter Anderem wohl auch durch die nun rasch anwachsende Zahl von Automobilen, ausgelöst durch den auf Grund des aufkommenden motorisierten Individualverkehr stark zunehmenden Geräuschpegel. So finden sich zu dieser Zeit auch Veröffentlichungen, die zum ersten Mal neben Untersuchungen von Außengeräuschemissionen der Kraftwagen und dem Geräuschverhalten von Motorrädern explizite Untersuchungen zum Innengeräusch von Kraftfahrzeugen zum Inhalt haben, insbesondere sind dabei die Arbeiten von G. Bobbert zu nennen¹. Kurz und Oberst (1958) führten Untersuchungen sowohl zum Außen- als auch zum Innengeräusch damaliger Fahrzeuge durch und vermerken in ihrem Artikel, dass in damaligen Personenwagen «Lautstärken im allgemeinen höher als 85 Phon» vorzufinden waren. Bobbert (1961) quantifizierte schließlich zum ersten Mal die Beiträge einzelner Fahrzeugkomponenten am Gesamtgeräusch. Aber erst in den 70er Jahren wandte man sich dem Thema wieder intensiver zu. So erschienen beispielsweise britische Studien, die begannen darauf hinzuweisen, dass nicht allein ein niedriger A-bewerteter Schalldruckpegel zu einem notwendigerweise akzeptablen Geräuschklima (Bryan et al. (1978): *noise climate*) im Fahrzeug führt, sondern dass hier auch subjektive Komponenten, insbesondere die Erwartungshaltung, vermutlich eine größere Rolle als erwartet spielen könnten. Zum Einfluss nichtphysikalischer Größen auf die empfundene Qualität von Geräuschen wird jedoch später noch in den Kapiteln 1.2 und 1.3, sowie in Teil II eingegangen.

Nach wie vor stellt jedoch der hohe Schalldruckpegel im Fahrzeuginnenraum lange Zeit das primäre Problem dar. Bobbert (1988) bemerkt in einer Rückschau, dass sich der Schalldruckpegel im Fahrzeuginnenraum von Mittelklassefahrzeugen zwischen 1958 bis 1987 um etwa 10 dB gesenkt hat. Auch wenn dies auf Grund von psychoakustischen Untersuchungen perceptiv etwa einer Halbierung der Lautheit entspricht, bemerkt Bobbert nicht unkritisch, dass man sich die Minderung «*allerdings noch größer wünschte*».

Während im Laufe der Zeit mit den wachsenden Möglichkeiten der Technik auch die Grenzwerte für Außengeräusche für eine Fahrzeugvorbeifahrt von 1980 bis heute vom Gesetzgeber von 84 dB(A) auf 74 dB(A) herabgesetzt wurden, erfolgten die Anstrengungen zur Senkung des Innengeräuschpegels durch Wettbewerbsgründe hingegen aus fast ausschließlich eigenem Antrieb der Fahrzeughersteller. So misst man in heutigen Fahrzeugen bei einer Reisegeschwindigkeit von 130 km/h Schalldruckpegel von etwa 70-80 dB(A).²

Zur Verdeutlichung der Problematik der Komplexität des Fahrzeuginnenraumgeräusches soll ein Überblick über die verschiedenen Schallentstehungsmechanismen beim Fahrzeug gegeben werden.

¹Siehe Bobbert (1957), Bobbert (1958a) bzw. Bobbert (1958b) sowie Bobbert (1959).

²Dieser Wert gilt allerdings überwiegend nur für Mitteleuropa, Nordamerika usw. In weiten Teilen der Welt sind die Geräuschpegel der Fahrzeuge sowohl nach außen als auch im Fahrzeuginnenraum noch sehr hoch, bisweilen erreichen sie sogar gehörschädigende Werte. So berichten beispielsweise Kumar und Jain (1994) von Bussen in Delhi (Indien), deren L_{90} im Fahrgastraum bei bis zu 89 dB(A) liegt. In einer neueren Studie messen Chandrasekhar et al. (2000) in Kuwait-Stadt für Busse immerhin noch einen mittleren L_{10} von 90 dB(A), der mittlere L_{90} liegt hier bei 75 dB(A).

