

Objektivierung des Schwingungskomforts schwerer Nutzfahrzeuge

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Nils Bulthaupt, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 25. September 2020
Referent: Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Barbara Deml

Kurzfassung

Für die Entwicklung neuer LKW ist es von Interesse, den subjektiv wahrgenommenen Fahrkomfort möglichst frühzeitig vor dem Bau realer Prototypen beurteilen und abstimmen zu können. Dazu sind objektive, messbare Kennwerte notwendig, welche den Fahrkomfort beschreiben und mit deren Hilfe dieser aus Messungen oder Simulationsergebnissen vorhergesagt werden kann. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden entsprechende Kennwerte für die komfortrelevanten Schwingungsphänomene „Längsstoßen“, „Nicken“ und „Wanken“ erarbeitet und Zielwerte für die Entwicklung zukünftiger Fahrzeuge abgeleitet. Die dafür notwendigen objektiven Messdaten sowie die subjektiven Bewertungen der Schwingungsphänomene werden im Rahmen umfangreicher Messkampagnen im LKW erfasst. Zur systematischen Analyse der Messdaten werden die wahrnehmungsrelevanten Frequenzbereiche jedes Schwingungsphänomens bestimmt und daraus Frequenzgewichtungskurven abgeleitet. Des Weiteren werden maskierende und verstärkende Einflüsse einzelner Schwingungsereignisse auf die Schwingungsphänomenwahrnehmung untersucht und durch Gewichtungsfaktoren ausgedrückt. Mit diesen wird eine Methode zur Signalverarbeitung im Zeitbereich entwickelt, welche die maskierenden Einflüsse berücksichtigt. Aus den resultierenden Signalen werden Kennwertverläufe abgeleitet, die zur Vorhersage von wahrnehmungsrelevanten Zeitpunkten herangezogen werden. Aus diesen werden skalare Kennwerte berechnet, welche mit den Bewertungen der Schwingungsphänomene korrelieren. Für jedes Schwingungsphänomen wird mit Hilfe der Einzelkennwerte ein Regressionsmodell zur Vorhersage der Bewertungen entwickelt, welches dann für die Ableitung von objektiven Zielwerten verwendet wird.

Abstract

A time efficient development process of new trucks is a main goal of the truck manufacturers. This includes an early development of ride comfort before real prototypes exist. Therefore it is necessary to determine objective and measurable characteristic values to predict the subjectively perceived ride comfort from measurement or simulation results. The aim of this dissertation is the determination of objective characteristic values and the prediction of the subjective evaluations of three vibration phenomena: “longitudinal bumps“, “pitching“ and “rolling“. The necessary objective measurement data and subjective evaluation data for each vibration phenomenon are acquired during extensive measuring campaigns including different track characteristics and truck configurations. For a systematic measurement data analysis the relevant frequency ranges for the perception of each vibration phenomenon are determined and frequency weighting curves are derived. In another experiment the masking influence of single vibration events on the perception of the vibration phenomena is investigated and described via weighting factors. These factors are used for the development of a signal post-processing methodology in the time-domain which takes into account the masking behaviour of single vibration events. Characteristic value curves are calculated from the resulting signals which are used to predict the relevant instants of time for a vibration phenomenon perception. Scalar characteristic values are calculated from the characteristic value curves and are correlated with the subjective evaluation data of each vibration phenomenon. They are used to develop regression models to predict the subjective evaluation and determine target values for a reasonable evaluation of each vibration phenomenon.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Tätigkeit im Entwicklungs- und Versuchszentrum (EVZ) Wörth im Team „Fahr-
dynamik und Fahrkomfort“ des LKW-Versuchs der Daimler AG durchgeführt. Sie wäre nicht zustande gekommen, wenn ich nicht vielfältige Unterstüt-
zungen erhalten hätte. Zuallererst möchte ich meinem Doktorvater Herrn
Prof. Dr. Gauterin für die Übernahme des Hauptreferats, die wertvollen
Anregungen und der steten Begleitung meiner Arbeit danken. Für die
Übernahme des Korreferats möchte ich Frau Prof. Dr. Deml danken.
Darüber hinaus gilt mein Dank der Daimler AG und insbesondere Herrn Dr.
Rohr für die nennenswerten bereitgestellten Budgets, für die Messtechnik,
die Möglichkeit der Versuchsdurchführungen, die Nutzung der LKW und
für die darüber hinaus stete Unterstützung. Mein besonderer Dank gilt
Herrn Denis Heddergott für die Heranführung an das spannende Thema,
für die Aufnahme in sein Team und die große Unterstützung während
meiner gesamten Doktorandenzeit. Auch für das fortwährende Interesse
und Vertrauen in meine Arbeit möchte ich ihm danken. Des Weiteren
möchte ich meinen TeamkollegInnen Herrn Erik Händler, Herrn Bernd
Heydegger, Herrn Christian Janson, Frau Ingrid Müller, Herrn Carsten
Stenzel und meinem ehemaligen Teamkollegen Herrn Stephan Walterspiel
für die freundliche Aufnahme, das gute Arbeitsklima und die jederzeitige
Unterstützung bei allen technischen Fragestellungen danken. Dem Team
am Ride Simulator bestehend aus Herrn Wolfram Just und Herrn Frank
Reiter danke ich für die Einweisung in die Funktionsweise und die jederzeit
freundliche Hilfestellung bei Umbauten und allen Herausforderungen bzgl.
meiner Signalwünsche. Zusätzlich danke ich Herrn Prof. Dr. Dragon für die

Nutzungsmöglichkeit des Ride Simulators. Der Werkstatt des EVZ Wörth möchte ich für die zuverlässige Unterstützung bei allen Fahrzeugumbauten während meiner Messkampagnen danken. Nicht zuletzt gilt mein Dank allen Probanden, die sich bereit erklärt haben, die teils langen und intensiven Beurteilungen am Simulator oder im Fahrzeug durchzuführen. Ohne sie wäre die Arbeit nicht möglich gewesen. Hier möchte ich Herrn Uwe Keck und die Kollegen aus der Berechnungsabteilung erwähnen, die sich stets bereit erklärt haben, an allen Versuchen am Simulator teilzunehmen. Stellvertretend seien hier Herr Dr. Fründ, Herr Sing und Herr Stürmer genannt. Des Weiteren möchte ich allen an dieser Arbeit beteiligten Studenten danken, die mich in meiner Arbeit unterstützt haben und damit zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Stellvertretend seien hier Herr Steffen Schmid und Herr Christoph Gröning genannt. Abschließend möchte ich meinen Eltern für die fortwährende Unterstützung während meines Studiums und meiner Doktorandenzeit sowie meiner Frau Katharina danken, die immer liebevoll zu mir gehalten und mich unterstützt hat.

Stuttgart, im September 2020

Nils Bulthaupt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Gliederung und Aufbau der Arbeit	2
2	Grundlagen	5
2.1	Begriffsbildung Fahrkomfort	5
2.2	Schwingungssystem Lastkraftwagen	7
2.3	Schwingungswahrnehmung	10
2.3.1	Sensorik des Menschen	11
2.3.2	Prozess der Wahrnehmung	15
2.3.3	Empirische Gesetzmäßigkeiten der Psychophysik	16
2.4	Definition untersuchter Schwingungsphänomene	18
2.4.1	Längsstoßen	20
2.4.2	Nicken	20
2.4.3	Wanken	21
3	Stand der Forschung	23
3.1	Einflussfaktoren auf die Schwingungswahrnehmung	23
3.1.1	Wahrnehmungsschwellen, Unterschiedsschwellen und Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke	24
3.1.2	Biodynamische Reaktionen des menschlichen Körpers	26
3.1.3	Sitzeigenschaften und Körperhaltung	27
3.1.4	Druckverteilung zwischen Mensch und Sitz	29
3.1.5	Geräuscheinfluss	31
3.1.6	Maskierungseffekte durch Schwingungen	32

3.1.7	Weitere Einflüsse auf die Bewertung des Diskomforts	34
3.2	Verfahren zur Schwingungs- und Diskomfortbewertung . . .	36
3.3	Ansätze zur Objektivierung der Schwingungswahrnehmung .	42
3.3.1	Menschmodelle	42
3.3.2	Relevanzfilterungen	44
3.3.3	Korrelative Ansätze	45
3.4	Zielsetzung der Arbeit	48
4	Datengenerierung durch Fahrversuche	51
4.1	Zielsetzung und Anforderungen	51
4.2	Messtechnischer Aufbau	52
4.2.1	Messstellen am Fahrzeug	52
4.2.2	Entwicklung eines Beurteilungsbogens zur subjektiven Bewertung von Schwingungsphänomenen . . .	55
4.3	Versuchsablauf und Durchführung	59
4.4	Statistische Analyse der subjektiven Bewertungen	65
4.4.1	Statistische Analyse der Phänomenstärkebewertungen	65
4.4.2	Statistische Analyse der Akzeptanzbewertungen . .	72
4.4.3	Statistische Analyse der wahrnehmungsrelevanten Körperbereiche	74
4.4.4	Statistische Analyse der relevanten Faktoren für die Phänomenstärkebewertung	75
5	Wahrnehmungsrelevante Frequenzen und Maskierungseffekte	77
5.1	Ride Simulator	77
5.2	Frequenzuntersuchungen	80
5.2.1	Zielsetzung	80
5.2.2	Vorgehensweise	81
5.2.3	Versuchsdurchführung	85
5.2.4	Analysegrößen	87

5.2.5	Versuchsergebnisse	87
5.3	Untersuchungen zur Maskierungswirkung einzelner Schwingungsereignisse	89
5.3.1	Motivation	89
5.3.2	Zielsetzung	92
5.3.3	Vorgehensweise	93
5.3.4	Versuchsdurchführung	96
5.3.5	Analysegrößen	98
5.3.6	Versuchsergebnisse	99
5.4	Untersuchungen zur Maskierungswirkung mehrerer Einzel- ereignisse	113
5.4.1	Zielsetzung	113
5.4.2	Vorgehensweise	114
5.4.3	Versuchsdurchführung	115
5.4.4	Analysegrößen	116
5.4.5	Versuchsergebnisse	117
5.5	Untersuchungen zum Audio- und Videoeinfluss	118
5.5.1	Zielsetzung	118
5.5.2	Vorgehensweise	118
5.5.3	Versuchsdurchführung	120
5.5.4	Analysegrößen	122
5.5.5	Versuchsergebnisse	122
5.6	Zusammenfassung von Kapitel 5	126

**6 Implementierung der Maskierungseffekte in die Signal-
auswertung 129**

6.1	Frequenzfilter	129
6.2	Maskierungsansatz	130
6.3	Signalbewertung	134
6.3.1	Signalfilterung	136
6.3.2	Peak-to-Peak Verlaufsberechnung	136

6.3.3	Bestimmung von Maskierungsfaktoren	137
6.3.4	Bestimmung des verstärkungsäquivalenten Reizzu- waches	139
6.3.5	Berechnung eines Gesamtmaskierungsverlaufes . . .	142
7	Kennwerte und Wahrnehmung	145
7.1	Messdaten der Beschleunigungssensoren	145
7.2	Triggerverlaufsanalyse	147
7.3	Messdaten der Druckmessmatten	150
7.4	Berechnung skalarer Kennwerte	154
7.5	Korrelationsanalyse	156
8	Modellerstellung und Validierung	161
8.1	Regressionsmodellerstellung	161
8.2	Validierung	168
8.3	Ableitung von Zielwerten	172
9	Zusammenfassung und Ausblick	173
9.1	Zusammenfassung	173
9.2	Ausblick	176
A	Anhang zu Kapitel 4	177
B	Anhang zu Kapitel 5	191
B.1	Anhang zu Abschnitt 5.2	192
B.2	Anhang zu Abschnitt 5.3	197
B.3	Anhang zu Abschnitt 5.4	213
B.4	Anhang zu Abschnitt 5.5	219
C	Anhang zu Kapitel 6	221
D	Anhang zu Kapitel 7	261
D.1	Anhang zu Abschnitt 7.1	261

D.2 Anhang zu Abschnitt 7.3	263
E Anhang zu Kapitel 8	267
E.1 Anhang zu Abschnitt 8.1	267
Abbildungsverzeichnis	271
Tabellenverzeichnis	283
Formelverzeichnis	289
Literaturverzeichnis	295

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die vorliegende Arbeit ist am Standort Würth der Truck-Entwicklung der Daimler AG im Team „Fahrndynamik und Fahrkomfort“ entstanden. Gegenstand der Arbeit ist die Objektivierung des Schwingungskomforts schwerer Nutzfahrzeuge, d.h. die Erarbeitung von Zusammenhängen zwischen objektiven Kennwerten aus Mess- oder Simulationsdaten und subjektiven Bewertungen des Schwingungskomforts im Fahrzeug.

Das Schwingungsverhalten eines schweren Nutzfahrzeugs unterscheidet sich signifikant von dem eines PKW. Die relativ geringe Steifigkeit des Fahrwerkes im Verhältnis zu den großen Massen des Rahmens, des Fahrerhauses, der Achsen und ggf. der Beladung sowie der separaten Lagerung von Fahrerhaus und Sitz führen zu einer großen Anzahl von Eigenmoden im komfortrelevanten Schwingungsbereich. Vor allem aber wird die Komplexität der Fahrzeugkomfortentwicklung durch eine sehr hohe Variantenanzahl verursacht. Rahmenlänge, Radstand, Achsanzahl, Anzahl angetriebener und gelenkter Achsen, Motorisierung, Fahrwerks- und Fahrerhausfederungssysteme mit Kombinationen aus Luft- und Blattfedern und Fahrerhausgröße sind in verschiedenen Ausführungen und für unterschiedliche Fahrzeugtypen (Sattelzüge, Pritschenfahrzeuge, Kipper, Betonmischer, ...) kombinierbar. Dies führt mit zusätzlich unterschiedlichen Beladungszuständen zu einer Vielzahl von Einflussparametern, die auf das Schwingungsverhalten des Gesamtsystems einwirken. Der Prozess der sogenannten „Fahrkomfortabstimmung“ der Feder- und Dämpfersysteme ist dementsprechend aufwändig, da für jede mögliche Fahrzeugkombination

ein „guter“ Schwingungskomfort sichergestellt werden soll.

Der Schwingungskomfort schwerer Nutzfahrzeuge wird bislang ausschließlich subjektiv beurteilt. Dies geschieht durch erfahrene Beurteiler aus dem Fahrzeugversuch, die Fahrten auf unterschiedlichen Streckenprofilen mit verschiedenen Lastfällen durchführen und den Schwingungskomfort im Fahrzeug bewerten.

Bei Neuentwicklungen ist dies erst in der sogenannten „Prototypenphase“ möglich, wenn erste Versuchsfahrzeuge aufgebaut wurden. Die Abhängigkeit von realen Prototypen impliziert einen aus Fahrkomfortsicht geringen Reifegrad dieser Fahrzeuge. Um diesen zu erhöhen, die Entwicklungszeiten zu verkürzen und damit die Entwicklungskosten bzgl. der Fahrkomfortabstimmung zu senken, besteht ein Bedarf an der Definition von objektiven Zielgrößen für den Schwingungskomfort schwerer Nutzfahrzeuge. Diese Zielgrößen sollten in Form messbarer beziehungsweise aus der Simulation ableitbarer objektiver Kenngrößen eine quantitative Beschreibung des subjektiv empfundenen Schwingungskomforts erlauben.

1.2 Gliederung und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist in neun Kapitel gegliedert. In Kapitel zwei werden Grundlagen dargestellt, wobei auf den Komfortbegriff, das Schwingungssystem „Lastkraftwagen“ (LKW), den menschlichen Wahrnehmungsprozess von Schwingungen und auf psychophysikalische Gesetzmäßigkeiten eingegangen wird. Des Weiteren werden die Schwingungsphänomene „Längsstößen“, „Nicken“ und „Wanken“ definiert, mit denen sich die vorliegende Arbeit auseinandersetzt.

In Kapitel drei wird der Stand der Forschung zum vorliegenden Thema zusammengefasst. Dabei wird auf Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf die Schwingungswahrnehmung eingegangen, und es werden verschiedene Ansätze zur Objektivierung der Schwingungswahrnehmung anhand von Forschungsarbeiten erläutert. Darauf aufbauend wird die Zielsetzung der

vorliegenden Arbeit präzisiert und gegenüber bereits bestehenden Arbeiten auf dem Gebiet der Objektivierung des Schwingungskomforts abgegrenzt.

In Kapitel vier erfolgt die für die Arbeit notwendige Datengenerierung durch Messfahrten im LKW. Dies beinhaltet die Aufnahme von objektiven Messdaten und den zugehörigen subjektiven Komfortbewertungen für jedes der definierten Schwingungsphänomene. Im Verlauf des Kapitels werden der Versuchsablauf, die verwendete Messtechnik sowie die Entwicklung der verwendeten Bewertungsbögen zur Erfassung der subjektiven Bewertungen erörtert. Des Weiteren erfolgt die Analyse der subjektiven Bewertungsergebnisse.

In Kapitel fünf werden für jedes definierte Schwingungsphänomen systematische Untersuchungen zu wahrnehmungsrelevanten Frequenzbereichen und Maskierungseffekten durchgeführt. Dies geschieht mit Hilfe von Simulatorversuchen. Der verwendete Simulator, die Versuchsabläufe und die Auswertungen der Versuchsergebnisse werden in dem Kapitel ausführlich dargestellt. Auf Basis der Versuchsergebnisse aus Kapitel fünf erfolgt in Kapitel sechs die Entwicklung einer Methode, die es erlaubt, die zuvor untersuchten Maskierungseffekte in der Auswertung von Schwingungssignalen zu berücksichtigen.

Die entwickelte Methode wird in Kapitel sieben für die Bestimmung und Berechnung von objektiven Kennwerten aus den in Kapitel vier erfassten Messdaten verwendet. Aus den berechneten Kennwerten werden in Kapitel acht die Kennwerte mit komfortrelevanten Informationen bestimmt. Mit diesen wird für jedes Schwingungsphänomen ein quantitatives Modell zur Vorhersage der Komfortbewertung entwickelt. Die Modelle werden daraufhin validiert, und es werden für jedes Schwingungsphänomen Zielwerte abgeleitet, die eine objektive Grenze für „gute“ Komfortbewertungen darstellen. In Kapitel neun erfolgt schließlich eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und ein Ausblick auf sich ergebende Forschungsfelder.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsbildung Fahrkomfort

Der Fahrkomfort lässt sich nach Heißing als „das Wohlbefinden der Insassen während der Fahrt“ umschreiben und „umfasst die Gesamtheit aller auf die Insassen einwirkenden mechanischen und akustischen Schwingungen in allen Fahrsituationen“ [47, S. 475]. In der vorliegenden Arbeit wird unter dem Begriff „Schwingung“ eine mechanische Schwingung verstanden. Andere Schwingungsarten werden zur Abgrenzung präzise benannt. Aus wissenschaftlicher Sicht hat sich das Verständnis des Komfortempfindens über die letzten Jahrzehnte hinweg zu einem zweidimensionalen Konstrukt entwickelt. Ein Überblick über diese Entwicklung ist in [127] zu finden. Slater definiert „Komfort“ als „state of physiological, psychological and physical harmony between a human being and the environment“ [114, S. 4], d.h. als harmonischen Zustand zwischen Mensch und Umgebung hinsichtlich physiologischen, psychologischen und physikalischen Aspekten. Zhang et al. zeigen dagegen, dass man das Komfortempfinden in zwei Dimensionen aufteilen kann. Ein Aspekt bezeichnet den Komfort, der andere Aspekt den Diskomfort (vgl. Abbildung 2.1). Der Diskomfort ist dabei nicht als Gegenteil des Komforts zu verstehen. So hängt der Diskomfort mit biomechanischen Faktoren zusammen, die Reaktionen wie Schmerzempfinden, Erschöpfung etc. hervorrufen. Komfort ist dagegen mit Empfindung von „Entspannung“ und „Wohlbefinden“ verbunden. Ästhetik kann das Komfortempfinden dabei noch verstärken. Beide Aspekte, d.h. Komfort und Diskomfort treten immer gleichzeitig in unterschiedlichen Ausprägungen auf.

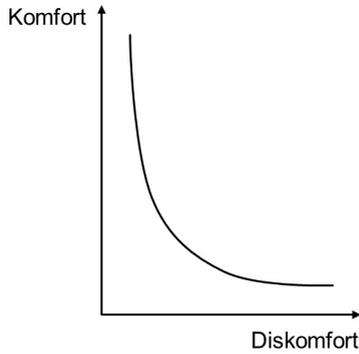


Abbildung 2.1: Komfortmodell nach Zhang et al. [128]

Knoll [69] erweitert den Ansatz von Zhang et al. und bezeichnet den Komfort als Ergebnis aus Gefallen und Nicht-Erleiden. Dies ist qualitativ in Abbildung 2.2 dargestellt. Je größer das Gefallen und je geringer das Erleiden ist, umso größer ist demnach das Komfortempfinden.

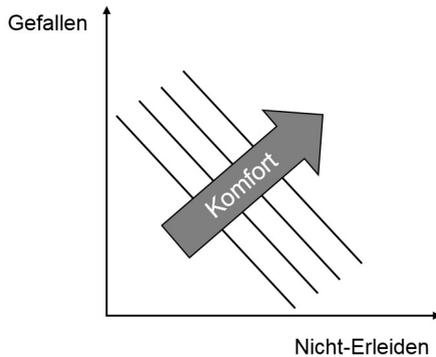


Abbildung 2.2: Darstellung des Komforts als Ergebnis aus Gefallen und Nicht-Erleiden nach Knoll [69]

Das Komfortempfinden hängt neben den auf den menschlichen Körper wirkenden Schwingungen auch von weiteren Umgebungseinflüssen ab. Bubb

stellt mit seiner Komfortpyramide [23] eine Reihenfolge der Komfortbedürfnisse auf. Diese sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Nach Befriedigung der untersten beiden Stufen „Geruch“ und „Licht“ stehen Schwingungen an dritter Stelle und tragen damit essentiell zum Komfortempfinden im Fahrzeug bei. „Lärm“, „Klima“ und „Anthropometrie“ spielen eine nachgelagerte Rolle. Hier sei auch auf Reichart [107] verwiesen, der in seiner Arbeit den Einfluss von äußeren und fahrzeugeigenen Faktoren auf den Langstreckenkomfort im Fahrzeug untersucht.

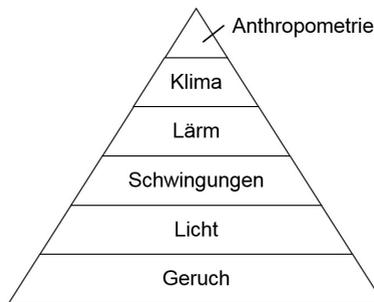


Abbildung 2.3: Komfortpyramide nach Bubb [23]

In der vorliegenden Arbeit wird sich ausschließlich auf rein fühlbare Schwingungen bis zu einem Frequenzbereich von maximal 20 Hz konzentriert. Dabei wird die Begriffsbildung nach Zhang et al. [128] verwendet. Der Fahrkomfort wird demnach hinsichtlich des störenden Aspektes, der durch die Fahrbahnunebenheiten hervorgerufenen Schwingungen untersucht, die einen Diskomfort hervorrufen. Der Begriff „Fahrkomfort“ wird deshalb im Folgenden im Kontext des Diskomforts der durch die Fahrbahn angeregten und im Fahrzeug fühlbaren Schwingungen verstanden.

2.2 Schwingungssystem Lastkraftwagen

In der vorliegenden Arbeit werden Lastkraftwagen (LKW) in Form von 4x2 Sattelzugmaschinen betrachtet. Der Ausdruck 4x2 bezeichnet dabei die

Diese Vereinfachung setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen: $m_{4,v}$ und $m_{4,h}$ bezeichnen die ungedeuteten Massen der Vorder- und Hinterachse der Sattelzugmaschine. Diese sind über die Achsfedern mit den Steifigkeiten $c_{3,v}$ und $c_{3,h}$ und über die Achsdämpfer mit den Dämpferkonstanten $d_{3,v}$ und $d_{3,h}$ an den Rahmen gekoppelt. Die Masse des Rahmens inklusive Motor und Tank ist mit m_3 bezeichnet. Da der Rahmen wie eine Zusatzfeder wirkt und Biegebewegungen ausführen kann, wird der Rahmen in der vereinfachten Darstellung durch zwei Teile dargestellt, die durch ein Gelenk gekoppelt und mit einer Drehfeder verbunden sind. Dies soll die mögliche Biegung des Rahmens berücksichtigen. Daraus ergeben sich die anteilige vordere Masse des Rahmens $m_{3,v}$ und die anteilig hintere Masse des Rahmens $m_{3,h}$ mit der Biegesteifigkeit c_3 . Auf den hinteren Teil des Rahmens wirkt bei einem Betrieb des Fahrzeuges mit einem Auflieger die anteilige Masse des Aufliegers m_5 . Auf den vorderen Teil des Rahmens stützt sich das Fahrerhaus über die vordere und hintere Fahrerhauslagerung mit den Federsteifigkeiten $c_{2,v}$ und $c_{2,h}$ und den Dämpferkonstanten $d_{2,v}$ und $d_{2,h}$ ab. Die Masse des Fahrerhauses ist mit m_2 bezeichnet. Das letzte Schwingelement ist der Fahrersitz mit der aggregierten Masse m_1 aus Fahrersitz und Fahrer. Der als Schwingsitz ausgeführte Fahrersitz bildet zusammen mit der Fußaufstandsfläche im Fahrerhaus und dem Lenkrad die Schnittstellen des Fahrzeuges zum menschlichen Körper. Diese sind in Abbildung 2.6 hervorgehoben. Um die Schwingungsanregung des menschlichen Körpers durch den LKW zu untersuchen, wird im weiteren Verlauf der Arbeit der Fokus auf die Anregung durch das Fahrerhaus und den Schwingsitz gelegt. Dies entspricht in Abbildung 2.5 den Schwingebenen 1 und 2, die durch die entsprechenden Indizes gekennzeichnet sind. Schwingungseinleitungen durch das Lenkrad werden in dieser Arbeit nicht untersucht.



- 1: Sitzfläche
- 2: Rückenlehne
- 3: Lenkrad
- 4: Fußaufstandsfläche

Abbildung 2.6: Draufsicht auf das Interieur eines Actros Fahrerhauses aus [27] mit eingezeichneten Fahrer-LKW-Schnittstellen

Tabelle 2.1: Resonanzfrequenzen f_{Res} des menschlichen Körpers aus [106].

Körperregion	f_{Res} in Hz	Körperregion	f_{Res} in Hz
Kopf axial	ca. 25	Wirbelsäule axial	10 - 12
Schultergürtel	4 - 5	Unterarm	16 - 30
Brustwand	ca. 60	Hand	50 - 200
Unterleibsmasse	4 - 8	Beine	2 - >20

2.3 Schwingungswahrnehmung

Die im LKW auftretenden fühlbaren Schwingungen werden über die im vorigen Abschnitt genannten Schnittstellen des Menschen mit dem Fahrzeug in den Menschen eingeleitet. Die Kontaktstellen auf Seiten des Menschen sind die Hände, die Füße sowie Gesäß und Rücken. Der Mensch als schwingungsfähiges System reagiert auf die eingeleiteten Schwingungen, welche zu Resonanzen im menschlichen Körper führen können. Eine Auswahl an körperbereichsabhängigen Resonanzfrequenzen f_{Res} ist in Tabelle 2.1 aufgeführt. In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die Schwingungswahrnehmung des Menschen bzgl. fühlbarer Schwingungen eingegangen. Dazu werden [20], [75], [108], [110] und [111] herangezogen. Zuerst werden die

für die Reizaufnahme verantwortlichen Sensoren im menschlichen Körper näher beschrieben. Im Anschluss daran erfolgt die Erläuterung des Prozesses vom Reiz zur Empfindung. Um den Zusammenhang von Reizstärke und Empfindungsintensität mathematisch beschreiben zu können, sind geeignete Wahrnehmungsmodelle notwendig. Die grundlegenden Modelle werden in Abschnitt 2.3.3 erläutert.

2.3.1 Sensorik des Menschen

Die Erfassung von fühlbaren Schwingungen zugrundeliegenden Reizen erfolgt beim Menschen über verschiedenartige Sensoren im menschlichen Körper. Dazu gehören spezialisierte Rezeptoren (Sinneszellen) in der Haut, die Informationen über Druck, Dehnung, Geschwindigkeit und Beschleunigung der Haut liefern. Darüber hinaus spielt der Vestibularapparat als Gleichgewichtsorgan und Detektor sowohl für translatorische Beschleunigungen als auch für Rotationsbeschleunigungen eine maßgebliche Rolle. Zusammen mit den Informationen aus dem sogenannten propriozeptiven System, welches Informationen aus dem Bewegungsapparat (u.a. Muskelspindeln, Sehnen, Gelenke...) liefert, kann die Lage des menschlichen Körpers und dessen Bewegung im Raum erfasst werden.

Mechanorezeptoren

Die für die Aufnahme mechanischer Reize verantwortlichen Mechanorezeptoren liegen in unterschiedlichen Schichten der Haut. Sie weisen verschiedene sogenannte Adaptionsraten auf, welche den zeitlichen Verlauf der Reaktion eines Rezeptors auf Reize beschreiben. Wirkt ein adäquater Reiz auf einen Rezeptor, führt dies zu einer Änderung des Rezeptorpotentials. Dessen Anstieg ist abhängig von der Intensität des Reizes. Steigt das Potential über die rezeptorspezifische Reizschwelle (Maß für die Empfindlichkeit des Rezeptors) an, erfolgt eine Umwandlung des Potentials in eine Serie elektrischer Impulse, die zum zentralen Nervensystem weitergeleitet werden. Je

höher das Rezeptorpotential, umso größer fällt die Frequenz der Impulse aus.

In den oberen Hautschichten liegen Merkelzellen (SA-Rezeptor: langsam adaptierend), Meissner-Körperchen und Haarfollikel-Sensoren (beides RA-Rezeptoren: schnell adaptierend). In den tieferen Schichten liegen Ruffini-(SA-Rezeptor) und Pacini-Körperchen (PC-Rezeptor: sehr schnell adaptierend) [75]. Je höher die Adaptionsrate eines Rezeptors ist, umso schneller nimmt das Rezeptorpotential aufgrund biologisch-chemischer Prozesse bei einem konstanten Reiz wieder ab. Bei Unterschreitung der Reizschwelle werden keine Impulse mehr gesendet.

Die SA-Rezeptoren bleiben bei einem anhaltenden Reiz über einen längeren Zeitraum elektrisch aktiv und detektieren infolgedessen Dauer und Intensität eines Reizes. Merkelzellen sind empfindlich für senkrecht auf die Haut wirkende Kräfte [75] und „messen [...] die Eindringtiefe eines mechanischen Reizes“ [20, S. 325]. Die Ruffini-Körperchen reagieren dagegen auf die Dehnung der Haut. Dabei antworten sie je nach Dehnungsrichtung und -stärke unterschiedlich. Sie „werden am stärksten bei der Einwirkung von Scherkräften gereizt“ [75, S. 375].

