

Gerhard Robens

Ein Handlungssystem zur Skalierung der simulierten Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray für eine effiziente Validierung in kleinen Halbfreifeldräumen im Fahrzeugentwicklungsprozess

An operation system for scaling the indoor pass-by measurement with a microphone array for an efficient validation in small semi-anechoic chambers in the vehicle development process

Band 61

Systeme ■ Methoden ■ Prozesse

Hrsg.: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Gerhard Robens

Ein Handlungssystem zur Skalierung der simulierten Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray für eine effiziente Validierung in kleinen Halbfreifeldräumen im Fahrzeugentwicklungsprozess

An operation system for scaling the indoor pass-by measurement with a microphone array for an efficient validation in small semi-anechoic chambers in the vehicle development process

Copyright: IPEK ▪ Institut für Produktentwicklung, 2013
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Universität des Landes Baden-Württemberg und
nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft

Alle Rechte vorbehalten

Druck: Stolzenberger Druck und Werbung GmbH & Co. KG, Leimen
06224-7697915

ISSN 1615-8113

**Ein Handlungssystem zur Skalierung der
simulierten Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray für
eine effiziente Validierung in kleinen
Halbfreifeldräumen im
Fahrzeugentwicklungsprozess**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Dipl.-Ing. Gerhard Robens
aus Augsburg

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Februar 2013

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Korreferent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe¹ am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie und Monitoring von Lager- und Funktionsreibsystemen, die NVH mit dem Fokus auf Schwingungen und Akustik an Komponenten und am Gesamtfahrzeug, die Mikrosystemtechnik mit dem Fokus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

¹ Eh.: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)

Vorwort zu Band 61

Die moderne Fahrzeugentwicklung hat unterschiedlichste Optimierungsziele. Neben der Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des Antriebs und des Gesamtfahrzeuges, dem fahrdynamischen Verhalten und der Energieeffizienz kommt der Geräuschabstrahlung eine große Bedeutung zu. Die Geräusche eines Fahrzeuges können dabei sowohl als störend empfunden werden - wie z. B. die Fahrgeräusche bei der Vorbeifahrt, als auch als wichtiges Element der Komfortgestaltung - z. B. bei der Anmutung des Schließens von Türen in Limousinen der Oberklasse - wirksam werden. Beide Zielrichtungen, sowohl die Vermeidung von störenden Geräuschen, als auch die gezielte Darstellung von erwünschtem Geräuschverhalten, sind wesentliche Elemente im Entwicklungsprozess von Fahrzeugen. In Teilen ist das Geräuschverhalten der Fahrzeuge auch durch gesetzliche Bestimmungen im Sinne des Emissionsschutzes geregelt. Eine wichtige solche Größe ist das sog. Vorbeifahrgeräusch, das unter definierten Bedingungen ermittelt wird, um das Außengeräuschverhalten eines Fahrzeuges im Straßenverkehr beurteilen zu können. Diese sogenannte Vorbeifahrtsgeräuschmessung ist ein ganz wesentliches Element bei der Homologation neuer Kraftfahrzeuge und muss daher systematisch untersucht und entwickelt werden. Die normale Durchführung dieser Untersuchungen erfolgt auf definierten Test-strecken im Außenbereich. Dabei treten natürlich immer wieder Störungen, z. B. durch die Witterung, auf. Gleichzeitig ist dieses Verfahren sehr zeitaufwändig und teuer. Es besteht daher ein großes Interesse daran, Aussagen zum Vorbeifahrgeräusch auch mit effizienteren und effektiveren Methoden zu gewinnen. Ein solcher Ansatz ist die Beurteilung des Vorbeifahrgeräusches auf Rollenprüfständen in Akustikhallen. Um hier die realistischen Randbedingungen der Vorbeifahrt im Freifeld im Außenbereich abbilden zu können, sind im Allgemeinen sehr große Akustikhallen notwendig. Diese großen Akustikmesshallen sind kostspielig und stehen daher nur in begrenztem Umfang zur Verfügung. Insbesondere auch Zulieferer im Automobilbereich, die Komponenten mit Auswirkungen auf das Vorbeifahrgeräusch entwickeln und liefern, können häufig nicht auf solche relevanten Akustikmesshallen zugreifen. Es gibt aber sowohl Unternehmen im OEM-Bereich als auch bei Zulieferern häufig Akustikmesshallen mit integrierten Rollen, die nicht den Idealabmessungen zur Durchführung der Vorbeifahrtmessung auf der Rolle entsprechen, die aber trotzdem gute Mess-Randbedingungen bieten und auch von der Verfügbarkeit wesentlich einfacher einzusetzen sind. Es besteht daher ein hohes Interesse, mit einem geeigneten Ansatz diese Hallen soweit zu ertüchtigen, dass zumindest für vergleichende Untersuchungen Vorbeifahrtmessungen möglich werden. An dieser Stelle setzt die Arbeit von Herrn Dr.-Ing. Gerhard Robens an. Er hat sich zum Ziel gesetzt, auf der Basis systematischer Analysen und Untersuchungen die Randbedingungen und

notwendigen Maßnahmen zur Ertüchtigung einfacher Akustikmesshallen mit Rollenprüfständen für die Vorbeifahrtmessung zu untersuchen und daraus sowohl die notwendigen Anforderungen, Vorbereitungsmaßnahmen und auch die erforderlichen Messprozesse als grundlegende methodische Konzepte zu erforschen und als Prozesselement für den Produktentwicklungsprozess, insbesondere mit dem Fokus auf die Validierung, zu definieren. Herr Dr. Robens leistet mit der von Ihm entwickelten systematischen Vorgehensweise einen wertvollen Beitrag für die Entwicklungspraxis im Fahrzeugbau.

Februar, 2013

Albert Albers

Kurzfassung

Im Fahrzeugentwicklungsprozess muss für jedes Fahrzeug im Rahmen der Typenzulassung, der s. g. Homologation, die Messung der beschleunigten Vorbeifahrt nach DIN ISO 362 durchgeführt werden mit dem Ziel, die Lärmbelastung des Straßenverkehrs zu begrenzen. Diese Messung muss auf der Teststrecke durchgeführt werden, was zu hohen Kosten und Verzögerungen im Entwicklungsprozess aufgrund schlechten Wetters und Störgeräuschen aus der Umgebung führen kann. Zudem werden die Antriebsstrangtopologien immer komplexer, wodurch die Fahrstrategie stark von der Betriebsstrategie abhängt und dadurch die Komplexität der Versuchsdurchführung ebenfalls steigt. Daher wird angestrebt, die Messungen auf einem Akustikrollenprüfstand durchzuführen.

Für die vollständige Abbildung der gesamten Messstrecke müssen diese Akustikhallen sehr groß sein, was entweder infrastrukturell oder aus Kostengründen nicht realisierbar ist. Daher gibt es bereits theoretische Ansätze, das Messverfahren zu skalieren. Untersuchungen zeigen, dass diese Ansätze bei der Skalierung keine vergleichbaren Ergebnisse liefern.

In dieser Arbeit werden zwei Teilhandlungssysteme für die Projektierung und die Validierung beschrieben. Diese beinhalten zum einen die Untersuchungen für die Prüfung der akustischen Umgebung, zum andern, wie die simulierte Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray im Fernfeld in kleineren Akustikhallen durchzuführen ist.

Dazu werden anfangs die geometrischen und akustischen Randbedingungen eines Fahrzeuges und des Akustikrollenprüfstands am IPEK – Institut für Produktentwicklung untersucht. Auf Basis von Messungen mit einem Halbdodekaeder und einem Voll-dodekaeder wird das Fahrzeug als Unit-Under-Test im XiL-Framework als Punktschallquelle simuliert und die Einflussfaktoren auf die Skalierung identifiziert und quantifiziert. Damit können die theoretischen Annahmen aus dem Stand der Forschung verifiziert oder falsifiziert und die Ursachen der unterschiedlichen Ergebnisse identifiziert werden. Diese Ergebnisse führen zu neuen Thesen, welche wiederum mit der künstlichen Schallquelle verifiziert und auf ein reales Fahrzeug übertragen werden. An zwei weiteren Fahrzeugen verschiedener Klassen werden die Thesen validiert.

Abschließend werden die Erkenntnisse verallgemeinert und es werden zwei Teilhandlungssysteme entwickelt. Diese beinhalten die Prüfung der akustischen Umgebung und die Messung in einer zur DIN ISO 362 vergleichsweise kleineren Akustikhalle. Diese Methoden beschreiben außerdem, welche Restriktionen und Randbedingungen erfüllt sein müssen, damit die Skalierung zulässig ist. Abschließend werden diese in den Fahrzeugentwicklungsprozess eingeordnet.

abstract

For the homologation, every vehicle must pass the test of the pass-by measurement according to the ISO 362, with the goal to reduce the noise load of road traffic. Today this measuring must be done on the test track, which can lead to huge costs and delays in the development process because of bad weather or disturbing background noise. In addition, the powertrain topologies and with it the drive strategy, influenced by the operating strategy becomes more complex. So the complexity of the measuring increases. Therefore engineers are making an effort to measure the pass-by noise on an acoustic roller test bench.

To gauge the complete length of the track inside, the anechoic chamber must be very large, which is not possible either for infrastructural reasons or high amount of costs. Therefore there are some theoretical approaches to scale up the measuring. Experimental tests show that the scaled results are not comparable.

This thesis describes two methods for the project planning and validation which allows to evaluate the acoustic environment and measuring the pass-by noise with a microphone array in the far field in an anechoic chamber smaller than in the ISO recommend.

Therefore, in the first step, the geometrical and acoustical boundary conditions of a sample vehicle and of the IPEK – Institute of Product Engineering roller test bench are analyzed and discussed.

On the basis measuring with a generic source, like a half- and a full dodecahedron, the influencing factors on the scaling are identified and quantified. With it, the theoretical assumptions of the state of the art can be verified or falsified to identify the reasons of the different measurements. This leads to new theses. These are also verified by generic sources and transferred to a real vehicle. Afterwards the theses are validated on two more vehicles.

In conclusion, the gained knowledge is generalized and described as an operating system showing how to measure the pass-by noise in smaller anechoic chambers and which restrictions and boundary conditions must be fulfilled to realize the scaling of the measurement setup.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als akademischer Mitarbeiter in der Forschungsgruppe NVH/Driveability am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).

Mein größter Dank gebührt meinen Doktorvater Herr o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit, das entgegengebrachte Vertrauen und die Rahmenbedingungen für meine Forschungsarbeiten. Er hat mich nicht nur bei fachlichen Fragestellungen gefordert, unterstützt und begleitet, sondern mir auch die Freiheiten gegeben, an unkonventionellen Ansätzen zu forschen. Herr o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers hat mich in meiner Zeit am IPEK durch viel Wissen und vor allem Erfahrung sehr stark als Person geprägt.

Für die Übernahme des Koreferates bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Weber.

Ein besonderer Dank geht an meinen Gruppenleiter und Kollegen Dr. Matthias Behrendt für den wissenschaftlichen Austausch und die Anregungen bei wissenschaftlichen Gesprächen.

Des Weiteren danke ich allen Kolleginnen und Kollegen am Institut. Nicht nur für die wissenschaftlichen Diskussionen und fruchtbaren Impulse, sondern auch für das sehr angenehme und offene Arbeitsklima.

Zu dem danke ich meiner Familie, die mich stets bei meiner Arbeit motiviert und unterstützt haben.

Karlsruhe, den 28. Februar 2013

Gerhard Robens

„Früher brachte der Lärm die Menschen aus der Ruhe. Heutzutage ist es die Stille.“

Ernst Ferstl (1955-)

österreichischer Lehrer und Autor

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Grundlagen und Stand der Forschung	5
2.1	Produktentstehung	5
2.1.1	Fahrzeugentwicklungsprozess	6
2.1.2	Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)	8
2.2	X-in-the-Loop-Framework	11
2.3	Grundbegriffe der Akustik	13
2.3.1	Schall	13
2.3.2	Charakteristische Größen von Schallwellen	14
2.3.2.1	Schallgeschwindigkeit c	14
2.3.2.2	Frequenz f und Wellenlänge λ	15
2.3.2.3	Frequenzverschiebung (Dopplereffekt)	15
2.3.3	Feldgrößen des Schallfeldes	15
2.3.3.1	Schalldruck $p(t)$	16
2.3.3.2	Schalldruckpegel L_p	16
2.3.3.3	Schallschnelle $v(t)$, Schallschnellepegel L_v	16
2.3.4	Schallenergiegrößen	17
2.3.4.1	Schallintensität I ; Schallintensitätspegel L_I	17
2.3.4.2	Schallleistung P ; Schallleistungspegel L_W	17
2.3.5	Einteilung der Schallereignisse	18
2.3.6	Bewertung von Schall	21
2.3.6.1	Kurven gleicher Lautstärke und relative Frequenzbewertung	21
2.3.6.2	Spektrale Darstellung von Schallfeldgrößen	22
2.3.7	Schallquellen	23
2.3.7.1	Punktschallquelle	24
2.3.7.2	Flächenstrahler	25
2.3.8	Schallfelder in Prüfumgebungen	26
2.3.8.1	Hallraum	26
2.3.8.2	Freifeldraum	27
2.3.8.3	Halbfreifeldraum	28
2.3.8.4	Realer Raum	29
2.3.9	Schallausbreitung im Freifeld	30
2.3.10	Schallausbreitung im Halbfreifeld	32
2.3.10.1	Raumwinkelmaß	32
2.3.10.2	Interferenz	34
2.4	Schallquellen am Fahrzeug	34
2.4.1	Einflussfaktoren auf das Fahrgeräusch auf dem Prüfstand	34

2.4.1.1	Antriebsgeräusch	35
2.4.1.2	Rollgeräusch	38
2.4.1.3	Frequenzbereiche der Schallquellen	39
2.4.2	Schallfelder von Fahrzeugen.....	40
2.5	Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch nach DIN ISO 362.....	41
2.5.1	Fahrer	42
2.5.2	Fahrzeug	42
2.5.3	Umwelt.....	42
2.5.3.1	Umgebung.....	43
2.5.3.2	Meteorologische Bedingungen	44
2.5.4	Fahrmanöver zur Messung des Vorbeifahrgeräusches	44
2.5.4.1	Beschleunigte Vorbeifahrt.....	45
2.5.4.2	Konstante Vorbeifahrt	45
2.5.5	Messaufbau	45
2.5.6	Messergebnis	46
2.6	Simulierte Vorbeifahrt – Messung auf dem Rollenprüfstand	47
2.6.1	Simulierte Vorbeifahrt mittels Linienarray im Fernfeld	48
2.6.1.1	Umwelt	49
2.6.1.2	Manöver	49
2.6.1.3	Messaufbau.....	50
2.6.1.4	Messergebnis mittels Pass-by-Algorithmus	50
2.6.2	Simulierte Vorbeifahrt mittels Nahfeld-Komponenten-Messung	53
2.6.3	Schalldruckvorhersage mittels Linienarray	54
2.6.4	Simulierte Vorbeifahrt mittels Holografie oder Beamforming	55
2.7	Zusammenfassung	57
3	Motivation und Zielsetzung	59
3.1	Motivation	59
3.2	Zielsetzung	61
4	Forschungskonzept	63
5	Bewertung der Anwendbarkeit bestehender Methoden in kleinen Hallen .	66
5.1	Simulierte Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray im Fernfeld.....	66
5.2	Simulierte Vorbeifahrt mittels Nahfeld-Komponenten-Messung	66
5.3	Schalldruckvorhersage mittels Linienarray	67
5.4	Simulierte Vorbeifahrt mittels Holografie oder Beamforming.....	67
5.5	Bewertung und Zusammenfassung	68
6	Messtechnik.....	71
6.1	Mikrofone	71
6.2	Halbdodekaeder	72
6.3	(Voll)Dodekaeder.....	72

7	IPEK – Akustikrollenprüfstand	73
7.1	Geometrische und akustische Eigenschaften des Raumes	73
7.2	Dynamik des Prüfstands	75
7.3	Geräusche am Prüfstand	76
7.3.1	Prüfstandsbetriebsgeräusch	76
7.3.1.1	Leerlaufgeräusch des Prüfstands	76
7.3.1.2	Prüfstandsgeräusch unter Last	78
7.3.2	Geräusch der Absauganlage	79
8	Messung mit dem Mikrofonarray im Fernfeld	82
8.1	Freifeldbedingung	82
8.1.1	Versuchsfahrzeug	82
8.1.2	Ermittlung der Freifeldbedingung	83
8.2	Messaufbau	84
8.2.1	Grenzbedingungen der Arraygeometrie	84
8.2.2	Mikrofonaufbau	86
8.3	Messergebnisse	87
8.3.1	Messstrecke	88
8.3.2	Pegelmaximum	88
8.3.3	Position des Maximums	89
8.3.4	Zusammenfassung der Messergebnisse	89
8.4	Fehlerrechnung	89
9	Entwicklungswerkzeug als Element des Handlungssystems	92
9.1	Mikrofonkoordinaten	93
9.2	Eingabebereich	93
9.3	Filtereinstellungen	95
9.4	Achsenbereich und Ausgabefeld	96
9.5	Validierung des Werkzeuges	96
10	Untersuchung der Annahmen der Methode	98
10.1	Spektralanalyse	98
10.2	Pegeldämpfung	101
10.3	Zusammenfassung	101
11	Messung mit künstlicher Schallquelle	103
11.1	Messaufbau für die Messung mit künstlicher Schallquelle	103
11.2	Signalwiedergabe	104
11.3	Halbdodekaeder	105
11.3.1	Pegeldämpfung	106
11.3.2	Bewegte Quelle - konstante Vorbeifahrt	107
11.3.3	Streckenverlängerung mit dem Halbdodekaeder	109
11.3.4	Verschiebung der Quelle	110

11.3.5	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	111
11.4	(Voll)Dodekaeder.....	112
11.4.1	Validierung der Annahmen.....	113
11.4.1.1	Schallabsorptionsgrad.....	113
11.4.1.2	Raumwinkelmaß	114
11.4.1.3	Interferenz	115
11.4.1.4	Mikrofonhöhe	116
11.4.1.5	Zusammenfassung der Annahmen.....	121
11.4.2	Messergebnis	122
11.4.2.1	Einfluss der Quellenhöhe.....	122
11.4.2.2	Einfluss der Mikrofonhöhe	126
11.4.2.3	Einfluss des Arrayabstandes	131
11.4.2.4	Streckenverlängerung mit dem Voll-dodekaeder.....	132
11.4.2.5	Verschiebung der Quelle.....	133
11.4.3	Zusammenfassung der Erkenntnisse.....	134
11.5	Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Messungen mit künstlichen Schallquellen	136
12	Übertragbarkeit auf das System Fahrzeug.....	138
12.1	Position des akustischen Zentrums	138
12.2	Höhe des Mikrofonarrays	141
13	Validierung an weiteren Fahrzeugklassen.....	143
13.1	Validierung am Beispiel eines Sport Utility Vehicle (SUV).....	143
13.2	Validierung am Beispiel eines Kleinwagens	145
13.3	Zusammenfassung	147
14	Teilhandlungssysteme für die simulierte Vorbeifahrt in kleinen Hallen	148
14.1	System Fahrzeug	149
14.2	System Umwelt.....	151
14.2.1	Rollenprüfstand	151
14.2.2	Grenzfrequenz der Halle	152
14.2.3	Maximaler Abstand des Arrays	153
14.2.4	Mikrofonhöhe.....	153
14.2.5	Mindesthallengröße.....	154
14.3	System Fahrer	155
14.4	Zusammenfassung	155
15	Simulierte Vorbeifahrt im Fahrzeugentwicklungsprozess	159
15.1	Teilhandlungssystem zur Prüfung und Planung des Akustikrollenprüfstands in der Projektierung	160
15.2	Teilhandlungssystem zur Messung der simulierten Vorbeifahrt in kleinen Hallen in der Validierung	161
15.3	Zusammenfassung	161

16	Zusammenfassung und Ausblick.....	163
16.1	Zusammenfassung	163
16.2	Ausblick	166
17	Literaturverzeichnis.....	169
	Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten	178

Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
κ	-	Isentropenexponent
R	J/mol/K	Gaskonstante
m_L	mol	Molare Masse
p	Pa	Schalldruck
ρ	kg/m ²	Dichte
T	K	Temperatur
ϑ	K	Temperaturänderung
λ	m	Wellenlänge
λ_G	m	Grenzwellenlänge
f	Hz	Frequenz
f_s	Hz	Senderfrequenz
f_E	Hz	Empfängerfrequenz
f_G	Hz	Grenzfrequenz
f_O	Hz	Obere Grenzfrequenz
f_U	Hz	Untere Grenzfrequenz
f_m	Hz	Mittelfrequenz
v_S	m/s	Sendergeschwindigkeit
v_E	m/s	Empfängergeschwindigkeit
$x(t)$	m	Weg
ω	1/s	Kreisfrequenz
Re	-	Realteil
A	-	Amplitude
L_p	dB	Schalldruckpegel
v	m/s	Schallschnelle
τ	s	Zeitvariable
L_v	dB	Schallschnellepegel
I	W/m ²	Schallintensität
L_I	dB	Schallintensitätspegel
P	W	Schalleistung
L_P	dB	Schalleistungspegel
r	m	Abstand
r_H	m	Hallradius
b	m	Variable
d_p	m	Abstand Strahler - Mikrofon
L	m	Strahlerlänge
α	-	Schallabsorptionsgrad
h_R	m	Mikrofonhöhe
h_S	m	Quellenhöhe
L_A	m	Arraylänge
D_Ω	dB	Raumwinkelmaß
Ω	Rad	Abstrahlwinkel

D	m	Abstand Quelle - Array
L	m	Fahrzeuglänge
a_{urban}	m/s^2	Städtische Beschleunigung
$a_{wot\ ref}$	m/s^2	Referenzbeschleunigung
M	Nm	Drehmoment
J	kgm^2	Massenträgheit
β	-	Glättungsfaktor
A	m	Verschiebung
x_Q	m	x-Koordinate akustisches Zentrum
z_Q	m	z-Koordinate akustisches Zentrum
n	-	Laufindex
m	-	Anzahl der Schallquellen

1 Einleitung

Mit dem Zitat: „We are here to make the world quieter“², eröffnete Professor Hideki Tachibana, Vice-President des I-INCE (International Institute of Noise Control Engineering of the USA, Inc.) die Internoise Konferenz 2011. Mit diesem Zitat spricht er nicht nur die Lärminderung von Flugzeugen, Fahrzeugen etc., sondern auch den Lärmschutz und vor allem die gesundheitlichen Auswirkungen des Lärms auf den Menschen an. Damit zeigt sich gerade in der Fahrzeugentwicklung der Wandel, dass das NVH-Verhalten im Spannungsfeld von Energieeffizienz, Kostenreduzierung, Sicherheit und vor allem CO₂-Reduzierung eine immer bedeutendere Rolle spielt³.

Der Begriff NVH steht für Noise-Vibration-Harshness⁴ und beschreibt Geräusche und Schwingungen von technischen Systemen und deren subjektive Wahrnehmung und Empfindung. Dieser ist allerdings sehr stark durch den Mobilitätssektor geprägt, vor allem durch die Fahrzeugindustrie⁵. Hier wird der Begriff meist mit dem Kunden oder dem Insassen eines Fahrzeuges in Verbindung gebracht, welcher auf Basis subjektiver Eindrücke ein Fahrzeug als komfortabel oder unkomfortabel oder gerade im Sound-Engineering als „gefällt“ oder „gefällt nicht“ bewertet⁶. Das NVH-Verhalten ist damit zu einem wichtigen Kaufkriterium geworden⁷.

Der Begriff umfasst allerdings viel mehr als nur die Auswirkung auf den Insassen und dessen subjektiven Gefallen. So steht er auch für Geräusche und Schwingungen, die nach außen hin die Umwelt beeinflussen. Dies können Geräusche sein, die Passanten oder Anwohner an Straßen in Form von akustischen Schwingungen wahrnehmen oder viel kritischer als gesundheitsschädigenden Lärm⁸.

Der gesellschaftliche Wandel und das weltweite Bevölkerungswachstum führen zu einer Urbanisierung und somit zu einem steigenden Verkehrsaufkommen⁹. Damit die Städte durch die Fahrzeuggeräusche nicht immer lauter werden, beschränkt der Gesetzgeber das emittierende Fahrzeug-Außengeräusch bei der Vorbeifahrt auf einen maximalen Schalldruckpegel. Jedes Fahrzeug, das neu entwickelt wird, muss

² Tachibana 2010

³ Albers / Düser 2010

⁴ Hieronimus 1990

⁵ FEV 2008

⁶ Zhang et al. 1996

⁷ Genuit 2010

⁸ Genuit 2010

⁹ Albers et al. 2010b

einen festgelegten Grenzwert bei der beschleunigten Vorbeifahrt auf der Teststrecke einhalten¹⁰, um die Homologation, d. h. die Typenzulassung für den Betrieb auf öffentlichen Straßen, zu erhalten.

Moderne Fahrzeuge sind heutzutage, gerade unter dem Aspekt alternativer Antriebsstrangtopologien, immer komplexer werdende mechatronische Systeme¹¹. Dies führt dazu, dass die Anforderungen an die Entwicklungsingenieure zur Einhaltung sinkender Grenzwerte immer weiter steigen und damit auch die Anforderung an die Fahrzeugentwicklung selbst und deren Entwicklungsprozesse¹². Die zunehmende Komplexität stellt somit auch hohe Anforderungen an die domänenübergreifende und interdisziplinäre Validierung und ebenso an die Validierungsumgebung¹³. Auch wenn die Homologation bis heute noch auf der Teststrecke erfolgen muss und auch die praktischen Versuche dort für die Validierung unabdingbar sind, wird angestrebt, möglichst viele Untersuchungen frühzeitig auf dem Prüfstand durchzuführen¹⁴. Damit besteht die Möglichkeit, Untersuchungen unabhängig von Wettereinflüssen in kurzer Zeit effizient und mit einer hohen Reproduzierbarkeit durchzuführen.

Für die Messung des Vorbeifahrgeräusches auf einem Akustikrollenprüfstand gibt es bereits erste Methoden. Diese benötigen allerdings für ein zuverlässiges Ergebnis Akustikhallen in der Größe der ISO-Teststrecke von ca. 27 m Länge. Derartige Prüfstände sind in der Regel nur bei OEMs verfügbar, da diese aufgrund der akustischen Einhausung von Wand und Decke sehr teuer sind. Zudem kann die Infrastruktur und damit die notwendige Grundfläche nicht zu Verfügung stehen, um derartig große Hallen zu realisieren. Andere Methoden auf Basis der Transferpfadanalyse hingegen benötigen ein Vorwissen über zu erwartende Schallquellen und sind zudem sehr aufwendig, da jedes Fahrzeug mit einer Vielzahl von Sensoren appliziert werden muss.

Im Rahmen dieser Arbeit soll am Beispiel eines konventionellen Fahrzeuges eine Methode zur Messung des Vorbeifahrgeräusches als ein Teilhandlungssystem der Fahrzeugvalidierung auf einem Rollenprüfstand erarbeitet werden. Der Fokus liegt dabei auf Akustikrollenprüfständen, welche sich in kleineren Akustikhallen befinden, die nicht die in der ISO 362 definierte Größe besitzen. Die zu entwickelnde Methode bietet zum einen die Möglichkeit, Akustikrollenprüfstände auf die Eignung zu prüfen

¹⁰ DIN ISO 362: 2009

¹¹ Albers et al. 2009b

¹² Weber 2009

¹³ Albers et al. 2010a

¹⁴ Sciuto / Hellmund 2001

und das Vorbeifahrgeräusch in kleinen Akustikräumen zu messen, nahezu unabhängig vom Fahrzeug oder der Antriebsstrangtopologie durch einen einfachen raumfesten Aufbau der Messtechnik. Schwerpunkt der Arbeit liegt dabei auf der Skalierbarkeit, um Entwicklungsingenieuren und Forschern die Möglichkeit zu bieten, auch in kleineren Prüfumgebungen die notwendigen Untersuchungen zeit- und ressourceneffizient durchzuführen.

Zu Beginn in Kapitel 2 wird die Produktentstehung mit der zentralen Aktivität Validierung und das X-in-the-Loop (XiL) Validierungsframework eingeführt, um die wissenschaftliche Arbeit in den Produkt- bzw. Fahrzeugentwicklungsprozess einordnen zu können. Darüber hinaus werden im Folgenden die wichtigsten akustischen Größen, sowie die Einteilung der elementaren Schallquellen und ihrer Eigenschaften und die relevanten Zusammenhänge der physikalischen Größen in der Akustik erläutert. Darauf aufbauend werden die am Fahrzeug auftretenden Schallquellen und Schallfelder erörtert. Basierend auf der Vorbeifahrtsmessung auf der Teststrecke werden anhand des XiL-Validierungsframeworks die bereits bekannten Methoden vorgestellt. Hiervon ausgehend werden in Kapitel 3 die Motivation dieser Arbeit und die daraus abgeleiteten Ziele dargestellt. Kapitel 4 beschreibt die Vorgehensweise für das Erreichen der Ziele dieser Arbeit. In Kapitel 5 werden die im Stand der Forschung beschriebenen Methoden zur Messung des Vorbeifahrgeräusches anhand verschiedener Kriterien bewertet und auf die Anwendbarkeit auf dem Akustikrollenprüfstand des IPEK – Institut für Produktentwicklung, welcher in Kapitel 6 genauer untersucht wird, geprüft. In Kapitel 6 wird die für die weiteren Untersuchungen verwendete Messtechnik erläutert. Kapitel 8 zeigt die Ergebnisse der Messungen und die Einflüsse der Skaleneffekte auf Basis des Stands der Forschung. Für die Entwicklung der Methode wird ein Entwicklungswerkzeug in Kapitel 9 vorgestellt, das für die Auswertung in dieser Arbeit verwendet wird. Die Skaleneffekte werden in Kapitel 10 genauer untersucht. In Kapitel 11 wird das System Fahrzeug bzw. das Schallfeld des Fahrzeuges mittels künstlicher Schallquellen simuliert, um damit die Komplexität der Schallabstrahlung zu reduzieren. Somit können die getroffenen Annahmen aus dem Stand der Forschung verifiziert oder falsifiziert werden. Dadurch können der Einfluss der Skaleneffekte quantifiziert und die auftretenden Abweichungen durch die Skalierung beschrieben und kompensiert werden. Auf dieser Basis können die Annahmen und die erarbeiteten Erkenntnisse in Kapitel 12 auf das reale System Fahrzeug übertragen werden. Die daraus entwickelte Vorgehensweise wird in Kapitel 13 an zwei weiteren Fahrzeugen, einem Kleinwagen und einem Sport-Utility-Vehicle (SUV) validiert. In Kapitel 14 werden die Annahmen verallgemeinert und es wird eine Methode aufgezeigt, wie und unter welchen Randbedingungen die Messung der simulierten Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray im Fernfeld in kleinen

4 Einleitung

Hallen skaliert werden kann. Zudem wird gezeigt, welche Untersuchungen durchgeführt werden müssen, um eine Akustikhalle mit einem Rollenprüfstand auf die Eignung zur simulierten Vorbeifahrt zu überprüfen. Im folgenden Kapitel 15 werden die Methoden als Teilhandlungssysteme in den Fahrzeugentwicklungsprozess und in das integrierte Produktenstehungsmodell eingeordnet. Abschließend wird die Arbeit in Kapitel 16 zusammengefasst und einen Ausblick über weitere wissenschaftliche Fragestellungen gegeben.

2 Grundlagen und Stand der Forschung

Ein Handlungssystem beschreibt Ropohl¹⁵ als die Summe aller Transformationsprozesse zum Überführen von Zielen in Objekte. In dieser Arbeit werden zwei Teilhandlungssysteme für die Projektierung und Validierung beschrieben, wie eine akustische Umgebung zu prüfen ist und wie die simulierte Vorbeifahrt auf einem Rollenprüfstand in einem Halbfreifeldraum, welcher nicht die in der Norm erforderlichen Abmessungen besitzt, durchzuführen ist.

Ohne methodisches Vorgehen ist es kaum möglich, ein Fahrzeug - als hoch komplexes System - ganzheitlich und strukturiert zu entwickeln. Daher spielen Produktentwicklungsprozesse eine bedeutende Rolle¹⁶. In diesem Kapitel werden deshalb zunächst die Grundlagen der Produktentwicklung mit der zentralen Aktivität Validierung und das XiL-Framework erläutert, um die Arbeit in die Produktentstehung einzugliedern. Die beschleunigte Vorbeifahrt auf der Teststrecke ist heute immer noch Bestandteil der Homologation von Fahrzeugen und damit ein fester Bestandteil der Validierung des Gesamtfahrzeuges im Fahrzeugentwicklungsprozess¹⁷.

Im Anschluss an die Eingliederung in den Entwicklungsprozess wird die Basis der relevanten akustischen Grundlagen für diese Arbeit geschaffen. Dazu werden zunächst die erforderlichen Grundbegriffe der Akustik, Schallquellen und Schallfelder und die physikalischen Zusammenhänge erläutert und dann auf Basis der Vorbeifahrtsmessung auf der Teststrecke anhand des XiL-Frameworks bereits bekannte Ansätze zur simulierten Vorbeifahrt in Akustikhallen aufgezeigt.

Ziel dieses Kapitels ist die Zusammenfassung des für diese Arbeit notwendigen Stands der Forschung.

2.1 Produktentstehung

Die Produktentstehung ist ein soziotechnisches System, in dem neben Arbeitsmitteln, Entwicklungswerkzeugen und Technologien der Mensch eine bedeutende Rolle spielt. Durch den Wunsch des Menschen nach Veränderung für einen bestimmten Zweck legt er eine Zielsetzung für die Produktentstehung fest. Durch das Wissen des Menschen und durch seine Arbeitskraft im Prozess ist er maßgeblich an der Transformation der Ziele aus dem Zielsystem in Objekte, dem

¹⁵ Ropohl 2009

¹⁶ Albers et al. 2011a

¹⁷ DIN ISO 362: 2009

s. g. Objektsystem, beteiligt. Alle Prozesse, die zur Transformation von Zielen in Objekte beteiligt sind, bilden das Handlungssystem¹⁸.

Folgende Unterkapitel wird zunächst einen kurzen Überblick über den Fahrzeugentwicklungsprozess und die Produktentstehung geben. Dabei wird speziell auf das von Albers¹⁹ entwickelte integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) eingegangen, um die Arbeit anhand dieses Modells in den Produktentwicklungsprozess einzuordnen.

2.1.1 Fahrzeugentwicklungsprozess

Fahrzeugentwicklungsprozesse werden, durch die zunehmende Anzahl der Funktionen, Vernetzungen und Anforderungen an die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Sicherheit, sowie Variantenvielfalt immer komplexer. Zudem sind an diesem Prozess immer mehr Disziplinen beteiligt, wie z. B. die Elektrotechnik, durch die elektronischen Regelungssysteme und die Elektrifizierung des Antriebsstranges, wodurch diese immer umfangreicher werden²⁰. Durch die zunehmende Anzahl an Subsystemen und nicht zuletzt durch die Wechselwirkung Fahrzeug, Fahrer und Umgebung, entstehen immer mehr Interaktionen, die heute zunehmend in den Vordergrund rücken²¹. Es ergeben sich somit immer mehr Ziele im Zielsystem die über das Handlungssystem in das Objektsystem überführt werden müssen. Demzufolge wird die Anzahl der Aufgaben, die bewerkstelligt werden müssen immer größer und das bei zunehmendem Kosten- und Zeitdruck²². Methoden und Prozesse sollen daher den Entwickler unterstützen, diesen Anforderungen gerecht zu werden²³.

Um diesem Zeit- und Kostendruck entgegenzuwirken wird angestrebt, möglichst früh im Fahrzeugentwicklungsprozess Systeme und Teilsysteme zu simulieren und zu validieren²⁴. Je später die Validierung, also der Abgleich zwischen dem Ziel- und dem Objektsystem erfolgt, desto kostenintensiver werden Änderungen am Produkt, wie in Bild 1 dargestellt.

¹⁸ Ropohl 2009

¹⁹ Albers 2010

²⁰ Seiffert 2008

²¹ Albers et al. 2010b

²² Schäuffele / Zurawka 2010

²³ Albers / Düser 2009

²⁴ Albers et al. 2010b

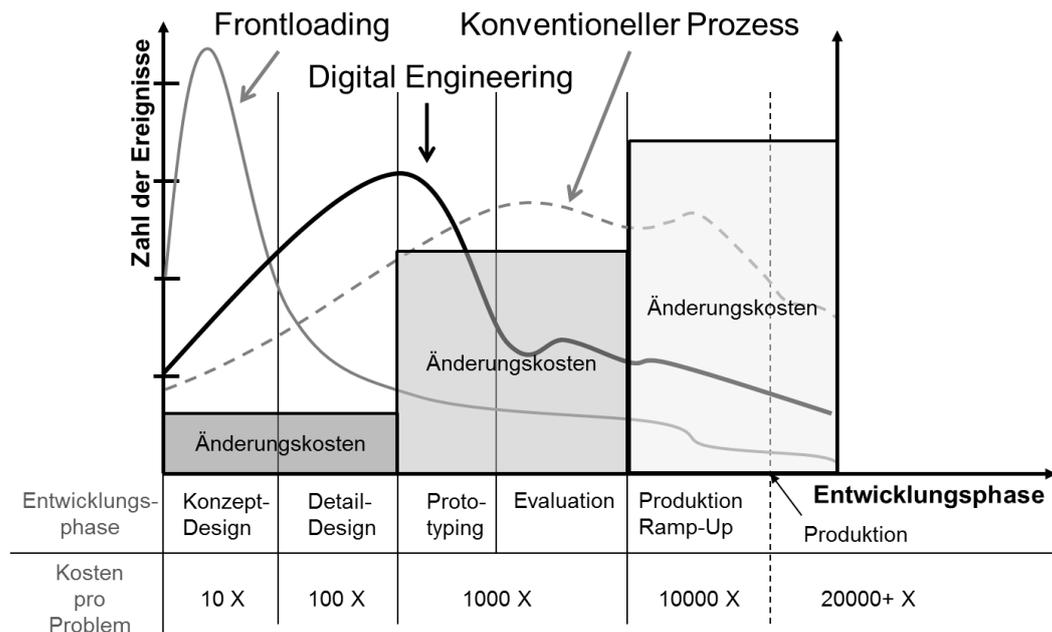


Bild 1: Kostenentwicklung für Probleme in der Entwicklungsphase²⁵

In der Fahrzeugentwicklung spielt die Akustik eine immer bedeutendere Rolle. Dies beinhaltet nicht nur das Sound-Engineering und das Sound-Design im Sinne der Kundenwünsche und Markenerkennung, sondern auch die Außenakustik wie u. a. das Vorbeifahrgeräusch. Dieses lässt sich allerdings erst in einer sehr späten Phase des Fahrzeugentwicklungsprozesses messen, da das Fahrzeug zumindest als realer Prototyp zur Verfügung stehen bzw. für die Homologation das Produkt der Serie entsprechen muss. Für eine frühzeitige Validierung und Abschätzung der Ergebnisse wird angestrebt, das Vorbeifahrgeräusch auf einem Rollenprüfstand zu simulieren, um Unsicherheiten, wie meteorologische Bedingung, im Entwicklungsprozess auszuschließen.

Um den Entwickler methodisch zu unterstützen, entwickelte Albers²⁶ das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM). Dieses Metamodell beinhaltet alle Elemente, die für die Entwicklung eines Produktes notwendig sind. Dabei definiert Albers²⁷ die Validierung als zentrale Aktivität und entwickelt eine durchgängige Validierungsumgebung, das s. g. „X“-in-the-Loop Framework.

²⁵ Weber 2009

²⁶ Albers 2010

²⁷ Albers / Düser 2009b

2.1.2 Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM)

Der Fahrzeugentwicklungsprozess ist stark vom Zeit- und Kostendruck geprägt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, sind Methoden und Prozesse für die Produktentstehung insbesondere in der Fahrzeugentwicklung notwendig.²⁸

Für die Produktentstehung gibt es bereits bekannte Prozessmodelle wie die VDI 2221²⁹, das Stage-Gate-Modell von Cooper³⁰, das V-Modell der VDI-Richtlinie 2206³¹ oder integrative Ansätze mit dem Fokus der Erfüllung der Kundenwünsche unter Beteiligung aller Stakeholder³².

Alle genannten Handlungsschemata zeigen jedoch eine mangelnde Reaktionsfähigkeit bei dem Umgang mit Komplexität, welche durch die Verschachtelung unzähliger Elemente in der Produktentwicklung entsteht³³. Entwicklungsprozesse insbesondere bei Fahrzeugen unterliegen aufgrund der sich stetig ändernden Randbedingungen, der großen Anzahl an Subsystemen und Zulieferern und des zunehmenden Zeit- und Kostendruckes einer hohen Dynamik und damit einem hohen Grad an Vernetzung der einzelnen Elemente, welche in der Regel nur stark vereinfacht dargestellt werden können³⁴. Sequenzielle Modelle haben im Gegensatz zu parallelen Modellen nicht die Möglichkeit, notwendige Iterationen in Prozessen darzustellen. Zu umfangreich definierte Modelle hingegen können zwar viele Eventualitäten abdecken, jedoch bieten sie kaum eine Hilfestellung in der Praxis.

Basierend auf den fünf Hypothesen der Produktentstehung definierte Albers³⁵ das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM), wie in Bild 2 dargestellt. Da dieses Modell ein Forschungsschwerpunkt am IPEK ist, wird darauf im Folgenden näher eingegangen, um die Arbeit in den Kontext der Produktentwicklung und vor allem der Fahrzeugentwicklung einzugliedern.

Das iPeM ist ein Metamodell, das allgemeine Beschreibungen zu Elementen und deren Beziehungen enthält, um spezifische Modelle für die Produktentwicklung darstellen zu können. Als Metamodell enthält es alle Elemente, die für die Entwicklung notwendig sind. Diese sind das Zielsystem, das Objektsystem und das

²⁸ Schäuffele / Zurawka 2010

²⁹ VDI-Richtlinie 2221

³⁰ Cooper 1994

³¹ VDI-Richtlinie 2206

³² Ehrlenspiel 2003

³³ Albers / Braun 2011

³⁴ Meboldt 2008

³⁵ Albers 2010

Handlungssystem mit den Aktivitäten der Produktentstehung, der Problemlösung, das Ressourcensystem und das Phasenmodell. Mit diesem Metamodell kann somit jeder spezifische und einzigartige Entwicklungsprozess abgebildet werden (Hypothese 1)³⁶.

Die Basis dieses Modells bildet das ZHO³⁷-Triple. So enthält das Metamodell das Zielsystem und Objektsystem, welche durch das Handlungssystem miteinander verknüpft sind. Das Handlungssystem wird durch die Aktivitätenmatrix, das Ressourcensystem und das Phasenmodell beschrieben. Nach Albers dritter Hypothese³⁸ ist die zentrale Aktivität im Entwicklungsprozess die Validierung zum kontinuierlichen Abgleich des Objektsystems mit dem Zielsystem.

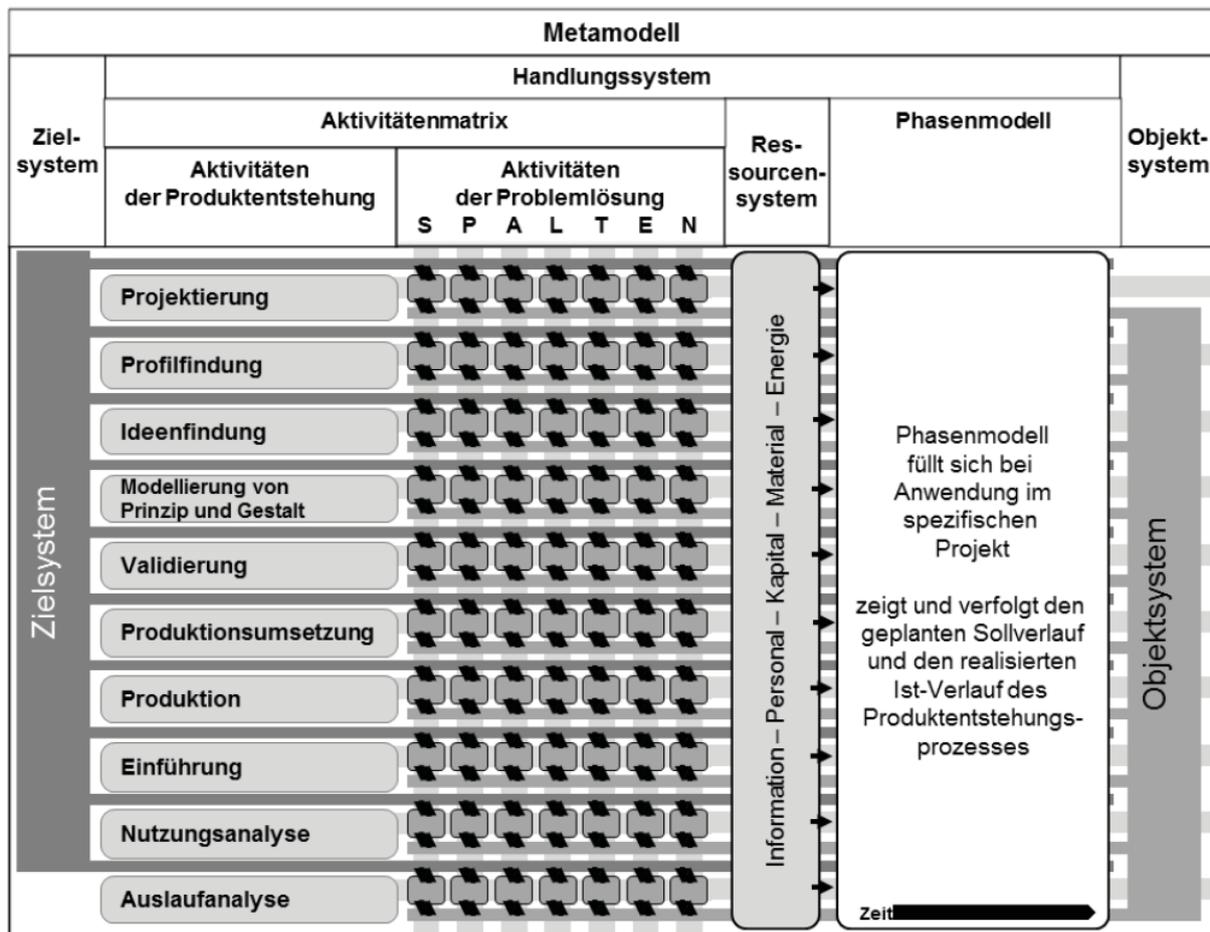


Bild 2: Das integrierte Produktentstehungsmodell (iPeM) nach Albers³⁹

³⁶ Albers 2010

³⁷ ZHO: Abkürzung für Zielsystem, Handlungssystem, Objektsystem

³⁸ Albers / Braun 2011

³⁹ Albers 2010

Aktivitätenmatrix

Die Aktivitätenmatrix besteht aus den Aktivitäten der Produktentstehung (den s. g. Makroaktivitäten) und den Aktivitäten der Problemlösung „SPALTEN“ (den s. g. Mikroaktivitäten)⁴⁰. Die Makroaktivitäten bilden im Groben den Lebenszyklus eines Produktes ab. Die Reihenfolge besitzt dabei keine sequenzielle Chronologie, viel mehr sind diese Prozesse als grundsätzlich zu unterscheidende Aktivitäten zu sehen, welche in jedem Prozess individuell und iterativ angewendet werden.

Neben den Aktivitäten der Produktentstehung enthält die Aktivitätenmatrix die Aktivitäten der Problemlösung. Als Problemlösungsprozess wird hier die SPALTEN Methode nach Albers et al.⁴¹ genutzt. Dieser Prozess kann in jeder Aktivität der Produktentstehung für die Transformation von Zielen in konkrete Objekte angewendet werden.

Die Aktivitätenmatrix gibt dem Entwickler eine Struktur, die im Entwicklungsprozess durchlaufen wird. Der Problemlösungsprozess SPALTEN unterstützt den Entwickler methodisch. SPALTEN ist eine Methode zur Problemlösung und steht als Akronym für: **S**ituationsanalyse, **P**roblemeingrenzung, **A**lternative Lösungssuche, **L**ösungsauswahl, **T**ragweitenanalyse, **E**ntscheiden und Umsetzen, **N**achbereiten und **L**ernen⁴². Diese universelle Methode muss dabei an das Problem angepasst werden, daher müssen nicht immer alle Schritte durchlaufen werden.

Ressourcensystem

Das Ressourcensystem ist ein weiteres zentrales Element im Handlungssystem. In diesem System sind die Elemente wie Mitarbeiter, Kapital, Information (auch Patente etc.) oder auch Arbeitsmittel (Material, Maschinen, Prüfstände etc.)⁴³ festgelegt, welche den Entwicklern zur Verfügung stehen und können direkt den Tätigkeiten in der Aktivitätenmatrix zugewiesen werden. So können die einzelnen Aktivitäten als Phasen auf einem Zeitstrahl abgebildet werden. Damit lässt sich die Sicht der Entwickler mit der Sicht des Controllings verknüpfen⁴⁴.

Phasenmodell

Mit der Abbildung der Aktivitäten als Phasen auf einem Zeitstrahl lässt sich das Phasenmodell z. B. als Gantt-Chart erstellen. Die den Aktivitäten zugeordneten Zeitintervalle können somit als eine Phase mit einer zeitlich bestimmten Dauer einem

⁴⁰ Gerst 2002

⁴¹ Albers et al. 2005

⁴² Albers et al. 2005

⁴³ Albers 2010

⁴⁴ Albers / Braun 2011

Prozess zugeordnet werden. Das bedeutet, dass Phasen aus mehreren parallelen Aktivitäten bestehen können. Diese sind dynamisch und müssen den jeweiligen Erfordernissen und Projektsituationen angepasst werden.⁴⁵

Albers definiert mit dem integrierten Produktentstehungsmodell ein Metamodell mit allen Elementen, welches es ermöglicht, jeden spezifischen Produktentstehungsprozess, so auch den Fahrzeugentwicklungsprozess, zu beschreiben. Die zentrale Aktivität ist dabei die Validierung. Um den Abgleich zwischen Zielsystem und Objektsystem auf verschiedenen Ebenen und Entwicklungsstufen durchführen zu können, entwickelte Albers⁴⁶ das im Folgenden erläuterte „X“-in-the-Loop Framework.

2.2 X-in-the-Loop-Framework

Nach Albers dritter Hypothese⁴⁷ ist, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, die Validierung die zentrale Makroaktivität in der Produktentstehung. Validierung tritt jedoch in der Regel als zeitlich parallele Aktivität zu den anderen Makroaktivitäten auf. Dadurch wird nicht nur überprüft, ob das entwickelte (Teil-)System die definierten Ziele erfüllt, sondern es entsteht auch Wissen, das in den Entwicklungsprozess zurückfließen muss⁴⁸.

Mit steigender Komplexität der Systeme steigen auch die Komplexität der Validierungsmethoden und die Anforderungen an die Validierungsumgebung. Die Validierung muss sowohl auf Basis der virtuellen Validierung (Simulation) wie auch einer realen Validierung (Test) erfolgen und integriert betrachtet werden.⁴⁹

In Anlehnung an den klassischen Hardware-in-the-Loop Ansatz für das Testen von Steuergeräten und Steuergerätefunktionen definiert Albers^{50,51} eine durchgängige Validierungsumgebung, das s. g. „X-in-the-Loop Framework“ (kurz: XiL-Framework), wie in Bild 3 dargestellt.

⁴⁵ Albers 2010

⁴⁶ Albers / Düser 2009b

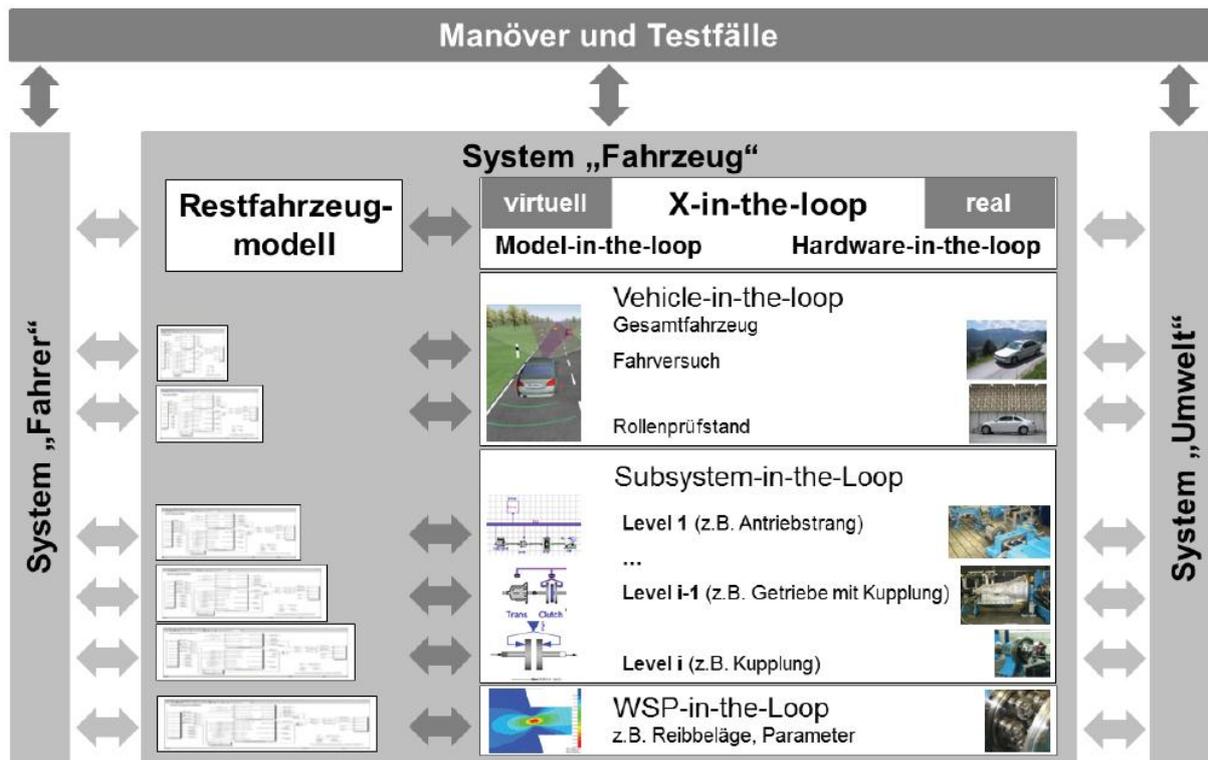
⁴⁷ Albers / Braun 2011

⁴⁸ Düser 2010

⁴⁹ Schyr 2006

⁵⁰ Albers et al. 2008

⁵¹ Albers et al. 2009c

Bild 3: X-in-the-Loop Framework nach Albers⁵²

Dabei steht das „X“ für die Unit-Under-Test (UUT), dem zu untersuchenden Prüfling. Die UUT kann je nach Abstraktionsgrad und Detailtiefe in verschiedenen Ebenen (s. g. Layern) vorliegen, angefangen vom Gesamtfahrzeug über das Subsystem bis hin zum Wirkflächenpaar. So kann die UUT in verschiedenen Ebenen integriert untersucht werden wie z. B. das Wirkflächenpaar im Reibbelag einer Kupplung, nur das Kupplungssystem, das System Kupplung im Antriebsstrang bis hin zum System im Gesamtfahrzeug. Die UUT kann dabei nicht nur eine Hardwarekomponente sein, sondern auch ein Modell oder ein Steuergerätecode. Jeder Level wird durch eine anwendungsspezifische Restfahrzeugsimulation ergänzt, mit dem Ziel, die UUT unter realitätsnahen Bedingungen und damit immer in den beeinflussenden Wechselwirkungen zu untersuchen⁵³. Der Detaillierungsgrad kann je nach Untersuchungsziel und Anwendung variieren.

Ein wichtiges Merkmal des XiL-Frameworks ist dabei die ständige Einbeziehung des Systems „Fahrer“ und des Systems „Umwelt“ in den anwendungsspezifischen Manövern und Testfällen. Auch diese Systeme können real oder virtuell sein, wie z. B. ein virtueller Fahrer mittels Simulation oder einem Fahrroboter oder die Simulation des Systems „Umwelt“, wie z. B. die Simulation eines Freifeldes in einer

⁵² Albers, Düser 2009b

⁵³ Albers, Düser 2009b

Akustikhalle. Somit bietet das XiL-Framework die Möglichkeit auf allen Ebenen sowohl Open- als auch Closed-Loop Manöver dazustellen⁵⁴.

Die Messung des Vorbeifahrgeräusches und die simulierte Vorbeifahrt beschreiben damit ein Teilhandlungssystem der Makroaktivität Validierung im Fahrzeugentwicklungsprozess. Das Ziel dabei ist der Abgleich des gemessenen Fahrzeuggeräusches, also eine Eigenschaft des Objektes mit den definierten Grenzwerten im Zielsystem. Dieser Abgleich kann, je nach UUT, in allen Layern auftreten. So kann das entwickelte Fahrzeug als UUT dem Vehicle-in-the-Loop Layer zugeordnet werden, allerdings können auch, die Auswirkungen von unterschiedlichen Subsystemen als UUT bei der Vorbeifahrtsmessung betrachtet werden. In dieser Arbeit wird das Gesamtfahrzeug als UUT betrachtet. Damit ordnet sich die Arbeit auf dem Vehicle-in-the-Loop Layer ein. Eine besondere Rolle wird dabei die Simulation der Umwelt in der Akustikhalle und des Fahrzeuges spielen. Zum besseren Verständnis ist es erforderlich zunächst im Folgenden die Grundbegriffe der Akustik zu definieren.

2.3 Grundbegriffe der Akustik

Die Akustik, abgeleitet aus dem Griechischen (ακουειν = hören) beschreibt die Lehre des Schalls und die Wirkung auf den Menschen bezüglich Erzeugung, Ausbreitung, Reflexion und Absorption in Medien⁵⁵. In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen der Akustik behandelt.

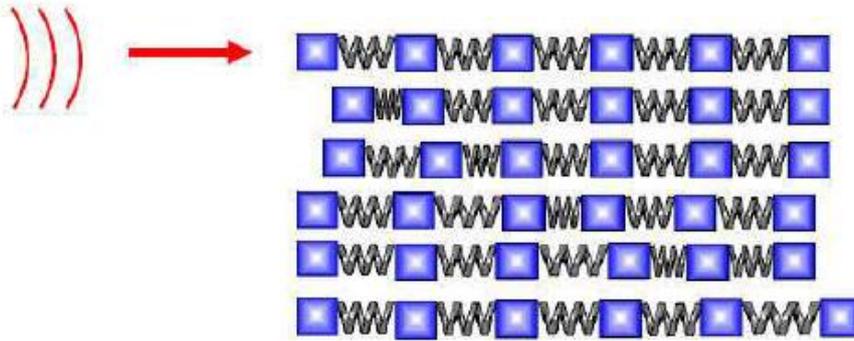
2.3.1 Schall

Periodische Wechselprozesse, entstehend durch elektrodynamische Schwingungen und Wellen von Molekülen in Medien, werden im Allgemeinen als Schall bezeichnet⁵⁶. Die Schwingungen können allgemein durch ein Feder-Massen-Modell, wie in Bild 4 dargestellt, veranschaulicht werden.

⁵⁴ Düser 2010

⁵⁵ Kuttruff 2004

⁵⁶ DEGA 2006

Bild 4: Ausbreitung von Schwingungen in gasförmigen Medien⁵⁷

Da gasförmige und flüssige Medien keine Schub- und Scherkräfte übertragen, schwingen die Massen in Ausbreitungsrichtung und werden als Longitudinal- oder Dichtewellen bezeichnet. In festen Medien dagegen können zudem auch Scherungswellen, s. g. Transversalwellen entstehen⁵⁸.

2.3.2 Charakteristische Größen von Schallwellen

Schallwellen sind Schwingungen von Teilchen und besitzen charakteristische Größen und Zusammenhänge, auf die im Folgenden eingegangen wird.

2.3.2.1 Schallgeschwindigkeit c

Die Schall- oder Phasengeschwindigkeit beschreibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Medium. Ausgehend von der Zustandsgleichung eines idealen Gases gilt für die Schallgeschwindigkeit c in Abhängigkeit der Temperatur T , Isentropenexponent κ , Gaskonstante R und der molaren Masse m_l folgende Beziehung nach Gl. 1

$$c = \sqrt{\frac{\kappa RT}{m_l}}; \text{ mit } \frac{R}{m_l} = \frac{p_0}{\rho_0 T_0} \quad \text{Gl. 1}$$

Für den täglichen Gebrauch in der Fahrzeugakustik werden für T_0, p_0, ρ_0 und κ üblicherweise folgende Normalwerte verwendet⁵⁹

$$T_0 = 293,15 \text{ K}; p_0 = 101325 \text{ Pa}; \rho_0 = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \kappa = 1,4$$

In Abhängigkeit einer Raumtemperaturänderung ϑ ergibt sich die Schallgeschwindigkeit zu Gl. 2.

⁵⁷ Gabi 2006

⁵⁸ DEGA 2006

⁵⁹ Pflüger et al. 2010

$$c = 331,22 \sqrt{\frac{T_0 + \vartheta}{T_0}} \frac{m}{s} \quad \text{Gl. 2}$$

Näherungsweise wird in der Fahrzeugtechnik die Schallgeschwindigkeit bei Raumtemperatur mit $c = 343 \text{ m/s}$ und in der Regel als konstant angenommen⁶⁰.

2.3.2.2 Frequenz f und Wellenlänge λ

Ausgehend von der ebenen Wellengleichung gibt es für stehende Wellen einen Sonderfall, der in der Akustik eine wichtige Bedeutung besitzt, und zwar die in Ausbreitungsrichtung laufende, ebene, harmonische Welle⁶¹. Die Schallgeschwindigkeit c , Frequenz f und Wellenlänge λ sind dabei über die Beziehung nach Gl. 3 verknüpft.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Gl. 3}$$

2.3.2.3 Frequenzverschiebung (Dopplereffekt)

Für bewegte Schallquellen oder bewegte Empfänger ändert sich die wahrgenommene Frequenz mit der Relativgeschwindigkeit. Diese Frequenzverschiebung wird als Dopplereffekt nach seinem Entdecker Christian Andreas Doppler bezeichnet⁶². Allgemein betrachtet lässt sich die Frequenz des wahrnehmenden Empfängers nach Gl. 4 beschreiben.

$$f_E = f_S \left(\frac{c - v_E}{c - v_S} \right) \quad \text{Gl. 4}$$

Dabei ist c die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Medium, v_E bzw. v_S die Geschwindigkeit des Empfängers bzw. Senders und f_S die Frequenz des Senders. In Abhängigkeit von der Relativbewegung hört der Empfänger damit eine andere Frequenz, als der Sender abstrahlt. Dieses Phänomen ist daher bei jedem vorbeifahrenden Fahrzeug vorhanden.

2.3.3 Feldgrößen des Schallfeldes

Schallfelder lassen sich anhand Ihrer Schallfeldgrößen beschreiben. Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Größen. In diesem Kapitel werden nur die wichtigsten und für die Arbeit relevanten Größen erläutert. Da die Feldgrößen für ein reales Schallfeld mathematisch komplex sind, werden diese wie in Gl. 5 definiert⁶³. In der

⁶⁰ Pflüger et al. 2010

⁶¹ Pflüger et al. 2010

⁶² Schetzen 2006

⁶³ DEGA 2006

Literatur wird meist die vereinfachte Schreibweise verwendet, d. h., die Zeitwerte $x(t)$ ergeben sich aus dem Realteil des entsprechenden, mit $e^{j\omega t}$ multiplizierten komplexen Zeigers⁶⁴.

$$x(t) = \hat{x} \cdot \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}\{\hat{x}e^{j(\omega t + \varphi)}\} = \operatorname{Re}\{\underline{\hat{x}}e^{j\omega t}\} \quad \text{Gl. 5}$$

2.3.3.1 Schalldruck $p(t)$

Die wichtigste Größe in der Akustik ist der Schalldruck bzw. Schallwechseldruck. Er wird skalar in Pascal (Pa) angegeben. Eine Schallwelle entsteht durch die Schwingung von Molekülen, wie in Bild 4 schematisch dargestellt. Durch die Teilchenschwingung wird das Medium komprimiert und auf der gegenüberliegenden Seite expandiert. Der entstehende Wechseldruck ist mit dem statischen Luftdruck überlagert und wird als Schallwechseldruck $p(t)$ bezeichnet. Der hörbare Druckbereich liegt in der Akustik zwischen $2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (untere Hörschwelle bei 1000 Hz) und 200 Pa (annähernd Schmerzschwelle).

2.3.3.2 Schalldruckpegel L_p

Da der Schalldruck $p(t)$ eine Wertespanne von sieben 10er - Potenzen einnehmen kann, wird der Schalldruck meist logarithmisch als Schalldruckpegel L_p in Dezibel (dB) angegeben, um den Umgang mit diesem großen Bereich zu vereinfachen.

Der Schalldruckpegel nach Gl. 6 ist die logarithmische Normierung des Effektivwertes \tilde{p} nach Gl. 7 auf den Bezugsdruck $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}$ (Schalldruck an der Hörschwelle bei 1 kHz), woraus sich für den hörbaren Schall ein Wertebereich von 0 dB bis 140 dB ergibt⁶⁵.

$$L_p = 20 \log\left(\frac{\tilde{p}}{p_0}\right) \text{ mit} \quad \text{Gl. 6}$$

$$\tilde{p}^2 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{-\tau}^{\tau} p^2(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-T}^T p^2(t) dt \quad \text{Gl. 7}$$

2.3.3.3 Schallschnelle $v(t)$, Schallschnellepegel L_v

Im Gegensatz zum Schalldruck ist die Schallschnelle $v(t)$ eine vektorielle Größe und beschreibt die zeitliche Schwinggeschwindigkeit des Moleküls um die Ruhelage. Häufig wird die Schnelle in Schallausbreitungsrichtung skalar nach Gl. 8 angegeben, mit der Amplitude A und der Frequenz f .

⁶⁴ Lerch et al. 2009

⁶⁵ DEGA 2006

$$v = \frac{dx}{dt} = 2\pi f A \cdot \cos(2\pi f(t - \frac{x}{c})) \quad \text{Gl. 8}$$

Die Schnelle wird ebenfalls als Pegelgröße nach Gl. 9 in dB mit der Bezugsschnelle $v = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ (Schallschnelle an der Hörschwelle bei 1 kHz⁶⁶) angegeben und dem Effektivwert \tilde{v} analog nach Gl. 7 zum Schalldruck⁶⁷.

$$L_v = 20 \log\left(\frac{\tilde{v}}{v_0}\right) \quad \text{Gl. 9}$$

2.3.4 Schallenergiegrößen

Schallenergiegrößen werden durch die jeweiligen Feldgrößen beschrieben. Die meist verwendeten Größen für die Beschreibung in der Maschinen- und Fahrzeugakustik sind der Schalleistungspegel und Schallintensitätspegel.

2.3.4.1 Schallintensität I ; Schallintensitätspegel L_I

Die Schallintensität I beschreibt die Schallenergie, die von einem Objekt ausgestrahlt wird und pro Zeiteinheit durch eine definierte Oberfläche austritt. Sie ist vektoriell durch die Schallschnelle nach Gl. 10 definiert und wird in W/m^2 angegeben.

$$\vec{I} = p(t) \cdot \vec{v}(t) \quad \text{Gl. 10}$$

Die Schallintensität kann ebenfalls, wie in Gl. 11, als Pegelgröße in dB mit dem Effektivwert \tilde{I} und dem Bezugswert $I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W/m}^2$ angegeben werden⁶⁸.

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{\tilde{I}}{I_0}\right) \quad \text{Gl. 11}$$

2.3.4.2 Schalleistung P ; Schalleistungspegel L_W

Die Schalleistung P ist eine akustisch invariante Größe. Sie ergibt sich durch die Integration der Intensität über die Durchtrittsfläche des Energieflusses nach Gl. 12 und beschreibt die pro Zeiteinheit abgegebene oder aufgenommene Schallenergie in Watt⁶⁹.

$$P = \int^S \vec{I} d\vec{S} \quad \text{Gl. 12}$$

⁶⁶ DIN EN ISO 1683:2008

⁶⁷ Kollmann 2000

⁶⁸ DEGA 2006

⁶⁹ Henn et al. 2008

Der Schallleistungspegel kann analog nach Gl. 13 mit dem Effektivwert \tilde{P} und dem Bezugswert $P_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W}$ berechnet werden und ist eine charakteristische Größe für die Beurteilung einer Quelle.

$$L_p = 10 \cdot \log \left(\frac{\tilde{P}}{P_0} \right) \quad \text{Gl. 13}$$

2.3.5 Einteilung der Schallereignisse

Schall wird aufgrund der vielen unterschiedlichen Eigenschaften, die dieser besitzen kann, unterteilt. In der Literatur finden sich u. a. folgende Klassifizierungen des Schalls wieder^{70,71}:

- Abhängig vom Medium (Wellenart)
 - Fluidschall als **Luftschall** oder Flüssigkeitsschall
 - Körperschall
- Abhängig von der Frequenz
 - Infraschall: $1 \text{ Hz} < f < 16 \text{ Hz}$
 - **Hörbarer Schall: $16 \text{ Hz} < f < 16.000 \dots 20.000 \text{ Hz}$**
 - Ultraschall: $16.000 \text{ Hz} < f < \text{ca. } 1 \text{ GHz}$

In Abhängigkeit vom Frequenzspektrum wird der hörbare Schall nach Schallereignissen eingeteilt. Die Wichtigsten sind in Bild 5 dargestellt⁷².

In der Fahrzeugtechnik treten in der Regel nur Geräusche auf, d. h. Schallereignisse mit aperiodischen und unharmonischen Frequenzverläufen. Hörbare Auffälligkeiten zählen, auch wenn diese anders empfunden werden, trotzdem zu Geräuschen, da diese durch dominante Frequenzen in einem breiten Frequenzspektrum entstehen. Einzelne Töne oder Klänge mit nur einer Frequenz bzw. einer Frequenz und deren harmonischen Schwingungen kommen bei Untersuchungen am Gesamtsystem nur sehr selten vor⁷³.