1.1.2 Geräuschquellen beim heutigen Kraftfahrzeug

Geräusche entstehen beim fahrenden Kraftfahrzeug sowohl durch die Luft- und Körperschallabstrahlung von Aggregaten innerhalb des Fahrzeugs (Motor, Getriebe, Lüfter, Abgasanlage, Ansaugsystem usw.) als auch durch die Wechselwirkung des Fahrzeugs mit seiner Umgebung (Roll- und Windgeräusche). Im Fahrzeuginneren tritt darüber hinaus noch sekundärer Luftschall auf, der in der Regel durch eingeleitete Körperschallanregung im Fahrgastraum entsteht. Der Anteil einzelner Geräuschquellen an der Zusammensetzung des Gesamtgeräuschs ist im Wesentlichen von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs abhängig. Im Nachfolgenden seien die wichtigsten Geräuschquellen kurz erläutert. Ausführlichere Darstellungen finden sich z. B. bei Klingenberg (1991), Heckl und Müller (1994) und Ahmed (1995).

Motorgeräusche

Das Motorgeräusch setzt sich aus vielen Einzelgeräuschen, die insbesondere durch den Verbrennungsvorgang, aber auch durch die Motormechanik erzeugt werden, zusammen.

- Das Verbrennungsgeräusch wird dabei durch den Druck bzw. die Druckänderung im Zylinder bestimmt. Dies macht sich insbesondere dann bemerkbar, wenn es wegen eines ungünstigen Zündzeitpunkts zu einem abrupt ansteigenden Druck im Zylinder kommt, was zu einer Klangcharakteristik führt, die man im Sprachgebrauch auch als „Klopfen“ bezeichnet. Beim Dieselmotor ist der Verbrennungsdruck höher als beim Ottomotor, weswegen auch der Anteil des Verbrennungsgeräusches am Gesamtmotorengeräusch typischerweise höher ist.
- Neben dem Verbrennungsgeräusch spielt beim Ottomotor auch das Geräusch des Kolbenspiels eine Rolle, das auftritt, wenn sich die Kolben von einer Zylinderinnenseite zur anderen bewegen („Kolbenkippen“).
- Gleichfalls hat auch die Anzahl und die Anordnung der Zylinder einen großen Einfluss auf den Charakter des Motorgeräuschs, was sich klanglich in unterschiedlichen Ausprägungen der einzelnen Motorordnungen (Vielfache der Drehzahl) äußert. Durch ihre weite Verbreitung im europäischen Raum werden in dieser Arbeit vorwiegend vierzylindrige Reihenmotoren untersucht (vgl. Kap. 1.4.2). Ihr Frequenzspektrum ist durch eine starke Ausprägung der zweiten Motorordnung gekennzeichnet.
- Geräusche der den Verbrennungsraum umgebenden Mechanik entstehen beispielsweise durch den Vorgang des Öffnens und Schließens von Ventilen sowie durch Hilfsaggregate wie Öl- und Kraftstoffpumpe.

Getriebeegeräusche

Die Geräuscentwicklung beim Getriebe entsteht hauptsächlich durch Reibung der Zahnflanken und Lager. Neben der Hauptstörfrequenz durch die Zahneingriffe entstehen dabei auch ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz. Das so erzeugte Geräusch wird vorrangig auf dem Körperschallweg übertragen. Starke tonale Anteile sind heutzutage allerdings nicht mehr so häufig anzutreffen wie noch vor einigen Jahren, bisweilen sind sie allerdings bei einer Fahrt im Rückwärtsgang noch deutlich hörbar. Verglichen mit dem Motogeräusch fällt das Getriebeegeräusch bei Fahrzeugen mit Schaltgetriebe jedoch nur wenig ins Gewicht.