Demgegenüber unterschreiten die RA-Rezeptoren bei einem Dauerreiz schnell die Reizschwelle (z.B. Meissner-Körperchen 50 - 500 ms [20]) und sind dann wieder erregbar. Sie detektieren Reizänderungen und reagieren somit auf deren Geschwindigkeit. Dabei hängt die Impulsfrequenz von der Stärke der Reizänderung ab. Die Detektierung der Reizänderungen hat eine Empfindung von Berührung oder niederfrequenten Vibrationen zur Folge [75]. Die PC-Rezeptoren reagieren auf Beschleunigungen der Haut und nehmen Vibrationsreize auf [75]. Auf Grund der schnellen Adaption antworten die Rezeptoren nur zu Beginn und am Ende einer mechanischen Reizänderung. In Abbildung 2.7 ist der Verlauf der Aktionspotentialimpulse der unterschiedlichen Rezeptoren für einen rampenförmigen Reiz qualitativ dargestellt.

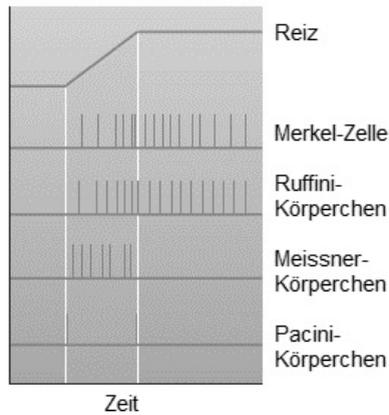


Abbildung 2.7: Qualitativer Zusammenhang zwischen dem Verlauf eines Reizes und den Aktionspotenzialen von Merkel-Zelle, Ruffini-, Meissner- und Pacini-Körperchen (nach [75])

Einige der aufgeführten Rezeptoren treten nicht nur in der Haut, sondern auch an anderen Stellen des menschlichen Körpers auf. So befinden sich beispielsweise die Pacini-Körperchen auch im Bauch- und Lungenfell sowie in der Faserschicht zwischen zwei Muskeln.

Vestibularapparat

Der Vestibularapparat ist ein Teil des Innenohres und ist für die Detektion von translatorischen Beschleunigungen und Drehbeschleunigungen zuständig, mit deren Hilfe er Informationen über die Lage des menschlichen Körpers im Raum liefert. Er setzt sich aus drei senkrecht zueinander stehenden Bogengangorganen und zwei senkrecht zueinander stehenden Maculaorganen zusammen [108] (vgl. Abbildung 2.8). Ihre Rezeptoren detektieren über feine Sinneshärchen, die in eine Flüssigkeit ragen, Informationen über Dreh- und Translationsbeschleunigungen, wobei die Rezeptoren schon in Ruhelage ein Aktionspotential aufweisen. Die Bogengänge sind mit einer gallertartigen Masse gefüllt und für die Detektion von Drehbeschleu-

nigungen zuständig. Bei der Wirkung von Drehbeschleunigungen bewegt sich diese Masse, wodurch die in die gallertartige Masse ragenden Sinneshärchen ausgelenkt werden. Dies führt zu einer Änderung des elektrischen Potentials der Rezeptoren und dadurch zu einer Änderung der Aktionspotentialfrequenz [108], [110].

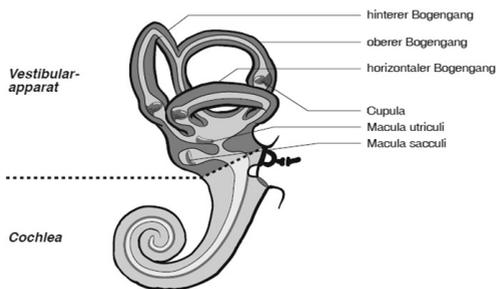


Abbildung 2.8: Aufbau des Vestibularapparates (aus [111])

Die beiden Maculaorgane sind für die Detektion von translatorischen Beschleunigungen zuständig. Deren Sinneshärchen sind ebenfalls in eine gallertartige Masse eingebettet, die durch den Zusatz von Otolithen eine höhere spezifische Dichte als die gallertartige Masse der Bogengänge aufweist. Hier werden die Masse und damit die Sinneshärchen durch Translationsbeschleunigungen ausgelenkt, was zur Änderung der Aktionspotentialfrequenz führt. Über die Zu- bzw. Abnahme der Aktionspotentialfrequenzen bei einer Bewegung des Kopfes kann zwischen positiven und negativen Bewegungsrichtungen unterschieden werden. Mit Hilfe der Informationen des Vestibularapparates und des propriozeptiven Systems können unbewusste und reflexartige Korrekturbewegungen zur Lage des menschlichen Körpers im Raum durchgeführt werden.

2.3.2 Prozess der Wahrnehmung

Ein physikalischer Reiz kann, wie im vorigen Abschnitt beschrieben, durch unterschiedliche Rezeptoren detektiert werden. Der Reiz löst Rezeptorpotentialänderungen aus, die zur Erregung von Nervenfasern führen [110]. Die Erregung der Nervenfasern wird in sensorische Gehirnzentren übertragen. Die Verarbeitung dieser Signale im Gehirn induziert subjektive Sinneseindrücke oder Empfindungen [110], aus deren Interpretation die Wahrnehmung entsteht [75]. Die Reaktion auf einen physikalischen Reiz und der damit verbundene Wahrnehmungsprozess ist von mehreren Einflussfaktoren abhängig: Zum einen haben körperliche Aspekte einen Einfluss auf die Schwingungsreaktionen des menschlichen Körpers und damit auf die Wahrnehmung. Dies sind unter anderem die Körpergröße, das Körpergewicht, das Alter, das Geschlecht und auch die Konstitution des jeweiligen Menschen. Die Schwingungswahrnehmung wird außerdem durch weitere Sinneseindrücke beeinflusst. Hier sind vor allem visuelle Eindrücke, Geräusche und auch Temperatureinflüsse zu nennen.

Des Weiteren kann zwischen Wahrnehmung und Erkennung unterschieden werden. Eine Erkennung liegt erst nach Überschreiten einer Erkennungsschwelle vor, was eine bestimmte Qualität der Wahrnehmung voraussetzt [98]. Bei den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen richtet sich die Wahrnehmung stets auf konkrete Schwingungsereignisse, die als solche eindeutig wahrgenommen und erkannt werden können. Infolgedessen wird nachfolgend nicht weiter zwischen Erkennung und Wahrnehmung von Schwingungsereignissen unterschieden.

Im Anschluss an die Wahrnehmung steht die Beschreibung des Wahrgenommenen. Um eine psychophysikalische Messung vornehmen zu können, ist das Wahrnehmungsereignis durch den Menschen mit Hilfe einer quantitativen Größe zu beschreiben [83]. Dies kann durch die Vergabe von Beurteilungsnoten erfolgen. Der Mensch „[...] wirkt also gleichzeitig als wahrneh-

mendes und beurteilendes Messorgan“ [83, S. 24], welches verschiedenen Messfehlern unterliegt.

Die Beschreibung des Wahrnehmungsereignisses hängt neben den Messfehlern des Messorgans „Mensch“ auch von der internen Referenz eines jeden Menschen ab [83]. Diese umfasst neben individuellen Erfahrungen und damit verbundenen Erwartungshaltungen auch unterschiedliche Wissensstände und Fähigkeiten (z.B. das analytische Beurteilen von Schwingungen beim Fahren eines LKW).

Die mathematische Beschreibung der Zusammenhänge zwischen physikalischen Reizstärken und subjektiven Empfindungsstärken wird auf dem Gebiet der Psychophysik untersucht. Die grundlegenden empirischen Gesetzmäßigkeiten werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

2.3.3 Empirische Gesetzmäßigkeiten der Psychophysik

Die Psychophysik befasst sich mit den Zusammenhängen zwischen subjektiven Empfindungsintensitäten und physikalisch messbaren Reizen [110]. Erste Zusammenhänge wurden dabei im Jahre 1834 von Weber gefunden. Darauf aufbauend folgten die Erkenntnisse von Fechner (1860) [110] und Stevens (1962) [45]. Diese grundlegenden Gesetzmäßigkeiten der Psychophysik werden im Folgenden anhand [110], [20], [111], [3] und [45] erläutert.

Gesetz von Weber

Weber fand in seinen Untersuchungen eine Abhängigkeit zwischen der kleinsten wahrnehmbaren Reizänderung (Unterschiedsschwelle ΔR) und der Stärke des jeweiligen Referenzreizes R . Der Reizzuwachs zur Überschreitung einer Unterschiedsschwelle und der jeweilige Referenzreiz

stehen nach Weber in einem konstanten Verhältnis (s. Gleichung 2.1). Die Konstante wird auch Weberkonstante genannt.

$$\frac{\Delta R}{R} = konst. \quad (2.1)$$

Je größer die Stärke eines Referenzreizes ist, umso größer muss auch die Stärke eines zweiten Reizes sein, um einen Unterschied zum Referenzreiz wahrzunehmen. Das Weber-Gesetz gilt allerdings nicht für Reize, die nahe an der Reizschwelle liegen oder deren Stärke sehr groß ist [3]. Dabei bezeichnet die Reizschwelle die „kleinste Intensität eines Reizes bestimmter Qualität, die gerade noch eine Empfindung hervorruft“ [111].

Weber-Fechner-Gesetz

Fechners Gesetz beruht auf dem Gesetz von Weber und beschreibt einen Zusammenhang zwischen Empfindungsintensität E und Reizstärke R (Gleichung 2.3). Dieser Zusammenhang basiert auf der Annahme, dass das Überschreiten einer Unterschiedsschwelle einem kleinstmöglichen Empfindungszuwachs ΔE entspricht, der in seiner Größe konstant ist. Somit entsteht eine Skala für die Empfindungsstärke in Einheiten der Unterschiedsschwellen. Der Nullpunkt dieser Skala entspricht der Reizschwelle R_0 . Mit Anwendung des Weber-Gesetzes folgt für den Empfindungszuwachs ΔE mit der Konstanten \bar{k} :

$$\Delta E = \bar{k} \frac{\Delta R}{R} . \quad (2.2)$$

Durch Integration des Zusammenhanges folgt als formaler Ausdruck für die Empfindungsintensität das Weber-Fechner-Gesetz:

$$E = \bar{k} * \ln \left(\frac{R}{R_0} \right) , \text{ mit } E = 0 \text{ für } R < R_0. \quad (2.3)$$

Eine logarithmische Zunahme der Reizstärke führt zu einer linearen Zunahme der Empfindungsintensität. Reizstärken unterhalb der Reizschwelle R_0 rufen dabei keine Empfindung hervor, wodurch $E = 0$ für $R < R_0$ gilt.

Stevens Potenzgesetz

Im Weber-Fechner-Gesetz wird die Empfindungsintensität nur indirekt durch die Verwendung von Unterschiedsschwellen als ein Vielfaches eines Referenzreizes dargestellt. Im Gegensatz dazu führte Stevens Untersuchungen unter Verwendung einer direkten Skalierung der subjektiven Empfindungsintensität durch. Er kam zu dem Ansatz, dass sich der Zusammenhang zwischen Empfindungsintensität und Reizstärke in Form von Potenzfunktionen darstellen lässt:

$$E = \bar{k}_1 (R - R_0)^{\bar{k}_2} . \quad (2.4)$$

E bezeichnet die Empfindungsintensität, R die Reizstärke und R_0 die Reizschwelle. \bar{k}_1 und \bar{k}_2 sind Skalierungsfaktoren. Das Stevens Potenzgesetz ermöglicht neben einer direkten Zuordnung der subjektiv empfundenen Intensität auf einer Rationalskala auch die Darstellung des ungenauen Bereiches des Weber-Fechner-Gesetzes.

2.4 Definition untersuchter Schwingungsphänomene

Als Schwingungsphänomene werden im Folgenden durch den Fahrzeuginsassen wahrgenommene, fühlbare Schwingungsereignisse verstanden, die sich eindeutig durch die Wirkrichtung, die Frequenz, die Schwingform und Einleitungsstelle in den menschlichen Körper unterscheiden. Des Weiteren wird zwischen transienten und periodischen Ereignissen unterschieden. Dies erlaubt eine eindeutige Benennung und Beschreibung verschiedenartiger Schwingungsphänomene.

Im Rahmen dieser Arbeit werden drei Schwingungsphänomene untersucht.

Tabelle 2.2: Notationen zur Beschreibung von Bewegungsrichtungen

Bewegungsrichtung	Notation
Translation in x-Richtung	tx
Translation in y-Richtung	ty
Translation in z-Richtung	tz
Rotation um die x-Achse	rx
Rotation um die y-Achse	ry
Rotation um die z-Achse	rz

Diese werden nachfolgend definiert und zeichnen sich jeweils durch eine Hauptbewegungsrichtung aus. Als Hauptbewegungsrichtung wird hier diejenige Bewegungsrichtung verstanden, ohne dessen Komponente das jeweilige Schwingungsphänomen nicht auftreten würde. Zur eindeutigen Beschreibung von Bewegungsrichtungen wird das in Abbildung 2.9 dargestellte, sich mit dem Fahrerhaus bewegende Koordinatensystem eingeführt.

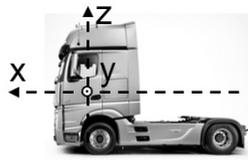


Abbildung 2.9: Verwendetes Koordinatensystem am Beispiel eines Actros aus [27]

Die Bewegungsrichtungen werden dabei nach denen in Tabelle 2.2 aufgeführten Notationen bezeichnet.

2.4.1 Längsstößen

Unter „Längsstößen“ wird ein auf dem Fahrersitz im unteren Rücken- und Gesäßbereich wahrgenommenes Stoßen verstanden, welches hauptsächlich auf optisch ebener Fahrbahn auffällt. Die Hauptbewegungsrichtung des „Längsstößens“ entspricht einer Translation in x-Richtung (vgl. Abbildung 2.10).



Abbildung 2.10: Hauptbewegungsrichtung des „Längsstößens“ am Beispiel eines Actros aus [27]

Das Stoßen resultiert aus einer Vertikalanregung der Hinterachse, welche zu vertikalen Rahmenschwingungen führt. Diese Vertikalschwingungen werden durch die Kinematik der Fahrerhausanbindung in harmonische Längsschwingungen des Fahrerhauses umgesetzt, die in einem noch zu bestimmenden Frequenzbereich als Stöße wahrgenommen werden. Des Weiteren können bei den hier untersuchten Sattelzugmaschinen Stöße durch den Auflieger eingeleitet werden. Die Nickbewegung des Aufliegers führt dabei auf Grund dessen größerer Masse zu einer stoßartigen Längsbewegung der Sattelzugmaschine und damit zu „Längsstößen“.

2.4.2 Nicken

Unter „Nicken“ wird eine wahrgenommene Rotation um die Fahrzeugquerachse verstanden. Die Hauptbewegungsrichtung des „Nickens“ entspricht somit einer Rotation um die y-Achse (vgl. Abbildung 2.11).



Abbildung 2.11: Hauptbewegungsrichtung des „Nickens“ am Beispiel eines Actros aus [27]

Bezüglich des Fahrkomforts wird nur das „Nicken“ durch Fahrbahnanregungen betrachtet. Nickbewegungen auf Grund von fahrdynamischen Manövern, wie zum Beispiel das Bremsen, bleiben hier außen vor. Auslöser von fahrkomfortrelevanten Nickbewegungen sind beidseitige Unebenheiten der Fahrbahn. Resultierende phasenverschobene Federbewegungen der vorderen und hinteren Fahrerhauslagerung oder alleinige Federbewegung der vorderen oder hinteren Fahrerhauslagerung führen zu einer Rotation des Fahrerhauses um die y -Achse. Entsprechend führen phasenverschobene oder einseitige Federbewegungen der vorderen und hinteren Achsfedern zu einer Nickbewegung des Fahrzeuges. Beide Fälle resultieren in einer wahrgenommenen Nickbewegung auf dem Fahrersitz.

2.4.3 Wanken

Unter „Wanken“ wird eine wahrgenommene Rotation um die Fahrzeuglängsachse verstanden. Die Hauptbewegungsrichtung des „Wankens“ ist somit eine Rotation um die x -Achse (vgl. Abbildung 2.12). Die Bewegung des menschlichen Oberkörpers und die Bewegung der Rückenlehne des Fahrersitzes befinden sich dabei in Phase. Bezüglich des Fahrkomforts wird nur das „Wanken“ durch Fahrbahnanregungen betrachtet. Wankbewegungen auf Grund von fahrdynamischen Manövern, wie zum Beispiel eine Kurvenfahrt, werden hier nicht bewertet. Auslöser von fahrkomfortrelevanten Wankbewegungen sind wechsel- oder einseitige Unebenheiten der Fahrbahn. Diese führen zu einer phasenverschobenen oder einseitigen

Federbewegung der linken und rechten Fahrerhauslagerung und somit zu einer Wankbewegung des Fahrerhauses. Genauso können phasenverschobene oder einseitige Achsfederbewegungen zu einer Wankbewegung des Gesamtfahrzeuges führen.



Abbildung 2.12: Hauptbewegungsrichtung des „Wankens“ am Beispiel eines Actros aus [27]

3 Stand der Forschung

Die Objektivierung der Schwingungswahrnehmung und die Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Wahrnehmung von Schwingungen ist seit vielen Jahren Gegenstand der Forschung. Dabei wird unter Objektivierung der Schwingungswahrnehmung die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen objektiv messbaren physikalischen Größen oder daraus abgeleiteter Kennwerte und zugehörigen subjektiven Evaluierungen bzgl. der Schwingungswahrnehmung verstanden. Im vorliegenden Kapitel wird zuerst auf die Arbeiten zur Untersuchung von Einflussfaktoren auf die Schwingungswahrnehmung eingegangen. Der darauf folgende Abschnitt geht auf Verfahren zur Bewertung von Schwingungen ein. Im dritten Abschnitt folgt die Vorstellung von in der Literatur bekannten Ansätzen zur Objektivierung der Schwingungswahrnehmung. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels erfolgt die Formulierung der Zielsetzung der Arbeit und eine Abgrenzung zu den bereits bestehenden Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Objektivierung des Schwingungskomforts.

3.1 Einflussfaktoren auf die Schwingungswahrnehmung

Im Allgemeinen unterscheidet man bei Humanschwingungen zwischen Ganzkörperschwingungen und lokalen Schwingungen. Ganzkörperschwingungen treten auf, wenn der menschliche Körper durch eine schwingende Oberfläche abgestützt wird [42]. Dies ist beim sitzenden Menschen der Fall, der durch die Sitzfläche und gegebenenfalls durch die Rückenlehne gestützt wird. Lokale Schwingungen treten auf, wenn ein oder mehrere Gliedmaßen oder der Kopf direkt durch Schwingungen angeregt werden [42]. Dies kann

im Fahrzeug durch Vibrationen des Lenkrades, der Kopfstützen oder der Fußaufstandsflächen geschehen.

Die Schwingungswahrnehmung hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Zum einen sind dies anthropometrische Einflüsse (Alter, Geschlecht, Konstitution, usw.), psychologische Einflüsse (z.B. die Erwartungshaltung) und Einflüsse von außen, wie beispielsweise Geräusche und visuelle Eindrücke. Zum anderen beeinflussen die Körperhaltung, die Schwingungsrichtung, die Einleitungsstelle in den Körper, die Schwingungsart (periodisch, regellos oder transient), die Stärke und Dauer der Schwingung sowie deren Frequenz [42] die Schwingungswahrnehmung.

3.1.1 Wahrnehmungsschwellen, Unterschiedsschwellen und Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke

Schwingungswahrnehmungen können durch Wahrnehmungsschwellen, Unterschiedsschwellen und Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke beschrieben werden, die in [42], [15], [17], [16], [91], [10], [36], [35], [86], [87] verwendet werden. Wahrnehmungsschwellen bezeichnen die geringste Stärke einer Schwingung, die gerade noch wahrnehmbar ist. Eine Unterschiedsschwelle bezeichnet ausgehend von einer ersten Schwingung die Stärke einer zweiten Schwingung, die gerade noch als unterschiedlich wahrgenommen wird. Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke beschreiben Kombinationen aus Frequenz und Amplitude, die vom Probanden als gleich stark wahrgenommen werden. Beispielhaft sei hier eine Arbeit von Morioka und Griffin [86] erwähnt, in der Wahrnehmungsschwellen und Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke für sinusförmige Schwingungen in longitudinaler, lateraler und vertikaler Bewegungsrichtung untersucht werden. Deren Ergebnisse sind in Abbildung 3.1 dargestellt und verdeutlichen die unterschiedlichen Verläufe für variierende Anregungsstärken und Bewegungsrichtungen.

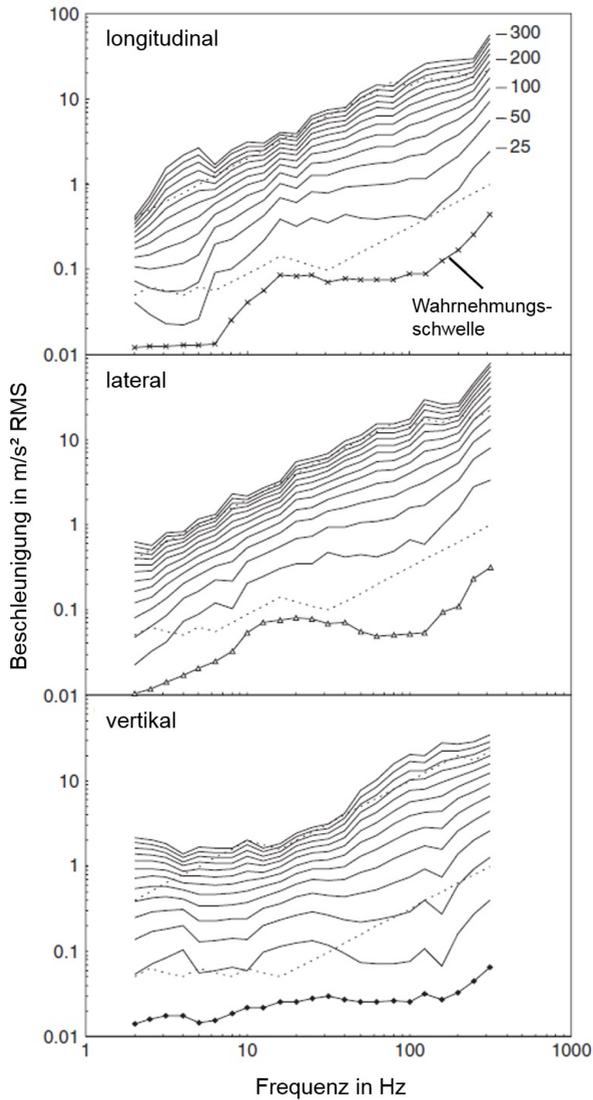


Abbildung 3.1: Äquivalente Komfortkonturen für Wahrnehmungsstärken von 25-300 nach Gleichung 2.4 relativ zu einer Schwingungsstärke von 1,0 m/s² RMS (Vertikalschwingungen) oder 0,5 m/s² RMS (Longitudinal- und Lateralschwingungen) bei 20 Hz nach [86]

Die Medianwerte der Wahrnehmungsschwellen sind für jede Bewegungsrichtung jeweils durch die unterste Kurve dargestellt. Gepunktete Linien kennzeichnen den Bereich der untersuchten Anregungen.

3.1.2 Biodynamische Reaktionen des menschlichen Körpers

Neben dem Wahrnehmungsaspekt ist auch die biodynamische Reaktion des menschlichen Körpers auf Schwingungsanregungen Gegenstand vieler Forschungsarbeiten, beispielsweise [105], [94], [95], [96], [97], [117], [104], [29], [118], [131], [130]. Nawayseh und Griffin zeigen in ihren Arbeiten [94], [95], [96] und [97], dass die effektive Schwingmasse des Menschen bei vertikalen und longitudinalen Schwingungen von der Körperhaltung des sitzenden Menschen, der Stärke der Anregung und von der anregenden Frequenz abhängt. Die effektiven Schwingmassen weisen Resonanzfrequenzen im Bereich um 5 bis 7 Hz auf, in longitudinaler Richtung zusätzlich im Bereich von 1 bis 2 Hz.

Matsumotoa und Griffin untersuchen den Einfluss der Stärke von kontinuierlichen und von transienten Ganzkörperschwingungen in vertikaler Richtung [80]. Sie zeigen, dass die biodynamischen Reaktionen und Diskomfortbewertungen durch die Stärken der Anregungen beeinflusst werden, vor allem im Bereich von 3,14 bis 4 Hz. Des Weiteren können Korrelationen zwischen den Diskomfortbewertungen und der effektiven Schwingmasse sowie den mechanischen Impedanzen aufgezeigt werden.

Rakheja und Stiharu weisen nach, dass die Resonanzfrequenzen bei Vertikalschwingungen auch von der Haltung der Arme abhängen. Die Resonanzfrequenzen fallen niedriger aus, wenn die Arme in Lenkradhaltung positioniert sind [105]. Des Weiteren zeigen Toward und Griffin [117], dass die körperliche Reaktion auf vertikale Schwingungen auch von anthropometrischen Größen wie dem Alter, der Statur, dem Body-Mass-Index (BMI) und dem Geschlecht (siehe auch Dewangan et al. [29]) abhängen.

Qiu und Griffin zeigen eine Abhängigkeit des biodynamischen Verhaltens

vom Vorhandensein einer Rückenlehne bei longitudinalen und vertikalen regellosen Schwingungen auf [104]. Danach fällt bei vorhandener Rückenlehne die effektive Schwingmasse des Menschen in longitudinaler Richtung im Frequenzbereich von ca. 2 bis 10 Hz größer aus als bei nicht vorhandener Rückenlehne. Unter 2 Hz ist dagegen die longitudinale und unter 6 Hz die vertikale effektive Schwingmasse bei vorhandener Rückenlehne geringer. Untersuchungen von Shibata [112] zeigen einen signifikanten Einfluss der Phasenverschiebung zweier korrelierender Schwingungen in unterschiedlichen Raumrichtungen auf die vertikale effektive Schwingmasse des Menschen, der im Frequenzbereich von 1 bis 4 Hz am stärksten auftritt. Zhou und Griffin zeigen, dass sich die effektive Schwingmasse bei vertikalen sinusförmigen Anregungen und bei regellosen Anregungen ähnlich verhält [130]. Außerdem untersuchen sie in [131] den Diskomfort bei sinusförmigen Schwingungen in Vertikalrichtung und zeigen, dass sich die Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke und die biodynamischen Reaktionen des menschlichen Körpers konsistent verhalten.

3.1.3 Sitzeigenschaften und Körperhaltung

Eine Vielzahl empirischer Untersuchungen widmet sich dem Einfluss verschiedener Sitzeinstellungen auf die Reaktionen des menschlichen Körpers unter Schwingungseinwirkung. Zunächst zeigen Hinz et al. [49], dass das Vorhandensein einer Rückenlehne das Übertragungsverhalten von Ganzkörperschwingungen auf die Wirbelsäule beeinflusst. Rückenlehenschwingungen werden nach Qiu und Griffin [103] maßgeblich durch Nick- und Wankschwingungen in Kombination mit translatorischen Schwingungen beeinflusst.

Eine besondere Bedeutung hat die Neigung der Rückenlehne sowohl für die biodynamische Reaktion des sitzenden menschlichen Körpers als auch für den wahrgenommenen Diskomfort. Nawayseh [93] zeigt, dass mit zunehmender Rückenlehnenneigung die Gesamtstärke der Schwingungen an

der Rückenlehne zunimmt. Dabei wird die resultierende Schwingung in x-Richtung verstärkt und in z-Richtung reduziert.

Jalil und Griffin [59] zeigen bzgl. longitudinaler Schwingungen der Rückenlehne, dass die Resonanzfrequenz der Rückenlehne unter Einfluss des sitzenden Menschen mit zunehmender Rückenlehnenneigung steigt, während demgegenüber die Neigung der Sitzfläche nur geringe Auswirkungen auf die Resonanzfrequenz der Rückenlehne hat.

Für Schwingungen, die normal [6] und parallel [7] zur Rückenlehne wirken, weisen Basri und Griffin mit steigender Neigung der Rückenlehne eine Erhöhung der Wahrnehmungsschwellen im Frequenzbereich von 4 bis 8 Hz nach, welche für parallele Schwingungen allerdings nur gering ausfällt. Bezüglich vertikaler Ganzkörperschwingungen zeigen sie in [8], dass die Rückenlehne für Frequenzen größer 8 Hz zu einem höheren Diskomfort führt, was sich vor allem bei geneigter Rückenlehne auswirkt. Bei Frequenzen zwischen 5 bis 6,3 Hz konnte der Diskomfort durch eine geneigte Rückenlehne dagegen gesenkt werden. Beard und Griffin [11] zeigen, dass der Diskomfort des sitzenden Menschen unter Wirkung von Lateralschwingungen im Frequenzbereich von 0,2 bis 1 Hz mit vorhandener Rückenlehne geringer ist als ohne Rückenlehne. Auch die Höhe der Rückenlehne hat einen Einfluss auf den Diskomfort von niederfrequenten Lateral- und Wankschwingungen [13]. Eine hohe Rückenlehne verstärkt den Diskomfort bei Lateralschwingungen unter 0,63 Hz, reduziert ihn aber bei Schwingungen bis 1 Hz. Bei Wankschwingungen reduziert eine hohe Rückenlehne den Diskomfort im Frequenzbereich bis 0,63 Hz.

Betrachtet man die Neigung der Sitzfläche, so hat ein Neigungswinkel bis zu 15° einen vernachlässigbaren Einfluss auf die vertikale effektive Schwingmasse des sitzenden Menschen unter Einwirkung von vertikalen Ganzkörperschwingungen. Allerdings wirkt sich die Neigung auf die effektive Schwingmasse in longitudinaler Richtung aus.

Weitere Studien widmen sich der Sitzpolsterung. Grundsätzlich beeinflusst gemäß Hinz et al. [51] eine Sitzpolsterung und damit die Kontaktbedingun-

gen zwischen Sitz und Mensch dessen effektive Schwingmasse. Das Übertragungsverhalten des Sitzes kann durch den sogenannten SEAT-Wert ausgedrückt werden, der das Verhältnis aus der Schwingungsbelastung des gepolsterten Sitzes durch die Schwingungsbelastung eines starren Sitzes bildet [42]. Basri und Griffin wenden diesen unter anderem zur Vorhersage der Schwingungsisolierung eines Sitzes an [9].

Nach Tufano und Griffin [118] wird die Resonanzfrequenz der effektiven Schwingmasse des sitzenden Menschen durch die vertikalen Übertragungseigenschaften des Sitzes nicht beeinflusst. Die effektive Schwingmasse fällt auf einem gepolsterten Sitz jedoch leicht geringer aus als auf einem starren Sitz. Der Sitzschaum zeigt dabei nichtlineare Übertragungseigenschaften. Auch die Stärke des Sitzschaumes spielt eine Rolle [129]. Sie hat eine geringe Auswirkung auf das vertikale und longitudinale Übertragungsverhalten an der Sitzfläche und Rückenlehne. Der Sitzschaum reduziert zudem die Resonanzfrequenzen in vertikaler Richtung im Vergleich zu einem starren Sitz. Beard und Griffin [12] zeigen, dass ein Sitzschaum das Übertragungsverhalten von Lateral- und Wankschwingungen zum menschlichen Körper im Frequenzbereich von 0,25 bis 1 Hz verstärkt. Ein verstärkter Diskomfort tritt bei lateralen Schwingungen im Frequenzbereich unter 0,63 Hz auf, bei Wankschwingungen unter 0,4 Hz.