Rauschen

Neben den natürlichen Geräuschen gibt es in der technischen Akustik nach DIN 1320 noch eine Vielzahl von weiteren Geräuschen. Eines davon ist der Rauschschall, bei dem der zeitliche Verlauf seiner Feldgrößen aus der Sicht des

⁷⁰ Gabi / Pantle 2010

⁷¹ Borucki 1980

⁷² FESI 2001

⁷³ Genuit 2010

Empfängers nur statistisch beschreibbar ist⁷⁴. Die zwei wichtigsten Vertreter von Rauschen sind das „weiße Rauschen“ und das „rosa Rauschen“. Sie werden in der Regel als Testsignale verwendet.

Wie in Bild 5 dargestellt, besitzt das „weiße Rauschen“ ein konstantes Leistungsdichtespektrum, d. h., alle Frequenzen sind mit gleicher Amplitude enthalten. Die Terz- oder Oktavpegel steigen um 3 dB je Oktave an.

Beim $1/f$ -Rauschen oder auch „rosa Rauschen“ genannt, fällt die Amplitude des Spektrums reziprok zur Frequenz ab. Bei Verdoppelung der Frequenz halbiert sich die Rauschleistungsdichte. Die Leistungsdichte des Frequenzspektrums nimmt um 3 dB/Oktave zu höheren Frequenzen ab. Die Terz- bzw. Oktavpegel sind bei allen Frequenzen konstant⁷⁵. Subjektiv klingt das rosa Rauschen wie eine Gleichverteilung aller Frequenzen aufgrund der geringeren Hörempfindlichkeit bei niedrigeren Frequenzen.

⁷⁴ DIN 1320: 2009

⁷⁵ Möser 2010

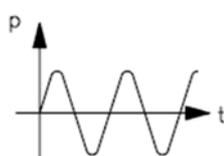
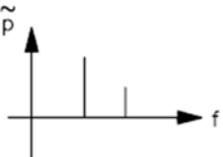
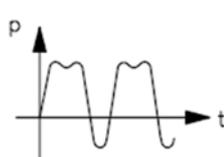
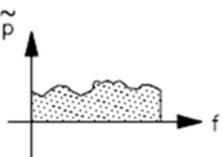
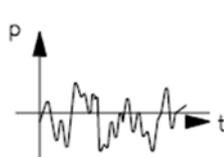
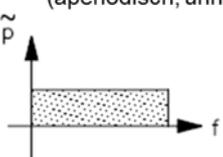
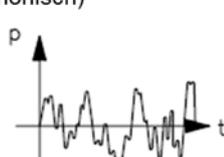
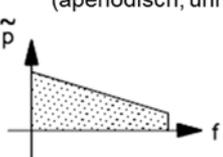
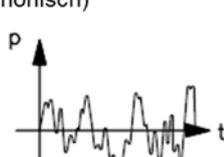
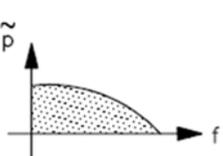
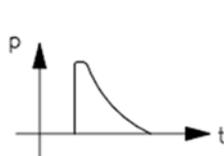
Frequenzen		physiologisch - psychologisch
1. Spektrum	2. Wellenbild	
Ton (periodisch, harmonisch)		Ohr kann Tonhöhe zuordnen. Nur elektroakustisch darstellbar.
		
Klang (periodisch)		Ohr kann Klanghöhe zuordnen. Klanghöhe = Grundhöhe. Eindruck ist musikalisch (Klangfarbe). Musikinstrumente, Vokale, Glocken, Hupen, etc.
		
Geräusch (aperiodisch, unharmonisch)		„Geräuschhöhe“ im Allgemeinen nicht vorhanden. Eindruck, speziell Lästigkeit, von verschiedenen Faktoren abhängig
		
Geräusch des „weißen Rauschens“ (aperiodisch, unharmonisch)		„Geräuschhöhe“ nicht feststellbar. (Wird für elektroakustische Meßzwecke verwendet)
		
Geräusch des „rosa Rauschens“ (aperiodisch, unharmonisch)		„Geräuschhöhe“ nicht feststellbar. (Wird für elektroakustische Meßzwecke verwendet)
		
Knall		Schall schmerzerzeugend, Kurzer Impuls.
		

Bild 5: Charakteristische Schallspektren im Schalldruck-Frequenz-Verlauf bzw. Amplituden-Zeit-Verlauf⁷⁶

⁷⁶ FESI 2001

2.3.6 Bewertung von Schall

In der technischen Akustik gibt es neben den Analysemethoden, wie die Fourier- oder Terzanalyse weitere standardisierte Bewertungsmethoden, wie die relative Frequenzbewertung und die Darstellung in genormten Frequenzintervallen. Für die Anpassung des Schalls an das menschliche Gehör und an die Empfindung von Schallereignissen gibt es in der Psychoakustik eine weitere Vielzahl von Bewertungsgrößen und Kennwerten wie z. B. Lautheit, Schärfe, Rauheit, Schwankungsstärke etc., auf die in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird, da diese für die simulierte Vorbeifahrt nicht notwendig sind⁷⁷. Im Folgenden wird daher nur auf die relative Frequenzbewertung und die spektrale Darstellung mittels Terz- und Oktavfilter eingegangen.

2.3.6.1 Kurven gleicher Lautstärke und relative Frequenzbewertung

Das Hörempfinden des menschlichen Ohrs ist abhängig von Frequenz und Schalldruckpegel. So werden unterschiedliche Frequenzen als gleich laut empfunden, obwohl der Schalldruckpegel variiert. Dieser Sachverhalt wird durch die Kurven gleicher Lautstärke beschrieben, wie in Bild 6 links dargestellt⁷⁸.

Basierend auf den Kurven gleicher Lautstärke werden verschiedene Bewertungskurven in Form von Frequenzfiltern eingesetzt, welche in Näherung die Inversen der Kurven gleicher Lautstärke darstellen⁷⁹. Der bewertete Schalldruckpegel wird in der Einheit dB(„X“) angegeben, wobei „X“ für jeweilige Kennzeichnung der Bewertung steht. Neben der wichtigsten A-Bewertung gibt es die Bewertungen B, C, D und Z, welche wie folgt definiert sind⁸⁰:

- dB(A): Für Schalldrücke bis 60 dB (Beschreibung von Lärm und Geräuschen)
- dB(B): In internationalen Normen nicht mehr enthalten
- dB(C): Für Schalldrücke über 85 dB (Bewertung von Lärm mit sehr hohen Schalldruckpegeln)
- dB(D): Zur Messung von Fluglärm (nicht in Deutschland)
- dB(Z): Lineare Bewertung in Vorbereitung (von „Zero = Null“); ersetzt dB(lin)

⁷⁷ Wu et al. 2009

⁷⁸ DIN 45630-1

⁷⁹ Dubbel 2007

⁸⁰ DIN EN 61672-1 2003

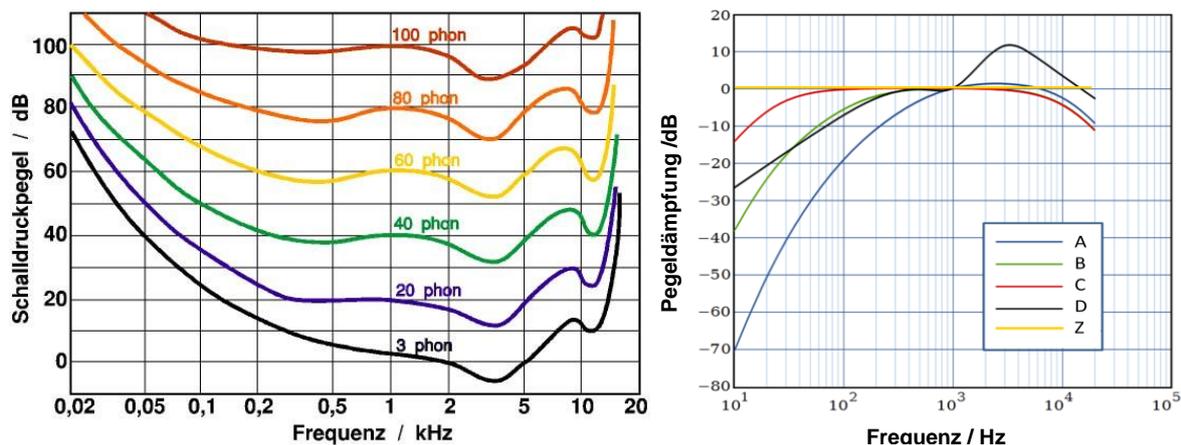


Bild 6: Kurven gleicher Lautstärke (links) und relative Frequenzbewertung des Schalldruckpegels (rechts)⁸¹

In der Fahrzeugentwicklung und bei akustischen Messungen im Bereich der Fahrzeugakustik - so auch bei der Messung des Vorbeifahrgeräusches - ist der A-bewertete Schalldruckpegel in dB(A) die maßgebende Größe.

2.3.6.2 Spektrale Darstellung von Schallfeldgrößen

In der technischen Akustik entstehen in der Regel komplexe zeitliche Schalldruckverläufe, die zwar periodische Anteile besitzen, allerdings überwiegend stochastisch sind⁸². Für hochauflösende Untersuchungen und zur gezielten Suche von dominanten Frequenzen in Signalen sind schmalbandige Analysen erforderlich. In der Signalverarbeitung wird die sogenannte FFT-Analyse (Fast-Fourier-Transform) verwendet, allerdings ist diese hohe Frequenzauflösung manchmal nicht erforderlich oder auch unerwünscht, da das Spektrum von 16 Hz bis 16 kHz reicht. Für Aussagen, ob Signale signifikante Frequenzanteile enthalten, werden dagegen breitbandige Analysen durchgeführt, welche eine Verdichtung des Frequenzbereiches mit gleichmäßiger Auflösung zugunsten der Übersichtlichkeit ermöglichen. Der wichtigste Vertreter in der Akustik ist allgemein die 1/n-Oktav-Analyse ($n=1, 2, 3, 6, 9, 12, \dots$)⁸³. Die gängigsten Filter sind der Oktavfilter ($n=1$) und Terz- oder 1/3-Oktav-Filter ($n=3$).

Die Analyse erfolgt mittels Filter relativ konstanter Bandbreite. Dabei ist das Verhältnis von Bandbreite Δf zur Mittenfrequenz f_m immer konstant. Diese Größen sind abhängig von der oberen und unteren Grenzfrequenz f_o, f_u und unterliegen den in Gl. 14, Gl. 15 und Gl. 16 nachstehenden Gesetzmäßigkeiten⁸⁴:

⁸¹ DIN EN 61672-1 2003

⁸² Pflüger et al. 2010

⁸³ Möser 2009

⁸⁴ Storm, R. 2008

$$f_o = f_u \sqrt[n]{2} \tag{Gl. 14}$$

$$f_m = \sqrt{f_u f_o} = f_u \sqrt[n]{2} = \frac{f_o}{\sqrt[n]{2}} \tag{Gl. 15}$$

$$\Delta f = f_o - f_u = f_m \left(\sqrt[n]{2} - \frac{1}{\sqrt[n]{2}} \right) \tag{Gl. 16}$$

In Bild 7 ist exemplarisch das Terzspektrum eines akustischen Signals dargestellt. Dabei wird das gesamte Zeitsignal in jeweils 0,5 s lange Abschnitte unterteilt und in jedem Abschnitt das Terzspektrum ausgewertet und die Amplitude über die Mittenfrequenzen aufgetragen. Die ersten 2 Abschnitte werden dabei immer als Block angezeigt, alle weiteren als je eine Linie. Auf der rechten Seite im Diagramm ist zusätzlich für jedes Zeitintervall der Gesamtpegel aufgetragen.

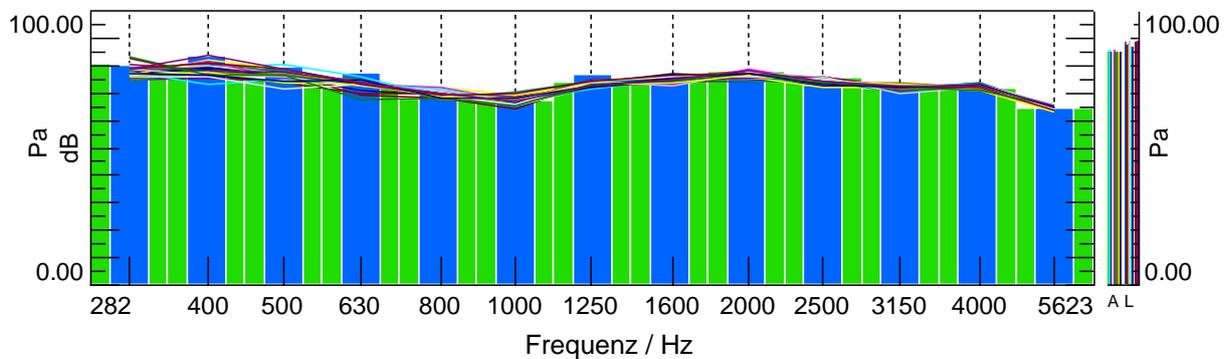


Bild 7: Exemplarische Darstellung eines Terzspektrums

2.3.7 Schallquellen

Jede Schallquelle baut in einem schwingfähigen Medium ein Schallfeld mit einer bestimmten Schalldruck- bzw. Schalldruckpegelverteilung auf. Die Schallquelle selbst beeinflusst in Abhängigkeit ihrer Größe, Geometrie, Schalleistung, spektraler Verteilung und der Richtcharakteristik das Schallfeld. Des Weiteren wird das Schallfeld einer Schallquelle stark durch die Umgebung geprägt⁸⁵. In der Akustik werden zwei grundlegende Quellenarten unterschieden⁸⁶:

- Punktschallquellen
- Linien- und Flächenschallquellen

⁸⁵ Henn et al. 2008

⁸⁶ Gabi / Pantle 2010

Die gängigsten Schallquellen und die für die weiteren Untersuchungen verwendeten Quellen sind die Punktschallquellen. Diese werden anhand Ihrer Pole eingeteilt:

- Monopol; Kugelstrahler 0. Ordnung
- Dipol, Kugelstrahler 1. Ordnung
- Multipol

Zudem gibt es noch weitere praktische Strahler wie z. B. den Plattenstrahler oder Kolbenstrahler⁸⁷. Im Folgenden soll jedoch nur auf die für die Arbeit relevanten Quellen eingegangen werden.

2.3.7.1 Punktschallquelle

In Bild 8 sind die Schwingformen von Punktschallquellen 0., 1. und 2. Ordnung zweidimensional dargestellt.

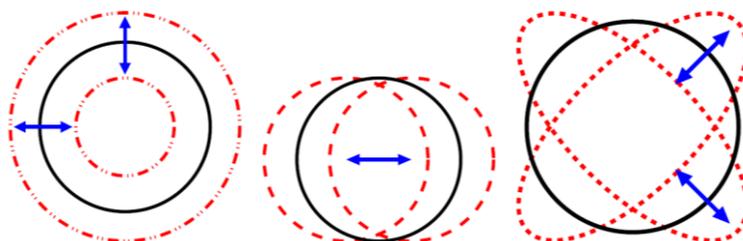


Bild 8: Schallquellen: Monopol(links); Dipol (Mitte); Quadropol (rechts)⁸⁸

Monopol; Kugelstrahler 0. Ordnung

Der Monopol, oder auch Kugelstrahler 0. Ordnung genannt, ist eine pulsierende oder auch „atmende“ Kugel. Das Volumen dieses Strahlers ändert sich pulsierend und ist damit der einfachste Elementarstrahler. Der Mittelpunkt der Kugel bleibt ortsfest und die Kugeloberfläche schwingt gleichphasig mit der Schallschnelle. Im Idealfall sendet die Kugel aus Symmetriegründen eine Kugelwelle ohne Richtcharakteristik aus.

Technisch gesehen gibt es drei Möglichkeiten, einen Kugelstrahler in guter Näherung zu realisieren. Für die Erzeugung einer Kugelwelle gibt es die Möglichkeit, eine Schallquelle durch einen Spalt im Boden oder in der Wand strahlen zu lassen. Durch die Beugung am Einzelspalt entsteht eine Elementarwelle, wie in Bild 9 links dargestellt⁸⁹. Für die Messungen in Prüfhallen ist diese Variante oft nicht möglich, daher gibt es den s. g. Halbdodekaeder, wie in Bild 9 Mitte dargestellt. Die Bezeichnung Halbdodekaeder kommt durch die geometrische Form, bestehend aus

⁸⁷ Henn et al. 2008

⁸⁸ Gabi / Pantle 2010

⁸⁹ Nolting 2007

sechs 5-eckigen Flächen und einer Auflagefläche. In den 5-eckigen Flächen ist jeweils ein Lautsprecher eingepasst. Durch die annähernd halbrunde Kugelform des Halbdodekaeders, welche auf dem Boden des Prüfraumes aufgestellt wird, entsteht eine gute Annäherung an eine Punktschallquelle, die eine Kugelwelle ausstrahlt. Eine weitere Form des Kugelstrahlers ist der s. g. (Voll)Dodekaeder. Dieser besteht aus 12 gleichseitigen 5-eckigen Flächen, in welchen jeweils ein Lautsprecher eingebaut ist, wie in Bild 9 rechts dargestellt. Der Dodekaeder erzeugt somit annähernd eine Vollkugel und bildet damit ebenfalls einen Kugelstrahler 0. Ordnung.

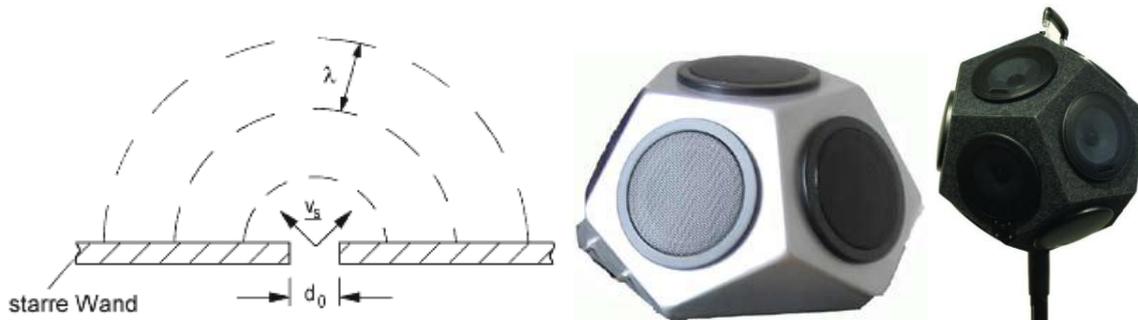


Bild 9: Schallquelle im Boden(links)⁹⁰; Halbdodekaeder (Mitte)⁹¹; Dodekaeder (rechts)⁹²

Dipol, Kugelstrahler 1. Ordnung

Kugelstrahler 1. Ordnung entstehen durch Wechselkräfte, welche die Quelle als Ganzes in der Ebene zum Schwingen anregen, ohne dass sich das Volumen ändert. Im Idealfall kann der Kugelstrahler 1. Ordnung ein weiterer Elementarstrahler sein. Aufgrund der ebenen Bewegung werden die gegenüberliegenden Wellen gegenphasig angeregt. Damit ist die Schallabstrahlung zwar nicht mehr kugelsymmetrisch, jedoch rotationssymmetrisch zur Strahlerachse⁹³. Für das weitere Vorgehen sind diese Strahler allerdings nicht von Interesse.

Multipol, Kugelstrahler n-ter Ordnung

Kugelstrahler n-ter Ordnung besitzen keine kugelsymmetrischen Eigenschaften, sondern schwingen mit über den Umfang verteilten Wellenformen⁹⁴.

2.3.7.2 Flächenstrahler

In den Normenwerken^{95,96} wird für Flächen- und Linienstrahler ein Modell von vielen Punktschallquellen herangezogen. Dabei muss die Linie oder Fläche in adäquate

⁹⁰ Henn et al. 2008

⁹¹ Stratenschulte Messtechnik 2012

⁹² Stratenschulte Messtechnik 2012

⁹³ Henn et al. 2008

⁹⁴ Kollman 2000

⁹⁵ DIN ISO 9613-2: 1999

Punktschallquellen aufgeteilt werden, sodass sich die Gesamtschallemission der Linienquelle mit einer Länge als Summe der Längen der Teilstrahler ergibt.

2.3.8 Schallfelder in Prüfumgebungen

Die Gesamtheit, in der die Prüfung eines Systems auf Eigenschaften vorgenommen wird, wird als Prüfumgebung bezeichnet⁹⁷. Schallfelder können sich nur in Medien ausbreiten. Der Raum, in dem sich Schall ausbreitet und dabei bestimmten Gesetzen unterliegt, wird als Schallfeld bezeichnet. Dieses Feld wird durch die Schallfeldgrößen beschrieben, welche gesetzmäßig voneinander abhängig sind. Generische Prüfräume werden daher nach Ihren Schallfeldern eingeteilt⁹⁸.

- Hallraum
- Freifeldraum
- Halbfreifeldraum
- Realer Raum

2.3.8.1 Hallraum

Ziel des Hallraumes ist es, einen möglichst hohen Grad an Reflexionen zu schaffen. Dies wird erreicht, indem die Wände und die Decke des Raumes möglichst schallhart, also eine geringe Schallabsorption aufweisen und nicht parallel oder senkrecht zueinanderstehen. So kann eine Überlagerung von Schallwellen und damit die Möglichkeit der Auslöschung durch Interferenzen vermieden werden⁹⁹. Um dies zu erreichen, werden meist schallreflektierende Platten räumlich und geometrisch unbestimmt an Wänden und Decken befestigt, wie in Bild 10 links und rechts erkennbar. Häufig werden diese Räume zur Untersuchung des Schallabsorptionsgrades und Bestimmung des Schalleistungspegels verwendet. In Bild 10 links ist exemplarisch der Hallraum des Fraunhofer Institutes für Bauphysik IBP in Stuttgart und rechts der Hallraum der TU Dresden dargestellt.

Schall, welcher von einer Schallquelle in einem Hallraum abgestrahlt wird, wird somit ungerichtet an den schallharten Begrenzungsflächen reflektiert. Dadurch erfolgt eine „Durchmischung“ der Schallwellen. In diesem Schallfeld ist im zeitlichen Mittel die

⁹⁶ DIN EN 12354-4: 2001

⁹⁷ Duden 2004

⁹⁸ Günther et al. 1994

⁹⁹ Günther et al. 1994

Amplitude überall gleich groß und der Schalleinfall aus jeder Richtung gleich wahrscheinlich¹⁰⁰.



Bild 10: Hallraum des Fraunhofer Institutes für Bauphysik IBP in Stuttgart (links)¹⁰¹ und rechts der TU Dresden¹⁰²

2.3.8.2 Freifeldraum

Für die Schallquellenanalyse werden häufig Freifeldräume verwendet. Ziel dieser Räume ist es, wie der Name schon sagt, ein Freifeld nachzubilden. Die Wände, Decken und auch der Boden sind in diesem Raum mit schallabsorbierendem Material ausgekleidet, um Reflexionen an den Begrenzungsflächen zu unterdrücken. In einem Freifeldraum kann sich der Schall somit ungehindert, also ohne Reflexion oder Streuung an Hindernissen, ausbreiten. Es entsteht ein sich von der Schallquelle ausbreitendes, gerichtetes Schallfeld, das sogenannte Freifeld. In Bild 11 links ist exemplarisch der Freifeldraum des Fraunhofer IBP in Stuttgart und rechts der Freifeldraum der Ingenieurgesellschaft für Schalltechnik mbH dargestellt. In diesen Räumen gilt ab einem bestimmten, von der Wellenlänge abhängigen Abstand zur Schallquelle das akustische Abstandsgesetz zwischen Schalldruckpegel und Abstand der Quelle. Es besagt, dass der Schalldruckpegel bei Verdoppelung des Abstandes um 6 dB kleiner wird.

Da der Schall in einem idealen Freifeldraum vollständig von der akustischen Einkleidung absorbiert wird, werden diese Räume oft auch als „schalltote Räume“ bezeichnet¹⁰³.

¹⁰⁰ Genuit 2010

¹⁰¹ Fraunhofer IBPa

¹⁰² IAS – TU Dresden

¹⁰³ Genurit 2010



Bild 11: Freifeldraum des Fraunhofer Institutes für Bauphysik IBP (links)¹⁰⁴ und der Ingenieurgesellschaft für Schalltechnik mbH (rechts)¹⁰⁵

2.3.8.3 Halbfreifeldraum

Im Gegensatz zu dem im vorherigen Kapitel beschriebenen Freifeldraum ist der Halbfreifeldraum mit einem schallharten Boden ausgestattet. Diese Räume sind in der Regel für akustische Untersuchung an Fahrzeugen mit einem Prüfstand ausgestattet, wie z. B. der in Bild 12 links dargestellte Akustikrollenprüfstand am IPEK¹⁰⁶ oder der in Bild 12 rechts abgebildete Außengeräuschprüfstand der BMW Group. Das Ziel dieser Hallen ist die Nachbildung einer Teststrecke für Akustikuntersuchung im Freien. Die Wände sind schallabsorbierend und bilden das akustische Freifeld und damit auch die Gesetzmäßigkeiten des Freifeldes nach¹⁰⁷. Der schallharte Boden hingegen spiegelt annähernd die Bedingungen der Straße bzw. der Fahrbahn wieder.

¹⁰⁴ Fraunhofer IBPb

¹⁰⁵ Ingenieurgesellschaft für Schalltechnik mbH

¹⁰⁶ Albers et al. 2009a

¹⁰⁷ Zeller 2009



Bild 12: Halbfreifeldraum des IPEK mit Allradrollenprüfstand (links)¹⁰⁸; Außengeräuschprüfstand der BMW Group (rechts)¹⁰⁹

2.3.8.4 Realer Raum

Reale Räume spiegeln Teile der charakteristischen Eigenschaften eines Hallraumes und eines Freifeldraumes wieder. Das Schallfeld des Raumes lässt sich grundsätzlich in das Nahfeld und Fernfeld einteilen. Das Fernfeld kann wiederum in das Freifeld und das Diffusfeld in Abhängigkeit vom Schalldruck eingeteilt werden, wie in Bild 13 links dargestellt. Bild 13 rechts zeigt den Schalldruckpegelverlauf eines Freifeldraumes (schwarze Linie) und den Schalldruckpegelverlauf von einer Quelle in einem realen Raum (rote Linie)¹¹⁰.

Die Trennung des Nah- und Fernfeldes wird durch die Wellenlänge des Schalls (λ) und den Abstand zur Quelle (r) charakterisiert. Ausgehend von der Schallquelle wird von einem Nahfeld gesprochen¹¹¹.

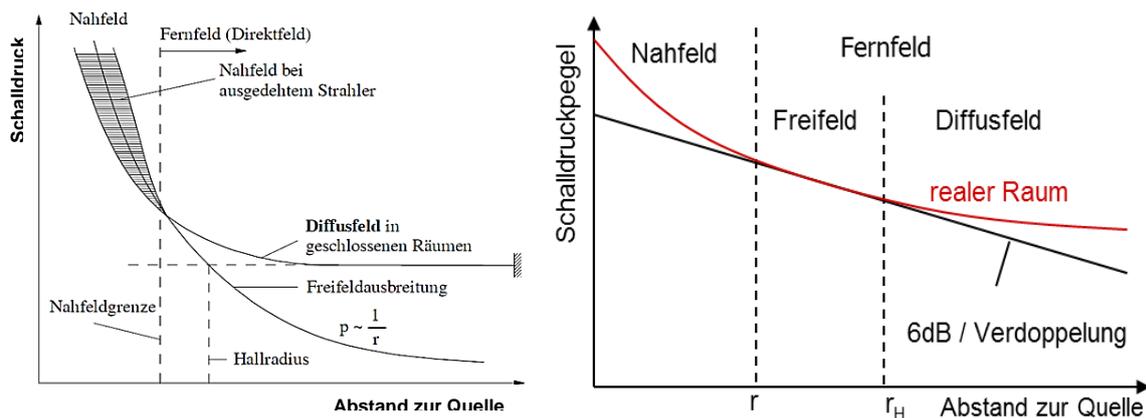


Bild 13: Einteilung des Schallfeldes in einem realen Raum: Schalldruck (links)¹¹²; Schalldruckpegel (rechts)¹¹³

¹⁰⁸ Albers et al. 2009a

¹⁰⁹ Finsterhölzel et al. 2006

¹¹⁰ Albers et al. 2009a

¹¹¹ Maute 2006

Nahfeld

Ist der Abstand der Quelle kleiner als die Wellenlänge ($r < \lambda$) so wird von einem Nahfeld gesprochen. Darin ist die Phasenverschiebung zwischen Schalldruck und Schallschnelle ungleich null. Für Abstände wesentlich kleiner als die Wellenlänge ($r \ll \lambda$) strebt die Phasenverschiebung den Wert $\pi/2$ an¹¹⁴.

Fernfeld

Wird der Abstand von der Schallquelle größer als die Wellenlänge ($r > \lambda$) so geht das Nahfeld in das Fernfeld über. Das Fernfeld wird in *Freifeld* und *Diffusfeld* unterteilt. Die Grenze zwischen den Feldern wird durch den Hallradius (Hallabstand) r_H definiert. An dieser Stelle sind die Schallenergieanteile des Freifeldes und die des Diffusfeldes gleich groß. Im Fernfeld schwingen die Schallschnelle und der Schalldruck phasengleich.

Im Freifeld folgt der Schalldruck dem Abstandsgesetz. Dabei reduziert sich der Schalldruckpegel um 6 dB bei Verdoppelung des Abstandes zur Quelle. Im Diffusfeld dagegen entsteht durch die Reflexion des Schalls an den Begrenzungsflächen eine Überhöhung des Schalldruckpegels¹¹⁵.

2.3.9 Schallausbreitung im Freifeld

Der Zusammenhang zwischen Abstand und Schalldruck kann durch eine idealisierte Punktschallquelle bzw. einen Kugelstrahler 0. Ordnung hergeleitet werden. Eine ideale Quelle strahlt Schallwellen kugelförmig in alle Raumrichtungen ab. Innerhalb des Fernfeldes, bzw. für Abstände größer der Wellenlänge ($r > \lambda$) nimmt der Schalldruck indirekt (umgekehrt) proportional zum Abstand ab ($p \propto 1/r$)¹¹⁶. In Bild 14 sind eine Punktquelle und die entsprechenden Flächen F bei verschiedenen Abständen (r) dargestellt.

¹¹² Lerch et al. 2009

¹¹³ Robens et al. 2007

¹¹⁴ Lerch et al. 2009

¹¹⁵ Robens et al. 2007

¹¹⁶ Henn et al. 2008

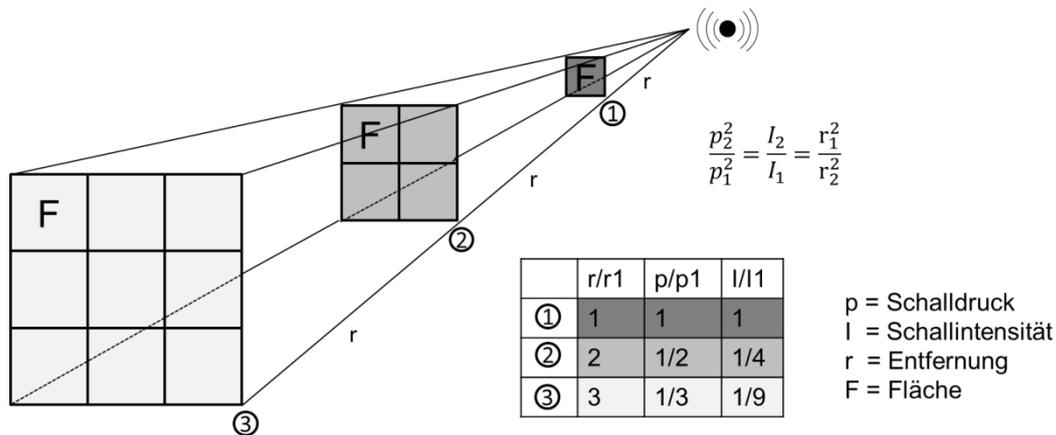


Bild 14: Veranschaulichung des Abstandsgesetzes¹¹⁷

Für das Freifeld gilt die geometrische Bedingung des Strahlensatzes. Der Quotient zweier Schalldrücke verhält sich indirekt (umgekehrt) proportional zu dem Quotient der Abstände nach Gl. 17.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{r_2}{r_1} \tag{Gl. 17}$$

Eingesetzt in Gl. 6 ergibt sich die Gesetzmäßigkeit, dass der Schalldruckpegel im Freifeld um 6 dB kleiner wird bei einer Verdoppelung des Abstandes zur Schallquelle nach Gl. 18. Diese Abnahme wird auch Pegeldämpfung genannt. Die Schallintensität geht entsprechend dem Flächeninhalt quadratisch in die Formel ein¹¹⁸.

$$\Delta L_p = 20 \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \tag{Gl. 18}$$

Nach Henn et al.¹¹⁹ ist allerdings die Abnahme des Schalldruckpegels um 6 dB bei Verdoppelung des Abstandes nur ein theoretischer Wert und die obere Grenze. Praktische Werte liegen unterhalb des Wertes, wie in Bild 15 dargestellt ist. Um diesen Sachverhalt zu berücksichtigen formuliert Henn die Beziehung wie in Gl. 19 definiert.

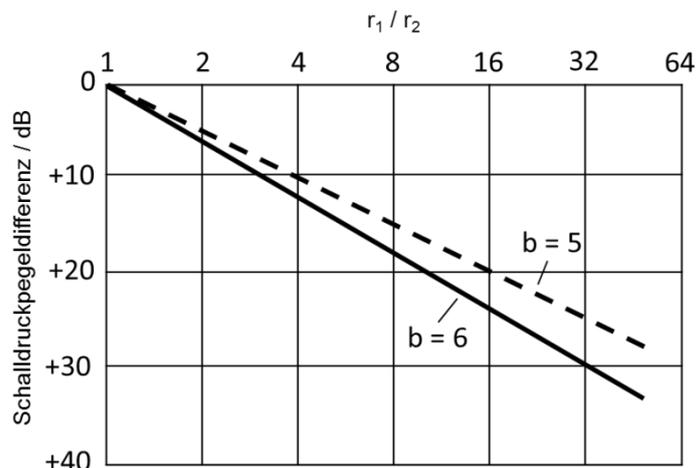
$$\Delta L_p = \frac{b}{6} 20 \lg \left(\frac{r_1}{r_2} \right) \tag{Gl. 19}$$

Die Variable *b* wird dabei als Steigungsmaß eingeführt. Praktisch gesehen wird der Schalldruckpegel demnach weniger gedämpft als theoretisch errechnet. Diese Abweichung ist allerdings erst für sehr große Abstandsänderungen relevant.

¹¹⁷ Pflüger et al. 2010

¹¹⁸ Pflüger et al. 2010

¹¹⁹ Henn et al. 2008

Bild 15: Reale Pegeländerung im Freifeld¹²⁰

2.3.10 Schallausbreitung im Halbfreifeld

Im Gegensatz zum Freifeldraum besitzt der Halbfreifeldraum einen schallharten Boden, wie in Kapitel 2.3.8.3 beschrieben. Durch mögliche Reflexionen entstehen zusätzlich Effekte, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

2.3.10.1 Raumwinkelmaß

Für die Schallausbreitung im Halbfreifeldraum werden zwei Fälle unterschieden.

Im einfachsten Fall handelt es sich um eine Punktschallquelle, die auf dem Boden platziert ist, wie in Kapitel 2.3.7.1 in Bild 9 links und Mitte exemplarisch dargestellt. Es entsteht eine kugelförmige Elementarwelle. Die Schallausbreitung verhält sich wie im vorherigen Kapitel 2.3.9 erläutert.

Im zweiten Fall wird eine Punktschallquelle im Raum betrachtet, wie in Bild 16 dargestellt. Für eine Quellenhöhe h_s , welche wesentlich kleiner ist als der Abstand zwischen Quelle und Mikrofon d_p , empfängt das Mikrofon nicht nur den Schall der Quelle, sondern auch durch die Reflexion am Boden den Schall der Spiegelquelle. Dieser Schall kann durch eine Spiegelquelle S_1 interpretiert werden.

¹²⁰ Henn et al. 2008

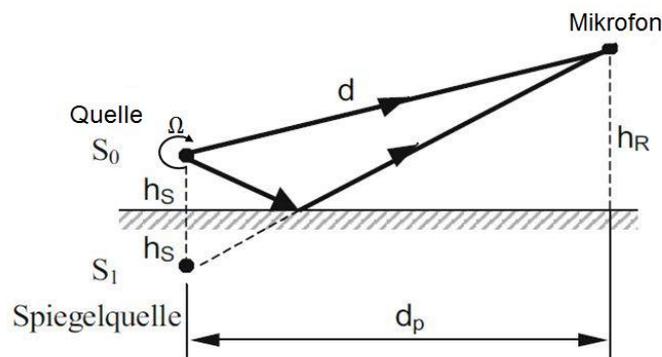


Bild 16: Punktschallquelle über schallharten Boden¹²¹

Die gleichmäßige Schallausbreitung in alle Richtungen ist durch einen Abstrahlwinkel Ω von 4π gekennzeichnet. Folgt eine Abstrahlung nur in einem begrenzten Winkel, so wirkt sich die Pegelabnahme nicht vollständig aus. Dieser Unterschied lässt sich gemäß Gl. 20 durch das Raumwinkelmaß¹²² - definiert durch den Abstrahlwinkel Ω – wie folgt ausdrücken:

$$L_S = L_{S4\pi} + D_\Omega \tag{Gl. 20}$$

D_Ω wird dabei nach Gl. 21 ermittelt.

$$D_\Omega = 10 \cdot \lg\left(\frac{4\pi}{\Omega}\right) \text{ dB} \tag{Gl. 21}$$

Nach Henn et al. kann das Raumwinkelmaß auch für Reflexionen an ebenen Bodenflächen nach Gl. 22 mit dem Schallabsorptionsgrad α bestimmt werden.

$$D_\Omega = 10 \cdot \lg\left[1 + (1 - \alpha) \cdot \frac{d_p^2 + (h_S - h_R)^2}{d_p^2 + (h_S + h_R)^2}\right] \text{ dB} \tag{Gl. 22}$$

Wird eine ideale Reflexion ($\alpha = 0$) des Schalls am Boden und ein Abstand zwischen Mikrofon und Quelle wesentlich größer als die Mikrofonhöhe ($d_p \gg h_R$) angenommen, so sind die Schallwege beider Quellen annähernd gleich lang und die Schalldruckpegel der Quelle und der Spiegelquelle gleich groß. In diesem Sonderfall überhöht sich der Schalldruckpegel gegenüber der ungerichteten Abstrahlung ohne Reflexion um bis zu 3 dB. Dies darf dann angenommen werden, wenn aufgrund von breitbandigen Geräuschen eine Inkohärenz vorausgesetzt werden kann. Für sehr schallweichen und absorbierenden Boden ($\alpha = 1$) entfällt diese Erhöhung wiederum

¹²¹ Henn et al. 2008

¹²² DIN ISO 9613-2: 1999

vollständig. Da der Schallabsorptionsgrad frequenzabhängig ist, ist das Raumwinkelmaß ebenfalls frequenzabhängig, kann aber dennoch vereinfacht gemäß Gl. 22 angegeben werden^{123,124}.

2.3.10.2 Interferenz

Wird eine Quelle und die dazugehörige Spiegelquelle, wie in Bild 16 dargestellt, angenommen, so ergeben sich zwei Schallpfade. Aufgrund des Längenunterschiedes zwischen direktem und reflektiertem Schall entsteht am Mikrofon ein Laufzeitunterschied und dadurch eine Phasenverschiebung. Infolgedessen kann es durch Überlagerung der zeitlich verschobenen Signale zu konstruktiven oder destruktiven Interferenzen kommen. Maßgebend ist dafür die Differenz der beiden Schallpfade, die sich nach Gl. 23 ermittelt, mit der geometrischen Beziehung, dass der Einfallswinkel dem Ausfallswinkel entspricht.

$$\Delta x = d - (d_1 + d_2) = \sqrt{d_p^2 + (h_R + h_S)^2} - \sqrt{d_p^2 + (h_R - h_S)^2} \quad \text{Gl. 23}$$

Ob die Interferenz sich konstruktiv oder destruktiv auswirkt, hängt vom Wegunterschied Δs wie folgt ab¹²⁵:

- Konstruktive Interferenz: $\Delta s = k \cdot \lambda$ mit $k \in N_0$
- Destruktive Interferenz: $\Delta s = (2k \pm 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$ mit $k \in N_0$

2.4 Schallquellen am Fahrzeug

Für die Messung von Fahrzeuggeräuschen und den Transfer in akustische Hallen ist es notwendig, zuvor die zu erwartenden Frequenzen des Schalls zu kennen, um entsprechend die Zulässigkeit der Randbedingungen, gegeben durch die Schallfelder, prüfen zu können. In diesem Kapitel werden die Einflussfaktoren durch die Fahrsituation und die am Fahrzeug vorhandenen Schallquellen und Schallfelder erläutert.

2.4.1 Einflussfaktoren auf das Fahrgeräusch auf dem Prüfstand

Das komplexe Fahrgeräusch eines Fahrzeuges entsteht durch die Vielzahl von verschiedenen Quellen, die bedingt durch den Fahrerwunsch und durch die Fahr- und Betriebsstrategie hervorgerufen werden, wie in Bild 17 schematisch dargestellt. Die hier genannten Geräusche beziehen sich nur auf die aktiven Schallquellen eines

¹²³ Henn et al. 2008

¹²⁴ Cicalo / Trozzi 2009

¹²⁵ Nolting 2007

Fahrzeuges. Windgeräusche, hervorgerufen durch die Fahrgeschwindigkeit und bedingt durch die Fahrzeugform, werden außen vor gelassen. Diese Abbildung ist ebenfalls zulässig für den Betrieb auf dem Rollenprüfstand, da bei Akustikmessungen in der Regel kurzzeitig auf Fahrtwindkühlung verzichtet wird und somit keine Windgeräusche entstehen. Zudem entstehen auch durch Abgasabsaugungen Geräusche, die jedoch vernachlässigt werden können (vgl. Kapitel 7.3).

Die dominierenden Geräusche entstehen durch den Antrieb und durch das Reifengeräusch, bestimmt durch die Fahrsituation und die von außen wirkenden Kräfte. Maßgebliche Einflussgrößen sind dabei die Motorlast, resultierend aus den Fahrwiderständen und äußeren Kräften, Motordrehzahl und die daraus resultierende Fahrgeschwindigkeit.

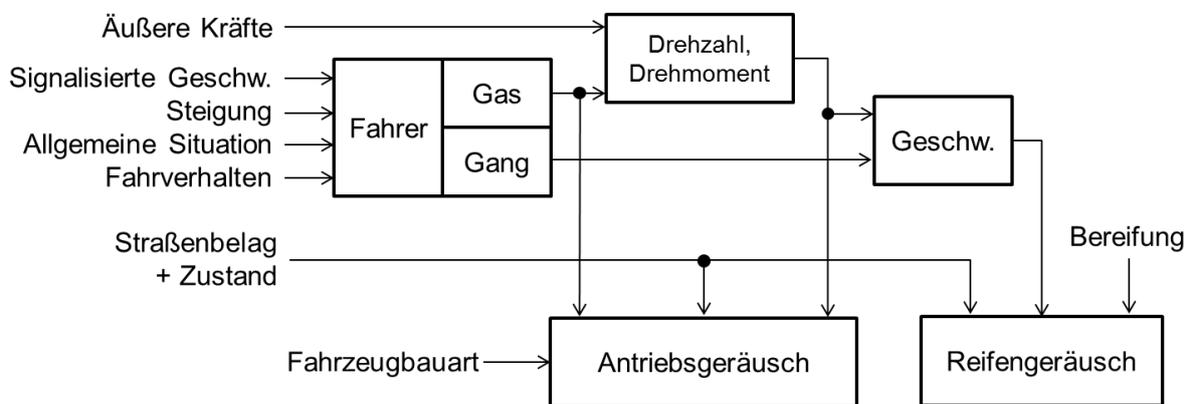


Bild 17: Einflussfaktoren auf das Fahrzeuggeräusch¹²⁶

Bei der beschleunigten Vorbeifahrt dominiert je nach Fahrzeugbauart, Antrieb, Bereifung und Gangwahl entweder das Reifengeräusch gegenüber dem Antriebsgeräusch¹²⁷ oder das Antriebsgeräusch ist vom Schalldruckpegel her ähnlich dem Reifengeräusch oder sogar größer¹²⁸.

2.4.1.1 Antriebsgeräusch

Das Antriebsgeräusch setzt sich aus vielen Einzelschallquellen zusammen. Maßgebend dafür sind Motor, Getriebe, Ansaug- und Abgasanlage.

Motorgeräusch

Das Motorengeräusch für konventionelle, verbrennungsmotorische Antriebe ist vor allem abhängig von Motordrehzahl und Motorlast, wie in Bild 18 links dargestellt. Zu

¹²⁶ EMPA 1997

¹²⁷ Janssen et al. 2011

¹²⁸ Biermann 2003

sehen sind der Stillstand-Leerlauf-Schalldruckpegel und der Volllast-Vorbeifahrt-Schalldruckpegel des Motorengeräusches über die Motordrehzahl. Erwartungsgemäß nimmt der Schalldruckpegel mit zunehmender Last und steigender Drehzahl zu¹²⁹. Ebenfalls verändert sich der Schalldruckpegel bauartbedingt und wird mit zunehmender Leistung größer, wie in Bild 18 rechts dargestellt.

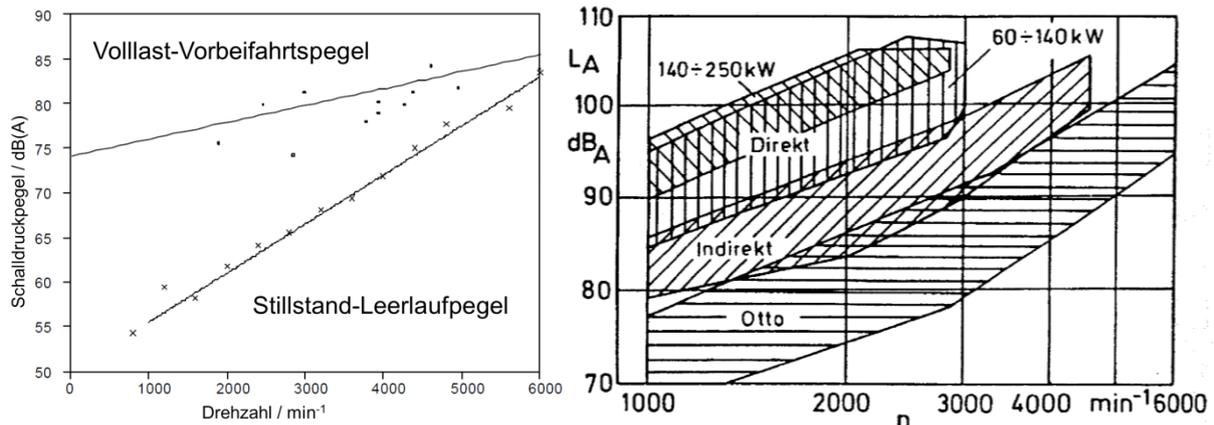


Bild 18: Motorengeräusch in Abhängigkeit von der Drehzahl und Motorlast (links)¹³⁰; Motorgeräusch in Abhängigkeit von der Leistung und Bauart (rechts)¹³¹

Fahrzeuge mit hybriden Antrieb können bei gleicher Summenleistung durch den zusätzlichen elektrischen Antrieb einen leistungsschwächeren Verbrennungsmotor besitzen. Die Tendenz des steigenden Motorgeräusches mit zunehmender Motorlast im verbrennungsmotorischen Betrieb ist allerdings weiterhin vorhanden, welche nicht zwingend an die Fahrzeuggeschwindigkeit gekoppelt ist¹³².

Getriebe

Das Getriebe liefert zum Gesamtgeräuschpegel einen eher untergeordneten Beitrag. Die Bedeutung hat allerdings nach Zeller¹³³ durch die weiter steigenden Anforderungen an die Motorakustik zugenommen, da der Maskierungseffekt immer geringer wird. Das Getriebegeräusch hat allerdings einen großen Einfluss auf die Innenraumakustik¹³⁴.

¹²⁹ EMPA 1997

¹³⁰ EMPA 1997

¹³¹ Biermann 2007

¹³² Zeller 2009

¹³³ Zeller 2009

¹³⁴ Genuit 2010

Ansaug- und Abgasgeräusch

Einen Beitrag zum Vorbeifahrgeräusch leistet das Ansaug- und Abgasgeräusch. Je nach Motordrehzahl und Motorlast kann das Abgasgeräusch neben dem Motorgeräusch die dominierende Quelle sein¹³⁵. Das Luftansaugsystem hingegen liegt nach Pflüger¹³⁶ um 10 dB unter dem Abgasgeräusch und ist daher weniger relevant.

Nach Harrison¹³⁷ liegt jedoch eine andere Geräuschverteilung bei der Vorbeifahrt vor. Er beschreibt, dass je nach Messzeit und Messort entweder Ansaug- oder Abgasgeräusche dominieren können. In Bild 19 links ist die Aufteilung der Geräuschquellen zu Beginn und rechts am Ende der Vorbeifahrtsmessung anteilmäßig abgebildet.

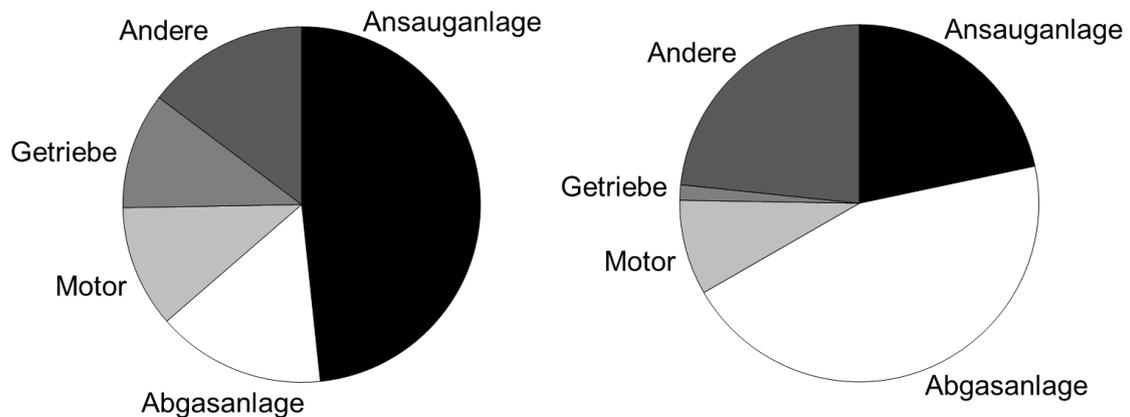


Bild 19: Aufteilung der Geräuschanteile zu Beginn bzw. Ende der Vorbeifahrtsmessung nach Harrison¹³⁸

Die unterschiedlich großen Geräuschanteile bezgl. der Ansaug- und Abgasanlage zwischen Harrison zu Zeller und Biermann kommen durch den Sekundärschall. In dieser Aufteilung wird nicht unterschieden, ob die Geräusche als Primärschall durch Massenstromschwankungen oder als Sekundärschall durch Übertragungen des Motorschalls auf Ansaug- und Abgasanlage entstehen.

Im Abgasmündungsgeräusch dominieren nach Genuit¹³⁹ bei einer Vollastbeschleunigung die Motorordnungen. In Bild 20 ist das Campbell-Diagramm eines Ottomotors dargestellt. Die hier dominierenden 1,5. und 3. Ordnungen liegen in einem Frequenzbereich zwischen 31,5 und 200 Hz.

¹³⁵ Biermann 2007
¹³⁶ Pflüger et al. 2010
¹³⁷ Harrison 2004
¹³⁸ Harrison 2004
¹³⁹ Genuit 2010

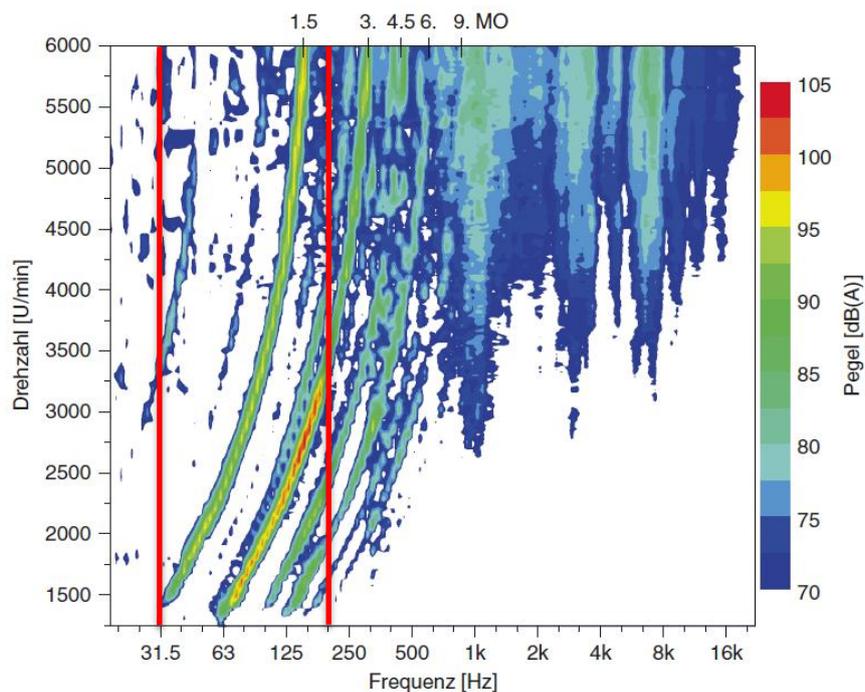


Bild 20: Campbell Diagramm vom Abgasmündungsgeräusch eines Ottomotors unter Vollast¹⁴⁰

2.4.1.2 Rollgeräusch

Das Rollgeräusch setzt sich aus Reifen-Fahrbahn-Geräuschen und aerodynamischen Geräuschen des Reifens zusammen. Letztere können bei der beschleunigten Vorbeifahrt vernachlässigt werden, da die Umströmungsgeräusche erst bei hohen Geschwindigkeiten an Bedeutung gewinnen¹⁴¹. Das Reifen-Fahrbahn-Geräusch unterliegt dabei folgenden Effekten:

Schallanregung

Die Schallanregung beim Reifen entsteht durch die mechanische Schwingung von Gummiteilchen, die beim Walken verformt werden und somit zum Schwingen angeregt werden. Das Reifengeräusch ist geschwindigkeitsabhängig und liegt dabei in einem Frequenzbereich von 150-1000 Hz¹⁴². Mit kleinerer Größtkörnung des Fahrbahnbelags nimmt die Reifenschwingung und der Schalldruckpegel ab. Es findet durch Kompression und Dekompression von Luft in abgeschlossenen Hohlräumen des Reifenprofils eine aerodynamische Anregung (Airpumping) statt¹⁴³. Zudem kann es durch Resonanzen in offenen Hohlräumen zu einer Schallabstrahlung von

¹⁴⁰ Genuit 2010

¹⁴¹ EMPA 1997

¹⁴² Gauterin et al. 2009

¹⁴³ Schmerbeck 2011

höherfrequenten Schallanteilen größer 1 kHz kommen. Dies spielt besonders bei Messungen auf dem Prüfstand eine bedeutende Rolle, da hier die Fahrbahnoberfläche sehr glatt ist und mit dem Reifen in Wechselwirkung steht¹⁴⁴.

Schallausbreitung

Die Ausbreitung des Schalls hängt stark von der Fahrbahn und dem Schallabsorptionsgrad des Belages ab. Je schallhärter der Untergrund desto stärker ist die Reflexion. Die Schallabstrahlung kann bei offenporigen Belägen um 10 dB kleiner sein und liegt bei höheren Geschwindigkeiten in einem Frequenzbereich um 1 kHz bis 2 kHz. Dieses Phänomen tritt besonders bei Rollenprüfständen auf, da die umschließende Rollenverkleidung in der Regel aus metallischem Material besteht und damit sehr schallhart ist ($\alpha = 0,01$)^{145,146}.

Schallabstrahlung

Bei der Schallabstrahlung am Reifen entsteht das Phänomen des Schalltrichters. Abgestrahlter Schall wird im Radkasten und an der Verkleidung des Reifens reflektiert und kann so je nach Abstrahlwinkel eine Verstärkung von 7 dB bis 20 dB im Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 3 kHz erreichen. Die Schallabstrahlung ist damit nicht auf die Aufstandsfläche begrenzt, sondern über den ganzen Umfang des Reifens verteilt^{147,148}.

2.4.1.3 Frequenzbereiche der Schallquellen

Für die experimentelle Untersuchung am Prüfstand und die Simulation der Umwelt nach dem XiL-Framework (vgl. Kapitel 2.2) müssen die Grenzfrequenzen der zu messenden Schallereignisse bekannt sein.

Die tiefste untere Grenzfrequenz wird nach DIN ISO 362¹⁴⁹ wie folgt definiert: Ein 4-Takt-4-Zylinder Verbrennungsmotor besitzt die niedrigste Drehzahl im fahrenden Zustand von ca. 1000 U/min⁻¹. Die Zündfrequenz beträgt dabei 34 Hz, was der niedrigsten zu erwartenden Frequenz entspricht. Für die Vorbeifahrtmessung ist allerdings ein höherer Drehzahlbereich ab ca. 2000 U/min⁻¹ ($\sim 67 \text{ Hz}$) von Interesse. Daher liegt die untere Grenzfrequenz von 67 Hz über den ermittelten 34 Hz aus der Norm.

¹⁴⁴ Leister 2009

¹⁴⁵ Beckenbauer et al. 2002

¹⁴⁶ Beckenbauer 2008

¹⁴⁷ Hoever 2012

¹⁴⁸ Prašćević 2002

¹⁴⁹ DIN ISO 362-1: 2009

Die obere Grenzfrequenz wird durch die Reifen definiert, da bei der simulierten Vorbeifahrt die Strömungsgeräusche des Fahrzeuges vernachlässigt werden. Daraus folgt, dass die Schallabstrahlung des Reifens die obere maximale Frequenz mit 3 kHz festlegt.

Zusammenfassend wird der mögliche Frequenzbereich von 34 Hz bis 3 kHz für konventionelle, verbrennungsmotorische Antriebe definiert. Auf Grund der Höheren Motordrehzahlen kann die untere Grenzfrequenz mit 67 Hz angenommen werden. Werden alternative Antriebskonzepte betrachtet, so kann es durch den Elektromotor und der Leistungselektronik zu weitaus höheren Frequenzen von über 5 kHz kommen¹⁵⁰.

2.4.2 Schallfelder von Fahrzeugen

Nach Kapitel 2.4.1 gibt es verschiedene dominierende Schallquellen am Fahrzeug. Wird nun das gesamte Schallfeld des Fahrzeuges betrachtet, so ergibt sich eine komplexe Schallverteilung durch Überlagerung der verschiedenen Schallquellen. Nach Taylor¹⁵¹ lässt sich, wie in Bild 21 exemplarisch für ein Frequenzband dargestellt, die im Nahfeld gemessene komplexe Schallverteilung durch die Überlagerung von Punktschallquellen darstellen. Das Beispiel zeigt die Schallverteilung an einem Fahrzeug mit Frontmotor.

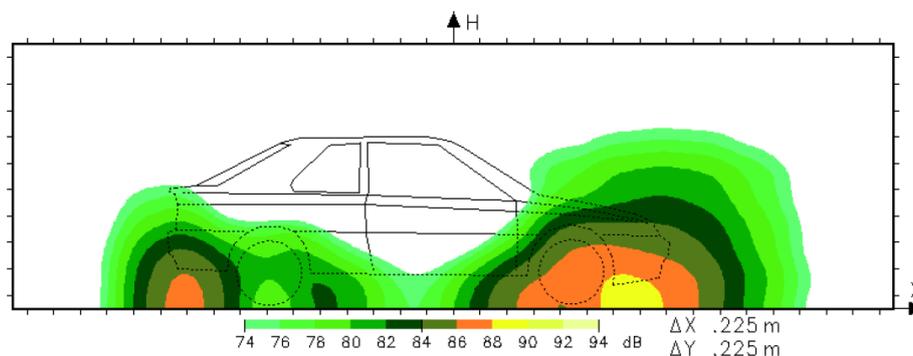


Bild 21: Schallintensität eines Fahrzeuges mit Frontmotor gemessen im Nahfeld¹⁵²

Wird der Abstand zwischen Fahrzeug und Messaufnehmer bei der Messung weit genug vergrößert, kann von einem Freifeld ausgegangen werden¹⁵³. Einzelschallquellen können somit zu einem ungerichteten Punktstrahler zusammengefasst werden. Dies setzt voraus, dass die Teilschallquellen zueinander inkohärent sind. Obwohl die Geräuschquellen im Fahrzeug einen kausalen

¹⁵⁰ Meier 2011

¹⁵¹ Taylor 1997

¹⁵² Taylor 1997

¹⁵³ Bruel&Kjaer 2006

Zusammenhang haben, sind alle Teilschallquellen nach Demmerer¹⁵⁴ weitestgehend inkohärent.

Zur Gültigkeit dieser Annahme müssen nach Möser¹⁵⁵ folgende Bedingungen erfüllt werden:

1. Der mittlere Abstand D zwischen Strahler und Mikrofon muss im Vergleich zur Strahlerlänge L viel größer sein.

$$D \gg L \quad \text{Gl. 24}$$

2. Der Abstand D zwischen Strahler und Mikrofon muss viel größer sein, als die Strahlerlänge L zum Quadrat dividiert durch die Wellenlänge λ .

$$D \gg \frac{L^2}{\lambda} \quad \text{Gl. 25}$$

3. Der Abstand D zwischen Strahler und Mikrofon muss viel größer sein, als die untere Grenzwellenlänge λ_G

$$D \gg \lambda_G \quad \text{Gl. 26}$$

Nach Möser¹⁵⁶ ist es allerdings in der Praxis erlaubt, das „viel größer“ mit „wenigstens größer“ anzunähern.

2.5 Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch nach DIN ISO 362

In diesem Kapitel wird die Grundlage zur beschleunigten Vorbeifahrt, d. h. die Messung nach DIN ISO 362 Teil 1¹⁵⁷ und Teil 2¹⁵⁸ auf der Teststrecke erläutert, da diese Norm die Richtlinie für die Homologation ist und entsprechend auf dem Prüfstand abgebildet wird. Sie ist entscheidend für das Grundverständnis und die prinzipielle Vorgehensweise. Auf Basis dieser Norm wird der aktuelle Stand der Forschung zur simulierten Vorbeifahrt dargelegt. Das Ziel aller Verfahren ist die Ermittlung eines skalaren Einzahlkennwertes – das Maximum des Schalldruckpegelverlaufes in dB(A) über der Messstrecke – für die Homologation.

¹⁵⁴ Demmerer 2002

¹⁵⁵ Möser 2007

¹⁵⁶ Möser 2007

¹⁵⁷ DIN ISO 362-1: 2009-07

¹⁵⁸ DIN ISO 362-2: 2010-05

Dafür muss der gemessene Wert kleiner als der vom Gesetzgeber vorgegebene Wert sein. Der Kennwert liegt heute für PKWs bei 74 dB(A)¹⁵⁹.

Das Verfahren wird anhand des XiL-Frameworks bzgl. Fahrer, Fahrzeug, Umgebung und Fahrmanöver gegliedert¹⁶⁰, um daraus die Anforderungen und Randbedingungen für die Methode in kleinen Akustikhallen ableiten zu können.

Die Messung des Vorbeifahrgeräusches auf der Teststrecke auf freiem Feld ist in der DIN ISO 362 Teil 1 und Teil 2 definiert. Die DIN ISO 362-1 bezieht sich dabei auf Fahrzeuge der Klassen M und N¹⁶¹. Die DIN ISO 362-2 bezieht sich auf die Klasse L, welche in Kapitel 2.5.2 erläutert werden¹⁶².

2.5.1 Fahrer

Die Messung der beschleunigten Vorbeifahrt erfolgt auf einer Teststrecke. Nach der Norm wird dazu ein geschulter Testfahrer herangezogen. Da das Fahrmanöver im Vergleich zu andern Testmanövern wie z. B. dem NEFZ-Zyklus recht einfach ist, kann dieses ohne weiteres mit einem realen Fahrer (z.B. einem Testfahrer) durchgeführt werden.

2.5.2 Fahrzeug

In der DIN ISO 362 Teil 1 werden die Fahrzeugklassen M und N definiert. Dazu zählen Fahrzeuge mit mindestens vier Rädern zum Personen- und Gütertransport. Die Fahrzeugklasse L (Fahrzeuge mit weniger als vier Rädern) wird in der DIN ISO 362 Teil 2 beschrieben. Das Verfahren ist analog zu Teil 1. Wegen der geringeren Bedeutung der in Teil zwei beschriebenen Gruppe werden in dieser Arbeit die Messungen mit einem vierrädrigen Personenkraftwagen durchgeführt. Das Fahrzeug muss zu Beginn der Prüfung in einen definierten Zustand gebracht werden, wie spezielle Beladung, definiertes Prüfgewicht, Reifenzustand etc. Da diese Parameter für das Ergebnis der Arbeit nicht relevant sind, wird an dieser Stelle nicht näher drauf eingegangen, sondern auf die DIN ISO 362 verwiesen¹⁶³.

2.5.3 Umwelt

Die Umwelt hat einen großen Einfluss auf das Messverfahren und auf das Ergebnis. Sie wird in dieser Arbeit zum einen in den Bereich Umgebung, zum anderen in den Bereich der meteorologischen Bedingungen aufgeteilt. Das Testfeld hat durch die

¹⁵⁹ DIN ISO 362-1: 2009-07

¹⁶⁰ Düser 2010

¹⁶¹ DIN ISO 362-1: 2009-07

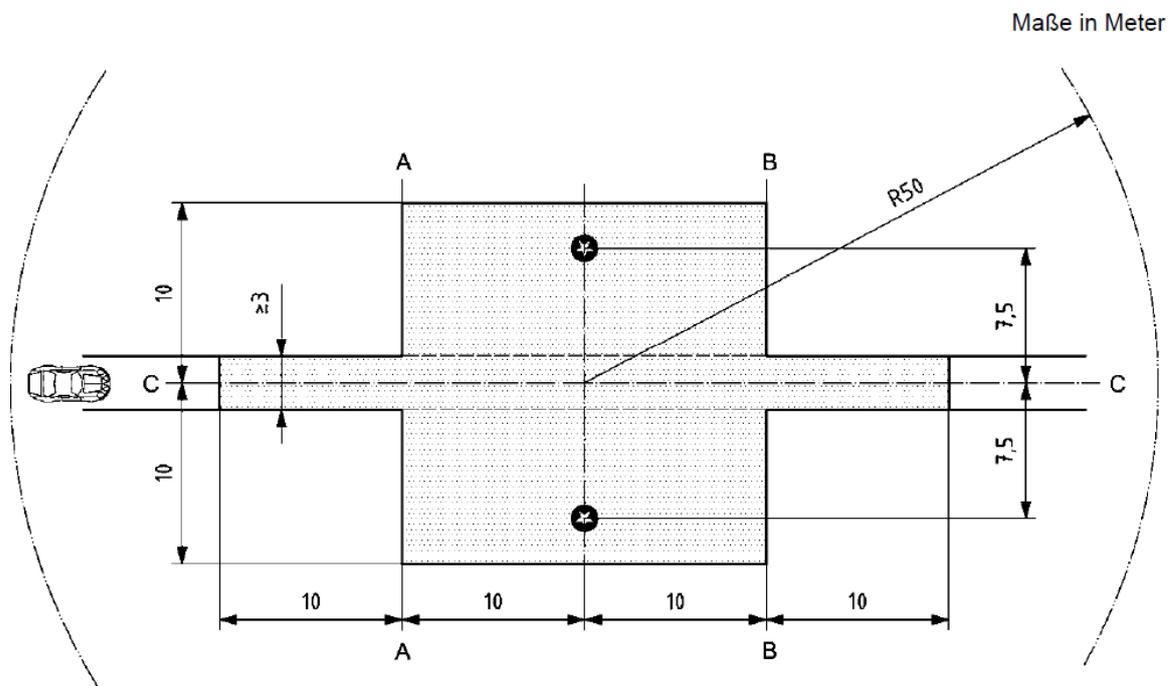
¹⁶² DIN ISO 362-2: 2010-05

¹⁶³ DIN ISO 362-1: 2009-07

exakten Maße und Beschaffenheit Einfluss auf das Fahrmanöver und die Durchführung der Versuche. Zudem muss das Umfeld der Strecke entsprechend flach und eben sein, um das Schallfeld nicht zu beeinflussen. Die meteorologischen Bedingungen wiederum haben Einfluss auf Störgeräusche und auf die Schallausbreitung und damit wiederum auf das Schallfeld und das Messergebnis.

2.5.3.1 Umgebung

In Bild 22 ist die Messumgebung nach DIN ISO 362 abgebildet. Im Wesentlichen besteht die Teststrecke aus einer quadratischen, ebenen Prüffläche mit einer Seitenlänge von 20 m (A-A, A-B). Darüber hinaus befindet sich jeweils an einer gegenüberliegenden Seite mittig angeordnet eine 10 m lange, mindestens 3 m breite Fahrbahn.



Legende

- Mindestfläche, die mit der Prüfoberfläche bedeckt ist, d. h. der Prüfbereich
- * Mikrofonpositionen (Höhe 1,2 m)

Bild 22: Testumgebung für die Messung der beschleunigten Vorbeifahrt¹⁶⁴

Die beschriebene Strecke muss sich auf einem freien Feld befinden. Es dürfen innerhalb von einem 50-Meter-Radius vom Mittelpunkt der Teststrecke aus keine reflektierenden Gegenstände vorhanden sein, d. h., es muss über einen Radius von

¹⁶⁴ DIN ISO 362-1: 2009

50 m die Halbfreifeldbedingung gelten. Ebenfalls können Gebäude außerhalb dieses Radius Schallreflexionen hervorrufen und die Messung beeinflussen¹⁶⁵. Die Prüffläche und Strecke muss trocken und frei von schallabsorbierenden Materialien (Schnee, Split etc.) sein. Die Oberfläche der Teststrecke muss ebenfalls eine nach ISO 10844: 2011 definierte Beschaffenheit haben und einen maximalen Schallabsorptionsgrad von $\alpha = 0,10$ aufweisen¹⁶⁶.