Die Verwendung eines Automatikgetriebes führt zum typischen Geräusch der von den Turbinenschaufeln angeregten Schwingungen im Wandleröl. Die dabei entstehende tonale Komponente ist das charakteristische „Heulen“ eines Automatikgetriebes (vgl. Klingenberg (1991)).

Kühlergeräusche

Die Geräusche des Kühler-Lüfter-Systems werden in erster Linie durch die Strömung an den Spitzen der Schaufelblätter verursacht. Wie bei solchen aeroakustischen Vorgängen üblich, bestehen die tonalen Anteile aus ganzzahligen Vielfachen der Drehfrequenz multipliziert mit der Anzahl der Schaufelblätter. Hier versucht man durch spezielle Blattanordnungen und -formen Abhilfe zu schaffen. Vergleichbare Probleme stellen sich natürlich auch bei Schallquellen im Innenraum des Fahrzeugs, wie z. B. bei Klimaanlage (vgl. Hipp-Kalthoff (1995)).

Geräusche der Abgasanlage

Der Anregungsvorgang, der zur Entstehung der Geräusche der Abgasanlage führt, besteht im Wesentlichen aus Volumenstromschwankungen beim Ausströmvorgang der Auspuffgase während der Öffnung der Auslassventile. Die Frequenz des Auftretens der Druckausgleichsvorgänge ist damit proportional zur Motordrehzahl und führt neben dem breitbandigen Strömungsgeräusch zu ausgeprägten tonalen Anteilen. Tatsächlich treten in einer realen Abgasanlage durch Querschnittsänderungen im Anlagenverlauf (Austrittsöffnung usw.) Impedanzsprünge auf, die zu Reflexionen führen, die ihrerseits wiederum auf die Ventile zurückwirken können. Dies kann neben einer starken Geräuscentwicklung in ungünstigen Fällen auch zu einer Leistungsminderung des Motors beitragen.

Rollgeräusche

Unter Rollgeräuschen wird hier das akustische Ergebnis des Zusammenspiels zwischen Reifen und Fahrbahn verstanden. Hierbei sind Reifenbeschaffenheiten wie Breite und Profilart von ebensolcher Bedeutung wie Fahrbahnbeschaffenheiten. So ist die Geräuscentwicklung

bei einer Fahrt auf Pflastersteinen deutlich größer als auf asphaltierter Fahrbahn. Auch bei einer Fahrt auf regennasser Fahrbahn kann der Außengeräuschpegel deutlich höher liegen als auf trockener Fahrbahn. Klingenberg (1991) gibt für diesen Fall Werte von bis zu +10 dB(A) im Vergleich zur trockenen Fahrbahn an.

Windgeräusche

Windgeräusche entstehen im Allgemeinen durch Luftverwirbelungen und Strömungsabrisse an Karosserieteilen. Sie sind im Fahrzeuginneren bei heutigen Pkw erst bei höheren Fahrgeschwindigkeiten (ca. 100 km/h) wahrnehmbar, können dann jedoch je nach der Zusammensetzung des vorherrschenden Innengeräusches schnell eine dominierende Rolle einnehmen.

1.1.3 Maßnahmen zur Geräuschreduzierung beim Kraftfahrzeug

Allgemein lassen sich Schallschutzmaßnahmen in primäre und sekundäre Maßnahmen unterteilen, d. h. in Maßnahmen, die zu einer verminderten Geräuschenstehung und solche, die zu einer vermehrten Geräuschdämmung und -dämpfung beitragen. Ersteres betrifft konstruktive Maßnahmen an der Geräuschquelle (z. B. die Auswahl geeigneter Materialien und Funktionsprinzipien), zu letzterem zählen konstruktive Maßnahmen zur Verringerung der Schallübertragung, wie z. B. Absorber, Trennwände, Vermeidung von Körperschallbrücken usw.