Als Fazit kann mit Blick auf die geplanten Untersuchungen festgehalten werden, dass Veränderungen des Sitzes, insbesondere Änderungen der Sitzpolsterung oder der Rückenlehnenneigung, die Schwingungswahrnehmung des Fahrers beeinflussen.

3.1.4 Druckverteilung zwischen Mensch und Sitz

Als eine für den statischen Diskomfort relevante Größe hat sich die Druckverteilung an der Schnittstelle zwischen Mensch und Sitz herausgestellt. Die dort wirkende Kraft sowie die Stärke des mittleren Druckes sind nicht nur vom Sitzschaum, sondern nach [124], [125], [44] auch von der Sitzhöhe,

dem Körperbau und der Sitzhaltung abhängig. Auch der BMI [52] und das Geschlecht [50] spielen bei der Druckverteilung eine entscheidende Rolle. Nag et al. [92] zeigen außerdem, dass die Druckverteilungen in Abhängigkeit der Rückenlehnenneigung, Sitzflächenneigung und dem Vorhandensein von Armlehnen variieren.

Bezüglich der statischen Diskomfortbewertung kann nach Hartung [46] grundsätzlich festgehalten werden, dass Sitze, bei denen hohe Drücke zwischen Mensch und Sitz auftreten, mit einem höheren statischen Diskomfort bewertet werden als Sitze, die niedrige Drücke verursachen. Anhand der mit keinem oder geringem Diskomfort bewerteten Lastverteilungen leitet er eine optimale Lastverteilung für Sitze ab. Kolich et al. [72] zeigen, dass die Diskomfortbewertung von der Körpermasse, der ästhetischen Erscheinung des Sitzes, der Gesamtkraft auf der Sitzfläche und der Rückenlehne, dem maximalen Druck an der Sitzfläche, und dem Druck an der Rückenlehne abhängt. Der Einfluss des ästhetischen Gefallensurteils und der optimalen Sitzdruckverteilung auf die Bewertung des Sitzkomforts wird von Knoll [69] bestätigt.

Nach der Arbeit von Mergl [81] sind die prozentuale Last, der maximale Druck und der Gradient der Drucksummenkurve verschiedener Körperbereiche für die subjektive Bewertung des Sitzkomforts ausschlaggebend. Er leitet Werte und Gestaltungsregeln für einen optimalen Sitzkomfort ab, die sowohl für das Kurz- als auch das Langzeitverhalten gelten.

Zenk [127] wendet die von Mergl erstellten optimalen Werte in einem Fahrzeug an und zeigt, dass diese mit einem geringen Druck an der Bandscheibe korrelieren. Er entwickelt auf dieser Basis eine Apparatur und Regelung, welche mit Hilfe von Blasenlementen im Sitz automatisiert die optimale Sitzdruckverteilung zwischen Fahrersitz und Fahrer einstellt. Er konnte die optimalen Werte von Mergl somit im Fahrzeug validieren.

3.1.5 Geräuscheinfluss

Das Auftreten von Geräuschen beeinflusst die Wahrnehmung von fühlbaren Schwingungen. Dies zeigen unter anderem die Untersuchungen [18], [64], [116], [54], [56] und [57].

Kaufmann et al. untersuchen Punkte gleicher Wahrnehmungsstärke von vertikalen Schwingungen (normalverteilt, bandpassbegrenzt mit einer halben Oktave, Mittenfrequenz 31,5 Hz) des sitzenden Menschen bei gleichzeitig und zeitversetzt auftretendem Geräusch (normalverteilt, bandpassbegrenzt mit einer halben Oktave, Mittenfrequenz 100 Hz) [64]. Sie zeigen einen signifikanten Einfluss des Schalldruckpegels auf die Punkte gleicher Wahrnehmungsstärke. Zudem stellen sie einen signifikanten Reihenfolgeeffekt fest. Dieser ist davon abhängig, ob erst das Geräusch oder erst die Schwingung präsentiert wird. Töpken et al. untersuchen für die genannten Schwingungen und Geräusche den Einfluss des Zeitversatzes zwischen Geräusch und Schwingungsdarbietung [116]. Für eine Signaldauer von 1 s und maximalen Zeitversätzen von $\pm 1,5$ s zeigt sich kein statistisch signifikanter Einfluss des zeitlichen Versatzes auf die Punkte gleicher Wahrnehmungsstärken.

Huang und Griffin untersuchen auf einem Simulator den Diskomfort, der durch vertikale Schwingungen einer PKW-Fahrt und den zugehörigen Innenraumgeräuschen verursacht wird [54]. Der Diskomfort der Schwingungen wird dabei relativ zum Diskomfort des Geräusches und umgekehrt bewertet. Auch hier zeigt sich ein deutlicher Reihenfolgeeffekt. D.h. die Bewertung ist davon abhängig, ob das Geräusch relativ zur Schwingung oder umgekehrt bewertet wird. Geräusche höherer Lautstärke maskieren dabei den Diskomfort, der durch Schwingungen geringerer Stärke verursacht wird. Die Bewertung des Diskomforts der Schwingungen wird durch Geräusche mehr beeinflusst als umgekehrt. Weiterhin untersuchen Huang und Griffin den Diskomfort des sitzenden Menschen bei regellosen vertikalen Ganzkörperschwingungen im Frequenzbereich von 5 bis 10 Hz

und gleichzeitig bzw. separat präsentierten Geräuschen im Frequenzbereich von 50 bis 500 Hz [56]. Mit steigender Lautstärke sinkt der durch die gleichzeitigen Schwingungen verursachte Diskomfort. In einer weiteren Untersuchung zeigen Huang und Griffin, dass sich der Einfluss der Geräusche auf die Bewertung der Schwingungen mit steigender Dauer nicht ändert [57]. Der Einfluss der Schwingungen auf die Bewertungen der Geräusche sinkt allerdings mit steigender Einwirkungsdauer.

3.1.6 Maskierungseffekte durch Schwingungen

Die Wahrnehmung von Schwingungen kann durch das Vorhandensein anderer Schwingungen geschwächt werden. Dieses Phänomen wird als Maskierungseffekt bezeichnet. Zu den wenigen Untersuchungen zur Maskierung durch Schwingungen zählen die Arbeiten von Morioka und Griffin [85], [88]. Sie untersuchen den Einfluss einer Maskierungsschwingung auf die Wahrnehmungsschwelle von sinusförmigen Schwingungen am Mittelfinger und an der Hand [85]. Dazu wurde den Probanden ein Testsignal in Form einer Sinusschwingung präsentiert, die in vier Frequenzstufen von 16 bis 125 Hz variiert wurde. Im Anschluss folgte eine kurze Pause und eine Maskierungsphase. In der Maskierungsphase wurde das Maskierungssignal in Form einer regellosen 16 oder 125 Hz Schwingung mit einer 1/3 Oktaven-Bandbreite abgespielt. Die Maskierungsphase wurde in zwei Beurteilungsabschnitte eingeteilt. In einer der beiden Abschnitte wurde das Testsignal überlagert. Die Probanden sollten daraufhin angeben, in welchem der beiden Abschnitte das Testsignal enthalten ist. Je nach richtiger oder falscher Antwort wurde die Amplitude des Testsignals nach der in [123] vorgestellten Methode verstärkt oder abgeschwächt. Über die Medianberechnung wurden daraufhin für verschiedene Maskierungsstärken und Frequenzen des Testsignals die Wahrnehmungsgrenzen bestimmt. Es stellte sich eine eindeutige Abhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle von der Stärke der Maskierungsschwingung heraus. In einer weiteren Untersuchung betrachten Morio-

ka und Griffin die Wahrnehmungsschwellen für longitudinale sinusförmige Rückenlehenschwingungen bei vorhandener Maskierungsschwingung [88]. Es wurde die gleiche Vorgehensweise wie in [85] verwendet. Das Testsignal entsprach hier einer 2 s andauernden Sinusschwingung, die in vier Stufen von 4 bis 31,5 Hz variiert wurde. Das Maskierungssignal stellt eine regellose, 7 s andauernde Schwingung mit einer Mittenfrequenz von 4 Hz und einer Bandbreite von 1/3 Oktave dar. Das Vorhandensein der Maskierungsschwingung erhöht die Wahrnehmungsschwellen bei jeder betrachteten Frequenz in Abhängigkeit der Stärke der Maskierungsschwingung und des Frequenzunterschiedes zum Testsignal. Je größer der Frequenzunterschied ausfällt, umso geringer ist die Auswirkung der Maskierung.

Ljunggren et al. untersuchen die Schwingungswahrnehmung des sitzenden Menschen bei Wirkung von sinusförmigen vertikalen Ganzkörperschwingungen im Frequenzbereich von 5 bis 31,5 Hz [77]. Dies geschieht zunächst für einzelne Frequenzen und anschließend mit Überlagerung einer 8 Hz Schwingung. Die Wahrnehmungsschwellen der einzelnen Frequenzen stimmen mit den aus der Literatur bekannten Grenzen überein. Bei Überlagerung einer 8 Hz-Schwingung sind die Wahrnehmungsschwellen bis auf 10 Hz größer. Der Diskomfort steigt dabei mit zunehmender Frequenzannäherung der untersuchten sinusförmigen Schwingungen an die 8 Hz-Schwingung und mit zunehmender Amplitude der Schwingungen.

Knauer untersucht die Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen von harmonischen Schwingungen, von Frequenzbändern und von Impulsen bei vorhandenem Grundrauschen [68]. Die Frequenzen der harmonischen Schwingungen, die Mittenfrequenzen der Frequenzbänder und deren Bandbreite sowie die Stärke der Impulse werden variiert. Des Weiteren wird der Pegel des Grundrauschens variiert. Die Maskierungswirkung der harmonischen Schwingungen hängt dabei von der spektralen Distanz der untersuchten Frequenz von der Mittenfrequenz des maskierenden Grundrauschens ab. Auch hier sinkt die maskierende Wirkung mit größer werdendem Frequenzunterschied. Mit steigendem Pegel des Grundrauschens steigt auch die Wahr-

nehmungsschwelle der harmonischen Schwingungen. Die Ergebnisse gelten ebenfalls für die untersuchten Frequenzbänder. Die Wahrnehmungsschwellen der Impulse hängen ebenfalls von der Stärke des Grundrauschens ab. Die Ergebnisse von Knauer erweisen sich als konsistent zu denen von Morioka und Griffin.

3.1.7 Weitere Einflüsse auf die Bewertung des Diskomforts

Weitere Untersuchungen zum Einfluss auf die Diskomfortbewertungen wurden von Ahn und Griffin durchgeführt [2]. Sie untersuchen den Einfluss von Frequenz, Stärke, Dämpfung und Schwingungsrichtung von vertikalen mechanischen Stößen auf die Diskomfortbewertung des sitzenden Menschen. Die Frequenz wurde in 16 Stufen im Bereich von 0,5 bis 16 Hz variiert, die Stärke in fünf Stufen und die Dämpfung in vier Stufen. Sie zeigen, dass die Frequenzabhängigkeit des Diskomforts durch vertikale Stöße von der Stoßstärke abhängt. Mit steigender Stoßstärke sinkt die Wachstumsrate des Diskomforts bei steigender Frequenz des Stoßes. Die Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke variieren somit mit der Frequenz und hängen von der Stoßstärke ab. Die größte Empfindlichkeit ist im Bereich von 4 bis 12,5 Hz zu beobachten.

In einer weiteren Untersuchung bestimmt Ahn für stoßartige, vertikale Ganzkörperschwingungen im Frequenzbereich von 0,5 bis 16 Hz Kurven gleicher Wahrnehmungsstärke und leitet daraus eine Gewichtungskurve für die Bewertung von vertikalen Ganzkörperstößen ab [1]. Hier zeigt sich die größte Empfindlichkeit bei Frequenzen unter 0,63 Hz sowie im Bereich zwischen 5 und 6,3 Hz. Die Anwendung der Gewichtungskurven auf die Beschleunigung der Stöße weist gute Korrelationen zu den Diskomfortbewertungen auf.

Wyllie und Griffin untersuchen den Diskomfort des sitzenden Menschen für sinusförmige Nick- und Längsschwingungen für Frequenzen zwischen 0,2 und 1,6 Hz [126]. Die Untersuchungen wurden mit und ohne Rücken-

lehne auf einem starren Sitz durchgeführt. Auch hier zeigt sich eine Abhängigkeit des Diskomforts von der Stärke und der Frequenz der Schwingungen. Bei Frequenzen größer 0,4 Hz mit Rückenlehne und größer 0,8 Hz ohne Rückenlehne werden Längsschwingungen, die aus Nickbewegungen resultieren, mit größerem Diskomfort bewertet als reine Längsschwingungen. Nickschwingungen erzeugen also einen größeren Diskomfort als reine Längsschwingungen. Eine Rückenlehne steigert den Diskomfort von Nickschwingungen ab Frequenzen größer als 0,63 Hz, aber senkt den Diskomfort für reine Längsschwingungen.

Huang und Griffin vergleichen die absolute und die relative Bewertung der Stärke von Schwingungen und Geräuschen [55]. Dabei werden 13 Stärken an regellosen Schwingungen im Frequenzbereich von 5 bis 10 Hz und 13 Geräuschpegel im Frequenzbereich von 50 bis bis 500 Hz betrachtet. Die Schwingungen und Geräusche werden absolut und relativ zu einem weiteren Signal hinsichtlich des Diskomforts bewertet. Es zeigen sich für beide Methoden hohe Korrelationen zwischen der jeweiligen Stärke und der Diskomfortbewertung. Die relative Bewertungsmethode erweist sich jedoch als stabiler gegenüber wiederholten Bewertungsabgaben.

Mulder und Abbink untersuchen die Wahrnehmung des Diskomforts anhand von Fahrzeugschwingungen in der translatorischen x- und z-Richtung sowie der Rotation um die y-Achse [90]. Die drei Bewegungsrichtungen werden einzeln betrachtet und in ihrer Stärke und Frequenzbandbreite variiert. Der Diskomfort steigt mit steigender Schwingungsstärke und größer werdender Frequenzbandbreite. Es zeigt sich dabei eine Kombination aus Stärke und Frequenzbandbreite, die einen maximalen Diskomfort hervorruft. Der Zusammenhang zwischen Diskomfortbewertung und Effektivwert der Schwingungen wird durch eine Funktion zweiten Grades angenähert.

3.2 Verfahren zur Schwingungs- und Diskomfortbewertung

Im Folgenden werden unterschiedliche Verfahren zur Schwingungsbewertung dargestellt. In der VDI-Norm 2057 von 1987 ([119], [120], [121]) wird die „Bewertete Schwingstärke“ $K(t)$ als Kennwert für das Ausmaß der auf den Menschen einwirkenden Schwingungen verwendet. $K(t)$ entspricht dabei einem frequenzbewerteten, bandbegrenzten und normierten Schwingungssignal. Der Effektivwert K_{eff} der „Bewerteten Schwingstärke“ wird dabei als Maß für die Schwingungseinwirkung benutzt und berechnet sich durch die Integration des zeitabhängigen Signals $K(t)$ folgendermaßen:

$$K_{eff} = \sqrt{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} K(t)^2 dt}. \quad (3.1)$$

Die Bestimmung der K-Werte erfolgt durch die an der Schwingungseinleitungsstelle gemessenen Beschleunigungen und ist raumrichtungs- und körperhaltungsabhängig. Beispielhaft ist in Abbildung 3.2 der Verlauf für die z-Beschleunigung bei sitzender Körperhaltung dargestellt.

Die Bewertung mittels K-Werten gilt inzwischen als veraltet. Dennoch wird dieser Ansatz hier vorgestellt, da eine Vielzahl an Untersuchungen diese Methode anwenden.

Cucuz untersucht das Schwingempfinden von PKW-Insassen und die Auswirkung von stochastischen Unebenheiten und Einzelhindernissen in z-Richtung auf den Diskomfort des sitzenden Menschen [25]. Dabei berücksichtigt er die Schwingungseinleitung durch den Sitz, die Füße und die Hände. Für diese Einleitungsstellen leitet er Bewertungsfaktoren zu den jeweiligen K-Werten ab, aus denen er eine Gesamtschwingungsbelastung berechnet. Des Weiteren zeigt er, dass regellose Schwingungen stärker wahrgenommen werden als reine sinusförmige Schwingungen.

Hennecke erweitert den K-Wert um einen Instationaritätsfaktor IF , welcher von den Amplitudeneigenschaften des Zeitsignals abhängt und die Anteile transienter Ereignisse im Schwingungssignal berücksichtigt [48]. Durch Multiplikation des Instationaritätsfaktors mit dem K-Wert ergibt sich der erweiterte K-Wert K_{erw} , der nach Hennecke gut mit dem subjektivem Empfinden korreliert.

$$K_{erw} = K_{eff} \cdot IF . \tag{3.2}$$

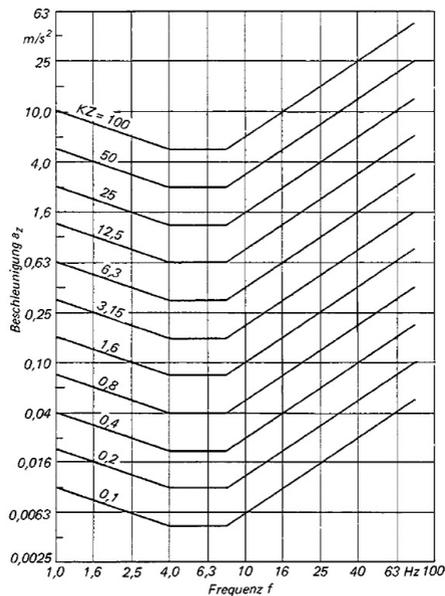


Abbildung 3.2: Kurven gleicher „Bewerteter Schwingstärken“ K in Abhängigkeit von Frequenz und Schwingbeschleunigung bei Einwirkung in z-Richtung (KZ) für den sitzenden Menschen [120]

Klingner leitet für 11 verschiedene Einleitungsstellen Gewichtungsfaktoren B zur Berechnung der „Bewerteten Schwingstärke“ aus der kreisfrequenzabhängigen Beschleunigung $a(\omega)$ für periodische Schwingungen ab [67], [82]. Diese berücksichtigen die Einleitungsstellen des Sitzes und der Fü-

ße jeweils in allen drei Raumrichtungen, die Einleitungsstelle der Hände in vertikaler Richtung, die Einleitungsstellen der Rückenlehne in Längs- und Querrichtung sowie die Nick- und Wankbewegungen. Die Gewichtungskurven sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

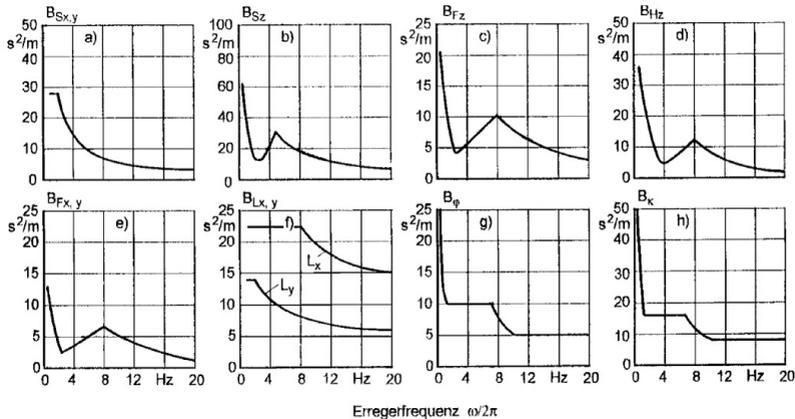


Abbildung 3.3: Bewertungsfunktionen für periodische Anregungen: a) Sitz in Längs- und Querrichtung, b) Sitz in vertikaler Richtung, c) Fuß in vertikaler Richtung, d) Hand in vertikaler Richtung, e) Fuß in Längs- und Querrichtung, f) Rückenlehne in Längs- und Querrichtung, g) „Nicken“, h) „Wanken“ [82]

Die „Bewertete Schwingstärke“ einer Einleitungsstelle i für periodische Schwingungen $K_{p,i}$ berechnet sich dann nach folgender Gleichung:

$$K_{p,i}^2 = \int_{0.5\omega_1}^{1.5\omega_1} B_{p,i}^2(\omega) a_{p,i}(\omega) d\omega . \tag{3.3}$$

Für die Wirkung von stochastischen, regellosen Schwingungen führt Klingner für jede Einleitungsstelle i einen Gewichtungsfaktor $G_{st,i}$ ein. Die

„Bewerteten Schwingstärken“ einer Einleitungsstelle bei stochastischen Schwingungen berechnen sich damit zu:

$$K_{st,i}^2 = G_{st,i}^2 \cdot \int_0^{40\pi} B_{p,i}^2(\omega) a_{st,i}(\omega) d\omega . \quad (3.4)$$

Für multiaxiale Schwingungen werden zusätzlich einleitungsstellenabhängige Gewichtungsfaktoren $G_{Ma,i}$ definiert. Die insgesamt wirkende „Bewertete Schwingstärke“ $K_{ges}(\omega)$ für alle 11 Einleitungspunkte wird damit folgendermaßen berechnet:

$$K_{ges}^2 = \sum_{i=1}^{11} G_{Ma,i}^2 \cdot (K_{st,i}^2 + K_{p,i}^2) . \quad (3.5)$$

Die heute gültigen Normen ISO 2631-1 [58] und VDI 2057-1 [122] empfehlen ebenfalls Kennwerte auf Basis von frequenzbewerteten Beschleunigungen zur Beschreibung der Schwingungseinwirkung auf den Menschen. Die Frequenzbewertungsverläufe unterscheiden sich dabei für unterschiedliche Körperhaltungen, Einleitungsstellen der Schwingungen und deren Bewegungsrichtungen. Die für den sitzenden Menschen relevanten Bewertungskurven und deren Zuordnung zu den jeweiligen Messstellen und Bewegungsrichtungen sind in Abbildung 3.4 dargestellt.

Durch Anwendung der jeweils gültigen Frequenzbewertung ergibt sich für ein Beschleunigungssignal $a(t)$ die frequenzbewertete Beschleunigung $a_w(t)$. Der Effektivwert (auch Root-Mean-Square) a_{RMS} der frequenzbewerteten Beschleunigung wird als Kennwert zur Beschreibung der Schwingungseinwirkung verwendet:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} . \quad (3.6)$$

T beschreibt dabei die Dauer der Schwingungseinwirkung.

3 Stand der Forschung

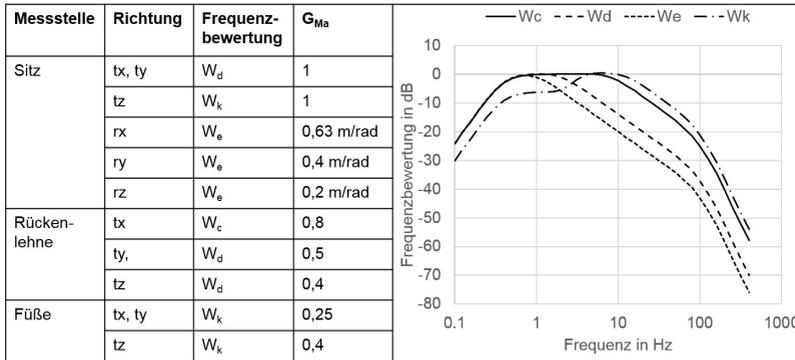


Abbildung 3.4: Frequenzbewertungskurven nach ISO 2631-1 von 1997 [58] und VDI 2057-1 von 2002 [122]

In der VDI 2057-1 [122] sind die in Tabelle 3.1 aufgeführten Werte den subjektiv beschriebenen Wahrnehmungen bei sinusförmiger Schwingungsanregung zugeordnet worden.

Tabelle 3.1: Zusammenhang zwischen dem Effektivwert a_{RMS} der frequenzbewerteten Beschleunigung $a_w(t)$ und der subjektiven Wahrnehmung bei sinusförmiger Schwingung nach VDI 2057-1 von 2002 [122]

a_{RMS} in m/s^2	Wahrnehmung	a_{RMS} in m/s^2	Wahrnehmung
<0,01	nicht spürbar	0,02-0,08	gut spürbar
0,015	Wahrnehmungsschwelle	0,08-0,315	stark spürbar
0,015-0,02	gerade spürbar	>0,315	sehr stark spürbar

Neben dem Effektivwert a_{RMS} wird auch der Verlauf des gleitenden Effektivwerts $a_{RMS,gl}(t)$ betrachtet. Dieser berücksichtigt die zeitlich zurückliegenden Schwingungen mit exponentiell abnehmender Gewichtung und ist nachfolgend definiert. ε beschreibt dabei die Integrationsvariable, d.h. die

Zeit, und τ die Integrationszeitkonstante für die gleitende Mittelung. In ISO 2631-1 [58] ist $\tau = 1$ s empfohlen.

$$a_{RMS,gl}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\varepsilon=0}^t a_w^2(\varepsilon) \exp\left(\frac{\varepsilon-t}{\tau}\right) d\varepsilon}. \quad (3.7)$$

Als maximale Schwingungsbelastung im gemessenen Zeitraum wird der Maximalwert des gleitenden Effektivwertes $MTVV$ herangezogen:

$$MTVV = \max(a_{RMS,gl}(t)). \quad (3.8)$$

Der sogenannte Crestfaktor Cr (auch Scheitelfaktor genannt) berechnet sich aus dem Verhältnis von a_{MAXB} , dem Betragsmaximalwert der frequenzbewerteten Beschleunigung, und a_{RMS} :

$$Cr = \frac{a_{MAXB}}{a_{RMS}} \quad (3.9)$$

$$\text{mit } a_{MAXB} = \max(|a_w(t)|). \quad (3.10)$$

Er wird bei stoßhaltigen Schwingungsverläufen verwendet. Seine Verwendung wird nach [122] kritisch gesehen. Um die Schwingungseinwirkung bei Schwingungen, die gleichzeitig in mehreren Raumrichtungen auftreten, zu bestimmen, wird der Schwingungsgesamtwert $a_{RMS,ges}$ berechnet. Dieser bildet aus den einzelnen Effektivwerten jeder Raumrichtung mit den Multiaxialgewichtungsfaktoren G_{Ma} aus Abbildung 3.4 einen gewichteten Vektorbetrag:

$$a_{RMS,ges} = \sqrt{G_{Ma,tx}^2 \cdot a_{RMS,tx}^2 + G_{Ma,ty}^2 \cdot a_{RMS,ty}^2 + G_{Ma,tz}^2 \cdot a_{RMS,tz}^2}. \quad (3.11)$$

Nach Griffin [43] eignen sich dagegen der RMQ (Root-Mean-Quad) und der VDV (Vibration-Dose-Value) besser zur Beschreibung der Schwingungseinwirkung, da diese empfindlicher gegenüber Stößen und anderen Einzel-

ereignissen im Schwingungssignal sind. Der RMQ des frequenzgewichteten Beschleunigungssignals berechnet sich ähnlich wie der RMS:

$$a_{RMQ} = \left[\frac{1}{T} \int_{t=0}^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (3.12)$$

Der VDV berücksichtigt im Gegensatz zum RMS und RMQ auch die Dauer der Schwingung und ist nach Griffin [43] dem RMQ vorzuziehen.

$$a_{VDV} = \left[\int_{t=0}^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}. \quad (3.13)$$

Eine Übersicht zur Anwendung der genannten Kennwerte, um die Ganzkörperschwingungsbelastung eines Fahrers zu reduzieren, ist in [115] zu finden.

3.3 Ansätze zur Objektivierung der Schwingungswahrnehmung

Nach Knauer [68] lassen sich die Ansätze zur Objektivierung des Diskomforts in drei Bereiche einteilen. Dies sind Ansätze unter Verwendung von sogenannten „Menschmodellen“, welche die biodynamischen Schwingungseigenschaften des Menschen simulieren, Ansätze unter Verwendung von Relevanzfilterungen, welche komfortrelevante Merkmale identifizieren und Korrelationsansätze unter Verwendung von Regressionsmodellen oder künstlich neuronalen Netzen. Auf die drei Ansätze wird im Folgenden kurz eingegangen.

3.3.1 Menschmodelle

Menschmodelle können in Form theoretischer physikalischer Modelle oder in Form realer mechanischer Modelle aufgebaut sein. Mit Hilfe von Wahrnehmungs- und Reizverarbeitungsmodellen lassen sich Aussagen über das Komfortempfinden treffen [68].

Theoretische physikalische Menschmodelle wurden unter anderem in [66] als 2D-Finites-Element-Modell, in [37] als Starrkörpermodell mit elastischen Verbindungselementen und in [79] sowie [39] als „lumped parameter“-Modell verwendet. Ziel der Erstellung dieser Modelle ist die Analyse des menschlichen Schwingungsverhaltens und die Erlangung eines besseren Verständnisses bzgl. der biodynamischen körperlichen Reaktionen. Dazu gehört die Analyse von Resonanzfrequenzen und den zugehörigen Schwingungsmoden. Die Parametrierung der Modelle erfolgt anhand des Abgleichs mit Messungen an Probanden. So können Übertragungsfunktionen, wirkende Kräfte und Resonanzfrequenzen für unterschiedliche Sitze, Sitzpositionen und Körperstaturen berechnet werden. In einer Anwendung von [63] werden die RMS-Werte der Beschleunigungen einzelner Körperregionen mit dem sogenannten Ride-Index korreliert, welcher die Schwingungsschädigung des Körpers beschreibt.

Des Weiteren existieren virtuelle 3D-Ganzkörpermodelle, wie beispielsweise CASIMIR (entwickelt von der TU Darmstadt) oder RAMSIS (entwickelt von der Human Solutions GmbH). CASIMIR erlaubt zusätzlich zu den bereits genannten Eigenschaften von Menschmodellen die Analyse von Sitzdruckverteilungen. RAMSIS wird für die Analyse ergonomischer Eigenschaften wie beispielsweise Bewegungsanalysen und Bedienkomfort eingesetzt. In [113] wird CASIMIR angewandt, um den dynamischen und statischen Sitzkomfort zu evaluieren. Ein weiteres 3D-Modell aus einer Finite-Elemente-Modellierung wird in [53] entwickelt, um die statische Druckverteilung auf einem PKW-Sitz vorherzusagen.

Als aktives Menschmodell ist MEMOSIK V zu nennen [89]. Dieser dreidimensionale Schwingungsdummy simuliert das menschliche Schwingungsverhalten mit Hilfe zweier aktiver Schwingeinheiten. Beide Schwingeinheiten simulieren die dynamischen Schwingmassen des Menschen. Eine Einheit arbeitet in vertikaler Richtung und leitet Kräfte über eine Gesäßkontur in die Sitzfläche ein, die zweite Einheit arbeitet in Längsrichtung und leitet Kräfte über eine Rückenkontur in die Rückenlehne ein. Zusätzlich ist eine

Wirbelsäule mit adaptiver Torsionssteifigkeit vorhanden. So ist es möglich, das dynamische Verhalten in longitudinaler, lateraler und vertikaler Richtung auf realen Sitzen zu simulieren.