2.5.3.2 Meteorologische Bedingungen

Die Messung auf freiem Feld darf nur unter bestimmten meteorologischen Bedingungen stattfinden. Die Lufttemperatur muss zwischen 5°C und 40°C liegen. Die Windgeschwindigkeit einschließlich Windböen darf nicht größer als 5 m/s sein. Fremdgeräusche (einschließlich Windgeräusche) müssen kleiner 10 dB des gemessenen Schallpegels sein. Die Bedingungen sind bei der Messung mit aufzuzeichnen. Für Differenzen des gemessenen Geräusches und des Störgeräusches zwischen 10 dB und 15 dB gibt es in der Norm einen Korrekturwert. In einer generischen Prüfumgebung, wie einer Akustikhalle, lassen sich die meteorologischen Einflüsse ganz vermeiden und die Messung bei idealen Randbedingungen durchführen.

2.5.4 Fahrmanöver zur Messung des Vorbeifahrgeräusches

Nach DIN ISO 362: 2003 aus dem Jahre 2003 besteht das Testmanöver nur aus einer beschleunigten Vorbeifahrt. Dabei soll das Fahrzeug sich mit einer konstanten Geschwindigkeit dem Testfeld annähern. Die Annäherungsgeschwindigkeit ist in Abhängigkeit von der Toleranz entweder bei 50 km/h oder durch einen prozentualen Wert der Motornendrehzahl definiert¹⁶⁷. Erreicht die Fahrzeugfront die Prüffläche bei der Linie A-A, wie in Bild 22 dargestellt, muss so schnell wie möglich der Motorregler voll betätigt werden und das Fahrzeug mit Volllast beschleunigt werden, solange, bis das Fahrzeugeck die Linie B-B passiert hat. Der Prüflauf sollte dabei für einen konventionellen PKW mit Fünfganggetriebe im zweiten und dritten Gang durchgeführt werden. Als Kontrollgröße für die richtige Wahl des Ganges wird ein prozentualer Wert zur Motornendrehzahl definiert¹⁶⁸.

In der im Jahre 2009 erschienenen Neuauflage DIN ISO 362: 2009 wurde das Prüfverfahren geändert, um die Ergebnisse dem realen Stadtverkehr anzupassen, da Geräuscheinflüsse durch z. B. Reifenprofiltiefe oder aufgrund neuer

¹⁶⁵ DIN ISO 362-1: 2009

¹⁶⁶ ISO 10844: 2011

¹⁶⁷ DIN ISO 362: 2003

¹⁶⁸ DIN ISO 362: 2003

Antriebsstrangtopologien bis dato unberücksichtigt blieben. Für das neue Verfahren wurden z. B. im Auftrag des Umweltbundesamtes umfangreiche Studien zu Ermittlung der Geräuschemissionen von Kraftfahrzeugen im Straßenverkehr durchgeführt¹⁶⁹, um Geräuschemissionen realitätsnah abzubilden¹⁷⁰. Weitere grundlegende Kenngrößen wie der dimensionslose spezifische Leistungsindex (Leistung (kW) / Fahrzeugmasse (kg) x 1000), verschiedene Referenzbeschleunigungen und ein weiteres Test-Manöver wurde neu eingeführt. Im Folgenden wird nur auf die relevanten Neuerungen eingegangen.

2.5.4.1 Beschleunigte Vorbeifahrt

Die beschleunigte Vorbeifahrt ist im Manöver identisch geblieben, allerdings soll versucht werden, eine möglichst konstante Beschleunigung zu erreichen. Daher darf mit der Vollastbeschleunigung bereits kurz vor Erreichen der Linie A-A der Prüffläche nach Bild 22 der Vollastregler betätigt werden, sodass bei Erreichen dieser Linie das Fahrzeug die Prüfgeschwindigkeit erreicht hat und linear beschleunigt. Diese Anpassung erfolgte aufgrund der zunehmend automatisch geschalteten Fahrzeugen und Fahrzeugen mit hybriden Antrieb.

Für die beschleunigte Vorbeifahrt wurden die Randbedingungen für die Gangwahl neu definiert. Diese erfolgt nicht mehr nur in Abhängigkeit von der Nenndrehzahl, sondern über eine gemittelte Referenzbeschleunigung. Dafür werden in Abhängigkeit vom Leistungsindex die Beschleunigungen a_{urban} und $a_{wot\ ref}$ numerisch bestimmt, wobei a_{urban} für die innerstädtische Beschleunigung und $a_{wot\ ref}$ für die Referenzbeschleunigung steht. Es wird zu Beginn ein Gang gewählt und die durchschnittliche Beschleunigung des Fahrzeuges ermittelt. Diese muss größer als $a_{wot\ ref}$ und kleiner als $2\ m/s^2$ sein. Zusätzlich ist der nächsthöhere Gang zu wählen.

2.5.4.2 Konstante Vorbeifahrt

Fahrzeuge mit einem Leistungsindex größer 25 müssen zusätzlich bei konstanter Geschwindigkeit von 50 km/h geprüft werden. Dazu muss das Fahrzeug die Prüfstrecke mit der konstanten Geschwindigkeit zurücklegen.

2.5.5 Messaufbau

Für die Messung im Freien werden zwei Freifeldmikrofone benötigt. Diese werden in der Mitte der Teststrecke (nach 10 m) jeweils rechts und links mit einem Abstand von 7,5 m von der Mittellinie positioniert, wie in Bild 22 als schwarze Kreise mit Stern dargestellt. Die Mikrofonhöhe beträgt dabei 1,2 m.

¹⁶⁹ Steven 2005

¹⁷⁰ DIN ISO 362: 2009

Während der Messung werden die Schalldrücke der Mikrofone, Fahrzeuggeschwindigkeit und Motordrehzahl über CAN-Bus, die Fahrzeugposition mittels Radar und Lichtschranken und die meteorologischen Bedingungen für die Dokumentation aufgezeichnet. Da auf einem freien Feld mit einem Abstand von 7,5 m Meter zum Fahrzeug gemessen wird, resultiert nach Gl. 2 und Gl. 3 eine untere Grenzfrequenz für die Freifeldbedingung von ca. 45 Hz.

2.5.6 Messergebnis

Jeder Prüflauf muss vier Mal wiederholt werden. Dabei darf die Abweichung zwischen den letzten vier gültigen Versuchen nicht größer als 0,5 dB(A) von Lauf-zu-Lauf, 0,9 dB(A) von Tag-zu-Tag und 1,5 dB(A) von Ort-zu-Ort sein. Es wird jeweils die rechte und linke Seite des Fahrzeuges gemessen. Die Ergebnisse der jeweiligen Seiten von der konstanten und beschleunigten Vorbeifahrt werden zu je einem städtischen Schalldruckpegel L_{urban} zusammengefasst. Im Prüfbericht sind der berechnete Schalldruckpegel und der gemittelte Schalldruckpegel der Vollastbeschleunigung von der Seite anzugeben, die den höheren Wert erzielt.

In Bild 23 ist das Ergebnis einer beschleunigten Vorbeifahrt für die Auswertung einer Seite, d. h. einem Mikrofon, dargestellt. Aufgetragen ist der aus dem Schalldruck berechnete Schalldruckpegel über die Messstrecke. Dabei ist zu beachten, dass die Skalierung der Abszisse von -10 m bis +10 m angegeben wird, wobei an der Stelle Null die Mikrofone platziert sind¹⁷¹. Der charakteristische Wert und damit das Ergebnis der beschleunigten Vorbeifahrtsmessung bildet das Maximum des Schalldruckpegels (hier 70 dB(A)).

¹⁷¹ DIN ISO 362-1:2009

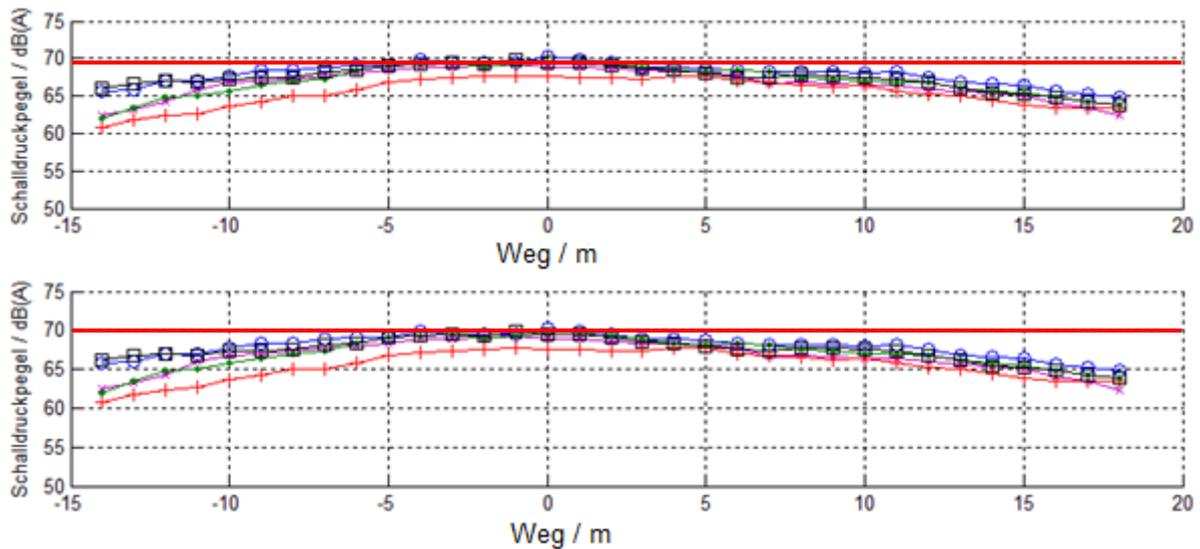


Bild 23: Ergebnis der Vorbeifahrtsmessung eines Fahrzeuges im dritten Gang (oben) und im vierten Gang (unten)

2.6 Simulierte Vorbeifahrt – Messung auf dem Rollenprüfstand

Die Messung des Vorbeifahrgeräusches auf der Strecke bringt viele Unsicherheiten beim Messen durch äußere Umwelteinflüsse oder Verzögerungen aufgrund der meteorologischen Bedingungen mit sich. Daher wird bestrebt, die Messung auf einem Rollenprüfstand in einer Akustikhalle durchzuführen.

Für den Transfer der Messung von der Teststrecke auf den Prüfstand in einer Akustikhalle sind in der Literatur verschiedene Methoden zu finden, wie die Messung mit diversen Mikrofonarrays^{172,173,174}, mittels Transferpfadanalyse¹⁷⁵ oder der Holografie^{176,177}. In der DIN ISO 362: 2009 sind ebenfalls bereits erste Anforderungen an die Akustikhalle gestellt, auf die in Kapitel 2.6.1 näher eingegangen wird.

Das Grundprinzip aller Methoden ist gleich. Durch den ortsfesten Aufbau des Fahrzeuges auf dem Prüfstand muss die Bewegung der Vorbeifahrt simuliert werden. Der Unterschied besteht in der Berechnung bzw. dem Messaufbau und der Bestimmung des Schallfeldes und der Simulation der Bewegung über Mikrofone.

¹⁷² Ryu et al. 2006

¹⁷³ Janssen et al. 2011

¹⁷⁴ Park et al. 1997

¹⁷⁵ Putner / Lohrmann 2011

¹⁷⁶ Park et al. 1997

¹⁷⁷ Kloow 2008

In der Situationsanalyse werden die in der Literatur genannten Verfahren erläutert. Dabei wird besonderes Augenmerk auf das System Umwelt und die Manöver und Testcases im Sinne des XiL- Validierungsframeworks gelegt.

Da alle Methoden sich mit der Messung des Geräusches eines Fahrzeuges befassen, werden vorab für alle Verfahren die Systeme Fahrer und Fahrzeug im Kontext der simulierten Vorbeifahrt erläutert, wobei das System Fahrzeug nur die Fahrzeugklassen betrifft.

- Fahrzeug: Für die Messung des Vorbeifahrgeräusches nach Kapitel 2.5 gibt es verschiedene Klassen von Fahrzeugen. Für die simulierte Vorbeifahrt auf dem Prüfstand wird ebenfalls diese Einteilung vorgenommen, da lediglich versucht wird, den Transfer von der Strecke auf den Prüfstand zu erreichen. In dieser Arbeit werden nur die Klassen M und N nach DIN ISO 362 Teil 1 betrachtet¹⁷⁸.
- Fahrer: Ein grundsätzlicher Vorteil von Messungen auf dem Rollenprüfstand ist die ortsfeste Fixierung des Fahrzeuges. Damit lassen sich sehr einfach messtechnische Anwendungen durch einfaches Applizieren von Messtechnik realisieren, ohne auf mobile Anwendungen oder Funkübertragungen zurückgreifen zu müssen. Der Fahrer kann für das Manöver der simulierten Vorbeifahrt gemäß dem XiL-Framework nach Albers¹⁷⁹ (vgl. Kapitel 2.2) real oder virtuell sein. So können auf dem Prüfstand z. B. Fahrroboter oder virtuelle Fahrer über die XiL-Simulationsplattform und geeignete Fahrzeugschnittstellen, wie die Ansteuerung des E-Gases¹⁸⁰, eingesetzt werden.

Es gibt mehrere Ansätze, die Messung des Vorbeifahrgeräusches auf dem Prüfstand abzubilden. Die zwei wichtigsten, die Messung mittels Linienarray im Fernfeld und die Nahfeld-Komponentenmessung, werden im Folgenden genauer erläutert. Alle weiteren Methoden werden hier der Vollständigkeit halber nur kurz aufgeführt.

2.6.1 Simulierte Vorbeifahrt mittels Linienarray im Fernfeld

Ein etabliertes Verfahren ist die Messung mittels eines Linienarrays im Fernfeld. Erste Ansätze sind dabei schon in der DIN ISO 362-1:2009 definiert worden. Im Folgenden wird dieses Verfahren und speziell die Eigenschaften der Umwelt sowie

¹⁷⁸ DIN ISO 362-1: 2009-07

¹⁷⁹ Albers et al. 2009c

¹⁸⁰ Albers et al. 2009a

der Messaufbau ausführlicher erläutert. Es definiert die Grundlagen für das weitere Vorgehen.

2.6.1.1 Umwelt

Für die simulierte Vorbeifahrt mittels Mikrofonarrays im Freifeld wird versucht, die Umgebung von der Teststrecke auf einen Prüfstand nachzubilden. Das bedeutet, der Prüfstand muss ebenfalls das Freifeld mit 50 m Radius und die 20 m x 20 m große Fläche nachbilden. Bereits in der DIN ISO 362-1:2009 sind die Anforderungen an diese Hallen wie folgt definiert:

Angenommen wird eine untere Grenzfrequenz von 34 Hz (Zündfrequenz eines 4-Zylinder-Motors bei 1000 U/min⁻¹). Der Abstand der Mikrofone zur Akustikeinhausung muss mindestens $\lambda_G/4$ betragen, was einer Entfernung von ca. 2,6 m entspricht. Zudem wird bei dieser unteren Grenzfrequenz von einer Dicke des schallabsorbierenden Materials von nominell 1,3 m pro Seite ausgegangen. Werden nun die 7,5 m Abstand zur Fahrzeugmittellinie betrachtet, so ergibt sich eine Raumbreite von etwa 18 m bei einseitiger Nutzung und 27 m bei beidseitiger Nutzung (ohne schallabsorbierendes Material).

Die Länge des Raumes muss ebenfalls die Messstrecke inklusive Fahrzeuglänge abbilden. Bei einer mittleren Fahrzeuglänge von 5 m muss der Raum mindestens 35 m lang sein. Die Deckenhöhe wird üblicherweise mit 7,5 m angenommen¹⁸¹.

In dieser Methode werden das Freifeld und die gesamte Messstrecke abgebildet. Wichtig dabei sind die resultierende Freifeldbedingung und die Länge der Halle, damit die Übertragbarkeit zulässig ist.

Auf der Teststrecke ist in der Norm ein Korrekturwert für Fremdgeräusche vorgesehen. Es ist darauf zu achten, dass auch das Prüfstandsgeräusch um 15 dB(A) kleiner ist, als der gemessene Schalldruckpegel. Damit wird sowohl die Frischluftkühlung des Fahrzeuges als auch die Absaugung der Abgasanlage berücksichtigt.

2.6.1.2 Manöver

Für die Abbildung der Manöver (Konstantfahrt und beschleunigte Vorbeifahrt) auf dem Prüfstand muss dieser über ausreichende Leistung verfügen, um die Dynamik der Vollastbeschleunigung realisieren zu können. Dabei muss der Prüfstand in der s. g. Straßensimulation betrieben werden. Hierbei wird der Fahrwiderstand des fahrenden Fahrzeuges in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit simuliert.

¹⁸¹ DIN ISO 362-1:2009-07

2.6.1.3 Messaufbau

Die eigentliche Herausforderung des Messaufbaus liegt in der Simulation der Bewegung. Hierzu wird ein Mikrofonarray in Abstand von 7,5 m zur Fahrzeugmittelachse aufgebaut. Das Array muss eine Gesamtlänge von mindestens 20 m zusätzlich der Fahrzeuglänge besitzen und so platziert werden, dass die Mikrofone 10 m vor Fahrzeugfront bzw. 10 m hinter das Fahrzeugheck reichen. In der Norm werden ca. 15-20 Mikrofone empfohlen, welche mit gleichmäßigem Abstand angeordnet werden, was einen Abstand von 1,25 m bis 1,6 m zwischen jedem Mikrofon entspricht, wie in Bild 24 beispielhaft dargestellt.

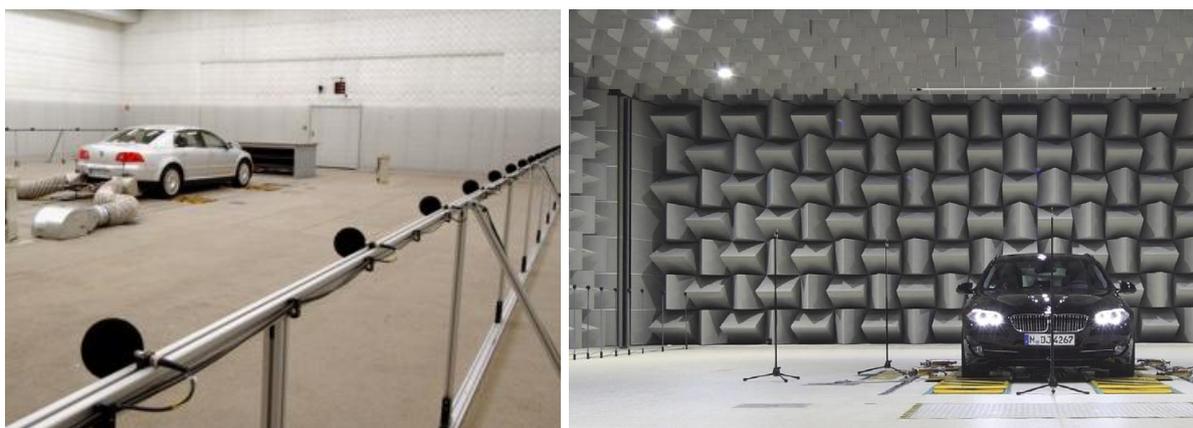


Bild 24: Prüfstand der VW AG (links)¹⁸² und der BMW Group (rechts)¹⁸³

2.6.1.4 Messergebnis mittels Pass-by-Algorithmus

Da das Messergebnis nicht direkt aus dem Signal ermittelt werden kann, soll in diesem Kapitel der Pass-by Algorithmus erläutert und hergeleitet werden. Als Messaufbau wird das im vorherigen Absatz beschriebene Array allgemein mit n Mikrofonen verwendet. Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass das Fahrzeug als Punktschallquelle angenommen werden darf¹⁸⁴. Die Punktschallquelle befindet sich im s. g. akustischen Zentrum des Fahrzeuges. Nach Ryu et al.¹⁸⁵ liegt das akustische Zentrum an einer Ecke des Fahrzeuges, da diese Position einen größeren „Sichtbereich“ mit dem gleichen Array abdecken kann, wie in Bild 25 in grün dargestellt. Nach Janssen et al.¹⁸⁶ befindet sich das akustische Zentrum mittig zwischen den Vorderreifen im Motormittelpunkt, wie in Bild 25 in blau dargestellt. Bei beiden Ansätzen liegt das akustische Zentrum auf Bodenhöhe.

¹⁸² Fuchs et.al. 2003

¹⁸³ Feltes et al. 2012

¹⁸⁴ Geniut 2010

¹⁸⁵ Ryu et al. 2006

¹⁸⁶ Janssen et al. 2011

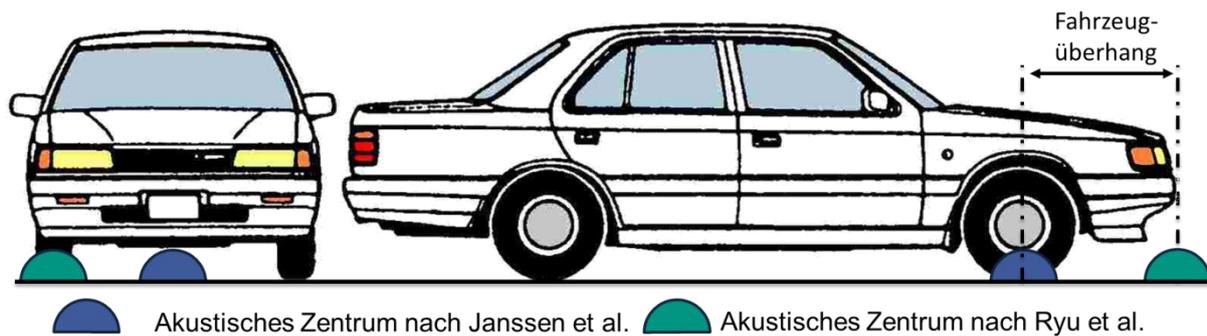


Bild 25: Position des akustischen Zentrums nach Janssen et al.¹⁸⁷ (blau) und Ryu et al.¹⁸⁸ (grün)

Als Fahrmanöver werden ebenso wie bei der Messung auf der Teststrecke die Konstantfahrt und die Vollastbeschleunigung durchgeführt und die Messdaten aufgezeichnet. Nach der Messung stehen, wie bei der Vorbeifahrtsmessung, Motordrehzahl, Gaspedalstellung, Fahrgeschwindigkeit und die A-bewerteten Messdaten der n-Mikrofone zur Verfügung.

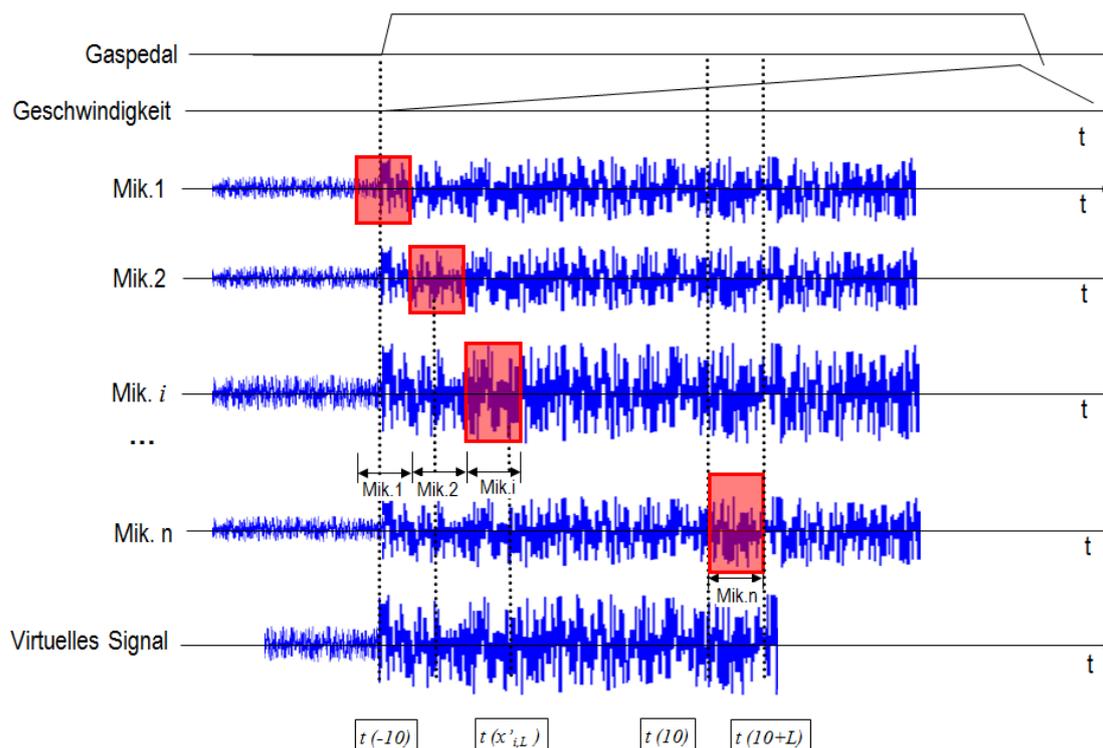
Im ersten Schritt wird aus dem gemessenen Geschwindigkeitsprofil das Streckenprofil durch Integration berechnet. Zum Zeitpunkt der Vollastbeschleunigung wird der Vollastregler oder das Gaspedal betätigt. Anhand eines definierten Schwellwertes aus dem Signal der Gaspedalstellung wird die Messstrecke virtuell auf den Zustand -10 Meter gesetzt.

In Abhängigkeit von der Fahrzeugposition bzw. der Position des akustischen Zentrums werden nun die Mikrofonsignale, wie in Bild 26 dargestellt, abschnittsweise „gemischt“, dem s. g. „Crossfading“. Befindet sich das Fahrzeug in einer Position zwischen zwei Mikrofonen, so gibt es mehrere Möglichkeiten, die Signale zu verrechnen. Zum einen können die Mikrofondaten prozentual gemischt werden, also linear (lineares Crossfading), zum anderen können die Signale nach Genuit mit der Cosinus-Funktion (für inkohärente Anteile wie z. B. Rauschen) bzw. der \cos^2 -Funktion (für kohärente bzw. tonale Anteile) überblendet werden¹⁸⁹. Durch das Crossfading der Mikrofonaufnahmen entsteht ein einzelnes monaurales Signal, welches noch nicht den Dopplereffekt beinhaltet. Durch Umrechnung der Schalldrücke in den Schalldruckpegel kann somit das virtuelle Ergebnis, der Schalldruckpegel über der Messstrecke, dargestellt werden.

¹⁸⁷ Janssen et al. 2011

¹⁸⁸ Ryu et al. 2006

¹⁸⁹ Genuit 2010

Bild 26: Algorithmus zur Berechnung des Vorbeifahrtsignals¹⁹⁰

Nach dem Crossfading kann im nächsten Schritt noch der Dopplereffekt (vgl. Kapitel 2.3.2.3) einberechnet werden. Das bedeutet, dass die Frequenzen in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit und Position des Fahrzeuges geändert werden. Da der Dopplereffekt nur die Frequenz verschiebt und nicht die Amplituden verändert, wird dieser in der Regel nur für das Sound-Engineering eingesetzt, um das Signal beim Anhören möglichst originalgetreu abzubilden^{191,192}. Der maximale Schalldruckpegel ändert sich dadurch jedoch nicht. Im letzten Schritt bieten Messtechnikhersteller oft die Möglichkeit, mittels binauraler Synthese das linke und rechte Ohrsignal zu bestimmen¹⁹³.

Für dieses Verfahren gibt es zudem den Ansatz, das Array näher als die geforderten 7,5 m zu platzieren, um die Messstrecke virtuell zu verlängern und den Schalldruckpegel jedes einzelnen Mikrofons auf Basis des Strahlensatzes zu skalieren. Die Mikrofonhöhe wird ebenfalls im gleichen Verhältnis, wie die Abstandsänderung skaliert. So kann zum einen der Abstand verringert, die

¹⁹⁰ Ryu 2005

¹⁹¹ Genuit 2010

¹⁹² Cicalo / Trozzi 2009

¹⁹³ Head acoustics 2012

Messstrecke verlängert und z. B. durch Positionierung der Mikrofone in der Halle um die Ecke zusätzliche Messstrecke gewonnen werden.

2.6.2 Simulierte Vorbeifahrt mittels Nahfeld-Komponenten-Messung

Nachteil der in Kapitel 2.6.1 beschriebenen Methode ist, dass ein sehr großer Raum benötigt wird. Es gibt Ansätze, die Messung im Nahfeld durchzuführen und diese auf das Fernfeld umzurechnen. Da das Manöver analog zu dem Verfahren im Kapitel 2.5 ist, wird im Folgenden nur auf den Messaufbau eingegangen.

Mittels Nahfeldmikrofonen werden die einzelnen Teilschallquellen am Fahrzeug gemessen und über eine Transferpfadanalyse die Anteile der Einzelbeiträge des Gesamtgeräusches verrechnet, wie in Bild 27 dargestellt.

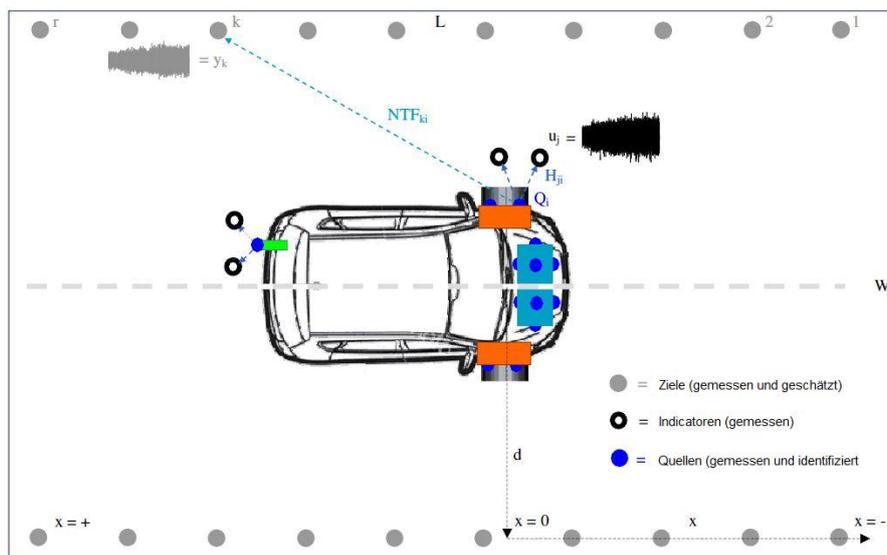


Bild 27: Messung der Teilschallquellen zur Bestimmung des Vorbeifahrgeräusches¹⁹⁴

Kern dieser Methode ist die Luftschall-Quantifizierung im Frequenzbereich. Jede Schallquelle (Motor, Abgasanlage, Reifen etc.) wird dabei quantifiziert und mittels einer verschiedenen Anzahl an Ersatzschallquellen nachgebildet. Dieses Modell benötigt die Übertragungsfunktion im Frequenzbereich und die akustischen Transferpfade im Zeitbereich, um die Ergebnisse der Nahfeldmessung auf verschiedene „Zielmikrofone“ zu berechnen¹⁹⁵. Die Übertragungsfunktion wird durch gleichzeitiges Messen im Nahfeld als auch im Fernfeld bestimmt¹⁹⁶. Da diese Messungen allerdings mit hohem Aufwand verbunden sind, erfolgt die Bestimmung oftmals mit einer reziproken Messung mittels Monopolschallquelle¹⁹⁷. Die

¹⁹⁴ Janssen et al. 2011

¹⁹⁵ Janssen et al. 2011

¹⁹⁶ Genuit 2010

¹⁹⁷ Fahy 1995

Eingangsgröße, also die gemessenen Quellensignale, werden im Frequenzbereich mittels des Übertragungsverhaltens berechnet und ergeben damit die Antwort jeder Quelle an jedem Mikrofon¹⁹⁸. Die entsprechenden Einzelbeiträge der Quellen können dann verrechnet werden. Daraus lässt sich der Gesamtschalldruckpegel bestimmen. In Bild 28 sind die Teilbeiträge der einzelnen Quellen dargestellt¹⁹⁹. Die schwarze Linie zeigt die Summe aller Teilbeiträge. Hier ist erkennbar, dass das Ansaugergeräusch in grüner Linie und das Schalldämpfermündungsgeräusch in orangener Linie eingezeichnet deutlich unter dem Schalldruckpegel der Reifen und dem des Motors, in roter und blauer Linie dargestellt, liegen.

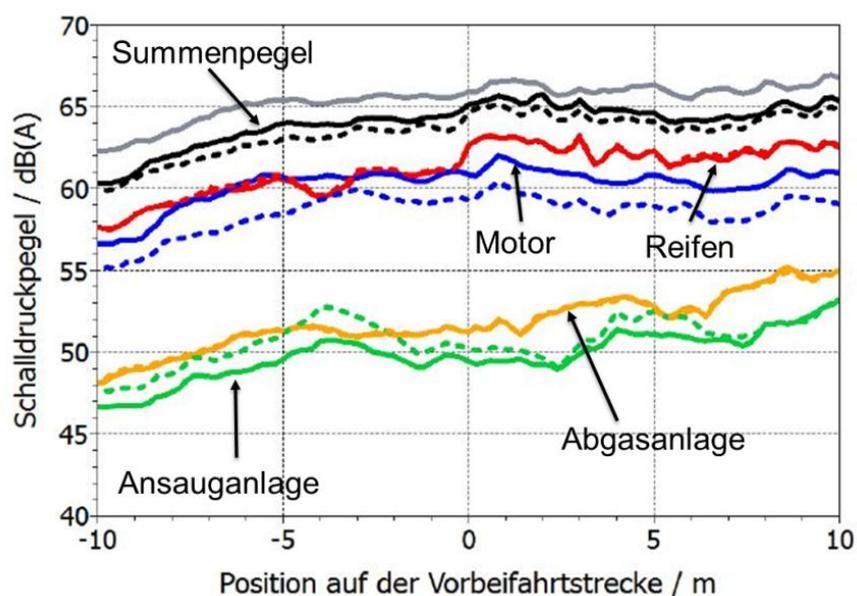


Bild 28: Teilbeiträge der Vorbeifahrtmessung mittels Nahfeldmessung²⁰⁰

In Hinblick auf die Optimierung von Teilsystemen ist diese Methode hilfreich, da diese detaillierte Informationen über Teilschallquellen liefert, um gezielte Maßnahmen zur Verbesserung des Geräusches durchführen zu können^{201,202}.

2.6.3 Schalldruckvorhersage mittels Linienarray

Ein weiterer Ansatz, das Vorbeifahrgeräusch zu simulieren, stammt von Park et al.²⁰³. Der Ansatz besteht darin, den Schalldruck über ein Linienarray quer zum Fahrzeug für eine Linie zu ermitteln und daraus den Schalldruck für das

¹⁹⁸ Lohrmann 2011

¹⁹⁹ Putner / Lohrmann 2011

²⁰⁰ Putner / Lohrmann 2011

²⁰¹ Genuit 2010

²⁰² Kim et al. 2001

²⁰³ Park et al. 1997

Schallfeld vorherzusagen. Wie in Bild 29 dargestellt, wird eine Mikrofonlinie entlang von Polarkoordinaten mit einem festen Winkel positioniert. Auf Basis mathematischer Beschreibungen können durch Messen des Schalldruckverlaufes die Parameter der Ausbreitung vorhergesagt werden. Nach Park et al. weist diese Methode allerdings aufgrund der Charakteristik des Berechnungsalgorithmus sehr große Fehler im Bereich des Fernfeldes auf²⁰⁴.

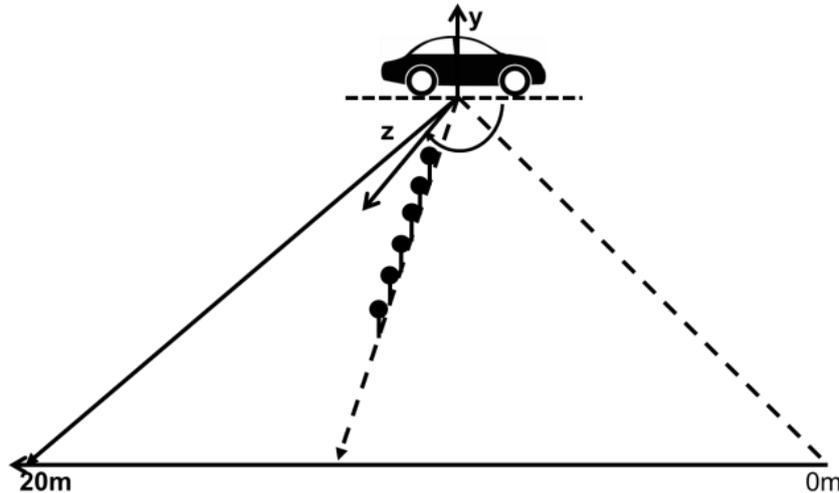


Bild 29: Schalldruckvorhersage mittels Linienarray

2.6.4 Simulierte Vorbeifahrt mittels Holografie oder Beamforming

Für das Messen und Lokalisieren von Schallquellen werden heute vermehrt s. g. akustische Kameras eingesetzt. Der Begriff ergibt sich durch die Überlagerung eines digitalen Bildes mit der gemessenen akustischen Information^{205,206}. Je nach Anwendung und Hersteller existieren für diese Messung verschieden Verfahren mit unterschiedlichen Randbedingungen und Restriktionen:

- Beamforming²⁰⁷
- Fernfeldholografie
- Nahfeldholografie

Der Aufbau des Mikrofonarrays ist bei allen Verfahren ein zwei- oder dreidimensionales Gitter mit unterschiedlicher Positionierung einer Vielzahl von Mikrofonen. Der größte Unterschied liegt darin, in welchem akustischen Feld (Nahfeld oder Fernfeld) gemessen werden soll. Dementsprechend unterscheiden

²⁰⁴ Park et al. 1997

²⁰⁵ Kloow 2008

²⁰⁶ Heinz et al. 2005

²⁰⁷ Verfahren zur Bestimmung von Schallquellenpositionen

sich die Verfahren lediglich in der Anwendung und im Berechnungsalgorithmus, auf den hier nicht näher eingegangen werden soll.

Nach Kloow²⁰⁸ und Park et al.²⁰⁹ erzielen die Fernfeldholografie und das Beamforming im Fernfeld eine sehr gute Orts- und Zeitauflösung und können daher für die Messung des akustischen Feldes auf der Teststrecke eingesetzt werden. Für die Messung in akustischen Räumen auf dem Rollenprüfstand wird aufgrund von Platzmangel die s. g. Nahfeldholografie – also Messung im Nahfeld - bevorzugt.

Im Folgenden werden zwei Ansätze zur Messung des Vorbeifahrgeräusches mittels Nahfeldholografie vorgestellt.

Park et al. verwendet dabei zwei Mikrofonreihen, welche in einem Abstand von 0,1 m nebeneinander senkrecht neben dem Fahrzeug aufgestellt sind, wie in Bild 30 dargestellt. Auf Basis mathematischer Gleichungen kann aus dem gemessenen Schalldrücken die Holografie-Bildebene zu einem definierten Zeitpunkt errechnet werden. Dies erfordert allerdings, dass zuvor die Drehzahl und Geschwindigkeit mit dem maximalen Schalldruckpegel auf der Teststrecke ermittelt werden muss.²¹⁰

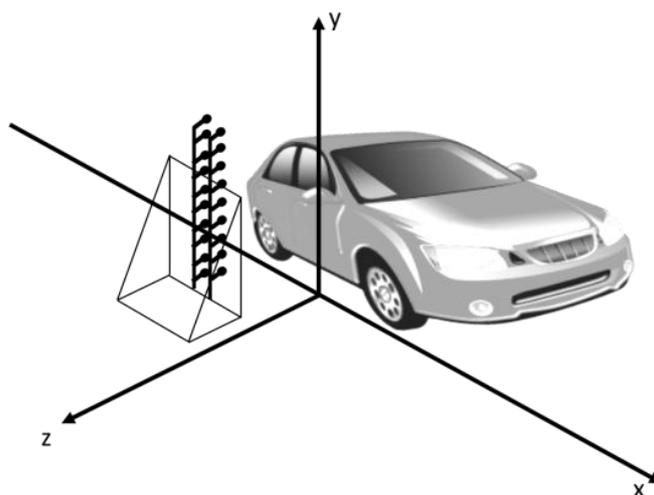


Bild 30: Messung mittels Nahfeldholografie²¹¹

Die Nahfeldholografie mittels eines Mikrofonarrays bietet die Möglichkeit, Schallquellen in Echtzeit zu lokalisieren und auch in Räumen durch eine Nahfeldmessung zu ermöglichen²¹².

²⁰⁸ Kloow 2008

²⁰⁹ Park et al. 1997

²¹⁰ Park et al. 1997

²¹¹ Park et al. 1997

²¹² Thomas et al. 2008

Im Gegensatz zu dem sehr kleinen Array verwendet der Hersteller MTS System Cooperation²¹³ ebenfalls ein Array mit zusätzlicher Kamera für die Nahfeldholografie, allerdings in einer Größe von 2 m auf 2 m. Das Array wird dabei in einem Abstand von 3 m parallel zur Fahrzeuglängsachse positioniert. In Bild 31 links ist der Aufbau eines Arrays mit 96 Mikrofonen dargestellt. Crewe et al.²¹⁴ entwickelten diese Methode für die Messung auf der Teststrecke für hohe Geschwindigkeiten, welches jedoch ebenfalls auch auf dem Prüfstand anwendbar ist. Ein Ergebnis dieser Messung für einen Frequenzbereich ist in Bild 31 rechts dargestellt.

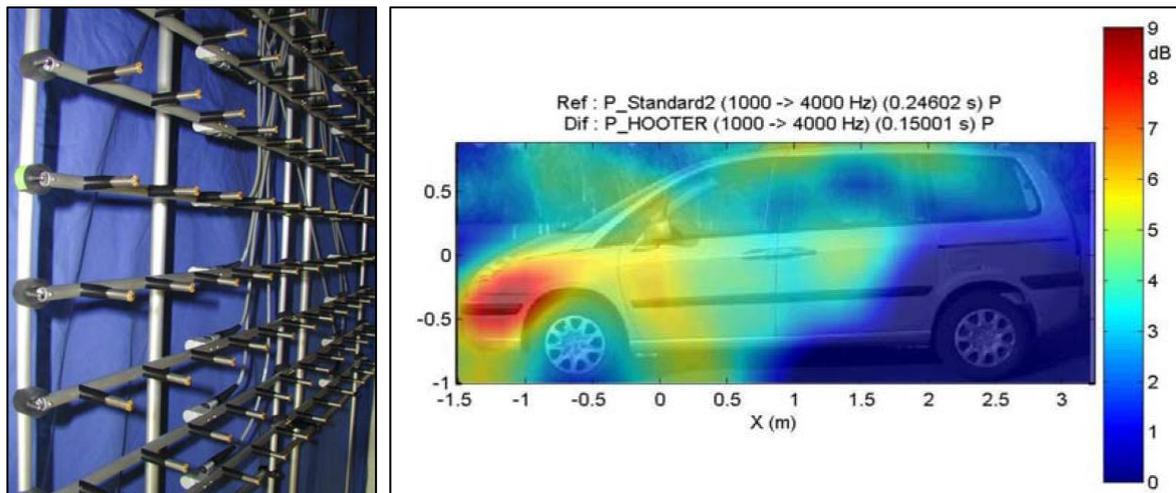


Bild 31: Array für Nahfeldholografie (links)²¹⁵ und Ergebnis einer Nahfeldholografie für einen Frequenzbereich (rechts)²¹⁶

Auch hier zeigt sich, dass die Nahfeldholografie für die Visualisierung ein gutes Ergebnis liefert, allerdings ist das Ergebnis dieser Methode nicht der maximale Schalldruckpegel der Vorbeifahrtmessung über den Weg, sondern lediglich der Schalldruckpegel an verschiedenen Positionen. Zwar lassen sich Schallquellen identifizieren und das Maximum des Schallpegels von einzelnen Schallquellen bestimmen, aber nicht das Summensignal in einem Norm gerechten Abstand.

2.7 Zusammenfassung

In Kapitel 2 wurden zu Beginn die Grundlagen der Produktentstehung und die Eingliederung der Arbeit in die Makroaktivität Validierung im Fahrzeugentwicklungsprozess aufgezeigt. Zudem wurden die Grundlagen der Akustik erklärt und die verschiedenen Schallquellen am Fahrzeug und den daraus

²¹³ MTS Systems Cooperation2012

²¹⁴ Crewe et al. 2002

²¹⁵ Fraunhofer IBPc

²¹⁶ Crewe et al. 2002

resultierenden Schallfeldern aufgezeigt und charakterisiert. Des Weiteren wurde die für die Arbeit verwendete Messtechnik vorgestellt. Anhand des XiL-Validierungsframeworks wurde das Messverfahren für die Messung des von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlten Geräusches nach DIN ISO 362-1 erläutert. Mit diesem Wissen als Grundlage konnten die aus der Literatur bekannten Verfahren zur Messung dieses Geräusches auf den Prüfstand in Akustikhallen hergeleitet werden und bieten damit die Basis für das weitere Vorgehen. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf das Messverfahren mittels Mikrofonarray im Fernfeld und speziell dabei auf das System Umgebung gelegt.

3 Motivation und Zielsetzung

3.1 Motivation

Der Kostendruck in der Fahrzeugentwicklung, sowohl bei der Produktion, als auch in der Entwicklung auf Grund der Forderung nach kürzeren Entwicklungszeiten steigt stetig an²¹⁷. Der Kunde erwartet beim Kauf eines neuen Fahrzeuges jedoch nicht nur ein sparsames und umweltfreundliches Fortbewegungsmittel, sondern auch ein bestimmtes Maß an Komfort und Luxus und das bei möglichst geringen Anschaffungskosten, wodurch effizientere Entwicklungsprozesse und Werkzeuge für die Validierung eine immer bedeutendere Rolle spielen²¹⁸.

Komfort und/oder Diskomfort²¹⁹ erfahren der Fahrer und die Insassen in Form von Schwingungen – sowohl als Körperschwingung als auch in Form von Luftschall. Das NVH-Verhalten beschreibt nicht nur die genannten Schwingungen, sondern auch die Auswirkung auf den Menschen²²⁰. Eine Domäne der NVH ist die Akustik, welche den hörbaren Luftschall beschreibt. In der Fahrzeugentwicklung spielt aber nicht nur der Komfort bezogen auf die Insassen eine wichtige Rolle, sondern auch Schallabstrahlung nach außen und die Einwirkung auf das System Umwelt.

Um die Umwelt und den Menschen durch das stetig steigende Verkehrsaufkommen (50 % Wachstum in den letzten 10 Jahren)²²¹ nicht stetig weiter zu belasten, wird seit 1966 das zulässige Außengeräusch eines vorbeifahrenden Fahrzeuges durch Richtlinien reguliert und liegt heute bei einem oberen Grenzwert von 74 dB(A)²²².

Der Grenzwert des zulässigen Schallpegels und das dazugehörige Messverfahren sind durch die DIN ISO 362 „Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch“ festgelegt. Die Homologation muss auf einer Teststrecke im Freien mit einem realen Fahrer erfolgen. Diese Prozedur bringt jedoch viele Unsicherheiten und unvorhersehbare Einflüsse mit sich.

Für die Durchführung der Messungen müssen definierte meteorologische Bedingungen herrschen. Da diese Bedingungen nicht beeinflussbar sind, kann z. B. in den Wintermonaten nur selten diese Messung durchgeführt werden. Dies muss

²¹⁷ Hüttenrauch / Baum 2008

²¹⁸ Albers et al. 2010b

²¹⁹ Zhang et al 1996

²²⁰ Hieronimus 1990

²²¹ Kraftfahrzeugbundesamt 2010

²²² DIN ISO 362-1: 2009-07

schon in der Planungsphase im Produktentwicklungsprozess mit berücksichtigt werden, da ansonsten hohe Kosten durch Wartezeiten entstehen können. Ebenfalls können unnötige Kosten und Wartezeiten durch Regen entstehen, da die Messung bei trockener Fahrbahn erfolgen muss. Hinzu kommen Windeinflüsse, welche die akustischen Schallwellen beim Aufzeichnen mit Mikrofonen verfälschen können.

Das Fahrmanöver muss nach einer definierten Prozedur ablaufen, die nur geübte Fahrer mit der erforderlichen Reproduzierbarkeit erreichen können. Für konventionelle Antriebsstrangtopologien ist dies zwar möglich, wird aber immer schwieriger, je komplexer diese werden, wie z. B. bei hybriden Antriebssträngen. Hier ist es kaum möglich, durch die variable elektromotorische Unterstützung z. B. in Abhängigkeit vom State of Charge (SOC)²²³ exakt den gleichen Zustand und die gleichen Betriebsbedingungen zu erzielen²²⁴.

Aus den oben genannten Gründen wird angestrebt, die Messung in einer Akustikhalle auf einem Rollenprüfstand durchzuführen. Dadurch kann z. B. ein virtueller Fahrer eingesetzt werden, um die Reproduzierbarkeit zu erhöhen. Zudem können die Bedingungen auf dem Prüfstand konstant gehalten werden, wie z. B. die Raumtemperatur. Somit kann die Prüfung das ganze Jahr über erfolgen. Damit werden Kosten aufgrund von Wartezeiten reduziert.

Ein weiterer Vorteil der Messung auf einem Prüfstand ist die Übertragung der Daten aus dem Fahrzeug auf das stationäre Messequipment durch eine einfache Verkabelung. Da das Fahrzeug auf dem Prüfstand ortsgebunden ist, müssen keine aufwendigen Messdatenübertragungen via Funk erfolgen. Zudem lassen sich auf dem Prüfstand relativ einfach komplexe Messungen, wie Schallortungsverfahren mittels Transferpfadanalyse oder akustischer Kamera zusätzlich realisieren, welche heute ein wichtiger Bestandteil des Sound-Engineering und der akustischen Optimierung sind.

Für die Abbildung der gesamten ISO-Teststrecke ist allerdings ein sehr großer Halbfreifeldraum mit einem dynamischen Allrad-Rollenprüfstand notwendig, welcher oft nicht zur Verfügung steht. Die Akustikhalle muss ein semi-reflexionsarmer Raum sein, d. h. eine Halle mit einem schallharten Boden und einer akustischen Isolierung sowohl an den Wänden als auch an der Decke. Hallen in der notwendigen Größe sind allerdings aus zwei Gründen sehr selten: Zum einen kann es sein, dass die Infrastruktur den notwendigen Platzbedarf nicht vorsieht, zum anderen sind die Kosten für diese Hallen sehr hoch. Dies liegt unter anderem an der notwendigen

²²³ Etablierter englischer Begriff für Batterieladezustand

²²⁴ Albers et al. 2009b

akustischen Verkleidung sowohl der Wände, als auch der Decke, wodurch die Kosten überproportional pro Quadratmeter Grundfläche ansteigen. Deutlich weiter verbreitet sind allerdings Akustikrollenprüfstände in kleineren Dimensionen.

3.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Teilhandlungssystems in der zentralen Aktivität Validierung für den Fahrzeugentwicklungsprozess. Eine Teilaufgabe in der Makroaktivität ist die Messung des Vorbeifahrgeräusches für die Homologation zur Einhaltung der Zielwerte aus dem Zielsystem. Dies können entweder die gesetzlichen Grenzwerte oder Zielwerte aus dem Lastenheft sein. In dieser Arbeit werden zwei Methoden als Teilhandlungssysteme für die Projektierung und die Validierung entwickelt. Zum einen eine Methode zur Überprüfung der Eignung der Akustikhalle und des Prüfstandes für die simulierte Vorbeifahrt, zum anderen eine Methode, das Vorbeifahrgeräusch mittels eines Linienarrays im Fernfeld auch in deutlich kleineren akustischen Hallen zu messen, die nicht den Abmessungen der in der DIN ISO 362 geforderten Teststrecke entsprechen. In Kapitel 2.6 wurden Ansätze gezeigt, welche auf Annahmen basieren, die bei der Skalierung auf kleinere Hallen nicht zulässig sind (wie sich in Kapitel 8 zeigen wird). Das Verfahren mittels Linienarray wird bereits in der o. g. DIN in groben Zügen erläutert, erfordert aber sehr große Hallen, im Gegensatz zur Transferpfadanalyse, welche wiederum sehr aufwendig ist. Zudem gibt es Messungen im Nahfeld, allerdings erfordern diese entweder eine Messung auf der Teststrecke, sind sehr aufwendig, oder liefern nur unzufriedene Ergebnisse.

Daraus leitet sich die zentrale Hypothese dieser Arbeit ab:

Es ist möglich, das Vorbeifahrgeräusch mittels Mikrofonarray in kleinen Akustikhallen zu messen und einen ortsfesten Aufbau zu realisieren, welcher es ermöglicht, die gesamte Messstrecke abzubilden. Das Ziel ist die in der Akustik auftretenden Skaleneffekte zu identifizieren und zu quantifizieren und eine Methode bereitzustellen, mit der diese Effekte berücksichtigt und somit gleiche Ergebnisse, unabhängig von der Hallengröße erzielt werden können.

Das bedeutet im Einzelnen:

- Analyse der bestehenden Methoden und Ableiten der Anforderungen an die Prüfumgebung.
- Definition der Prüfumgebung und Untersuchung der Randbedingung.
- Identifizierung der notwendigen Randbedingungen.
- Entwicklung eines Handlungssystems zur freien Implementierung des Vorbeifahrts-Algorithmus.

- Identifizieren und Quantifizieren der Ungenauigkeiten mit generischen Aufbauten mittels Halb- und Volldodekaeder.
- Ableiten der Thesen zur Skalierung des Verfahrens auf kleine Hallen.
- Übertragung der Annahmen auf das Fahrzeug.
- Validierung der Methode an weiteren Fahrzeugklassen.
- Verallgemeinern der Annahmen und Entwicklung der Methoden als Elemente eines Teilhandlungssystems für den Fahrzeugentwicklungsprozess.

4 Forschungskonzept

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise für das Erreichen der Ziele dieser Arbeit erläutert. Eine Entwicklungsaufgabe wird am IPEK als Problemlösungsprozess verstanden (vgl. Kapitel 2.1.2), welcher die formulierten Ziele, also das Zielsystem in das Objektsystem überführt. Ziel sind zwei Teilhandlungssysteme für die Projektierung und Validierung des Fahrzeugentwicklungsprozesses. Diese sind zum einen eine Vorgehensweise zur Prüfung der Anforderungen an den Prüfstand und die Akustikhalle für die simulierte Vorbeifahrt, zum anderen ein Teilhandlungssystem, mit dem die Messung des Vorbeifahrgeräusches in kleinen Hallen durchgeführt werden kann. Es steht somit nicht der Fahrzeugentwicklungsprozess als Ganzes im Vordergrund, sondern die Methoden als Teil der Projektierung und der Validierung im integrierten Produktentwicklungsprozess (iPeM). Diese ermöglichen es, das Vorbeifahrgeräusch in kleinen Hallen zu messen und dabei skalierbar die ganze Messstrecke vergleichbar abzubilden. Damit lässt sich das Objektsystem, also das Gesamtfahrzeug, über das entwickelte Handlungssystem, mit den Zielen aus dem Zielsystem abgleichen. Diese können entweder die gesetzlich vorgeschriebenen Maximalpegel sein können, oder die Zielwerte aus dem Lastenheft auf Grund von z. B. Komfortanforderungen.

Die Vorgehensweise richtet sich am Spaltenprozess aus und ist in das XiL-Framework auf dem Vehicle-in-the-Loop Layer eingegliedert. Die UUT ist dabei das Gesamtfahrzeug auf dem Rollenprüfstand. Da das System Fahrer und die Manöver und Testfälle durch die Norm beschrieben sind, wird ein besonderes Augenmerk auf das System Fahrzeug und Umwelt bzw. die Fahrzeug- und Umweltsimulation gelegt. Das Fahrzeug ist für die ersten Untersuchungen bei den Messungen nach dem Stand der Forschung ein reales Fahrzeug. Im weiteren Verlauf wird das Fahrzeug als Punktschallquelle sowohl auf dem Boden als auch oberhalb simuliert. Für die Messung in der Halle spielt zudem die Umwelt eine wichtige Rolle. Dabei müssen die akustischen Eigenschaften, wie sie auf der Teststrecke existieren, nachgebildet und simuliert werden.

Basis aller Methoden zur Messung des Vorbeifahrgeräusches auf dem Rollenprüfstand ist die DIN ISO 362²²⁵, da die Erfüllung dieser Norm für die Homologation vorgeschrieben ist. Darauf aufbauend wurden in Kapitel 2.6 in der Situationsanalyse verschiedene Ansätze gezeigt, die erkenntlich machen, dass es

²²⁵ DIN ISO 362: 2009

eine Vielzahl von Möglichkeiten gibt, das Vorbeifahrgeräusch zu simulieren. Wie die Problemeingrenzung zeigt, sind einige Verfahren sehr aufwendig und zum Teil fahrzeuggebunden, andere Verfahren wiederum liefern nur sehr ungenaue Ergebnisse oder sind nur in großen, normgerechten Hallen anwendbar. Daher werden im ersten Schritt bei Suche nach alternativen Lösungen alle Methoden auf die Anwendbarkeit und die Möglichkeit der Skalierung unter verschiedenen Aspekten beleuchtet und ihre Tragweite analysiert, um abschließend eine Bewertung der Verfahren zu erlangen, welche die Basis für das weitere Vorgehen ist.

Im Folgenden werden die geometrischen und akustischen Randbedingungen am IPEK-Akustikrollenprüfstand mit Vehicle-in-the-Loop Technologie untersucht, um eine definierte und zulässige Basis für die folgenden Untersuchungen zu erlangen, da die Umweltsimulation eine bedeutende Rolle spielt. Dazu zählen nicht nur die akustischen und geometrischen Eigenschaften der Halle, sondern u. a. auch die prüfstandbedingten Störgeräusche und die notwendige Dynamik des Prüfstands, um das Verfahren abzubilden. Das Ziel ist ein Teilhandlungssystem zur Prüfung der akustischen Umwelt und des Prüfstands zur Messung der simulierten Vorbeifahrt.

Da es für kleine Hallen bereits theoretische Ansätze gibt, werden diese in der Situationsanalyse für das Teilhandlungssystem der Skalierung als Basis für das weitere Vorgehen herangezogen und mit einem konventionellen PKW als Beispielsystem genauer untersucht. Die dabei identifizierten Abweichungen zeigen den weiteren Handlungsbedarf zur Klärung der Schwachstellen.

Kommerzielle Auswertesysteme sind sehr statisch und lassen in der Regel keinen Zugriff auf den Berechnungsalgorithmus zu. Daher wird für die Entwicklung der Methode ein Matlab® Werkzeug zur Berechnung der simulierten Vorbeifahrt entwickelt und vorgestellt. Es bietet die Möglichkeit, alle Parameter frei zu definieren. Damit steht ein Werkzeug nicht nur für diese Arbeit, sondern auch dem späteren Anwender als eine Ressource für das Teilhandlungssystem zur Verfügung.

In der Problemeingrenzung zur Klärung der Abweichungen werden in einem nachfolgenden Kapitel die Signale auf spektrale Einflüsse sowohl mittels Fast-Fourier-Transformation als auch mittels Terzanalyse untersucht. Da für die Vorbeifahrtsmessung der Schalldruck bzw. der Schalldruckpegel skaliert und ausgewertet wird, muss zudem, um die Problemstellung einzugrenzen, die Freifeldausbreitung und damit die Pegeldämpfung genauer beleuchtet werden.

Nach der umfangreichen Situationsanalyse und Problemeingrenzung werden Untersuchungen mit Hilfe von künstlichen Schallquellen durchgeführt, um die identifizierten Abweichungen zu klären. Im Vehicle-in-the-Loop Layer wird unter Einbeziehung von künstlichen Schallquellen das System Fahrzeug in seiner Komplexität reduziert und als Punktschallquelle simuliert. Dies vereinfacht in den

ersten Schritten die Modellbildung für die simulierte Vorbeifahrt und eröffnet damit, die Möglichkeit, die Umwelt bzw. die Umweltsimulation genauer zu beleuchten. Als künstliche Schallquellen werden ein Halbdodekaeder und ein Voll-dodekaeder verwendet, wie in Kapitel 6 beschrieben. Anhand dieser Messungen kann zum einen eine Methode zur Prüfung der Eignung des Prüfstandes und der Akustikhalle abgeleitet werden und zum anderen lassen sich damit neue Lösungen erarbeiten, um die Abweichungen durch die Skalierung, die durch sehr vereinfachte Annahmen aus dem Stand der Forschung entstehen, kompensieren zu können. Die neuen Lösungsansätze für die simulierte Vorbeifahrt werden anschließend auf das reale Fahrzeug übertragen und an zwei weiteren Fahrzeugen unterschiedlicher Klassen validiert.

Abschließend werden die getroffenen und validierten Annahmen verallgemeinert, in das XiL-Framework eingegliedert und daraus zwei Teilhandlungssysteme bereitgestellt. Diese beinhalten zum einen die Vorgehensweise zur Prüfung der Eignung der Umgebung und zum anderen eine Methode zur Skalierung des Messverfahrens in kleine Akustikhallen. Dabei wird der Fokus auf die erforderlichen Randbedingungen und Restriktionen gelegt. Diese Teilhandlungssysteme werden dann als Leitfaden zusammengefasst, veranschaulicht und abschließend in die Projektierung und Validierung des Fahrzeugentwicklungsprozesses eingeordnet.

Das letzte Kapitel gibt eine Zusammenfassung dieser Arbeit wieder und zeigt einen Ausblick auf weitere Forschungsfelder im Bereich der NVH bzgl. der Messung des Vorbeifahrgeräusches in Halbfreifeldräumen.

5 Bewertung der Anwendbarkeit bestehender Methoden in kleinen Hallen

In Kapitel 2.6.1 bis 2.6.4 wurden Messverfahren für die Messung der simulierten Vorbeifahrt auf dem Prüfstand vorgestellt, die zum Teil bereits in der Praxis angewendet werden, als auch neue Ansätze. In diesem Kapitel sollen die alternativen Lösungen daher auf die Anwendbarkeit in kleinen Hallen, der Aufwand und die Flexibilität der verschiedenen Methoden geprüft werden als Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen.

5.1 Simulierte Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray im Fernfeld

Das etablierte Verfahren, welches ein sehr gutes Ergebnis liefert, ist die Messung im Freifeld mittels eines Arrays mit 7,5 Meter Abstand zur Mittellinie. Der Nachteil dieser Methode ist allerdings die benötigte Raumgröße, die zur Verfügung stehen muss. Für die vollständige Abbildung der gesamten Messstrecke ist eine Mindestgröße in Abhängigkeit von der unteren Grenzfrequenz von 18 m Breite x 35 m Länge bei einseitiger Nutzung erforderlich (vgl. 2.6.1.3).

Viele Hersteller von Messsoftware bieten zwar die Möglichkeit, mit dem Array näher an das Fahrzeug heranzugehen, um die Messstrecke zu verlängern, allerdings basieren die Annahmen alle auf dem Prinzip des Strahlensatzes mit einer Punktschallquelle auf dem Boden²²⁶. Die Reduzierung des Fahrzeuges auf eine Punktschallquelle ist erst ab einem gewissen Abstand zulässig. Dabei wird allerdings angenommen, dass die virtuelle Schallquelle in einem akustischen Zentrum liegt, welches je nach Softwarehersteller im Motormittelpunkt oder an einer Ecke des Fahrzeuges sitzt. Für die Berechnung der Mikrofonhöhe wird davon ausgegangen, dass sich die Schallquelle auf dem Boden befindet. Ähnliche Ansätze für kleine Hallen gehen in die Richtung, die Mikrofone an den Hallenenden um die Ecke zu positionieren, um somit die simulierte Messstrecke verlängern zu können, allerdings basieren diese Umrechnungen auf den gleichen Annahmen.

5.2 Simulierte Vorbeifahrt mittels Nahfeld-Komponenten-Messung

Die Messung mittels Nahfeldmikrofonen bietet eine gute Möglichkeit für das Sound-Engineering, da das Gesamtfahrzeuggeräusch in seine Teilschallquellen zerlegt werden kann. Das Verfahren ist unabhängig von der Raumgröße. Der Nachteil dieser

²²⁶ Janssen et al. 2011

Methode ist allerdings, dass für eine gute Ortsauflösung sehr aufwendige Messtechnikapplikationen am Fahrzeug notwendig sind, welche zudem noch fahrzeuggebunden sind. Des Weiteren können neue unbekannte Parameter auftreten, bzw. Schallquellen, die nicht bekannt sind, nur schwer abgebildet werden. Abhängig davon können Schallquellen auftreten oder auch unterdrückt werden, da die Geräuschquellen bei z. B. hybriden Antriebsstrangtopologien nicht zwangsweise bekannt sind. Diese Verfahren basieren daher auf sehr viel Vorwissen über das Geräuschverhalten des Fahrzeuges. Die Methode ist sehr zeit- und folglich kostenintensiv, da der Aufbau für jedes Fahrzeug erneut durchgeführt werden muss. Damit bietet das Verfahren nicht die Möglichkeit, einfach und flexibel mehrere Fahrzeuge zu vermessen, da sich der Aufbau nicht ortsfest in der Akustikhalle befindet.

5.3 Schalldruckvorhersage mittels Linienarray

Die Vorhersage des Schallfeldes durch die Messung einer Linie in Polarkoordinaten mithilfe eines Linienarray beurteilt der Autor Park et al.²²⁷ als sehr ungenau im Fernfeld. Der Ansatz selber wurde aus diesem Grund vom Autor auch nicht weiterverfolgt.

5.4 Simulierte Vorbeifahrt mittels Holografie oder Beamforming

Das Beamforming oder die Holografie bieten sehr gute Möglichkeiten, Schallfelder zu visualisieren und damit das Potenzial Geräuschquellen zu lokalisieren und zu quantifizieren. Ebenfalls werden sowohl das Beamforming als auch die Holografie für die Messung des Vorbeifahrgeräusches verwendet. Park et al.²²⁸ verwendet dafür ein sehr kleines Array mit nur zwei Mikrofonreihen im Nahfeld, benötigt jedoch im Vorfeld die Kenntnis über Drehzahl und Geschwindigkeit des maximalen Schalldruckpegels zur stationären Messung.

Thomas et al.²²⁹ und Crewe et al.²³⁰ hingegen verwenden sehr große Flächenarrays. Dadurch kann die Ortsauflösung verbessert werden. Zusätzlich lassen sich mit Hilfe neuer Algorithmen transiente Zustände erfassen.

Alle Verfahren mittels Holografie oder Beamforming liefern als Ergebnis jedoch nur das visuelle Bild mit den akustischen Informationen über den lautesten Einzelpegel

²²⁷ Park et al. 1997

²²⁸ Park et al. 1997

²²⁹ Thomas et al. 2008

²³⁰ Crewe et al. 2002

und nicht das erforderliche Ergebnis des maximalen Summenschalldruckpegels über den Weg.

5.5 Bewertung und Zusammenfassung

Zusammenfassend werden in diesem Abschnitt die Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahren dargestellt, um so ein Geeignetes für die Messung des Vorbeifahrgeräusches in kleinen Hallen zu identifizieren. In der nachstehenden Tabelle 1 sind die wichtigsten Vor- und Nachteile der genannten Verfahren gegenübergestellt.

Pro	Kontra
<u>Mikrofonarray im Fernfeld</u>	
<ul style="list-style-type: none"> + Einfacher Aufbau + Fahrzeugunabhängig (keine Sensoren am Fahrzeug) + Skalierbar für kleinere Räume + Einfacher Algorithmus + Ergebnis direkt auswertbar + Erste Anforderungen bereits in der DIN 	<ul style="list-style-type: none"> – Verfahren für ISO-gerechte Hallengröße ausgelegt – Keine Teilschallquellenidentifikation möglich
<u>Nahfeld-Komponenten-Messung</u>	
<ul style="list-style-type: none"> + Teilschallquellenidentifikation möglich + Geringer Platzbedarf + Ergebnis direkt auswertbar 	<ul style="list-style-type: none"> – Aufwendige Applikation der Messtechnik am Fahrzeug notwendig (fahrzeugspezifisch) – Vorwissen über Geräuschquellen notwendig, Teilschallquellen müssen bekannt sein – Rechenintensiv
<u>Schallfeldvorhersage mittels Linienarray</u>	
<ul style="list-style-type: none"> + Einfacher Aufbau + Messung durch Vorhersage im Nahfeld möglich 	<ul style="list-style-type: none"> – Sehr ungenau, fehlerbehaftet – Aufwendiger Algorithmus
<u>Holografie/Beamforming</u>	
<ul style="list-style-type: none"> + Teilschallquellenidentifikation möglich + Visuelles Ergebnis + Sowohl im Nah- als auch im Fernfeld anwendbar 	<ul style="list-style-type: none"> – Messtechnik sehr teuer bei großer Ortsauflösung – Z.T. muss Drehzahl und Geschwindigkeit des Pegelmaximums bekannt sein

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Messverfahren²³¹

²³¹ Resseke et al. 2012

Für die Identifizierung und Lokalisierung von Teilschallquellen sind die Verfahren mit einer visuellen Unterstützung wie die Holografie sehr hilfreich, allerdings ist die erforderliche Messtechnik für eine gute Ortsauflösung sehr kostenintensiv. Zu dem liefern sie nicht das Ergebnis der Vorbeifahrtsmessung, lediglich den maximalen Schalldruckpegel an verschiedenen Orten.

Die Schallfeldvorhersage wurde bereits vom Autor selbst als zu fehlerbehaftet identifiziert und wird daher auch nicht weiter verfolgt.

Ein zukunftsweisendes Verfahren für die Analyse von Schallquellen und besonders für das Sound-Design von Fahrzeugen ist die Nahfeld-Komponenten-Messung. Gerade wenn es um die Charakterisierung von Teilschallquellen geht, bietet das Verfahren ein großes Potenzial. Die Bestimmung des maximalen Vorbeifahrtspegels ist jedoch sehr rechenintensiv. Der größte Nachteil dieses Verfahrens liegt allerdings im benötigten Vorwissen über die Schallquellen. Für alternative Antriebsstrangtopologien, bei denen die Schallquellen von vornherein nicht bekannt sind, kann dieses Verfahren zu ungenauen Ergebnissen führen. Ein weiterer großer Nachteil ist der Messaufbau. Durch die Messung der Teilschallquellen ist es notwendig, Sensoren am Fahrzeug zu applizieren. Dies macht das Verfahren sehr aufwendig, da die Applizierung für jedes zu vermessende Fahrzeug erneut durchgeführt werden muss.