Dämmung des Motorgeräuschs

Durch eine Kapselung des Motors lassen sich insbesondere die Motoraußengeräusche stark reduzieren. Da der Motorraum vieler Pkws nach unten hin offen ist, erfolgt ein Großteil des Schallaustritts in dieser Richtung. Eine Kapselung in diesem Bereich ist daher meist sehr wirkungsvoll. Nach Heckl (1994) ergeben sich durch Motorkapselungen beim Luftschall Pegelreduktionen von bis zu 30 dB(A). Das Verfahren birgt jedoch andere Probleme wie z. B. eine Temperaturerhöhung innerhalb der Kapsel, das Durchführen von Leitungen und Wellen usw.

Zur Reduzierung der Körperschalleinleitung, insbesondere durch Unwuchtkräfte im Motor, finden dämmende Motorlager Verwendung.

Reduzierung der Getriebeegeräusche

Bei Schaltgetrieben ist die Verwendung von akustisch günstigen Stirnradgetrieben bereits weit verbreitet. Darüber hinaus ist es notwendig die Zahnräder so zu konzipieren, dass sie eine niedrige Schwankung der Steife aufweisen, was zu einem geringeren Abstrahlverhalten führt. Darüber hinaus ist eine äußerst präzise Fertigung zwingend erforderlich. Auch muss

das Spiel zwischen den Zahnrädern so optimiert sein, dass die Geräuschabstrahlung minimal wird. Aktuelle Forschungsarbeiten zur Beschreibung des sehr komplexen Anregungs- und Abstrahlverhaltens von Getrieben, speziell für den Automobilbereich, finden sich z. B. bei Sattelberger (1997) und Hinz (1998).

Reduzierung der Kühlergeräusche

Zur Reduktion des Kühlergeräusches finden im Allgemeinen große Lüfter in Kombination mit guten Anströmbedingungen Verwendung. Voraussetzung zur Realisierung dieser Maßnahmen ist allerdings die Verfügbarkeit von ausreichend Raum im Motorbereich, was gerade bei Kleinwagen nicht immer gegeben ist.

Reduzierung des Geräuschs der Abgasanlage

Auf Seiten des primären Schallschutzes ist es nötig, einen möglichst konstanten Volumenstrom in der Anlage zu erzielen. Eine Möglichkeit der Realisierung ist hier, die Auspuffvorgänge der einzelnen Zylinder geeignet zeitlich gegeneinander zu versetzen. Des Weiteren sind Ventilformen nötig, durch die plötzliche Druckanstiege vermieden werden können. Als sekundäre Maßnahme zur Geräuschreduktion kommen hier in umfangreichem Maße Schalldämpfer zum Einsatz (vgl. Mechel (1994)).

1.1.4 Schlussfolgerungen

Die Geräuschabstrahlung von Kraftfahrzeugen nach außen wie nach innen wird im Wesentlichen durch das Motor-, das Roll- und das Windgeräusch bestimmt. Der Beitrag der verschiedenen Geräusche zum Gesamtgeräusch ist geschwindigkeitsabhängig und daher stark von der aktuellen Fahrsituation abhängig: Bei niedrigen Geschwindigkeiten dominiert das Motorgeräusch, bei mittleren das Rollgeräusch und bei hohen Geschwindigkeiten das Windgeräusch.

Nicht nur durch diese Einzelbeiträge, sondern auch durch das Abstrahlverhalten von Karosserie, Scheiben, Armaturen usw. in den Fahrzeuginnenraum entsteht ein höchst komplexes Schallfeld, bei dem sich der Hörer beispielsweise für manche Quellen im Nahfeld, für andere im Fernfeld befindet, von denen wiederum einige ein gerichtetes und andere ein diffuses Abstrahlverhalten aufweisen. Dies kann dazu führen, dass also auch am Fahrerort, der bei unseren weiteren Betrachtungen die zentrale Rolle spielen soll, große interaurale Unterschiede auftreten können. Es besteht die Vermutung, dass große interaurale Signalunterschiede einen Einfluss auf die empfundene Geräuschqualität haben (vgl. Chouard (1997)).