3.3.2 Relevanzfilterungen

Filterungen von Schwingungssignalen bzgl. komfortrelevanter Bestandteile und deren Klassifizierung werden in den Arbeiten von Knauer [68] und Fischer-von Röhn [34] angewandt. Knauer [68] führt Untersuchungen im PKW zu Wahrnehmungsschwellen und Unterschiedsschwellen von harmonischen und transienten Schwingungen sowie von Frequenzbändern unter Wirkung von Maskierungsschwingungen in Form von definiertem Grundrauschen durch. Aus den Ergebnissen formuliert er einen Ansatz zur Identifizierung von Signalbestandteilen, die oberhalb der Wahrnehmungsschwelle des Menschen liegen. Die identifizierten Signalbestandteile werden daraufhin mit Hilfe der aufgenommenen Unterschiedsschwellen bewertet. So lässt sich objektiv feststellen, ob beispielsweise zwei Umbauten eines Fahrzeuges einen spürbaren Unterschied liefern. Des Weiteren zeigt er die prinzipielle Anwendbarkeit eines sogenannten Random-Forest-Algorithmus zur Schwingungskomfortbewertung im Fahrzeug. Die Eingangsgrößen bilden hierbei die identifizierten Signalbestandteile oberhalb der Wahrnehmungsschwellen.

Fischer-von Röhn [34] wendet sogenannte Wavelet-Transformationen an, um komfortrelevante Signalbestandteile bei der Überfahrt von Einzelhindernissen mit einem PKW zu identifizieren. Mit Hilfe der identifizierten Merkmale durch die verwendeten Gabor-Wavelets kann er Prädiktionsmodelle zur Vorhersage des Fahrkomforts ableiten. Dies geschieht einerseits durch lineare Modelle und andererseits durch ein künstlich neuronales Netz (s. Abschnitt 3.3.3). Auf Grund der Extrapolationseigenschaften der linearen Modelle werden diese von ihm bevorzugt.

3.3.3 Korrelative Ansätze

Die korrelativen Ansätze lassen sich in zwei Verfahren einteilen, welche Regressionsmodelle (vgl. hierzu [4]) oder sogenannte künstlich neuronale Netze (KNN) verwenden (vgl. hierzu [5]). Im Gegensatz zum Regressionsmodell müssen bei der Verwendung von KNN keine expliziten Zusammenhänge zwischen den unabhängigen Variablen angegeben werden. Diese werden selbständig durch einen Lernprozess ermittelt. Nachteilig ist, dass die Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Variablen nicht aufgedeckt werden. Es entsteht somit ein „Blackbox“-Verhalten zwischen Ein- und Ausgangsgrößen. Beide Methoden erfahren ein breites Einsatzspektrum in der Objektivierung subjektiver Wahrnehmungen. Im Folgenden wird zu jeder Methode eine Auswahl an Arbeiten vorgestellt.

Regressionsmodelle

Regressionsmodelle kommen bei der Objektivierung zum Einsatz, um Vorhersagen über die subjektive Wahrnehmung unter Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zu treffen.

Fülbier [38] nutzt die Regressionsanalyse zur Vorhersage der subjektiven Bewertung des Abrollkomforts von PKW bei der Überfahrt von Einzelhindernissen. Als Eingangsgrößen werden Kennwerte verwendet, welche die Fahrwerksvariationen und Hindernisgeometrien beschreiben.

Bellmann [14], [19] untersucht den Einfluss von Innenraumgeräuschen und Vibrationen auf die Bewertung des Fahrkomforts und zeigt mittels einer Regressionsanalyse, dass die nach ISO 2631-1 und VDI 2057-1 bewerteten Kenngrößen besser mit den subjektiven Bewertungen korrelieren als die entsprechenden unbewerteten Kenngrößen. Er leitet für Diesel- und Benzinfahrzeuge unterschiedliche Modelle ab.

Kraft [74] variiert mit Hilfe von Linearaktuatoren, die Zusatzkräfte im Fahrwerk aufprägen können, das Fahrverhalten eines PKW und kann fahrdynamische Kenngrößen mit den subjektiven Beurteilungen des Fahrverhaltens

korrelieren. Durch Gefallens- und Niveaubeurteilungen kann er Zielbereiche für die fahrdynamischen Kenngrößen festlegen.

Maier [78] ermittelt Kennwerte zur Objektivierung der subjektiven Wahrnehmung von antriebsstrangerregten Fahrzeugschwingungen unter Einsatz einer speziellen Sitzmessmatte zur Messung der Sitzschwingungen. Des Weiteren werden Schwingungen am Lenkrad und im Fußraum erfasst. Der Motorstart, der Motorstopp, der Leerlauf sowie das Anfahren und Hochfahren werden einzeln betrachtet. Aus den Zeitrohdaten der Sensoren werden skalare Kennwerte berechnet. Mittels schrittweiser Regression können Vorhersagen der Diskomfortbewertungen erzielt werden. Es stellt sich dabei heraus, dass der Diskomfort aus der Schwingungseinleitung über den Sitz am zuverlässigsten durch einen sitzkonsolenbasierten Kennwert vorhergesagt werden kann.

Pies [101] untersucht den reifenungleichförmigkeitserregten Schwingungskomfort. Dabei werden Sitz- als auch Lenkradschwingungen analysiert. Die Sitzschwingungen werden unter anderem durch eine spezielle Sitzmessmatte gemessen. Zur Analyse des menschlichen Einflusses auf die Lenkradschwingungen wird zusätzlich die Haltekraft mit einem speziell entwickelten Haltekraftsystem gemessen. Daraus geht ein menschlicher Einfluss auf Lenkradschwingungen hervor. Translatorische Schwingungen am Lenkrad werden kaum beeinflusst. Zur Vorhersage der subjektiven Bewertungen von Sitzschwingungen eignet sich ein Kennwert des Beschleunigungsvektors der Sitzkonsolenbeschleunigungen am besten. Bezüglich der Bewertungen von Lenkradschwingungen stellt sich ein Kennwert des am Lenkradkranz erfassten Beschleunigungsvektors als am besten geeignet heraus.

Jörißen [61] entwickelt ein Regressionsmodell zur Vorhersage des Fahrkomforts von PKW unter Einfluss realer Fahrbahnanregungen. Dabei erfolgt eine Untersuchung von vier Schwingungsphänomenen: „Heben“, „Werfen“, „Wanken“ und „Stuckern“. Für jedes dieser Schwingungsphänomene wird ein Regressionsmodell erarbeitet. Dabei kommen Kennwerte aus der spek-

tralen Betrachtung der Beschleunigungen eines festgelegten Referenzpunktes auf Höhe der Brust des sitzenden Menschen zum Einsatz. Die zugehörigen Versuche zur Aufnahme der Daten und Diskomfortbewertungen werden als Paarvergleiche eines Testsignals und eines Referenzsignals durchgeführt. Die Korrelationen der Kennwerte zu den zugehörigen Diskomfortbewertungen finden unter der Annahme statt, dass die Wahrnehmung des Testsignals durch die Signaleigenschaften des Referenzsignals beeinflusst wird. Daher werden die Kennwerte mit den relativen Bewertungen des Diskomforts korreliert. Für jedes Schwingungsphänomen kann ein valides Regressionsmodell erarbeitet werden. Im Regressionsmodell für das „Wanken“ finden die Signalintensität der Wankbewegung, der prozentuale Leistungsanteil der Wankbewegung am Gesamtsignal sowie die mittlere Drehpunkt-lage Berücksichtigung. Aus den gewichteten schwingungsphänomenspezifischen Modellen leitet Jörißen ein Gesamtregressionsmodell zur Vorhersage des Gesamtschwingungskomforts ab.

Künstlich neuronale Netze

Künstlich neuronale Netze (KNN) kommen zur Erstellung von Prognosemodellen zum Einsatz, wenn Zusammenhänge zwischen Ein- und Ausgangsgrößen mit Hilfe maschineller Lernverfahren gefunden werden sollen und die genauen Wirkbeziehungen zwischen den Größen nicht von Interesse sind.

Kolich [71] nutzt ein KNN zur Vorhersage des subjektiv wahrgenommenen Sitzkomforts von Fahrzeugsitzen. Eingangsgrößen des Modells bilden acht Sitzdruckgrößen, drei anthropometrische und demographische Größen und die subjektive Bewertung der Ästhetik des Sitzes. Kolich et al. stellen dem KNN-Modell ein Regressionsmodell mit gleichen Eingangsgrößen gegenüber und weisen ein höheres Bestimmtheitsmaß durch das KNN-Modell nach [72].

Birkhold [21] nutzt ein KNN zur Objektivierung des Wiederstartkomforts bei Fahrzeugen mit parallelen Hybridantrieben. Er trifft eine Auswahl an Kennwerten, welche die Schwingungsbelastung und die zeitliche Verzögerung zwischen Fahrerwunsch und Fahrzeugreaktion beschreiben. Im Vergleich weist das KNN-Modell gegenüber einem Regressionsmodell bei gleichen Eingangsgrößen eine höhere Vorhersagegüte bzgl. der Bewertungen auf.

Gohari et al. [41] nutzen ein KNN zur Vorhersage der Kopfbeschleunigungen durch Hand- und Sitzschwingungen. Sie nutzen dieses als biodynamisches Modell zur Entwicklung von Sitzen.

Lerspalungsanti et al. [76] entwickeln einen Ansatz zur Vorhersage der subjektiven Komfortbewertung von Antriebssträngen. Dieser soll zum Vergleich unterschiedlicher Getriebe dienen. Dazu werden komfortrelevante Parameter des Antriebsstranges identifiziert und die entsprechenden Daten am Fahrzeug gemessen. Mit dem KNN lassen sich die subjektiven Bewertungen während des Startvorganges vorhersagen. Des Weiteren können gute Korrelationen zu den Bewertungen des Getrieberassels erzielt werden.

Künstlich neuronale Netze können somit erfolgreich für die Objektivierung subjektiver Wahrnehmungen eingesetzt werden. Bzgl. des Bestimmtheitsmaßes haben sie oft Vorteile gegenüber Regressionsmodellen. Diese sind durch explizit vorgegebene und interpretierbare erklärende Variablen sowie durch einen plausiblen funktionalen Zusammenhang gekennzeichnet. Auf Grund der Möglichkeiten für einen theoretischen Erkenntnisgewinn wird in dieser Arbeit die Verwendung eines Regressionsmodells bevorzugt.

3.4 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Objektivierung des Schwingungskomforts schwerer Nutzfahrzeuge. Wie bei Jörißen [61] wird hier eine schwingungsphänomenspezifische Betrachtung des Schwin-

gungskomforts vorgenommen. Dies beinhaltet die ausgewählten Schwingungsphänomene „Längsstößen“, „Nicken“ und „Wanken“ (vgl. Abschnitt 2.4).

Eine Vielzahl der in diesem Kapitel vorgestellten Arbeiten widmet sich dem Schwingungskomfort im PKW. Das hier betrachtete Anwendungsgebiet LKW wird durch Forschungsarbeiten bisher kaum abgedeckt.

Mit Hilfe von Korrelationsanalysen soll für jedes der drei Schwingungsphänomene ein Regressionsmodell abgeleitet werden, welches anhand von objektiven Kennwerten die wahrgenommene Stärke eines Schwingungsphänomens schätzt.

Die objektiven Kennwerte werden aus den Simulations- und Messdaten im Zeitbereich abgeleitet. Dies geschieht unter systematischer Untersuchung von wahrnehmungsrelevanten Frequenzbereichen und von Maskierungseffekten in der Schwingungswahrnehmung. Der Einfluss von einzelnen Schwingungsereignissen auf die Wahrnehmung eines zeitlich nachfolgenden zu beurteilenden Schwingungsereignisses wurde in bisherigen Forschungsarbeiten nicht untersucht. Da aber potentielle Verdeckungseffekte durch zeitlich zurückliegende Schwingungsereignisse auftreten können, wird der Einfluss solcher Schwingungsereignisse in dieser Arbeit für alle drei Schwingungsphänomene untersucht und in der Kennwertgenerierung berücksichtigt.

Dazu wird ein neuer Ansatz verwendet, der eine Schwingung als eine Reihe aufeinanderfolgender Schwingungsereignisse in unterschiedlichen Bewegungsrichtungen interpretiert, dessen Einzelereignisse Auswirkungen auf die Wahrnehmung eines zeitgleich oder zeitlich nachfolgenden auftretenden Einzelereignisses haben.

Die für die Regressionen erforderlichen subjektiven Bewertungen der Schwingungsphänomenstärke werden zeitgleich zu den objektiven Messdaten erfasst. Zusätzlich werden weitere subjektive Daten erfasst, die es erlauben, anhand der Regressionsmodelle objektive Zielwerte für einen „guten“ Schwingungskomfort im LKW festzulegen.

4 Datengenerierung durch Fahrversuche

4.1 Zielsetzung und Anforderungen

Um Zusammenhänge zwischen der subjektiven Wahrnehmung von Schwingungsphänomenen im LKW und objektiven, auf Messdaten basierenden Kennwerten erarbeiten zu können, müssen im ersten Schritt geeignete Daten aufgenommen werden. Als Fahrzeuge werden 4x2 Sattelzugmaschinen verwendet. Diese gelten als klassische Fernverkehrsfahrzeuge. Sie sind auf unterschiedlichsten Fahrbahnprofilen unterwegs und werden vom Fahrer über lange Zeiträume bis zu mehreren Tagen hinweg bewegt. Aus Fahrkomfortsicht haben diese Fahrzeuge somit eine besondere Relevanz.

Nachfolgend genannte Anforderungen sollen für die Datenerfassung erfüllt werden: Es müssen geeignete Messstellen und Messgrößen am Fahrzeug ausgewählt werden, deren Daten potentiell mit der Wahrnehmungsstärke des jeweiligen Schwingungsphänomens korrelieren. Des Weiteren muss ein Bewertungsbogen entwickelt werden, der es erlaubt, die Wahrnehmung der Schwingungsphänomene in geeigneten Kategorien und Skalen zu bewerten. Die objektiven und die subjektiven Daten, die zu Reiz und Wahrnehmung korrespondieren, müssen möglichst gleichzeitig oder kurz verzögert aufgenommen werden, damit die Kausalität zwischen beiden Datentypen erhalten bleibt.

Damit es möglich ist, funktionale Zusammenhänge zwischen beiden Datentypen zu finden, muss die Stärke bzw. Ausprägung des jeweils zu bewertenden Schwingungsphänomens variiert werden. Dies kann durch unterschiedliche komfortrelevante Anregungsarten und -stärken am Fahrzeug erfolgen

oder durch eine Veränderung der Parameter des Schwingungssystems LKW (vgl. Abschnitt 2.2).

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die Messstellen am Fahrzeug, die Entwicklung eines Beurteilungsbogens und die Durchführung der Fahrversuche eingegangen. Diese dienen zur Datenerfassung von objektiven Messdaten und subjektiven Bewertungsdaten. Im Anschluss an die Datenerfassung folgt die statistische Auswertung der subjektiven Daten.

4.2 Messtechnischer Aufbau

4.2.1 Messstellen am Fahrzeug

Die Auswahl der Messstellen am Fahrzeug orientiert sich an den in Abschnitt 2.2 vorgestellten Schnittstellen des Fahrers mit dem Fahrzeug. Die Schwingungsphänomene „Längsstößen“, „Nicken“ und „Wanken“ werden ausschließlich über den Fahrersitz und das Fahrerhaus wahrgenommen. Entsprechend erfolgt die Auswahl der Sensorplatzierungen. Diese sind qualitativ in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Schwingungsanregung über das Lenkrad wird nicht berücksichtigt. Eine Übersicht aller Messstellen und deren Bezeichnungen ist in Tabelle 4.1 auf Seite 56 zu finden. Die einzelnen Messstellen werden nachfolgend erläutert.

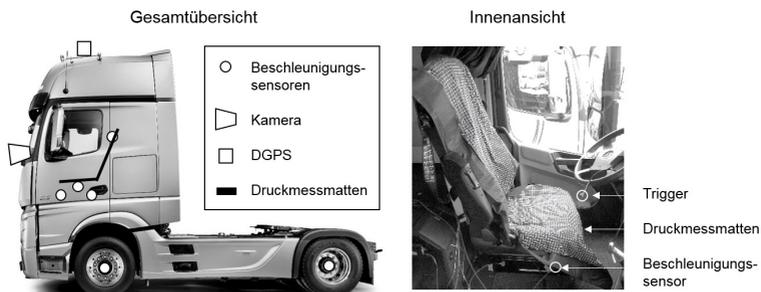


Abbildung 4.1: Qualitative Darstellung der Sensorplatzierungen am Fahrzeug unter Verwendung eines Actros aus [27]

Um die Bewegungen des Fahrersitzes und des Fahrerhauses zu erfassen, werden an der Fahrersitzkonsole („FaSiKo“) ein triaxialer und zwei biaxiale Beschleunigungssensoren verwendet. Daraus resultieren die gemessenen translatorischen Beschleunigungen $a_{FaSiKo,vl,tx}$, $a_{FaSiKo,vl,ty}$, $a_{FaSiKo,vl,tz}$, $a_{FaSiKo,hl,ty}$, $a_{FaSiKo,hl,tz}$, $a_{FaSiKo,vr,tx}$, $a_{FaSiKo,vr,tz}$. Im Index steht die jeweilige Messstelle der Beschleunigung. „vl“ steht als Abkürzung für „vorne links“, „hl“ für „hinten links“ und „vr“ für „vorne rechts“. Die Indizes tx , ty und tz beschreiben die Messrichtung (vgl. Tabelle 2.2 auf Seite 19) im Fahrzeugkoordinatensystem (vgl. Abbildung 2.9 auf Seite 19).

Aus den gemessenen translatorischen Beschleunigungssignalen der Fahrersitzkonsole werden die Rotationsbeschleunigungen folgendermaßen berechnet:

$$a_{FaSiKo,rx} = (a_{FaSiKo,vl,tz} - a_{FaSiKo,vr,tz})/l_y \quad (4.1)$$

$$a_{FaSiKo,ry} = (a_{FaSiKo,hl,tz} - a_{FaSiKo,vl,tz})/l_x \quad (4.2)$$

$$a_{FaSiKo,rz} = (a_{FaSiKo,vl,ty} - a_{FaSiKo,hl,ty})/l_x \quad (4.3)$$

l_x und l_y bezeichnen dabei die Beträge der Abstände in x- bzw. y-Richtung der jeweils für die Berechnung verwendeten Sensoren. Des Weiteren werden jeweils ein triaxialer Beschleunigungssensor im beweglichen Teil des Fahrersitzes auf einer Querstrebe unter der Sitzfläche und auf einer Querstrebe der Rückenlehne befestigt. Die gemessenen Beschleunigungen sind mit $a_{SF,tx}$, $a_{SF,ty}$, $a_{SF,tz}$ und $a_{RL,tx}$, $a_{RL,ty}$, $a_{RL,tz}$ benannt. „SF“ steht hierbei für „Sitzfläche“ und „RL“ für „Rückenlehne“. Für die Messung der Beschleunigungen an der Fahrersitzkonsole, der Sitzfläche und der Rückenlehne werden durchgängig Sensoren mit der Modellbezeichnung „PCB-356B18“ der Firma „PCB Synotech GmbH“ verwendet.

Mit Hilfe von Druckmessmatten der Firma „XSENSOR“ wird die Messung der Druckverteilung an der direkten Schnittstelle zwischen Fahrersitz und Fahrer ermöglicht. Auf der Sitzfläche wird das Modell LX210:48.48.02 mit

einer Sensormatrix von 48x48 Sensoren und an der Rückenlehne das Modell LX100:40.64.02 mit einer Sensormatrix von 40x64 Sensoren verwendet.

Über das Schwingverhalten der ungefederten Massen des LKW (vgl. Schwingebene vier in Abbildung 2.5 auf Seite 8) soll näherungsweise die Schwingungsanregung des Gesamtsystems LKW durch die Fahrbahnoberfläche gemessen werden. Aus diesem Grund sind an jeder der beiden Achsen links und rechts jeweils ein triaxialer Beschleunigungssensor mit der Modellbezeichnung „PCB-(M)354C03“ der Firma „PCB Synotech GmbH“ platziert. Die gemessenen Beschleunigungen an der linken Seite der Vorderachse („VA,l“) sind mit $a_{VA,l,tz}$, $a_{VA,l,ty}$, $a_{VA,l,tx}$ und an der rechten Seite mit $a_{VA,r,tz}$, $a_{VA,r,ty}$, $a_{VA,r,tx}$ bezeichnet. Entsprechend ergeben sich die Benennungen an der Hinterachse („HA“) mit $a_{HA,l,tz}$, $a_{HA,l,ty}$, $a_{HA,l,tx}$ und $a_{HA,r,tz}$, $a_{HA,r,ty}$, $a_{HA,r,tx}$. Aus den z-Beschleunigungen der Achsen werden vier weitere Beschleunigungsverläufe berechnet, welche die gleichseitigen und wechselseitigen Beschleunigungen der Vorder- und Hinterachse abbilden:

$$a_{VA,gs,tz} = \frac{a_{VA,l,tz} + a_{VA,r,tz}}{2} \quad (4.4)$$

$$a_{VA,ws,tz} = a_{VA,l,tz} - a_{VA,r,tz} \quad (4.5)$$

$$a_{HA,gs,tz} = \frac{a_{HA,l,tz} + a_{HA,r,tz}}{2} \quad (4.6)$$

$$a_{HA,ws,tz} = a_{HA,l,tz} - a_{HA,r,tz} \quad (4.7)$$

Um die Messungen aus mehreren Fahrversuchen auf dem selben Streckenabschnitt miteinander vergleichbar machen zu können, werden die Messsignale cm-genau zugeschnitten. Dazu wird auf dem Dach des Fahrerhauses ein Differential Global Positioning System (DGPS) verbaut, das die cm-genaue Positionsbestimmung des Fahrzeuges erlaubt. Um darüber hinaus die für das jeweilige Schwingungsphänomen relevanten Zeitabschnitte eingrenzen zu können, kann der Fahrer über einem am Lenkrad des Fahrzeuges

verbauten Triggerschalter während der Messung Markierungen im Signal setzen, wenn das zu bewertende Schwingungsphänomen auftritt.

Für die in Kapitel 5 durchgeführten Simulatoruntersuchungen werden zusätzlich mit Hilfe eines binauralen Kopfbügelmikrofons die Innenraumgeräusche und mit Hilfe einer Kamera an der Frontscheibe des Fahrerhauses die gefahrene Strecke aufgenommen.

4.2.2 Entwicklung eines Beurteilungsbogens zur subjektiven Bewertung von Schwingungsphänomenen

In diesem Abschnitt wird ein Bewertungsbogen entwickelt, um die subjektiven Eindrücke der Probanden bezüglich der zu bewertenden Schwingungsphänomene festzuhalten. Dieser Bogen erfasst die wahrgenommene Stärke des Schwingungsphänomens als Maß des Diskomforts, dessen Akzeptanz als Maß des Gefallens, die wahrgenommenen Körperbereiche und den ausschlaggebenden Faktor für die Bewertungsabgabe der Phänomenstärke. Die abgegebene Bewertung zu einem Schwingungsphänomen bezieht sich dabei immer auf die gesamte Bahn, d.h. auf jene Strecke, auf der das zu untersuchende Schwingungsphänomen auftritt. Auf jedes Beurteilungskriterium des Bewertungsbogens wird nachfolgend eingegangen.

Wahrgenommene Stärke des Schwingungsphänomens

Um objektive, komfortrelevante Zielwerte für die einzelnen Schwingungsphänomene definieren zu können, muss ein Zusammenhang zwischen objektiven Messdaten und absoluten Bewertungsnoten erarbeitet werden. Aus diesem Grund wird für die Bewertung der Schwingungsphänomene eine metrische Skala zur Absolutbewertung der wahrgenommenen Phänomenstärke verwendet. Diese umfasst neun Bewertungspunkte (Noten) und ist endpunktskaliert, um dem Probanden eine Skala mit gleichmäßigem Abstand zwischen zwei Noten zu gewähren.

Tabelle 4.1: Übersicht aller Messstellen

Messstelle	Raum- richtungen	Bezeichnung	Messgröße
Fahrersitzkonsole			
vorne links	x, y, z	$a_{FaSiKo,vl,tx/ty/tz}$	Beschleunigung
vorne rechts	x, z	$a_{FaSiKo,vr,tx/tz}$	Beschleunigung
hinten links	y, z	$a_{FaSiKo,hl,ty/tz}$	Beschleunigung
Sitzfläche			
Mitte	x, y, z	$a_{SF,tx/ty/tz}$	Beschleunigung
48x48 Sensoren	normal	$LX210 - Sens_{R,S}$	Druck
Rückenlehne			
oben	x, y, z	$a_{RL,tx/ty/tz}$	Beschleunigung
40x64 Sensoren	normal	$LX100 - Sens_{R,S}$	Druck
Vorderachse			
links	x, y, z	$a_{VA,l,tx/ty/tz}$	Beschleunigung
rechts	x, y, z	$a_{VA,r,tx/ty/tz}$	Beschleunigung
Hinterachse			
links	x, y, z	$a_{HA,l,tx/ty/tz}$	Beschleunigung
rechts	x, y, z	$a_{HA,r,tx/ty/tz}$	Beschleunigung
Sonstige			
Binaurales			
Kopfbügelmikrofon	-	BHS_r, BHS_l	Geräuschpegel
Lenkrad	-	$Eventtrigger$	Spannung
DGPS			Lage-
Fahrerhausdach	-	GPS_{long}, GPS_{lat}	koordinaten
Kamera			
Frontscheibe	-	$Fahrbahnvideo$	Videosignal

Dieser ist Voraussetzung für die Berechnung einiger statistischer Kenngrößen, wie z.B. des Mittelwertes [102]. Eine „1“ entspricht dabei „nicht wahrnehmbar“, eine „9“ entspricht „sehr stark wahrnehmbar“. Der Bewertungspunkt „sehr stark wahrnehmbar“ ist dann zu wählen, wenn das Phänomen im jeweiligen Fahrzeug ungewöhnlich stark auftritt und zugleich diejenige Beurteilungsstrecke gefahren wird, auf der das Phänomen am stärksten wahrnehmbar ist. Die beiden Endpunkte der Skala sind durch die sogenannte „Wahrnehmungsschwelle“, ab der ein Reiz wahrnehmbar ist, und das „maximale Empfinden“ begründet. Die Skala ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

nicht wahrnehmbar $\hat{=}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\hat{=}$ sehr stark wahrnehmbar
-----------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----------------------------------

Abbildung 4.2: Endpunktbenannte 9-Punkte-Skala zur Bewertung der Schwingungsphänomenstärke

Akzeptanz der wahrgenommenen Phänomenstärke

Um den Noten der wahrgenommenen Phänomenstärke Akzeptanzwerte zuzuordnen zu können, werden diese in einer Ordinalskala mit fünf geordneten Kategorien abgefragt:

- „sehr gut“
- „gut“
- „akzeptabel“
- „gerade noch akzeptabel“
- „unakzeptabel“

Dabei wird die Akzeptanz bezüglich der gefahrenen Strecke und des gefahrenen Baumusters (abhängig von Radformel, Aufbau etc.) bewertet.

Körperbereiche

Neben der Phänomenstärke und der Akzeptanz werden auch diejenigen Körperbereiche abgefragt, an denen das zu bewertende Schwingungsphänomen

wahrgenommen wird. Dies soll Hinweise auf auszuwertende Messgrößen der Druckmessmatten geben. Zur Angabe der Körperbereiche wird eine sogenannte Bodymap verwendet (siehe Abbildung 4.3). Diese ist [8] nachempfunden und erweitert worden. Sie unterteilt den menschlichen Körper in unterschiedliche nummerierte Wahrnehmungsbereiche. Dadurch können die für die Wahrnehmung eines bestimmten Schwingungsphänomens relevanten Körperbereiche erfasst werden. Hier ist es zulässig, mehrere Bereichsnummern anzugeben.

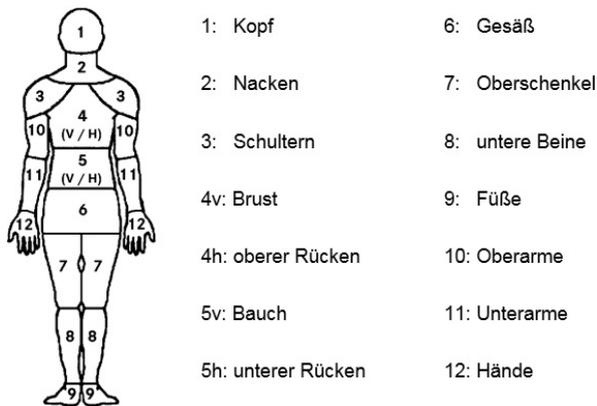


Abbildung 4.3: Einteilung des Körpers in Wahrnehmungsbereiche mit Hilfe einer [8] nachempfundenen und erweiterten Bodymap

Ausschlaggebender Faktor für die Bewertungsabgabe

Um ergänzende Hinweise für die Definition objektiver Kennwerte zu erfassen, wird zusätzlich nach dem ausschlaggebenden Faktor für die Bewertung der Phänomenstärke gefragt. Hier ist nur eine Antwortmöglichkeit zulässig. Folgende Antwortmöglichkeiten stehen zur Auswahl:

- Das stärkste wahrgenommene Schwingungsphänomenereignis auf der Beurteilungsstrecke ist für die Bewertungsabgabe ausschlaggebend.

- Der Mittelwert aller wahrgenommenen Schwingungsphänomereignisse auf der Beurteilungsstrecke ist für die Bewertungsabgabe ausschlaggebend.
- Die Summe, d.h. die Anzahl und die Stärke aller wahrgenommenen Schwingungsphänomereignisse, ist für die Bewertungsabgabe ausschlaggebend.

4.3 Versuchsablauf und Durchführung

Mit Hilfe der in Abschnitt 4.2.1 vorgestellten Messtechnik werden die Fahrversuche durchgeführt. Dazu werden zwei 4x2 Sattelzugmaschinen mit jeweils einem vollständig ausgeladenen Auflieger und einer Fahrzeugesamtmasse von 40 t herangezogen. Eines der Fahrzeuge dient als Referenzfahrzeug und bleibt in seiner Konfiguration konstant. Das zweite Fahrzeug dient als Variantenfahrzeug. In dieses wird die genannte Messtechnik eingebaut. Da die Fahrersitzeinstellung sich auf die Wahrnehmung des Schwingungskomforts auswirkt (vgl. Abschnitt 3.1.3), wird für die Untersuchungen immer der gleiche LKW-Schwingsitz (Modell MSG 115, Grammer AG) mit den in Tabelle 4.2 aufgeführten Einstellungen verwendet. Einflüsse von unterschiedlichen Sitzschäumen, Kontaktflächen durch unterschiedliche Abmessungen der Sitze und Einflüsse durch unterschiedliche Neigungen des Sitzes sollen so vermieden werden.