Dagegen hat das Verfahren mittels eines Linienarrays im Fernfeld immer mehr an Bedeutung zugenommen. Erste Randbedingungen und Anforderungen sind schon in der Norm²³² zu finden. Dieses Verfahren wird bereits bei den OEMs in den ISO-gerechten Akustikrollenprüfständen eingesetzt. Der Vorteil im Kontext des XiL liegt in der guten Simulation der Umwelt und des Manövers auf dem Prüfstand. Das etablierte Verfahren liefert im Vergleich zur Messung auf der Strecke sehr gute Ergebnisse²³³. Zudem ist der Aufbau stationär und nicht fahrzeuggebunden, wodurch die Messungen mit unterschiedlichen Fahrzeugen sehr schnell durchgeführt werden. Der Algorithmus zur Berechnung des Vorbeifahrgeräusches ist im Vergleich zu den anderen Verfahren sehr robust und performant.

Die Möglichkeit der Skalierbarkeit, mit Hilfe des auf dem Schallausbreitungsgesetzes, auf nicht ISO-gerechte Abmessungen der Halle wird bereits durchgeführt. Dies kann entweder durch Verkleinerung des Abstandes oder durch Positionierung der Mikrofone um die Ecke erfolgen, um den verfügbaren Platz effektiver zu nutzen.

²³² DIN ISO 362-1: 2009

²³³ Finsterhölzel et al. 2006

Da an der Messmethode mittels Arrays im Fernfeld auch noch Forschungsaktivitäten bzgl. Reifenakustik²³⁴ etc. laufen und erste Randbedingungen bereits durch die Norm bekannt sind, wird dieses Verfahren als Basis für das weitere Vorgehen verwendet und weiterentwickelt in Hinblick auf seine Anwendbarkeit in kleinen Hallen.

²³⁴ Finsterhölzel et al. 2006

6 Messtechnik

In diesem Kapitel wird auf die für die experimentellen Untersuchungen verwendete Messtechnik eingegangen, insbesondere auf die Mikrofone und auf die künstlichen Schallquellen.

6.1 Mikrofone

Für die Messung des Schalldruckes gibt es eine Vielzahl von Messaufnehmern, wie der Piezoschwinger, das Elektret-Mikrofon und das Kondensatormikrofon. Nach Möser²³⁵ ist der einzige Mikrofontyp für die Messung des absoluten Schalldruckes, welcher der in den Normen genannten Genauigkeitsanforderungen genügt, das Kondensatormikrofon.

Es basiert auf der Messung der Kapazitätsänderung eines Kondensators. Die Membran des Mikrofons ist dabei an eine Elektrode des Kondensators gekoppelt, wie in Bild 32 dargestellt. Wird die Membran durch den Schalldruck angeregt, ändert sich der Abstand der beiden Elektroden, wodurch sich eine Kapazitätsänderung ergibt. Durch die daraus resultierende Ladungsänderung wird im Vorverstärker eine Spannungsänderung induziert, welche verstärkt wird und mit einem Datenlogger aufgezeichnet werden kann²³⁶.

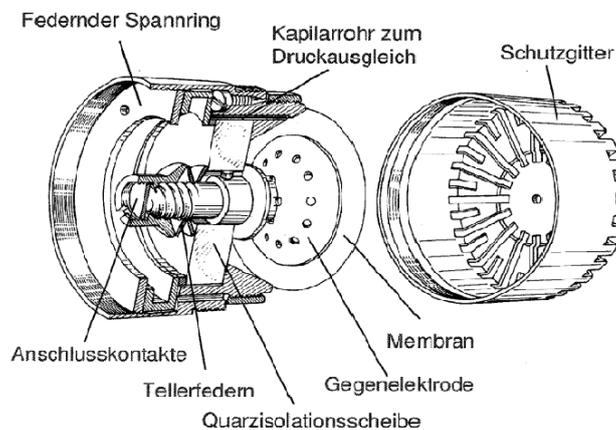


Bild 32: Aufbau eines Kondensatormikrofons²³⁷

Diesen Typ des Mikrofons gibt es in verschiedenen Varianten, sowohl für die Messung im Nahfeld als auch im Freifeld²³⁸. Für die Messung der beschleunigten

²³⁵ Möser 2007

²³⁶ Kollmann et al. 2006

²³⁷ Möser 2007

Vorbeifahrt im Freifeld werden ½ Zoll Freifeldmikrofone vom Typ 40 AE in Kombination mit ½ Zoll CCP (Constant Current Power) Vorverstärker vom Typ 26 CA des Herstellers G.R.A.S verwendet. Für die Reifen-Geräusch- und Prüfstandsgeräuschmessungen werden Nahfeldmikrofone des Typs 40 AD mit ebenfalls ½ Zoll CCP Vorverstärker des Typs 26 CA von G.R.A.S verwendet.

6.2 Halbdodekaeder

Für die Untersuchungen mit einer generischen Schallquelle wird eine Punktschallquelle mit Kugelcharakteristik verwendet. Da die Variante des eingebauten Lautsprechers im Boden (vgl. Kapitel 2.3.7.1) nicht praktikabel ist, wird für die Messungen ein Halbdodekaeder verwendet. Dieser besitzt eine maximale Schallleistung von ca. 120 dB bei breitbandiger Anregung zwischen 20 Hz und 20 kHz. Der Halbdodekaeder kann einen Frequenzbereich zwischen 80 Hz - 6,3 kHz wiedergeben²³⁹. Für die Untersuchungen liegt daher die untere Grenzfrequenz der Quelle von 80 Hz oberhalb der 64 Hz Grenzfrequenz des Freifeldraumes. Nach oben ist der Frequenzbereich bis 6,3 kHz begrenzt, was für die Untersuchungen an Fahrzeugen ausreichend ist (siehe Kapitel 2.4.1.3).

6.3 (Voll)Dodekaeder

Für die Nachbildung einer Kugelschallquelle im Raum wird ein (Voll)Dodekaeder verwendet (vgl. Kapitel 2.3.7.1). Der Dodekaeder bildet ebenfalls eine Kugelwelle aus, allerdings im Gegensatz zum Halbdodekaeder mit einer 360-Grad-Abstrahlung in alle Raumrichtungen. Der Dodekaeder besitzt eine maximale Schallleistung von 120 dB bei einer breitbandigen Anregung von ebenfalls 20 Hz - 20 kHz. Der gefilterte Frequenzbereich liegt auch hier zwischen 80 Hz und 6,3 kHz²⁴⁰.

²³⁸ G.R.A.S. 2012

²³⁹ Stratenschulte Messtechnik 2012

²⁴⁰ Stratenschulte Messtechnik 2012

7 IPEK – Akustikrollenprüfstand

Für die simulierte Vorbeifahrt im Kontext des XiL-Frameworks muss sowohl bei dem Transfer von der Teststrecke auf den Akustikrollenprüfstand als auch bei der Skalierung das System „Umwelt“ genauer untersucht werden, um dieses System richtig simulieren zu können. Dazu soll in diesem Kapitel die Umwelt, der IPEK - Akustikrollenprüfstand mit Vehicle-in-the-Loop Technologie - näher untersucht werden, inwieweit die Randbedingungen für die Messung erfüllt sind bzw. welche Restriktionen daraus zu folgern sind.

Der Akustikrollenprüfstand am IPEK ist ein zwei-achsgetriebener Rollenprüfstand in einem Halbfreifeldraum, wie in Bild 34 links und rechts dargestellt.

Im Folgenden werden zum einen die geometrischen und akustischen Eigenschaften der Akustikhalle untersucht, als auch die Dynamik des Prüfstands und die im Betrieb entstehenden Schallemissionen.

7.1 Geometrische und akustische Eigenschaften des Raumes

Die Halle des Akustikrollenprüfstands besitzt inkl. Raumauskleidung folgende Abmessungen, wie in Bild 33 dargestellt:

- Breite: 10,72 m
- Länge: 14,05 m
- Höhe: 6,83 m

Der Prüfstand ist dabei außermittig in der Prüfhalle platziert, um zu einer Seite einen möglichst großen Abstand zur Akustikeinhausung zu erlangen. Für die beidseitige Messung kann das Fahrzeug sowohl vorwärts als auch rückwärts gefesselt werden, sodass sich die Fahrtrichtung umkehren lässt.

Der Boden ist entsprechend dem Halbfreifeld schallhart mit einem typischen Schallabsorptionsgrad von $\alpha = 0,06$ ausgeführt. Die Wände sind mit absorbierendem Material versehen.

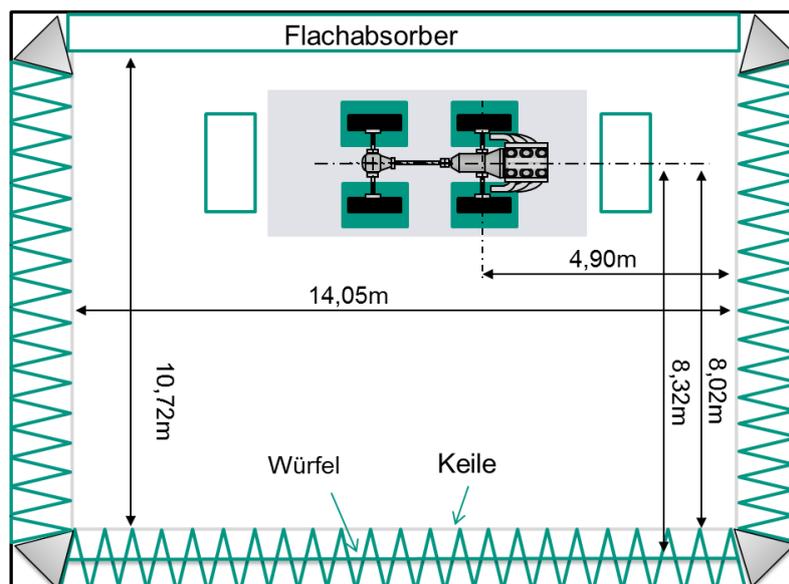


Bild 33: Abmessungen des Akustikrollenprüfstands

Um eine möglichst niedrige Grenzfrequenz, bei möglichst großem nutzbarem Raum, zu erreichen, sind in diesem Raum drei verschiedene Arten von Absorber verwendet worden. In Bild 34 links sind die absorbierenden Keile und die Flachabsorber (das so genannte CAR System der Kapolnek GmbH) zu sehen. Bild 34 rechts zeigt ebenfalls die Keile und eine schalldurchlässige Abdeckung, hinter welcher sich kleine, senkrecht aufgereichte Würfel befinden²⁴¹. Damit wird eine untere Grenzfrequenz von 80 Hz erreicht. Ebenfalls erfüllt der Prüfraum die Genauigkeitsklasse 1 der DIN EN ISO 3745^{242,243}. Auf allen Prüfbahnen wurde zudem eine untere Grenzfrequenz von 63 Hz im Terzband mit einer ausreichenden Genauigkeit gemessen.



Bild 34: Akustikrollenprüfstand des IPEK: CAR System (links); Keile und Würfel (rechts)

²⁴¹ Messbericht 2008

²⁴² DIN EN ISO 3745:2009

²⁴³ Genuit 2010

Für die Analogie auf der Messstrecke werden die Mikrofone mit einem Abstand von 7,5 m zur Fahrzeug Mittelachse aufgestellt. Wie in Bild 33 zu sehen ist, beträgt der maximale Abstand von der Fahrzeugmittelachse zur Wand 8,22 m. Für die Positionierung der Mikrofone ist nach Kapitel 2.6.1.1 zu beachten, dass einen Mindestabstand von $\frac{\lambda_G}{4}$ von der Wand eingehalten werden sollte^{244,245}. Daraus resultiert ein Mindestabstand zur Wand von 1,06 m bzw. 1,33 m bei 80 Hz bzw. 64 Hz.

Der effektive Raum für die Mikrofonpositionierung reduziert sich damit auf 7,16 m bzw. auf 6,89 m zur Fahrzeugmittelachse. Um dennoch den Abstand von 7,5 m zu erreichen kann das Fahrzeug exzentrisch, also außermittig auf dem Prüfstand platziert werden.

Die Länge des effektiv nutzbaren Raumes reduziert sich ebenfalls um den zweifachen Mindestabstand. Da an den Seitenwänden im Abstand von 7,5 m der Schall nicht mehr senkrecht zur Wand einfällt, spielt der Mindestabstand zwischen den Arrayenden und der Akustikverkleidung eine eher untergeordnete Rolle²⁴⁶.

7.2 Dynamik des Prüfstands

Für die simulierte Vorbeifahrt muss das Fahrzeug auf dem Prüfstand eine Vollastbeschleunigung durchführen. Der Prüfstand wird dabei, wie in Kapitel 2.6.1.2 erläutert, in einer Straßensimulation betrieben, welche entsprechend dem Fahrzeug, die Fahrwiderstände in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit simuliert. Um dies zu gewährleisten, wird im Folgenden die notwendige Dynamik des Prüfstands geprüft.

Der Rollenprüfstand besitzt eine Antriebsleistung von je 220 kW pro Achse mit je einer Massenträgheit von 2152,4 kgm². Das maximale Drehmoment bis zu einer Geschwindigkeit von 80 km/h beträgt 10 kNm. Nach Gl. 27 lässt sich somit die maximale Leerlaufbeschleunigung a_{max} der Rolle bestimmen.

$$a_{max} = \frac{M}{J} \cdot r_{Rolle} = \frac{10.000 \text{ Nm}}{2152,4 \text{ kgm}^2} \cdot 0,995 \text{ m} = 4,62 \text{ m/s}^2 \quad \text{Gl. 27}$$

Dies ist eine sehr konservative Abschätzung, da der Prüfstand den realen Fahrwiderstand simulieren muss und damit dieser Anteil zusätzlich bei der beschleunigten Vorbeifahrt zur Verfügung steht. Somit wird bei der

²⁴⁴ Bay et al. 2003

²⁴⁵ DIN ISO 362-1:2009

²⁴⁶ Pazos et al. 2006

Vollastbeschleunigung durch das Fahrzeug zusätzliche Energie dem System hinzugefügt.

7.3 Geräusche am Prüfstand

Für die Untersuchungen auf dem Akustikrollenprüfstand des IPEK müssen im nächsten Schritt die Nebengeräusche bei der Messung beurteilt werden. Da die Versuche nur wenige Sekunden lang dauern, wird das Fahrzeug kurzzeitig ohne aktive Kühlung d. h. ohne Lüftung betrieben. Daher sind noch folgende Geräuschquellen zu beurteilen²⁴⁷:

- Prüfstandsbetriebsgeräusch
- Geräusch der Absauganlage

7.3.1 Prüfstandsbetriebsgeräusch

Für die Quantifizierung des Prüfstandsbetriebsgeräusches soll zum einen das Leerlaufgeräusch der Rollen und zum anderen das Geräusch des Prüfstands unter Last quantifiziert werden. Da der elektrische Antrieb und die Lagerbelastung der Prüftrommel einen Einfluss auf das Störgeräusch haben können, werden dafür Untersuchungen mit und ohne Fahrzeug herangezogen. Nach Pflüger²⁴⁸ können alle Neben- oder Störgeräusche kleiner 10 dB(A) vernachlässigt werden, was mit diesen Untersuchungen geprüft wird. Als Maß wird der Schalldruckpegel bei 7,5 m Abstand herangezogen.

7.3.1.1 Leerlaufgeräusch des Prüfstands

Zur Beurteilung des Prüfstandsleerlaufgeräusches wird der Schalldruck mit 1 m Abstand über der Rollenoberfläche und zudem in der Mitte des Prüfstands im gleichen Abstand gemessen. Bei der simulierten Vorbeifahrt treten Geschwindigkeiten im Bereich zwischen 50 km/h und 70 km/h auf. Daher wird zunächst eine stationäre Geschwindigkeit bei 50 km/h betrachtet. Dazu wird sowohl der A- bewertete Schalldruckpegel der Mikrofone bei 1 m, als auch der gemittelte Schalldruckpegel bei 7,5 m Abstand , wie in Bild 35 dargestellt, gemessen.

²⁴⁷ Genuit 2010

²⁴⁸ Pflüger et al. 2010

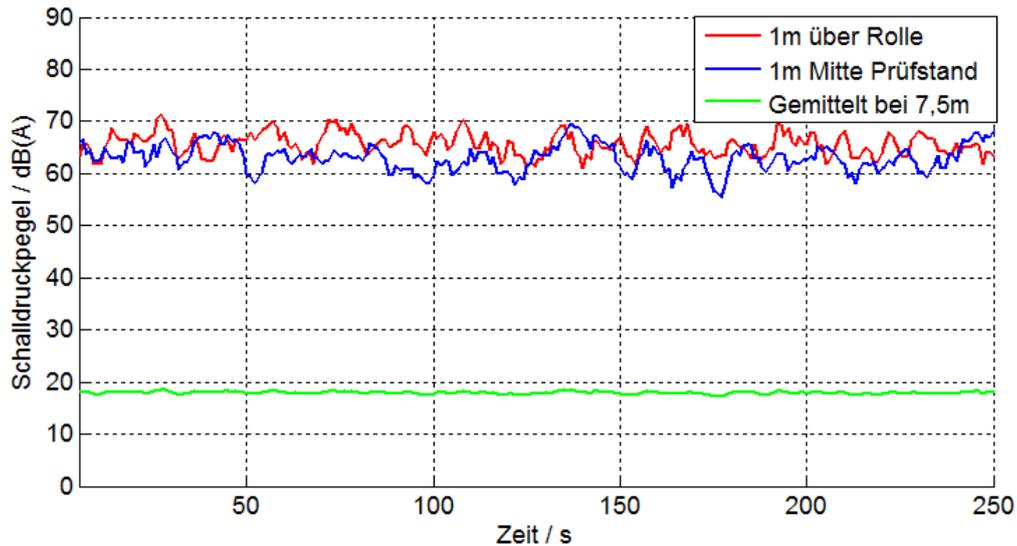
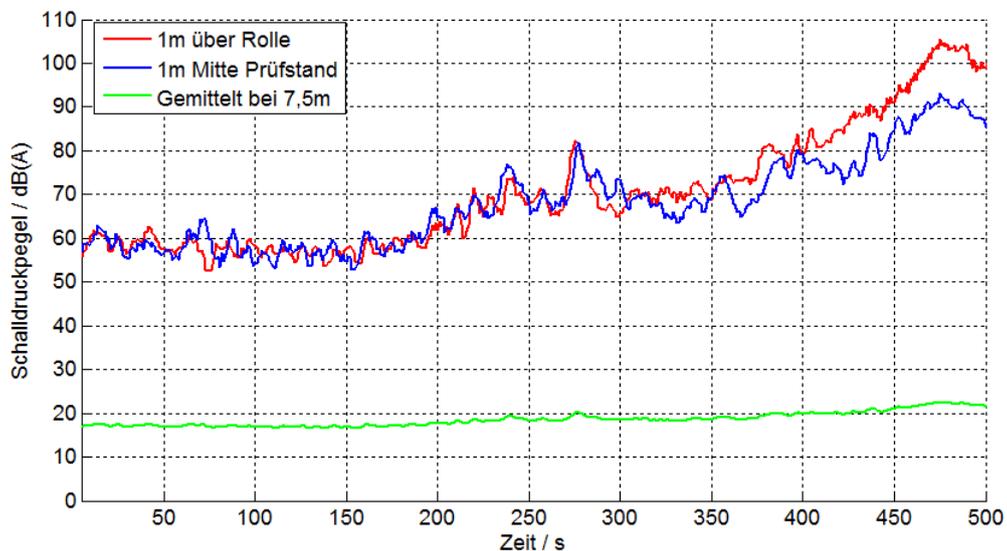


Bild 35: Rollenleerlaufgeräusch bei 50 km/h

Die beschleunigte Vorbeifahrt ist ein transienter Vorgang. Daher wird der Schalldruck zusätzlich bei einer Rollenbeschleunigung von 2 m/s^2 im Bereich von 5 km/h bis 150 km/h gemessen, was der maximalen Beschleunigung bei der simulierten Vorbeifahrt entspricht. Wie in Bild 36 dargestellt, steigt der Schalldruckpegel bei einem Abstand von 1 m bis auf ca. 105 dB(A) an. Der mittlere Schalldruckpegel bei 7,5 m Abstand von Prüfstandsmitte bewegt sich in beiden Messungen zwischen 17 dB(A) und 23 dB(A).

Bild 36: Schalldruckpegel bei Beschleunigung von 2 m/s^2

Es zeigt sich, dass bei einem Fahrzeuggeräusch von 60 dB(A) - 70 dB(A) bei einem Messabstand von 7,5 m das Rollengeräusch mit 20 dB(A) zu vernachlässigen ist und der Prüfstand die Anforderungen erfüllt.

7.3.1.2 Prüfstandsgeräusch unter Last

Für die Messung des Prüfstandsgeräusches zur Prüfung der Trommelgeräusche unter Last wird ein Fahrzeug auf den Prüfstand gefesselt und über diesen angetrieben. Dafür werden Nahfeldmikrofone mit jeweils 0,5 m Abstand zum Prüfstand und zum Ein- und Auslauf des Reifens und der Reifenseite im Nahfeld positioniert, wie in Bild 37 links bzw. rechts dargestellt.



Bild 37: Messung der Trommelgeräusche (links) und Messung der Reifengeräusche (rechts)

In Bild 38 ist der Schalldruckpegel der einzelnen Mikrofone über einem Zeitabschnitt von 70 s abgebildet bei konstanter Geschwindigkeit von 50 km/h. Die Geräusche des Reifens im Nahfeld sind dabei um mindestens 18 dB(A) im Mittel lauter als die gemessenen Schwingungen an der Rollenoberfläche.

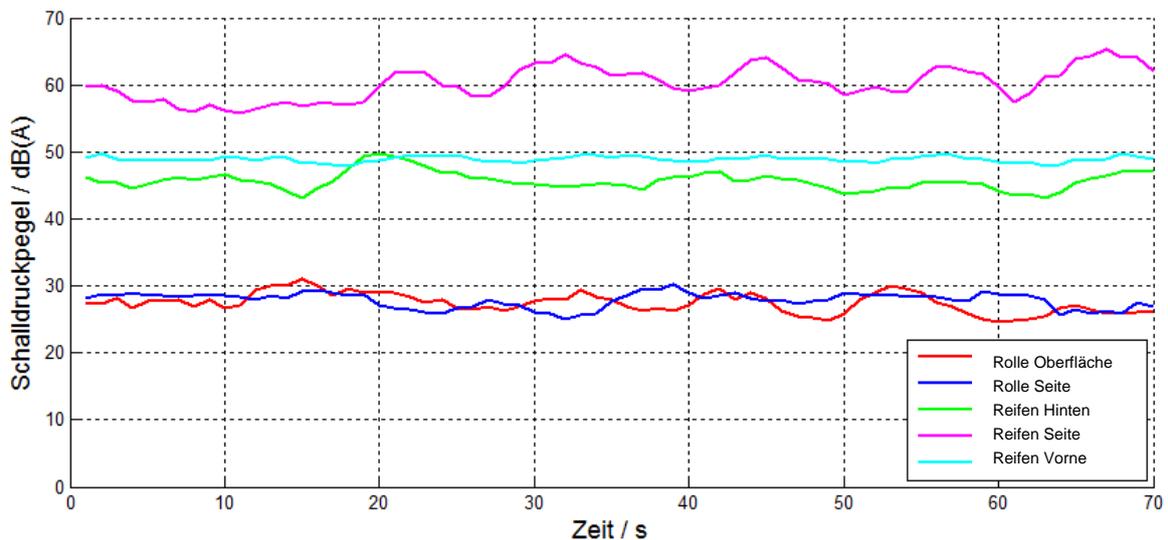


Bild 38: Schalldruckpegel von Rolle und Reifen im Nahfeld

Der heutige Grenzwert von Fahrzeuggeräuschen bei der Vorbeifahrt liegt bei 74 dB(A)²⁴⁹. Aktuelle Mittelklassefahrzeuge erzielen heute einen Wert von ca. 71 dB(A), Kleinwagen um die 60 dB(A)²⁵⁰. Damit ist das Rollengeräusch bzw. das Prüfstandsgeräusch weit unter dem zu messenden Geräusch und somit ausreichend leise.

7.3.2 Geräusch der Absauganlage

Werden Fahrzeuge auf dem Rollenprüfstand in einer geschlossenen Halle untersucht, so müssen die Abgase des Fahrzeuges abgesaugt werden. Die Abgasabsaugung sollte einen niedrigen Schalldruckpegel im Betrieb aufweisen, um die Störgeräusche so klein wie möglich zu halten. Um diese zu quantifizieren, wurde der Schalldruck der Absaugung sowohl im Nahfeld mit 1 m Abstand als auch im Fernfeld mit einem Abstand von 7,5 m gemessen. In Bild 39 links ist der Aufbau des Nahfeldmikrofons und rechts der dazu gehörige Schalldruckpegelverlauf der Nah- und Fernfeldmessung dargestellt.

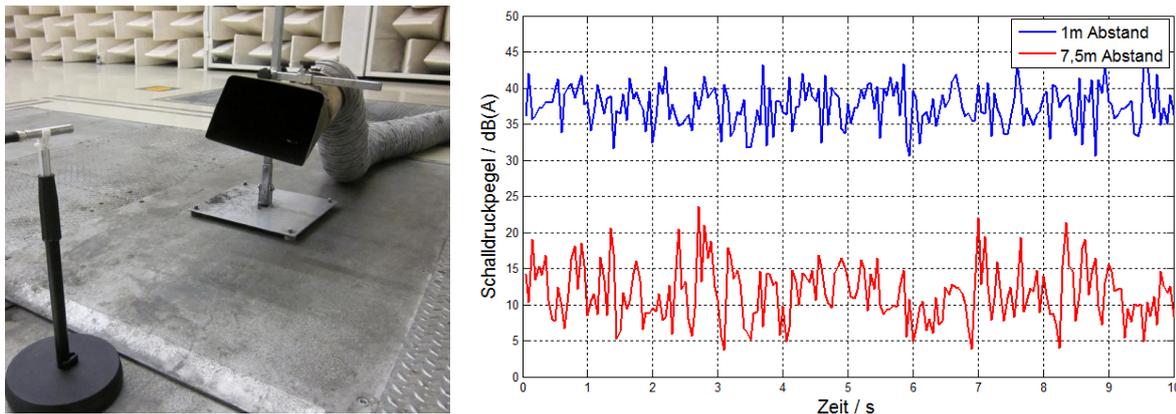


Bild 39: Nahfeldmessung der Absaugung (links); Schalldruckpegel des Absauggeräusches (rechts)

Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Nahfeldmessung einen mittleren Schalldruckpegel von 38 dB(A) und die Fernfeldmessung einen Schalldruckpegel von 14 dB(A) im Mittel aufweist. Die Abgasabsaugung ist also deutlich leiser, als das zu messende Fahrzeuggeräusch. Für die Messung ist allerdings zu beachten, dass sich das Ende der Abgasanlage nicht direkt im Absaugtrichter befindet, da sonst der Mündungsschall gedämpft wird.

Für die Quantifizierung der Mündungsschalldämpfung der Abgasanlage durch die Absauganlage werden zwei Vergleichsmessungen durchgeführt. Dazu wird die

²⁴⁹ DIN ISO 362-1: 2009

²⁵⁰ Schmillen / Schneider 2003

simulierte Vorbeifahrt mit und ohne Abgasabsaugung durchgeführt. Bei der Variante ohne Absaugung können die Abgase, wie auf der Teststrecke, frei austreten.

In Bild 40 ist der A-bewertete Schalldruckpegel über den Weg für die Messung der simulierten Vorbeifahrt mit und ohne Abgasabsaugung dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Verlauf und die maximale Amplitude beider Messungen sehr ähnlich sind. Zudem ist zu erkennen, dass der Schalldruckpegel ohne Absauganlage zum Ende der Messstrecke um 0,3 dB(A) größer ist. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Abstrahlrichtung des Mündungsgeräusches erst beim Passieren des virtuellen Nullpunktes dominanter wird.

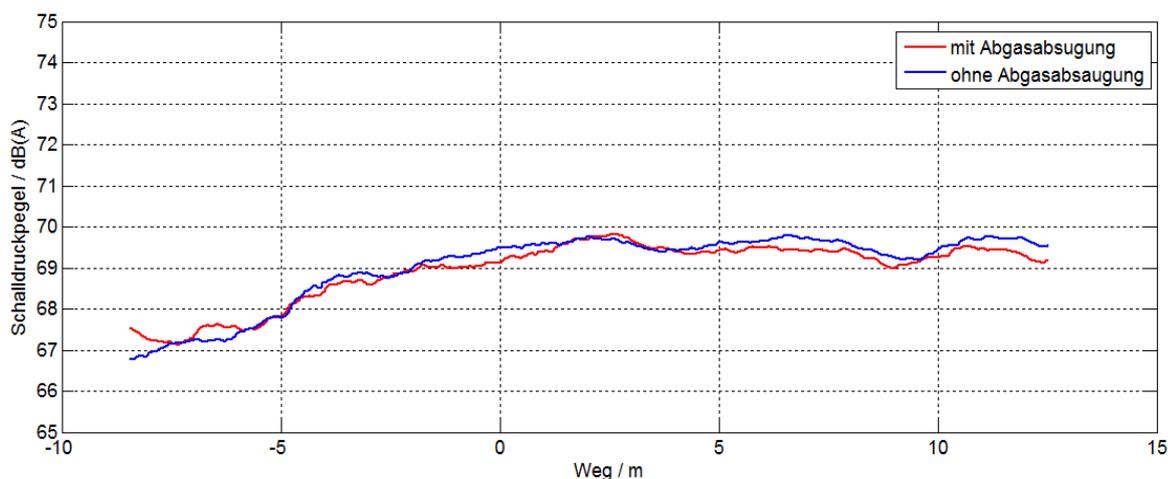


Bild 40: Vergleich der A-bewerteten Schalldruckpegel bei der simulierten Vorbeifahrt mit und ohne Absauganlage

Für die simulierte Vorbeifahrt hat daher die Abgasabsaugung und die Dämpfung des Abgasschalls bei dem untersuchten Fahrzeug keine Auswirkung.

Wird dagegen der nicht bewertete Schalldruckpegel bei der beschleunigten Vorbeifahrt, wie in Bild 41 betrachtet, so ist ein deutlicher Unterschied in der Amplitude zwischen den Messungen mit und ohne Abgasabsaugung erkennbar.

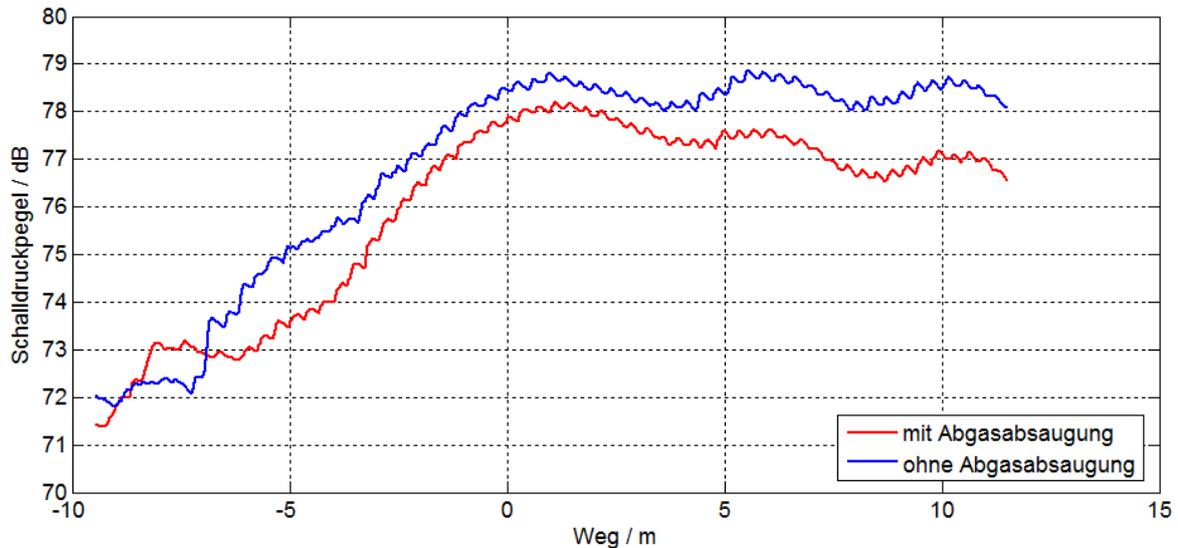


Bild 41: Vergleich der nicht bewerteten Schalldruckpegel bei der simulierten Vorbeifahrt

Der Schalldruckpegel ist gegenüber der Messung mit Abgasabsaugung im Mittel um ca. 1 dB bis 1,5 dB größer. Zudem wird der Unterschied mit zunehmender Messstrecke deutlich größer. Dies liegt wiederum an der Richtwirkung des Mündungsschalls. Wie in Kapitel 2.4.1.1 bereits erläutert, liegen die Abgasgeräusche in einem sehr niedrigen Frequenzbereich. Da der Schalldruck bei der Messung des Vorbeifahrgeräusches A-bewertet wird, werden somit die tiefen Frequenzen sehr stark gedämpft. Daher ist die Dämpfung des Mündungsschalls durch Messung mit Abgasabsaugung für die simulierte Vorbeifahrt zulässig. Spielt die Messung für das Sound-Design eine zusätzliche Rolle, so sollte dieser Einfluss aber durchaus berücksichtigt werden.

Des Weiteren ist an diesem Beispiel der Einfluss der A-Bewertung sehr gut ersichtlich. Der maximale Schalldruckpegel ist bei den A-bewerteten Messungen um ca. 9 dB kleiner als ohne Bewertung. Hier spiegelt sich die starke Dämpfung der niedrigen Frequenzen durch die Bewertung wider.

8 Messung mit dem Mikrofonarray im Fernfeld

Nach Klärung der Prüfstandsgeräusche wird die Messung mittels eines Mikrofonarrays im Fernfeld durchgeführt und untersucht. Dazu wird die Methode der Messung des Vorbeifahrgeräusches mittels Array im Fernfeld, wie in Kapitel 2.6.1 ausführlich beschrieben, verwendet. Da die Messung im Fernfeld durchzuführen ist, müssen zu Beginn die Randbedingungen des Freifeldes in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeometrie festgelegt werden.

8.1 Freifeldbedingung

Wie in Kapitel 2.4.2 aufgezeigt, hängt die Freifeldbedingung von der zu messenden Grenzfrequenz und maßgeblich von der Schallquelle, also dem Fahrzeug ab. Für die Messung mittels Mikrofonarray im Freifeld werden daher im ersten Schritt die Schallquellen und die daraus resultierende Freifeldbedingung ermittelt.

8.1.1 Versuchsfahrzeug

Im Folgenden wird das in der Situationsanalyse verwendete Fahrzeug ausführlicher vorgestellt und auf die daraus resultierenden Randbedingungen eingegangen. Für diese Untersuchungen wird ein PKW mit Frontmotor mit 125 kW Leistung, konventionellem 5 Gang-Getriebe und einem Gesamtgewicht von 1660 kg herangezogen. Damit besitzt das Fahrzeug einen Leistungsindex von 75,3. Somit müssen sowohl die konstante als auch die beschleunigte Vorbeifahrt betrachtet werden (vgl. Kapitel 2.5).



Bild 42: Versuchsfahrzeug des IPEK

Die Länge des Fahrzeuges beträgt 4,77 m. Der Abstand zwischen Motorzentrum und Abgasanlage beträgt 4,35 m und definiert damit den größten Abstand der Schallquellen.

8.1.2 Ermittlung der Freifeldbedingung

Die untere Grenzfrequenz der IPEK-Akustikhalle wird nach Kapitel 6 mit 80 Hz angenommen. Zudem werden alle Messdaten analog zur DIN 362 A-bewertet (vgl. Kapitel 2.3.6.1). Dadurch werden Frequenzen kleiner 80 Hz bereits um 22,5 dB gedämpft. Die Schallausbreitungsgeschwindigkeit wird mit $c = 340 \text{ m/s}$ angenommen (vgl. Kapitel 2.3.2.1).

Für die Messung mit einem kleineren Abstand müssen zuerst die drei Freifeldbedingungen nach Kapitel 2.4.2 geklärt werden. Die dominierenden Schallquellen sind das Reifengeräusch, Motor, sowie das Ansaug- und Abgassystem, wobei nach Pflüger²⁵¹ das Ansaugsystem vernachlässigt werden kann.

1. Der Abstand zwischen Motor (Zentrum) bis Ende Abgasanlage beträgt 4,35 m.

$$D \gg 4,35\text{m} \quad \text{Gl. 28}$$

2. Der Mindestabstand nach Gl. 29 errechnet sich durch die Beziehung von Fahrzeuglänge und untere Grenzfrequenz zu 4,45 m:

$$D \gg \frac{L^2}{\lambda} = \frac{L^2}{c} \cdot f = \frac{(4,35\text{m})^2}{\frac{340\text{m}}{\text{s}}} \cdot 80\text{Hz} = 4,45\text{m} \quad \text{Gl. 29}$$

3. Der Mindestabstand wird durch die untere Grenzfrequenz Gl. 30 definiert und ergibt 4,25 m:

$$D \gg \lambda = \frac{c}{f} = \frac{340\text{m}}{80\text{Hz}} = 4,25\text{m} \quad \text{Gl. 30}$$

Daraus resultiert ein theoretischer Mindestabstand von 4,45 m für die Fernfeldmessung und das Fahrzeug entspricht in guter Näherung einer ungerichteten Punktschallquelle. Zwar sollte in der theoretischen Betrachtung der Abstand viel größer sein, als die ermittelten Werte, allerdings ist es nach Möser²⁵² in der Praxis zulässig, das „viel größer“ durch ein „größer gleich“ zu ersetzen. Um nicht direkt in der Grenzbedingung zu messen, werden für die Untersuchungen etwas größere Abstände gewählt. Der größte Abstand resultiert aus der zweiten Bedingung. Für die Berechnung wurde der Abstand zwischen Motor und Abgasanlage verwendet. Wie in Kapitel 7.3.2 gezeigt, ist das tieffrequente Geräusche der

²⁵¹ Pflüger et al. 2010

²⁵² Möser 2007

Abgasanlage auf Grund der A-Bewertung eher untergeordnet zu betrachten. Damit verkürzt sich die Strahlerlänge und der Mindestabstand könnte entsprechend kleiner gewählt werden.

In Bild 44 ist die Fernfeldbedingung für das oben genannte Fahrzeug eingezeichnet. Der Abstand sollte jedoch größer gewählt werden, um nicht direkt an der Grenze der Annäherung zu liegen.

8.2 Messaufbau

Nach Bestimmung der Freifeldbedingung in Abhängigkeit von der Schallquelle kann nun der erforderliche Raum geprüft werden. Damit können die Grenzbedingungen für die Position und die Länge des Mikrofonarrays bestimmt werden.

8.2.1 Grenzbedingungen der Arraygeometrie

Nach Kapitel 2.5 muss eine Messstrecke von 20 m durchfahren werden. Die Messung beginnt, sobald das Fahrzeug die Linie A-A mit der Fahrzeugfront erreicht und endet, sobald das Heck die Linie B-B nach Bild 22 passiert hat. Das hat zur Folge, dass als eigentliche Messstrecke bei der simulierten Vorbeifahrt eine Länge von 20 m plus einmal die Fahrzeuglänge L betrachtet werden muss.

Wird davon ausgegangen, dass nach Kapitel 2.4.2 das Fahrzeug ab einem Mindestabstand als Punktschallquelle betrachtet werden kann, so lassen sich die Mikrofonkoordinaten bezogen auf einen variablen Abstand in Meter zur Mittellinie berechnen.

$$x_{1,D} = \frac{D}{7,5m} \cdot (10 + s) \quad \text{Gl. 31}$$

$$x_{n,D} = -\frac{D}{7,5m} \cdot (10 + L - s) \quad \text{Gl. 32}$$

Gl. 31 und Gl. 32 zeigen den Zusammenhang zwischen dem ersten und dem letzten (n -ten) Mikrofon. Veranschaulicht wird dies in Bild 43. So ist der Abstand abhängig von der Fahrzeuglänge und der Position des akustischen Zentrums. Dabei wird das akustische Zentrum als Koordinaten-Ursprung verwendet. Die Variable s ist dabei der Abstand zwischen Fahrzeugfront und dem akustischen Zentrum, welches nach Janssen et al.²⁵³ im Motormittelpunkt angenommen wird. Für das oben genannte Versuchsfahrzeug beträgt $s = 1,0$ m.

²⁵³ Janssen et al. 2011

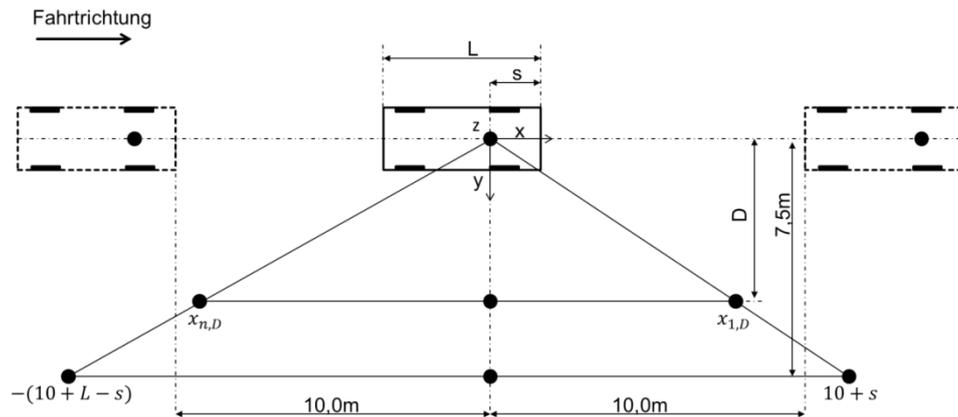


Bild 43: Berechnung der notwendigen Raumlänge

Für einen Abstand D lässt sich draus die benötigte Arraylänge nach Gl. 33 bestimmen.

$$L_A = x_{1,D} - x_{n,D} = \frac{D}{7,5} \cdot (10m + s) + \frac{D}{7,5m} \cdot (10m + L - s) = \frac{D}{7,5m} \cdot (20m + L) \quad \text{Gl. 33}$$

Die Mikrofonhöhe h wird auf Basis der trigonometrischen Beziehung für eine Punktschallquelle auf dem Boden nach Gleichung Gl. 34 bestimmt²⁵⁴.

$$h = \frac{D}{7,5m} \cdot 1,2m \quad \text{Gl. 34}$$

Nach Gl. 33 ergibt sich bei einer Hallenlänge von 14,05 m ein Abstand zwischen Fahrzeugmittelachse und Mikrofonarray von 4,25 m bzw. eine benötigte Hallenbreite von 14,69 m bei dem geforderten Mindestabstand von 4,45 m. Damit kann gezeigt werden, dass die Hallenbreite theoretisch nicht ausreichend ist, ohne die Freifeldbedingung zu verletzen. Mit dem kleinsten möglichen Abstand von Fahrzeugmittelachse und Mikrofonarray kann theoretisch nur eine Gesamtstrecke von 18,66 m abgebildet werden.

Für das Ergebnis ist nur das Maximum des Schalldruckpegels von Interesse. Wird der Schalldruckpegel über den Weg aufgetragen, so liegt das Maximum in der Regel nicht am Rand der Messkurve. Daher ist die ermittelte Messstrecke für die Bestimmung des Pegelmaximums ausreichend. Sollte die Position des maximalen Schalldruckpegels wider Erwarten außerhalb der messbaren Strecke liegen, so kann durch eine virtuelle Verschiebung des Arrays in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsprofil der Messstreckenabschnitt relativ zum Fahrzeug verschoben werden. Das bedeutet, dass die Messung erst zeitlich versetzt zur Position des

²⁵⁴ Janssen et al. 2011

Fahrzeuges beginnt. Damit wird zwar der Messbereich nicht größer, aber es lassen sich nicht relevante Messabschnitte zu Messbeginn verwerfen zugunsten zusätzlicher Messabschnitte am Ende.

8.2.2 Mikrofonaufbau

Für die Messung wurde ein Array mit 12 Mikrofonen verwendet mit einem Abstand zwischen den Mikrofonen von je 1,05 m.

Für die Versuchsdurchführung werden drei Varianten untersucht. Nach Kapitel 8.1.2 ist ein Mindestabstand zwischen Fahrzeugmittellinie und Mikrofon von 4,45 m erforderlich. Daher wurden als Abstand der Mikrofonreihe 4,5 m, 6 m und 7,5 m gewählt, wie in Bild 44 dargestellt. Da bei dieser Methode von einer punktförmigen Quelle ausgegangen wird, wird entsprechend der geometrischen Beziehung nach Gl. 34 die Höhe der Mikrofone angepasst.

Daraus ergeben sich für die Messung folgende Positionswerte für das Mikrofonarray:

- $D = 4,5 \text{ m}$; $h = 0,72 \text{ m}$
- $D = 6,0 \text{ m}$; $h = 0,96 \text{ m}$
- $D = 7,5 \text{ m}$; $h = 1,20 \text{ m}$ (Normabstand, Normhöhe)

In Bild 44 sind neben den Mikrofonpositionen zudem das in Kapitel 8.1.2 berechnete Nahfeld in grün und das Fernfeld in blau des Fahrzeuges eingezeichnet.

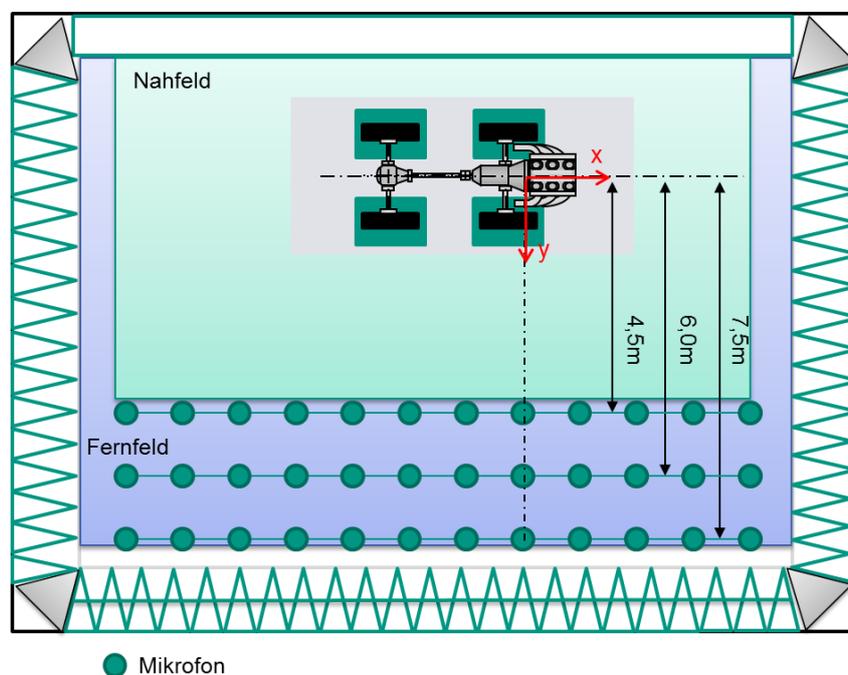


Bild 44: Nahfeld und Fernfeldbedingung am Fahrzeug und Aufbau der Mikrofone

8.3 Messergebnisse

Im Folgenden sind repräsentative Ist- und Soll- Messergebnisse von den in Kapitel 8.2 beschriebenen drei Messaufbauten, sowohl für die konstante als auch für die beschleunigte Vorbeifahrt, jeweils umgerechnet auf den Normabstand dargestellt. Zu sehen sind jeweils die A-bewerteten Schalldruckpegelverläufe über der Messstrecke für die konstante Vorbeifahrt mit 50 km/h in Bild 45 und die beschleunigte Vorbeifahrt in Bild 46 bei unterschiedlichen Abständen D . Jede Kurve entspricht dem Mittelwert aus fünf Messungen. Die mittlere Standardabweichung liegt bei 0,21 und die maximale Standardabweichung bei 0,38.

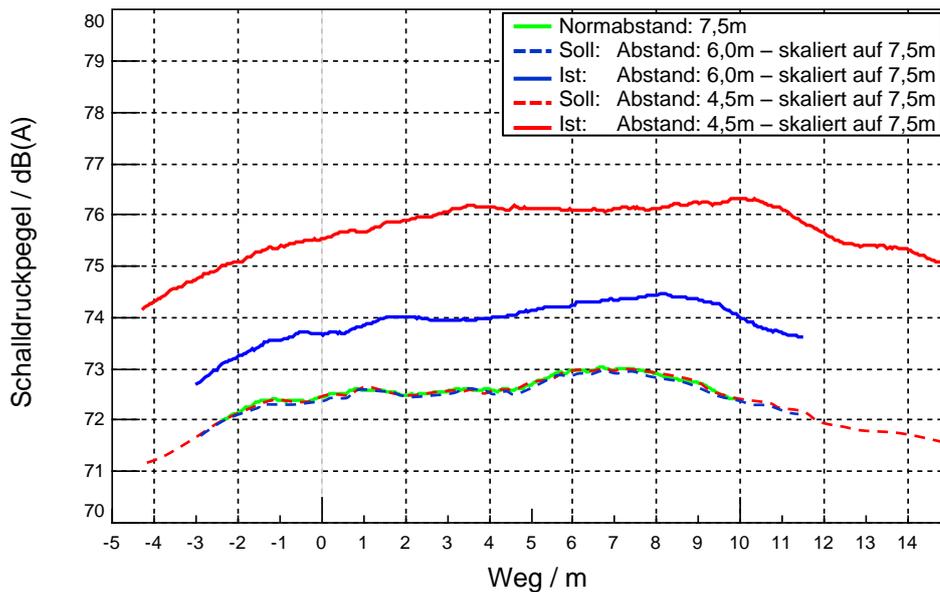


Bild 45: Skalierte Ergebnisse der konstanten Vorbeifahrt mit unterschiedlichem Arrayabstand

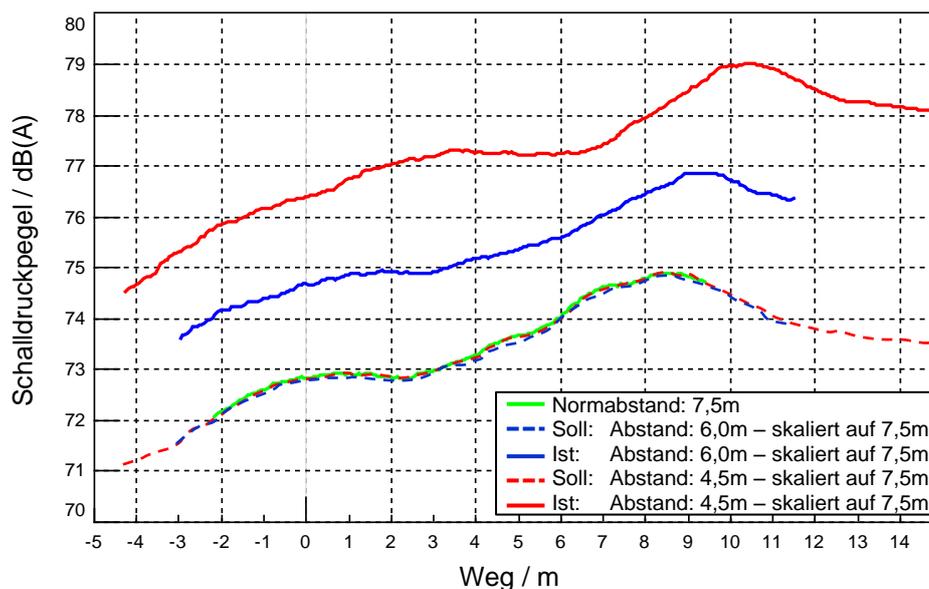


Bild 46: Skalierte Ergebnisse der beschleunigten Vorbeifahrt mit unterschiedlichem Arrayabstand

Die drei Messaufbauten weisen in beiden Versuchen deutliche Unterschiede in folgenden drei Punkten auf:

- Messstrecke
- Maximum des Schalldruckpegels
- Position des Maximums

8.3.1 Messstrecke

Bei der Betrachtung der Messstrecke wird ersichtlich, dass die mögliche messbare Strecke mit kleiner werdendem Abstand zwischen Fahrzeugmittellinie und Mikrofonarray zunimmt. Dieser Sachverhalt ist auf die geometrischen Eigenschaften bzw. die zentrische Streckung zurückzuführen. Durch die gleichbleibende Arraylänge ergibt sich auf Basis des Strahlensatzes eine größere Messstrecke. Die Strecke und damit der mögliche Messbereich konnte somit von 11,5 m auf 19 m vergrößert werden. Der Ursprung der Koordinaten für die Messstrecke wurde bei der Messung auf die Rollenmitte der Vorderachse gelegt.

Für die Messungen, sowohl bei 7,5 m, als auch bei 4,5 m Abstand werden je 12 Mikrofone verwendet. Für die Messung bei 7,5m Abstand bedeutet dies eine Anzahl von 12 Stützstellen auf die messbare Strecke von 11,5 m, was einem Abstand von 1,05 m zwischen den Mikrofonen entspricht. Verringert sich der Abstand bei gleichbleibender Arraylänge, so verringert sich örtlich gesehen die Anzahl der gemessenen Stützstellen, da auf einen größeren Messbereich die gleiche Anzahl an Mikrofonen verteilt wird. Nach Kapitel 2.6.1.3 bzw. nach der Norm²⁵⁵ sind die 12 Stützstellen für diese Messung jedoch ausreichend²⁵⁶.

8.3.2 Pegelmaximum

Die drei Messläufe unterscheiden sich deutlich im gemessenen maximalen Pegel, obwohl die Mikrofondaten auf 7,5 m mittels des Abstandsgesetzes umgerechnet werden. So weist die Messung bei der konstanten Vorbeifahrt mit 7,5 m Abstand ein Pegel von 73 dB(A) und die Messung mit 4,5 m Abstand 76,5 dB(A) auf. Damit entsteht durch die Abstandsänderung und Skalierung ein Pegelunterschied von 3,5 dB(A). Wird dagegen die beschleunigte Vorbeifahrt betrachtet, so ist sogar eine Pegelzunahme von über 4 dB(A) zwischen den Messungen mit 4,5 m und 7,5 m Abstand erkennbar. Das Fahrzeug selbst ist bei der Beschleunigung, bezogen auf die Konstantfahrt, um 2,0 dB(A) bis 2,5 dB(A) lauter, was auf die zunehmenden

²⁵⁵ DIN ISO 362-1: 2009-07

²⁵⁶ Albers / Robens 2011

Motorengeräusche zurückzuführen ist. Grundsätzlich sei hier angemerkt, dass der maximale Pegel auf der Teststrecke (vgl. Bild 23) im Vergleich zur Messung in der Halle ca. 5 dB(A) kleiner ist. Dies ist auf das Reifengeräusch zurück zu führen. Bedingt durch den Rollenbelag und die gekrümmte Rollenoberfläche sind diese auf dem Prüfstand ausgeprägter. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Skalierbarkeit des Messverfahrens und der Übertragbarkeit von großen in kleine Hallen. Der größere Schalldruckpegel bedingt durch die Reifengeräusche auf dem Prüfstand werden in dieser Arbeit nicht näher untersucht. Dieses Phänomen sollte in weiteren Arbeiten genauer betrachtet werden, um letztendlich auch die Übertragbarkeit von Strecke zu Prüfstand im absoluten Schalldruckpegel gewährleisten zu können.

8.3.3 Position des Maximums

Betrachtet wird nun die örtliche Position des Pegelmaximums. Dabei ist auffällig, dass mit kleiner werdendem Abstand des Arrays zur Fahrzeugmittellinie hin sich das Maximum des Vorbeifahrtpegels nach vorne, also in Richtung der positiven Messstrecke, verschiebt. Dies kann sowohl bei der konstanten als auch bei der beschleunigten Vorbeifahrt festgestellt werden. Da lediglich der maximale Wert ausschlaggebend ist und nicht die Position des Maximums, spielt diese für die Vorbeifahrtmessung eine eher untergeordnete Rolle. Die Verschiebung wird allerdings dann interessant, wenn das Maximum durch z. B. neuartige Antriebsstrangtopologien erst am Ende der Messstrecke erreicht wird.

8.3.4 Zusammenfassung der Messergebnisse

Auf Basis der Messung der konstanten und beschleunigten Vorbeifahrt mit verschiedenen Arrayabständen kann gezeigt werden, dass durch die geometrische Beziehung, ausgehend von einem Kugelstrahler, die Messstrecke virtuell verlängert werden kann. Durch die Reduzierung des Abstandes zwischen Array und Fahrzeugmitte kommt es allerdings zu einer deutlichen Überhöhung des Pegelmaximums von bis zu 4,1 dB(A). Zudem verschiebt sich das Maximum des Schalldruckpegels in die positive Koordinatenrichtung. Für die Vorbeifahrtmessung hat die Position des Maximums eher eine untergeordnete Rolle, da der repräsentative Wert nur das Maximum des Schalldruckpegels ist, unabhängig von der Position.

8.4 Fehlerrechnung

Abschließend soll exemplarisch für einen repräsentativen Messlauf, d. h. fünf aufeinanderfolgende Messungen, die Qualität der Daten geprüft, beurteilt und einer Vergleichsmessung auf der Strecke gegenübergestellt werden. Da der Schalldruckpegel auf der Messstrecke aus den oben genannten Gründen (vgl. Kapitel 8.3.2) kleiner ist als auf dem Rollenprüfstand, wird hier nicht die absolute

Größe betrachtet. Für die Homologation ist diese zwar von Interesse, allerdings eignet sich im Sinne des XiL der Prüfstand gerade für vergleichende Untersuchungen im Entwicklungsprozess deutlich besser, da die Ergebnisse deutlich genauer und reproduzierbarer sind.

Um die Ergebnisse besser darzustellen, werden die Ergebnisse in 1 dB(A) Skalen dargestellt. Dazu werden in zwei Diagrammen die zwei Messläufe (Teststrecke, Prüfstand) exemplarisch gegenübergestellt. Die Unterteilung der Ordinaten beider Diagramme ist aufgrund des großen Wertebereiches der Straßenmessung auf jeweils 1 dB(A) Schritte unterteilt. In Bild 47 ist der Mittelwert aus fünf Messungen und die Standardabweichung der Messungen auf der Teststrecke dargestellt. Es ergibt sich eine mittlere Standardabweichung von 1,04 dB(A). Der größte Messfehler beträgt dabei 2,38 dB(A) und entspricht einer Abweichung von 4 %.

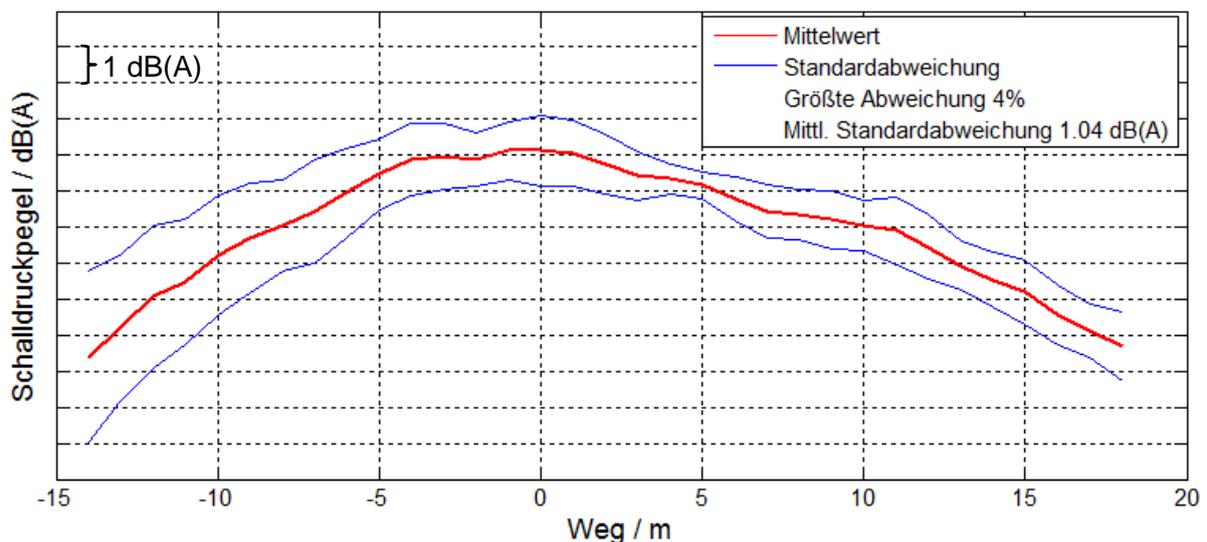


Bild 47: Mittelwert und Standardabweichung auf der Teststrecke bei der beschleunigten Vorbeifahrt

In Bild 48 hingegen sind der Mittelwert aus fünf Messungen und die Standardabweichung der Messungen auf dem Prüfstand dargestellt. Die mittlere Standardabweichung beträgt nur noch 0,18 dB(A). Der größte Messfehler beträgt nur noch 0,35 dB(A), was einem Prozentsatz von nur 0,4 % entspricht.

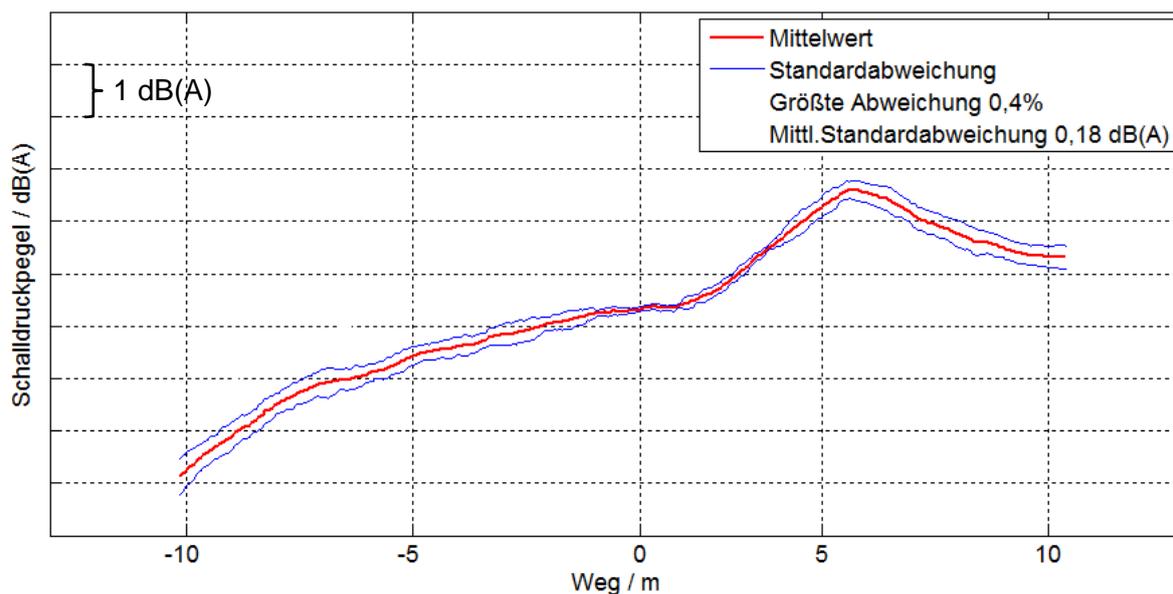


Bild 48: Mittelwert und Standardabweichung auf dem Prüfstand bei der beschleunigten Vorbeifahrt

Die Messungen zeigen, dass die größten Abweichungen im Prozentbereich um eine ganze Zehnerpotenz kleiner und die Standardabweichung ebenfalls beim Prüfstand deutlich kleiner gegenüber der Strecke ist. Anhand dieser Fehleranalyse begründet sich u. a. die Motivation, die Messung des Vorbeifahrgeräusches auf dem Prüfstand zu simulieren. Damit kann gezeigt werden, dass sich Messfehler deutlich reduzieren lassen und sehr gut reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden können.

9 Entwicklungswerkzeug als Element des Handlungssystems

In Kapitel 8 wurde gezeigt, dass durch die Reduzierung des Abstandes zwischen Array und Fahrzeugmittellinie die Messstrecke vergrößert werden kann. Obwohl die Messdaten mittels der Freifeldausbreitung auf die 7,5 m umgerechnet werden, entstehen durch die Verschiebung des Arrays auf Basis des Strahlensatzes nicht skalierbare Ergebnisse.

Für die weiteren Untersuchungen und die Entwicklung einer Methode zur Skalierbarkeit wird ein Entwicklungswerkzeug zur Berechnung der simulierten Vorbeifahrt (EBV) implementiert. Da kommerzielle Softwarelösungen von namhaften Herstellern wie LMS²⁵⁷ und Bruel & Kjaer²⁵⁸ keine Änderungen im Softwarecode erlauben, wurde der Vorbeifahrts-Algorithmus nach Kapitel 2.6.1 in Matlab® von MathWorks implementiert, um somit die Möglichkeit zu besitzen, Änderungen, die sich aus den Randbedingungen ergeben, am Algorithmus oder an den Parametern vorzunehmen und diese in die Software zu implementieren.

Der Dopplereffekt wird bei der Auswertung über das EBV nicht berücksichtigt, da das Verhältnis von $\frac{f_E}{f_S}$ bei 50 km/h 1,04 beträgt und nur bei der A-Bewertung einen Einfluss besitzt. Der größte Einfluss liegt bei der unteren Grenzfrequenz bei 80 Hz, da die Pegeldämpfung durch die A-Bewertung schneller größer wird, als der Frequenzunterschied durch den Dopplereffekt. Dadurch ergibt sich ein maximaler Pegelunterschied von 0,5 dB(A) bei einer Frequenz von 80 Hz.

In Bild 49 ist die grafische Oberfläche des Entwicklungswerkzeuges dargestellt, welche in fünf Bereiche und dem „START“-Button zum Starten der Routine unterteilt ist und im Folgenden erläutert wird.

²⁵⁷ LMS International 2012

²⁵⁸ Bruel & Kjaer 2012

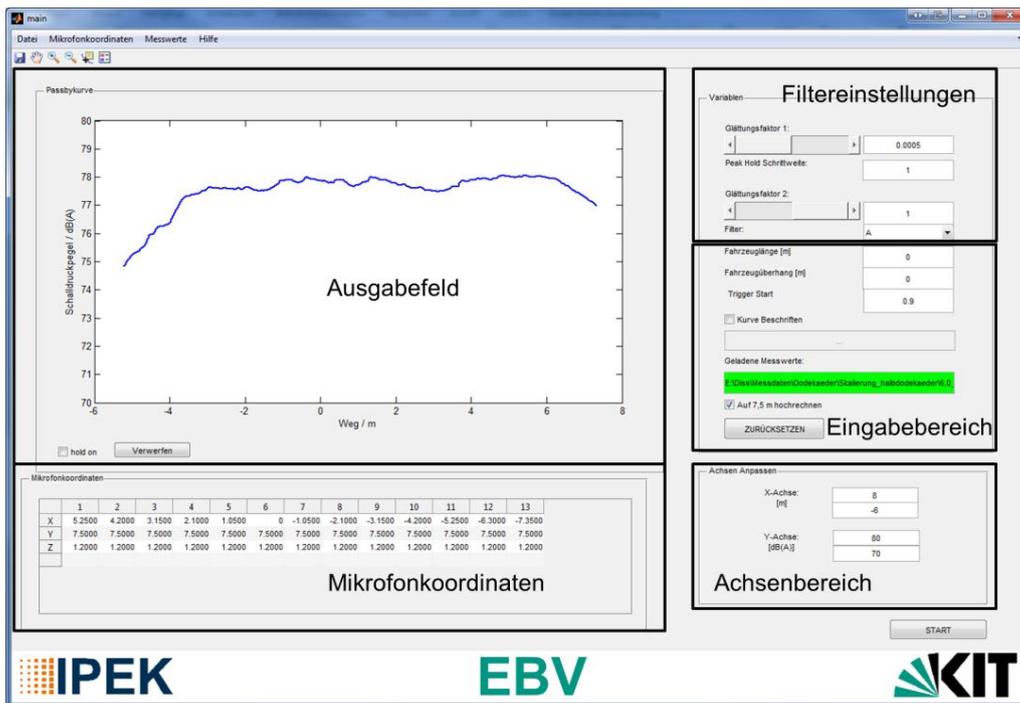


Bild 49: Aufbau der grafischen Benutzeroberfläche des EBVs

9.1 Mikrofonkoordinaten

Für eine variable Positionierung der Mikrofone kann für jedes Mikrofon die X-, Y-, und Z- Raumcoordinate angegeben werden. Ausgehend von der Punktschallquelle ändert sich bei einer Abstandsänderung des Mikrofons zur Schallquelle auch die Mikrofonhöhe nach dem Strahlensatz. Der Ursprung wird in das akustische Zentrum gelegt. Anhand dieser Koordinaten können die Schalldrücke auf den Norm-Abstand von 7,5 m skaliert werden. Die Mikrofonpositionen werden ebenfalls auf den Normabstand hochgerechnet. Somit können anhand frei wählbarer Mikrofonpositionen, wie z.B. in einer Reihe oder auch um die Ecke, die Schalldrücke und virtuellen Positionen auf die Normabstände skaliert werden²⁵⁹. Jedes Mikrofonsignal mit einem kleineren Mikrofonabstand als 7,5 m kann entsprechend der Freifeldausbreitung auf den Normabstand umgerechnet werden. Damit unterstützt das Werkzeug den Ingenieur im Fahrzeugentwicklungsprozess bei der Individualisierung der Messung in kleinen Hallen.

9.2 Eingabebereich

In dem Feld „Eingabebereich“ lassen sich alle für die Berechnung notwendigen Fahrzeugparameter einstellen und die Daten auswählen. Die zu berechnenden Messdaten werden im *.mat-Format geladen. In dieser Datei sind alle Daten über

²⁵⁹ Maier et al. 2011

den auszuwertenden Messlauf enthalten, wie Fahrgeschwindigkeit, Trigger (oder Gaspedalstellung) und die Messdaten der einzelnen Mikrofone.

Im Eingabefenster „Trigger Start“ kann der Schwellwert für das Triggersignal festgelegt werden. Da die Messung z.B. über einen manuellen Trigger oder direkt über die Gaspedalstellung gestartet werden kann, ist somit die Amplitude des Triggersignals frei wählbar.

Im Eingabebereich werden zusätzlich die Fahrzeuglänge und der Fahrzeugüberhang definiert. Diese Werte sind notwendig für die Auswertung.

- Fahrzeuglänge:

Die Fahrzeuglänge bestimmt das Ende der Messstrecke. Nach Kapitel 2.5 werden als Messstrecke 20 m betrachtet. Die Messung beginnt bei Überschreiten der virtuellen -10 m mit der Fahrzeugfront und endet nach Passieren des Fahrzeughecks der virtuellen +10 m Marke. Dadurch wird die virtuelle Strecke um genau die Fahrzeuglänge verlängert. Anhand des Strahlensatzes wird somit das letzte Mikrofon auf die Endposition hochgerechnet.

- Fahrzeugüberhang:

Die Berechnung des Schalldruckpegels beruht auf der Freifeldbedingung und der Annahme, dass sich das Fahrzeug wie eine Punktschallquelle verhält (vgl. Kapitel 2.4.2). Die Punktschallquelle wird im akustischen Zentrum des Fahrzeuges, welches auf der Fahrzeugmittellinie liegt (Y-Koordinate = 0) angenommen (vgl. Bild 25). Der Abstand zwischen Fahrzeugfront und der virtuellen Punktschallquelle in X-Richtung wird als Fahrzeugüberhang definiert. Diese Größe ist notwendig für die Start- und Endbedingung der Messung (vgl. Bild 43).

Mit der Checkbox „auf 7,5 m hochrechnen“ kann die Verrechnung der Messdaten definiert werden. Wird diese aktiviert, so werden die Messdaten jedes einzelnen Mikrofons über den Strahlensatz auf die virtuelle Normposition von 7,5 m in Abhängigkeit von der Mikrofonkoordinate hochgerechnet. Bei Deaktivierung kann der Schalldruckpegelverlauf für die aktuelle Mikrofonposition errechnet werden. Diese Funktion ist nur dann sinnvoll anwendbar, wenn alle Mikrofone die gleiche Y-Koordinate besitzen. So können die realen Messdaten ohne die geometrische Streckung dargestellt werden.

9.3 Filtereinstellungen

Im Fenster „Filtereinstellungen“ können Filter für die Rohdatenfilterung parametrisiert werden. Dazu stehen drei Filteroptionen zur Verfügung, die entweder einzeln oder kombiniert angewendet werden können.

- A-Bewertung:

Das Ergebnis der Vorbeifahrtsmessung ist der A-bewertete Schalldruckpegel (vgl. Kapitel 2.5.6). Dazu wird ein Mikrofon verwendet und der gemessene Schalldruck als A-bewerteter Schalldruckpegel dargestellt. Bei der simulierten Vorbeifahrt werden daher alle Mikrofonrohdaten vor der Berechnung der Vorbeifahrtskurve A-bewertet. Zwar haben die Datenlogger performante Hardware-A-Decoder²⁶⁰, die genutzt werden können, allerdings stehen danach die Messdaten nicht mehr als unbewertete Rohdaten zur Verfügung. Daher wird diese Bewertung über einen Softwarefilter vorgenommen.

- Glättung:

Da die Messdaten sehr starkes Rauschen und Schwankungen aufweisen können, werden die Daten zur Berechnung geglättet. Dazu wird ein rekursiver Exponentialfilter nach Gl. 35 implementiert²⁶¹. Dieser Filter berechnet einen gewichteten, gleitenden Mittelwert aus der Kenntnis des vorherigen Wertes und des gemessenen Wertes in Abhängigkeit vom Glättungsfaktors β . Durch die Filterung gehen allerdings Informationen über sehr kurzzeitige Ereignisse verloren. Für die simulierte Vorbeifahrt spielt dieser Verlust allerdings keine Rolle, da bei der Messung keine sprunghaften Ereignisse auftreten und die Versuchsdauer im Vergleich zur Abtastrate sehr viel größer ist.

$$p_n = \sqrt{(1 - \beta)\hat{p}_n^2 + \beta \cdot p_{n-1}^2} \quad \text{Gl. 35}$$

- Peak-hold

Für die Veranschaulichung der Daten wird die Datenmenge mit dem Peak-hold Verfahren reduziert. Die Peak-hold Funktion reduziert die Auflösung der Abszisse. Dabei werden die Zeitwerte in einem Zeitintervall immer auf den maximalen Wert gesetzt²⁶².

²⁶⁰ LMS International 2012a

²⁶¹ Maier 2011

²⁶² LMS International 2012b

9.4 Achsenbereich und Ausgabefeld

Im Ausgabefeld wird der nach Kapitel 2.6.1.4 berechnete und bewertete Schalldruckpegel über der Messstrecke dargestellt. Über das Feld „Achsenbereiche“ kann der dargestellte Wertebereich des Ausgabefeldes angepasst werden. Zudem besteht noch die Möglichkeit über das „hold on“ Kontrollkästchen bzw. über den Button „Verwerfen“ die vorherigen Daten im Ausgabefeld zu behalten bzw. zu verwerfen. Dadurch können mehrere Datensätze gleichzeitig angezeigt und besser miteinander verglichen werden.

9.5 Validierung des Werkzeuges

Für die Validierung des EBVs, insbesondere die Funktionalität des Algorithmus, werden exemplarisch zwei verschiedene Durchläufe gegenübergestellt. In Bild 50 sind die ausgewerteten Messdaten zweier Messungen gegenübergestellt. Bei den Kurven mit der Bezeichnung „Software“ handelt es sich um die Auswertung der Messdaten mit einer kommerziellen Software. Die Kurven mit der Beschriftung „EBV“ hingegen sind die ausgewerteten Ergebnisse mit dem dargestellten Entwicklungswerkzeug zur Berechnung der simulierten Vorbeifahrt.

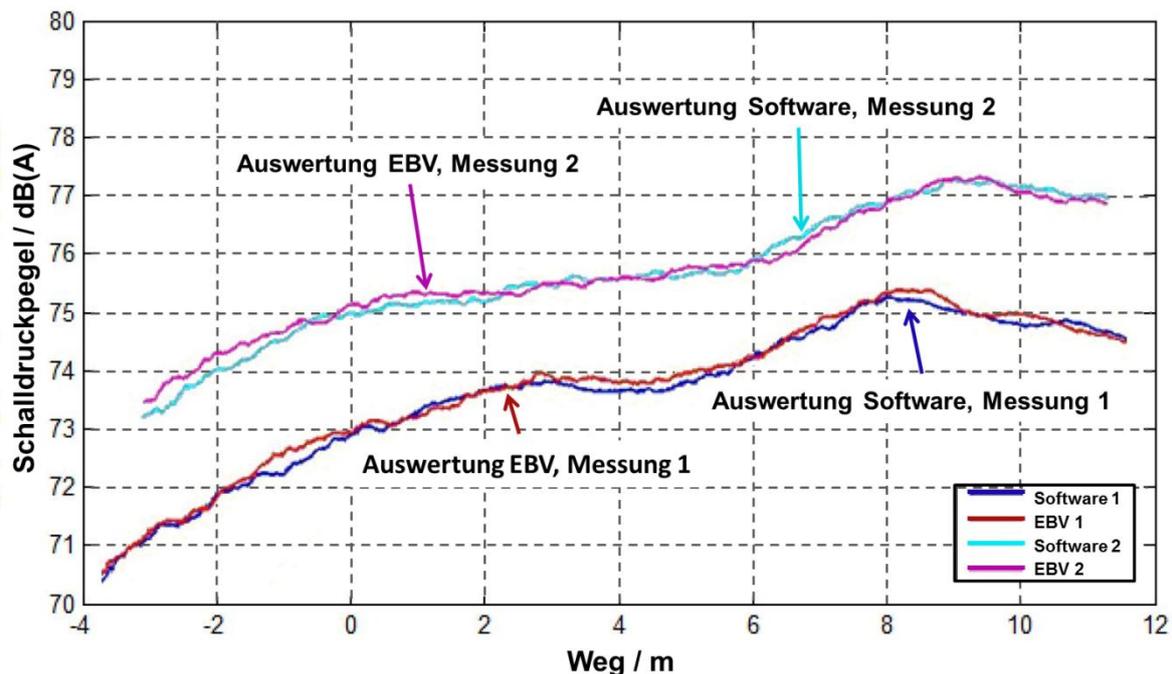


Bild 50: Vergleich zwischen kommerzieller Software und EBV

Dabei kann eine sehr gute Übereinstimmung mit einem maximalen Fehler von 0,5 % festgestellt werden. Das entwickelte Werkzeug liefert in sehr guter Annäherung die gleichen Ergebnisse, wie eine kommerzielle Software und ist damit für die weitere Auswertung geeignet. Für die Validierung der simulierten Vorbeifahrt auf dem Prüfstand muss eigentlich der Abgleich zwischen Straße und Prüfstand erfolgen. Wie

auch schon vorher angemerkt, wird der Unterschied im maximalen Pegel durch die Reifengeräusche hervorgerufen. Dieser Effekt muss in weiteren Forschungsarbeiten untersucht werden. Für diese Arbeit mit dem Fokus auf der Skalierung und der Übertragbarkeit von große in kleine Hallen, dient der Abgleich zur der Plausibilitätserklärung des implementierten Algorithmus und zur Validierung des Werkzeuges.

10 Untersuchung der Annahmen der Methode

Die Skalierung des Messverfahrens mittels eines Linienarrays beruht im wesentlichen auf der Vergrößerung der Messstrecke durch Reduzierung des Messabstandes zwischen Fahrzeug und Array. In Kapitel 8 wurde gezeigt, dass die Reduzierung des Abstandes zu unterschiedlichen Ergebnissen, sowohl in der Amplitude, als auch in der Position des Maximums, führt. Der Methode liegen im Wesentlichen folgenden Annahmen zu Grunde:

1. Die Messung erfolgt im Fernfeld.
2. Die Messumgebung ist ein Freifeld.
3. Das Messobjekt ist eine Punktschallquelle auf dem Boden.
4. Das akustische Zentrum befindet sich im Motormittelpunkt auf Bodenhöhe.

Obwohl alle Bedingungen nach Angaben der Literatur eingehalten wurden, entstehen zwei charakteristische Effekte. Zum einen steigt der Schalldruckpegel mit der Reduzierung des Abstandes zwischen Array und Fahrzeug, zum anderen verschiebt sich die Position des Pegelmaximums. Um die Ursache dieser Abweichungen zu identifizieren, werden in der Situationsanalyse in diesem Kapitel die gemessenen Daten detailliert untersucht.

Die Analyse befasst sich mit der genauen Untersuchung der einzelnen Messsignale der Mikrofone, um sicherzustellen, dass die auftretenden Effekte nicht aus Interferenzen etc. resultieren. Hierfür werden die Signale der Mikrofone an der Position $x = 0$ m nach Bild 44 untersucht. Dieses Kapitel stellt die erste Situationsanalyse da, um eine Richtung für das weitere Vorgehen zu ermitteln.

10.1 Spektralanalyse

In Bild 51 sind die spektralen Verteilungen der A-bewerteten Schalldrücke des Mikrofons an der Wegkoordinate 0 m auf einer Messlinie im Abstand von 4,5 m, 6,0 m und 7,5 m bei einer Konstantfahrt im 3. Gang, dargestellt. Die gezeigten Rohdaten werden dabei nicht skaliert, da das Augenmerk lediglich auf der Frequenzverteilung liegt und nicht auf den maximalen Amplituden.

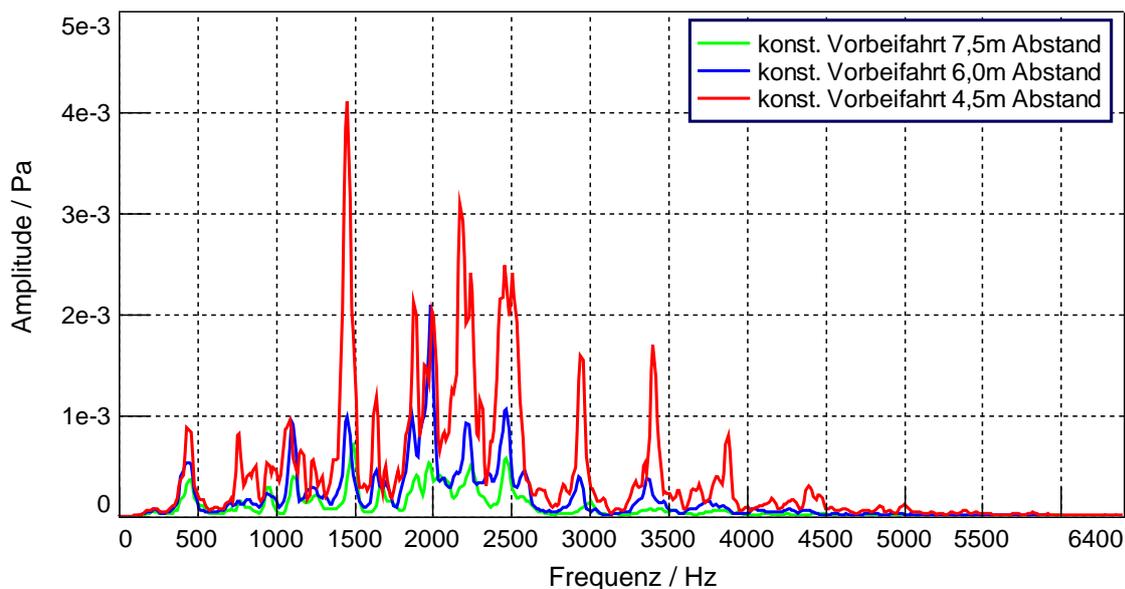


Bild 51: Spektrale Darstellung mit 4,5 m, 6,0 m und 7,5 m Abstand bei der konstanten Vorbeifahrt

Wie zu erwarten, sind die Amplituden für das Mikrofon mit dem kleinerem Abstand zur Mittellinie höher, als die des Mikrofons mit dem größerem Abstand. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Spektren und die Extrema sehr ähnlich sind, allerdings einige Amplituden überproportional und nicht gleichmäßig ausgeprägt sind. Zudem ist ersichtlich, dass die ausgeprägten Spitzenwerte bei allen Messungen bei der gleichen Frequenz vorkommen.

In Bild 52 sind analog die Spektren der Messwerte des gleichen Mikrofons bei der beschleunigten Vorbeifahrt dargestellt.

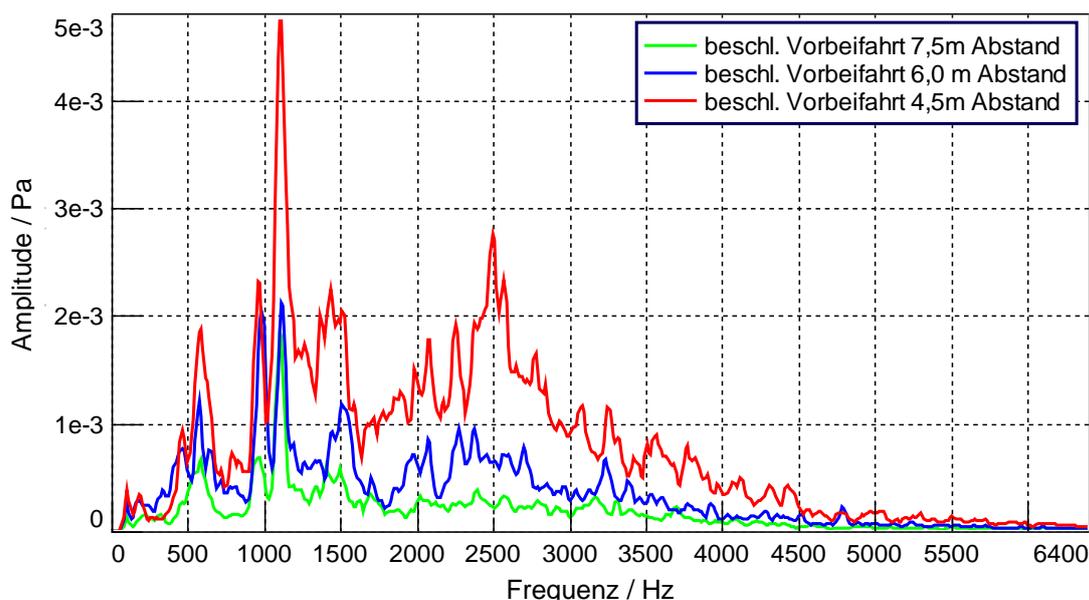


Bild 52: Spektrale Darstellung mit 4,5 m, 6 m und 7,5 m Abstand bei der beschleunigten Vorbeifahrt

Auch hier ist zu erkennen, dass die Messwerte mit dem kleineren Abstand zum Fahrzeug deutlich größere Amplituden liefern. Die Amplituden sind durch die Vollastbeschleunigung größer als bei der Konstantfahrt, jedoch sind auch hier keine Auffälligkeiten einzelner Frequenzverschiebungen vorhanden.

Für die weitere Betrachtung signifikanter Frequenzanteile liefert die breitbandige Terzanalyse einen besseren Einblick. In Bild 53 sind jeweils die Terzspektren der mittleren Mikrofone bei verschiedenen Abständen für die simulierte Vorbeifahrt dargestellt.

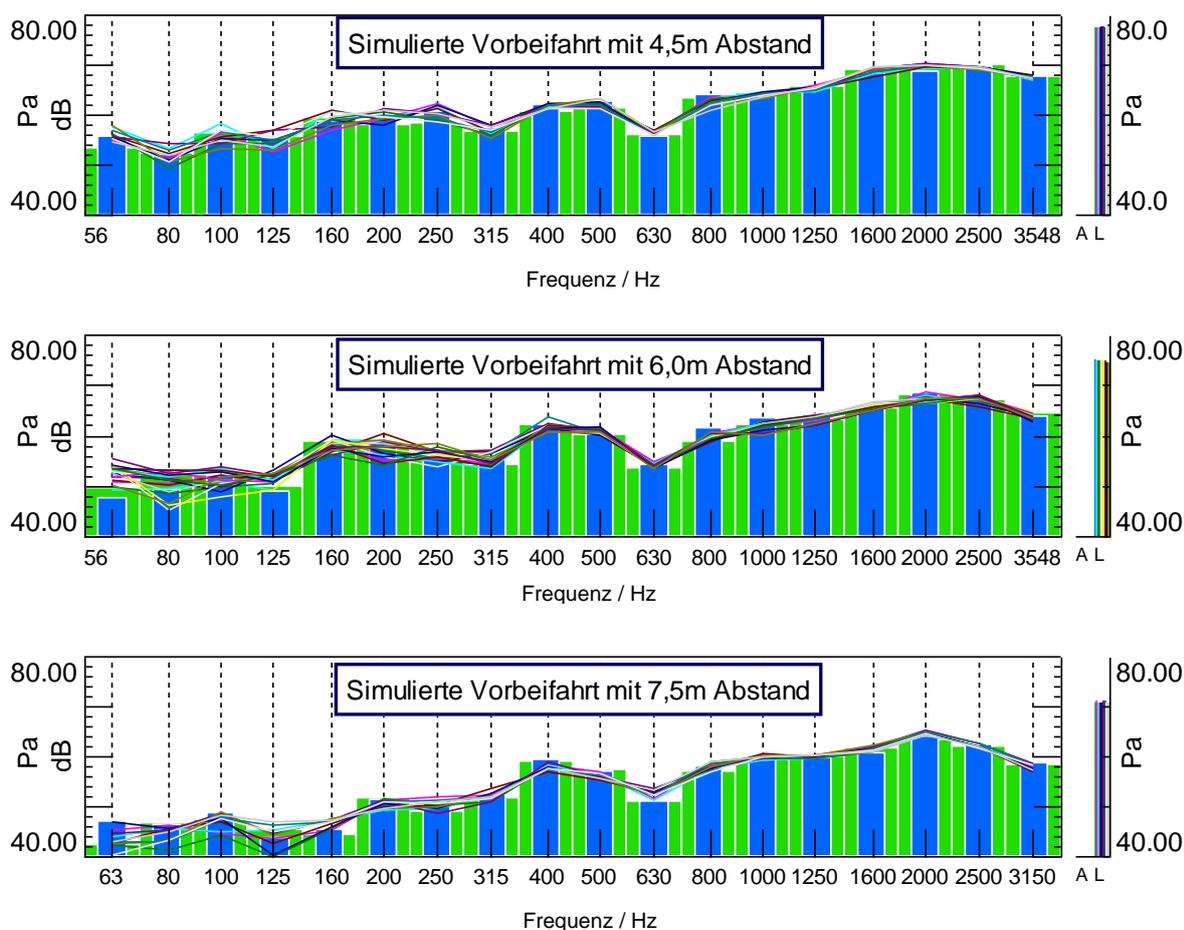


Bild 53: Terzspektren der simulierten Vorbeifahrt mit unterschiedlichem Abstand

Auffällig dabei ist, dass die hohen Frequenzen eine recht gute Übereinstimmung in den drei Messungen zeigen, hingegen die tiefen Frequenzen bei kleinerem Abstand deutlich zunehmen. Alle Messungen haben ein Minimum bei 630 Hz und ein lokales Maximum bei 400 Hz und 2 kHz. Zudem ist ersichtlich, dass der Pegel zu höheren Frequenzen zunimmt.

Der spektrale Vergleich der drei Messungen mit unterschiedlichen Abständen zeigt, dass sowohl bei der Konstantfahrt als auch bei der beschleunigten Vorbeifahrt sich die Amplituden stark unterscheiden. Das Terzspektrum zeigt, dass die tiefen Frequenzen mit kleiner werdendem Mikrofonabstand überproportional zunehmen.

10.2 Pegeldämpfung

Im vorherigen Kapitel wurde gezeigt, dass die spektrale Verteilung in der schmalbandigen FFT sich nicht nur in den Amplituden unterscheidet, sondern auch in der Terzanalyse in den niedrigen Frequenzbändern. Für die Skalierung der Mikrofone wird die Annahme getroffen, dass der Schalldruckpegel der Gesetzmäßigkeit des Freifeldes, ausgehend von einer Punktschallquelle unterliegt und die Pegel nach Gl. 18 logarithmisch zum Quotient der Abstände gedämpft werden.

Um diese Pegeldämpfung zu quantifizieren, wird am gleichen Mikrofon bei $x = 0$ (vgl. Bild 44) die Pegeldämpfung der Schallausbreitung bezogen auf den Abstand zur Fahrzeugmitte untersucht. Um Fehler von transienten Vorgängen zu vermeiden, werden als Berechnungsgrundlage die Messdaten der konstanten Vorbeifahrt herangezogen. Der Schalldruckpegel des Mikrofons wird über die Messzeit gemittelt, um Messfehler zu kompensieren.

In Tabelle 2 sind jeweils der theoretisch und der experimentell ermittelte Wert der Pegeldämpfung für die Abstandsänderungen angegeben. Dabei wird die Dämpfung für die Änderungen von 6,0 m auf 7,5 m, von 4,5 m auf 6,0 m und von 4,5 m auf 7,5 m und das Delta zwischen dem theoretischen und experimentellen Werten bestimmt.

Abstandsänderung (von → auf)	Theoretisch	Gemessen	Delta (theoretisch - gemessen)	Abweichung in %
6,0 m → 7,5 m	-1,94 dB	- 3,46 dB	1,52 dB	78 %
4,5 m → 6,0 m	-2,50 dB	- 3,30 dB	0,80 dB	32 %
4,5 m → 7,5 m	-4,44 dB	- 6,76 dB	2,32 dB	52 %

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Pegeldämpfung

Aus Tabelle 2 wird ersichtlich, dass die gemessene Pegeldämpfung nicht der theoretischen Dämpfung entspricht (vgl. 2.3.9). Je nach Abstand entstehen Abweichungen zwischen 0,80 dB und 2,32 dB. Die Dämpfung wird durch den Quotienten der absoluten Abstände berechnet. Daher liefern gleiche Abstandsänderungen, wie von 6,0 m auf 7,5 m und 4,5 m auf 6,0 m unterschiedliche Ergebnisse.

10.3 Zusammenfassung

Für die Signalanalyse wird das nicht skalierte Mikrofonsignal an der Stelle $x = 0$ bei den Abständen 7,5 m, 6,0 m und 4,5 m gegenübergestellt. Dabei kann in der schmalbandigen Analyse mittels FFT festgestellt werden, dass zwar die Amplituden

unterschiedlich groß sind, jedoch im Vergleich zwischen den Abständen keine auffälligen Frequenzverschiebungen auftreten. Somit können Interferenzeinflüsse ausgeschlossen werden. Zudem wird bei der Vorbeifahrtmessung der Schalldruckpegel über das gesamte A-bewertete Spektrum ausgewertet. Einzelne Frequenzänderungen durch Interferenzen spielen daher eine untergeordnete Rolle. In der breitbandigen Terzanalyse hingegen ist zu erkennen, dass zwar die Extremwerte im gleichen Frequenzband liegen, allerdings die tieferen Frequenzanteile bei kleinerem Abstand zunehmen.

Bei der Betrachtung der Pegeldämpfung ist auffällig, dass die experimentelle Untersuchung gegenüber dem theoretischen Abstandsgesetz der Schallausbreitung bei der Skalierung ein großes Delta aufweist. Dies hat zur Folge, dass die Schalldruckpegel bei der Umrechnung falsch wiedergegeben werden.

Zusammenfassend kann gezeigt werden, dass bei Messungen am realen Fahrzeug die Pegeldämpfung nicht dem Gesetz der Freifeldausbreitung einer Punktschallquelle unterliegt. Dies kann entweder daran liegen, dass die Freifeldbedingung in der Akustikhalle oder die Fernfeldbedingung des Fahrzeuges nicht eingehalten werden. Zudem wird die Annahme getroffen, dass das Fahrzeug ab einem gewissen Abstand als Punktschallquelle betrachtet wird, was möglicherweise Auswirkungen auf die Pegeldämpfung hat. Der wichtigste Punkt ist jedoch die Annahme, dass sich die Punktschallquelle auf dem Boden befindet und damit die Schallausbreitung reflexions- und interferenzfrei ist.

Die Signalanalyse zeigt deutliche Abweichungen in der Pegeldämpfung, allerdings können noch keine konkreten Ursachen oder Ergebnisse abgeleitet werden. Für die Problemeingrenzung müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Dazu werden im Folgenden Messungen mit künstlichen Schallquellen durchgeführt, um die verschiedenen Annahmen aus dem Stand der Forschung zu verifizieren oder zu falsifizieren und festzustellen woher die abweichende Pegeldämpfung resultiert und welche Maßnahmen daraus abzuleiten sind.

11 Messung mit künstlicher Schallquelle

Für die Problemeingrenzung der in Kapitel 8 identifizierten Abweichung werden im Folgenden Untersuchungen mit generischen Schallquellen durchgeführt. Für die Skalierung des Messverfahrens werden die in Kapitel 10 genannten Annahmen getroffen. Um zu identifizieren, welche Annahmen welchen Einfluss auf das Ergebnis haben, wird das System Fahrzeug, also die UUT auf dem Vehicle-in-the-Loop Layer, mit einer generischen Schallquelle als Punktschallquelle simuliert. Diese wird dabei mittig im Koordinatenursprung auf dem Prüfstand platziert.

11.1 Messaufbau für die Messung mit künstlicher Schallquelle

Für die Simulation des Fahrzeuges als Punktschallquelle wird zum einen ein Halbdodekaeder (Bild 54 links) und zum anderen ein Volldodekaeder (Bild 54 rechts), wie in Kapitel 2.3.7.1 beschrieben, in der Mitte des Prüfstands platziert. Das Mikrofonarray wird bei diesen Messungen wiederum in den Abständen 7,5 m, 6,0 m und 4,5 m platziert mit der entsprechenden Höhenkorrektur nach Gl. 34, wie exemplarisch der Aufbau in Bild 54 rechts bei 7,5 m dargestellt. Die Quelle befindet sich dabei im Koordinatenursprung.



Bild 54: Messaufbau mit Halbdodekaeder(links), Volldodekaeder (mitte) und Mikrofonarray mit 7,5 m Abstand (rechts)

Der Abstand zwischen den Mikrofonen ist dabei so gewählt, dass die Mikrofone jeweils auf einer Linie zur Kugelquelle liegen, wie in Bild 55 dargestellt. Wird davon ausgegangen, dass der (Halb)Dodekaeder eine annähernd ideale Kugelwelle abstrahlt, so misst jedes Mikrofon den gleichen Richtungsanteil der Schallquelle. Das Verhältnis der jeweiligen Mikrofonkoordinaten ist dabei nach Gl. 36 konstant gewählt:

$$\frac{x_n}{x_{n+1}} = \frac{y_n}{y_{n+1}} = \frac{z_n}{z_{n+1}} = \text{const} \quad \text{Gl. 36}$$

Da die Pegeldämpfung nach Gl. 18 nur vom Quotient der Abstände abhängig ist, entsteht durch den fächerartigen Aufbau ein konstantes Verhältnis der Strecken und damit der Pegeldämpfung nach Gl. 37 wie folgt:

$$\frac{r_n}{r_{n+1}} = \frac{\sqrt{x_n^2 + y_n^2 + z_n^2}}{\sqrt{x_{n+1}^2 + y_{n+1}^2 + z_{n+1}^2}} = \text{const} \quad \text{Gl. 37}$$

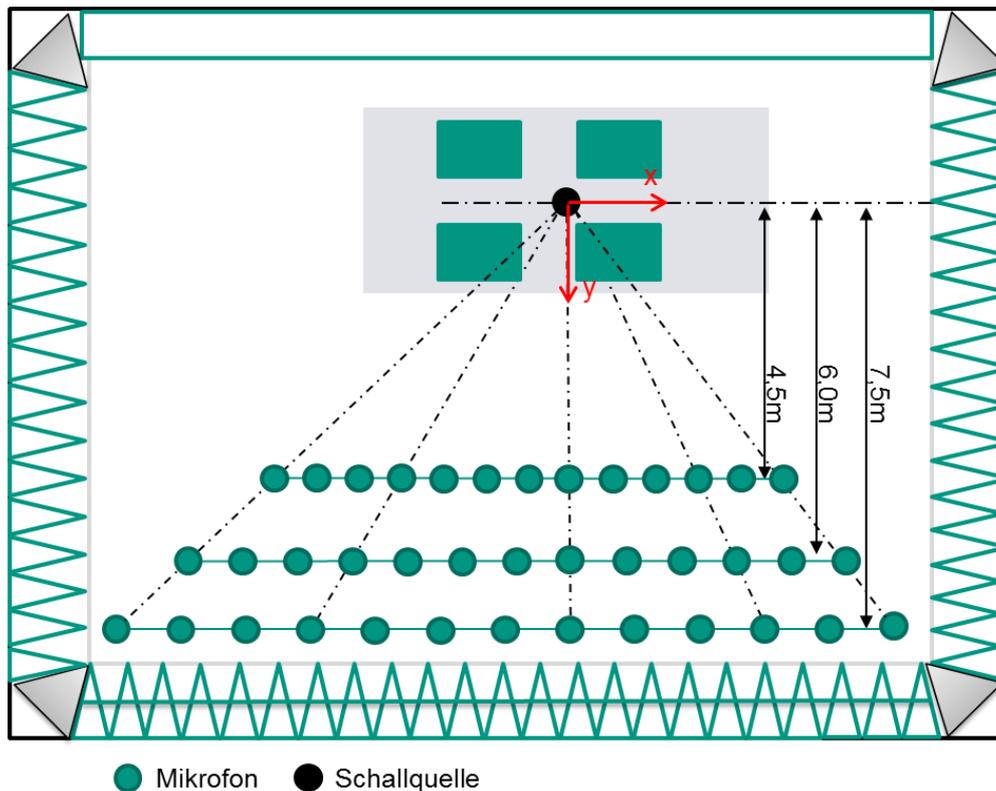


Bild 55: Aufbau der Mikrofone mit künstlicher Schallquelle

Für die Beurteilung der Streckenverlängerung werden zudem Messungen mit dem Aufbau nach Kapitel 8.2.2 durchgeführt.

11.2 Signalwiedergabe

Für die Versuchsdurchführung werden zwei unterschiedliche Testsignale herangezogen:

- Weißes Rauschen als generisches Signal, mit einem möglichst konstanten Frequenzverlauf
- Fahrzeuggeräusch, welches zuvor in 7,5 m Abstand bei 50 km/h Konstantfahrt mit einem Freifeldmikrofon auf dem Prüfstand aufgenommen wurde.

Die akustischen Signale werden über eine externe Soundkarte ausgegeben, in einem entsprechenden Vorverstärker verstärkt und über den im Kapitel 6 beschriebenen Halb- bzw. Volldodekaeder wiedergegeben.

Da sämtliche Geräte in der Wiedergabekette einen nur annähernd konstanten Frequenzgang aufweisen, wird die Übertragungsfunktion zwischen dem abgespielten Testsignal und dem gemessenen Mikrofonsignal überprüft. In Bild 56 links ist die Übertragungsfunktion des Halbdodekaeders dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass der Frequenzgang in guter Annäherung einen linearen Verlauf zeigt, ohne dass dominante Resonanzen zu erkennen sind. Es sind lediglich zwei marginale Senken im Bereich von 1,4 kHz und 4 kHz vorhanden. Die Randfrequenzen im oberen und unteren Frequenzbereich werden sehr gut wieder gegeben.

Zur Plausibilitätsprüfung ist in Bild 56 rechts das Terzspektrum des aufgenommenen weißen Rauschens des mittleren Mikrofons bei einem Abstand von 7,5 m dargestellt. Es ist ebenfalls ein annähernd konstanter Verlauf zu erkennen. Es sind lediglich die gleichen Senken erkennbar. Aufgrund der Charakteristik des Halbdodekaeders treten keine Reflexionen und damit auch keine Interferenzen auf.

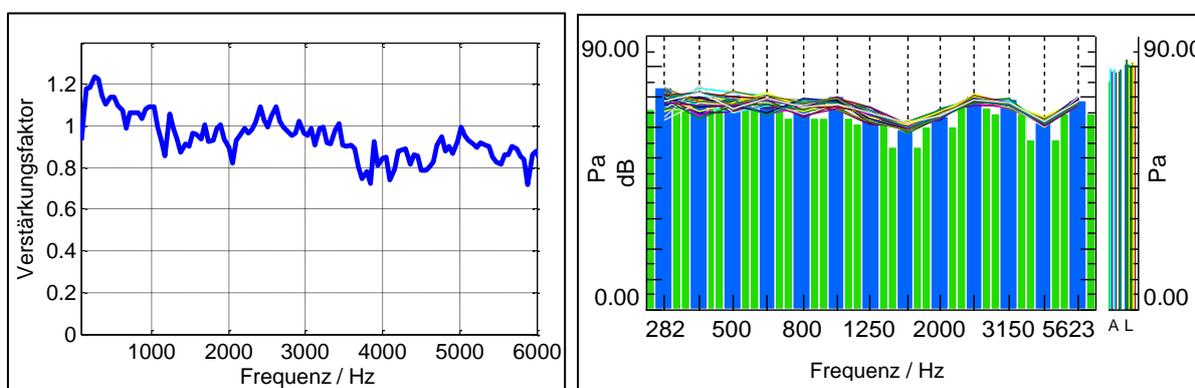


Bild 56: Übertragungsfunktion der Wiedergabekette des Halbdodekaeders (links);
Terzspektrum des weißen Rauschens (rechts)

Der maximale Schalldruckpegel kann bei den Messungen variieren. Dies liegt zum einen am Signal selbst und zum anderen daran, dass die beiden Schallquellen bei gleicher Eingangsleistung die Signale unterschiedlich wiedergeben. Daher werden in den folgenden Diagrammen für den relativen Vergleich die Ordinatenachsen immer in 1 dB(A) Schritte unterteilt. Für die Auswertung und die Schlussfolgerungen ist der Absolutwert irrelevant. Es wurde allerdings darauf geachtet, dass der Schalldruckpegel in einem repräsentativen Bereich von ca. 70 dB(A) liegt.

11.3 Halbdodekaeder

In diesem Abschnitt wird das Fahrzeug als Punktschallquelle auf Bodenhöhe mittels eines Halbdodekaeders (vgl. 6.2) simuliert. Da der Halbdodekaeder auf dem Boden eine elementare Halbkugelwelle abstrahlt, kann davon ausgegangen werden, dass das abgestrahlte Schallfeld den physikalischen Gesetzen des Freifeldes unterliegt (vgl. 2.3.9). Im Folgenden werden die Messergebnisse zuerst im ruhenden Fall betrachtet, d. h., die Punktschallquelle steht ortsfest und der Schalldruckpegel jedes

Mikrofons wird ausgewertet. Im zweiten Fall wird die Quelle als bewegt betrachtet, d. h., die Punktschallquelle wird als bewegte Schallquelle mittels des in Kapitel 8.4 beschriebenen Werkzeuges simuliert.

11.3.1 Pegeldämpfung

Für die Validierung der Freifeldbedingung und der freien Schallausbreitung werden von jedem Mikrofon die gemittelten Schalldruckpegel als skalare Größe ausgewertet. Anhand dieser Summenpegelwerte wird entsprechend des Abstandsgesetzes die Schalldämpfung zwischen jeweils dem n-ten Mikrofon bei unterschiedlichen Abständen ausgewertet²⁶³.

In Bild 57 bzw. Bild 58 ist jeweils die Pegeldämpfung über der Nummer des Mikrofons für das weiße Rauschen bzw. für das Fahrzeuggeräusch aufgetragen. Des Weiteren ist in gestrichelter Linie die jeweilige theoretische Pegeldämpfung für die Abstandsänderungen von 6,0 m auf 7,5 m, von 4,5 m auf 6,0 m und von 4,5 m auf 7,5 m dargestellt. Die Punktschallquelle ist im Bereich der vorderen Prüfstandsrollen und damit nicht mittig im Raum positioniert. Da das Array allerdings über die gesamte Hallenbreite aufgebaut ist, entspricht die Quellenposition nicht der Arraymitte und damit der Hallenmitte, sondern steht an der Position des Mikrofones mit der Nummer 0. Daher variiert die Anzahl der Mikrofone zwischen vorne und hinten (vgl. Kapitel 11.1). Für die Generalisierung spielt dies in sofern eine Rolle, dass durch die Position der Quelle und der Hallenlänge die Messstrecke nach vorne und hinten definiert ist (vgl. Kapitel 8.2.1).

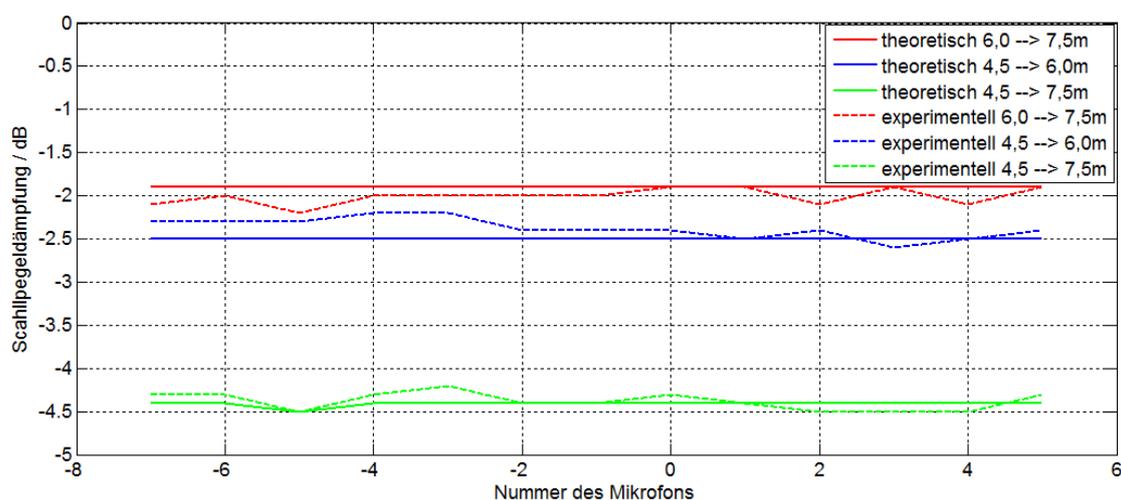


Bild 57: Pegeldämpfung der Mikrofonreihen mit weißem Rauschen

²⁶³ Thieltges et al. 2011

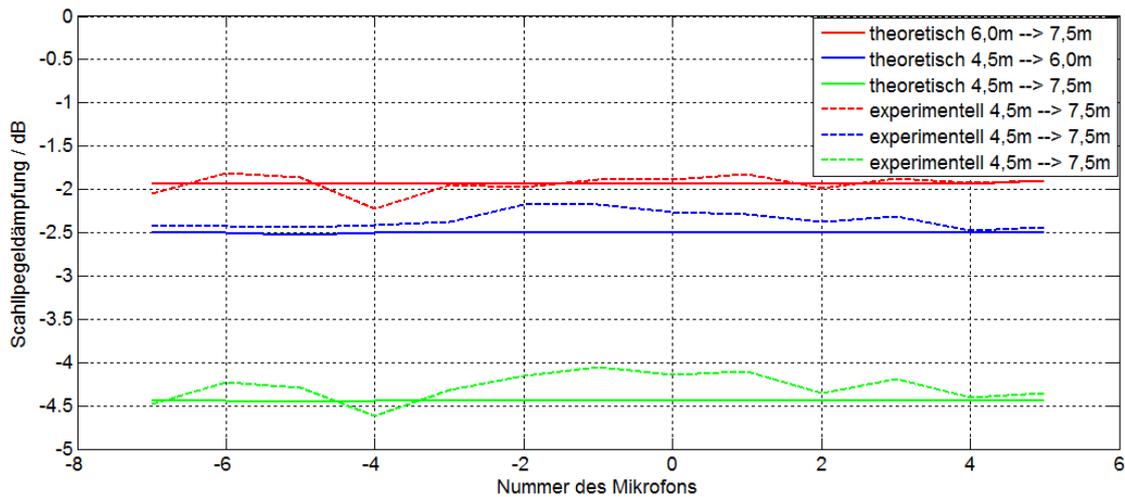


Bild 58: Pegeldämpfung der Mikrofonreihen mit Fahrzeuggeräusch

Aus der Auswertung der Pegeldämpfung ist erkennbar, dass sowohl für das weiße Rauschen als auch für das Fahrzeuggeräusch eine gute Übereinstimmung zwischen den theoretischen mit den gemessenen Schalldruckpegeln und der Pegeldämpfung vorliegt. Die Abweichungen sind kleiner 0,3 dB (entspricht 6 %) bei einem gemessenen Gesamtpegel von maximal 82 dB. Angemerkt sei an dieser Stelle, dass die Abstände aus den Koordinaten für jedes Mikrofon berechnet werden und zudem die Positionierung der Mikrofone ungenau ist. Da der Logarithmus für kleine Quotienten sehr sensitiv ist, kann bei der Auswertung schon für kleine Abweichungen ein relativ großer Fehler entstehen. Gegenüber den Messungen mit einem Fahrzeug (vgl. Kapitel 8) ist der Fehler deutlich kleiner.

Zusammenfassend kann gezeigt werden, dass die Freifeldbedingung in der Akustikhalle bei Verwendung einer Punktschallquelle auf dem Boden erfüllt ist, und die Schallausbreitung im betrachteten Frequenzbereich dem Abstandsgesetz folgt. Mit dieser Vorgehensweise, durch die Bestimmung der Pegelabnahme bei verschiedenen Abständen, kann in Akustikhallen untersucht werden, inwieweit die Freifeldbedingung gegeben ist. Diese Vorgehensweise ist angelehnt an das Verfahren zur allgemeinen Bestimmung zur Festlegung der Eignung von reflexionsarmen Räumen und Halbräumen im Anhang A der DIN EN ISO 3745²⁶⁴. Damit lassen sich alle Akustikhallen auf diese Eignung untersuchen.

11.3.2 Bewegte Quelle - konstante Vorbeifahrt

Betrachtet wird im Folgenden der bewegte Fall. Dazu wird die Punktschallquelle als bewegt simuliert und die konstante Vorbeifahrt mittels des in Kapitel 8.4 beschriebenen Werkzeuges simuliert.

²⁶⁴ DIN EN ISO 3745:2009

In Bild 59 und Bild 60 wird der Halbdodekaeder als konstant bewegt angenommen und die simulierte Vorbeifahrt bei einer konstanten Geschwindigkeit bei 50 km/h mit weißem Rauschen bzw. mit dem Fahrzeuggeräusch und bei den unterschiedlichen Abständen ausgewertet.

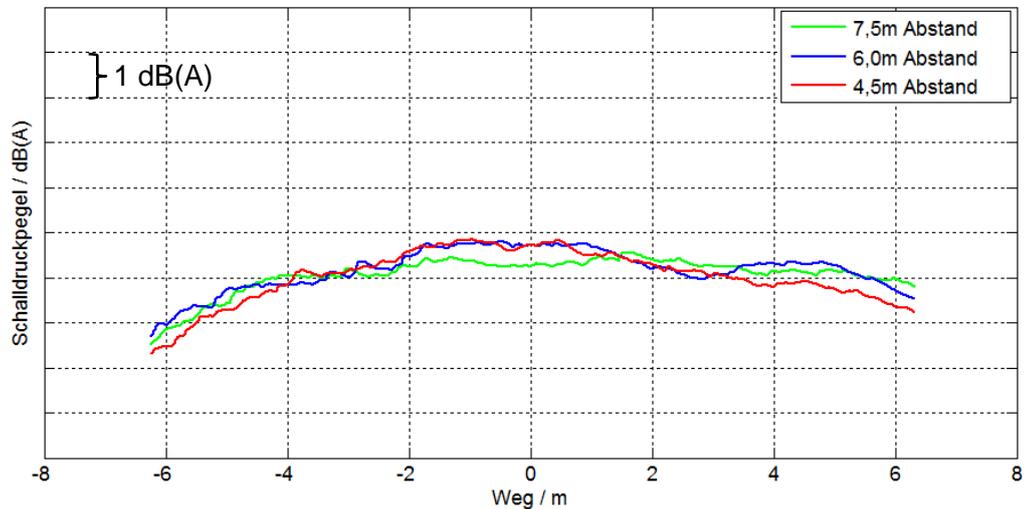


Bild 59: Simulierte Vorbeifahrt mit weißem Rauschen

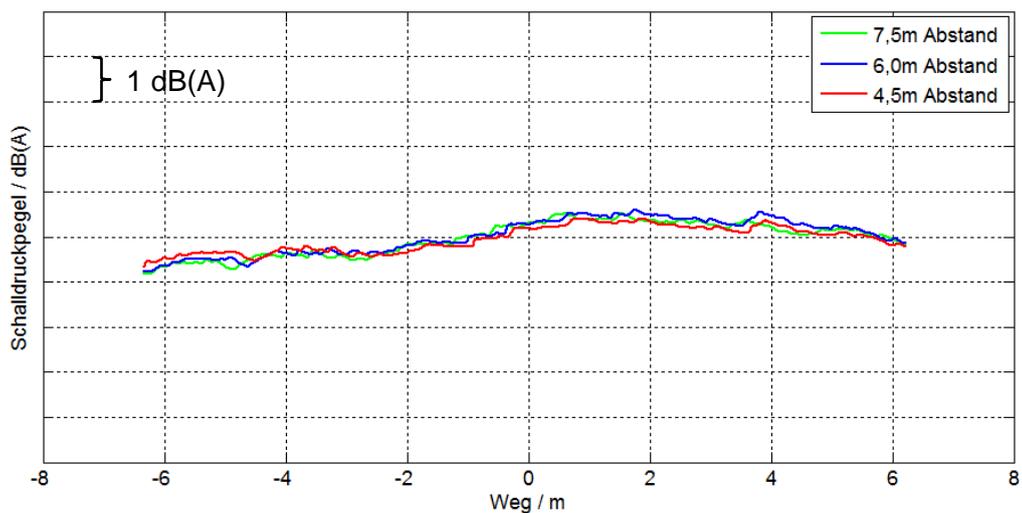


Bild 60: Simulierte Vorbeifahrt mit Fahrzeuggeräusch

Wie der Vergleich zeigt, liefert auch die Simulation der vorbeifahrenden Punktschallquelle auf dem Boden eine gute Übereinstimmung für die Messungen in den verschiedenen Abständen. Sowohl der maximale Schalldruckpegel als auch die Position des Maximums stimmen überein. Die maximale Abweichung bei der Versuchsdurchführung mit weißem Rauschen ist kleiner als 0,5 dB(A), was einem Fehler von 0,7 % entspricht. Bei den Messungen mit realem Fahrzeuggeräusch ist die Abweichung kleiner als 0,2 dB(A), was einem Fehler von 0,3 % entspricht.

Auffällig ist, dass die Kurven mit weißem Rauschen leicht unterschiedlich verlaufen, hingegen die Kurven mit einem realen Fahrzeuggeräusch den gleichen Verlauf

aufweisen. Dies ist auf die Eigenschaften der Testsignale zurückzuführen. Das weiße Rauschen ist wie in Kapitel 2.3.5 beschrieben, ein generisches statistisches Signal. Der Frequenzgenerator generiert dabei ein statistisches Signal, ohne die Kenntnis des vorherigen oder nachfolgenden Signals in einem Zeitintervall. Dadurch beginnt jede Messung zu einem undefinierten Zeitintervall, in welchem der Frequenzinhalt variieren kann. Für die Deckungsgleichheit der Kurven wäre somit eine zeitliche Mittelung über mehrere Zeitintervalle notwendig oder die Wiedergabe eines bereits aufgenommenen Signals. Die Kurven des realen Fahrzeuggeräusches sind hingegen deckungsgleich. Dies kommt dadurch zustande, dass das aufgezeichnete Fahrzeuggeräusch bei jeder Messung erneut wiedergegeben wird. Somit ist die zeitliche Amplituden- und Frequenzverteilung bei jeder Messung konstant. Daher ist es ausreichend bzw. sogar sinnvoll für die weiteren Untersuchungen das aufgenommene Fahrzeuggeräusch, auf Grund der bessern Reproduzierbarkeit und der bekannten Zeit- und Frequenzverteilung, als Testsignal zu verwenden.

11.3.3 Streckenverlängerung mit dem Halbdodekaeder

In Bild 61 sind die skalierten Messergebnisse mittels Halbdodekaeder mit dem Mikrofonaufbau nach Kap 8.2.2 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die simulierte Messstrecke durch die Verschiebung des Arrays in Richtung des Fahrzeuges deutlich vergrößert werden kann. Sowohl die maximalen Schalldruckpegel als auch die Verläufe der Kurven zeigen eine sehr gute Übereinstimmung.

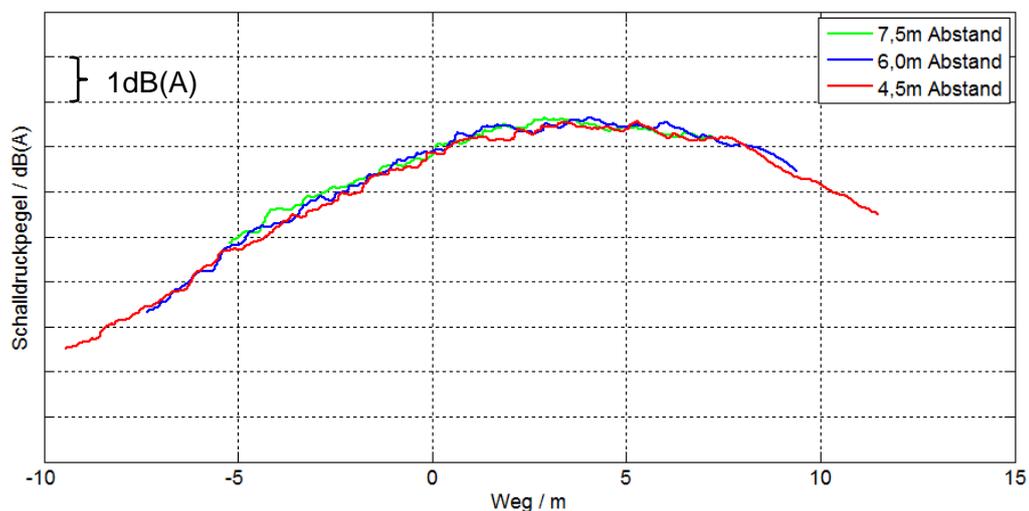


Bild 61: Skalierung mit dem Halbdodekaeder nach Kapitel 8.2.2

Das Maximum liegt bei ca. 4 m, was darauf zurückzuführen ist, dass der Mikrofonaufbau nicht symmetrisch ist, sondern der Halbdodekaeder außermittig von der Arraylänge steht und damit, ausgehend von der Quelle, das Array zu einer Seite

länger ist als zur anderen. Dies führt zu einer exzentrischen Projektion der Messdaten.

11.3.4 Verschiebung der Quelle

Im Gegensatz zu den vorherigen Messungen wird jetzt die Quelle mit dem Mikrofonaufbau nach Kapitel 8.2.2 aus dem Koordinatenursprung verschoben und die konstante Vorbeifahrt mit dem Halbdodekaeder simuliert. Wie in Bild 62 dargestellt, ist zu erkennen, dass die Kurven und vor allem die Maxima in eine Richtung verschoben werden, ähnlich dem Verhalten wie in Kapitel 8.3.3 beschrieben. D. h. je kleiner der Abstand zwischen Fahrzeugmittellinie und Mikrofonarray wird, desto stärker verschieben sich die Grafen und das Pegelmaximum bei außermittiger Positionierung.

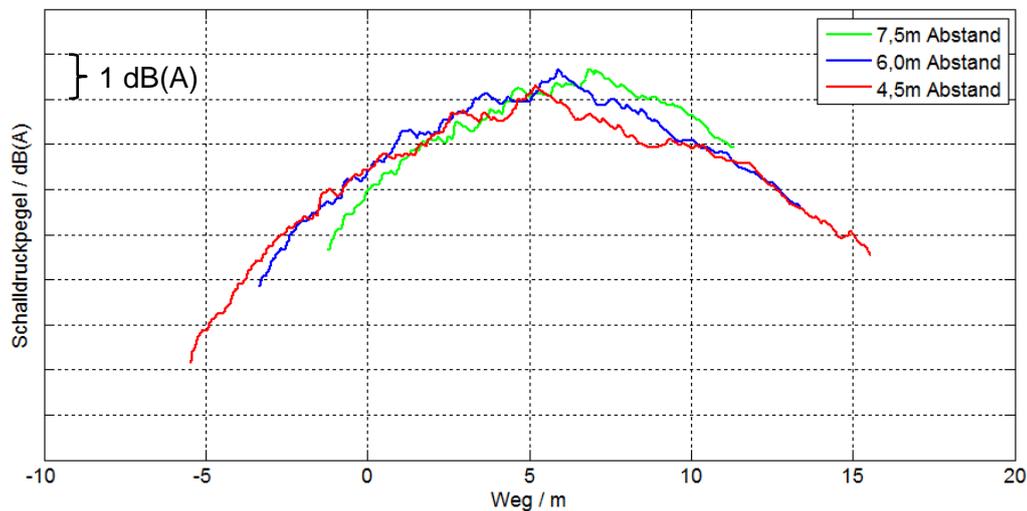


Bild 62: Messung mit Quelle außerhalb des Ursprungs

Dieses Phänomen entsteht durch die Verschiebung des akustischen Zentrums aus dem Koordinatenursprung und lässt sich anhand der geometrischen Beziehung erklären, wie in Bild 63 dargestellt.

Bei der Simulation wird eine Quelle betrachtet, die sich zum Zeitpunkt $t = 0 T$ an der Stelle $x = -10 m$ befindet. Zum Zeitpunkt $t = 0,5 T$ hat die Quelle den virtuellen Weg von $x = 0 m$ erreicht. Zu diesem Zeitpunkt werden die Daten des Mikrofons an der Stelle $x = 0 m$ für die Berechnung herangezogen. Ist die Quelle zu diesem Zeitpunkt am lautesten, so liegt das Maximum bei exakt $0 m$ (grüne Linie) für alle drei Abstände.

Nun wird die Quelle aus dem virtuellen akustischen Zentrum verschoben:

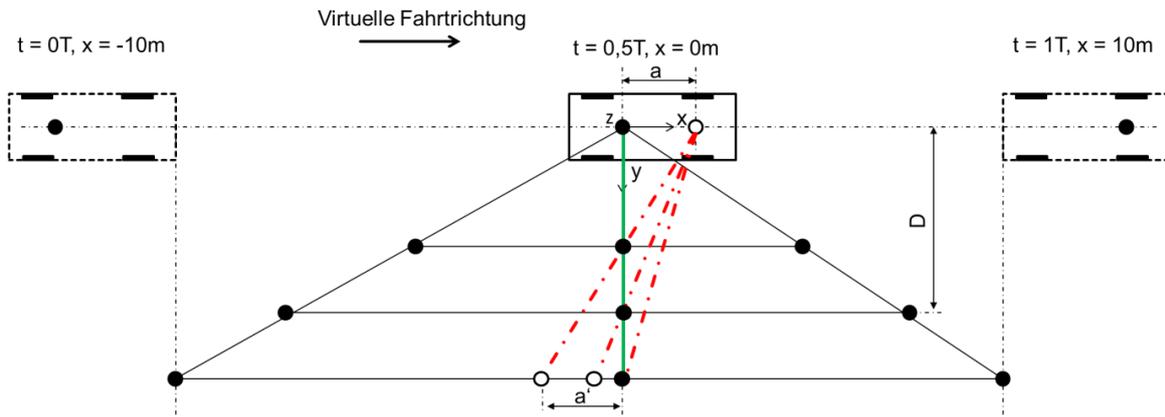


Bild 63: Simulierte Vorbeifahrt mit verschobenem akustischen Zentrum

Ist das Fahrzeug zum Zeitpunkt $t = 0,5 T$ wieder an der Stelle $x = 0 \text{ m}$, wird wiederum für die Berechnung des Mikrofonsignals an der Stelle $x = 0 \text{ m}$ herangezogen. Bedingt durch die Skalierung wird das Mikrofon nicht auf die Stelle $x = 0$ projiziert, sondern durch die Verschiebung der Quelle in eine Koordinatenrichtung. Je näher das Mikrofonarray an der Fahrzeugmittelachse ist und je weiter das virtuelle akustische Zentrum vom realen Zentrum abweicht, desto stärker verschiebt sich das Maximum. Liegt das reale akustische Zentrum hinter dem Virtuellen, verschiebt sich das Maximum bei der Skalierung in positive x -Richtung. Der Fehler lässt sich geometrisch bedingt nach Gl. 38 darstellen.

$$\frac{D}{7,5\text{m} - D} = \frac{a}{a'} \quad \text{Gl. 38}$$

11.3.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Die Simulation des Fahrzeuges als Punktschallquelle auf Bodenhöhe mittels eines Halbdodekaeders zeigt, dass sowohl für generische Signale als auch für ein reales Fahrzeuggeräusch die Pegeldämpfung in der Akustikhalle eine sehr gute Übereinstimmung mit der theoretischen Schallausbreitung liefert. Daraus folgt, dass auf Basis des Schallausbreitungsgesetzes das Mikrofonsignal auf den entsprechenden Abstand umgerechnet werden kann. Zudem zeigt sich, dass die simulierte Vorbeifahrt der Punktschallquelle unter diesen Randbedingungen bei verschiedenen Arrayabständen eine sehr gute Übereinstimmung liefert und durch die Skalierung die Messstrecke vergrößert werden kann²⁶⁵.

Mit Hilfe einer Messung außerhalb des Koordinatenursprungs und damit außerhalb des akustischen Zentrums lässt sich auch die Verschiebung des Maximums erklären.

²⁶⁵ Landes et al. 2012

Aus den Messungen mit dem Halbdodekaeder können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die Akustikhalle bildet bei der Betrachtung einer Punktschallquelle auf dem Boden das Freifeld im interessierenden Frequenzbereich sehr gut ab.
- Der Messaufbau befindet sich im Fernfeld, da die Pegeldämpfung einen linearen Verlauf aufweist.
- Eine Verschiebung der Quelle aus dem virtuell angenommenen akustischen Zentrum führt bei der simulierten Bewegung zu einer Verschiebung des Maximums.

Mit diesen Messungen kann gezeigt werden, dass für die IPEK-Akustikhalle die erste und zweite zentrale Annahme aus Kapitel 10 (die Messumgebung ist ein Freifeld und es wird im Fernfeld gemessen) zutreffen. Damit kann allgemein gezeigt werden, wie und mit welcher Messtechnik gemessen werden muss, um diese Eigenschaften auch in anderen Hallen nachweisen zu können.

Zudem kann gezeigt werden, dass die dritte als auch vierte zentrale Annahme aus Kapitel 10 nicht zulässig sind.

Aus diesen Erkenntnissen lassen sich für die Skalierung der simulierte Vorbeifahrt und für das weitere Vorhergehen neue Hypothesen schlussfolgern und ableiten:

- Das Fahrzeug ist keine Punktschallquelle auf dem Boden.
- Die Position des akustischen Zentrums muss für die Skalierung bekannt sein.

Um diese Hypothesen zu validieren wird das Fahrzeug als Punktschallquelle oberhalb des Bodens mit einem Volldodekaeder simuliert.

11.4 (Voll)Dodekaeder

In Kapitel 11.3 wurde gezeigt, dass die Methode der simulierten Vorbeifahrt auf Basis einer Punktschallquelle am Boden mit sehr guter Reproduzierbarkeit skaliert werden kann. Da ein Fahrzeug allerdings Schallanteile oberhalb des Bodens ausstrahlt, kommt es zu Reflexionen und ggf. Interferenzen. Im Folgenden wird ein Dodekaeder nach Kapitel 6.3 verwendet um damit das Fahrzeug als Punktschallquelle oberhalb des Bodens, zu simulieren. Der Dodekaeder ist ebenfalls eine Punktschallquelle mit Kugelcharakteristik, strahlt aber im Gegensatz zum Halbdodekaeder in 360 Grad Raumrichtung ab. Durch die Platzierung auf einem Stativ kommt es somit ebenfalls zu Reflexionen. Damit wird das Fahrzeug weiterhin als Punktschallquelle mit Reflexionsanteilen simuliert.

Der Messaufbau wird analog zu der Messung mit Halbdodekaeder fächerartig (vgl. Bild 55) realisiert, sodass jedes Mikrofon bei der Skalierung auf dem gleichen

Schallpfad liegt. Der weitere Aufbau für die Streckenerweiterung erfolgt wie in Kapitel 8.2.

Die Mikrofonhöhen werden dabei nach verschiedenen Berechnungsmethoden eingestellt. Bei diesem Versuchsaufbau wird der Dodekaeder in verschiedenen Höhen positioniert. Als Testsignale werden für die ruhende Quelle wiederum das weiße Rauschen und das Fahrzeuggeräusch und für die bewegte Quelle aufgrund des zeitlich konstanten Frequenzinhaltes jedoch nur das Fahrzeuggeräusch verwendet.

11.4.1 Validierung der Annahmen

Nach 2.3.10 lässt sich eine Pegelüberhöhung durch das Raummaß bestimmen, allerdings ist die Höhe der Schallquelle unbekannt. Ferner ist unbekannt, wie die Höhe des Mikrofons berechnet werden muss, da in Gl. 34 von einer Schallquelle auf dem Boden ausgegangen wird. Daher wird im ersten Schritt die Pegelüberhöhung durch die Reflexion und die getroffenen Annahmen numerisch überprüft und quantifiziert. Obwohl der Schwerpunkt der Untersuchung auf der Skalierung des Verfahrens und nicht auf der Übertragbarkeit von der Teststrecke in die Halle liegt, wird trotzdem im zweiten Schritt das Raumwinkelmaß in der Halle und auf der Teststrecke theoretisch überprüft. Des Weiteren wird der Einfluss der Mikrofonposition auf Interferenzen durch Reflexionen quantifiziert.

11.4.1.1 Schallabsorptionsgrad

Nach Kapitel 7.1 besitzt der Halbfreifeldraum einen Schallabsorptionsgrad von $\alpha = 0,06$. Unter realen Bedingungen auf der Teststrecke mit einer genormten Oberfläche darf der Schallabsorptionsgrad nach Kapitel 2.5.3 maximal einen Wert von $\alpha = 0,10$ betragen²⁶⁶. Das Raumwinkelmaß hängt dabei von den geometrischen Parametern wie Abstand zur Schallquelle, Mikrofon- und Schallquellenhöhe ab.

In Bild 64 ist die prozentuale Abweichung zwischen den unterschiedlichen Absorptionsgraden auf der Z-Achse über der Mikrofonhöhe und dem Abstand des Mikrofons aufgetragen. Jede Ebene in diesem Diagramm beschreibt jeweils die Abweichung für eine definierte Quellenhöhe. Die Quellenhöhe wird dabei zwischen 0,1 m und 1,0 m in 0,1 m Schrittweite über dem Boden variiert. Die Mikrofonhöhe wird auf Basis des Halbdodekaeders, d. h. über die geometrische Beziehung nach Gl. 34, berechnet.

²⁶⁶ ISO 10844: 2011

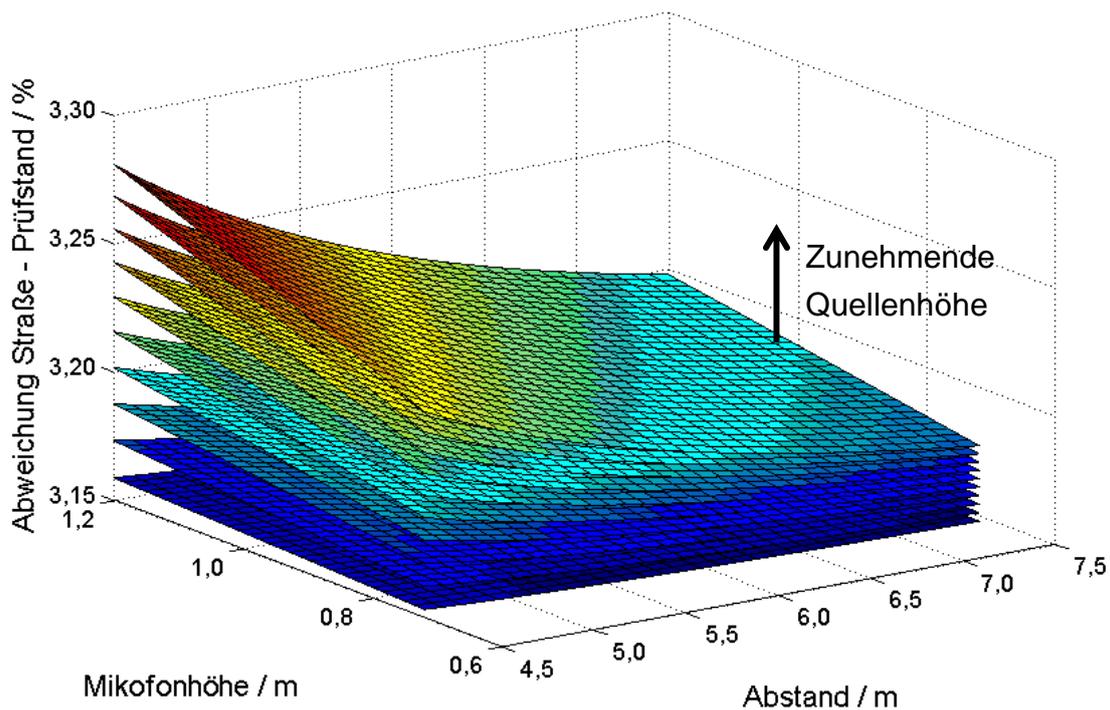


Bild 64: Numerischer Fehler durch variierenden Schallabsorptionsgrad bei Punktschallquelle

Daraus wird ersichtlich, dass der unterschiedliche Absorptionsgrad abhängig von Quellenhöhe, Mikrofonabstand und -höhe ist. Allerdings haben diese Faktoren in der theoretischen Betrachtung kaum einen Einfluss auf das Raumwinkelmaß. Durch die Differenz des Absorptionsgrades von 0,04 entsteht lediglich eine maximale Pegeldifferenz von 0,09 dB zur Teststrecke. Die Abweichung des Raumwinkelmaßes zwischen Straße und Prüfstand liegt in einer Größenordnung von 3 % und steigt mit zunehmender Quellenhöhe. Da das absolute Raumwinkelmaß mit ca. 3 dB im Vergleich zum gemessenen Schalldruckpegel sehr klein ist, darf für die weitere Betrachtung ein Absorptionsgrad von $\alpha = 0,06$ angenommen werden.

11.4.1.2 Raumwinkelmaß

Für Quellen oberhalb des Bodens beschreibt das Raumwinkelmaß die zusätzliche Schallüberhöhung durch die Reflexionen am Boden im Halbfreifeldraum. In Bild 65 ist das Raumwinkelmaß in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Quelle und Empfänger und von der Mikrofonhöhe für verschiedene Quellenhöhen dargestellt.

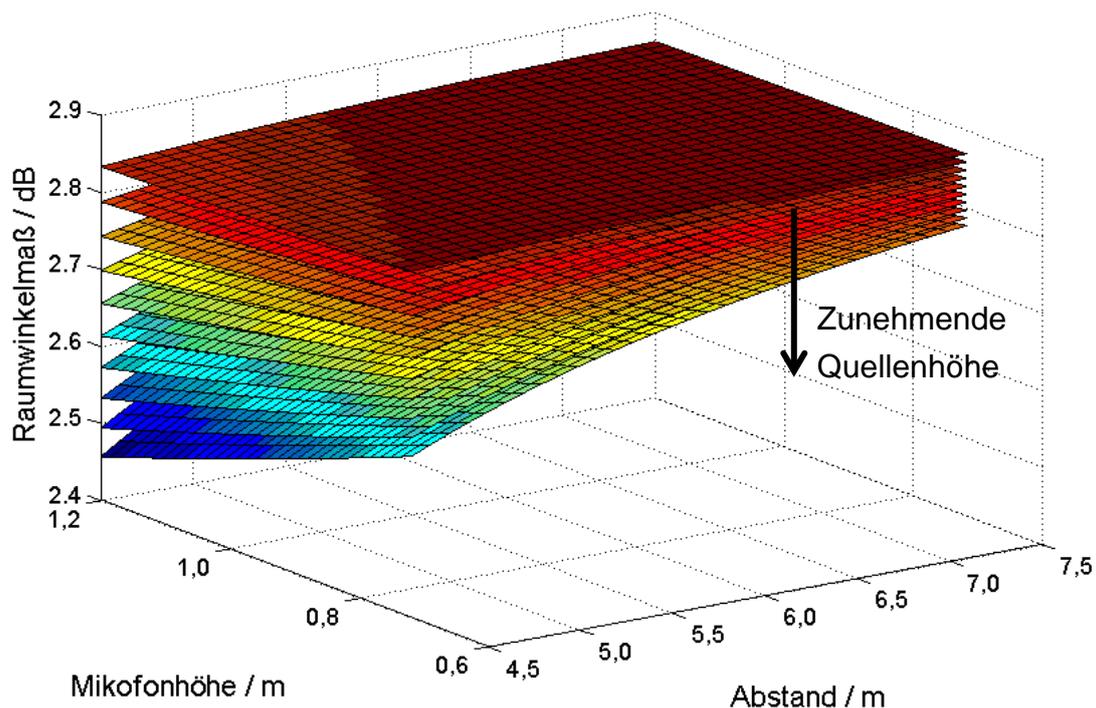


Bild 65: Raumwinkelmaß für verschiedene Quellhöhen (numerisch)

Dabei ist zu erkennen, dass mit zunehmender Quellhöhe und Mikrofonhöhe das Raumwinkelmaß abnimmt. Zusätzlich nimmt das Raumwinkelmaß ab, wenn der Abstand zur Quelle reduziert wird. Wird das Fahrzeug als Punktschallquelle betrachtet, so bedeutet das für die Vorbeifahrt, dass jedes Mikrofon zu jedem Zeitpunkt ein anderes Raumwinkelmaß besitzt, da die Entfernung der Mikrofone unterschiedlich zur Punktschallquelle sind. Insgesamt muss der Schallpegel bei der Betrachtung mit Reflexionen entsprechend dem Raumwinkelmaß und der Gl. 25 größer werden. Wie allerdings in Bild 65 erkennbar, variiert das Raumwinkelmaß nur sehr gering. Generell wird der Schalldruckpegel größer als mit einer Halbkugelquelle auf dem Boden, allerdings unterscheidet sich das theoretische Raumwinkelmaß bei verschiedenen Quellen- und Mikrofonhöhen nur gering.