Tabelle 4.2: Sitzeinstellungen

Sitzbestandteil	Einstellung
Sitzfläche	Neigung: -5° bzgl. der x-Achse um die y-Achse Dämpfung: höchste Dämpfungseinstellung
Rückenlehne	Neigung: -15° bzgl. der z-Achse um die y-Achse
Armstützen	hochgeklappt

Insgesamt werden sechs Messkampagnen (MK) mit jeweils unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen gefahren. Dabei wird jeweils das Variantenfahrzeug hinsichtlich der Dämpferkennlinien der Fahrerhauslagerung und der Achsdämpfer verändert. Dies entspricht einer Verstimmung der Dämpferparameter aus Ebene zwei und drei in Abbildung 2.5 auf Seite 8. In

Tabelle 4.3: Übersicht der Fahrzeugkonfigurationen aller Messkampagnen

Mess- kampagne	Achsdämpfer		Fahrerhauslagerung	
	vorne	hinten	vorne	hinten
MK1	hart	hart	hart	hart
MK2	weich	weich	weich	weich
MK3	weich ¹	weich ¹	weich	weich
MK4	sehr weich ²	sehr weich ²	sehr weich ²	sehr weich ²
MK5	sehr hart	sehr hart	sehr hart	sehr hart
MK6	mittelweich	mittelweich	mittelweich	mittelweich

¹: ohne Achsstabilisator, ²: Referenzfahrzeug

Tabelle 4.3 sind die unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen qualitativ aufgelistet. In Messkampagne 4 wird das Referenzfahrzeug auch als Variantenfahrzeug verwendet und mit der genannten Messtechnik ausgestattet, um auch für dieses Fahrzeug objektive Messdaten zu erfassen.

In jeder Messkampagne wird mit einer festen Fahrzeugkonfiguration für jedes der in Abschnitt 2.4 genannten drei Schwingungsphänomene ein definiertes Streckenkollektiv gefahren. Dieses Streckenkollektiv ist eine gezielte Auswahl aus den 12 verfügbaren Bahnen des EVZ Wörth, die in Abbildung 4.4 dargestellt sind und in Tabelle 4.4 näher beschrieben sind.

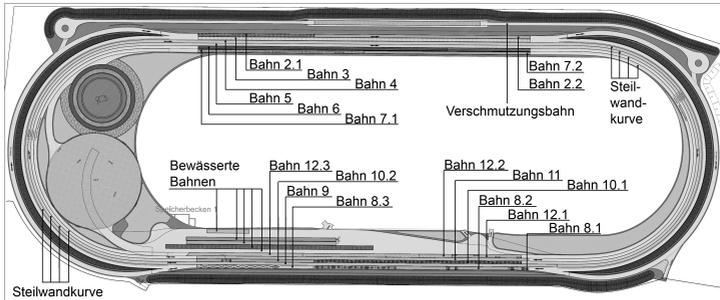


Abbildung 4.4: Teststrecke EVZ Würth nach [26]

Tabelle 4.4: Übersicht der verwendeten Bahnen des EVZ Würth

Bahnnr.	Beschreibung
2	Auf- und ablaufende Plattenstöße
4	Durchgehender Fahrstreifen Asphalt mit einer Senke
5	Durchgehender Fahrstreifen Asphalt
7	Starke, gleich- und wechselseitige Anregung
8.1 + 8.2	Rampe und Senke, starke gleichseitige Anregung
8.3	Gleich- und wechselseitige Sinuswellen
9	Fahrstreifen Betonautobahn
10	Betonautobahn mit Plattenstößen
11	Schlechte Landstraße
12	Einzelhindernisse (Gullideckel, Brückenfugen, ...)

Die Bahnen bieten unterschiedliche ausgewählte Fahrbahncharakteristiken, sodass unterschiedliche Schwingungsanregungen des Fahrzeuges reproduzierbar realisiert werden können. Bei den Fahrbahncharakteristiken handelt es sich teilweise um Reproduktionen von Fahrbahnoberflächen öffentlicher

Straßen. Zu jeder Bahn wird eine definierte Geschwindigkeit vorgegeben, die von den Probanden konstant einzuhalten ist.

Das zu einem Schwingungsphänomen korrespondierende Streckenkollektiv umfasst jene Bahnen, auf denen das betrachtete Schwingungsphänomen angeregt wird. Die Streckenkollektive sind in Tabelle 4.5 aufgeführt.

Tabelle 4.5: Streckenkollektive

Längsstößen		Nicken		Wanken
MK 1-4	MK 5-6	MK 1-4	MK 5-6	MK 1-6
Bahn 2	Bahn 9	Bahn 2	Bahn 2	Bahn 7
Bahn 5	Bahn 10	Bahn 4	Bahn 4	Bahn 8.3
Bahn 9	Bahn 11	Bahn 7	Bahn 8.3	Bahn 11
Bahn 10	Bahn 12	Bahn 8.1 + 8.2	Bahn 11	
Bahn 11		Bahn 8.3		
Bahn 12		Bahn 11		

Beispielsweise bilden die Bahnen 2, 4, 7, 8.1 + 8.2, 8.3 und 11 ein Streckenkollektiv der Messkampagnen 1-4 zur Beurteilung des „Nickens“. Bahnen, auf denen mehrere Schwingungsphänomene auftreten, sind entsprechend in mehreren Streckenkollektiven vertreten. Die Fahrversuche laufen in jeder der sechs Messkampagnen nach folgendem Prozess ab:

1. Gesamteindruck bzgl. Referenz- und Variantenfahrzeug:

In jeder Messkampagne fährt jeder Proband zuerst sämtliche in Tabelle 4.4 aufgeführten Bahnen mit dem Referenzfahrzeug, um einen Gesamteindruck des Fahrzeuges bzgl. des Fahrkomforts zu gewinnen und die unterschiedlichen Ausprägungen und Stärken der zu beurteilenden Schwingungsphänomene kennen zu lernen. Im Anschluss werden sämtliche

Bahnen mit dem Variantenfahrzeug gefahren. In den Streckenkollektiven ist immer auch diejenige Bahn enthalten, die das jeweils zu beurteilende Schwingungsphänomen auf der Teststrecke des EVZ Wörth am stärksten anregt.

2. Beurteilungsprozess für jedes Schwingungsphänomen:

In diesem Schritt beginnt der eigentliche Beurteilungsprozess. Für jedes Schwingungsphänomen wird das korrespondierende Streckenkollektiv aus Tabelle 4.5 herangezogen. Die Bahnen werden nacheinander gefahren und einzeln bewertet. Dazu wird die jeweilige Bahn zuerst mit dem Referenzfahrzeug befahren. Im Anschluss wird das zum Streckenkollektiv korrespondierende Schwingungsphänomen nach den in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Kriterien bzgl. Phänomenstärkenoten, Akzeptanzwerten, Körperbereichen und ausschlaggebenden Faktoren beurteilt. Die Bewertungsabgabe erfolgt jeweils für die vollständig gefahrene Bahn. Danach wird die Bahn mit dem Variantenfahrzeug befahren. Dabei werden die objektiven Messdaten aufgenommen. Während der Fahrt betätigt der Proband den Triggerschalter, wenn er das zu bewertende Schwingungsphänomen wahrnimmt. Im Anschluss werden die subjektiven Bewertungen abgegeben. Ist dieser Vorgang abgeschlossen, wiederholt sich der Beurteilungsprozess für die nächste Bahn des Streckenkollektivs.

Die Messkampagnen 1-4 werden ausschließlich mit einer geringen Zahl von 6-9 geübten (männlichen) Beurteilern gefahren, die nachfolgend als „Experten“ bezeichnet werden. Die Messkampagnen 5 und 6 dagegen mit einer größeren Probandenzahl von 19-20 (männlichen) Probanden, die sich aus geübten und ungeübten Beurteilern zusammensetzt. Die Daten der Messkampagnen 1-4 werden zur Modellerstellung herangezogen. Die Daten der Messkampagnen 5 und 6 werden im folgenden Verlauf der Arbeit als Validierungsdaten verwendet. Die Modelle können so auch im Extrapolationsbereich getestet werden.

Tabelle 4.6: Mittelwerte und Standardabweichungen μ (SD) der messkampagnen-abhängigen Probandenkollektivdaten

MK	n	Alter in Jahren	Größe in cm	Masse in kg	BMI in kg/m²
1	9	38,44 (11,61)	183 (7,15)	86,22 (12,8)	25,8 (3,9)
2	8	38,75 (12,28)	183,38 (7,5)	86,13 (13,58)	25,7 (4,1)
3	7	37,71 (8,84)	183 (7,95)	89 (13,24)	26,7 (4)
4	6	38 (9,52)	183,5 (8,48)	89,33 (14,28)	26,6 (4,4)
5	20	39,7 (9,08)	181,25 (8,7)	86,05 (10,21)	26,3 (3,3)
6	19	41,11 (10,10)	180,42 (9,44)	85,53 (11,25)	26,4 (3,6)

Im Anhang in Abbildung A.1 sind die messkampagnenabhängigen Probandenkollektive in Abhängigkeit des Alters, der Körpermasse, der Körpergröße und des Body Mass Indexes (BMI) dargestellt. Die Anzahl der Probanden n , die Mittelwerte (μ) und die Standardabweichungen (SD) sind in der Abbildung jeweils unter den Legendeneinträgen zu finden und zusammenfassend in Tabelle 4.6 aufgeführt.

Für Validierungsfahrten außerhalb des Testgeländes wurden in den Messkampagnen 5 und 6 zusätzlich acht weitere Streckenabschnitte herangezogen. Diese werden im Anschluss an die oben beschriebenen Beurteilungsfahrten im EVZ Wörth mit dem Variantenfahrzeug gefahren und bewertet. Die Streckenabschnitte sind nachfolgend in Tabelle 4.7 aufgelistet und werden ebenfalls mit einer Bahnnummer versehen. Es werden zu jedem Stre-

ckenabschnitt zu den Verkehrszeichen kompatible Geschwindigkeitsvorgaben gemacht.

Tabelle 4.7: Übersicht der Validierungsstrecken außerhalb des EVZ Wörth

Bahnnr.	Beschreibung
21	Landstraße zur Beurteilung des „Längsstoßens“
22	Landstraße mit langweiliger Anregung zur Beurteilung des „Nickens“
23	Landstraße zur Beurteilung des „Wankens“
24	Landstraße zur Beurteilung des „Längsstoßens“
25	Landstraße zur Beurteilung des „Wankens“
26	Landstraße zur Beurteilung des „Nickens“
27	„gute asphaltierte Bundesstraße“ zur Beurteilung des „Längsstoßens“
28	Landstraße zur Beurteilung des „Nickens“

4.4 Statistische Analyse der subjektiven Bewertungen

4.4.1 Statistische Analyse der Phänomenstärkebewertungen

Um die Phänomenstärkenoten analysieren zu können, ist zunächst eine Notentransformation notwendig. Dies ist darin begründet, dass die Probanden die Notenskala auf Grund individueller Erfahrungen in der Bewertung von Schwingungsphänomenen, individueller Erfahrungen bzgl. auftretender Phänomenstärken im Fahrzeug und auch individueller Interpretation der Notenunterschiede unterschiedlich ausnutzen.

Gewöhnlich wird in solchen Fällen eine sogenannte z-Transformation (auch Standardisierung genannt) angewandt. Diese transformiert jede einzelne Note N eines Probanden in eine standardisierte Note Z , sodass der Erwar-

tungswert der standardisierten Noten = 0 und die Standardabweichung = 1 beträgt [70]. Die transformierten Noten sind allerdings in ihrer Ausprägung nicht mehr bzgl. der Skalenendpunkte „nicht wahrnehmbar“ und „sehr stark wahrnehmbar“ interpretierbar. Aus diesem Grund werden hier die in einer gegebenen Messkampagne MK abgegebenen Noten N eines Probanden $Prob$ bzgl. eines Schwingungsphänomens SP jeweils derart linear transformiert, dass das individuelle Bewertungsminimum N_{MIN} bzw. Bewertungsmaximum N_{MAX} mit dem Durchschnitt aller Minima μ_{MIN} bzw. Maxima μ_{MAX} über alle Probanden betrachtet übereinstimmt.

Für einen einzelnen Probanden gilt bzgl. eines vorgegebenen Schwingungsphänomens und einer vorgegebenen Messkampagne die Notentransformation:

$$N_{Tr} = (N - N_{MIN}) \frac{\mu_{MAX} - \mu_{MIN}}{N_{MAX} - N_{MIN}} + \mu_{MIN} . \quad (4.8)$$

Allgemein gilt für die einzelnen Messkampagnen und Schwingungsphänomene:

$$N_{Tr,Prob,MK}^{SP} = (N_{Prob,MK}^{SP} - N_{MIN,Prob,MK}^{SP}) \frac{\mu_{MAX,MK}^{SP} - \mu_{MIN,MK}^{SP}}{N_{MAX,Prob,MK}^{SP} - N_{MIN,Prob,MK}^{SP}} + \mu_{MIN,MK}^{SP} . \quad (4.9)$$

Die Transformation wird für das Schwingungsphänomen „Längsstößen“ in Messkampagne 1 in Abbildung 4.5 verdeutlicht.

In Abbildung 4.6 ist die Verteilung der transformierten Noten für das „Längsstößen“ im Variantenfahrzeug bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives als Boxplot dargestellt. Die Enden der Balken begrenzen das obere und untere Quartil. Die schwarze Markierung innerhalb der Balken repräsentiert den Medianwert. Die Enden der schwarzen Linien ober- und unterhalb der Balken stellen die minimale und maximale transformierte Note dar. Kreise und Sterne stellen Ausreißer dar.

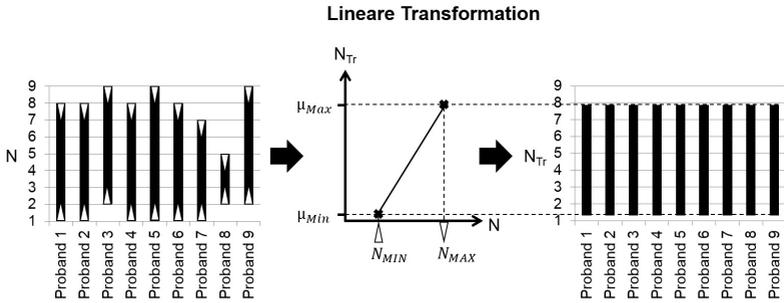


Abbildung 4.5: Lineare Notentransformation für das „Längsstößen“ in MK1

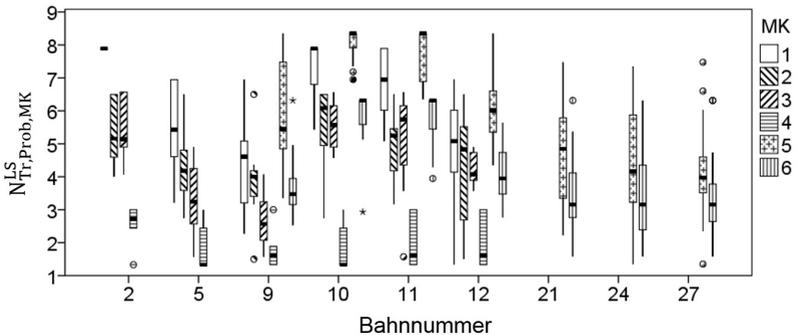


Abbildung 4.6: Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkennoten des Variantenfahrzeuges für das „Längsstößen“ (LS) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives

Anhand der Medianwerte ist zu erkennen, dass durch die unterschiedlichen Streckencharakteristiken und Messkampagnen (d.h. Fahrzeugkonfigurationen) unterschiedliche Bewertungen hervorgerufen werden konnten. Das heißt die wahrgenommenen Phänomenstärken weisen Variationen auf. Der Wertebereich der Medianwerte erstreckt sich von 1,33 bis 8,35. Neben den unterschiedlichen Medianwerten ist ebenfalls eine erhebliche Streuung der transformierten Noten zu beobachten. Die mittlere maximale Notendiffe-

renz bzgl. einer gefahrenen Bahn einer bestimmten Messkampagne beträgt 3,31 und die mittlere Standardabweichung 1,1 Notenpunkte. Die maximale Notendifferenz einer gefahrenen Bahn bei einer bestimmten Messkampagne beträgt 6,13 (Bahn 27, MK5) und die maximale Standardabweichung 1,9 (Bahn 12, MK2). Detaillierte, nach den Bahnen und Messkampagnen aufgeschlüsselte deskriptive Statistiken sind im Anhang in Tabelle A.1 aufgeführt.

Die Notenverteilung für das Referenzfahrzeug ist in Abbildung 4.7 als Boxplot dargestellt. Die Streuungen der Bewertungen des Referenzfahrzeuges bzgl. des „Längsstoßens“ fallen im Vergleich zum Variantenfahrzeug geringer aus.

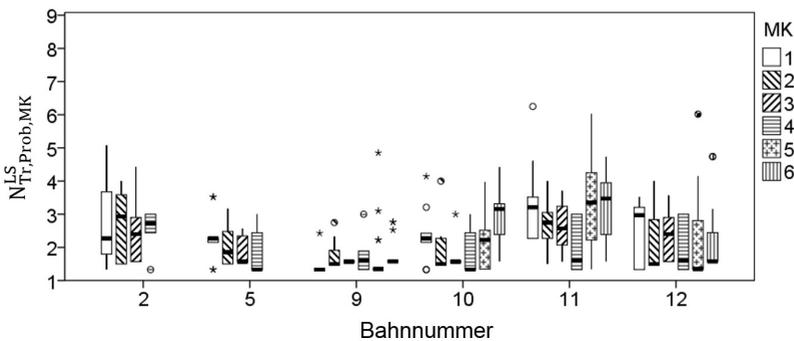


Abbildung 4.7: Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Referenzfahrzeuges für das „Längsstoßen“ (LS) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives

Die Medianwerte erstrecken sich auf einen Bereich von 1,33 bis 3,47. Die mittlere maximale Notendifferenz bei einer gefahrenen Bahn einer bestimmten Messkampagne beträgt 2,32 und die mittlere Standardabweichung 0,84 Notenpunkte. Auch die maximale Notendifferenz bzgl. einer gefahrenen Bahn und Messkampagne fällt geringer aus. Sie beträgt 4,67 Notenpunkte (Bahn 11, MK5). Die maximale Standardabweichung liegt bei 1,95 Noten-

punkten (Bahn 2, MK1). Die detaillierten deskriptiven Statistiken zur Bewertung des Referenzfahrzeuges bzgl. des „Längsstoßens“ sind im Anhang in Tabelle A.2 aufgeführt.

Beim „Nicken“ konnte durch die unterschiedlichen Streckencharakteristiken und Fahrzeugkonfigurationen des Variantenfahrzeuges ebenfalls eine breite Variation der Medianwerte erreicht werden. Dies ist in Abbildung 4.8 zu sehen.

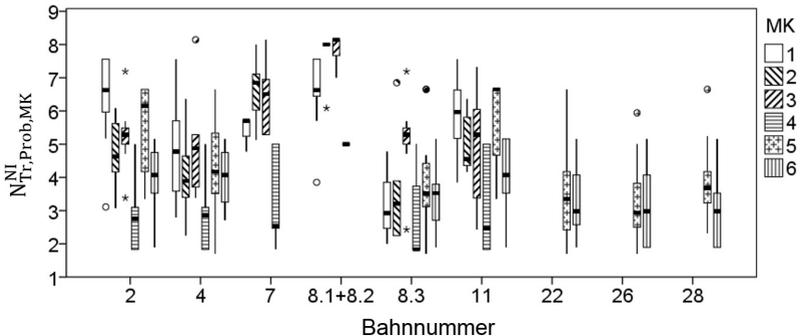


Abbildung 4.8: Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Variantenfahrzeuges für das „Nicken“ (NI) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives

Der Wertebereich der Medianwerte erstreckt sich von 1,83 bis 8,14. Die mittlere maximale Notendifferenz bzgl. einer gefahrenen Bahn einer bestimmten Messkampagne beträgt 3,4 und die mittlere Standardabweichung 1,16 Notenpunkte. Die entsprechende maximale Notendifferenz liegt bei 4,95 (Bahn 8.3 und Bahn 22, MK5) und die maximale Standardabweichung bei 1,88 Notenpunkten (Bahn 11, MK3). Die nach Bahnen und Messkampagnen aufgeschlüsselten deskriptiven Statistiken zur Bewertung der Phänomenstärke des „Nickens“ beim Variantenfahrzeug sind im Anhang in Tabelle A.3 aufgeführt.

Die Verteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Referenzfahrzeuges bzgl. des „Nickens“ ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Hier erstreckt

sich der Bereich der Medianwerte von 1,83 bis 5,69. Der Bereich ist somit kleiner als der des Variantenfahrzeuges. Die mittlere maximale Notendifferenz bzgl. einer gefahrenen Bahn und Messkampagne beträgt 1,08 und die mittlere Standardabweichung 2,91 Notenpunkte. Beide Werte sind geringer als die des Variantenfahrzeuges. Dies trifft auch für die maximale Standardabweichung bzgl. einer gefahrenen Bahn und Messkampagne zu. Diese beträgt 1,65 Notenpunkte (Bahn 8.1+8.2, MK2). Die maximale Standardabweichung beträgt 4,95 Notenpunkte (Bahn 11, MK5).

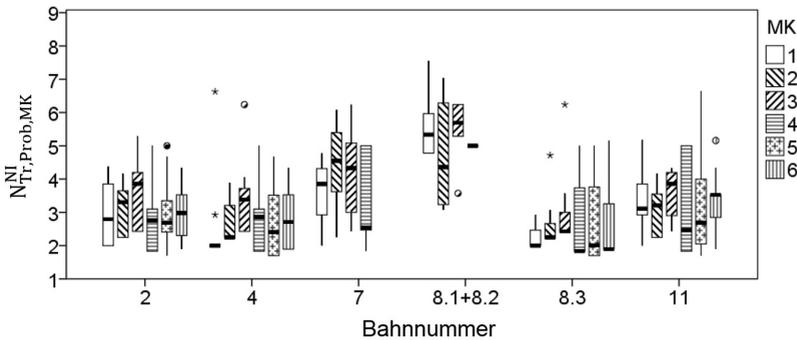


Abbildung 4.9: Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Referenzfahrzeuges für das „Nicken“ (NI) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives

Die Verteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Variantenfahrzeuges bzgl. des „Wankens“ ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

Auch beim „Wanken“ konnte durch die Variation der Fahrbahncharakteristiken und der Fahrzeugkonfigurationen des Variantenfahrzeuges ein großer Bereich an unterschiedlichen Noten dargestellt werden. Die Mediane erstrecken sich auf einen Bereich von 1,68 bis 7,43. Die mittlere maximale Notendifferenz einer Bahn und Messkampagne beträgt 2,71 und die mittlere Standardabweichung 0,97 Notenpunkte. Die maximale Notendifferenz

bzgl. einer Bahn und Messkampagne beträgt 4,29 (Bahn 11, MK3) und die maximale Standardabweichung 1,65 (Bahn 11, MK3).

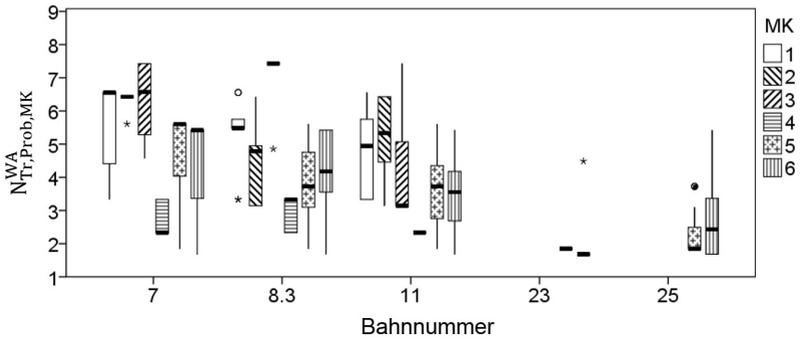


Abbildung 4.10: Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkennoten des Variantenfahrzeuges für das „Wanken“ (WA) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives

Die Verteilung der transformierten Phänomenstärkennoten des Referenzfahrzeuges bzgl. des „Wankens“ ist in Abbildung 4.11 dargestellt.

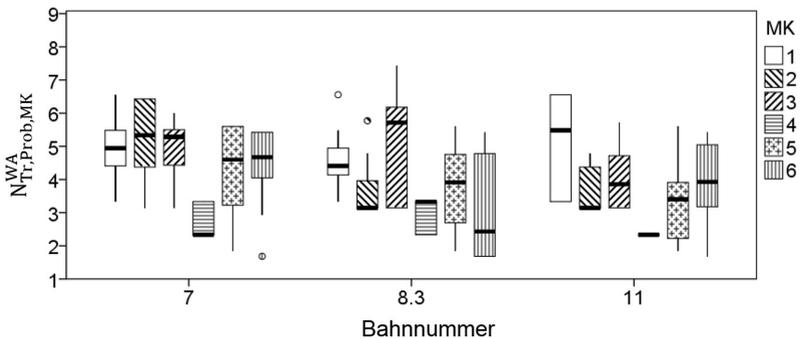


Abbildung 4.11: Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkennoten des Referenzfahrzeuges für das „Wanken“ (WA) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives

Die Mediane erstrecken sich auf einen Bereich von 2,33 bis 5,71. Der Bereich ist kleiner als beim Variantenfahrzeug. Die mittlere maximale Notendifferenz einer Bahn und Messkampagne beträgt 2,86 und die mittlere Standardabweichung 1,07 Notenpunkte. Beide Werte fallen höher aus als beim Variantenfahrzeug. Die maximale Notendifferenz tritt bei Bahn 8.3, MK3 auf und beträgt 4,29. Die maximale Standardabweichung tritt ebenfalls bei Bahn 8.3, MK3 auf und beträgt 1,81 Notenpunkte.

Insgesamt konnte für alle Schwingungsphänomene durch die unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen des Variantenfahrzeuges und durch die unterschiedlichen Streckencharakteristiken ein Medianwertebereich von mindestens 5,74 Notenpunkten erreicht werden. Die Auswahl der Beurteilungstrecken und Fahrzeugkonfigurationen war somit hinsichtlich einer Phänomenstärkenvariation erfolgreich. Dies ermöglicht die Durchführung von Korrelationsanalysen zwischen den subjektiven Phänomenstärkennoten und objektiven Kennwerten aus Messsignalen im weiteren Verlauf der Arbeit.

4.4.2 Statistische Analyse der Akzeptanzbewertungen

Die Akzeptanzwerte werden hinsichtlich ihrer Phänomenstärkennotenverteilung analysiert. Dies ist notwendig, um die Notenskala der Phänomenstärke in Akzeptanzbereiche aufzuteilen. Dies ermöglicht im weiteren Verlauf der Arbeit die Ableitung von Zielwerten, die eingehalten werden müssen, um einen bestimmten Akzeptanzbereich zu erfüllen. Die Verteilung der Phänomenstärkennoten bzgl. der Akzeptanzkriterien, aufgeteilt nach den zu bewertenden Schwingungsphänomenen, ist in Abbildung 4.12 dargestellt.

Die Medianwerte bei den ersten vier Akzeptanzkriterien mit schlechterer Akzeptanzbewertung nehmen bei allen Schwingungsphänomenen zu. Die zugehörigen schwingungsphänomenabhängigen Medianwerte liegen für jedes Akzeptanzkriterium auf einem ähnlichen Niveau mit einer maximalen Notendifferenz von 0,67 Notenpunkten. Das Akzeptanzkriterium „unakzeptabel“ bildet beim „Wanken“ eine Ausnahme. Hier beträgt die maxima-

le Differenz zu den beiden anderen Schwingungsphänomenen 1,77 Notenpunkte. Eine Tabelle mit den genauen Medianwerten ist im Anhang unter Tabelle A.7 zu finden.

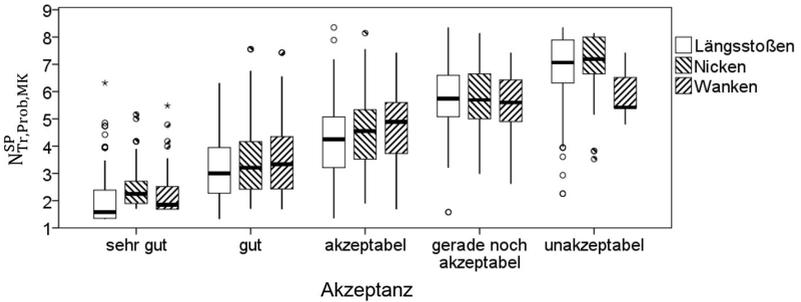


Abbildung 4.12: Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkennoten bzgl. der Akzeptanz

Um Notengrenzen für jedes Akzeptanzkriterium festzulegen, wird der mittlere Phänomenstärkenmedianwert zwischen zwei Akzeptanzkriterien berechnet. Für die aufeinanderfolgenden Akzeptanzkriterien i_{Akz} mit $i_{Akz} = 1 \dots 4$ (1: sehr gut, 4: gerade noch akzeptabel) folgt:

$$N_{Akz}^{SP,i_{Akz}} = \text{Median}(\underline{N}_{Tr,Prob,MK}^{SP,i_{Akz}}) + \frac{\text{Median}(\underline{N}_{Tr,Prob,MK}^{SP,i_{Akz}}) - \text{Median}(\underline{N}_{Tr,Prob,MK}^{SP,i_{Akz}+1})}{2}. \quad (4.10)$$

$\underline{N}_{Tr,Prob,MK}^{SP,i_{Akz}}$ bezeichnet dabei den Vektor aller transformierten Phänomenstärkennoten eines Schwingungsphänomens SP , die zum jeweiligen Akzeptanzkriterium i_{Akz} gehören. Die sich ergebenden Grenzen sind in Tabelle 4.8 aufgeführt.

Tabelle 4.8: Schwingungsphänomenabhängige Phänomenstärkenotengrenzen zu jedem Akzeptanzkriterium

Akzeptanzkriterium	LS	Nicken	Wanken
sehr gut	< 2,29	< 2,73	< 2,59
gut	2,29– < 3,63	2,73– < 3,88	2,59– < 4,11
akzeptabel	3,63– < 5	3,88– < 5,12	4,11– < 5,24
gerade noch akzeptabel	5– < 6,4	5,12– < 6,44	5,24– < 5,51
unakzeptabel	≥ 6,4	≥ 6,44	≥ 5,51

LS: Längsstößen

4.4.3 Statistische Analyse der wahrnehmungsrelevanten Körperbereiche

Zur Analyse der wahrnehmungsrelevanten Körperbereiche eines jeden Schwingungsphänomens wird die relative Anzahl der Nennungen eines Körperbereiches betrachtet. Diese ist das Verhältnis aus der absoluten Anzahl der Nennungen eines Körperbereiches und der Gesamtzahl der ausgefüllten Fragebögen. Die Verteilung auf die Körperbereiche ist für jedes Schwingungsphänomen in Abbildung 4.13 dargestellt.