11.4.1.3 Interferenz

Strahlt eine Quelle oberhalb des Bodens Schall ab, so entsteht durch die Spiegelung am Boden eine Spiegelquelle. Das Mikrofon empfängt, analog zum Raumwinkelmaß, nicht nur die Schallwelle der Quelle, sondern auch den Anteil der Spiegelquelle. Das Raumwinkelmaß beschreibt lediglich die Überhöhung des Schalldruckpegels, ohne Berücksichtigung von Interferenzen oder der Frequenzabhängigkeit vom Schallabsorptionsgrad. Durch den Längenunterschied zwischen Direktschall und Reflexionsschall entstehen Interferenzen.

In Abhängigkeit von der Höhe der Quelle, dem Abstände und der Mikrofonhöhe, lässt sich die Wegdifferenz nach Gl. 23 und daraus die Interferenzfrequenz 1. Ordnung

bestimmen. Da der Wegunterschied zwischen Quelle und Mikrofon abhängig von der Position des Mikrofons ist, muss die Interferenz für jedes Mikrofon und für jede Quellenhöhe bestimmt werden. In Bild 66 sind die konstruktiven und destruktiven Interferenzen erster Ordnung ($k=1$) für verschiedene Quellenhöhen bei 7,5 m Abstand und 1,2 m Mikrofonhöhe für verschiedene X-Koordinaten zum Ursprung dargestellt.

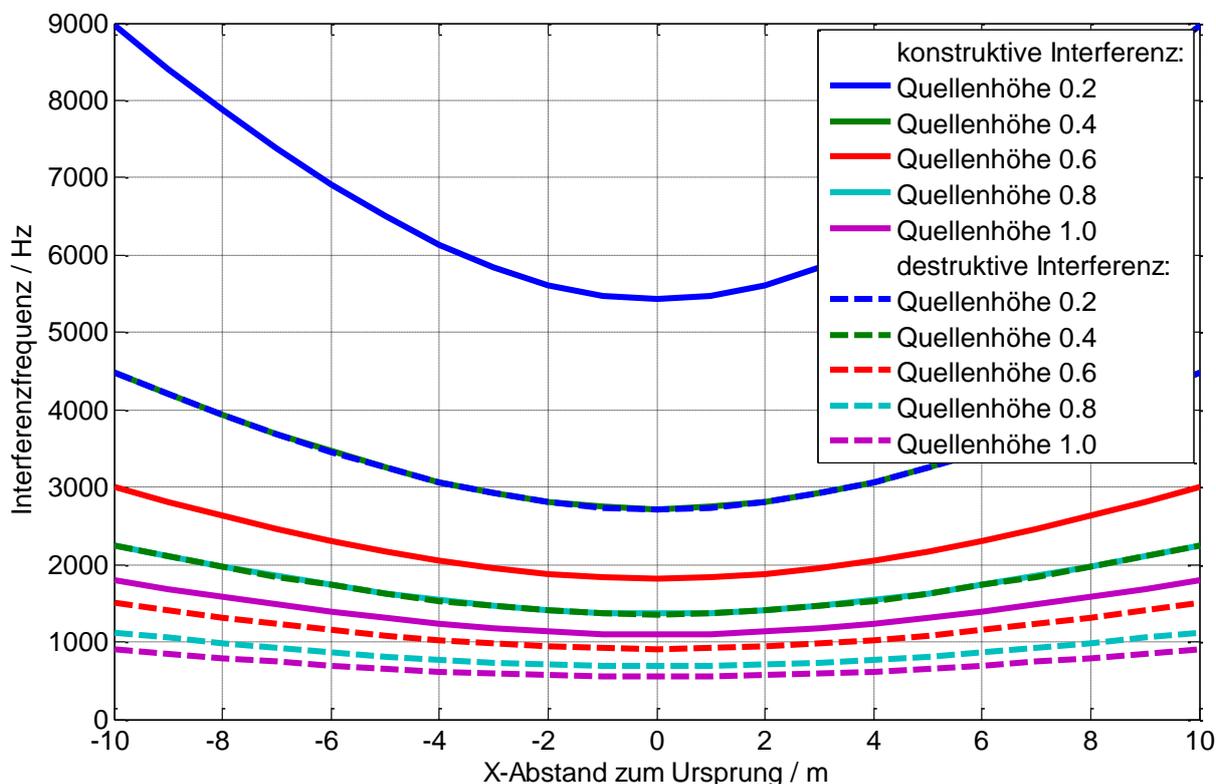


Bild 66: Konstruktive und destruktive Interferenzfrequenz 1. Ordnung

Für kleine und mittlere Quellenhöhen ist die konstruktive Interferenz eher uninteressant, da diese erst bei ca. 2500 Hz beim mittleren Mikrofon auftritt und damit in der Fahrzeugakustik nur im Frequenzbereich der Reifen vorkommen kann. Die destruktive Interferenz tritt hingegen bei Frequenzen um die 1000 Hz für mittlere und große Quellenhöhen auf und spielt damit theoretisch eine Rolle. Konstruktive und destruktive Interferenzen liefern insgesamt jedoch eher einen untergeordneten Beitrag zum Summenpegel, da das Fahrzeuggeräusch sehr breitbandig ist und in der Auswertung der gesamte Frequenzbereich betrachtet wird.

11.4.1.4 Mikrofonhöhe

Für Schallquellen oberhalb des Bodens entsteht durch Reflexion nicht nur Direktschall, sondern auch indirekter Schall. Für einen Abstand zur Fahrzeugmittelachse ist nach der Norm eine eindeutige Mikrofonhöhe mit 1,2 m bei einem Abstand zur Fahrzeugmittelachse von 7,5 m definiert. Für die Platzierung des Arrays mit kleineren Abständen muss geklärt werden, wie die Mikrofonhöhe bestimmt

werden muss, um vergleichbare Ergebnisse bei der Skalierung zu erzielen. Dazu werden folgende Ansätze betrachtet:

- Berechnung auf Basis des Halbdodekaeders^{267,268}.
- Berechnung der Mikrofonhöhe auf Basis der Interferenz²⁶⁹.
- Berechnung auf Basis des Voll-dodekaeders²⁷⁰.

Berechnung auf Basis des Halbdodekaeders

Bei der Berechnung auf Basis des Halbdodekaeders wird in der Theorie angenommen, dass sich die Schallquelle auf dem Boden befindet. Die lineare Höhenberechnung erfolgt dabei nach Gl. 34. Diese Annahme vernachlässigt dabei die Reflexions- und Interferenzanteile. Für sehr kleine Abstände kann es vorkommen, dass die Mikrofonhöhe kleiner als die Quellenhöhe und somit die Abstrahlcharakteristik der Quelle vernachlässigt wird. Wie in Kapitel 8.3 dargestellt, ist diese Höhenberechnung nicht zielführend. Zudem wird damit die Annahme getroffen, dass die Quellenhöhe keinen Einfluss auf die Skalierung besitzt.

Berechnung der Mikrofonhöhe auf Basis der Interferenz

Cicalo und Trozzi²⁷¹ haben sich ebenfalls mit der Berechnung der Mikrofonhöhe beschäftigt, allerdings bei Zweirädern und mit sehr viel kleineren Abständen ($D < 1,5$ m) zur Quelle. Da die lineare Berechnung auf Basis des Halbdodekaeders eine kleinere Mikrofonhöhe als die Quellenhöhe liefert, wurde die Mikrofonhöhe auf Basis gleicher Interferenzen berechnet. Mit Gl. 23 lässt sich die Wegdifferenz des direkten und indirekten Schallpfades für unterschiedliche Quellenhöhen für ein Mikrofon bestimmen. Da die Mikrofonhöhe bei einem Abstand von 7,5 m genormt ist, lässt sich somit, wie in Bild 67 dargestellt, eine Höhe für ein Mikrofon in einem definierten Abstand ermitteln, welche genau die gleiche Wegdifferenz zwischen direkten und indirekten Schall besitzt.

²⁶⁷ Janssen et al. 2011

²⁶⁸ Ryu 2005

²⁶⁹ Cicalo / Trozzi 2009

²⁷⁰ Robens et al. 2012

²⁷¹ Cicalo / Trozzi 2009

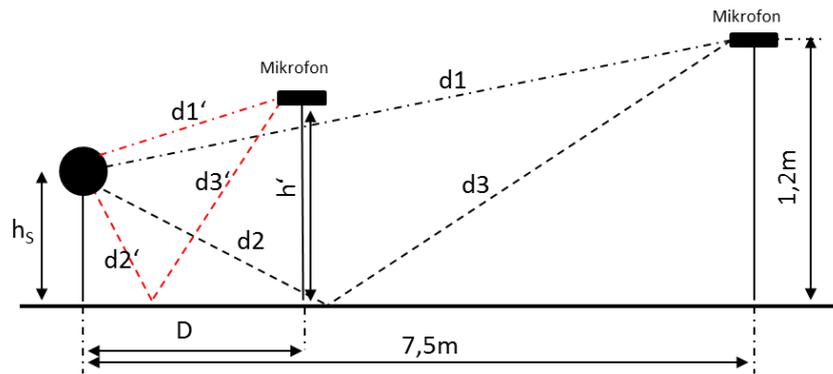


Bild 67: Mikrofonhöhen gleicher Interferenz

Dabei muss folgende Bedingung nach Gl. 39 gelten:

$$(d2 + d3) - d1 = (d2' + d3') - d1' \quad \text{Gl. 39}$$

Die Interferenz ist abhängig von der Quellenhöhe, welche bei dieser Methode berücksichtigt wird. Die Richtcharakteristik der Quelle muss dabei vernachlässigt werden. Wird die Restriktion, dass das Mikrofon auf dem gleichen direkten Schallpfad ($d1$) liegen muss, mathematisch formuliert, so liefert das Gleichungssystem nur die mathematisch trivialen Lösungen $D = 0$, $h' = h_s$ und $D = 7,5 \text{ m}$, $h' = 7,5 \text{ m}$.

Berechnung auf Basis des Volldekaeders

Wird davon ausgegangen, dass das Fahrzeug zwar eine Punktschallquelle ist, aber eine Richtcharakteristik besitzt, so muss das Mikrofon auf dem Schallpfad der Quelle und Normhöhe liegen. Soll das Mikrofon den Schall unter dem gleichen Winkel empfangen, so muss die Höhe h' des Mikrofons in Abhängigkeit von der Quellenhöhe h_s nach Gl. 40 berechnet werden. In Bild 68 sind zum Vergleich die Höhenberechnungen auf Basis des Halb- und des Volldekaeders dargestellt.

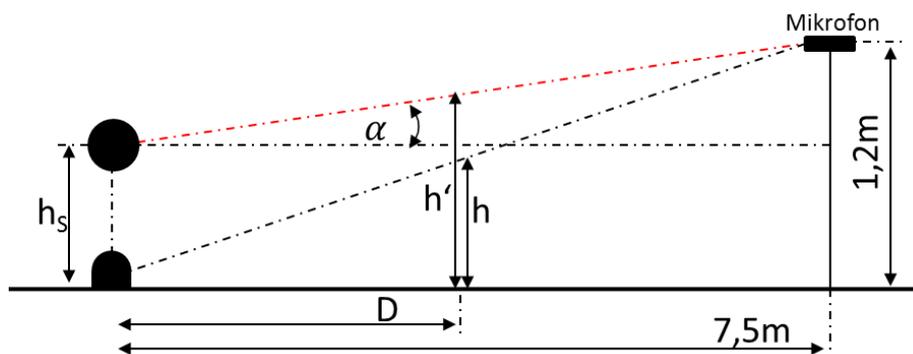


Bild 68: Höhenkorrektur bei einer Schallquelle oberhalb des Bodens

$$h' = (1,2\text{m} - h_s) \cdot \frac{D}{7,5\text{m}} + h_s = 0,16 \cdot D + \left(1 - \frac{D}{7,5}\right) \cdot h_s \quad \text{Gl. 40}$$

Die Höhenberechnung berücksichtigt dabei nicht nur die Abhängigkeit vom Abstand, sondern auch die Quellenhöhe im Vergleich zur Berechnung auf Basis des Halbdodekaeders.

Bewertung der Mikrofonhöhe

Wie die Messungen in Kapitel 8.3 gezeigt haben, liefert die Berechnung auf Basis des Halbdodekaeders für Quellen oberhalb des Bodens für größere Abstände keine vergleichbaren Ergebnisse. Für die Quantifizierung der verschiedenen Berechnungsmethoden werden im ersten Schritt die Mikrofonhöhen der Berechnungsmethoden theoretisch verglichen. In Bild 69 ist die Mikrofonhöhe über dem Abstand zwischen Quelle und Mikrofon dargestellt und der für Pkws relevante Bereich nach Kapitel 8.1 aufgrund der notwendigen Freifeldbedingung abgegrenzt. Dabei ist erkennbar, dass die Berechnungen zwischen der Interferenzmethode und der Methode mittels Halbdodekaeder erst bei sehr kleinen Abständen voneinander abweichen. Die Berechnungsmethode auf Basis des Dodekaeders liefert deutlich höhere Mikrofonpositionen.

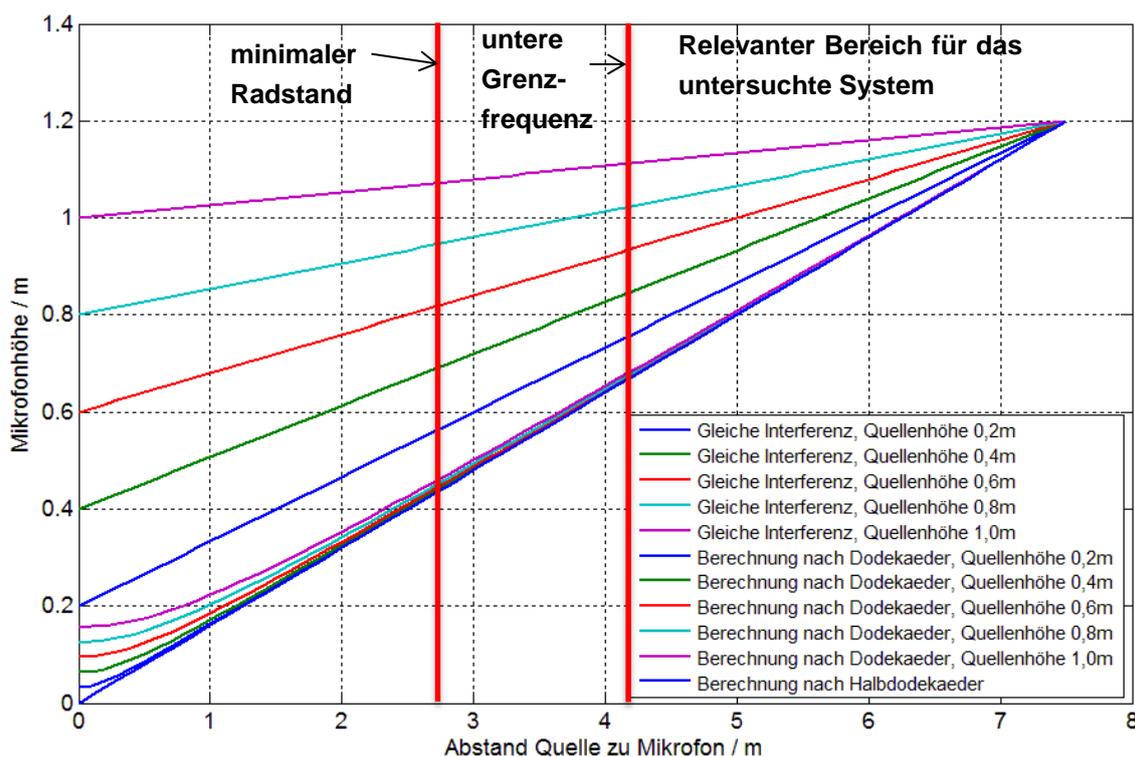


Bild 69: Vergleich der Berechnungsmethoden

Die Kurven aller Berechnungsmethoden schneiden sich bei einem Abstand von 7,5 m bei der Normhöhe von 1,2 m. Wie oben genannt, ist erkennbar, dass es keine Position gibt, welche sowohl die Richtcharakteristik als auch die gleiche Interferenz, für Quellen oberhalb des Bodens, berücksichtigt.

Für den relevanten Messbereich im Freifeld konnte nach Kapitel 8 gezeigt werden, dass die lineare Höhenberechnung auf Basis des Halbdodekaeders und damit auch die Höhe gleicher Interferenz keine vergleichbaren Ergebnisse liefert.

Da die Mikrofonhöhe das Raumwinkelmaß beeinflusst, sollen abschließend durch die verschiedenen Berechnungen entstehenden Abweichungen ermittelt werden. In Bild 70 ist das Raumwinkelmaß für h und h' über verschiedene Quellenhöhen und verschiedene Abstände aufgetragen. Die Quellenhöhe wird dabei von 0,2 m bis 1 m variiert. Da das Raumwinkelmaß abhängig von der Mikrofonhöhe ist, wird die Höhe h einmal durch Gleichung Gl. 34 (Quelle auf Boden) bestimmt und das andere Mal h' durch die Gl. 40 (Mikrofonhöhe in Abhängigkeit von der Quellenhöhe).

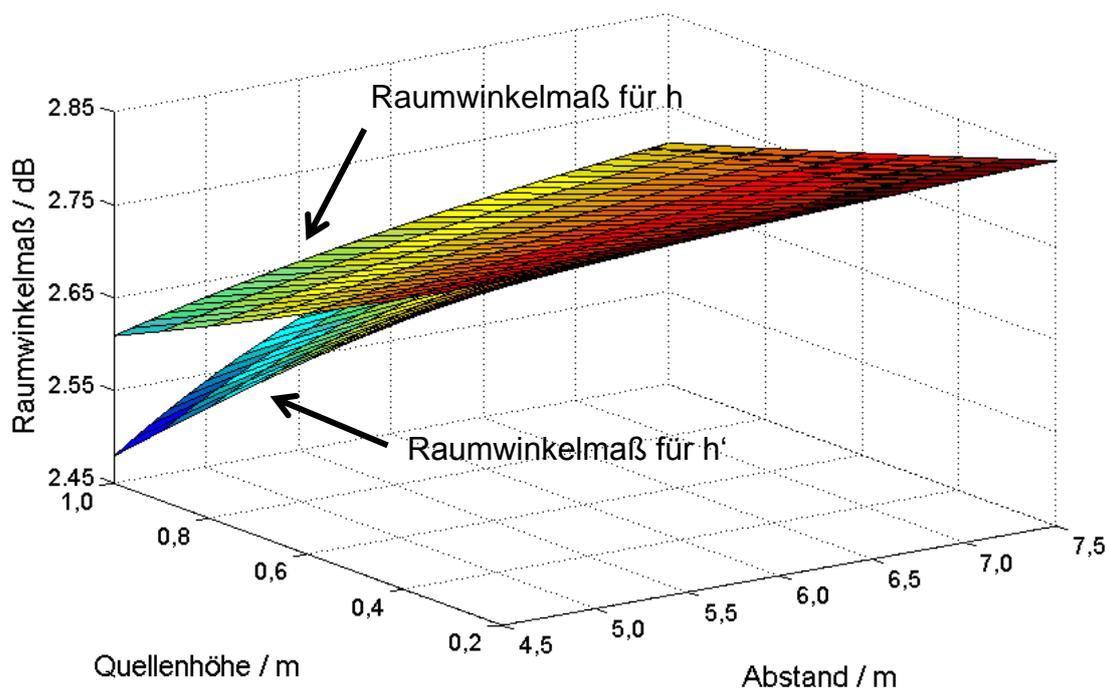
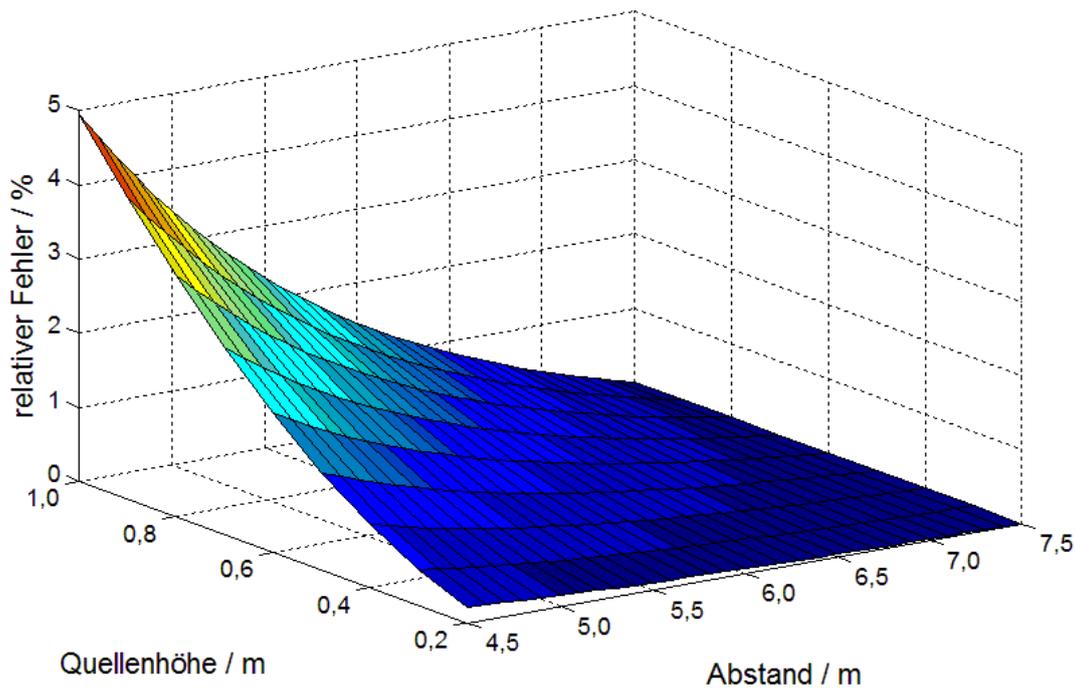


Bild 70: Raumwinkelmaß für unterschiedliche Berechnungen der Mikrofonhöhen

Zu erkennen ist, dass die Ebenen für größere Abstände und kleine Quellenhöhen sehr ähnlich sind. Die Ebene h' weist eine etwas stärkere Krümmung auf, was an der größeren Mikrofonhöhe bei hohen Quellen liegt.

Wird nun die Differenz der zwei Ebenen aus h und h' berechnet, wie in Bild 71 dargestellt, ist erkennbar, dass die maximale Abweichung des Raumwinkelmaßes zwischen den verschiedenen Berechnungsmethoden bei 7,5 m entsprechend 0% und für sehr große Quellenhöhen und kleine Abstände ca. 5 % beträgt.

Bild 71: Differenz des Raumwinkelmaßes von h und h'

D. h., unabhängig von der Berechnungsmethode hat die Mikrofonhöhe theoretisch einen Einfluss von maximal 5% auf das Raumwinkelmaß, was allerdings nur einem Wert von 0,13 dB entspricht und somit vernachlässigt werden kann.

11.4.1.5 Zusammenfassung der Annahmen

Auf Basis der theoretischen Betrachtung des Raumwinkelmaßes wird der gesamte Schalldruckpegel um etwa 3 dB größer, was einer Verdoppelung des Schalldruckes durch die Spiegelquelle entspricht. Die Parameter Schallabsorptionsgrad, Mikrofonhöhe und Quellhöhe spielen in der Theorie relativ zum absoluten Schalldruckpegel eine eher untergeordnete Rolle. Zudem kann theoretisch gezeigt werden, dass Interferenzen im relevanten Frequenzbereich entstehen, allerdings gibt es keine Mikrofonhöhe, die sowohl die Richtungsabhängigkeit von der Quelle berücksichtigt, als auch die gleiche Interferenz besitzt wie bei dem genormten Abstand. In Kapitel 8 wurde bereits gezeigt, dass die Mikrofonhöhenberechnung sowohl auf Basis des Halbdodekaeders als auch auf Basis gleicher Interferenz keine vergleichbaren Ergebnisse bei der Skalierung erzielt. Im Folgenden werden für die Messungen mit dem Volldodekaeder jeweils die Höhen nach Gleichung Gl. 34 (Quelle auf Boden) und Gl. 40 (Mikrofonhöhe in Abhängigkeit von der Quellhöhe) experimentell betrachtet.

11.4.2 Messergebnis

Die Messungen hängen von den Parametern Abstand zum Fahrzeug, Quellenhöhe und Mikrofonhöhe (bzw. Berechnungsmethode der Mikrofonhöhe) ab. Für die Auswertung wird daher jeweils nur ein Parameter variiert.

11.4.2.1 Einfluss der Quellenhöhe

Zunächst wird der Einfluss der Quellenhöhe betrachtet. Dazu werden jeweils Messungen bei 7,5 m, 6,0 m und 4,5 m mit unterschiedlicher Quellenhöhe betrachtet.

In Bild 72 und Bild 73 sind jeweils die Terzspektren für das weiße Rauschen und für das reale Fahrzeuggeräusch des mittleren Mikrofons im Vergleich dargestellt. Der Abstand zwischen Dodekaeder und Mikrofon beträgt dabei 7,5 m und die Mikrofonhöhe entsprechend 1,2 m. Der Dodekaeder wird in der Höhe zwischen 0,2 m und 1,0 m variiert. Markiert sind dabei jeweils die Positionen der Minima.

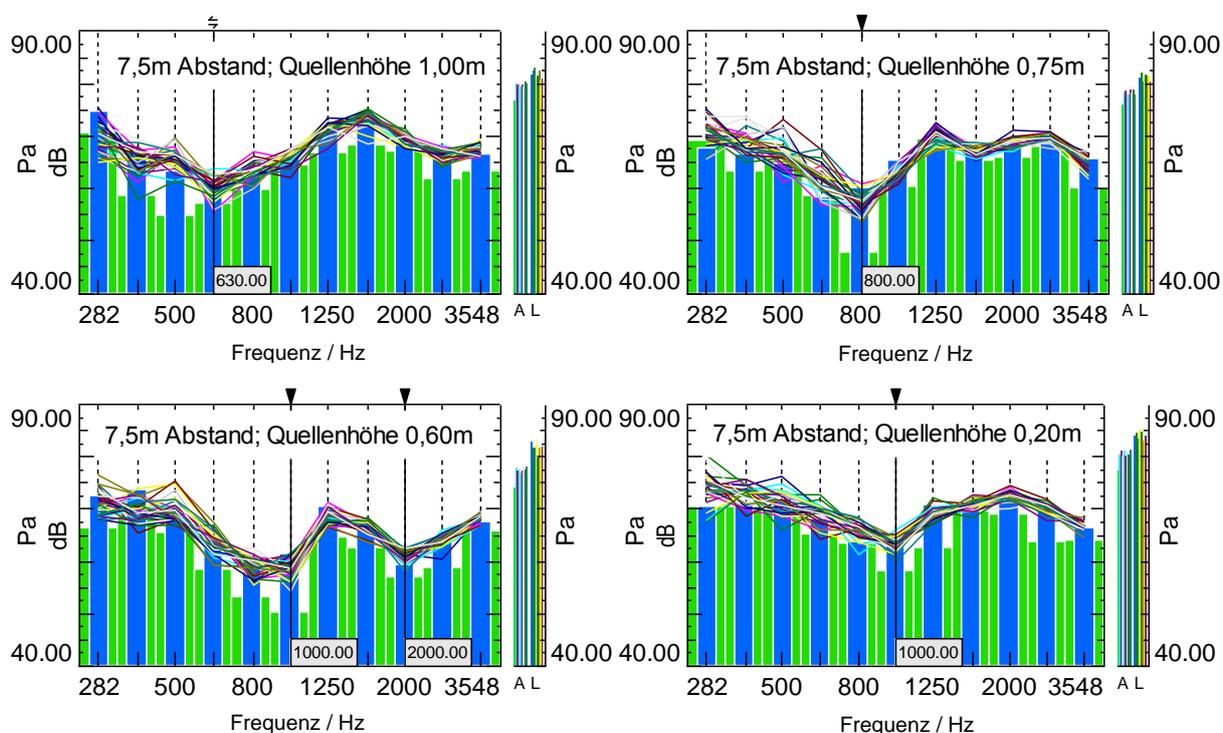


Bild 72: Vergleich der Terzspektren bei unterschiedlichen Quellenhöhen mit weißem Rauschen

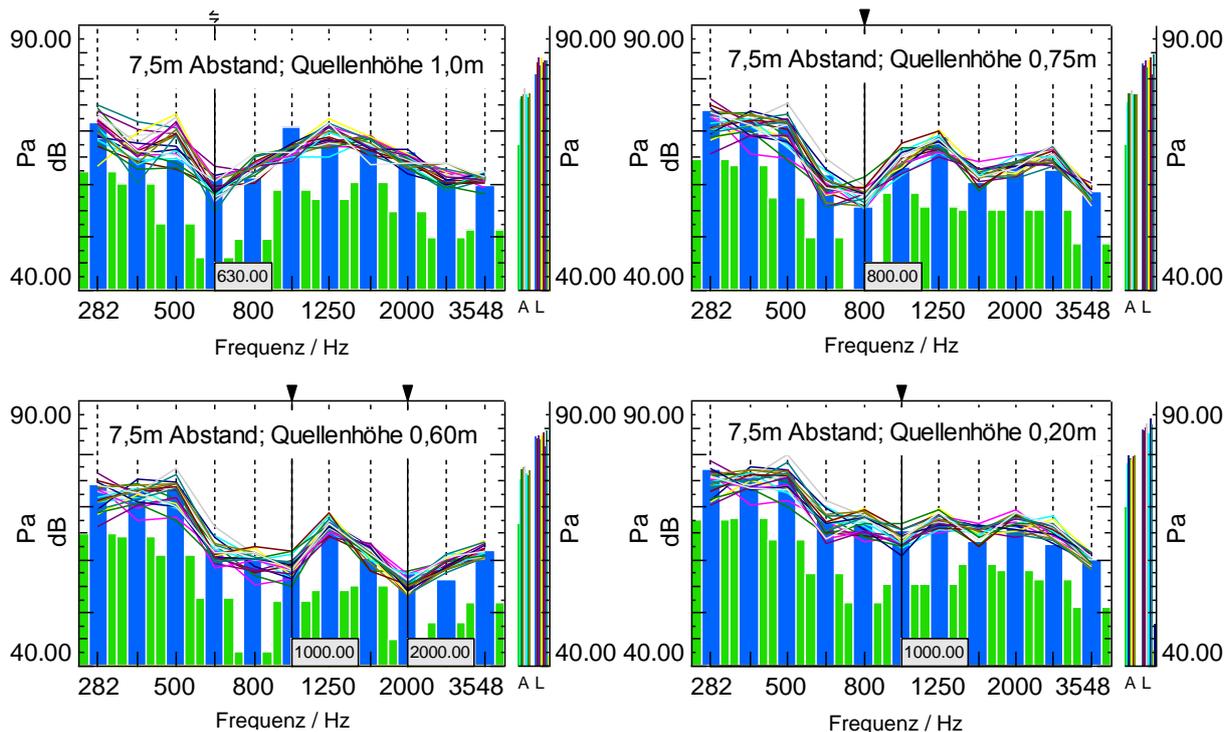


Bild 73: Vergleich der Terzspektrale bei unterschiedlichen Quellenhöhen mit Fahrzeuggeräusch

Tendenziell zeigen beide Testsignale im Terzspektrum bei gleicher Quellenhöhe einen sehr ähnlichen charakteristischen Verlauf. Das weiße Rauschen liefert bezüglich der Interferenzen eine sehr gute Übereinstimmung mit der Theorie (vgl. Kapitel 11.4.1.3). Die destruktive Interferenz 1. Ordnung wird mit zunehmender Quellenhöhe zu niedrigeren Frequenzen verschoben. Ebenfalls lässt sich bei 1 m Quellenhöhe die konstruktive Interferenz 1. Ordnung bei doppelter Frequenz erkennen. Da das weiße Rauschen ein breitbandiges, statistisch gleich verteiltes Signal ist, fällt es im Vergleich zum realen, bandbegrenzten Fahrzeugsignal bei hohen Frequenzen nicht so stark ab.

Bei einem Abstand von 7,5 m ist die Mikrofonhöhe von 1,2 m unabhängig von der Quellenhöhe, da diese durch die Norm vorgegeben wird. Damit reduziert sich das Raumwinkelmaß nach Gl. 22 auf eine Unbekannte. Die Quellenhöhe wird dabei bei jeder Messung variiert. In Bild 74 sind vier Messungen mit unterschiedlicher Höhe des Dodekaeders für den Abstand von 7,5 m dargestellt.

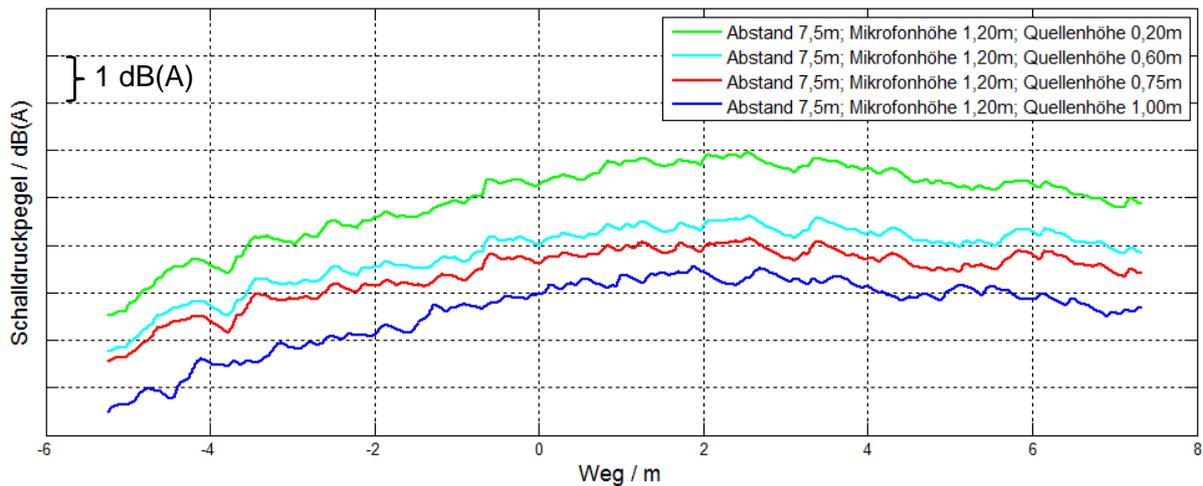


Bild 74: Messungen bei 7,5 m Abstand mit variabler Quellenhöhe

Der Verlauf der Grafen ist bei allen vier Messungen identisch. Auffällig dabei ist, dass die Kurven mit zunehmender Quellenhöhe leiser werden. Die Pegeldifferenz beträgt zwischen 0,20 m und 1,00 m ca. 2,4 dB(A).

Für die Untersuchung bei 4,5 m und 6,0 m wird die Mikrofonhöhe auf Basis des Halbdodekaeders herangezogen. In Bild 75 und Bild 76 zeigen die Messergebnisse das gleiche Verhalten wie bei dem Normabstand.

Der maximale Pegelunterschied bei 6,0 m liegt bei 2,5 dB(A) und bei 4,5 m 2,7 dB(A).

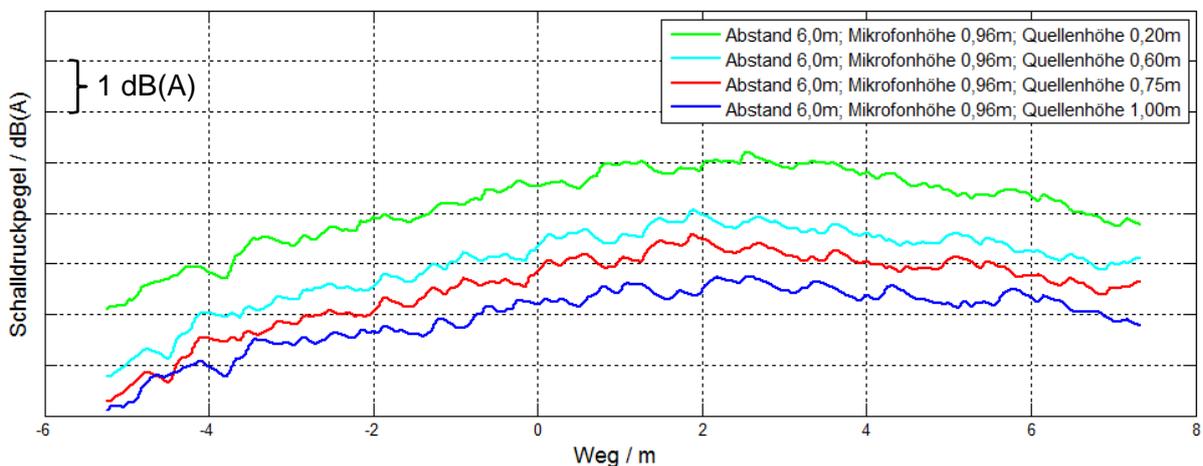


Bild 75: Messungen bei 6,0 m Abstand mit variabler Quellenhöhe

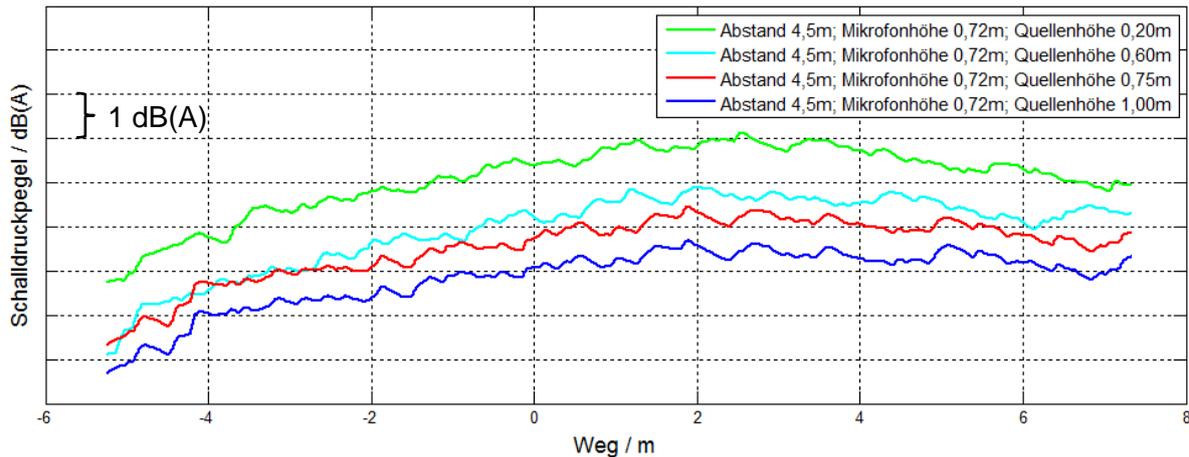


Bild 76: Messungen bei 4,5 m Abstand mit variabler Quellenhöhe

Generell ist bei allen Messergebnissen zu erkennen, dass jede Kurve die gleichen charakteristischen Merkmale aufweist, jedoch diese zum Teil entlang der Abszisse verschoben sind. Dieser Effekt ist auf die Zeitverzögerung des Triggers zurückzuführen. Die Quelle wird mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h bzw. 13,89 m/s simuliert. Das bedeutet, dass eine Zeitverzögerung von 0,1 s die charakteristischen Merkmale bereits um 1,39 m auf der Skala verschiebt. Für die Beobachtungen spielt diese Verschiebung keine Rolle und ist auch in den nachfolgenden Diagrammen vorhanden.

Die Messungen bestätigen den Einfluss der Reflexion bei verschiedenen Quellenhöhen. Mit zunehmender Quellenhöhe fällt der Schalldruckpegel analog zur theoretischen Betrachtung des Raumwinkelmaßes (vgl. Kapitel 11.4.1.2). Allerdings ist der Einfluss der Quellenhöhe deutlich ausgeprägter als bei der theoretischen Berechnung. Während das Raumwinkelmaß theoretisch nur Werte zwischen 2,40 dB und 2,85 dB annimmt und damit um 0,45 dB schwankt, sind die Unterschiede in den Extremwerten bei den Messungen größer 2 dB. Der maximale Pegelunterschied beträgt bei 6,0 m ca. 2,4 dB und bei 4,5 m ca. 2,7 dB. Damit zeigt sich, dass der Pegelunterschied mit kleiner werdenden Abständen zwischen Quelle und Mikrofon zunimmt.

Kugelquellen mit konstanter Schallleistung werden mit zunehmender Höhe der Quelle leiser. Dies lässt sich daraus begründen, dass der Schallweg des reflektierenden Schalls mit zunehmender Quellenhöhe größer wird und damit der Betrag der Spiegelschallquelle durch die Pegeldämpfung kleiner wird.

Für die Übertragung auf die simulierte Vorbeifahrt spielt dieses Erkenntnis vorerst eine untergeordnete Rolle, da in Abhängigkeit vom Fahrzeug die Quellenhöhe bauartbedingt ist. Es zeigt jedoch, dass die Quellenhöhe nicht verallgemeinert auf dem Boden angenommen werden darf. D. h. die Quellenhöhe hat einen Einfluss auf die Skalierung. Wenn das Fahrzeug eine Punktschallquelle widerspiegelt, ist es also

notwendig, die Position im Sinne der Quellenhöhe zu berücksichtigen, da ansonsten, wie die Messungen zeigen, die Skalierung und die Positionierung der Mikrofone nach dem Stand der Forschung nicht möglich ist.

11.4.2.2 Einfluss der Mikrofonhöhe

Im Folgenden soll der Beitrag der Mikrofonhöhe auf das Messergebnis quantifiziert werden. Dazu werden das Terzspektrum, die Pegeldämpfung und die simulierte Konstantfahrt der Messungen bei 6,0 m und bei 4,5 m Abstand ausgewertet. Die Mikrofonhöhe wird zum einen auf Basis des Halbdodekaeders, zum anderen auf Basis des Voldodekaeders nach Gl. 40 berechnet.

Im ersten Schritt werden die Terzspektren für die unterschiedlichen Abstände für eine Quellenhöhe von 0,2 m, wie in Bild 77 dargestellt, untersucht. Aufgrund der geringen Quellenhöhe variieren die Mikrofonhöhen nur gering. Auffällig dabei ist, dass alle Messungen ein Pegelminimum bei der Mittenfrequenz von 1000 Hz und ein Pegelmaximum bei der Mittenfrequenz von 2000 Hz haben. Die Pegeldifferenz zwischen Minimum und Maximum beträgt im Mittel um 10 dB. Im Vergleich dazu sind die Terzpegel der Messungen mit einer Quellenhöhe von 1,0 m in Bild 78 dargestellt. Alle Messungen haben ein Pegelmaximum bei der Mittenfrequenz von 1600 Hz. Auffällig ist dabei das Minimum. Wie in Kapitel 11.4.1.4 aufgezeigt, weisen die Messungen mit der Höhenberechnung auf Basis des Halbdodekaeders das Minimum im gleichen Terzband auf, wie die Messung bei Normabstand. Die Pegeldifferenz zwischen Minimum und Maximum ist mit 15 dB deutlich größer. Die Terzspektren mit der Höhenberechnung mittels Voldodekaeder weisen bei 6,0 m Abstand einen relativ konstanten Verlauf, bei 4,5 m ein Minimum bei der Mittenfrequenz von 1000 Hz auf. Generell ist der Pegelunterschied zwischen Minimum und Maximum kleiner.

Die Terzspektren zeigen, dass die Interferenzen mit der theoretischen Berechnung der Mikrofonhöhe gut übereinstimmen. Für kleine Quellenhöhen stimmen beide Berechnungsmethoden gut überein. Für höhere Quellen liefern beide Berechnungen sehr unterschiedliche Verläufe. Da in die Berechnung der simulierten Vorbeifahrt nicht nur einzelne Frequenzbänder, sondern der gesamte Frequenzbereich einfließt, wird im Folgenden der Summenschalldruckpegel betrachtet, um den Einfluss der Interferenzen zu bewerten.

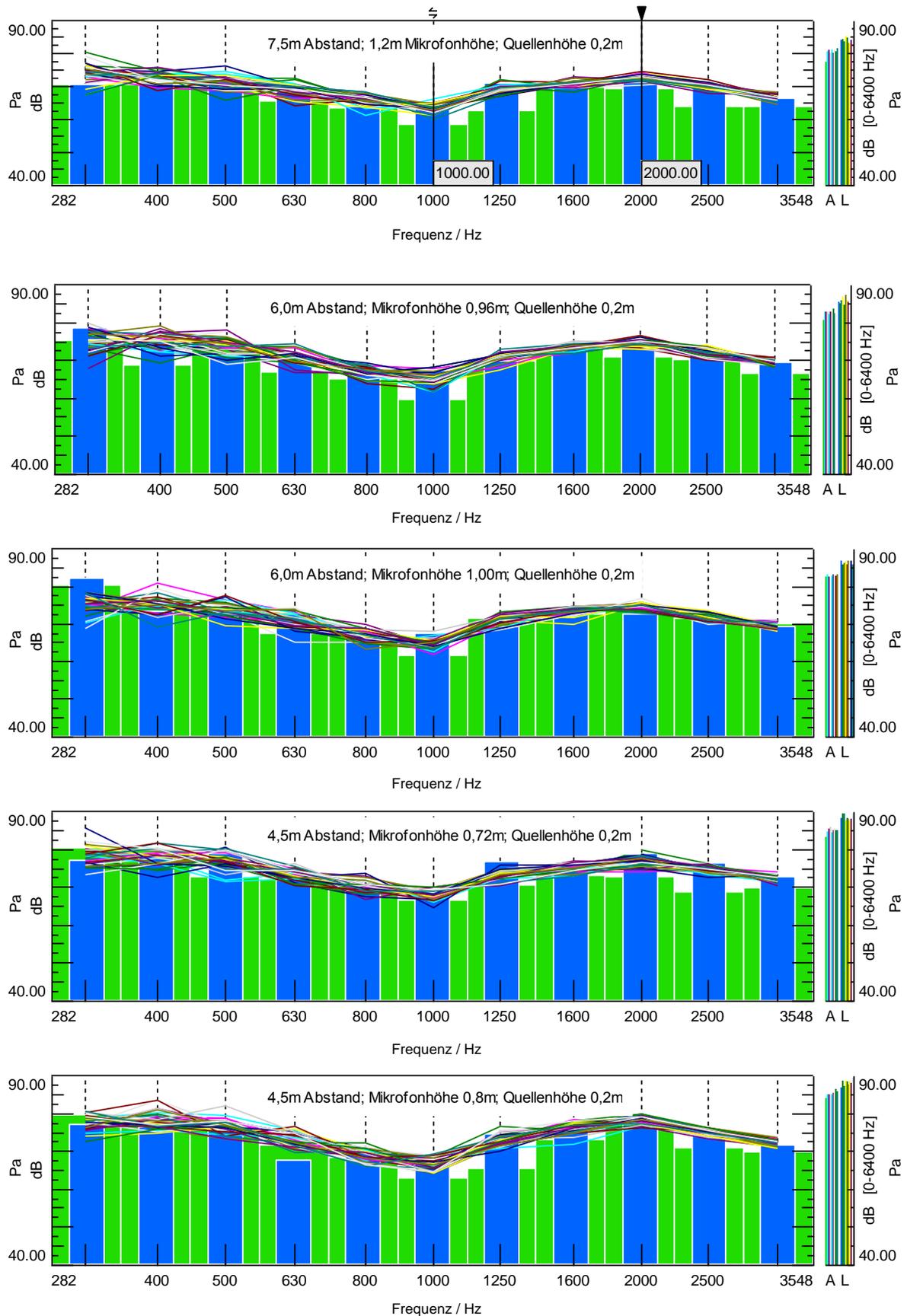


Bild 77: Gegenüberstellung der Terzspektren für 0,2 m Quellenhöhe des mittleren Mikrofons

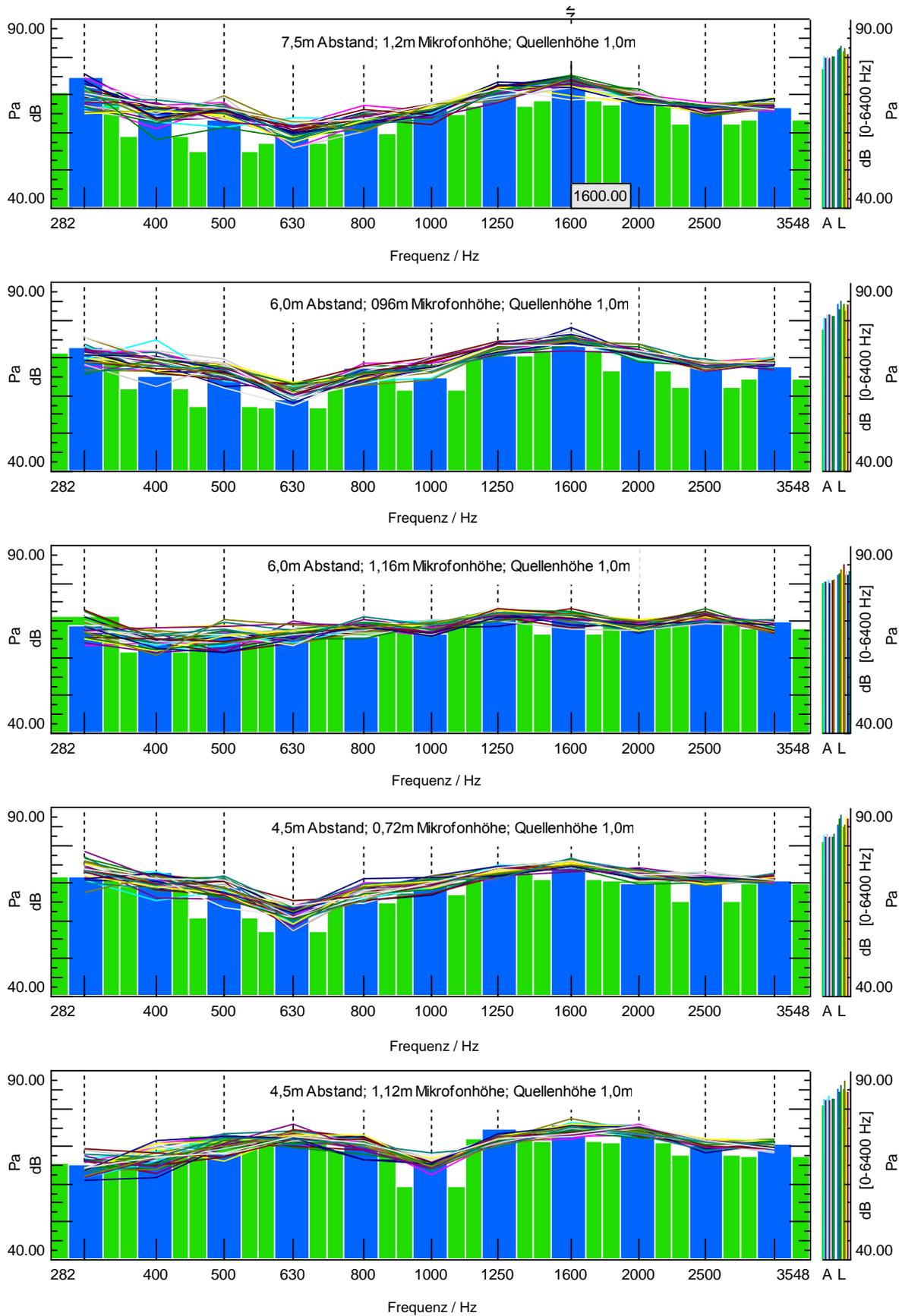


Bild 78: Gegenüberstellung der Terzspektren für 1,0 m Quellenhöhe des mittleren Mikrofons

Bild 79 zeigt den gemittelten Schalldruckpegel des mittleren Mikrofons an der Stelle $x = 0\text{m}$ bei der Messung mit verschiedenen Quellenhöhen. Als Referenz dient dabei die Messung bei 7,5 m Abstand mit einer Mikrofonhöhe von 1,2 m. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, sinkt mit zunehmender Quellenhöhe auch der gemittelte Schalldruckpegel. Werden gegenüber der Referenzmessung die Schalldruckpegel der Messungen mit unterschiedlicher Mikrofonhöhe aufgetragen, so ist erkennbar, dass für kleine Quellenhöhen die Pegeldämpfung dem theoretischen Schallausbreitungsgesetz für beide Höhenberechnungen sehr gut folgt.

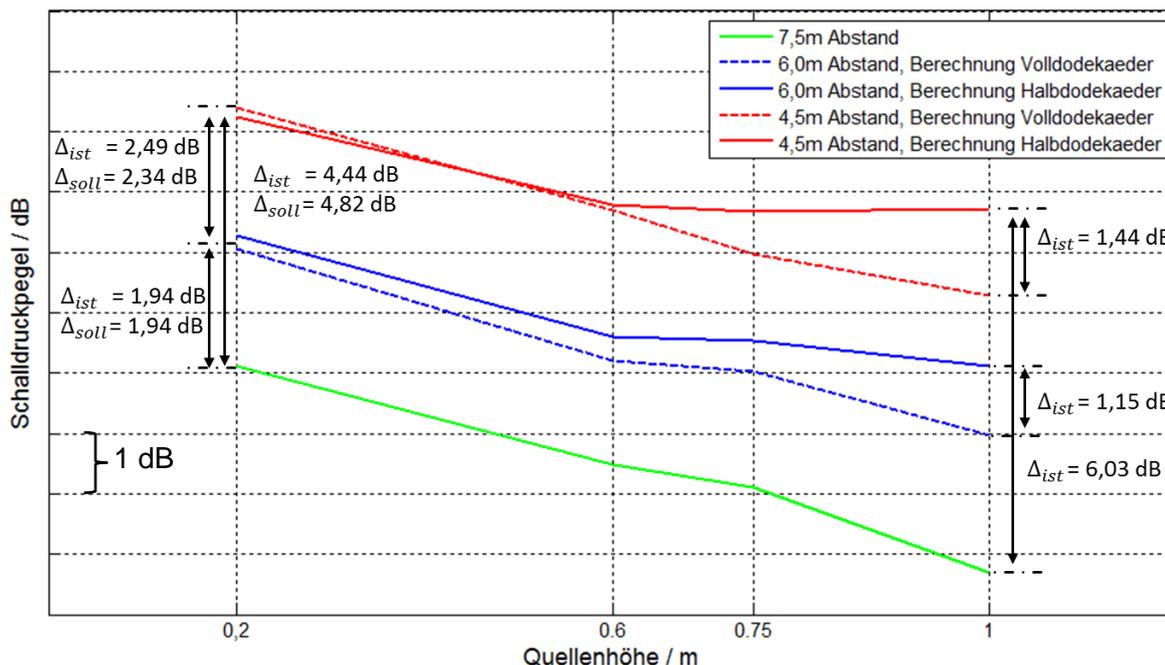


Bild 79: Pegeldämpfung des mittleren Mikrofons bei unterschiedlicher Quellenhöhe

Für größere Quellenhöhen wird die Abweichung in den Berechnungsmethoden deutlich größer. Hier weist die Mikrofonhöhe, basierend auf der Quelle am Boden bzw. gleicher Interferenz, einen um bis zu 1,44 dB größeren Schalldruckpegel auf. Die höhere Mikrofonpositionierung hingegen zeigt ein sehr gutes Verhalten gegenüber der Referenzmessung mit Normabstand. Die Messwerte liegen annähernd auf einer Geraden und sind parallel zur Referenzmessung. Daraus lässt sich ableiten, dass die freie Pegeldämpfung in sehr guter Näherung durch die neue Mikrofonhöhenberechnung für Quellen oberhalb des Bodens erfüllt ist und damit die Skalierbarkeit auf Basis der Freifeldausbreitung möglich ist.

In Bild 80 ist die konstante Vorbeifahrt mit dem Volldekaeder bei einem Abstand von 6,5 m simuliert dargestellt. Die Höhe des Volldekaeders wird dabei wieder in verschiedenen Stufen variiert. Geometrisch bedingt wird der Höhenunterschied der Mikrofone zwischen den beiden Berechnungsmethoden mit zunehmender Quellenhöhe größer. So betragen bei einem Abstand von 6,0 m die Differenzen der Mikrofonhöhen der beiden Berechnungsmethoden zwischen 0,04 m und 0,2 m.

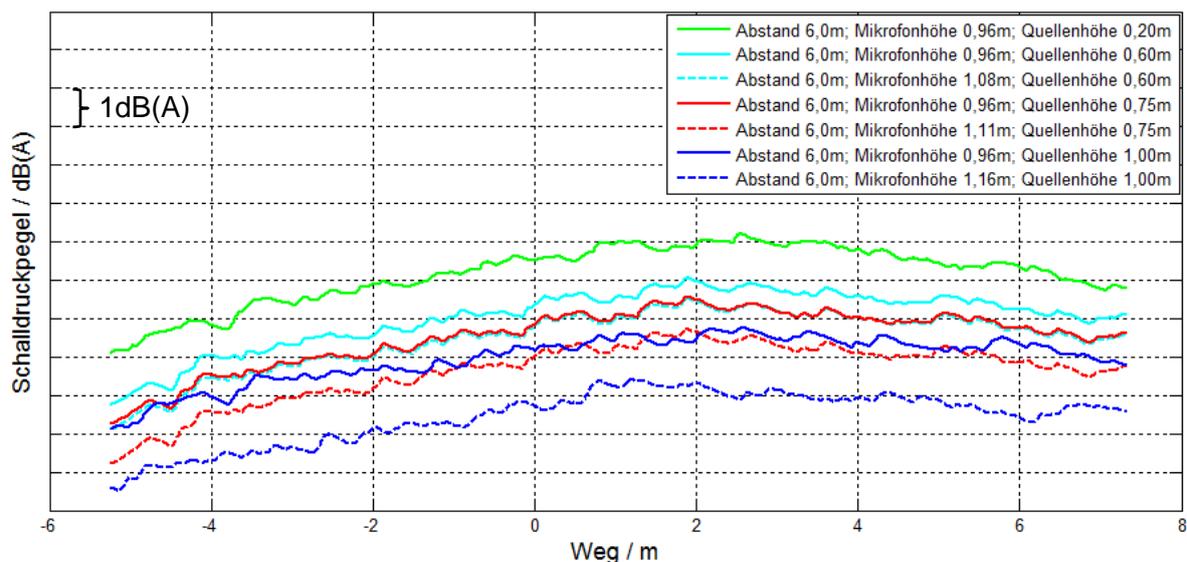


Bild 80: Messung bei 6,0 m Abstand und unterschiedlichen Mikrofonhöhen

Dabei ist auffällig, dass mit zunehmender Quellenhöhe die Messergebnisse stärker voneinander abweichen. Die Differenz in den gemessenen Schallpegeln zwischen den unterschiedlichen Mikrofonhöhen werden mit zunehmende Quellenhöhen größer. D. h. die Messungen mit kleinerer Mikrofonhöhe liefern einen größeren Schallpegel. Die Pegeldifferenz beträgt bei der größten Quellehöhe die größte Abweichung von ca. 1,8 dB(A). Da die Differenz der beiden Mikrofonhöhen abhängig von der Kugelhöhe ist, wird diese sehr klein, wenn die Schallquelle auf dem Boden steht. Somit sind auch die Pegel der beiden Messungen mit 0,20 m Quellenhöhe annähernd identisch.

Das gleiche Verhalten zeigen ebenfalls die Messungen bei einem Abstand von 4,5 m mit unterschiedlichen Mikrofonhöhen und Quellenhöhen, wie in Bild 81, dargestellt.

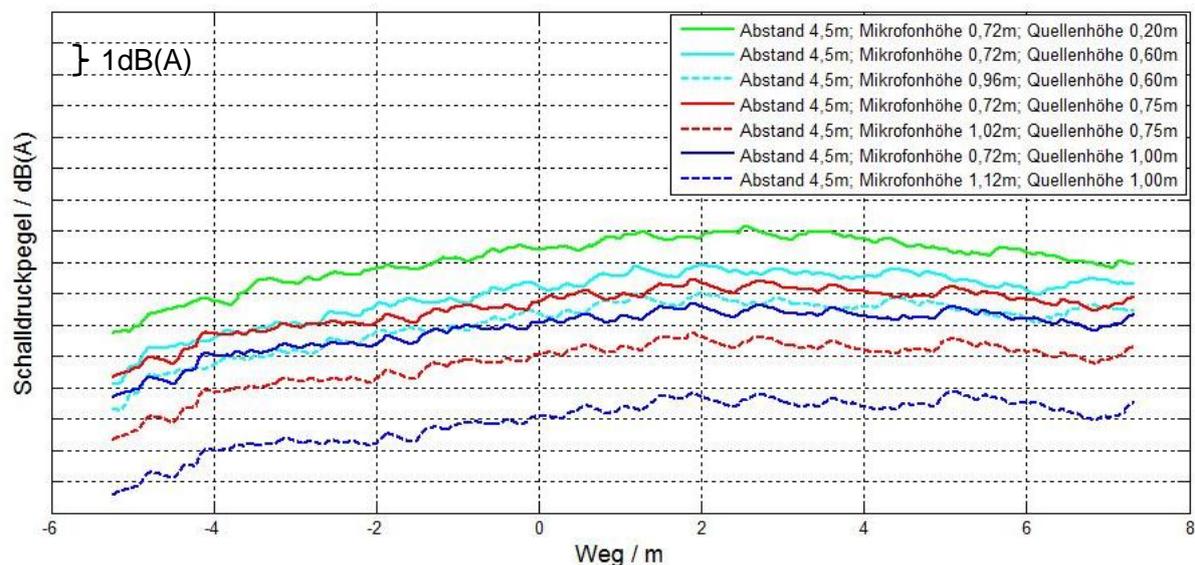


Bild 81: Messung bei 4,5 m Abstand und unterschiedlichen Mikrofonhöhen

Mit zunehmender Quellenhöhe wird der Schalldruckpegel kleiner. Auch bei diesen Messungen zeigt sich der Einfluss der verschiedenen Höhenberechnungen, allerdings noch ausgeprägter, als bei 6,0 m Abstand. So beträgt die Differenz der Mikrofonhöhen bei 1,0 m Quellenhöhe 0,4 m. Je höher sich die Schallquelle befindet, desto größer wird der Unterschied im maximalen Pegel. Für sehr kleine Quellenhöhen sind die Kurven wiederum ähnlich. Bei der Messung mit einer Quellenhöhe von 1,0 m liegt der Unterschied bei ca. 3,0 dB(A). Damit ist der Unterschied noch größer als bei der Messung mit 6,0 m.

Dies lässt sich auf den Reflexionsanteil zurückführen. Für sehr kleine Abstände nähert sich das Mikrofon bei der Berechnung auf Basis des Halbdodekaeders dem Boden an. Je nach Abstand und Quellenhöhe ist die Mikrofonhöhe dann kleiner als die Quellenhöhe, wodurch der Reflexionseinfluss größer wird. Befindet sich das Mikrofon über der Quelle, wird der Reflexionsanteil kleiner. Nach der Berechnungsmethode mit dem Volldodekaeder bleibt die Mikrofonhöhe immer größer als die Quellenhöhe, woraus die kleineren Pegelwerte resultieren.

11.4.2.3 Einfluss des Arrayabstandes

Im Folgenden werden die skalierten Ergebnisse der Messung bei 7,5 m, 6,0 m und 4,5 m verglichen. Zunächst wird von einer sehr niedrigen Quelle ausgegangen. Wie im vorherigen Absatz gezeigt, ist der Höhenunterschied der Mikrofone bei kleiner Quellenhöhe sehr gering und die Pegeldämpfung annähernd gleich. Demzufolge sind auch die Messergebnisse sehr ähnlich. Wie in Bild 82 zu sehen, sind die Unterschiede in den Ergebnissen bei kleiner Quellenhöhe sehr gering.

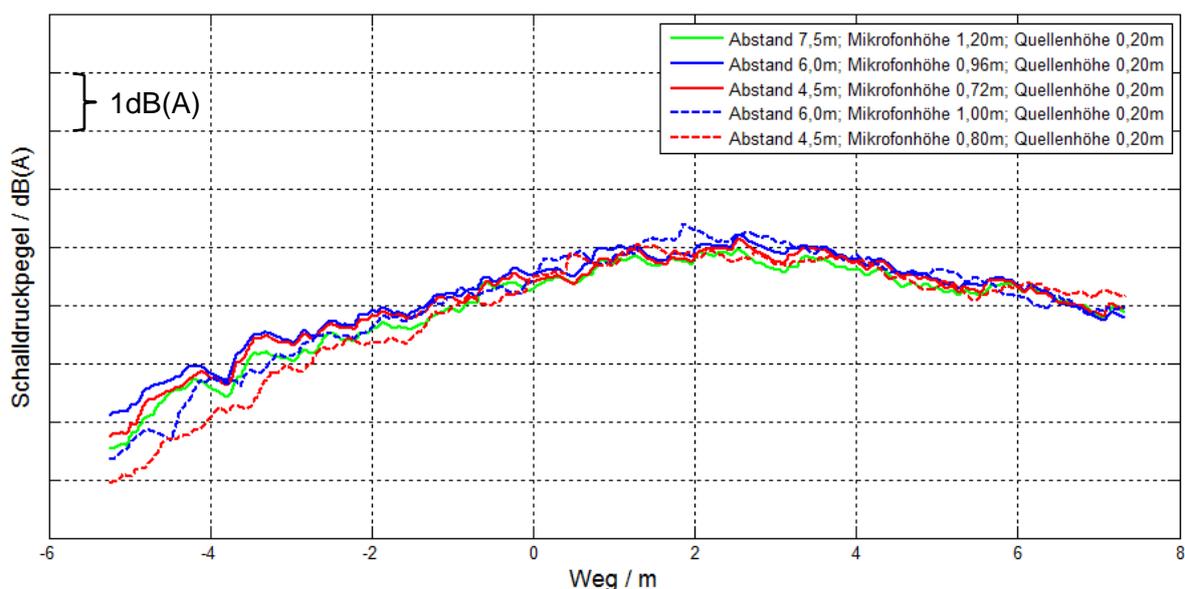


Bild 82: Vergleich der Berechnungsmethoden bei einer Quellenhöhe von 0,20 m

Im Vergleich sind in Bild 83 die Messergebnisse mit einer Quellenhöhe von 1,0 m bei verschiedenen Abständen und verschiedenen Berechnungsmethoden der Höhen

dargestellt. Mit der Berechnung der Mikrofonhöhe auf Basis der Kugelquelle am Boden weichen die Messergebnisse mit kleiner werdendem Abstand nach oben ab. Dabei entstehen Pegelüberhöhungen um ca. 3 dB(A). Mit der Berechnung der Mikrofonhöhe auf Basis des Dodekaeders jedoch stimmen die verschiedenen Ergebnisse der Messungen gut überein.

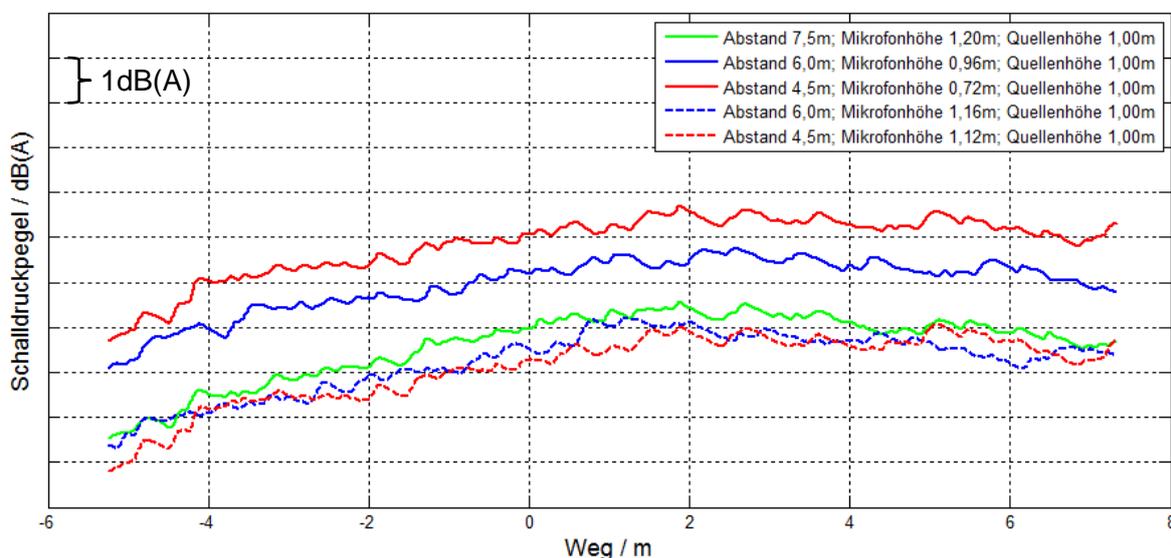


Bild 83: Vergleich der Berechnungsmethoden bei einer Quellenhöhe von 1,00 m

11.4.2.4 Streckenverlängerung mit dem Volldodekaeder

Im Folgenden wird wieder der Aufbau gewählt, wie in Kapitel 8.2.2 betrachtet, um die Erkenntnisse auch bei der Streckenverlängerung zu verifizieren. In Bild 84 sind die Messungen bei einer Kugelhöhe von 0,2 m dargestellt. Hier lässt sich gut erkennen, dass die Skalierung bei kleinen Quellenhöhen, analog zum Halbdodekaeder sehr gute Ergebnisse liefert und die Messstrecke deutlich länger wird.