Signifikante Prozentsätze gegenüber einer zufälligen Wahl eines Körperbereiches bei einem Signifikanzniveau von 0,05 sind mit einem „*“ markiert. Daraus lässt sich erkennen, dass das „Längsstößen“ hauptsächlich durch den unteren Rücken wahrgenommen wird. Das „Nicken“ hingegen wird hauptsächlich über den Kopf und den Nacken wahrgenommen. Diese Körperbereiche sind auch für die Wahrnehmung des „Wankens“ relevant. Zusätzlich spielt hier auch der Oberkörper in Form des oberen Rückens eine Rolle. Diese Erkenntnisse werden im weiteren Verlauf der Arbeit für die Kennwertberechnung aus den Daten der Druckmessmatten verwendet.

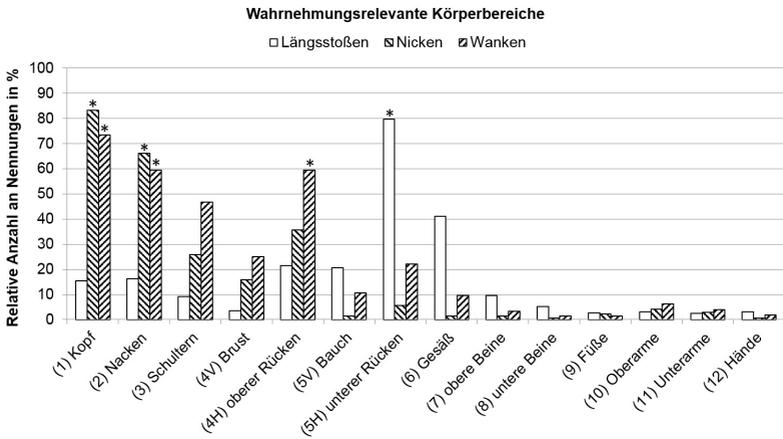


Abbildung 4.13: Wahrnehmungsrelevante Körperbereiche zu den untersuchten Schwingungsphänomenen

4.4.4 Statistische Analyse der relevanten Faktoren für die Phänomenstärkebewertung

Die Auswertemethodik bzgl. der relevanten Faktoren für die Phänomenstärkebewertung richtet sich nach der im vorigen Abschnitt angewandten Vorgehensweise. Entsprechend sind in Abbildung 4.14 für jedes Schwingungsphänomen die relative Anzahl an Nennungen für jeden ausschlaggebenden Faktor aufgetragen. Signifikante Prozentsätze bei einem Signifikanzniveau von 0,05 gegenüber einer zufälligen Wahl eines relevanten Faktors sind auch hier mit einem „*“ markiert.

Aus der Abbildung ist erkennbar, dass sowohl für alle Schwingungsphänomene die Anzahl der wahrgenommenen Schwingungsphänomeneereignisse als auch deren wahrgenommene Stärke ausschlaggebend für die Bewertung der Phänomenstärke sind. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass jeweils das gesamte Messsignal für die Berechnung von objektiven Kennwerten verwendet werden muss. Einzelne Werte eines Messsignals, wie z.B. der Ma-

ximalwert oder ein Messwert zu einem bestimmten Zeitpunkt sind daher weniger geeignet.

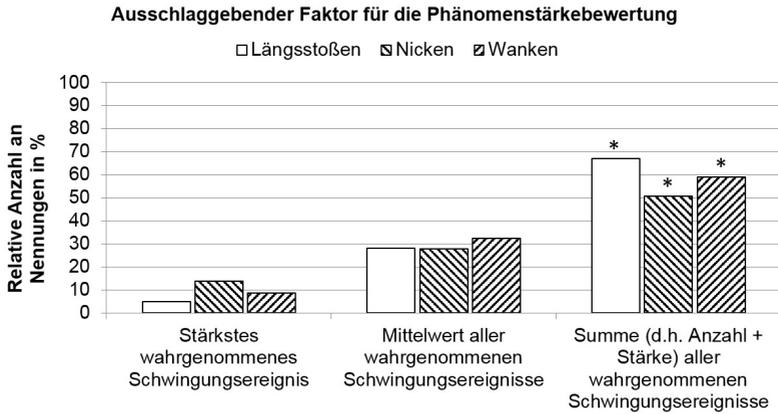


Abbildung 4.14: Für die Bewertung der Phänomenstärke relevante Faktoren

5 Wahrnehmungsrelevante Frequenzen und Maskierungseffekte

Im vorliegenden Kapitel werden mit Hilfe der in Kapitel 4 aufgenommenen Messdaten die wahrnehmungsrelevanten Frequenzbereiche aller drei Schwingungsphänomene untersucht. Auf den Ergebnissen aufbauend werden unterschiedliche Faktoren daraufhin untersucht, inwiefern diese die Wahrnehmung der Schwingungsphänomene beeinflussen. Analysiert werden der Einfluss gleichzeitig oder zeitlich vorher auftretender Schwingungsereignisse unterschiedlicher Bewegungsrichtungen sowie der Einfluss von Audio- und Videosignalen auf die wahrgenommene Stärke eines Schwingungsphänomens. Zur Untersuchung dieser Einflüsse wird der im folgenden Abschnitt vorgestellte Ride Simulator der Daimler AG verwendet.

5.1 Ride Simulator

Der Ride Simulator am Standort Sindelfingen der Daimler AG besteht aus einer auf einem Hexapod gelagerten beweglichen Plattform. Diese ist beschleunigungsgeregelt und ermöglicht translatorische Bewegungen von bis zu ± 220 mm in x- und y-Richtung sowie ± 200 mm in z-Richtung. Des Weiteren sind Winkel von bis zu $\pm 6^\circ$ in allen Raumrichtungen realisierbar. Der Ride Simulator und das verwendete Koordinatensystem sind in Abbildung 5.1 dargestellt.

Der Ride Simulator bietet die Möglichkeit, auf einen definierten Punkt referenzierte Beschleunigungen wiederzugeben. Als Eingangsgrößen dienen Beschleunigungssignale, die auf vorangegangenen Testfahrten am Fahrer-

sitz gemessen, künstlich erzeugt oder aus Simulationen am Fahrersitz berechnet wurden. Diese teilen sich jeweils in die drei translatorischen Beschleunigungen $a_{Sim,tx}$, $a_{Sim,ty}$, $a_{Sim,tz}$ und in die drei Rotationsbeschleunigungen $a_{Sim,rx}$, $a_{Sim,ry}$, $a_{Sim,rz}$ auf.

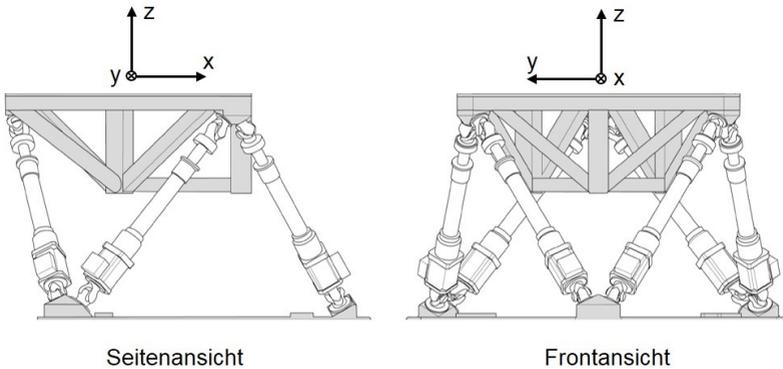


Abbildung 5.1: Darstellung des Ride Simulators der Daimler AG nach [61] und des verwendeten Koordinatensystems

Die Nutzung des Ride Simulators bietet gegenüber Versuchsfahrten im Fahrzeug folgende Vorteile:

- Reproduzierbare Signalabläufe garantieren die selbe Schwingungsanregung für jeden Probanden.
- Direkte Vergleiche von unterschiedlichen Beschleunigungssignalvarianten (resultierend aus unterschiedlichen Fahrzeugzuständen) sind ohne Warte- oder Umbauzeiten möglich. Dies ermöglicht einen zeit-effizienten Vergleich unterschiedlicher Schwingungsanregungen.
- Beschleunigungssignale aus Berechnungs- und Simulationsergebnissen sowie künstliche Signale können erlebbar gemacht werden.
- Signalmanipulationen können erlebbar gemacht werden:
 - Ausblenden bestimmter Schwingungsrichtungen
 - Ausblenden bestimmter Frequenzbereiche

- Verstärkung und Abschwächung der Signalamplituden
- Isolierte Betrachtung ausgewählter Signalausschnitte.

Nachteilig sind im Vergleich zu Versuchsfahrten im realen Fahrzeug die fehlende Fahraufgabe, die fehlende Fahrzeugumgebung und die fehlenden äußeren Umgebungseinflüsse.

Auf der Simulatorplattform werden für die nachfolgenden Untersuchungen die gleichen Schwingsitze und Einstellungen wie im realen Fahrzeug bei den Versuchsfahrten verwendet (s. Tabelle 4.2). Diese werden wie im realen Fahrzeug pneumatisch mit Druck beaufschlagt, um Federbewegungen und die Niveauregulierung der Sitze zu ermöglichen. Ergänzend zu den Sitzen werden Fußstützen auf der Simulatorplattform montiert, die eine Fußablage in Gaspedalstellung ermöglichen (vgl. Abbildung 5.2). Die Neigung der

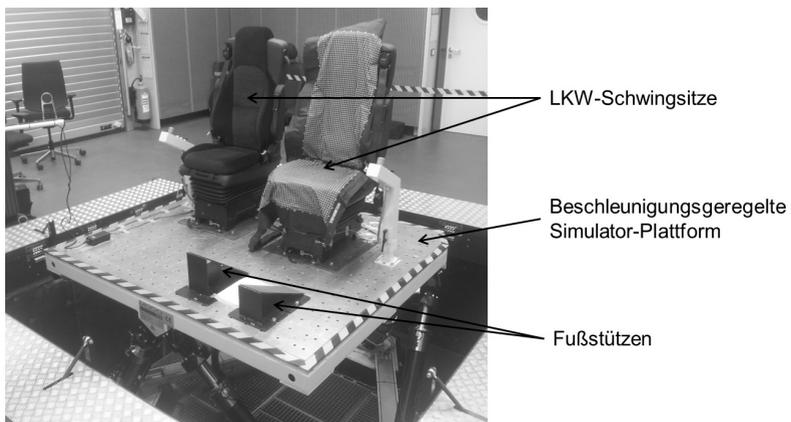


Abbildung 5.2: Ride Simulator Versuchsaufbau

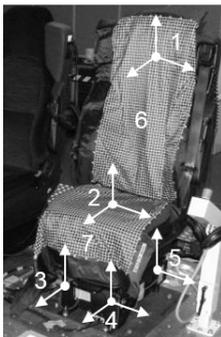
Fußstützen sind dem Realbetrieb im Fahrzeug nachempfunden und haben folgende Neigungswinkel:

- Neigung Fußstütze rechts: -35° bzgl. der x-Achse um die y-Achse,
- Neigung Fußstütze links: -25° bzgl. der x-Achse um die y-Achse.

Analog zu den Fahrzeugmessungen aus Kapitel 4 werden Beschleunigungen und Druckverteilungen am Fahrersitz gemessen (vgl. Tabelle 4.1). Dies umfasst:

- 7 Beschleunigungssensoren an der Fahrersitzkonsole,
- 3 Beschleunigungssensoren an der Sitzfläche,
- 3 Beschleunigungssensoren an der Rückenlehne,
- 48x48 Drucksensoren an der Sitzfläche,
- 40x64 Drucksensoren an der Rückenlehne.

Die Platzierung der entsprechenden Sensoren ist in Abbildung 5.3 qualitativ dargestellt.



- 1) Triaxialer Beschleunigungssensor an der Rückenlehne
- 2) Triaxialer Beschleunigungssensor unter der Sitzfläche
- 3) Biaxialer Beschleunigungssensor an der Fahrersitzkonsole vorne rechts
- 4) Triaxialer Beschleunigungssensor an der Fahrersitzkonsole vorne links
- 5) Biaxialer Beschleunigungssensor an der Fahrersitzkonsole hinten links
- 6) Druckmessmatte auf der Rückenlehne
- 7) Druckmessmatte auf der Sitzfläche

Abbildung 5.3: Ride Simulator Sensoranordnung

5.2 Frequenzuntersuchungen

5.2.1 Zielsetzung

Im Rahmen der Frequenzuntersuchungen soll für jedes der drei Schwingungsphänomene der jeweils für die Wahrnehmung relevante Frequenzbereich bestimmt werden. Gleichzeitig sollen in diesen Bereichen die Frequenzen hinsichtlich der Wahrnehmungsstärke bewertet werden. Aus den

resultierenden Bewertungskurven soll im Anschluss jeweils eine Frequenzgewichtungskurve für das „Längsstößen“, „Nicken“ und „Wanken“ abgeleitet werden. Diese sollen im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes als schwingungsphänomenabhängige Frequenzfilter in der Signalanalyse verwendet werden, um die für die Wahrnehmung des jeweiligen Phänomens relevanten Signalbestandteile wahrnehmungsgewichtet isolieren zu können.

5.2.2 Vorgehensweise

Aus den in Kapitel 4 durchgeführten Messungen wird für jedes der drei Schwingungsphänomene eine repräsentative Messung nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Das Schwingungsphänomen tritt als Einzelereignis isoliert auf,
- das Schwingungsphänomen ist deutlich wahrnehmbar,
- und aus den anderen Bewegungsrichtungen treten nur wenige wahrnehmbare Störeinflüsse auf.

Die Vorgehensweise für die Untersuchungen wird nachfolgend beispielhaft anhand des Schwingungsphänomens „Längsstößen“ vorgestellt, für das eine Messung der Messkampagne 1 auf Bahn 9 des EVZ Wörth ausgewählt wird. Die dazu korrespondierenden bzw. berechneten Beschleunigungen $a_{FaSiKo,vl,tx}$, $a_{FaSiKo,vl,ty}$, $a_{FaSiKo,vl,tz}$, $a_{FaSiKo,rx}$, $a_{FaSiKo,ry}$ und $a_{FaSiKo,rz}$ werden den Simulatorbeschleunigungen $a_{Sim,tx}$, $a_{Sim,ty}$, $a_{Sim,tz}$, $a_{Sim,rx}$, $a_{Sim,ry}$ und $a_{Sim,rz}$ zugeordnet und dann auf die Koordinaten der Messstelle „FaSiKo,vl“ des Simulators bezogen.

Im Anschluss daran wird durch iteratives Schneiden und Bewerten des Signals das genaue Zeitintervall des zum wahrgenommenen Schwingungsphänomen korrespondierenden Schwingungsereignisses bestimmt. Das Schwingungsereignis wird daraufhin nach den iterativ bestimmten zeitlichen Grenzen aus dem ursprünglichen Gesamtsignal isoliert. Anhand des isolierten Schwingungsereignisses wird die zugrundeliegende Frequenz bestimmt. Dies geschieht näherungsweise durch eine Analyse der

Schwingungsdauer und -perioden des isolierten Schwingungsereignisses im Zeitbereich, da eine Transformation des isolierten Signals in den Frequenzbereich zu einer zu groben Frequenzauflösung führen würde. Durch eine Bandpassfilterung des Gesamtsignals mit Eckfrequenzen von ± 1 Hz um die vorher bestimmte zugrundeliegende Frequenz, wird das Frequenzband im Gesamtsignal isoliert. Daraufhin folgt erneut iterativ die zeitlich genaue Eingrenzung des Einzelereignisses. Der Vorgang ist exemplarisch anhand der Beschleunigungskomponente $a_{Sim,tx}$ in Abbildung 5.4 dargestellt.

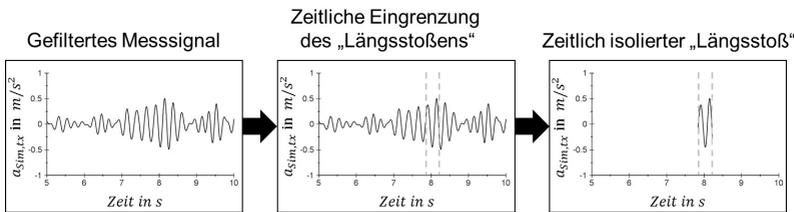


Abbildung 5.4: Vorgang zur Isolation eines Schwingungsereignisses am Beispiel des „Längsstoßens“ mit Hilfe des Beschleunigungssignals $a_{Sim,tx}$

Da es sich bei den isolierten Schwingungsereignissen nicht um klassische Stöße handelt, sondern um Ausschnitte aus Schwingungen an der Fahrersitzkonsole des LKW, die durch Anregungen von Resonanzfrequenzen entstehen (z.B. Rahmenschwingung beim Längsstößen, Fahrerhaus-schwingung beim Nicken und Wanken, vgl. Abschnitt 2.4), werden die Auswirkungen bzgl. einer Abschwächung des Amplitudenanstiegs durch die Filterung in Kauf genommen. Somit werden kontrollierte Bedingungen auf Basis der zugrunde liegenden Frequenzen des jeweiligen Schwingungsphänomens für die folgenden Untersuchungen in diesem Kapitel geschaffen.

Die Beschleunigungskomponenten $a_{Sim,tx}$, $a_{Sim,ty}$, $a_{Sim,tz}$, $a_{Sim,rx}$, $a_{Sim,ry}$ und $a_{Sim,rz}$ des bandpassgefilterten und zeitlich isolierten Einzelereignisses werden daraufhin mit einem Verstärkungsfaktor versehen und in eine künstli-

che Beschleunigungssignalumgebung (Hintergrundsignal) integriert. Dieses Hintergrundsignal besteht aus einem sich wiederholenden Signalausschnitt eines gemessenen und mit 0,5 Hz - 50 Hz bandpassgefilterten Beschleunigungssignals der Bahn 9, in dem gemäß der vorangegangenen Bewertungen subjektiv keine auffälligen Schwingungsphänomene wahrnehmbar sind. Es besteht ebenfalls aus den sechs genannten Beschleunigungskomponenten. Dessen z-Komponente ist beispielhaft in Abbildung 5.5 dargestellt. Die RMS-Werte der einzelnen Schwingungskomponenten des Hintergrundsignals sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

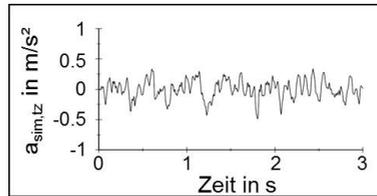


Abbildung 5.5: z-Komponente des Hintergrundsignals

Tabelle 5.1: RMS-Werte aller Beschleunigungskomponenten des Hintergrundsignals

Beschleunigungs- komponente	RMS-Wert	Beschleunigungs- komponente	RMS-Wert
$a_{Sim,tx}$	0,18 m/s ²	$a_{Sim,rx}$	0,3 rad/s ²
$a_{Sim,ty}$	0,03 m/s ²	$a_{Sim,ry}$	0,15 rad/s ²
$a_{Sim,tz}$	0,15 m/s ²	$a_{Sim,rz}$	0,01 rad/s ²

Aus dem Hintergrundsignal und dem darin platzierten und zu bewertenden Einzelereignis entsteht das für die folgenden Versuche verwendete Gesamtbeschleunigungssignal. Die Beschleunigungskomponente $a_{Sim,tx}$ dieses Signals ist in Abbildung 5.6 a) für das „Längsstößen“ dargestellt.

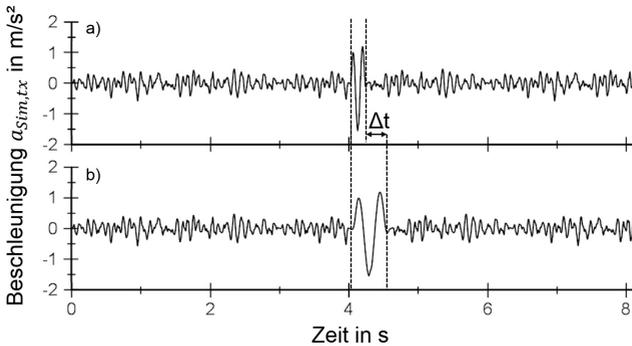


Abbildung 5.6: a) x-Komponente des Beschleunigungssignals b) x-Komponente des Beschleunigungssignals bei zeitlich gestrecktem Ereignis, jeweils für das „Längsstößen“

Das im Signal platzierte Einzelereignis wird zeitlich um Δt gestreckt und gestaucht. Damit können unterschiedliche Frequenzen des Einzelereignisses abgebildet werden. Die Beschleunigungsamplitude wurde dabei konstant gehalten (vgl. Abbildung 5.6 b)).

Untersucht wurden die in Tabelle 5.2 dargestellten schwingungsphänomen-abhängigen Frequenzbereiche mit jeweils 20 Abstufungen. Die detaillierten Frequenzabstufungen sind im Anhang in Tabelle B.1 zu finden.

Tabelle 5.2: Untersuchte Frequenzbereiche

Schwingungsphänomen	Frequenzbereich in Hz	Anzahl der Frequenz- abstufungen
Längsstößen	0,79 - 15,63	20
Nicken	0,88 - 16,67	20
Wanken	0,63 - 11,11	20

Die untersuchten Beschleunigungsamplituden aller Bewegungsrichtungen des jeweiligen im Hintergrundsignal platzierten (und wie zuvor beschrieben mit ± 1 Hz um die jeweils zugrunde liegende Frequenz bandpassgefilterten) Einzelereignisses sind für jedes der drei Schwingungsphänomene in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Tabelle 5.3: Untersuchte Beschleunigungsamplituden des Einzelereignisses

Beschleunigungs- komponente	LS	NI	WA
$a_{Sim,tx}$	1,37 m/s ²	0,25 m/s ²	0,03 m/s ²
$a_{Sim,ty}$	0,01 m/s ²	0,01 m/s ²	0,26 m/s ²
$a_{Sim,tz}$	0,25 m/s ²	0,61 m/s ²	0,34 m/s ²
$a_{Sim,rx}$	0 rad/s ²	0,06 rad/s ²	0,43 rad/s ²
$a_{Sim,ry}$	0,12 rad/s ²	1,1 rad/s ²	0,03 rad/s ²
$a_{Sim,rz}$	0,01 rad/s ²	0 rad/s ²	0,01 rad/s ²

LS: Längsstoßen, NI: Nicken, WA: Wanken

5.2.3 Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen wird je Schwingungsphänomen ein Probandenkollektiv von $n = 12$ (männlichen) Probanden herangezogen. Deren Zusammensetzung ist im Anhang in Abbildung B.1 in Abhängigkeit des Alters, der Körpermasse, der Körpergröße, des Body Mass Indexes (BMI) und des Schwingungsphänomens (SP) dargestellt. Die Mittelwerte (μ) und die Standardabweichungen (SD) sind zusammenfassend in Tabelle 5.4 aufgeführt. Jeder Versuch, d.h. die Präsentation aller Frequenzvariationen eines Schwingungsphänomens auf dem Simulator, findet auf dem mit Messtechnik bestückten Fahrersitz statt. Die Probanden fahren jeden Versuch getrennt voneinander, um eine gegenseitige Beeinflussung bzgl. der Bewertungsabgabe zu vermeiden. Zu Beginn eines jeden Versuches werden dem Proban-

den zwei Messsignale aus Kapitel 4 präsentiert: Eines in dem das jeweilige Schwingungsphänomen im Mittel mit einer Note > 7 beurteilt wurde und eines mit einer mittleren Bewertung von < 3 . Dies soll dem Probanden ermöglichen, sich in der verwendeten Beurteilungsskala zu orientieren.

Tabelle 5.4: Mittelwerte und Standardabweichungen $\mu(SD)$ der Probandenkollktivdaten zu den Frequenzuntersuchungen am Simulator

SP	n	Alter in Jahren	Größe in cm	Masse in kg	BMI in kg/m²
LS	12	39,75 (13,07)	181,92 (6,65)	82,5 (10,22)	24,94 (2,87)
NI	12	39 (13,71)	183,5 (5,69)	81,83 (10,09)	24,33 (2,96)
WA	12	41,67 (12,95)	181,75 (6,23)	83,42 (10,83)	25,29 (3,31)

SP: Schwingungsphänomen, n: Anzahl Probanden

LS: Längsstößen, NI: Nicken, WA: Wanken

Es werden alle Signalvariationen in Form der Frequenzveränderungen in aufsteigender Reihenfolge abgespielt. Auf Wunsch des Probanden konnte das zu bewertende Signal wiederholt werden. Nach jedem Signal findet eine Bewertungsabgabe statt. Dabei gibt der Proband an, ob das wahrgenommene Schwingungsereignis dem zu beurteilenden Schwingungsphänomen entspricht. Wenn dies der Fall ist, findet eine Einordnung der Phänomenstärke in die in Abschnitt 4.2.2 vorgestellte 9-Punkte-Skala statt. Andernfalls wird eine „1“, d.h. „nicht wahrnehmbar“, vergeben.

5.2.4 Analysegrößen

Da Medianwerte im Gegensatz zu Mittelwerten robuster gegen Ausreißer sind [70], werden diese im Folgenden für die Ableitung von Frequenzgewichtungen herangezogen.

Aus dem frequenzabhängigen Vektor $\underline{N}^{SP}(f) = [N_{Prob=1}^{SP}(f), \dots, N_{Prob=n}^{SP}(f)]$, der die einzelnen von den Probanden vergebenen frequenzabhängigen Phänomenstärkenoten $N_{Prob}^{SP}(f)$ des Schwingungsphänomens SP enthält, werden die frequenzabhängigen Medianwerte gebildet. Aus diesen werden mittels Normierung die Gewichtungsfaktoren $G_{Freq}^{SP}(f)$ berechnet:

$$G_{Freq}^{SP}(f) = \frac{\text{Median}(\underline{N}^{SP}(f)) - 1}{\max[\text{Median}(\underline{N}^{SP}(f_{i=1,2,\dots,20}))] - 1} \in [0, 1]. \quad (5.1)$$

Für die Berechnung der Gewichtungsfaktoren werden hier, und auch in den nachfolgenden Untersuchungen dieses Kapitels, keine Notentransformationen nach Gleichung 4.8 vorgenommen. Dies ist darin begründet, dass erstens ein Notenwert von „1“, d.h. „nicht wahrnehmbar“, weiterhin gültig bleiben soll und nicht durch eine Notentransformation verändert werden soll. Dies ist notwendig, um auch Gewichtungsfaktoren von „0“ zu erhalten. Zweitens werden die Bewertungen des Probandenkollektivs durch Medianwerte ausgedrückt, die dann für die Berechnung der Gewichtungsfaktoren verwendet werden. Die Streuung der individuellen Noten findet dementsprechend keine Berücksichtigung, weshalb eine Notentransformation nicht zwingend notwendig ist.

5.2.5 Versuchsergebnisse

In Abbildung 5.7 sind auf der linken Seite die vergebenen Noten für alle drei Schwingungsphänomene in Abhängigkeit der untersuchten Frequenzen als Boxplot dargestellt.

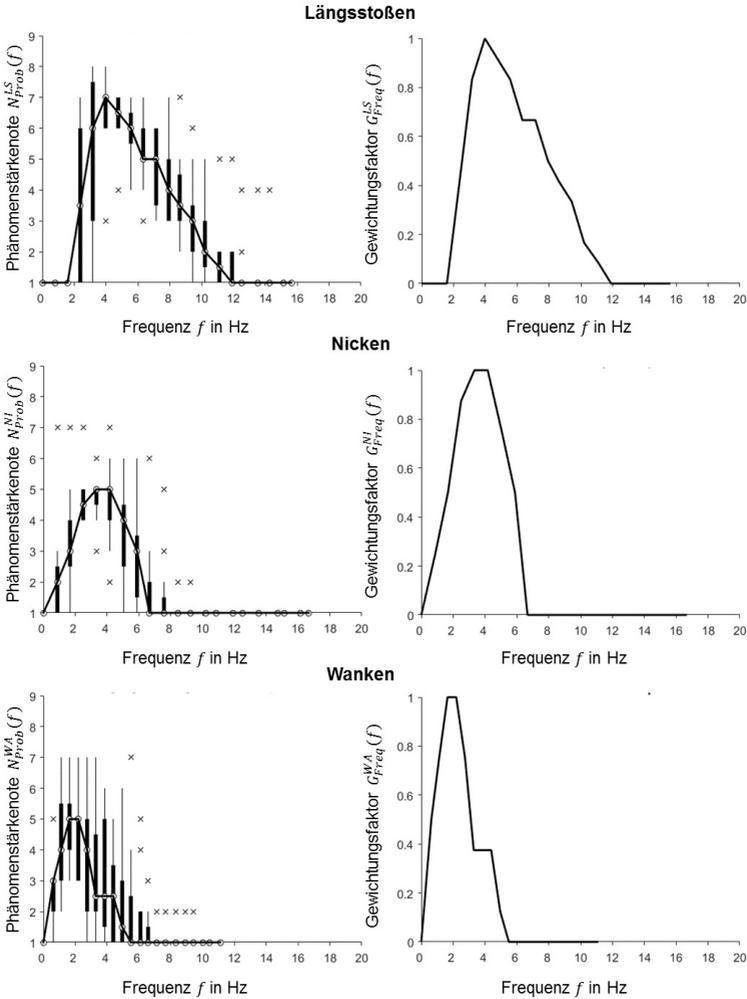


Abbildung 5.7: Links: Boxplots der Phänomenstärkenbewertungen bei variiert Frequenz. Rechts: Frequenzabhängige Gewichtungsfaktoren

Die Enden der dünnen Linien kennzeichnen die minimal und maximal vergebene Note. Die Enden der fetten Linien kennzeichnen das untere und obere

re Quartil. Weiße Kreise symbolisieren die Medianwerte, graue „x“ symbolisieren Ausreißer. Die zugehörigen deskriptiven Statistiken sind im Anhang in den Tabellen B.2 bis B.4 aufgeführt. Die resultierenden Gewichtungskurven sind in Abbildung 5.7 rechts dargestellt.

Mit Hilfe des zweiseitigen Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests [32] werden die vergebenen Noten des Probandenkollektives für jede Frequenzstufe auf einen signifikanten Unterschied zu einer „1“, d.h. „nicht wahrnehmbar“, untersucht. Das Signifikanzniveau ξ wird auf $\xi = 0,05$ festgelegt. Die Ergebnisse sind im Anhang in den Tabellen B.2 bis B.4 aufgeführt. Die schwingungsphänomenabhängigen signifikanten wahrnehmungsrelevanten Frequenzbereiche und die Frequenzen maximaler Wahrnehmungsstärke sind in Tabelle 5.5 aufgeführt. Die hier abgeleiteten Gewichtungskurven $G_{Freq}^{SP}(f)$ werden in Kapitel 6 zur schwingungsphänomenabhängigen Frequenzgewichtung verwendet.