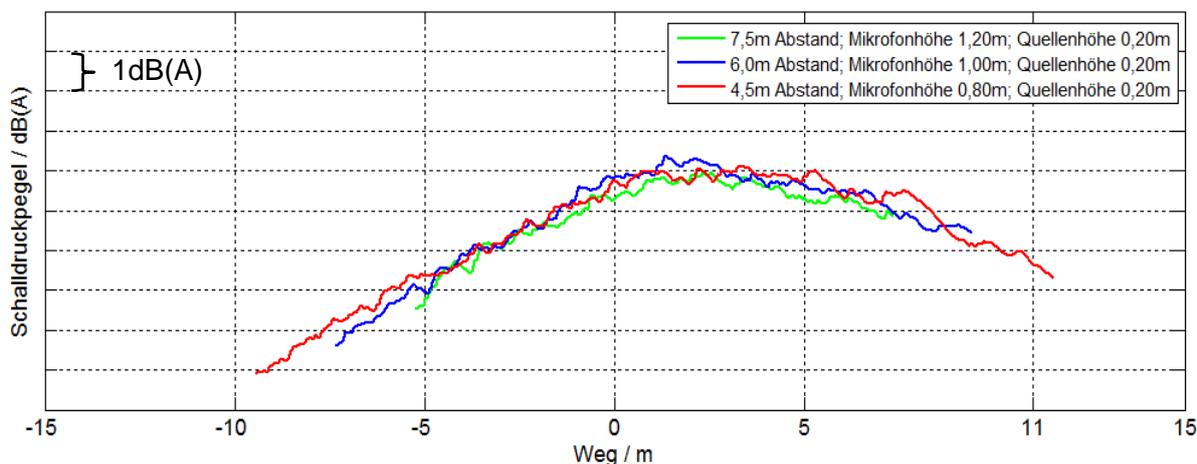


Bild 84: Streckenverlängerung mit Volldodekaeder bei 0,2 m Quellenhöhe nach Kapitel 8.2.2

In Bild 85 sind die Ergebnisse für die Quellenhöhe von 1,0 m dargestellt. Ebenfalls lässt sich zeigen, dass die Messungen mit der Berechnung der Mikrofonhöhe nach

Gl. 40 sehr gute Übereinstimmungen liefern und die Strecke sich ebenfalls durch die Skalierung deutlich verlängern lässt.

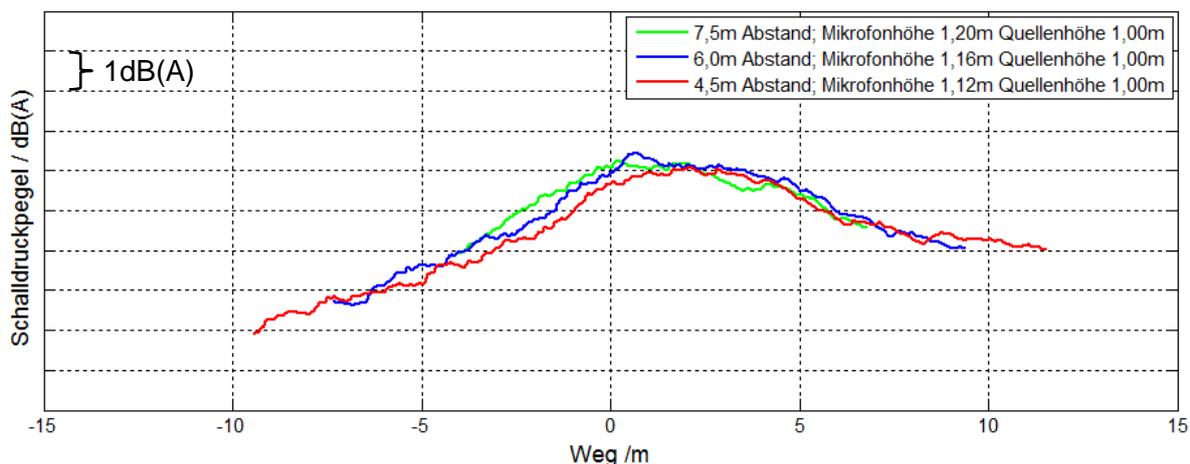


Bild 85: Streckenverlängerung mit Volldodekaeder bei 1,0 m Quellenhöhe nach Kapitel 8.2.2

11.4.2.5 Verschiebung der Quelle

Da auch der Dodekaeder im Koordinatenursprung platziert wird, entsteht durch die Skalierung keine örtliche Verschiebung des Maximums. Wird die Quelle mit einer Höhe von 0,2 m virtuell um einen Meter aus dem Koordinatenursprung verschoben, so lässt sich, wie in Bild 86 dargestellt, ebenfalls die Verschiebung des Maximums erkennen.

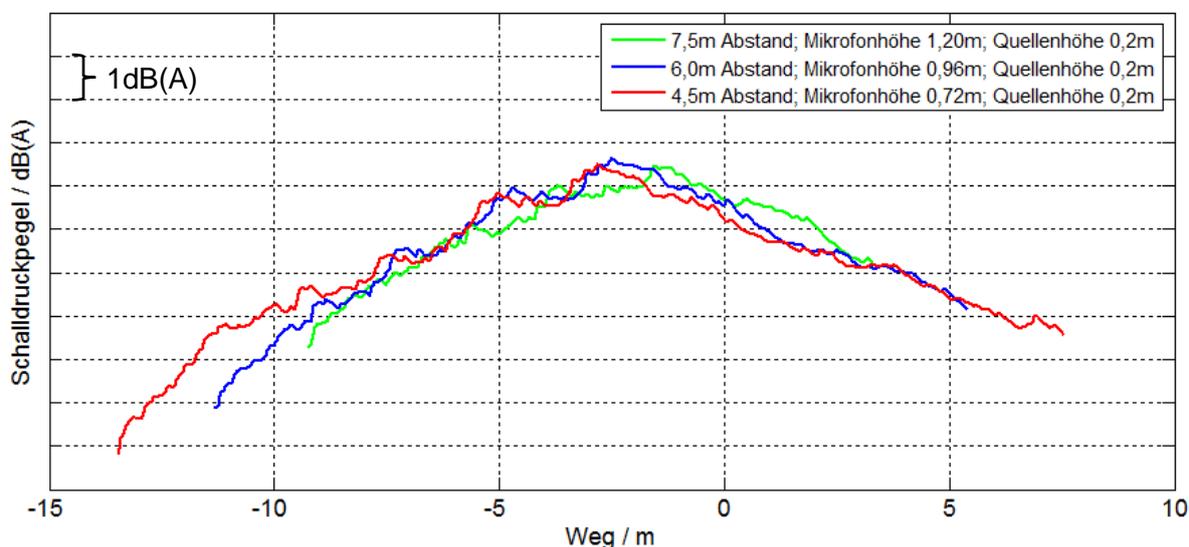


Bild 86: Skalierung mit dem Volldodekaeder auf Bodenhöhe mit verschobener Quelle

In Bild 87 sind die Messungen mit verschobenem Zentrum bei einer Quellenhöhe von 1,0 m dargestellt. Die Mikrofonhöhe wurde dabei mit der Methode für den Volldodekaeder nach Gl. 40 berechnet. Auch hier lässt sich erkennen, dass das Maximum in Abhängigkeit vom Arrayabstand zur Fahrzeugmittellinie verschoben wird.

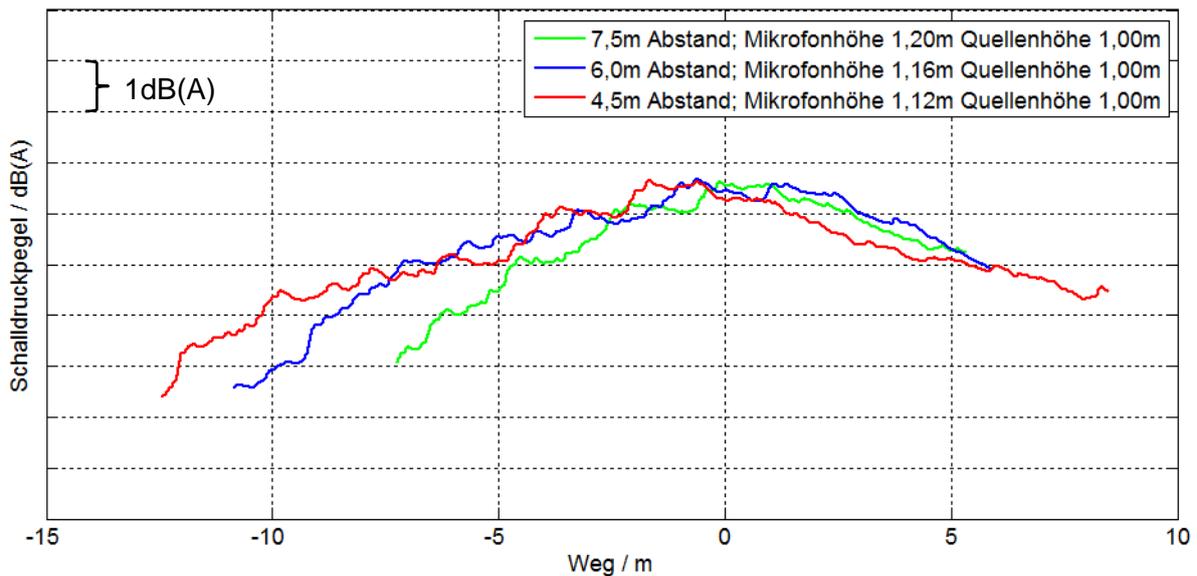


Bild 87: Skalierung mit dem Volldodekaeder auf 1,0 m Höhe mit verschobener Quelle

Mit beiden Quellenhöhen ist bei der Positionierung der Quelle außerhalb des akustischen Zentrums eine Verschiebung des Maximums zu erkennen. Durch die Verschiebung der Quelle, und damit des akustischen Zentrums, wird geometrisch bedingt auch die Messstrecke verschoben. So weist die Messung mit dem Aufbau nach 8.2.2 bei einer Quelle im Ursprung die Messstrecke von -9,5 m bis 12 m und im Vergleich dazu die Messung mit verschobener Quelle eine Messstrecke von -12,5 m bis +9 m auf. Zudem verstärkt sich der Effekt der Verschiebung mit zunehmendem x -Abstand zwischen Mikrofon und akustischen Zentrum.

11.4.3 Zusammenfassung der Erkenntnisse

Wird das Fahrzeug im Gegensatz zu Kapitel 11.3 als Punktschallquelle über dem Boden mit einem Voldodekaeder simuliert, entstehen reflexionsbedingte Effekte.

Die theoretische Betrachtung des Raumwinkelmaßes zeigt, dass die Quellenhöhe und die Mikrofonhöhe in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Quelle und Mikrofon einen Einfluss auf den Schalldruckpegel haben. Der ebenfalls ermittelte Einfluss durch die unterschiedlichen Schallabsorptionsgrade zwischen Straßen und Prüfhalle, ist in der Theorie so gering, dass er vernachlässigt werden kann.

Auf der Basis einer Quelle über dem Boden werden verschiedene Berechnungsmethoden untersucht und eine Methode gezeigt, mit der die Mikrofonhöhe für höhere Quellen berechnet werden kann. In der theoretischen Betrachtung des Raumwinkelmaßes kann die Berechnungsmethode der Mikrofonhöhe vernachlässigt werden, allerdings wird in den Messungen ersichtlich, dass der experimentelle Einfluss wesentlich größer ist. Da das Raumwinkelmaß zum Pegel addiert wird und die ermittelten Werte nur sehr gering voneinander abweichen, erhöht sich der theoretische Pegel um ca. 2,4 dB bis 2,9 dB. Auch der Einfluss der

unterschiedlichen Weglängen zwischen Mikrofon und Punktquelle kann theoretisch vernachlässigt werden, da der Summand für alle Mikrofone sehr ähnlich ist.

Der Einfluss der Reflexion ist in den experimentellen Untersuchungen deutlich ausgeprägter. Anhand der konstanten Vorbeifahrt mittels eines realen Fahrzeuggeräusches kann gezeigt werden, dass durch die Variation der Quellenhöhe der Reflexionsanteil eine wesentlich bedeutendere Rolle spielt als in der Theorie. Wird die Höhe des Dodekaeders erhöht, so verkleinert sich der Reflexionsanteil und der Schalldruckpegel sinkt.

Der Einfluss der Methoden zur Höhenberechnung wird dann mit dem Volldodekaeder quantifiziert. Das Ergebnis der Berechnung auf Basis der gleichen Interferenz nähert sich dabei für Abstände zwischen Quelle und Mikrofon größer 2,5 m dem Ergebnis der Methode auf Basis des Halbdodekaeders an. Die Berechnung mit Hilfe des Dodekaeders liefert für den Messaufbau größere Mikrofonhöhen. Dieser Höhenunterschied wird geometrisch bedingt größer, je höher die Quelle angenommen wird. Die Messungen zeigen, dass die Methode mit dem Halbdodekaeder größere Pegel liefert als die Berechnungsmethode auf Basis des Volldodekaeders. Wird der Mikrofonabstand zur Quelle hin verringert, nimmt der Pegelunterschied zu. Im Gegensatz zur Theorie beträgt die Abweichung eine Größenordnung von ca. 3 dB(A) und ist damit ähnlich groß, wie die in Kapitel 8.3 bei der Messung mit dem realen Fahrzeug identifizierte Abweichung. Werden die gemittelten Pegel mit dem Abstandsgesetz verglichen, so liefert die neue Methode zur Berechnung der Mikrofonhöhe bei einer Punktschallquelle über dem Boden eine wesentlich bessere Skalierbarkeit als die Höhenberechnung analog zum Halbdodekaeder.

Des Weiteren wird gezeigt, dass auch die Skalierung der Messstrecke mit Hilfe eines kleineren Arrayabstandes zur Fahrzeugmittellinie mit dem Halbdodekaeder möglich ist. Der Effekt der Verschiebung des Pegelmaximums tritt auch bei diesen Messungen auf, wenn das akustische Zentrum virtuell verschoben wird.

Zusammengefasst liefern die Messungen mit dem Dodekaeder folgende Erkenntnisse:

- Die Mikrofonhöhe und Quellenhöhe beeinflussen den Schalldruckpegel.
- Quellen über dem Boden liefern in Abhängigkeit von der Höhe einen unterschiedlichen Reflexionsanteil und damit einen Anteil zum Summenpegel.
- Durch die Reflexion entstehen Interferenzen, welche kaum einen Einfluss auf den Summenpegel haben.
- Für Quellen über dem Boden liefert die neue Berechnungsmethode nach Gl. 40 sehr gute Ergebnisse.

- Eine Verschiebung der Quelle aus dem angenommenen akustischen Zentrum verursacht bei der Skalierung eine Verschiebung des Pegelmaximums auf der Abszisse.

Die Messungen auf Basis des Standes der Forschung mit einer Punktschallquelle oberhalb des Bodens zeigen ein ähnliches Verhalten, wie die Messung am realen Fahrzeug. Daraus ergeben sich neue Hypothesen, die am realen Fahrzeug validiert werden:

- Das Fahrzeug verhält sich wie eine Punktschallquelle oberhalb des Bodens.
- Der Messaufbau befindet sich im fahrzeugspezifischen Fernfeld.

11.5 Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Messungen mit künstlichen Schallquellen

Die Messungen mit künstlicher Schallquelle, sowohl mit dem Halbdodekaeder als auch mit dem Volldodekaeder, liefern neue Erkenntnisse. Diese betreffen zum einen die Position des akustischen Zentrums als auch den Umgang mit Schallquellen oberhalb des Bodens und sind nachfolgend noch einmal aufgelistet:

- Die betrachtete Akustikhalle bildet das Halbfreifeld im interessierenden Frequenzbereich sehr gut ab.
- Die Messung erfolgt im Fernfeld, definiert durch die untere Grenzfrequenz.
- Die Quellenhöhe beeinflusst den Schalldruckpegel.
- Durch die Reflexion entstehen Interferenzen, welche kaum einen Einfluss auf den Summenpegel haben bei breitbandigen Geräuschen.
- Eine Verschiebung der Quelle aus dem virtuell angenommenen akustischen Zentrum führt bei der simulierten Vorbeifahrt zu einer Verschiebung des Maximums bei der Skalierung.
- Für Quellen über dem Boden liefert die neue Berechnungsmethode nach Gl. 40 sehr gute Ergebnisse für das lineare Abstandsgesetz.

Da das Fahrzeug keine Schallquelle auf dem Boden ist, kann gezeigt werden, dass der Einfluss der Reflexionen und die Richtcharakteristik mit betrachtet werden muss, um die lineare Skalierung auf Basis der Freifeldausbreitung zu ermöglichen. Daraus folgt, dass die Position sowohl in Fahrzeughöhenrichtung, als auch in Fahrzeughöhe eine wesentlich bedeutendere Rolle spielt, als in den teilweise einfachen Annahmen in der heutigen Literatur. Zudem muss entsprechend der Quellenhöhe die Mikrofonhöhe in Abhängigkeit von der Quellenhöhe bei der Skalierung angepasst werden.

Auf Basis des Standes der Forschung können die nach Kapitel 10 getroffenen Annahmen verifiziert und z.T. falsifiziert werden. Daraus leiten sich die neuen zentrale Hypothesen für die Skalierung der simulierten Vorbeifahrt ab, die im Folgenden am Fahrzeug validiert werden:

- Die Messung erfolgt im Fernfeld.
- Die Messumgebung ist ein Freifeld.
- Das Fahrzeug ist eine Punktschallquelle oberhalb des Bodens.
- Das akustische Zentrum ist fahrzeugspezifisch und muss abhängig davon ermittelt werden.

12 Übertragbarkeit auf das System Fahrzeug

Die Messung der simulierten Vorbeifahrt auf Basis des Standes der Forschung erfolgt unter der Annahme, dass sich das akustische Zentrum im Motormittelpunkt oder an der Fahrzeugfront befindet. Zudem werden die Mikrofonhöhen so skaliert, als wäre das Fahrzeug eine Punktschallquelle auf dem Boden. Anhand Messungen mit dem Halbdodekaeder und dem Volldodekaeder konnten zwei bedeutende Einflussfaktoren identifiziert und quantifiziert werden. Im Folgenden werden diese auf das reale Fahrzeug übertragen.

12.1 Position des akustischen Zentrums

Bei den Messungen nach Kapitel 8 wurde das akustische Zentrum nach Janssen²⁷² in 1,0 m Abstand von der Fahrzeugfront, also im Motorzentrum auf dem Boden angenommen.

Für ein Fahrzeug auf dem Rollenprüfstand kann gezeigt werden, dass sowohl die tieffrequenten Abgasgeräusche (vgl. Kapitel 7.3.2) als auch die Ansaugergeräusche durch die A-Bewertung vernachlässigbar sind. Demzufolge sind die Reifen mit den höherfrequenten Anteilen und der Motor die deutlich dominanteren Schallquellen, welche vom Betrag her etwa gleich groß sind²⁷³.

Daher leitet sich die Frage ab, inwiefern aus den dominierenden Schallquellen (Motor und Reifen) am Fahrzeug die Position einer Summenquelle bestimmt werden kann. Hinzu kommt noch die gesamte Karosserie als Quelle, welche ebenfalls durch die verschiedenen Quellen angeregt wird und Schall abstrahlt. Des Weiteren stellt sich die Frage, wie exakt diese Position überhaupt bestimmt werden muss, um die in der Norm geforderte Messtoleranz einzuhalten. Um hier das Zielsystem noch einmal aufzugreifen, soll eine schnell und einfach anwendbare und möglichst nicht fahrzeuggebundene Methode – im Sinne von Sensoren am Fahrzeug – entwickelt werden. Daher ist es nicht zielführend, sehr aufwendige Verfahren, wie z. B. die Messung von Oberflächenschnellen mittels Laservibrometrie²⁷⁴ oder Messungen mit der akustischen Kamera²⁷⁵ durchzuführen, um die Schallquellenposition exakt zu

²⁷² Janssen et al. 2011

²⁷³ Putner / Lohrmann 2011

²⁷⁴ Albers et al. 2009a

²⁷⁵ Heinz et al. 2005

bestimmen. Es muss lediglich eine Abweichung von kleiner 0,5 dB(A), wie in der DIN ISO 362 vorgeschrieben, erreicht werden²⁷⁶.

Wie im Stand der Forschung gezeigt, sind die dominierenden Schallquellen Ansaugsystem, Motor, Abgasanlage und Reifen, wobei die Schalldruckpegel von Motor und Reifen deutlich größer sind (vgl. Kapitel 2.4).

Für die Validierung wird zur Berechnung der Position des akustischen Zentrums eine stark vereinfachte Annahme getroffen, um eine entsprechende Anwendbarkeit zu gewährleisten.

Da die Reifengeräusche primär in der Reifenaufstandsfläche entstehen, diese allerdings über den gesamten Reifen abstrahlen und, wie in Kapitel 2.4.1.2 beschrieben, ebenfalls im Radkasten reflektiert werden²⁷⁷, wird das akustische Zentrum des Reifens im Radmittelpunkt angenommen. Das akustische Zentrum des Motors wird weiterhin im Motormittelpunkt angenommen, wie in Bild 88 dargestellt.

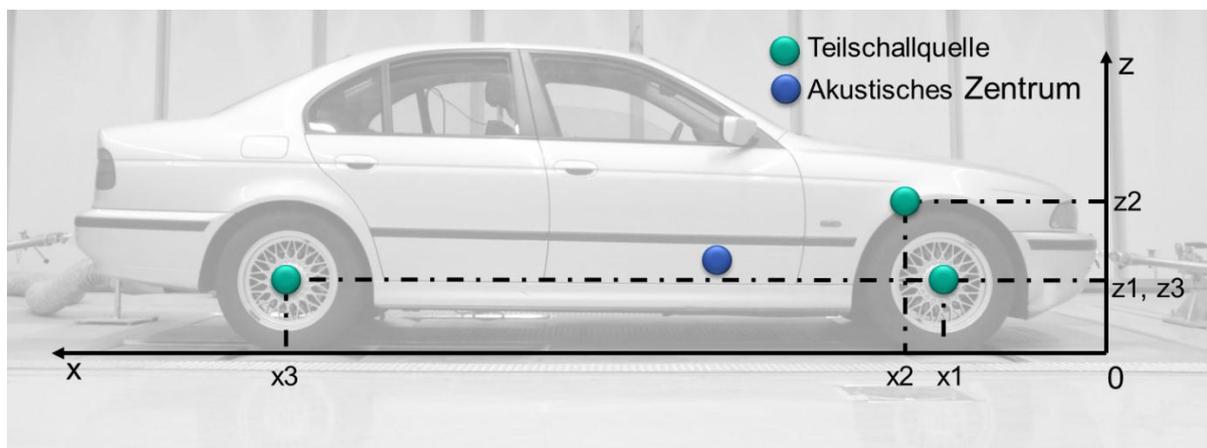


Bild 88: Bestimmung des akustischen Zentrums an einer Mittelklasse-Limousine

Analog zur Berechnung eines Schwerpunktes aus mehreren Massen, wie in der Mechanik, wird das akustische Zentrum, aus der Summe aller Teilschallquellen bestimmt. Hierbei ist jede Teilschallquelle mit einem Schalldruckpegel und einem „Hebelarm“ definiert. Reifen und Motor liefern annähernd den gleichen Beitrag zum Gesamtschalldruckpegel. Außerdem dürfen nach Demmerer²⁷⁸ die Quellen als inkohärent angenommen werden. Die Position des akustischen Zentrums lässt sich dann nach Gl. 41 bestimmen^{279,280}. Da die Schalldruckpegel für verbrennungsmotorische Fahrzeuge ungefähr die gleiche Größenordnung aufweisen,

²⁷⁶ DIN ISO 362: 2009

²⁷⁷ Hoever 2012

²⁷⁸ Demmerer 2002

²⁷⁹ Putner / Lohrmann 2011

²⁸⁰ Kruse, Taherzadeh 2011

ist eine Gewichtung nicht notwendig. Für z. B. rein elektrisch betriebene Fahrzeuge können die Motorgeräusche vom Schalldruckpegel im relevanten Geschwindigkeitsbereich vernachlässigt werden²⁸¹. Damit würde sich die Gleichung auf die Teilschallquellen der Reifen beschränken.

$$\begin{pmatrix} x_Q \\ z_Q \end{pmatrix} = \frac{\sum_{n=1}^m \begin{pmatrix} x_n \\ z_n \end{pmatrix}}{m} \quad \text{Gl. 41}$$

Demzufolge liegt das akustische Zentrum des untersuchten Systems (Fahrzeug mit Frontmotor) bei $\begin{pmatrix} x_Q \\ z_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,81 \\ 0,42 \end{pmatrix}$ m vom Koordinatenursprung entfernt, welches auf dem Boden an der Fahrzeugfront angenommen wird. Für Fahrzeuge mit Mittel- bzw. Heckmotor wird die Schallquelle des Motors entsprechend in der Mitte bzw. im Heck angenommen.

In Bild 89 sind die Ergebnisse der Messung nach Kapitel 8 dargestellt. Für die Auswertung werden die gleichen Rohdaten verwendet und dadurch das akustische Zentrum weiterhin auf dem Boden angenommen, allerdings entsprechend den ermittelten Koordinaten weiter hinten. Die Mikrofonhöhe ist bei diesen Messungen noch mit der Methode der Punktschallquelle auf dem Boden bestimmt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Positionen des Pegelmaximums im Vergleich zu den Messungen nach Kapitel 8.3 annähernd übereinander liegen. Somit bestätigt sich die Annahme, dass die Verschiebung des Maximums durch das im Motormittelpunkt gewählte akustische Zentrum entsteht. Wird das akustische Zentrum deutlich weiter in Richtung Fahrzeugmitte gemäß den berechneten Koordinaten verschoben, so stimmen die Positionen der Maxima gut überein. Durch Berechnung der Mikrofonhöhe auf Basis des Halbdodekaeders sind die Kurven weiterhin nach oben verschoben.

²⁸¹ Dudenhöffer / Hause 2012

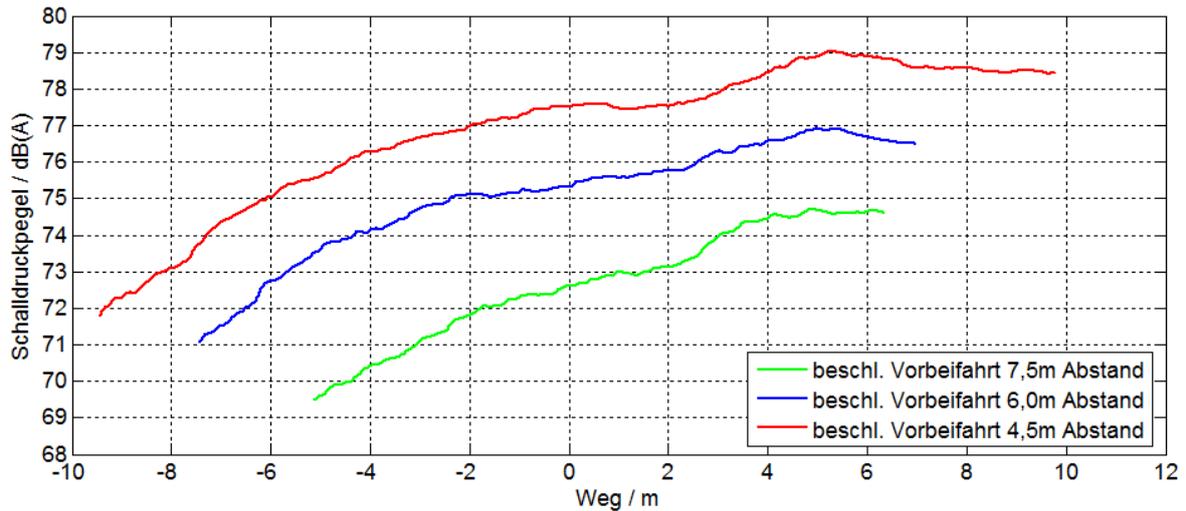


Bild 89: Messung mit akustischem Zentrum in Fahrzeugmitte auf Bodenhöhe

12.2 Höhe des Mikrofonarrays

Für die Berechnung der Mikrofonhöhe darf die Schallquelle nicht auf Bodenhöhe angenommen werden. Für Schallquellen über dem Boden muss, wie in Kapitel 11.4 festgestellt, die Quellenhöhe bekannt sein, um die richtige Mikrofonhöhe bestimmen zu können und damit die Skalierung zulässig ist. Die Mikrofonhöhe muss bei der Messung mit einem realen Fahrzeug immer fahrzeugspezifisch gewählt werden. Im Folgenden wird die Quellenhöhe in den vorher genannten Koordinaten angenommen.

Im Bild 90 und Bild 91 sind die Messergebnisse des Beispielsystems mit dem akustischen Zentrum in den vorher ermittelten Koordinaten für die konstante und beschleunigte Vorbeifahrt dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die neue Mikrofonhöhenberechnung sehr gute Ergebnisse bei der Skalierung liefert. Durch den geringeren Abstand von 4,5 m kann fast die gesamte Messstrecke abgebildet werden. Die Maxima sind mit einer Abweichung von 0,3 dB(A) (entspricht 0,41 %) gleich groß. Ebenfalls stimmen auch die Positionen der Maxima sehr gut überein. Dies kann sowohl bei der konstanten, als auch bei der beschleunigten Vorbeifahrt gezeigt werden. Das Pegelmaximum liegt wie bei den Messungen nach Kapitel 8 ebenfalls bei 73 dB(A) bzw. bei 75 dB(A).

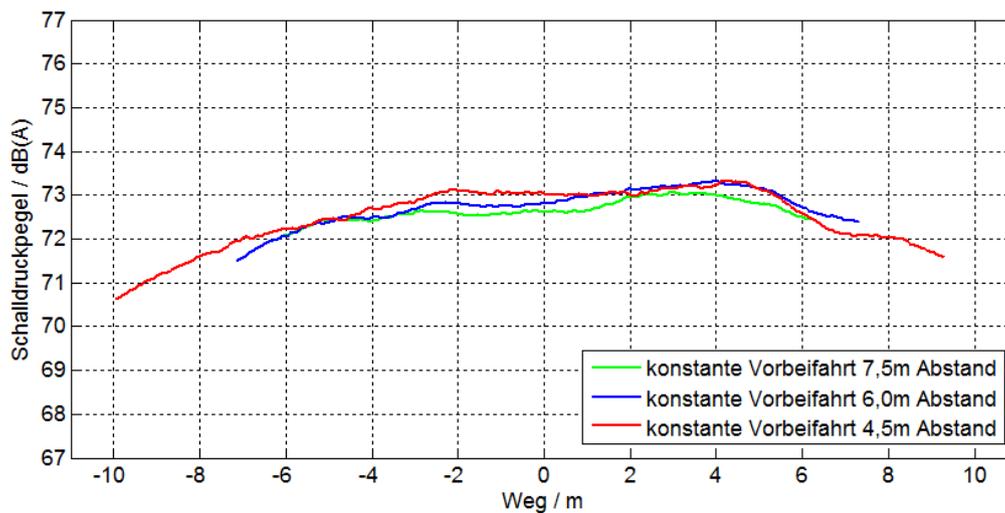


Bild 90: Konstante Vorbeifahrt bei unterschiedlichen Abständen mit neuer Mikrofonhöhe

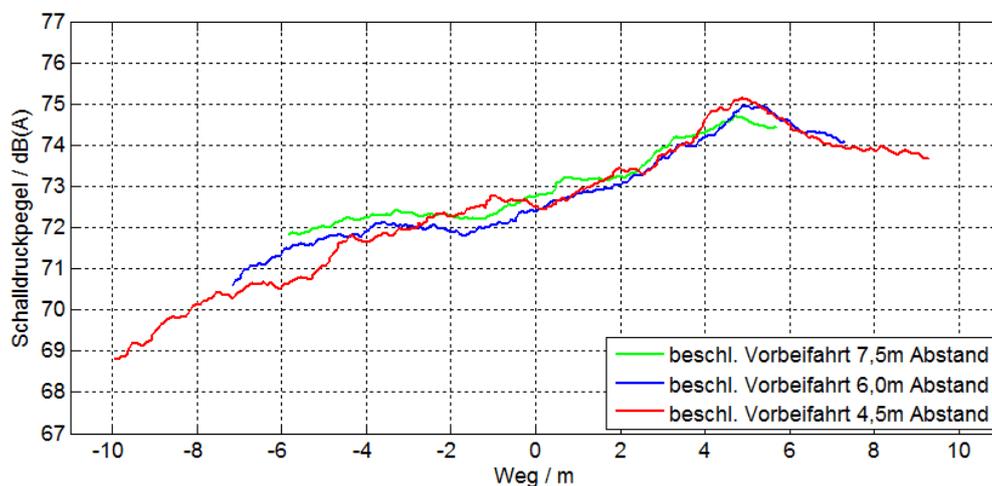


Bild 91: Beschleunigte Vorbeifahrt bei unterschiedlichen Abständen mit neuer Mikrofonhöhe

Auffällig dabei ist, dass zu Beginn der Schalldruckpegel etwas abweicht. Dies lässt sich auf den Filteralgorithmus zurückführen, da dieser rekursiv ist. Die ersten Werte werden entsprechend mit den vorherigen Werten verrechnet. Je nach Startwert des Filters kann dieser zu Beginn unterschiedliche Werte liefern.

Für die Validierung der getroffenen Annahmen und Hypothesen werden im Folgenden zwei weitere Fahrzeugklassen herangezogen.

13 Validierung an weiteren Fahrzeugklassen

Die Übertragbarkeit auf das Beispielsystem in Kapitel 12 zeigt, dass die einfache Positionsbestimmung des akustischen Zentrums sehr gute Ergebnisse liefert.

Für die Validierung der Methode werden zusätzlich zwei Fahrzeuge unterschiedlicher Fahrzeugklasse herangezogen.

13.1 Validierung am Beispiel eines Sport Utility Vehicle (SUV)

Im ersten Schritt wird nach Kapitel 2.4.2 der Mindestabstand für die Freifeldbedingung ermittelt. Da das Fahrzeug sehr lang ist, ergibt sich aus Gl. 25 ein Mindestabstand von $D = 5,38 \text{ m}$ bei einer unteren Grenzfrequenz von 80 Hz. Aus dieser Restriktion, gerundet auf 5,5 m wird mit Hilfe von Gl. 33 eine Arraylänge von 18,6 m bestimmt. In Anbetracht der Hallenlänge von 14,86 m lässt sich bereits sagen, dass die Skalierung nicht die vollständige Messstrecke wiedergeben wird, da die Randbereiche nicht vollständig abgebildet werden können.

Die Quellenposition wird analog wie in Kapitel 12.1 nach Gl. 41 durch die dominierenden Schallquellen zu den Koordinaten $\begin{pmatrix} x_Q \\ z_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,00 \\ 0,56 \end{pmatrix} \text{ m}$ ermittelt, wie in Bild 92 dargestellt.

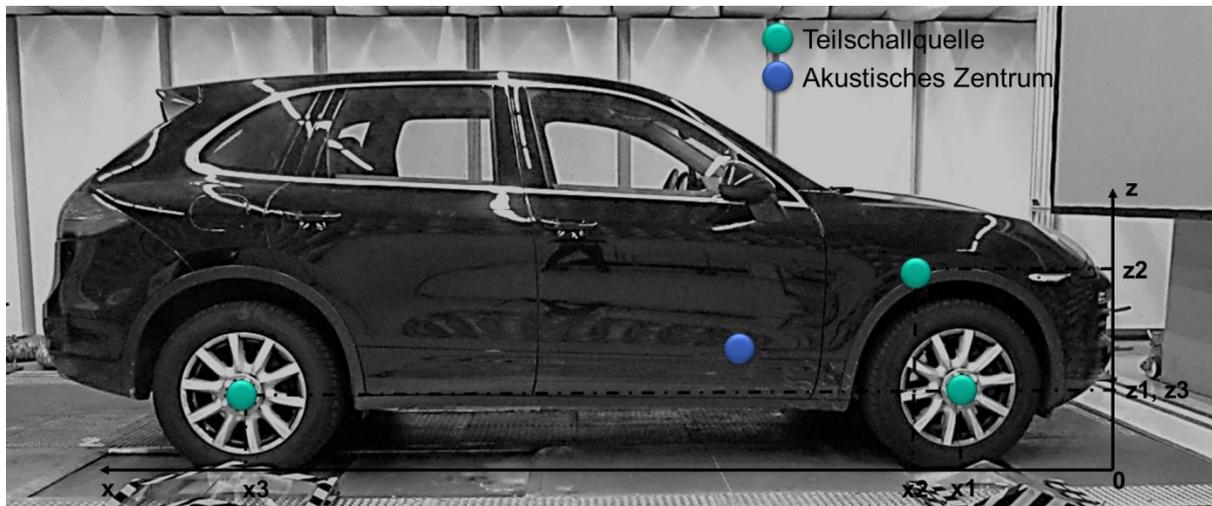


Bild 92: SUV mit den dominierenden Schallquellen

Anhand der Quellenkoordinaten kann für den definierten Arrayabstand die Mikrofonhöhe nach Gl. 40 ermittelt werden.

Aufgrund des Mindestabstandes des Arrays von 5,38 m werden die Messungen mit einem Abstand von 5,5 m und 7,5 m bei der konstanten und beschleunigten Vorbeifahrt verglichen.

In Bild 93 und Bild 94 sind die Ergebnisse der konstanten und beschleunigten Vorbeifahrt dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Ergebnisse gut übereinstimmen.

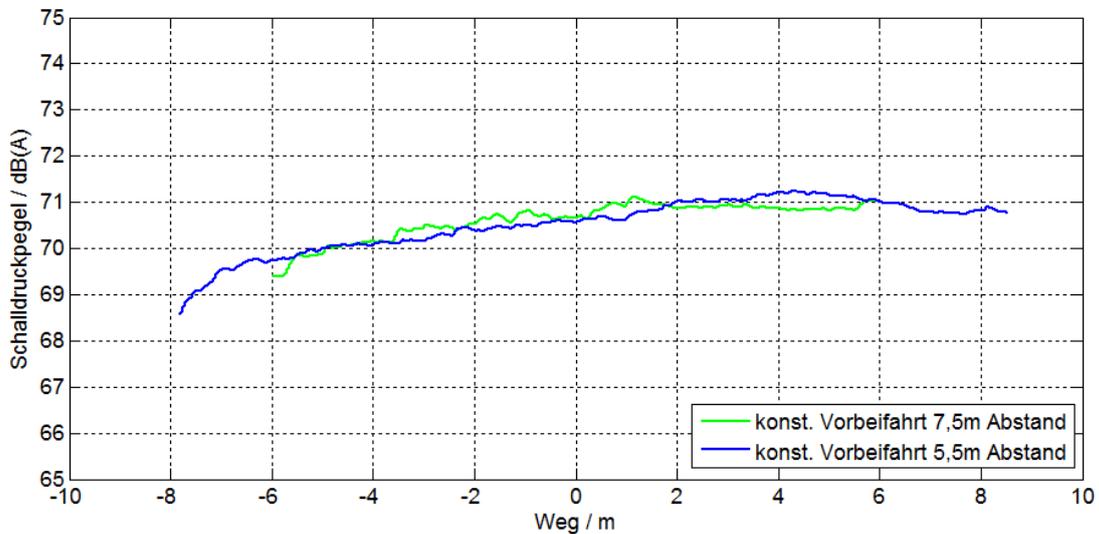


Bild 93: konstante Vorbeifahrt bei unterschiedlichen Abständen

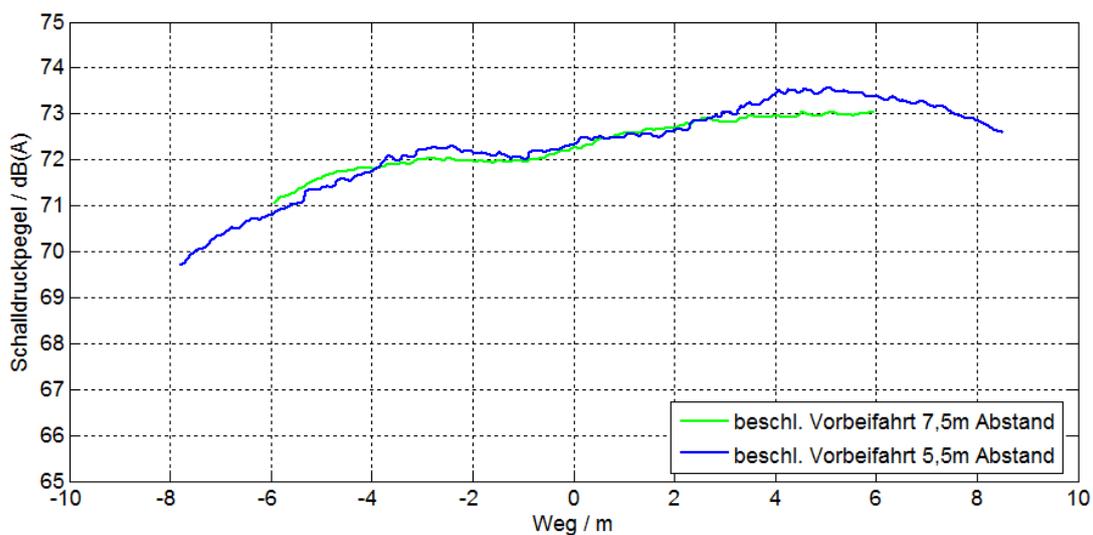


Bild 94: beschleunigte Vorbeifahrt bei unterschiedlichen Abständen

Die größte Abweichung mit ca. 0,5 dB(A) liegt im Maximum bei der beschleunigten Vorbeifahrt. Die vorgeschriebene Toleranz nach DIN ISO 362²⁸² liegt von Lauf-zu-Lauf ebenfalls bei 0,5 dB(A), von Tag-zu-Tag bei 0,9 dB(A) und sogar bei 1,4 dB(A) von Ort-zu-Ort. Damit liegt die Toleranz bei diesen Messungen innerhalb des zulässigen Bereiches. Zudem liefert die Reproduzierbarkeit der Versuchsdurchführung auf dem Prüfstand eine wesentlich kleinere Streuung, wodurch

²⁸² DIN ISO 362: 2009

die Skalierung mit dieser Methode gut anwendbar ist. Der Pegel bei der konstanten Vorbeifahrt ist ebenfalls um ca 2 dB(A) kleiner als bei der beschleunigten Vorbeifahrt.

Interessant ist der Vergleich zur Mittelklasse-Limousine. Obwohl das Fahrzeug stärker motorisiert ist, und durch die Geräusche der Abgasanlage als „sportlicher“ empfunden wird, ist das SUV etwas leiser. Dies liegt zum einen an der A-Bewertung der Messdaten, wodurch der tieffrequente Schall stark gedämpft wird, zum anderen am jüngeren Baujahr des Fahrzeuges und der damit verbundenen Weiterentwicklung im Sound-Design.

13.2 Validierung am Beispiel eines Kleinwagens

Im vorherigen Kapitel konnte gezeigt werden, dass die Übertragbarkeit von einer Mittelklasse-Limousine auf ein SUV möglich ist. Für die weitere Validierung soll daher die Methode an einem weiteren Beispielsystem - einem Kleinwagen - validiert werden.

Nach Kapitel 2.4.2 wird wieder der Mindestabstand berechnet. Hier zeigt sich, dass im Gegensatz zu den bisher betrachteten größeren Fahrzeugen die Restriktion des minimalen Abstandes zwischen Array und Fahrzeug aus der unteren Grenzfrequenz nach Gl. 26 herrührt, und nicht aus der Fahrzeuglänge. Daraus resultiert ein Mindestabstand von 4,25 m bei einer Grenzfrequenz von 80 Hz.

Der Mindestabstand von 4,25 m führt zu einer Arraylänge nach Gl. 33 von 13,6 m. Somit kann in der Halle die vollständige Messstrecke abgedeckt werden.

Die Koordinaten für das akustische Zentrum werden entsprechend der Teilschallquellen zu $\begin{pmatrix} x_Q \\ z_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1,67 \\ 0,43 \end{pmatrix} m$ ermittelt, wie in Bild 95 dargestellt.



Bild 95: Kleinwagen mit den dominierenden Schallquellen

In Bild 96 und Bild 97 sind die skalierten Ergebnisse der konstanten und beschleunigten Vorbeifahrt für die verschiedenen Arrayabstände von 7,50 m, 5,83 m und 4,25 m dargestellt.

Wie schon rechnerisch ermittelt, kann bei einem Abstand von 4,25 m die gesamte Messstrecke abgebildet werden. Die Extremwerte und die Positionen der Pegelmaxima stimmen mit einer geringen Abweichung von 0,4 dB(A) sehr gut überein. Ebenfalls stimmt der Verlauf der Kurven sehr gut überein.

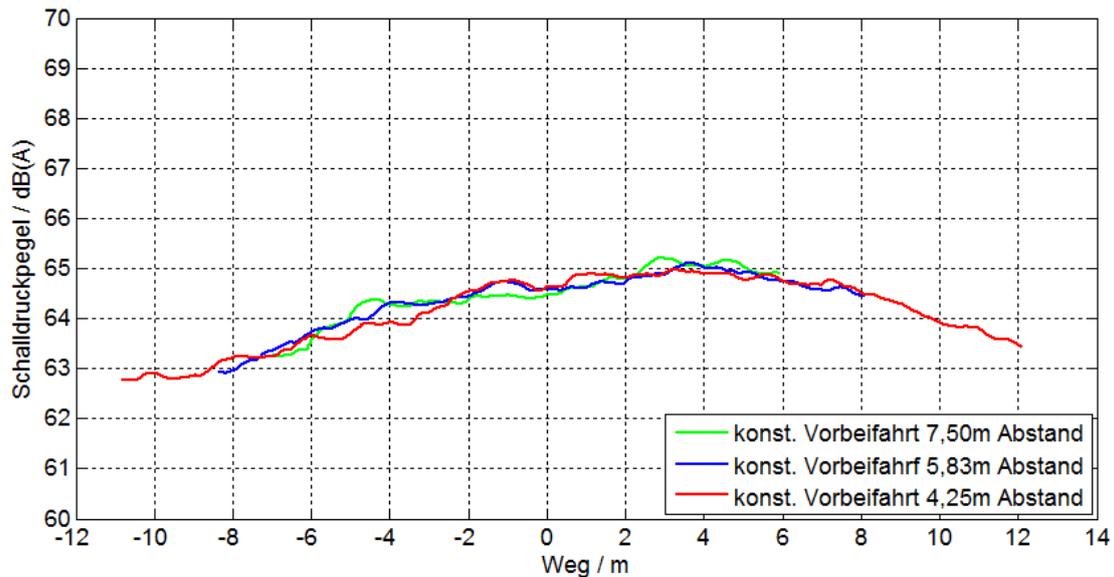


Bild 96: Konstante Vorbeifahrt eines Kleinwagens bei unterschiedlichen Abständen

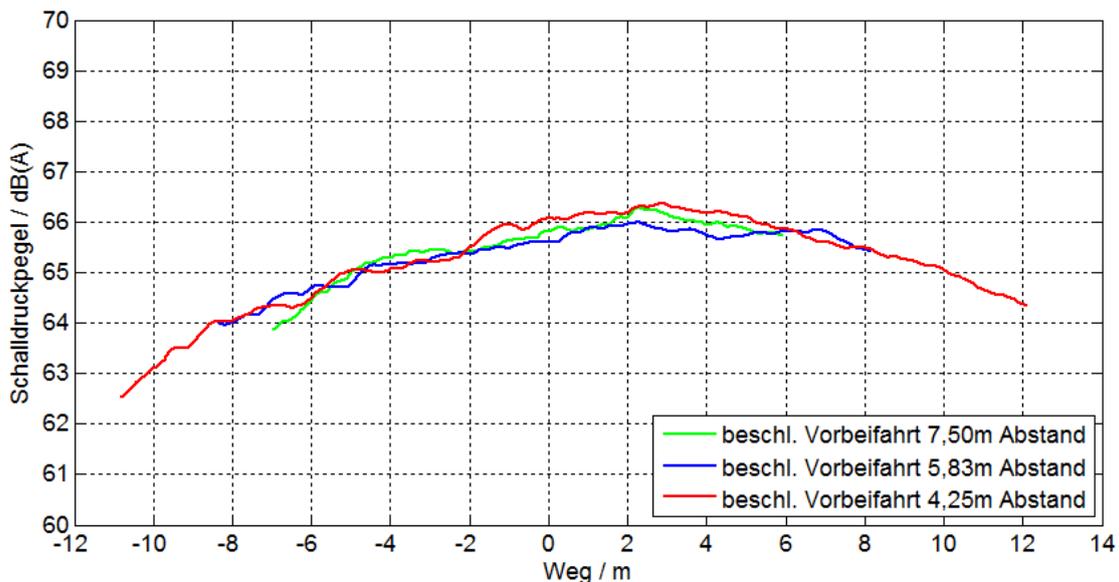


Bild 97: Beschleunigte Vorbeifahrt eines Kleinwagens bei unterschiedlichen Abständen

Der Kleinwagen ist deutlich leiser als die beiden anderen untersuchten Systeme. Der Unterschied zwischen der konstanten und der beschleunigten Vorbeifahrt beträgt nur etwa 1 dB(A).

13.3 Zusammenfassung

In den Kapiteln 12.1 bis 13.2 kann anhand der Übertragbarkeit und der Validierung an zwei weiteren Systemen bestätigt werden, dass die Skalierung unter Berücksichtigung der Position des akustischen Zentrums und der daraus resultierenden Mikrofonhöhe sehr gut möglich ist.

Dazu werden folgende Annahmen bestätigt:

- Die Position des akustischen Zentrums ist ausschlaggebend für die Position und Höhe des Pegelmaximums.
- Die Höhe des akustischen Zentrums beeinflusst die Mikrofonhöhe.
- Das akustische Zentrum kann mit einer guten Näherung auf Basis der Teilschallquellen Reifen und Motor nach Gl. 41 bestimmt werden.

Damit konnte gezeigt werden, dass die Skalierung sehr gut möglich ist für folgende Annahmen:

- Die Messung erfolgt im Fernfeld.
- Die Messumgebung ist ein Freifeld.
- Das akustische Zentrum des Fahrzeuges liegt im berechneten Zentrum.
- Die Mikrofonhöhe muss auf Basis des akustischen Zentrums berechnet werden.

14 Teilhandlungssysteme für die simulierte Vorbeifahrt in kleinen Hallen

Die Arbeit gliedert sich im XiL-Framework nach Albers in das Vehicle-in-the-Loop Layer ein. Das bedeutet, die Unit-Under-Test ist das Gesamtfahrzeug, zum einen als reales Fahrzeug, zum anderen virtuell, da das Schallfeld des Fahrzeuges mittels Punktschallquellen simuliert wird. Der Fokus liegt dabei auf der Simulation der Umwelt und des Fahrzeuges. Für die Erarbeitung der Teilhandlungssysteme wurde der SPALTEN Prozess durchlaufen.

In der Situationsanalyse wird in Kapitel 7 exemplarisch der IPEK – Akustikrollenprüfstand auf die Eignung der simulierten Vorbeifahrt geprüft. Dabei werden nicht nur die geometrischen und akustischen Eigenschaften der Halle beleuchtet, sondern auch die Nebengeräusche, wie Prüfstandsgeräusche und Geräusch der Abgasabsaugung, untersucht. In Kapitel 8 werden die Messergebnisse mit einem realen Fahrzeug der simulierten Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray im Freifeld für unterschiedliche Abstände zwischen Quelle und Mikrofon aufgezeigt. Dabei kann gezeigt werden, dass die Messstrecke geometrisch bedingt verlängert werden kann, wenn der Abstand zwischen Fahrzeugmittellinie und Mikrofonarray kleiner wird. Die Messung nach dem Stand der Forschung legt folgende Annahmen zugrunde:

- Die Messung erfolgt im Fernfeld.
- Die Messumgebung ist ein Freifeld.
- Das Messobjekt ist eine Punktschallquelle auf dem Boden.
- Das akustische Zentrum befindet sich im Motormittelpunkt.

Es lässt sich zeigen, dass die Skalierung mit diesen Annahmen systematische Fehler mit sich bringt. Zum einen kann, neben der virtuellen Streckenverlängerung, eine Verschiebung des Maximums festgestellt werden, zum anderen steigt der Schalldruckpegel mit kleiner werdendem Abstand zwischen Fahrzeug und Mikrofonarray.

Für die Problemeingrenzung wird in Kapitel 11 mit Hilfe von künstlichen Schallquellen das Fahrzeug als Punktschallquelle simuliert, um die Komplexität des Systems auf bekannte Eigenschaften zu reduzieren. Durch die Simulation des Fahrzeuges als Punktschallquelle können die Annahmen verifiziert bzw. falsifiziert, um zu sehen, welcher Fehler durch welche Annahme entsteht. Aufbauend auf diesen Grundlagen werden in diesem Kapitel zwei Teilhandlungssysteme für den

Fahrzeugentwicklungsprozess beschrieben. Dies beinhaltet zum einen die Überprüfung einer Halle und zum anderen, wie die Messung der simulierten Vorbeifahrt auf einem Rollenprüfstand in kleine Hallen skaliert werden kann.

Für die simulierte Vorbeifahrt im Kontext des XiL-Frameworks ist die Unit-Under-Test das Gesamtfahrzeug, welches in Wechselwirkung zum System Fahrer, Umwelt und Manöver und Testfällen steht. Die Umweltsimulation bei der simulierten Vorbeifahrt in der Akustikhalle im Sinne des akustischen Feldes spielt dabei eine bedeutende Rolle. Die Umgebung muss so simuliert werden, dass die Prüfumgebung ein Halbfreifeld im interessierenden Frequenzbereich widerspiegelt, was durch eine akustische Auskleidung der Halle mit Absorbern realisiert werden kann. Im Folgenden werden daher die neuen Erkenntnisse über das System Fahrer, Fahrzeug und Umwelt bezüglich der simulierten Vorbeifahrt in das XiL-Framework eingegliedert.

14.1 System Fahrzeug

Das System Fahrzeug als Unit-Under-Test liefert für die Skalierbarkeit den Großteil der akustischen und physikalischen Grenzen. Da die Messung im Freifeld erfolgen muss, ist das Fahrzeug mit all seinen Teilschallquellen maßgebend für den Frequenzbereich und damit für den Mindestabstand D . Für die Skalierung muss das Schallfeld des Fahrzeuges inkohärent sein und eine ebene Wellenfront ausbilden, damit es als Punktschallquelle angenommen werden darf. Aufgrund dieser Tatsache ergibt sich in Abhängigkeit vom Fahrzeug ein Mindestabstand zwischen Array und Fahrzeug, der durch die Grenzfrequenz und durch den Abstand der Teilschallquellen definiert ist. Damit diese Annahmen erfüllt sind, müssen folgende drei Bedingungen, in Abhängigkeit von der unteren Grenzfrequenz f_G bzw. der Grenzwellenlänge λ_G und der Schallgeschwindigkeit c , eingehalten werden:

$$1. \quad D > \text{Abstand der Teilschallquellen} \quad \text{Gl. 42}$$

$$2. \quad D > \frac{(\text{Abstand der Teilschallquellen})^2}{\lambda_G} \quad \text{Gl. 43}$$

$$3. \quad D > \lambda_G = \frac{c}{f_G} \quad \text{Gl. 44}$$

Die Messungen und die Literatur zeigen, dass es zulässig ist, dass „viel größer“ durch das „mindestens größer“ zu ersetzen. Daraus ergeben sich die Restriktionen, mit welchem Mindestabstand das Array zur Fahrzeugmittellinie platziert werden darf, um zum einen die Fernfeldbedingung und zum anderen die Annahme der ebenen Wellenfront zu erfüllen.

In Bild 98 sind die Bedingungen und damit der Mindestabstand zwischen Fahrzeug und Array in Abhängigkeit von unterschiedlichen Fahrzeuglängen bei einer unteren Grenzfrequenz von 80 Hz dargestellt. Dabei wird deutlich, dass unabhängig von der Hallengeometrie (bei gleicher unterer Grenzfrequenz) entweder die zweite oder die dritte Restriktion nach Gl. 43 bzw. Gl. 44 ausschlaggebend ist. Ferner ist zu erkennen, dass die maximale Fahrzeuglänge theoretisch nur 5,65 m sein darf, da ansonsten bei dem Normabstand von 7,5 m die o. g. Bedingungen nicht mehr erfüllt werden können. Damit lassen sich mit wenigen Ausnahmen, wie z.B. der Maybach von Mercedes-Benz, alle Fahrzeuge untersuchen. Theoretisch gesehen ist es damit nicht möglich, mit diesen großen Fahrzeugen die simulierte Vorbeifahrt durchzuführen, da die Bedingung der Punktschallquelle bereits bei dem Mikrofonabstand von 7,5 m nicht mehr erfüllt ist. Dies kann allerdings durch eine Verschiebung der unteren Grenzfrequenz in einem gewissen Rahmen kompensiert werden.

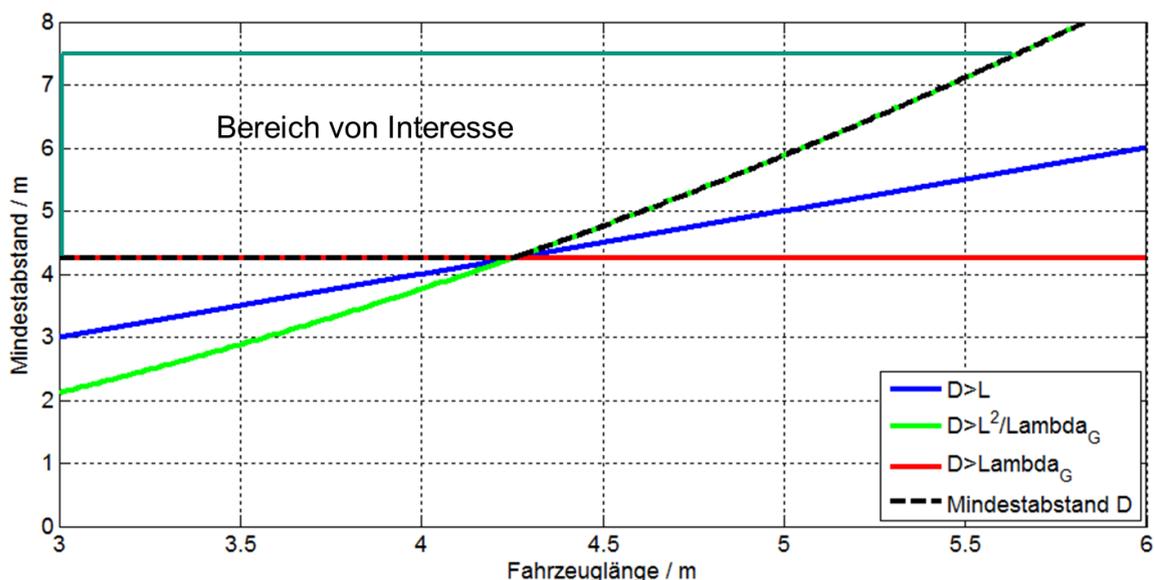


Bild 98: Gegenüberstellung der Restriktionen aus dem System Fahrzeug

Unter Einbezug dieser Kriterien kann die Annahme getroffen werden, dass das Fahrzeug eine Punktschallquelle bestehend aus der Summe aller Teilschallquellen ist und die Messung im Fernfeld stattfindet.

Für das System Fahrzeug wird zu Beginn der Arbeit angenommen, dass das Fahrzeug als eine Punktschallquelle auf dem Boden simuliert werden kann. Messungen mit dem Halbdodekaeder zeigten, dass die Skalierung für eine Quelle auf dem Boden sehr gute Ergebnisse liefert. Da ein Fahrzeug jedoch Schallquellen oberhalb des Bodens besitzt, entstehen durch Reflexionen Schallanteile, die sich nicht mehr auf Basis der Freifeldbedingung skalieren lassen. Daher muss das Fahrzeug in der Modellbildung als Punktschallquelle oberhalb des Bodens betrachtet werden.

Für die Berechnung der simulierten Vorbeifahrt wird das Fahrzeug als eine bewegte Punktschallquelle simuliert. Nach Janssen et al.²⁸³ und Ryu et al.²⁸⁴ befindet sich diese im akustischen Zentrum des Fahrzeugs entweder im Motormittelpunkt oder an einer Ecke des Fahrzeuges. Messungen bei der Skalierung zeigen allerdings eine Verschiebung des Maximums. Diese Verschiebung ist geometrisch bedingt und weist darauf hin, dass die Punktschallquelle nicht im angenommenen akustischen Zentrum liegt und damit außerhalb des Koordinatenursprungs für die Berechnung. Es kann gezeigt werden, dass die Verschiebung des Maximums nicht mehr auftritt, wenn die Lage des akustischen Zentrums richtig definiert wird.

Für die Bestimmung der Position des akustischen Zentrums wird - analog zur Mechanik - die Summenschallquelle aus den Teilschallquellen Reifen und Motor nach Gl. 45 gebildet. Die Abgasgeräusche und Ansaugergeräusche können aufgrund der kleineren Schalldruckpegel und der A-Bewertung vernachlässigt werden.

$$\begin{pmatrix} x_Q \\ z_Q \end{pmatrix} = \frac{\sum_{n=1}^m \begin{pmatrix} x_n \\ z_n \end{pmatrix}}{m} \quad \text{Gl. 45}$$

Abschließend gelten für das System Fahrzeug folgende Eigenschaften:

- Das Fahrzeug kann ab einem frequenzabhängigen Mindestabstand als Punktschallquelle betrachtet werden.
- Das Fahrzeug ist eine Punktschallquelle oberhalb des Bodens.
- Das akustische Zentrum befindet sich in „Schwerpunkt“ der Teilschallquellen und kann vereinfacht nach Gl. 45 berechnet werden.

14.2 System Umwelt

Ein großer Anteil der Randbedingungen wird durch die Messumgebung, d. h. sowohl durch die geometrischen und akustischen Eigenschaften der Akustikhalle, als auch durch den Prüfstand festgelegt, welche im Folgenden verallgemeinert dargestellt werden.

14.2.1 Rollenprüfstand

Grundsätzlich muss der Prüfstand selbst in der Akustikhalle schwingungstechnisch entkoppelt sein, damit möglichst wenige Störgeräusche durch den Betrieb entstehen. Nach Genuit²⁸⁵ erfüllen in der Regel alle neuen Akustikprüfstände diese Anforderung.

²⁸³ Janssen et al. 2011

²⁸⁴ Ryu et al. 2006

²⁸⁵ Genuit 2010

Um dies zu überprüfen, müssen im Nahfeld sowohl die Leerlaufgeräusche des Prüfstandes, als auch die Geräusche unter Last und die der Absauganlage gemessen werden. Diese müssen mindestens 10 dB kleiner sein, als die zu messenden Geräusche des Fahrzeugs bei der simulierten Vorbeifahrt. In Kapitel 7 werden diese Untersuchungen exemplarisch für den IPEK – Akustikrollenprüfstand durchgeführt. Wie hier zu erkennen ist, sind die Geräusche durch den Prüfstandsbetrieb deutlich kleiner als das zu messende Fahrzeuggeräusch.

Des Weiteren muss der Prüfstand eine Mindestleistung besitzen, um eine Beschleunigung mit Fahrzeug von 2 m/s zu erreichen, um die notwendigen Manöver und Testfälle durchführen zu können. Diese notwendige Leistung kann durch das Drehmoment des Prüfstands nach Gl. 46 ermittelt werden. Diese sehr konservative Abschätzung ist zulässig, da das Fahrzeug bei der beschleunigten Vorbeifahrt die Beschleunigung der Rolle unterstützt.

$$a_{max} = \frac{M_{Prüfstand}}{J_{Rolle}} \cdot r_{Rolle} \quad \text{Gl. 46}$$

Dies kann auch experimentell, anhand der gemessenen Beschleunigung auf dem Prüfstand validiert werden.

14.2.2 Grenzfrequenz der Halle

Ein bedeutender Aspekt für die Simulation der Umwelt ist die akustische Verkleidung der Prüfhalle, da diese entscheidend für die untere Grenzfrequenz ist und dadurch der Frequenzbereich für die Halbfreifeldbedingung definiert wird. Die untere Grenzfrequenz wird nach DIN EN ISO 3745²⁸⁶ bestimmt. Auf Basis dieser kann entsprechend das Freifeld und daraus der möglich messbare Frequenzbereich des Fahrzeuges abgeleitet werden, innerhalb dessen die physikalische Gesetzmäßigkeit der Schallausbreitung im Freifeld zulässig ist (Gl. 47).

$$f_{GrenzUnten} \leq f_{Messung} \leq f_{GrenzOben} \quad \text{Gl. 47}$$

Die untere Grenzfrequenz definiert ebenfalls den Mindestabstand des Arrays zur Akustikverkleidung. Er muss mindestens $\frac{\lambda_G}{4}$ betragen, wodurch der verfügbare Abstand zwischen Fahrzeug und Hallenwand kleiner wird^{287,288}.

²⁸⁶ DIN EN ISO 3745:2009

²⁸⁷ Bay et al. 2003

²⁸⁸ DIN ISO 362: 2009

14.2.3 Maximaler Abstand des Arrays

Für die Abbildung der gesamten Messstrecke muss entweder die Halle eine Mindestlänge von 20 m zuzüglich der Fahrzeuglänge haben, oder das Array mit einem Abstand kleiner 7,5 m platziert werden. Die Mindestlänge der Halle bzw. der notwendig Abstand des Arrays zum Fahrzeug lässt sich nach Gl. 48 bestimmen.

$$L_A = x_{1,D} - x_{n,D} = \frac{D}{7,5m} \cdot (10m + s) + \frac{D}{7,5m} \cdot (10m + L - s) = \frac{D}{7,5m} \cdot (20m + L) \quad \text{Gl. 48}$$

Damit kann geprüft werden, welcher maximale Abstand eingehalten werden muss, damit die Messstrecke vollständig abgebildet wird. Hier muss beachtet werden, dass der Abstand größer ist als der Mindestabstand durch die untere Grenzfrequenz für das Fernfeld des Systems Fahrzeug.

14.2.4 Mikrofonhöhe

Werden die minimalen Abstände resultierend aus dem System Fahrzeug eingehalten, wie in Bild 98 dargestellt, kann das Fahrzeug als Punktschallquelle angenommen werden. In den Untersuchungen wird gezeigt, dass die Skalierung auf der Basis der Punktschallquelle auf dem Boden am realen System allerdings nicht zulässig ist, da durch die Quelle oberhalb des Bodens Reflexionen entstehen und damit die Schallausbreitung nicht mehr der Freifeldbedingung unterliegt. Die dadurch entstehenden Reflexionen sind maßgeblich von der Quellenhöhe beeinflusst. Je höher die Quelle, desto niedriger ist der gemessene Schalldruckpegel bei konstanter Schallleistung der Quelle.

Um die Reflexionen zu berücksichtigen, muss die Mikrofonhöhe fahrzeugspezifisch in Abhängigkeit von der Höhe des ermittelten akustischen Zentrums berechnet werden. Messungen mit dem Vollandodekaeder zeigen, dass die Mikrofonhöhe auf Basis der Schallrichtung sehr gute Ergebnisse liefert. Daher muss bei kleineren Abständen die Mikrofonhöhe in Abhängigkeit vom System Fahrzeug nach Bild 99 und Gl. 49 bestimmt werden.

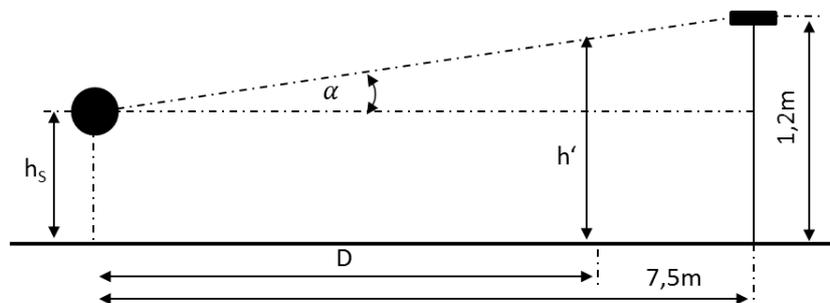


Bild 99: Beziehung zur Berechnung der Mikrofonhöhe für Schallquellen oberhalb des Bodens

$$h' = (1,2m - h_s) \cdot \frac{D}{7,5m} + h_s = 0,16 \cdot D + \left(1 - \frac{D}{7,5m}\right) \cdot h_s \quad \text{Gl. 49}$$

14.2.5 Mindesthallengröße

Das System Fahrzeug stellt durch den notwendigen Mindestabstand des Arrays zum Fahrzeug indirekte Forderungen an die Hallenbreite und damit auch an die Hallenlänge. Für die Abbildung der gesamten Messstrecke lassen sich die erforderlichen Grenzwerte von Hallenlänge und Hallenbreite in Abhängigkeit von der Fahrzeuglänge bei einer Grenzfrequenz, wie in Bild 100 gezeigt, darstellen. Die Mindestbreite bezieht sich dabei auf den Abstand der Fahrzeugmittellinie bis zur akustischen Einhausung. Es ist zu beachten, dass die Kurven Grenzbedingungen darstellen.

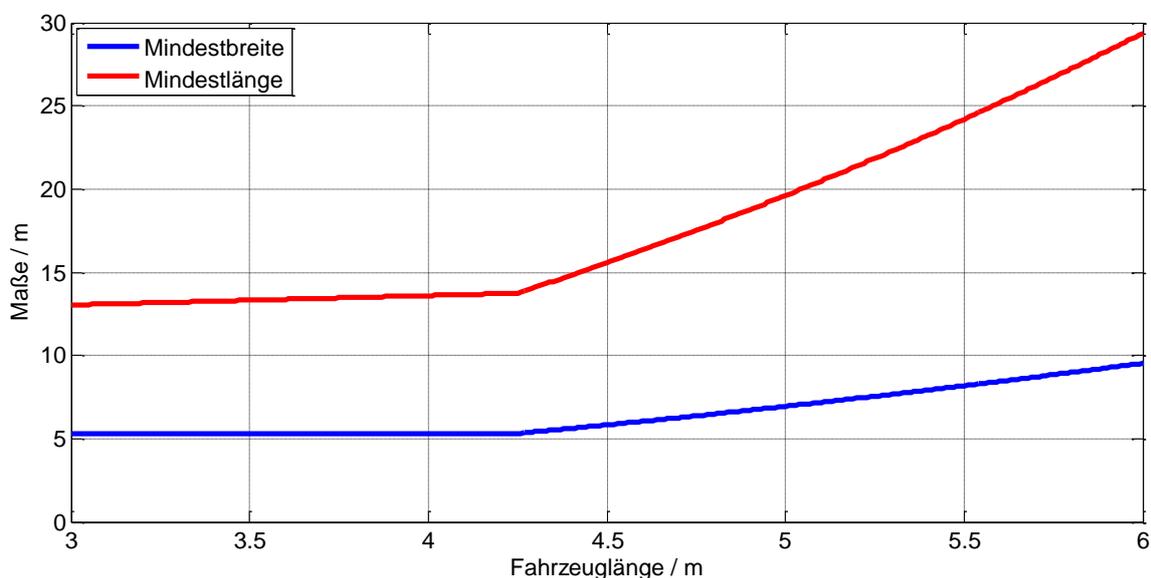


Bild 100: Notwendige Hallenbreite und Hallenlänge in Abhängigkeit von der Fahrzeuglänge

Diese Angaben stellen die Mindestgrenzgröße der Akustikhalle für eine untere Grenzfrequenz von 80 Hz dar, da hier der Abstand zur Akustikverkleidung ebenfalls mit berücksichtigt wird. Wird die untere Grenzfrequenz geändert so ändern sich ebenfalls die Abstände und die Restriktionen aus dem System Fahrzeug. Dabei ist zu beachten, dass die Hallenlänge und -Breite nicht nur von der Fahrzeuglänge abhängen, sondern wie aus Gl. 50 und Gl. 51 ersichtlich auch eine Funktion von Fahrzeuglänge, Grenzfrequenz und Abstand sind.

$$\text{Mindestbreite} = f(L, f_G, D) = \frac{1}{4} \cdot \frac{c}{f_G} + D(L, f_G) \quad \text{Gl. 50}$$

$$\text{Mindestlänge} = f(L, f_G, D) = \frac{D(L)}{7,5m} \cdot (20 + L(f_G)) \quad \text{Gl. 51}$$

Wird der Mindestabstand durch die Randbedingungen nach Gl. 42, Gl. 43 und Gl. 44 erweitert, lässt sich die Mindestlänge und Mindestbreite der Halle in Abhängigkeit von der Fahrzeuglänge und der Grenzfrequenz berechnen, wie in Bild 101 dargestellt.

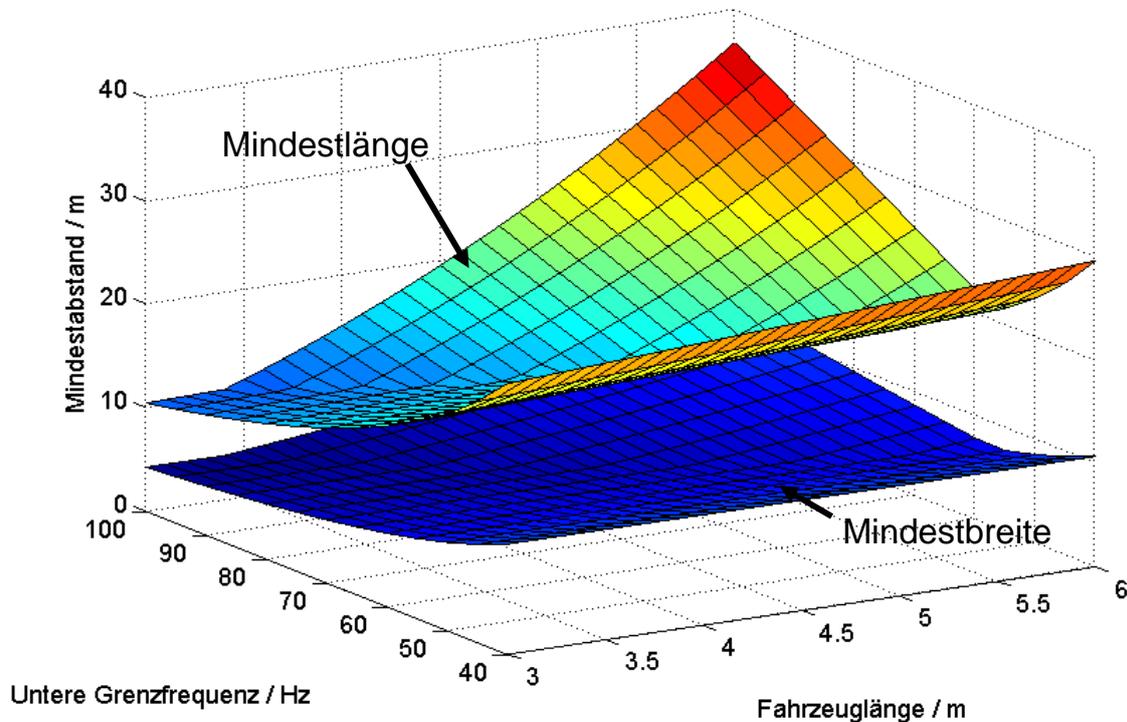


Bild 101: Mindestbreite und Mindestlänge in Abhängigkeit von der unteren Grenzfrequenz

14.3 System Fahrer

Der Fahrer kann bei der Messung sowohl real als auch virtuell sein. Der Vorteil an der ortsfesten Messung auf dem Prüfstand liegt im sicheren Betrieb und der Integration eines virtuellen Fahrers, um eine sehr hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Zudem liegt der Vorteil auf einer möglichen Automatisierung und zustandsüberwachten Manöverdurchführung, was für alternative neuartige Antriebsstrangtopologien von großer Bedeutung sein wird. Für die Skalierung selbst spielt der Fahrer keine Rolle.

14.4 Zusammenfassung

Aus den genannten Randbedingungen und Restriktionen für Fahrer, Fahrzeug und Umgebung können zwei Teilhandlungssysteme für den Fahrzeugentwicklungsprozess abgeleitet werden. Diese beinhalten zum einen die Überprüfung einer Akustikhalle mit einem Rollenprüfstand in der Projektierung und zum anderen den Prozess für die Messung der simulierten Vorbeifahrt in kleinen Akustikhallen.

In Bild 102 ist der Ablaufplan für die Prüfung der Eignung einer Halle verallgemeinert dargestellt, welche Anforderungen notwendig sind, damit die simulierte Vorbeifahrt

durchgeführt werden kann. Die Halle muss die Freifeldbedingung und damit die freie Pegeldämpfung ermöglichen. Allgemein lässt sich die Mindestabmessungen in Abhängigkeit von der Grenzfrequenz nach Bild 101 ermitteln, die notwendig sind um die simulierte Vorbeifahrt durchzuführen. Zudem werden nicht nur die Grenzfrequenzen der Halle und die Pegeldämpfung überprüft und berücksichtigt, sondern auch die Nebengeräusche des Prüfstand, welche um mindestens 10 dB kleiner sein müssen als das zu messende Fahrzeuggeräusch.

In Bild 103 ist der Ablaufplan für die Vorgehensweise für die Messung in kleinen Hallen dargestellt. Wichtig dabei ist, dass die Frequenzen einen Großteil der Restriktionen festlegen. Das System Fahrzeug muss als Punktschallquelle oberhalb des Bodens angenommen werden, damit die Skalierung möglich ist. Auf dieser Basis muss in Abhängigkeit von der berechneten Position des akustischen Zentrums des Fahrzeuges die Mikrofonhöhe bestimmt werden.

Abschließend gelten allgemein für die Skalierung der simulierten Vorbeifahrt mittels Messung im Fernfeld folgende Eigenschaften:

- Die Messumgebung ist ein Halbfreifeld, definiert durch die untere Grenzfrequenz.
- Die Prüfstandsgeräusche sind um mindestens 10 dB(A) kleiner als die zu messenden Geräusche.
- Die Messung mittels Array erfolgt im Fernfeld, welches abhängig von der unteren Grenzfrequenz der Systeme Umwelt und Fahrzeug ist.
- Das System Fahrzeug ist eine Punktschallquelle im Raum. Somit müssen Reflexionsanteile bei der Skalierung berücksichtigt werden.
- Die Punktschallquelle liegt im akustischen Zentrum. Die Position des akustischen Zentrums kann hinreichend genau auf Basis der Teilschallquellen Reifen und Motor berechnet werden.
- Die Mikrofonhöhe muss in Abhängigkeit von der Höhe des akustischen Zentrums berechnet werden.

Werden alle diese Punkte beachtet, so lässt sich die zentrale Hypothese dieser Arbeit bestätigen, dass es möglich ist, die Messung der simulierten Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray im Fernfeld auf einem Rollenprüfstand in eine kleinere Akustikhalle zu skalieren.

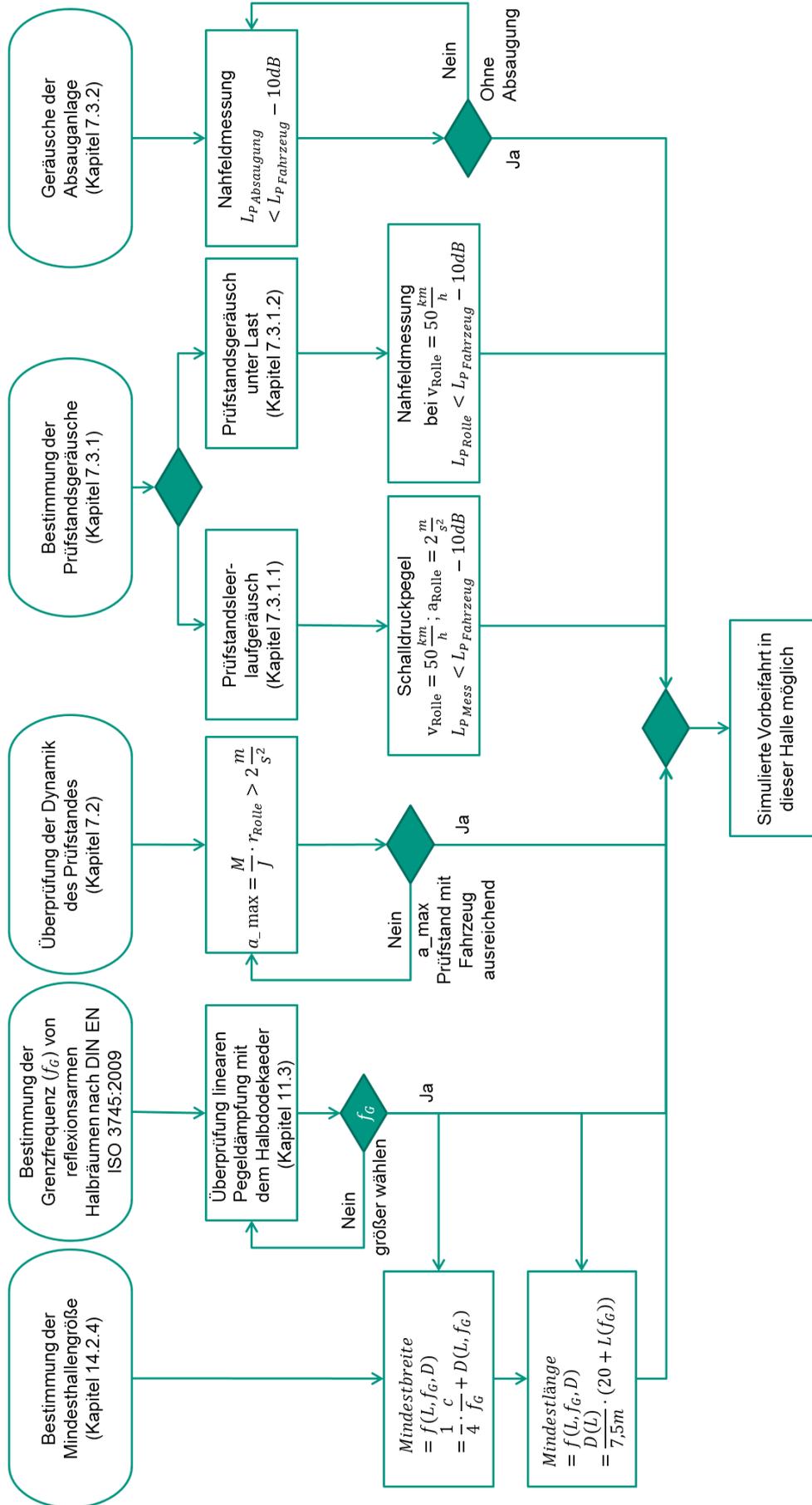


Bild 102: Ablaufplan zur Überprüfung der Eignung der akustischen Halle und des Prüfstands

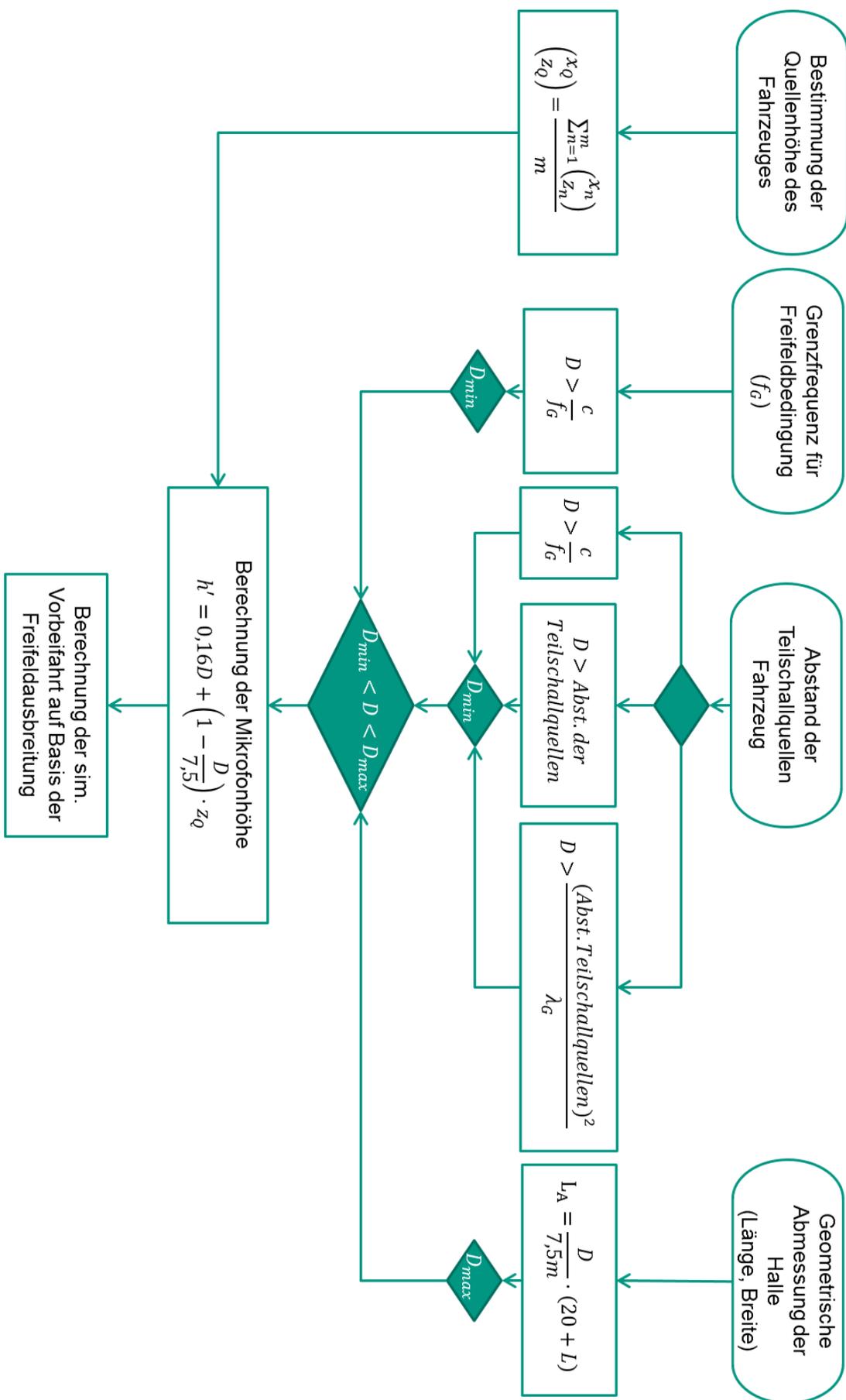


Bild 103: Ablaufplan der simulierten Vorbeifahrt für die Messung in kleinen Hallen

15 Simulierte Vorbeifahrt im Fahrzeugentwicklungsprozess

Wie bereits im Kapitel 2.1.1 und 2.2 dargestellt, ist der Fahrzeugentwicklungsprozess ein sehr komplexer, dynamischer und von Zeit und Kosten getriebener Prozess. Zur Unterstützung entwickelte Albers das integrierte Produktentstehungsmodell mit den Makroaktivitäten und dem Spaltenprozess zur Problemlösung. Dieses Metamodell überführt die Ziele aus dem Zielsystem über das Handlungssystem in das Objektsystem. Ein Handlungssystem in der zentralen Aktivität Validierung ist dabei das XiL-Validierungsframework²⁸⁹.

Ein vorgeschriebener Bestandteil der Validierung im Fahrzeugentwicklungsprozess ist die Messung der beschleunigten Vorbeifahrt nach DIN ISO 362²⁹⁰ zur Einhaltung des gesetzlich vorgeschriebenen Pegelgrenzwertes. Obwohl die Homologation noch immer auf der Teststrecke erfolgen muss, wird angestrebt, die Messungen in einer Akustikhalle auf dem Rollenprüfstand durchzuführen, um im Entwicklungsprozess Unsicherheiten und Störgrößen durch z. B. meteorologische Bedingungen entgegenzuwirken. Die Validierung im XiL-Framework erfolgt dabei im Vehicle-in-the-Loop Layer. Das bedeutet, das Fahrzeug steht bereits als realer Prototyp oder als Vorserienfahrzeug und damit sehr spät im Fahrzeugentwicklungsprozess zur Verfügung. Die Freifeldbedingung und damit die freie Schallausbreitung werden in der Halle simuliert. Für die Messung der simulierten Vorbeifahrt ist allerdings eine sehr große und damit kostenintensive Akustikhalle notwendig, die dem Entwickler nur selten als Ressource zur Verfügung steht.

Im Fahrzeugentwicklungsprozess müssen daher zwei Teilhandlungssysteme betrachtet werden, die sich aus den Forschungsergebnissen ableiten. Diese beinhalten zum einen die Planung oder Prüfung der Halle in Bezug auf die geometrischen und akustischen erforderlichen Eigenschaften in der Projektierung, zum anderen die Messung der simulierten Vorbeifahrt in kleinen Hallen in der Validierung, wie in Bild 104 dargestellt. In diesen Teilhandlungssystemen wird wiederum der Spaltenprozess durchlaufen.

²⁸⁹ Albers et al. 2008

²⁹⁰ DIN ISO 363: 2009

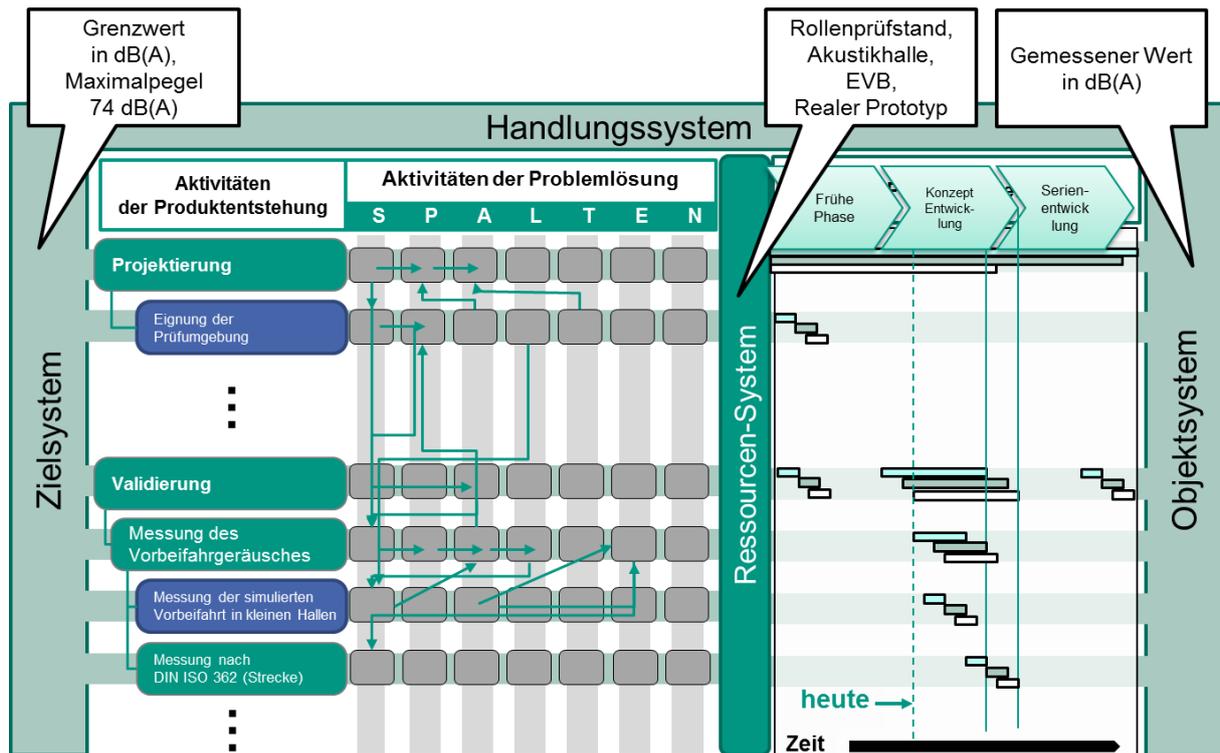


Bild 104: Teilhandlungssysteme im Fahrzeugentwicklungsprozess

15.1 Teilhandlungssystem zur Prüfung und Planung des Akustikrollenprüfstands in der Projektierung

Zu Beginn des Fahrzeugentwicklungsprozesses werden in der Situationsanalyse der Projektierung die notwendigen Ressourcen definiert. Wird die Vorbeifahrt in einer Akustikhalle simuliert, so muss eine entsprechende Halle mit einem Rollenprüfstand zur Verfügung stehen oder ggf. ein entsprechender Prüfstand geplant und gebaut werden. Für die Prüfung der notwendigen Eigenschaften der Halle und des Prüfstandes wird ein Teilhandlungssystem bereitgestellt, mit dem diese Eigenschaften abgefragt werden können. Dieses Teilhandlungssystem beschreibt nicht nur die Überprüfung der Prüfstandsgeräusche, sondern auch die notwendigen geometrischen und akustischen Eigenschaften der Halle, wie z. B. die Grenzfrequenz. In Kombination mit dem zu untersuchenden System lassen sich die erforderlichen geometrischen Abmessungen ableiten (vgl. Bild 102). Dieses Teilhandlungssystem muss nicht bei jedem Entwicklungsprozess erneut durchgeführt werden, da es ausreichend ist, wenn einmalig die Grenzen der Halle geprüft werden. Damit kann bereits in der Projektierung festgelegt werden, ob die simulierte Vorbeifahrt überhaupt mit den vorhandenen Ressourcen möglich ist bzw. welche Kosten eingeplant werden müssen, falls eine entsprechende Halle mit einem Akustikrollenprüfstand gebaut werden soll. In der Tragweitenanalyse kann zudem beurteilt werden, welche Restriktionen durch eine kleinere Halle entstehen.

Wurde die im Ressourcensystem definierte Halle geprüft und die Eignung festgestellt, kann diese in der Validierung für die Messung herangezogen werden und die simulierte Vorbeifahrt in kleinen Hallen mithilfe des zweiten entwickelten Teilhandlungssystems durchgeführt werden.

15.2 Teilhandlungssystem zur Messung der simulierten Vorbeifahrt in kleinen Hallen in der Validierung

In der zentralen Aktivität Validierung im Fahrzeugentwicklungsprozess erfolgt der Abgleich zwischen Zielsystem und Objektsystem, also zwischen den gemessenen Werten und den Lastenheftvorgaben. Steht eine kleinere Akustikhalle zur Verfügung, so kann in der alternativen Lösungsauswahl für die Messung des Vorbeifahrgeräusches ein entsprechendes Messverfahren (vgl. Kapitel 5) gewählt werden. Für die Messung mittels Mikrofonarray im Fernfeld müssen der Prüfstand und die akustische Umgebung in der Projektierung auf die Eignung für das Verfahren überprüft werden. Für diese Messung werden, basierend auf den Forschungsergebnissen, ein Teilhandlungssystem und ein Entwicklungswerkzeug bereitgestellt, wie das Verfahren skaliert und übertragen werden kann (vgl. Bild 103). Damit kann der Entwickler die Messung auch in entsprechend kleineren Hallen durchführen und übertragbare Ergebnisse wie in großen Hallen erzielen. In der Tragweitenanalyse kann dieser entscheiden, in wie weit Messungen, zusätzlich zur Homologation, auf der Strecke erfolgen müssen. Für die Messung in kleinen Hallen steht das entwickelte EBV (Entwicklungswerkzeug zur Berechnung der simulierten Vorbeifahrt) dem Entwickler als Ressource zur Verfügung.

15.3 Zusammenfassung

Obwohl die Homologation auf der Teststrecke im Freien erfolgen muss, spielt die simulierte Vorbeifahrt eine immer bedeutendere Rolle im Fahrzeugentwicklungsprozess. Durch das Messen in der Halle können in der Projektierung bereits Unsicherheiten in der Zeitplanung ausgeschlossen werden. Zudem können Kosten durch die Vermeidung aufwendiger Tests auf der Strecke durch die Übertragung auf den Prüfstand eingespart werden (road-to-rig)^{291, 292}. Hier kann deutlich einfacher und effizienter gemessen werden, vor allem mit einer besseren Reproduzierbarkeit. Dies wird notwendig, wenn durch Digital Engineering oder Frontloading das Vorbeifahrgeräusch virtuell simuliert werden soll²⁹³. Mit der Messung auf dem Prüfstand können somit genauere Eingangsdaten für die

²⁹¹ Haeder / Haefke 2001

²⁹² Sciuto / Hellmund 2001

²⁹³ Weber 2009

Simulation zu Verfügung gestellt werden^{294,295}. Durch die Möglichkeit der Messung in einer kleineren Halle können diese mit ggf. vorhandenen Ressourcen durchgeführt werden. Neubauten können aufgrund der möglichen Skalierung kleiner ausfallen und somit Kosten im Fahrzeugentwicklungsprozess eingespart werden. Mit dieser Arbeit stehen dem Entwickler zwei Teilhandlungssysteme zur Verfügung, die es ihm ermöglichen, die vorhandenen Ressourcen (Akustikhalle und Rollenprüfstand) auf Eignung zu prüfen und die Messung der simulierten Vorbeifahrt in kleinen Hallen durchzuführen.

²⁹⁴ Genuit 2010

²⁹⁵ Demmerer 2002

16 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick für weitere Tätigkeiten auf dem Forschungsfeld der simulierten Vorbeifahrt gegeben.

16.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Teilhandlungssysteme für den Fahrzeugentwicklungsprozess entwickelt. Für die Homologation muss jedes entwickelte Fahrzeug die Messung des abgestrahlten Geräusches für beschleunigte Straßenfahrzeuge absolvieren. Das Ziel dieser Messung ist die Begrenzung des Geräusches zur Minderung des Straßenverkehrslärmes. Dieser Test muss auf der Teststrecke im Freien erfolgen, was Unsicherheiten bei der Messung und zeitliche Verzögerungen im Fahrzeugentwicklungsprozess mit sich bringen kann. Dies können z. B. meteorologische Einflüsse sein, wie Regen oder Wind. Zudem muss das Manöver mehrfach wiederholt werden und eine definierte Reproduzierbarkeit erreicht werden, wodurch ein erheblicher Zeitaufwand entsteht. Um die Entwicklungszeit zu verkürzen, wird angestrebt, diese Messung in Akustikhallen auf einem Prüfstand durchzuführen. Erste Anforderungen an die Prüfstandsumgebung sind bereits in der DIN ISO 362: 2009 definiert. Diese Hallen müssen sehr große Abmessungen haben, welche entweder aus Kostengründen oder aus infrastrukturellen Gründen nicht vorhanden sind. Daher war das Ziel dieser Arbeit, eine Methode zu entwickeln, die es ermöglicht die Messung der simulierten Vorbeifahrt in kleineren Hallen zu messen.

Im Stand der Forschung wurden verschiedene Ansätze zur Messung der simulierten Vorbeifahrt auf dem Rollenprüfstand in großen Akustikhallen aufgezeigt. Diese Messverfahren wurden anhand verschiedener Kriterien bewertet und gegenübergestellt, um die Basis für die Methodenauswahl zu schaffen. Da für das Verfahren der Messung mittels Mikrofonarray bereits in der Norm erste Anforderungen definiert sind und der Messaufbau raumfest und nicht fahrzeugfest ist, wurde diese Methode als Basisverfahren für die Skalierung verwendet.

Für die weiteren Untersuchungen wurde auf Basis des XiL-Frameworks jeweils das System Fahrzeug und das System Umwelt genauer betrachtet, da die Umweltsimulation für den Transfer eine bedeutende Rolle spielt und das System Fahrzeug einen Großteil der Restriktionen liefert. Das System Fahrer wurde nur soweit beleuchtet, dass dieser auf der Teststrecke real ist, auf Prüfständen aber

durchaus ein virtueller Fahrer eingesetzt werden kann, was für alternative Antriebe sicherlich sinnvoll ist.

Für die Definition der Randbedingungen wurde der am IPEK vorhandene Akustikrollenprüfstand auf verschiedene notwendige Kriterien hin untersucht, wie z.B. die geometrischen und akustischen Eigenschaften, die Dynamik des Prüfstands und die verschiedenen Nebengeräusche, wie Absauganlage und Betriebsgeräusche. Dabei konnte festgestellt werden, dass lediglich die Länge des Prüfstands nicht für die Abbildung der gesamten Messstrecke ausreichend ist. Diese Vorgehensweise wurde verallgemeinert und bietet damit einen Leitfaden, anhand dessen Akustikrollenprüfstände auf die Eignung zur simulierten Vorbeifahrt untersucht werden können.

Wie im Stand der Forschung gezeigt, gibt es für diese Problematik den Ansatz, die Messstrecke mittels Reduzierung des Abstands zwischen Fahrzeug und Mikrofonarray zu verlängern. Dabei wird das Fahrzeug als Punktschallquelle auf dem Boden angenommen, die Mikrofonhöhe geometrisch skaliert und der Schalldruckpegel auf Basis der freien Schallausbreitung im Freifeld umgerechnet.

Auf der Grundlage dieser Situationsanalyse wurden Messungen mit unterschiedlichen Arrayabständen durchgeführt. Es war erkennbar, dass die Ergebnisse sehr stark variieren. So konnte eine Pegelzunahme um ca. 4 dB(A) bei Reduzierung des Arrayabstands um 3,0 m und eine Verschiebung des Pegelmaximums festgestellt werden.

Für die weitere Analyse und die nachträgliche Auswertung der Rohdaten wurde ein Werkzeug in Matlab® implementiert, welches es erlaubt, die Messdaten nachträglich offline mit unterschiedlichen Parametern auszuwerten und um auch generische Testszenarien untersuchen zu können.

Sowohl die Betrachtung der schmalbandigen FFT, als auch die breitbandige Terzanalyse der Messdaten der einzelnen Mikrofone zeigte, dass die Frequenzinhalte sehr ähnlich sind, allerdings die Summenpegel der einzelnen Abstände und damit die Pegeldämpfungen stark variieren.

Um die Ursache der Fehler analysieren und quantifizieren zu können, wurde das System Fahrzeug mit einer künstlichen Quelle als Punktschallquelle simuliert. Damit konnten Messungen durchgeführt werden, um die Annahmen auf Basis des Standes der Forschung zu verifizieren oder zu falsifizieren.

Messungen mit dem Halbdodekaeder zeigten, dass die Umweltsimulation sehr gut ist, d. h. die Akustikhalle des IPEK im interessierenden Frequenzbereich ein sehr gutes Freifeld nachbildet. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die skalierten Messungen mittels der Schallausbreitung im Fernfeld sehr gut übereinstimmen.

Zudem wurde untersucht, wie eine Positionierung des Halbdodekaeders außerhalb des angenommenen akustischen Zentrums das Ergebnis beeinflusst. Dabei wurde festgestellt, dass durch die außermittige Platzierung das Maximum des Pegels geometrisch bedingt durch die Skalierung verschoben wird.

Da das akustische Zentrum des Systems Fahrzeug in der Realität nicht, wie angenommen, auf dem Boden liegt, sondern oberhalb, wurde das Fahrzeug im Folgenden mittels Volldodekaeder als Punktschallquelle oberhalb des Bodens simuliert. Dadurch entstehen Reflexionen, die zu Interferenzen und höheren Pegeln führen können. Es zeigte sich, dass in der theoretischen Betrachtung das Raumwinkelmaß für die Reflexionen eine Rolle spielt, allerdings ist der Einfluss marginal. Die Messungen mit unterschiedlichen Quellenhöhen ergaben, dass der Einfluss der Quellenhöhe und der Mikrofonhöhe einen deutlich größeren Anteil zum Pegel beitragen. Daraus wurde hergeleitet, dass die Skalierung der Mikrofonhöhe in Abhängigkeit von der Quellenhöhe und des Abstandes zur Quelle berechnet werden muss. Durch die Reflexionen am Boden entstehen Interferenzen. Da der Pegel über das gesamte Spektrum ausgewertet wird, sind aufgrund des breitbandigen Signals einzelne destruktive oder konstruktive Interferenzen zu vernachlässigen.

Diese Erkenntnisse wurden auf das Fahrzeug übertragen. Da die Position des akustischen Zentrums Auswirkungen auf die Mikrofonposition und die Verschiebung des Pegelmaximums ergab, wurde eine stark vereinfachte Berechnungsmethode zur Positionsbestimmung erarbeitet. Auf Basis der Teilschallquellen Reifen und Motor wurde der „Schwerpunkt“ des akustischen Zentrums berechnet. Die Ergebnisse aus Messungen mit dem Fahrzeug zeigten eine sehr gute Skalierbarkeit, die innerhalb der in der Norm geforderten Toleranz liegt. Somit konnte dargelegt werden, dass mit der stark vereinfachten Berechnungsmethode die Position des akustischen Zentrums ausreichend genau bestimmt werden kann. Diese Methode wurde an zwei weiteren Fahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugklassen validiert.

Diese Vorgehensweise wurde im letzten Schritt verallgemeinert und als Methode zur Skalierung des Messverfahrens mittels Mikrofonarray im Freifeld erarbeitet. Damit konnte die zentrale Hypothese bestätigt werden, dass es möglich ist, unter definierten Randbedingungen die Messstrecke vollständig abzubilden und damit das Messverfahren in kleinen Hallen zu skalieren und anzuwenden.

Mit den in dieser Arbeit entwickelten Handlungssystemen ist es erstmals möglich, die simulierte Vorbeifahrt ebenfalls in Hallen abzubilden, die kleiner sind, als die in der DIN ISO 362: 2009 geforderten Raumabmessungen. Dabei wurde der Vergleich zwischen dem Normabstand und kleineren Abständen in der Halle aufgezeigt und Maßnahmen zur Kompensation der auftretenden Abweichungen erarbeitet.

16.2 Ausblick

Der Fokus der Arbeit lag auf der Skalierbarkeit. Dabei wurden Effekte, wie z.B. das zunehmende Reifengeräusch bei dem Transfer von der Strecke auf den Prüfstand vernachlässigt. Für die vergleichbare Messung auf dem Prüfstand müssen diese Effekte allerdings berücksichtigt werden. Dieser Effekt kann zum einen durch Reifen ohne Profil entschärft werden. Zum anderen ist denkbar, das Reifengeräusch zu extrahieren und im Sinne des XiL-Frameworks als Restfahrzeug hinzu zu simulieren. So kann z. B. das Reifengeräusch verschiedener Rad/Reifenkombinationen oder Fahrbahnbeläge getrennt auf der Teststrecke aufgenommen und anschließend in der Halle einem beliebigen Fahrzeug zu simuliert werden. Damit kann der Einfluss verschiedener Reifencharakteristiken bei Vorbeifahrtsmessungen schnell und effizient evaluiert werden. Die Simulation erlaubt hierbei schon in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses eine Vorhersage auf das akustische Verhalten des Fahrzeuges bei der Vorbeifahrtsmessung.

Die simulierte Vorbeifahrt auf dem Prüfstand wird für zukünftige Antriebsstrangtopologien unabdingbar sein. Das System Fahrzeug, welches in dieser Arbeit als Beispielsystem herangezogen wurde, ist ein konventioneller verbrennungsmotorischer Antriebsstrang mit Schaltgetriebe. Dieses System ist in seiner Komplexität, bezogen auf die Betriebsstrategie, überschaubar, da es nur diskrete Übersetzungsstufen im Antriebsstrang gibt und damit die Fahrgeschwindigkeit direkt an die Motordrehzahl und Motorlast gekoppelt ist. Für Automatikgetriebe ist in der Norm bereits viel reglementiert, wie z.B. die Versuchsdurchführung aussehen muss und welche Betriebszustände auftreten dürfen. Für hybride Antriebsstrangtopologien wird die Komplexität allerdings deutlich größer²⁹⁶. In Bild 105 sind die Messergebnisse der beschleunigten Vorbeifahrt mit einem Hybridfahrzeug für unterschiedliche State of Charges (SOC) und Startbedingungen dargestellt²⁹⁷. Dabei wurde zum einen der SOC variiert und zum anderen die Startbedingung, da dieses Fahrzeug sowohl elektrisch als auch verbrennungsmotorisch bzw. rekuperierend bei 50 km/h fahren kann. Die punktierten Linien zeigen die Messungen beginnend aus dem elektromotorischen Betrieb und die durchgezogenen Linien die kombinierten Startbedingungen bei jeweils unterschiedlichen SOC.

²⁹⁶ Düser 2010

²⁹⁷ Albers et al. 2010a

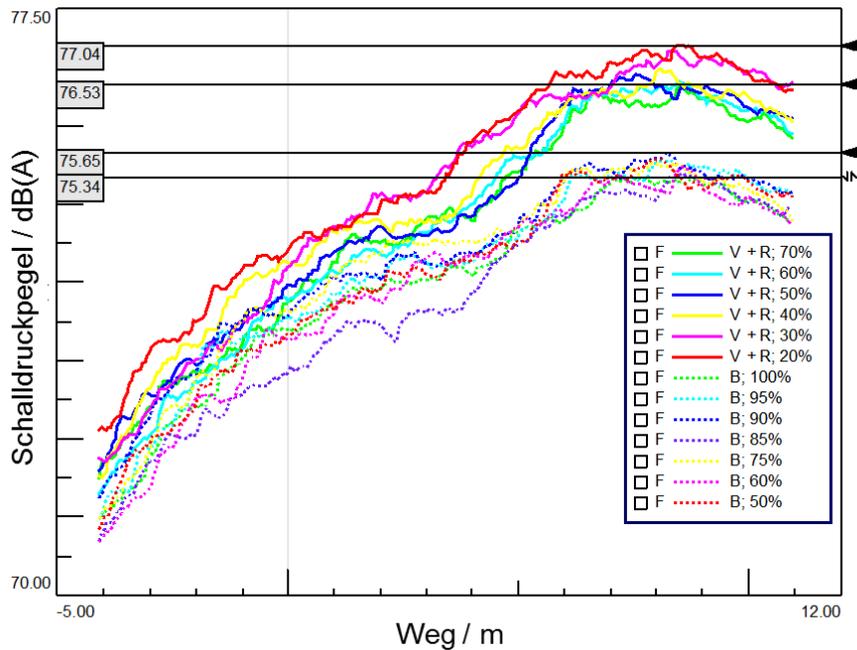


Bild 105: Messungen bei unterschiedlichem State of Charge mit einem Hybridfahrzeug²⁹⁸

Auffällig ist dabei, dass der maximale Pegel im Mittel um 1,5 dB(A) größer ist, wenn die Messung mit der kombinierten Startbedingung durchgeführt wird, als im rein elektrischen Zustand. Zudem ist erkennbar, dass der Pegel um 0,5 dB(A) größer wird, wenn der SOC abnimmt. Wie die Messungen zeigen, spielt der SOC bei hybriden Antriebsstrangtopologien eine Rolle. Dieser ist jedoch wiederum von der Betriebsstrategie, von verschiedenen Parametern und der Startbedingung abhängig²⁹⁹.

Aufgrund der vielen Betriebszustände, die selbst wieder von vielen Parametern abhängig sind, ist es teilweise nicht mehr möglich, ein eindeutiges Maximum bei nur einem Manöver zu identifizieren. Daher muss ggf. analog zum NEFZ-Zyklus ein "Vorbeifahrtszyklus" definiert werden, wie exemplarisch in Bild 106 dargestellt.

²⁹⁸ Bauer et al. 2010

²⁹⁹ Düser 2010

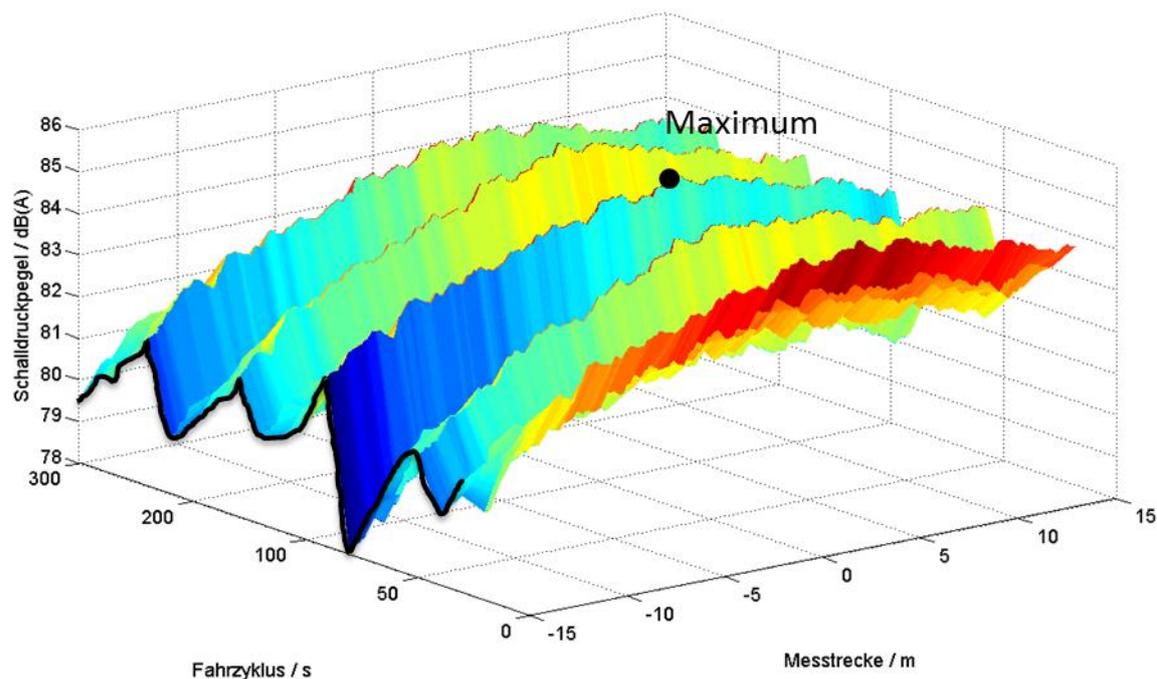


Bild 106: Vorbeifahrtsmessung auf Basis eines Zyklus

Durch die kontinuierliche Aufzeichnung der Messdaten auf dem Prüfstand kann auf Basis eines Zyklus zu jedem Zeitpunkt die Vorbeifahrtskurve für eine definierte Strecke errechnet und der Schalldruckpegel als Fläche kontinuierlich angegeben werden. So könnte sich innerhalb eines Zyklus der maximale Schalldruckpegel als skalare Kenngröße widerspiegeln und das globale Maximum als Grenzwert definiert werden.

Die hier nur kurz skizzierten Anwendungsmöglichkeiten lassen das breite Anwendungsspektrum erkennen, dass sich mit der hier entwickelten Methode der simulierten Vorbeifahrt auf dem Prüfstand in kleinen Hallen für die Praxis eröffnet.

17 Literaturverzeichnis

Albers 2010

Albers A.; Five Hypotheses about Engineering Processes and their Consequences, TMCE 2010, April 12–16, 2010, Ancona, Italy 2010

Albers / Braun 2011

Albers A.; Braun, A.; Der Prozess der Produktentstehung, Handbuch Leichtbau, Hrsg. Henning, F.; Moeller, E., Hanser Verlag 2011

Albers / Düser 2009

Albers, A.; Düser, T.; Integration of Simulation and Test using Vehicle-in-Loop Technology at the Roller Test Bench and in the Road Test. In: 3. Internationales Symposium für Entwicklungsmethodik. Wiesbaden, 2009

Albers / Düser 2010

Albers, A.; Düser, T.: Implementation of a Vehicle-in-the-Loop Development And Validation Platform. In: FISITA World Automotive, Congress. Budapest, 2010

Albers / Robens 2011

Albers, A.; Robens, G.: Indoor Pass-by noise testing on a roller test bench in a small anechoic chamber, 40th Internoise 2011; 4-7. September 2011, Osaka, Japan

Albers et al. 2005

Albers, A.; Burkardt, N.; Meboldt, M.; Saak, M.: SPALTEN Problem Solving Methodology in the Product Development. In: 15th International Conference on Engineering Design (ICED). Melbourne, 2005

Albers et al. 2008

Albers, A.; Düser, T.; Ott, S.: X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebsystemen; 8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation; Haus der Technik; Kassel 2008

Albers et al. 2009a

Albers, A.; Düser, T.; Robens, G.; Ott, S.; Sauer, J.; König, S.; Operation Mode Based Measurement Process for NVH Phenomena on a Roller Test Bench; 38th Internoise 2009, Ottawa, Canada

Albers et al. 2009b

Albers, A.; Düser, T.; Robens, G.; Ott, S.: Automated acquisition of operation mode depending NVH phenomena on a roller test bench; 9. International Stuttgarter Symposium "Automobil- und Motorentchnik"; Stuttgart 2009

Albers et al. 2009c

Albers, A.; Geier, M.; Stier, C.; Düser, T.; Behrendt, M.; Ott, S.; Simulationsgestützte Methoden – IDE und XiL zur Entwicklung von Antriebsstrangkomponenten; ATZ Automotive Engineering Partners; Ausgabe 06/2009;

Albers et al. 2010a

Albers, A.; Robens, G.; Schwarz, A., Fritz, M.; Schmitz, J.; Indoor pass-by Testing of hybrid electric vehicles on an acoustic roller test bench, 39th Internoise 2010, Lissabon, Portugal

Albers et al. 2010b

Albers A.; Babik, A.; Braun, A.; Merkel, P.; Robens, G.; Methodenentwicklung und –validierung am Beispiel eines innovativen Fahrzeugkonzepts für elektrisch angetriebene Fahrzeuge; VDI Innovative Fahrzeugantriebe, 10./11.November 2010, Dresden

Albers et al. 2010c

Albers, A.; Ott, S.; Behrendt, M.; Merkel, P.; Geier, M.; Validation as knowledgebase for future mobility systems; 9. Internationales CTI Symposium „Innovative Fahrzeug-Getriebe, Hybrid- und Elektro-Antrieb; Dezember 2010 Berlin

Albers et al. 2011a

Albers, A.; Behrendt, M.; Ott, S.; Prozessbegleitende Validierung in der Kupplungssystementwicklung; VDI Kupplungstagung 2011, Kupplungen und Kupplungssysteme in Antrieben 2011, Wiesloch 22.03 - 23.03.2011

Albers et al. 2011b

Albers, A.; Sadowski, E.; Marxen, L.; A new Perspective on Product Engineering – Overcoming Sequential Process Models; The Future of Design Methodology; 2011

Alink 2010

Alink, T.; Bedeutung, Darstellung und Formulierung von Funktion für das Lösen von Gestaltungsproblemen mit dem C&C-Ansatz; IPEK Forschungsberichte, Band 48; ISSN: 1615-8113 Karlsruhe 2010

Bay et al. 2003

Bay, K., Zhou, X., Schneider, W.; IBP-Mitteilung 426; Messsystem zur Abnahme von Freifeldräumen; Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst 2003

Beckenbauer et al. 2002

Beckenbauer, T.; Spiegler, P.; van Blokland, G.; Huscheck, S.; Stütze, T.; Heerkens, J.; Einfluss der Fahrbahntextur auf das Reifen-Fahrbahn-Geräusch; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik; Heft 847; August 2002

Beckenbauer 2008

Beckenbauer, T.: Entstehung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche, Physik der Reifen-Fahrbahn-Geräusche, 4. Informationstage, Müller-BBM Juni 2008

Biermann 2003

Biermann J.W., Krafffahrzeugakustik, Kompaktseminar, IKA; Institut für Krafffahrwesen; 2003

Borucki 1980

Borucki, H.: Einführung in die Akustik; 2. durchgesehene Auflage, B.I.- Wissenschaftsverlag 1980

Bruel&Kjaer 2006

Bruel&Kjaer; Simulated Indoor Pass-by Noise Measurement System; Denmark 2006

Bruel&Kjaer 2012

Bruel&Kjaer 2012; <http://www.bruelkjaer.de>; PULSE™ Indoor Pass-by Noise Measurement Type 77932012

Cicalo / Trozzi 2009

Cicalo, R.; Trozzi, L.; A Procedure to Simulate the Pass-by Noise Test of a Two-Wheel Vehicle Inside a Semi-Anechoic Chamber; SAE World Congress; Detroit Michigan USA; 2009

Cooper 1994

Cooper, R. G.: Perspective: Third-Generation New Product Processes. Journal of Product Innovation Management, Bd. 11, 1994

Crewe et al. 2002

Crewe, A.; Perrin, F.; Benoit, V.; Haddad, K.; Real-Time Pass-by Noise Source Identification Using A Beam-Forming Approach; SAE 2003 Noise & Vibration Conference and Exhibition, Mai 2003,

DEGA 2006

Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V.; DEGA-Empfehlung 101: Akustische Wellen und Felder, Berlin 2006

Demmerer 2002

Demmerer, S.; Simulation von Schallfeldern; Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation der Technischen Universität München; Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik; 2002

DIN 1320: 2009

Akustik - Begriffe; DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; Beuth Verlag; Dezember 2009

DIN EN 12354-4: 2001

Bauakustik - Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften - Teil 4: Schallübertragung von Räumen ins Freie; Deutsche Fassung EN 12354-4; DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; Beuth Verlag 2001

DIN EN 61672-1: 2003

Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen; DIN EN 61672-1: 2010; DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; Beuth Verlag 2003

DIN EN ISO 1683:2008

Akustik - Bevorzugte Bezugswerte für Pegel in der Akustik und Schwingungstechnik; DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth Verlag GmbH; November 2008

DIN EN ISO 3745:2009

Akustik - Bestimmung der Schalleistungspegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume ISO 3745:2003; Deutsche Fassung EN ISO 3745:2009; DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; Beuth Verlag; November 2009

DIN ISO 362: 2003

Messung des von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlten Geräusches Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (ISO 362:1998)

DIN ISO 362-1:2009

Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 – Teil 1: Fahrzeuge der Klassen M und N (ISO 362-1:2007 + Cor. 1:2009)

DIN ISO 362-2:2010

Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 – Teil 2: Fahrzeuge der Klasse L (ISO 362-2:2009)

DIN ISO 9613-2: 1999

Akustik – Dämpfung des Schalls bei der Ausbreitung im Freien – Teil 2; Allgemeines Berechnungsverfahren; DIN Deutsches Institut für Normung e. V.; Beuth Verlag; Oktober 1999

Düser 2010

Düser, T.: X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen; Forschungsberichte Band 47, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2010

Dubbel 2007

Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau, Grote, K.-H.; Feldhusen, J.; ISBN 978-3-540-49714-1 22. Aufl. Springer Berlin Heidelberg New York

Duden 2004

Bibliographisches Institut, Mannheim; Auflage: 23., Januar 2004; ISBN: 978-3411040131

Dudenhöffer / Hause 2012

Dudenhöffer, K.; Hause, L.; Geräuschwahrnehmung von Elektroautos; Automobiltechnische Zeitschrift; ATZ 03/2012, Springer 2012

Ehrlenspiel 2003

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. 3. Aufl., Carl Hanser Verlag, München, 2003

EMPA 1997

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Teil Quellenbeschreibung, Bericht zum F+E Projekt „Neues EMPA-Modell für Straßenlärm“, Januar 1997

Fahy 1995

Fahy, F. J. The vibro-acoustic reciprocity principle and applications to noise control. Acta Acustica united with Acustica, Volume 81, Number 6, S. Hirzel Verlag 1995

Feltes et al. 2012

Feltes, R.; Peuker, R.; Weber, F.; Gesamtfahrzeug- und Antriebsakustik des neuen BMW 525d; Automobiltechnische Zeitschrift; ATZ 01/2012, Titelthema Akustik; Springer 2012.

FEV 2008

FEV Spektrum; Technologie – Highlights aus dem FEV-Arbeitsspektrum; 30 Jahre FEV; Ausgabe 39, 12/2008

FESI 2001

FESI-DOKUMENT A2; Grundlagen der Akustik; European Federation of Association of Insulation Contractors; 3. Auflage; September 2001

Finsterhölzel et al. 2006

Finsterhölzel, H.; Caldiero, V.; Hobelsberger, J.; Baumann, W.; Daiber, F. Neuer Außengeräuschprüfstand im Entwicklungsprozess bei BMW; Automobiltechnische Zeitschrift; ATZ 108 Springer 2008

Pazos et al. 2006

Pazos, D., F., P.; Weber, L.; Sedlbauer, K.; Leistner, P.; IBP-Mitteilung 465; Schallabsorption von Lärmschutzwänden: Vergleich unterschiedlicher Messverfahren; Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst 2006

Fraunhofer IBPa

Hallraum zur Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und des Schalleistungspegels; Technisches Dokument des Fraunhofer IBP; http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/p20_tcm45-97965.pdf; 29.01.12

Fraunhofer IBPb

Akustischer Freifeldraum; Technisches Dokument des Fraunhofer IBP; http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/p22_tcm45-97966.pdf; 15.03.2012

Fraunhofer IBPc

Schallfelder auf einen Blick; Fraunhofer IBP; Institut für Bauphysik; http://www.ibp.fraunhofer.de/Images/Flyer_Holographie_tcm45-34409.pdf; 29.01.2012

Fuchs et al. 2003

Fuchs, H.V.; Zha, X.; Babuke, G.; Friedrich, P.; Das neue Volkswagen-Akustikzentrum in Wolfsburg. Teil 2: Reflexionsarme Raumauskleidungen; Automobiltechnische Zeitschrift; ATZ 105, Springer 2003

Gabi / Pantle 2010

Gabi M., I. Pantle; Skript zur Vorlesung „Technischen Akustik“ - Fachgebiet Strömungsmaschinen, Karlsruher Institut für Technologie 2010

Gauterin et al. 2009

Gauterin, F., Grollius, S., Braun, M., Influence of tangential force wheel load and inflation pressure on tire road noise; 3rd Dresden Workshop Tires: Road and Vehicle Interaction; 2009

Genuit 2010

Genuit, K.; Sound-Engineering im Automobilbereich, Methoden zur Messung und Auswertung von Geräuschen und Schwingungen; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010

Gerst 2002

Gerst, M.; Strategische Produktentscheidungen in der integrierten Produktentwicklung, Lehrstuhl für Produktentwicklung, Technischen Universität München, 2002.

G.R.A.S 2012

G.R.A.S Sound & Vibration; <http://www.gras.dk/00012/00013/>. 2012

Günther et al. 1994

Günther, B.C.; Hansen, K.-H.; Veit, I.; Technische Akustik – Ausgewählte Kapitel, 5., aktualisierte Auflage, Expert Verlag 1994

Harrison 2004

Harrison, M., Vehicle Refinement; Controlling Noise and Vibration in Road Vehicles; Elsevier Butterworth-Heinemann; Burlington, Massachusetts 2004

Heinz et al. 2005

Heinz, G.; Heilmann, G.; Schulze, H.; Brusius, S.; Krechberger, W.; Schumann, G.; Einsatz einer akustischen Kamera zur NVH-Optimierung von Motor und Triebstrang; 26. Internationales Wiener Motorensymposium; Wien 2005

Haeder / Haefke 2001

Haeder, J.; Haefke, B. Testen wie auf der Straße; ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 103, 9/2001

Head acoustics 2012

HEAD acoustics® GmbH; <http://www.head-acoustics.de/> 2012

Henn et al. 2008

Henn, H., Sinambari, G.R., Fallen, M.; – Ingenieurakustik – Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH Braunschweig/Wiesbaden – 3.Auflage April 2001

Hoever 2012

Hoever, C.; Simulationsbasierte Parameterstudie zum Zusammenhang zwischen Rollgeräusch und Rollwiderstand von PKW-Reifen; DAGA, 38. Jahrestagung für Akustik, Darmstadt 2012

Hieronimus 1990

Hieronimus, K.: Anforderungen an Schwingung- und Akustikberechnungen aus Sicht der Fahrzeugentwicklung. VDI-Bericht Nr. 186, Düsseldorf, 1990.

Hüttenrauch, Baum 2008

Hüttenrauch, M.; Baum, M.; Effiziente Vielfalt : Die dritte Revolution in der Automobilindustrie, Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2008

IAS – TU Dresden

Technische Universität Dresden; Institut für Akustik und Sprachkommunikation (IAS); <http://www.ias.et.tu-dresden.de/ias/kommunikationsakustik/laboratorien/hallraum/> 2012

Ingenieurgesellschaft für Schalltechnik mbH

Desone Modulare Akustik, Ingenieurgesellschaft für Schalltechnik mbH; <http://www.musik-akustik.de/schallschutzkabine/raumakustik/raumakustik-und-einflussfaktoren.html> 2012

ISO 10844:2011

Acoustics -- Specification of test tracks for the purpose of measuring noise emitted by road vehicles

Janssen et al. 2011

Janssens, K.; Aarnoutse, P.; Gajdatsy, P.; Britte, L.; Deblauwe, F.; Van der Auweraer, H.; Time-Domain Source Contribution Analysis Method for In-Room Pass-By Noise; 2011 SAE International; Detroit 2011

Km et al. 2001

Kim, B.-K.; Yoo Sungwong, Kim, H.; Zwanzig, K.; Prediction of Vehicle Pass-By Noise Using Indoor Measurements; SAE 2001; Detroit, USA 2001

Kloow 2008

Kloow, T.; Field experience on measurements with the Acoustic Camera; Joint Baltic-Nordic Acoustics Meeting 2008, 17-19 August 2008, Reykjavik, Iceland

Kollmann 2000

Kollmann, F.G; Maschinenakustik: Grundlagen, Messtechnik, Berechnung, Beeinflussung, 2., neu bearbeitete Auflage, Springerverlag 2000

Kollmann et al. 2006

Kollmann, F.G; Schösser, F.T.; Angert, R.; Praktische Maschinenakustik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006

Kruse, Taherzadeh 2011

Kruse, R.; Taherzadeh, S.; Quellenortung im Freiland: Einfluss der Umgebungsbedingungen und Bestimmung der Quellenhöhe durch Bodeneffektinversion; 37. Jahrestagung für Akustik, DAGA; Düsseldorf DAGA 2011

Leister 2007

Leister, G.; Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung; Strategie, Methoden, Tools; Vieweg + Teubner GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Lerch et al. 2009

Lerch, R.; Sessler, G. M.; Wolf, D.; Technische Akustik; Grundlagen und Anwendung; Springer Dordrecht Heidelberg London New York; 2009

LMS International 2012

LMS International 2012; www.lmsintl.com; LMS Test.Lab Acoustics; 2012

LMS International 2012a

LMS International 2012; www.lmsintl.com; LMS SCADAS family - Manual; 2012

LMS International 2012b

Schindele, T.; LMS Praxisseminar Teil 1: Grundlagen der Akustik, Event number: 664 416 074; 20. März 2012

Lohrmann 2012a

Lohrmann, M.; Beitragsanalyse am Beispiel der simulierten Vorbeifahrt mit Hilfe der TPA; 6. Symposium Motor- und Aggregateakustik; 29./30. Juni 2011; Magdeburg

Matthiesen / Ruckpaul 2012

Matthiesen S.; Ruckpaul A.; "NEW INSIGHTS ON THE CONTACT&CHANNEL-APPROACH – MODELLING OF SYSTEMS WITH SEVERAL LOGICAL STATES" Proceedings of TMCE 2012, May 7–11, 2012, Karlsruhe, Germany, Edited by I. Horváth, A. Albers, M. Behrendt and Z. Rusák

Maute 2006

Maute, D.: Technische Akustik und Lärmschutz, Carl Hanser Verlag GmbH & CO. KG; Auflage: 1 März 2006

Meboldt 2008

Meboldt, M.; "Mentale und formale Modellbildung in der Produktentstehung – als Beitrag zum integrierten Produktentstehungs-Modell (iPeM); Forschungsberichte Band 29, ISSN 1615-8113, Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers; Karlsruhe 2008

Meier 2011

Meier, C.; Electric Drive Acoustics, Komplexität und Zielkonflikte bei der Akustik-Entwicklung von Elektrofahrzeugen; E-Mobilität & Akustik, 5.DEGA-Symposium; Stuttgart 2011

Messbericht 2008

Schalltechnischer Messbericht Nr.: ABP 08/277-MB 1; Akustische Abnahmemessungen im Halbfreifeldraum mit eingebauter Leistungsrolle; Februar 2008

Meyer 2011

Meyer, M.; Signalverarbeitung: Analoge und digitale Signale, Systeme und Filter 6., korrigierte und verbesserte Auflage; Vieweg+Teubner Verlag Wiesbaden / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, 2011.

Möser 2009

Möser, M. Technisch Akustik, 8. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

MTS Systems 2012

MTS Systems Cooperation, www.mts.com, 2012

Nolting 2007

Nolting, W.; Grundkurs Theoretische Physik 3 Elektrodynamik; Springer Heidelberg Dordrecht London NewYork 2011

Park et al. 1997

Park, S., Kim, Y., and Ko, B., Methods of Passby Noise Prediction in a Semi-Anechoic Chamber, SAE World Congress; Technical Paper 971989, Detroit USA 1997.

Pflüger et al. 2010

Pflüger, M.; Brandl, F.; Bernhard, U.; Feitzelmayer, K.; Fahrzeugakustik – Der Fahrzeugantrieb, Gesetzliche Vorschriften, Richtlinien und Messverfahren; Herausgeber: List, H.; Springer Verlag Wien 2010

Prašćević 2002

Prašćević, Acoustics Emission Valorisation of Tyres by Sound Intensity Method, Working and Living Environmental Protection Vol. 2, No 2, Facta Universitatis 2002

Putner / Lohrmann 2011

Putner, J.; Lohrmann, M.; Beitragsanalyse der Fahrzeugaußengeräusches bei der simulierten Vorbeifahrt unter Verwendung von Betriebsmessungen; DAGA, Düsseldorf 2011

Robens et al. 2012

Robens, G.; Albers, A.; Behrendt, M.; Indoor Pass-by noise testing on a roller test bench in a smallanechoic chamber with an isotropic source; Internoise 2012; New York City, USA 2012

Ropohl 2009

Ropohl, G.: Eine Systemtheorie der Technik. 3. Auflage, Universitätsverlag Karlsruhe, 2009

Ryu 2005

Ryu, Y.; Bruel & Kjaer University; The optimum array design for the indoor simulated pass-by noise measurement system; ICSV 12; Lissbon 2005

Ryu et al. 2006

Ryu, Y.; Lange, S.; Narama, W.; Hirayama, M.; Bruel & Kjaer University; The Optimum Array Design for the Indoor Simulated Pass-by Noise Measurement System; JSAE Annual Congress; Japan 2006

Schetzen 2006

Schetzen, M.; Airborne Doppler Radar: Applications, Theory, and Philosophy; Volume 215 Progress in Astronautics and Aeronautics; American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Reston, Virginia 2006

Schmerbeck 2011

Schmerbeck, R.; Lärmindernde Asphaltdeckschichten - Erfahrungen und Tendenzen; Autobahndirektion Südbayern, Asphalt-Seminar; Regenstauf 2011

Schmillen / Schneider 2003

Schmillen, K.; Schneider, M.; Geräuschdesign, Workshop Verkehrslärm, Anwendung von Methoden des Geräuschdesigns zur Reduzierung des Außenlärms von Straßen- und Schienenfahrzeugen; FEV; Bonn-Bad Godesberg 2003

Schyr 2006

Schyr, C.: Modellbasierte Methoden für die Validierungsphase im Produktentwicklungsprozess mechatronischer Systeme am Beispiel der Antriebsstrangentwicklung. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Forschungsberichte des IPEK - Institut für Produktentwicklung, 2006

Sciuto / Hellmund 2001

Sciuto M, Hellmund R: „Road to Rig“ – Simulationskonzept an Powertrain-Prüfständen in der Getriebeerprobung. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 103, 2001

Schäuffele / Zurawka 2010

Schäuffele, J.; Zurawka, T.; Automotive Software Engineering; Vieweg+Teubner / GWV Fachverlag GmbH; Wiesbaden 2010

Seiffert 2008

Seiffert, U., Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz; Herausgeber: Rainer, G.; Vieweg+Teubner Verlag; Wiesbaden 2008

Steven 2005

Steven, H., Ermittlung der Geräuschemission von Kfz im Straßenverkehr, Forschungsauftrag 20054135, RWTÜV Fahrzeug GmbH, 2005

Stratenschulte Messtechnik 2012

Stratenschulte Messtechnik; Lautsprechersystem für die Bau- und Raumakustik, <http://www.stratenschulte-messtechnik.de>; 2012.

Storm 2008

Storm, R.; Kompendium Maschinenakustik Band 1 "Einführung in die Technische Akustik". Studienskript, 3. Auflage, 2008

Tachibana 2010

Tachibana, H. General view of road traffic noise problem; 39th Internoise 2010; Lissabon, Portugal 2010

Taylor 1997

Taylor, N., Rover Group UK; Rasmussen, P, Brüel&Kjær Denmark; Exterior Noise Measurement on a Rover 220 GSi, 1997;

Teller / Brandstätter

Teller, P., Brandstätter P.; Labor für Fahrzeugakustik und simulierte Vorbeifahrt, IBP-Mitteilung 510; 38(2011) Neue Forschungsergebnisse, kurz gefasst; 2011

Thomas et al. 2008

Thomas, J.-H.; Grulier, V.; Paillasseur, S.; Pascal J.-C.; Real-Time Nearfield Acoustic Holography: Implementation of direct and inverse Impulse Response in the time-wavenumber domain; ICSV15; International Congress on Sound and Vibration; Korea 2008

VDI-Richtlinie 2221

Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Beuth Verlag, Berlin, 1993

VDI-Richtlinie 2206

VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth Verlag, Berlin, 2004

Zeller 2009

Zeller, P.; Handbuch Fahrzeugakustik; Vieweg+Teubner; GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2009

Zhang et al. 1996

Zhang, L; Helander, M. G.; Drury, C. G.: Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. Human Factors, 38, 1996

Weber 2009

Weber, J.; Automotive Development Processes; Processes for Successful Customer Oriented Vehicle Development; Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2009

Studien-, Diplom-, Bachelor- und Masterarbeiten

Bauer et al. 2011

Bauer, J.; Robens, G.; Albers, A.: Experimentelle Akustikmessung von Hybridfahrzeugen auf dem Rollenprüfstand; Studienarbeit 2010 am IPEK

Landes et al. 2012

Landes, D.; Robens, G.; Albers, A.: Kartografie einer Geräuschmesszelle; Studienarbeit 2012 am IPEK

Maier et al. 2011

Maier, J.; Robens, G.; Albers, A.: Entwicklung und Validierung eines Softwaretools zur Berechnung der simulierten Vorbeifahrt; Studienarbeit 2011 am IPEK

Robens et al. 2007

Robens, G.; Gauterin, F.; Maoukil, M.: Konzeption einer Akustikmesseinrichtung zur Messung der Reifen-Fahrbahn-Geräusche; Diplomarbeit 2007 am FAST, eh. Institut für Fahrzeugtechnik und Mobile Arbeitsmaschinen, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

Resske et al. 2012

Resske, M.; Robens, G.; Albers, A.: State of the art of the simulated pass-by noise measurement, Bachelorarbeit 2012 am IPEK

Thieltges et al. 2011

Thieltges, S.; Robens, G.; Albers, A.: Untersuchung des Einflusses verschiedener Messaufbauten auf das Ergebnis bei der simulierten Vorbeifahrt; Studienarbeit 2011 am IPEK

Wu et al. 2009

Wu, Y.; Freudenmann, T.; Robens, G.; Albers, A.: Anwendbarkeit von psychoakustischen Kennwerten zur Beurteilung von Getriebegeräuschen; Diplomarbeit 2009 am IPEK

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Gerhard Robens
Geburtsdatum: 20. September 1981
Geburtsort: Augsburg
Staatsangehörigkeit: deutsch
Familienstand: ledig

Bildungsgang

2002 – 2007 Studium des Maschinenbaus mit Vertiefungsrichtung Fahrzeugtechnik an der Universität Karlsruhe (TH) (Abschluss: Diplom)
2001 – 2002 Zivildienst im Fritz-Felsenstein-Haus in Königsbrunn
1998 – 2001 Holbein-Gymnasium in Augsburg (Abschluss: allgemeine Hochschulreife)
1993 – 1997 Gymnasium Königsbrunn
1990 – 1992 Grundschule Nord, Königsbrunn
1988 – 1990 Grundschule West, Königsbrunn

Berufstätigkeit

seit April 2007 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Produktentwicklung (KIT)
2004 - 2007 Wissenschaftliche Hilfskraft am IPEK – Institut für Produktentwicklung; ehemals Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Universität Karlsruhe (TH)
Aug. / Sept. 2005 Praktikum im Ingenieurbüro Dr.-Ing. H. Graalmann
Juli / Aug. 2001; Praktikum bei EADS in Augsburg
Juli – Sept. 2002 Praktikum bei EADS in Augsburg