Tabelle 5.5: Zusammenfassende Ergebnisse der Frequenzuntersuchungen

	LS	NI	WA
signifikanter wahrnehmungsrel. Frequenzbereich	2,38 Hz bis 11,11 Hz	0,88 Hz bis 5,88 Hz	0,63 Hz bis 4,95 Hz
Frequenzbereich maximaler Wahrnehmungsstärke	3,97 Hz bis 5,56 Hz	2,5 Hz bis 4,17 Hz	1,12 Hz bis 2,19 Hz

LS: Längsstößen, NI: Nicken, WA: Wanken

5.3 Untersuchungen zur Maskierungswirkung einzelner Schwingungsereignisse

5.3.1 Motivation

Aus der Psychoakustik ist bekannt, dass ein Ton bestimmten Schalldruckpegels und begrenzter Zeitdauer eine Auswirkung auf die Wahrnehmung

eines zeitlich begrenzten und wesentlich kürzeren zweiten Tons (Testton) hat, der gleichzeitig oder zeitlich verschoben zum ersten Ton (Maskierungston) auftritt [33]. Der Testton wird durch den Einfluss des Maskierungstons schwächer wahrgenommen. Es tritt ein Maskierungseffekt auf, der sowohl vom zeitlichen Abstand beider Töne als auch von deren Schalldruckpegeln abhängt. Dieser Effekt ist in Abbildung 5.8 dargestellt und wird nachfolgend anhand [33] erläutert.

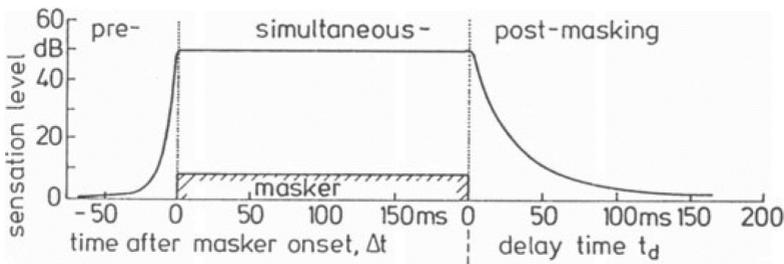


Abbildung 5.8: Schematische Darstellung der Maskierungswirkung eines Tons bestimmten Schalldruckpegels mit den drei Maskierungsbereichen „Vormaskierung“, „Simultanmaskierung“ und „Nachmaskierung“ aus [33]

In der Abbildung ist ein 200 ms andauernder Maskierungston („masker“) eines bestimmten Schalldruckpegels definiert und als schraffierter Bereich eingezeichnet. Der Beginn des Maskierungstons bildet den Nullpunkt der zeitlichen Achse bezüglich Δt . Ein im Vergleich zum Maskierungston kurzer Testton wird im zeitlichen Abstand von Δt nach Beginn des Maskierungstons abgespielt und dessen Schalldruckpegel aufgetragen, bei dem dieser noch gerade wahrnehmbar ist (in der Abbildung mit „sensation level“ bezeichnet). Der zeitliche Abstand Δt variiert von unter -50 ms (dies entspricht einer Platzierung des Testtons vor dem Maskierungston) bis zu 200 ms. Bei 200 ms wird ein neuer Nullpunkt bezüglich t_d definiert. Er kennzeichnet das Ende des Maskierungstons. Ab hier wird der Testton zeit-

lich weiter bis $t_d > 150$ ms verschoben und wieder der zur Wahrnehmung nötige Schalldruckpegel des Testtons aufgetragen.

In der Abbildung 5.8 sind drei Maskierungsbereiche dargestellt. Der Bereich der „Vormaskierung“ („pre-masking“) zeigt auf, dass ein zeitlich nach dem Testton auftretender Maskierungston eine maskierende Wirkung auf die Wahrnehmung des Testtons hat. Der für die Wahrnehmung erforderliche Schalldruckpegel des Testtons nimmt mit betragsmäßig sinkendem zeitlichen Abstand Δt zu. Im Anschluss folgt der Bereich der „Simultanmaskierung“ („simultaneous-masking“). Hier tritt der Testton gleichzeitig zum Maskierungston auf, und die Maskierungswirkung ist am größten. Daher muss der Schalldruckpegel hier am größten sein, um den Testton noch wahrzunehmen. Ab $t_d = 0$ beginnt die Phase der „Nachmaskierung“ („post-masking“), d.h. der Maskierungston tritt vor dem Testton auf. Hier sinkt der Maskierungseffekt mit zunehmendem zeitlichen Abstand des Testtons vom vorangegangenen Maskierungston.

Die Stärke der maskierenden Wirkung hängt in der Psychoakustik bei einem vorgegebenen Schalldruckpegel des Testtons von folgenden Faktoren ab:

- Zeitlicher Abstand zwischen Maskierungston und Testton: Mit zunehmendem zeitlichen Abstand nimmt die Maskierungswirkung ab [135], [30], [31], [132], [60], [134],[73], [40], [99].
- Dauer des Maskierungstons [135], [30], [31], [133], [99]: Die Maskierungswirkung nimmt mit der Dauer der Maskierung zu [100], [65].
- Stärke des Maskierungssignals: Mit zunehmender Stärke des Maskierungssignals nimmt die Maskierungswirkung zu [60], [65], [99].
- Frequenzlage des Maskierungs- und Testtons: Die Maskierungseigenschaften sind abhängig von der Frequenzlage des Maskierungstons im Vergleich zur Frequenzlage des Testtons [30], [31], [132], [84], [60].
- Dauer des Testtons [30], [31], [132]: Die Maskierungswirkung nimmt mit zunehmender Dauer des Testtons ab [28].

5.3.2 Zielsetzung

Mit Hilfe der Untersuchungen auf dem Ride Simulator soll herausgefunden werden, inwieweit ein aus der Psychoakustik bekannter zeitlich abhängiger Maskierungseffekt auch bei rein fühlbaren mechanischen Schwingungen auftritt, im Speziellen für die drei betrachteten Schwingungsphänomene. Aus der gesichteten Literatur sind dem Autor keine vergleichbaren Untersuchungen bezogen auf Ganzkörperschwingungen bekannt. Die einzigen bekannten Untersuchungen beziehen sich auf gleichzeitig stattfindene Test- und Maskierungssignale (vgl. Abschnitt 3.1.6).

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden nicht nur die Wahrnehmungsstärke abschwächende Effekte, sondern auch verstärkende Effekte unter dem Begriff „Maskierungseffekt“ zusammengefasst.

Während einer Fahrt im Fahrzeug treten Schwingungen unterschiedlichster Bewegungsrichtungen, Amplituden und Frequenzen auf. Betrachtet man eine Schwingung einer Bewegungsrichtung als eine Reihe aufeinanderfolgender, einzelner Schwingungsereignisse, so ist nicht bekannt, wie sich die zu einem bestimmten Zeitpunkt t_0 vorangegangenen einzelnen Schwingungsereignisse (Maskierungsereignisse) auf die Wahrnehmungsstärke des Schwingungsereignisses zum Zeitpunkt t_0 (Referenzereignis) auswirken. Dies gilt genauso für den Einfluss von Maskierungsereignissen anderer Bewegungsrichtungen auf die Wahrnehmung des Referenzereignisses. Dies ist qualitativ zur Verdeutlichung in Abbildung 5.9 dargestellt.

Zielsetzung der nachfolgenden Untersuchungen ist dementsprechend die Bestimmung von zeit-, bewegungsrichtungs-, amplituden- und frequenzabhängigen Kurven zur Gewichtung der Wahrnehmungsstärke eines bestimmten Schwingungsereignisses (Referenzereignis) bei gleichzeitigem oder zeitlich versetzt auftretendem Maskierungsereignis.

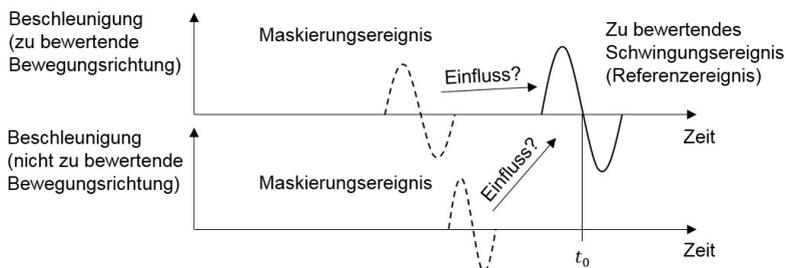


Abbildung 5.9: Qualitative Darstellung des Untersuchungsziels zur Maskierung von Schwingungsereignissen

5.3.3 Vorgehensweise

Im Unterschied zu der in Abbildung 5.8 beschriebenen akustischen Untersuchung, bei der eine andauernde Maskierungssequenz verwendet wurde, wird hier die Auswirkung eines einzelnen Schwingungsereignisses (Maskierungsereignis) auf die Bewertung eines zweiten Einzelereignisses (Referenzereignis) untersucht.

Zu diesem Zweck wird analog zu Abschnitt 5.2.2 ein einzelnes isoliertes Schwingungsphänomenereignis als Referenzereignis, z.B. ein isolierter „Längsstoß“, zum Zeitpunkt t_0 inklusive aller Schwingungskomponenten in das in Abschnitt 5.2.2 vorgestellte Hintergrundsignal platziert. Die verwendeten Amplituden aller Beschleunigungskomponenten des jeweiligen Referenzereignisses sind für die untersuchten Schwingungsphänomene in Tabelle 5.6 dargestellt. Die verwendeten Frequenzen der Referenzereignisse f_{Ref} resultieren aus gemessenen Fahrzeugreaktionen und bleiben für jedes Schwingungsphänomen jeweils konstant. Die Frequenzen stimmen daher nicht zwangsläufig mit denjenigen Frequenzen überein, die zu den Maxima der Gewichtungskurven in Abbildung 5.7 gehören. Sie fallen aber in den signifikanten, wahrnehmungsrelevanten Frequenzbereich (vgl. Tabelle 5.5). Beim „Nicken“ wird die Frequenz anhand der gemessenen Nickbewegung des Fahrerhauses beim Durchfahren einer Senke bestimmt.

Tabelle 5.6: Schwingungsphänomenabhängige Amplituden der Beschleunigungs-komponenten des Referenzereignisses

Beschleunigungs-komponente	LS	NI	WA
$a_{Sim,tx}$	1,26 m/s ²	0,49 m/s ²	0,06 m/s ²
$a_{Sim,ty}$	0,08 m/s ²	0,05 m/s ²	0,3 m/s ²
$a_{Sim,tz}$	0,59 m/s ²	1,18 m/s ²	0,4 m/s ²
$a_{Sim,rx}$	0,12 rad/s ²	0,14 rad/s ²	0,51 rad/s ²
$a_{Sim,ry}$	0,43 rad/s ²	1,07 rad/s ²	0,04 rad/s ²
$a_{Sim,rz}$	0,05 rad/s ²	0,03 rad/s ²	0,01 rad/s ²

LS: Längsstößen, NI: Nicken, WA: Wanken

Die so bestimmte Frequenz hat einen Wert von 1,3 Hz. Beim „Wanken“ wird entsprechend eine Frequenz von 1 Hz bestimmt, die beim Überfahren einer einseitigen Unebenheit auftritt. Die Frequenz des „Längsstoßes“ wird anhand der Fahrzeugreaktion auf Bahn 9 des EVZ mit 4,5 Hz bestimmt. Das Gesamtsignal, bestehend aus allen sechs bewegungsrichtungsabhängigen Beschleunigungskomponenten des Hintergrundsignals und des darin platzierten Referenzereignisses, wird im Folgenden mit Referenzsignal bezeichnet. Dieses ist beispielhaft für das „Nicken“ im oberen Teil der Abbildung 5.10 dargestellt. Die Amplitude des Referenzereignisses in der Hauptbewegungsrichtung $A_{Ref,HBR}$ entspricht beim „Nicken“ der Amplitude von $a_{Sim,ry}$.

Um die Wirkung von Maskierungseffekten zu analysieren, werden dem jeweiligen Referenzsignal unterschiedliche Variantensignale gegenübergestellt. Die Variantensignale bestehen aus dem Referenzsignal und einem zusätzlich überlagerten Maskierungsereignis. Dieses wird, wie im unteren Teil der Abbildung 5.10 dargestellt, in einem zeitlichen Abstand Δt vor das Referenzereignis platziert und mit der bereits aus dem Referenzsignal vorhandenen Beschleunigung überlagert.

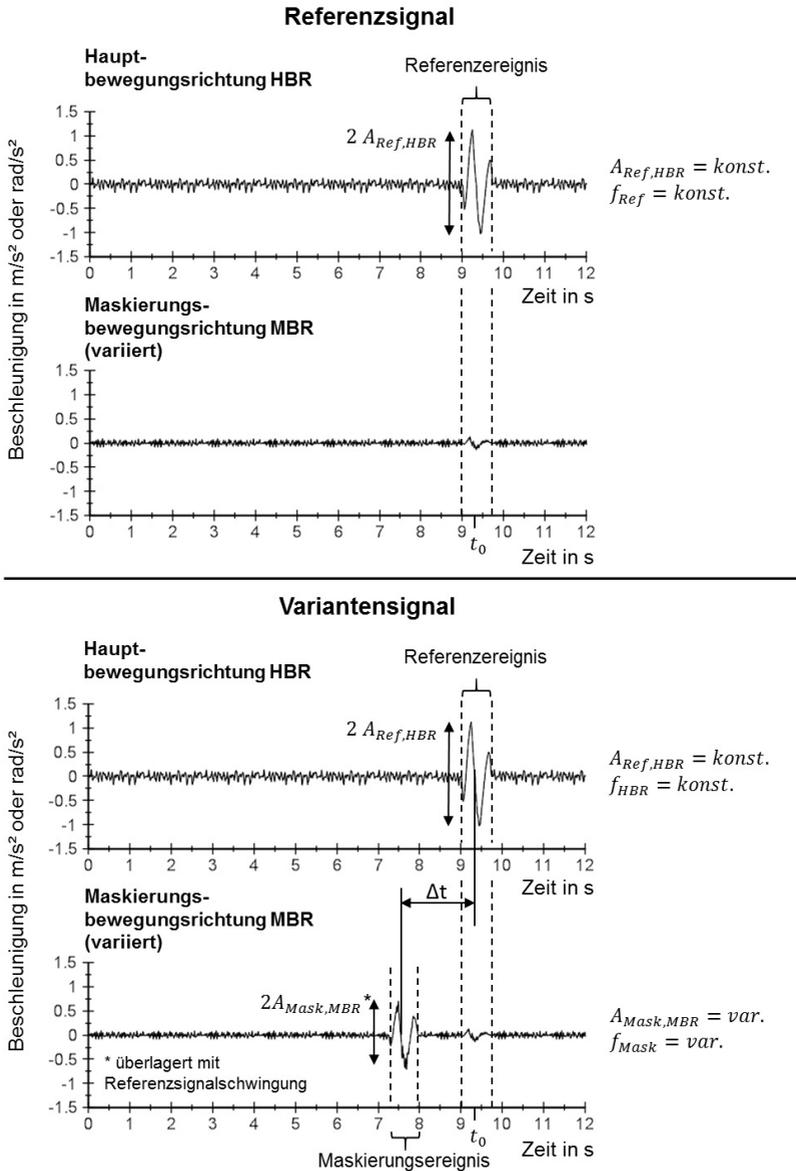


Abbildung 5.10: Darstellung des Referenzsignals und eines Variantensignals am Beispiel des „Nickens“

Δt misst den zeitlichen Abstand von Maskierungsereignismitte zu Referenzereignismitte t_0 . Die Frequenz des Maskierungsereignisses f_{Mask} wird bei den niederfrequenten Schwingungsphänomenen „Nicken“ und „Wanken“ mit derselben Frequenz wie das Referenzereignis festgelegt. Beim höherfrequenten „Längsstößen“ dagegen wird die Frequenz in zwei Stufen variiert. Die erste Frequenzstufe entspricht der Frequenz eines „Längsstoßes“ bei ca. 4,5 Hz, die zweite Stufe entspricht einem niederfrequenten Ereignis bei ca. 2 Hz. Das Maskierungsereignis enthält nur eine Beschleunigungskomponente in der Bewegungsrichtung des Maskierungsereignisses MBR . Der zeitliche Abstand Δt , die MBR sowie dessen Beschleunigungsamplitude $A_{Mask,MBR}$ werden für jedes der Schwingungsphänomene variiert.

Die Variationsstufen jedes Parameters sind beispielhaft für das „Nicken“ in Tabelle 5.7 aufgeführt, sodass sich 144 (6x4x6x1) Variantensignale ergeben. Die Amplituden sind hier als Vielfaches der Beschleunigungsamplitude der Hauptbewegungsrichtung $A_{Ref,HBR}$ angegeben und variieren daher je nach Bewegungsrichtung zwischen den Einheiten m/s^2 und rad/s^2 . Die Vorzeichen der MBR zeigen die Bewegungsreihenfolge an. Dabei bedeutet beispielsweise $+tx$ eine zuerst erfolgende Bewegung in positive tx-Richtung und eine anschließende Bewegung zurück zur Ausgangsposition in negative tx-Richtung. Eine umgekehrte Bewegungsreihenfolge ist mit einem „-“ gekennzeichnet. Eine Übersicht der Parameterstufen des „Längsstoßes“ und des „Wankens“ ist im Anhang in den Tabellen B.5 bis B.7 zu finden.

5.3.4 Versuchsdurchführung

Die Versuche, in denen Referenz- und Variantensignal verglichen werden, werden mit dem Probandenkollektiv aus Abschnitt 5.2.3 durchgeführt (vgl. Tabelle 5.4). Die 144 Versuche je Schwingungsphänomen gliedern sich in sechs Versuchsblöcke mit jeweils 24 Einzelversuchen, welche mit jedem Probanden durchgeführt werden. Beim „Längsstößen“ ergeben sich auf Grund der zwei Frequenzstufen des Maskierungsereignisses die doppelte

Tabelle 5.7: Variationsstufen der Maskierungsparameter beim „Nicken“

Δt in s	$A_{Mask,MBR}$	MBR	f_{Mask} in Hz
0	$0,5A_{Ref,HBR}$	$+tx$	1,3
0,186	$1A_{Ref,HBR}$	$+ty$	
0,372	$2A_{Ref,HBR}$	$-tz$	
0,744	$3A_{Ref,HBR}$	$+rx$	
1,244		$+ry$	
1,744		$+rz$	

Anzahl an Versuchen. Die Versuchsreihenfolge ist im Anhang in den Tabellen B.8 bis B.13 aufgeführt.

Zu Beginn eines jeden Versuchsblockes wird den Probanden zur Orientierung in der Bewertungsskala das Referenzsignal jeweils mit doppelter Amplitude des Referenzereignisses und mit einer viertel Amplitude des Referenzereignisses präsentiert. Dies entspricht Signalen mit einem stark und schwach wahrnehmbaren Schwingungsphänomenereignis aus den Fahrversuchen in Kapitel 4. Die Einzelversuche werden dann in Form von zu bewertenden Signalpaaren durchgeführt. Das heißt, jeder Proband bekommt zuerst das Referenzsignal präsentiert, welches das im Hintergrundsignal eingebettete Referenzereignis enthält. Nach einer dreisekündigen Pause wird ein Variantensignal, bestehend aus dem in das Hintergrundsignal eingebettete Referenz- und Maskierungsereignis (vgl. Abbildung 5.10), präsentiert. Auf Wunsch des Probanden kann die zu bewertende Signalpaarung wiederholt werden. Im Anschluss erfolgt die Bewertung der wahrgenommenen Phänomenstärke des Referenzereignisses jeweils für das Referenz- und Variantensignal anhand der 9-Punkte-Skala aus Abschnitt 4.2.2.

5.3.5 Analysegrößen

Um zu untersuchen, wie sich die Phänomenstärkennoten bei Variation des Maskierungsreizes verändern, wird im Folgenden, motiviert durch den Ansatz von Weber (vgl. Gleichung 2.1 aus Abschnitt 2.3.3), ein relativer Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ definiert:

$$RRZW_{MBR} = \frac{A_{Mask,MBR}}{A_{Ref,HBR}}. \quad (5.2)$$

Im Unterschied zum Ansatz von Weber werden im $RRZW_{MBR}$ keine ebenmerklichen Änderungen eines Reizes auf den Absolutwert des Reizes bezogen. Stattdessen bezieht der $RRZW_{MBR}$ die Amplitude des (hinzugefügten) Maskierungsereignisses in der Maskierungsbewegungsrichtung $A_{Mask,MBR}$ auf die vorhandene Amplitude in der Hauptbewegungsrichtung des Referenzereignisses $A_{Ref,HBR}$. Dabei stimmen HBR und MBR nicht immer überein, das heißt die Reize können (im Gegensatz zum Ansatz von Weber) aus unterschiedlichen Bewegungsrichtungen kommen. Des Weiteren stellt $A_{Mask,MBR}$ nur die Amplitude des hinzugefügten Signalanteils und nicht zwangsläufig einen ebenmerklichen Unterschied bzgl. des vorhandenen Referenzereignisses dar. Die Referenz bezüglich der Hauptbewegungsrichtung wurde gewählt, weil die untersuchten Schwingungsphänomene nur durch das Vorhandensein der Hauptbewegungskomponente existieren können (vgl. Abschnitt 2.4) und somit ein objektiver Bezug zum jeweiligen Schwingungsphänomen hergestellt wird.

Für jedes Schwingungsphänomen SP wird nachfolgend die Auswirkung des Maskierungsereignisses auf die Wahrnehmung des Referenzereignisses durch einen Maskierungsfaktor $G_{Mask,MBR}^{SP}(f_{Ref}, f_{Mask}, RRZW_{MBR}, \Delta t)$ ausgedrückt. Dieser hängt für definierte Frequenzen des Referenz- und Maskierungsereignisses f_{Ref} und f_{Mask} von MBR , von Δt und von $RRZW_{MBR}$ ab. Für eine abkürzende Notation werden die genannten Abhängigkeiten im Folgenden nur noch durch „(...)“ ausgedrückt.

Der Maskierungsfaktor $G_{Mask,MBR}^{SP}(\dots)$ wird durch Medianbildung aus den probandenspezifischen Maskierungsfaktoren $G_{Mask,MBR,Prob}^{SP}(\dots)$ berechnet. Letztere beschreiben vereinfacht gesprochen für jeden Probanden die Relation zwischen der vergebenen Note für das Referenzereignis unter dem Einfluss des Maskierungsereignisses und der vergebenen Note für das Referenzereignis ohne Einfluss des Maskierungsereignisses.

$G_{Mask,MBR,Prob}^{SP}(\dots)$ berechnet sich für jeden Probanden nach Gleichung 5.3 aus den Phänomenstärkennoten des Referenzereignisses im Variantensignal $N_{Mask,MBR,Prob}^{SP}(\dots)$ und des Referenzereignisses im Referenzsignal $N_{Ref,Prob}^{SP}$. Da das Referenzereignis im Referenzsignal auf Grund des Versuchsdesigns immer wahrnehmbar ist, gilt $N_{Ref,Prob}^{SP} > 1$.

$$G_{Mask,MBR,Prob}^{SP}(\dots) = \frac{N_{Mask,MBR,Prob}^{SP}(\dots) - 1}{N_{Ref,Prob}^{SP} - 1} \quad (5.3)$$

$$\underline{G}_{Mask,MBR}^{SP}(\dots) = \begin{bmatrix} G_{Mask,MBR,1}^{SP}(\dots) \\ G_{Mask,MBR,2}^{SP}(\dots) \\ \vdots \\ G_{Mask,MBR,11}^{SP}(\dots) \\ G_{Mask,MBR,12}^{SP}(\dots) \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$G_{Mask,MBR}^{SP}(\dots) = \text{Median}(\underline{G}_{Mask,MBR}^{SP}(\dots)) \cdot \quad (5.5)$$

Werte des Maskierungsfaktors <1 entsprechen einer maskierenden Wirkung. Diese ist umso größer, je geringer der Wert des Maskierungsfaktors ist. Werte >1 zeigen eine verstärkende Wirkung.

5.3.6 Versuchsergebnisse

In den nachfolgenden Auswertungen wird der Maskierungsfaktor $G_{Mask,MBR}^{SP}(\dots)$ für die festgelegten Frequenzen f_{Ref} und f_{Mask} in Abhängigkeit des untersuchten Zeitabstandes Δt und der untersuchten

relativen Reizzuwächse $RRZW_{MBR}$ aufgetragen. Die Darstellungen dieser Verläufe sind für jedes Schwingungsphänomen SP nach den Maskierungsbewegungsrichtungen MBR aufgeteilt. Um die Maskierungsfaktoren hinsichtlich signifikanter Unterschiede zur mit „1“ definierten Referenzsignalgewichtung zu untersuchen, wird für jeden Auswertepunkt ein Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test angewandt und $\xi = 0,05$ festgelegt. Die detaillierten Ergebnisse sind im Anhang in den Tabellen B.14 bis B.17 aufgeführt.

In den folgenden Abbildungen sind signifikante Maskierungsfaktoren durch eine schwarz ausgefüllte Markierung gekennzeichnet. Nicht signifikante sind mit einer weißen Füllung markiert. Der mit „1“ definierte Maskierungsfaktorverlauf des Referenzsignals ist mit einer fetten, schwarzen Linie dargestellt und hat den Legendeneintrag $RRZW_{MBR} = 0$.

Längsstößen

In den Abbildungen 5.11 und 5.12 ist das Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots)$ für das „Längsstößen“ (LS) bei niederfrequenten Maskierungsereignissen mit einer Frequenz von $f_{Mask} = 2\text{ Hz}$ dargestellt (siehe hierzu auch [24]). Für höherfrequente Maskierungsereignisse mit $f_{Mask} = 4,5\text{ Hz}$ ist dies in den Abbildungen 5.13 und 5.14 dargestellt. Die zugehörigen $RRZW_{MBR}$ Werte sind in den Legenden aufgetragen.

Es ist zu erkennen, dass sowohl 2 Hz als auch 4,5 Hz Maskierungsereignisse eine Auswirkung auf die Bewertung eines „Längsstoßes“ haben. Für die niederfrequenten Maskierungsereignisse der Maskierungsbewegungsrichtungen $+ty$, $+rx$, $+ry$ und $+rz$ gilt: Je größer der relative Reizzuwachs in der Maskierungsbewegungsrichtung ist und je geringer der zeitliche Abstand des Maskierungsereignisses zum Referenzereignis ist, umso stärker ist die Auswirkung des Maskierungsereignisses auf die Bewertung des Referenzereignisses.

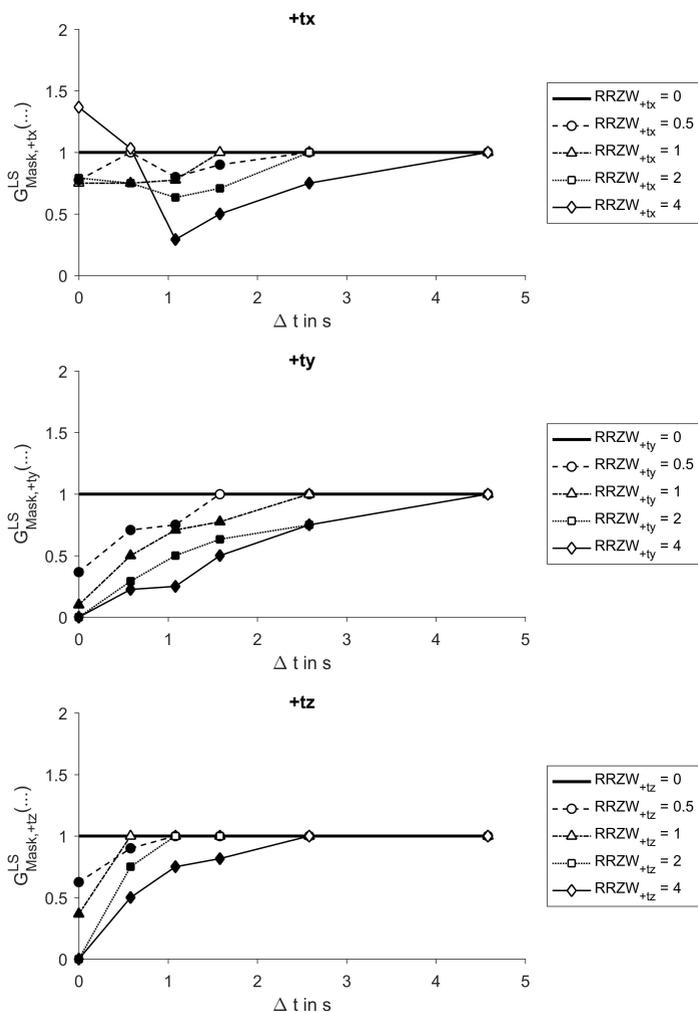


Abbildung 5.11: Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots)$ für translatorische Maskierungsereignisse ($f_{Mask} = 2\text{Hz}$) bzgl. der Bewertung eines „Längsstoßes“ ($f_{Ref} = 4,5\text{Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiertes Maskierungsbewegungsrichtung MBR

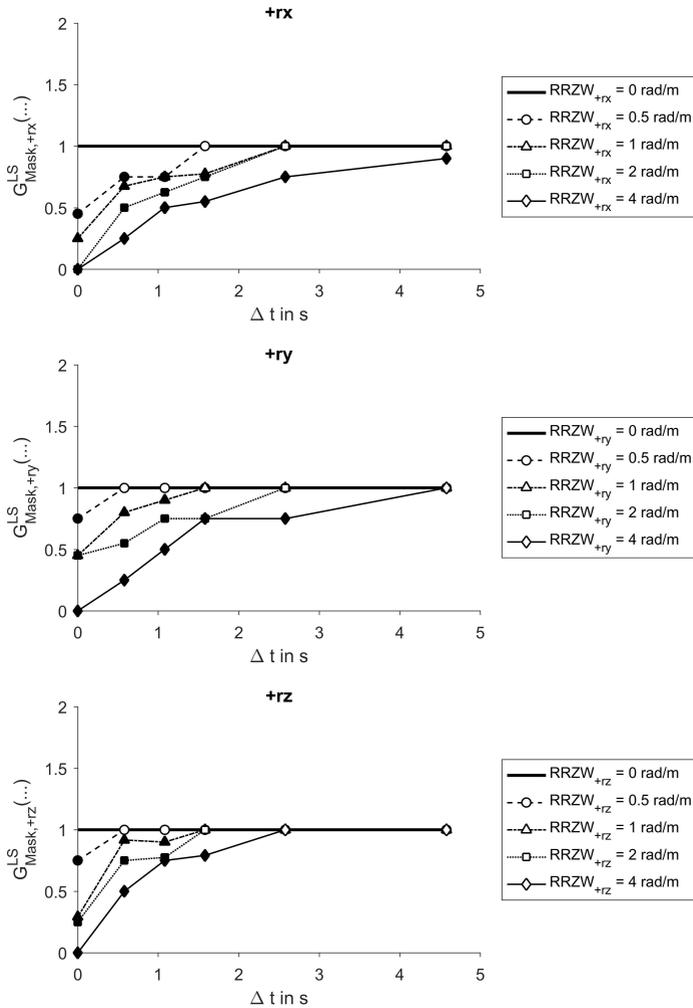


Abbildung 5.12: Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots)$ für Rotationsmaskierungsereignisse ($f_{Mask} = 2\text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung eines „Längsstoßes“ ($f_{Ref} = 4,5\text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiertes Maskierungsbewegungsrichtung MBR

Des Weiteren zeigt sich für die Maskierungsbewegungsrichtungen $+ty$, $+rx$, $+ry$ und $+rz$ eine zeitliche Zunahme der Maskierungswirkung mit steigendem relativen Reizzuwachs. Beispielsweise erreicht $G_{Mask,+ty}^{LS}(4,5\text{Hz}, 2\text{Hz}, 0,5, \Delta t)$ den Wert „1“ bei $\Delta t = 1,5825\text{s}$ und $G_{Mask,+ty}^{LS}(4,5\text{Hz}, 2\text{Hz}, 4, \Delta t)$ den Wert „1“ erst bei $\Delta t = 4,5825\text{s}$. Für $+tz$ gelten die oben genannten Verhaltensweisen ebenfalls, bis auf eine Ausnahme für $RRZW_{+tz} = 1$. Alle $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots) \neq 1$ sind bei den fünf Maskierungsbewegungsrichtungen bzgl. $\xi = 0,05$ signifikant.

Die größte Maskierungswirkung tritt somit für alle fünf Bewegungsrichtungen bei einer direkten Überlagerung des Referenzereignisses durch das Maskierungsereignis auf. Hier zeigt sich bei allen genannten Bewegungsrichtungen eine vollständige Maskierung des „Längsstoßens“.

Die Hauptbewegungsrichtung des „Längsstoßens“ $+tx$ zeigt im Vergleich zu den übrigen Bewegungsrichtungen ein abweichendes Verhalten. Die ersten drei Reizzuwachsstufen ($RRZW_{+tx} = 0,5; 1; 2$) maskieren das Referenzereignis im Vergleich zu den restlichen Maskierungsbewegungsrichtungen nur schwach. Die stärkste Reizzuwachsstufe $RRZW_{+tx} = 4$ führt bei einer direkten Überlagerung des Referenzereignisses zu einer verstärkenden Wirkung. Diese ist bzgl. $\xi = 0,05$ allerdings nicht signifikant. Ab $\Delta t \approx 1\text{s}$ entsteht dagegen eine signifikante Maskierungswirkung, die mit zunehmendem zeitlichen Abstand abnimmt.

In den Abbildungen 5.13 und 5.14 ist das Maskierungsverhalten der höherfrequenten Maskierungsereignisse dargestellt. Es fällt je nach Maskierungsbewegungsrichtung unterschiedlich aus.

Die Hauptbewegungsrichtung $+tx$ weist für $\Delta t = 0\text{s}$ mit steigendem relativen Reizzuwachs eine zunehmende Verstärkung des „Längsstoßens“ auf. Für die größten drei Reizzuwachsstufen ergeben sich dabei signifikante Unterschiede zu $RRZW_{+tx} = 0$. Bei direkt aufeinanderfolgenden „Längsstößen“ ($\Delta t = 0,265\text{s}$) ist ebenfalls eine verstärkende Wirkung zu erkennen. Diese ist allerdings nicht signifikant. Hier konnten die Probanden die zwei „Längsstöße“ nur zum Teil auseinander halten.

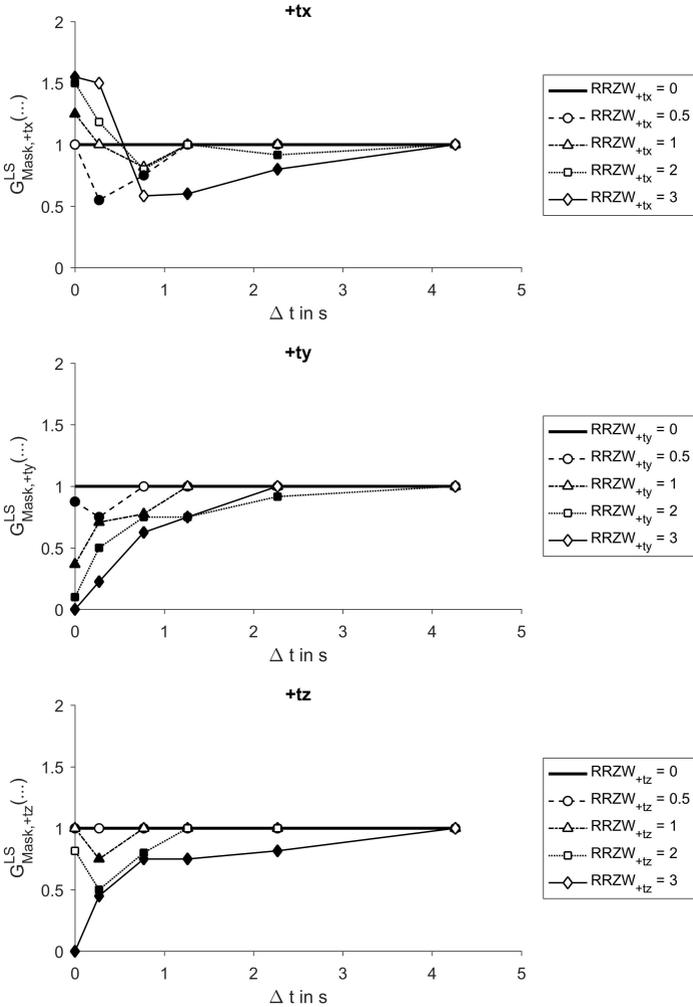


Abbildung 5.13: Verhalten des Maskierungsfaktors $G^L_{S, Mask, MBR}(\dots)$ für translatorische Maskierungsereignisse ($f_{Mask} = 4,5 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung eines „Längsstoßes“ ($f_{Ref} = 4,5 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiertem Maskierungsbewegungsrichtung MBR

5.3 Untersuchungen zur Maskierungswirkung einzelner Schwingungsereignisse

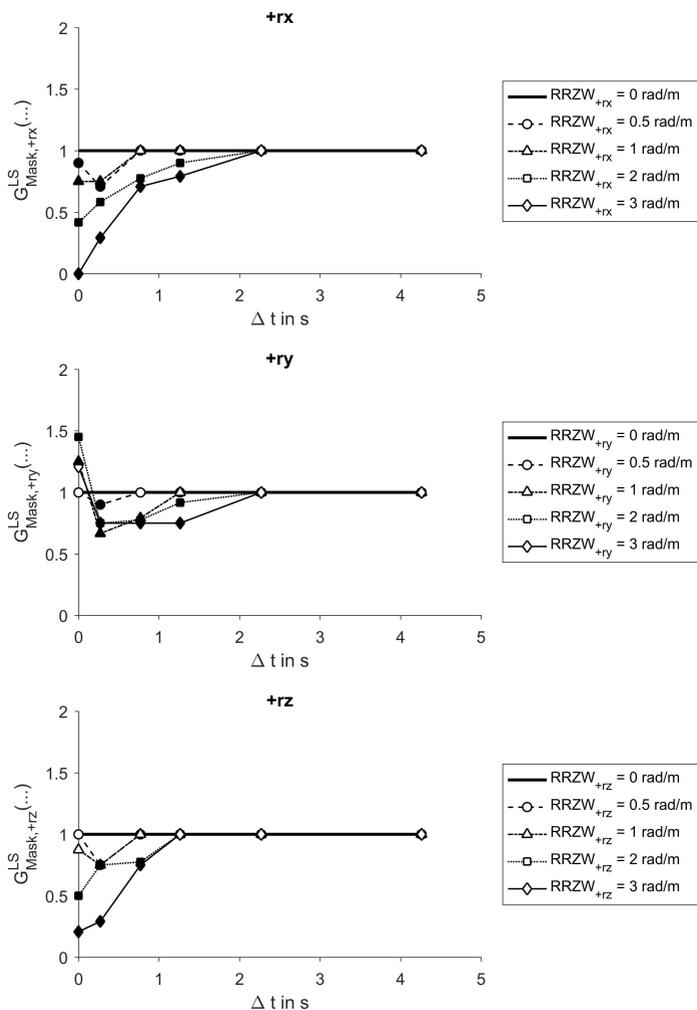


Abbildung 5.14: Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots)$ für Rotationsmaskierungsereignisse ($f_{Mask} = 4,5\text{Hz}$) bzgl. der Bewertung eines „Längsstoßes“ ($f_{Ref} = 4,5\text{Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsrichtung MBR

Für $\Delta t > 0,265$ s stellt sich eine maskierende Wirkung ein. Für die Maskierungsbewegungsrichtung $+ry$ ergibt sich ebenfalls eine verstärkende Wirkung bei $\Delta t = 0$ s. Diese ist für die größten beiden Reizzuwachsstufen signifikant. Mit zunehmendem Δt stellt sich dagegen eine maskierende Wirkung ein.

Für die übrigen Maskierungsbewegungsrichtungen ergeben sich durchgehend maskierende Wirkungen. Diese nehmen für die geringen Reizzuwächse mit einem steigenden zeitlichen Abstand Δt erst zu und dann ab.

Die stärksten Reizzuwächse weisen ein durchgehend abnehmendes Maskierungsverhalten mit zunehmendem Δt auf. Ab $\Delta t = 0,265$ s gilt: Je kleiner Δt und je größer der relative Reizzuwachs ist, umso größer ist die maskierende Wirkung. Für die jeweils größte Reizzuwachsstufe wird der „Längsstoß“ bei $+ty$, $+tz$ und $+rx$ vollständig maskiert. Zusätzlich zeigt sich für die Maskierungsbewegungsrichtungen $+ty$, $+tz$, $+ry$ und $+rz$ eine zunehmende Dauer der Maskierungswirkung mit steigendem relativen Reizzuwachs.

Nicken

Die Verläufe der Maskierungsfaktoren $G_{Mask,MBR}^{NI}(\dots)$ für das „Nicken“ (NI) sind in den Abbildungen 5.15 und 5.16 dargestellt. Sie unterscheiden sich für jede Maskierungsbewegungsrichtung und verlaufen zumeist nicht monoton. Im Gegensatz zum „Längsstoßen“ wurde beim „Nicken“ auf die Versuchsreihe bei einem zeitlichen Abstand von $\Delta t \approx 4$ s verzichtet, da Vorversuche ergeben haben, dass keine signifikanten Bewertungsunterschiede zwischen Varianten- und Referenzsignal auftreten. Stattdessen wurden die sechs untersuchten Zeitabstände bis maximal $\Delta t = 1,744$ s durchgeführt.

Die Maskierungsfaktoren der Hauptbewegungsrichtung $+ry$ weisen für die stärksten drei Reizzuwachsstufen in $\Delta t = 0$ s eine signifikant verstärkende Wirkung auf. Der Maskierungsfaktor fällt in $+ry$ bei allen Reizzuwachsstufen bei einem zeitlichen Abstand von $\Delta t = 0,186$ s mit signifikanten Werten in einen Bereich < 1 .

5.3 Untersuchungen zur Maskierungswirkung einzelner Schwingungsereignisse

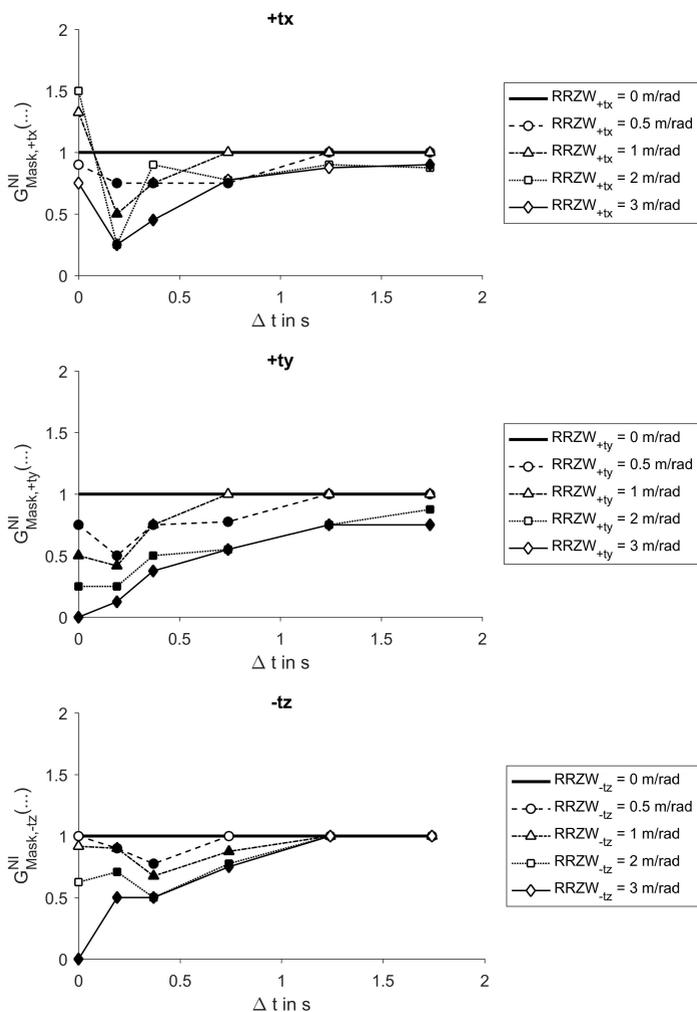


Abbildung 5.15: Verlauf des Maskierungsfaktors $G_{Mask.MBR}^{NI}(\dots)$ für translatorische Maskierungsereignisse ($f_{Mask} = 1,3\text{Hz}$) bzgl. der Bewertung des „Nickens“ ($f_{Ref} = 1,3\text{Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbe-
wegungsrichtung MBR

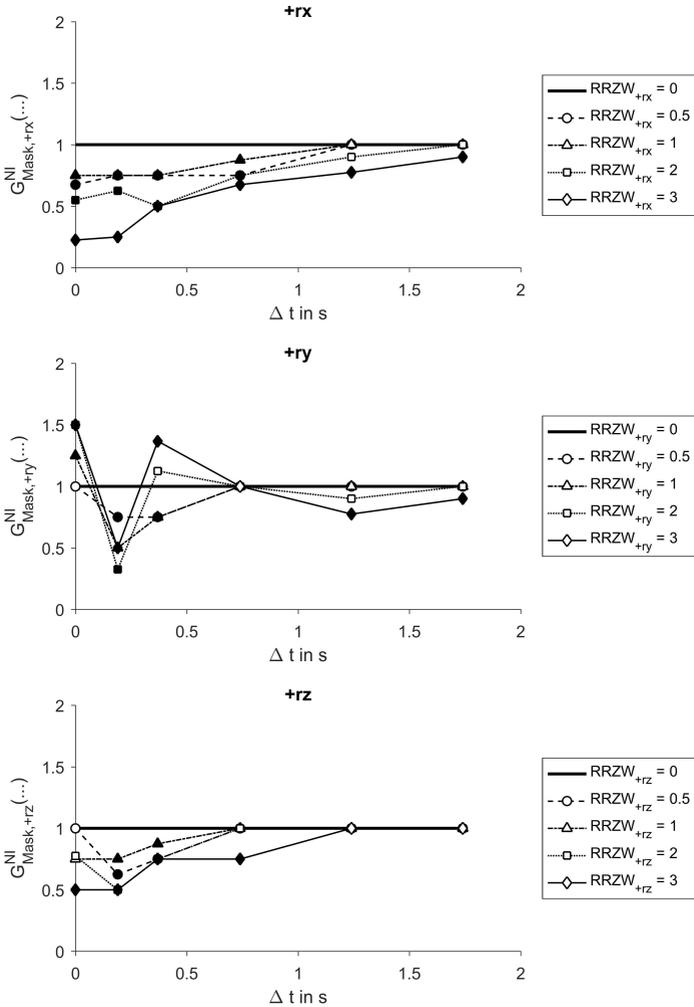


Abbildung 5.16: Verlauf des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{NI}(\dots)$ für Rotationsmaskierungsereignisse ($f_{Mask} = 1,3 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung des „Nickens“ ($f_{Ref} = 1,3 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiertes Maskierungsbewegungsrichtung MBR

Dies resultiert aus dem mit sich selbst überlagertem, phasenverschobenen Ereignis in der Hauptbewegungsrichtung. Bei einem relativen Reizzuwachs von $RRZW_{+ry} = 1$ und $\Delta t = 0,372$ s hebt sich das Referenzereignis in der Hauptbewegungsrichtung in einer Hälfte der Schwingungsperiode auf. Der nicht aufgehobene Teil der Schwingungsperiode des Referenzereignisses in Kombination mit der nicht aufgehobenen Hälfte der Schwingungsperiode des Maskierungsereignisses führen zu Bewertungen, die zu einem nicht signifikanten Maskierungsfaktor > 0 führen. Ein relativer Reizzuwachs von 0,5 führt ebenfalls zu einem Maskierungsfaktor < 1 .

Für relative Reizzuwächse > 1 ergeben sich verstärkende Wirkungen, d.h. die Maskierungsfaktoren sind > 1 . Bei weiter wachsendem Δt der Maskierungsbewegungsrichtung $+ry$ ergeben sich bis auf die letzten beiden Werte des größten Reizzuwachses keine signifikanten Maskierungsfaktoren.

Neben $+ry$ weist auch die Maskierungsbewegungsrichtung $+tx$ für die mittleren beiden Reizzuwachsstufen eine verstärkende Wirkung bei $\Delta t = 0$ s, d.h. einer direkten Überlagerung, auf. Diese ist jedoch nicht signifikant. Hier konnten die Probanden nicht klar zwischen einer Rotationsbewegung um die y-Achse und einer translatorischen Bewegung in x-Richtung unterscheiden. Für Zeitabstände $\Delta t > 0$ s treten hingegen signifikante Maskierungsfaktoren auf, wobei die maskierende Wirkung mit zeitlich zunehmendem Abstand geringer wird. Die übrigen Maskierungsbewegungsrichtungen weisen durchgehend maskierendes oder neutrales Verhalten auf. Tendenziell nimmt das maskierende Verhalten für $\Delta t > 0$ s mit zunehmendem Reizzuwachs und abnehmendem Δt zu. Ausnahmen bilden $-tz$ bei $\Delta t = 0,372$ s sowie $+rx$ bei der dritten Reizzuwachsstufe und $\Delta t = 0,372$ s. Bei $+ty$, $-tz$ und $+rx$ gilt für $\Delta t = 0$ s, dass mit zunehmendem Reizzuwachs die Maskierungswirkung zunimmt. $+ty$ und $-tz$ maskieren das „Nicken“ bei der größten Reizzuwachsstufe und $\Delta t = 0$ s vollständig. Des Weiteren weisen $+ty$ und $+rz$ bei den beiden kleinen Reizzuwachsstufen für $\Delta t = 0,186$ s größere Maskierungswirkungen auf als bei $\Delta t = 0$ s. Für die Maskierungsbewegungsrichtungen

$+ty$, $-tz$, $+rx$ und $+rz$ zeigt sich zudem eine zeitliche Zunahme der Maskierungswirkung mit steigendem relativen Reizzuwachs.

Wanken

Die Verläufe der Maskierungsfaktoren $G_{Mask,MBR}^{WA}(\dots)$ für das „Wanken“ (WA) sind in den Abbildungen 5.17 und 5.18 dargestellt. Analog zum „Nicken“ wurde beim „Wanken“ auf die Versuchsreihe bei einem zeitlichen Abstand von $\Delta t \approx 4$ s verzichtet, da Vorversuche ergeben haben, dass keine signifikanten Bewertungsunterschiede zwischen Varianten- und Referenzsignal auftreten. Die sechs untersuchten Zeitabstände wurden stattdessen bis maximal $\Delta t = 1,98$ s durchgeführt.

Die Hauptbewegungsrichtung $+rx$ weist bei einer direkten Überlagerung ($\Delta t = 0$ s), mit zunehmendem $RRZW_{+rx}$ eine zunehmende verstärkende Wirkung auf. Diese ist für die größten drei Reizzuwachsstufen signifikant. Die verstärkende Wirkung nimmt mit zunehmendem Δt ab und weist bei $\Delta t = 0,49$ s ein neutrales Verhalten auf. Ab $\Delta t \geq 0,98$ s entsteht für die drei größten Reizzuwachsstufen eine signifikante Maskierungswirkung, welche mit zunehmendem Δt abnimmt. Je größer dabei der relative Reizzuwachs ist, umso stärker ist die maskierende Wirkung. Die größten Maskierungswirkungen bei $\Delta t = 0,98$ s ergeben sich somit bei einem direkten Aufeinanderfolgen von Maskierungs- und Referenzereignis. Ein zunehmender zeitlicher Abstand schwächt diese maskierende Wirkung dann wieder ab.

Für die Maskierungsbewegungsrichtung $-ty$ ergibt sich in $\Delta t = 0$ s eine verstärkende Wirkung, die allerdings aufgrund von gemischten Bewertungen nicht signifikant ist. Dies spricht dafür, dass die Probanden nicht eindeutig erkennen konnten, ob eine zunehmende translatorische Bewegung in y -Richtung einem „Wanken“ entspricht oder nicht.

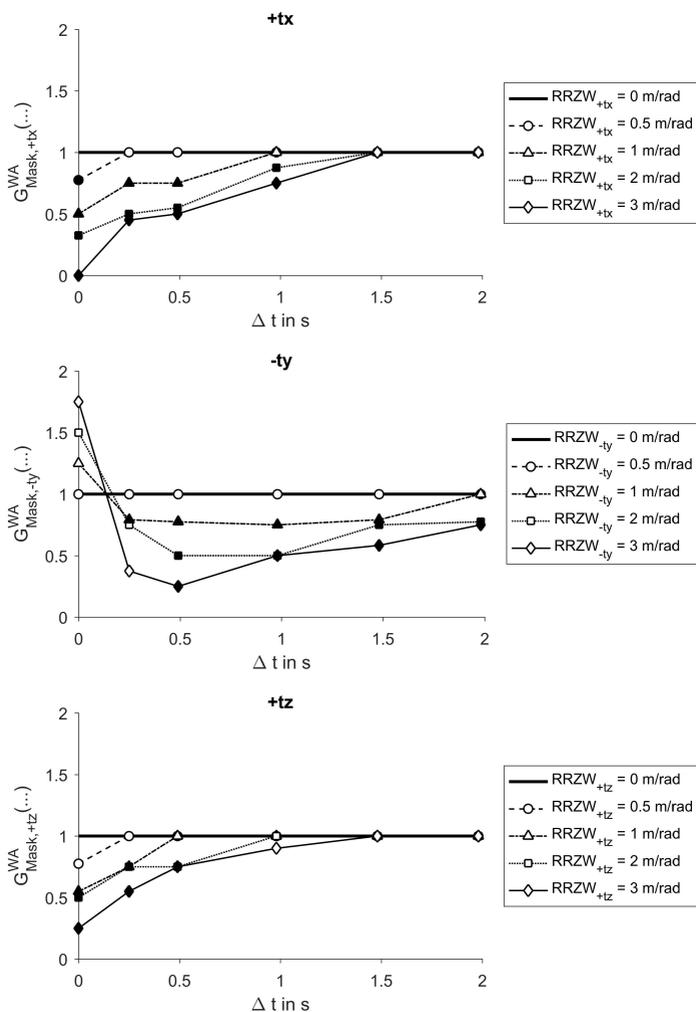


Abbildung 5.17: Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{WA}(\dots)$ für translatorische Maskierungsereignisse ($f_{Mask} = 1 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung des „Wankens“ ($f_{Ref} = 1 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbewegungsrichtung MBR

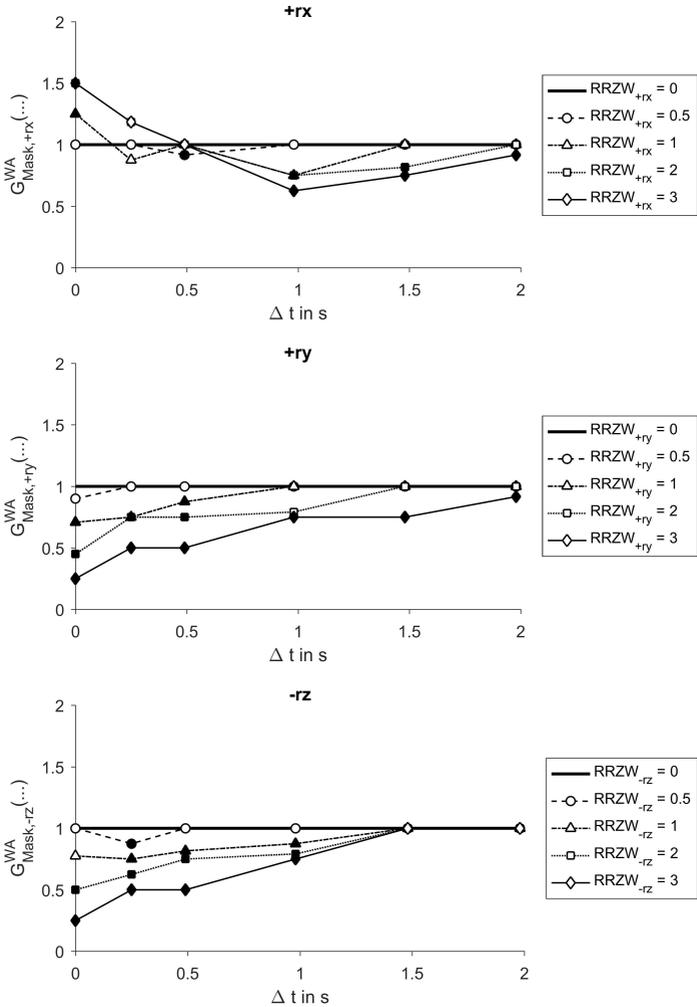


Abbildung 5.18: Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask, MBR}^{WA}(\dots)$ für Rotationsmaskierungsereignisse ($f_{Mask} = 1\text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung des „Wankens“ ($f_{Ref} = 1\text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbewegungsrichtung MBR

Trotz der nicht signifikanten Werte ist ihre Interpretation als verstärkende Wirkung kompatibel mit den Ergebnissen von Schmid [109], der eine Abhängigkeit der Wankstärkebewertung von der Summe der Beschleunigungs-komponenten t_y und r_x ableitet. Ab $\Delta t = 0,49\text{s}$ entsteht für die größten drei Reizzuwachsstufen eine signifikante maskierende Wirkung. Diese verstärkt sich mit zunehmendem relativen Reizzuwachs. Für die größten beiden Reizzuwachsstufen steigt der Maskierungsfaktor mit zunehmendem Zeitabstand des Maskierungsereignisses vom Referenzereignis Δt , d.h. die maskierende Wirkung nimmt ab. Die restlichen Maskierungsbewegungsrichtungen $+tx$, $+tz$, $+ry$ und $-rz$ weisen ein durchgehend maskierendes oder neutrales Verhalten auf. Die Stärke der maskierenden Wirkung nimmt mit abnehmendem $RRZW_{MBR}$ und zunehmendem Δt ab. Eine Ausnahme bildet der Punkt der geringsten Reizzuwachsstufe bei $\Delta t = 0,245\text{s}$ der Maskierungsbewegungsrichtung $-rz$.

Die Maskierungsfaktoren der Bewegungsrichtung $+tx$ und $-rz$ weisen für die größten beiden Reizzuwachsstufen bis zu $\Delta t = 0,98\text{s}$ signifikante Werte auf. Für $+ry$ und $+tz$ ist dies bis zu $\Delta t = 0,49\text{s}$ der Fall. Für $+tx$, $+tz$, $+ry$ und $-rz$ zeigt sich zudem eine zunehmende Dauer der Maskierungswirkung mit steigendem relativen Reizzuwachs.

5.4 Untersuchungen zur Maskierungswirkung mehrerer Einzelereignisse

5.4.1 Zielsetzung

Anhand der Untersuchungen in Abschnitt 5.3 ist ersichtlich, wie sich ein Einzelereignis bei Variation von dessen Bewegungsrichtung, zeitlichem Abstand zum Referenzereignis und Variation der Amplitude auf die Bewertung des Referenzereignisses auswirkt. Allerdings kann aus der Kenntnis der Einzelwirkungen kein Rückschluss auf die Gesamtwirkung mehrerer auftretender Maskierungsereignisse getroffen werden. Daher soll nachfolgend analysiert werden, ob und wie die Einzelmaskierungsfaktoren $G_{Mask,MBR}^{SP}(\dots)$

beim Auftreten mehrerer Maskierungsereignisse zu einem Gesamtmaskierungsfaktor für kombinierte Ereignisse $GK_{Mask,MBR}^{SP}(\dots)$ aggregiert werden können.

5.4.2 Vorgehensweise

Die Auswirkung mehrerer Maskierungsereignisse auf die Bewertung eines Referenzereignisses wird beispielhaft anhand des „Längsstoßens“ untersucht. Dazu werden gleichzeitig zwei 2 Hz Maskierungsereignisse der Bewegungsrichtungen $+ty$ und $+tz$ aus den Maskierungsuntersuchungen zum „Längsstoßen“ analog zu Abbildung 5.10 innerhalb des in 5.2.2 vorgestellten Hintergrundsignals platziert. Jedes einzelne Maskierungsereignis enthält nur eine Beschleunigungskomponente in der jeweiligen Bewegungsrichtung. Die zeitlichen Abständen Δt_{+ty} und Δt_{+tz} der Maskierungsereignisse zum Referenzereignis sowie die Amplituden $A_{Mask,+ty}$ und $A_{Mask,+tz}$ werden variiert. Die untersuchten Variationsstufen jedes Parameters sind in Tabelle 5.8 aufgeführt. Die Amplituden sind wieder als Vielfaches der Beschleunigungsamplitude der Hauptbewegungsrichtung HBR angegeben. Die Bewegungsrichtung der Maskierungsereignisse ist positiv (vgl. Notation aus Abschnitt 5.3.4).

Tabelle 5.8: Variationsstufen der Maskierungsparameter bei zwei Maskierungsereignissen

Δt_{+ty} in s	Δt_{+tz} in s	$A_{Mask,+ty}$	$A_{Mask,+tz}$	f_{Mask} in Hz
0	0	0	0	2
0,5825	0,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$	
1,0825	1,0825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$	
1,5825	1,5825			

5.4.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche werden mit 12 (männlichen) Probanden der in Tabelle 5.9 aufgeführten Zusammensetzung durchgeführt. Die detaillierte Zusammensetzung ist im Anhang unter Abbildung B.2 zu finden.

Tabelle 5.9: Mittelwerte und Standardabweichungen μ (SD) der Probandenkollektivdaten zu den Untersuchungen mit mehreren Maskierungsereignissen

n	Alter in Jahren	Größe in cm	Masse in kg	BMI in kg/m²
12	39,69 (13,1)	182,17 (5,79)	83 (9,29)	25,03 (2,68)

n: Anzahl Probanden

Die Versuche werden in zwei Blöcke mit jeweils 26 Einzelversuchen eingeteilt, in denen zu Beginn jeweils das Referenzsignal mit doppelter Amplitude und mit einer viertel Amplitude des „Längsstoßes“ vorgespielt wird, damit die Probanden die Bandbreite der Signalstärken kennenlernen.

Die Einzelversuche werden wieder in Form von zu beurteilenden Signalpaaren nach dem in Abschnitt 5.3.4 vorgestellten Ablauf durchgeführt. Jeder Proband bekommt zuerst das Referenzsignal des „Längsstoßes“ aus Abschnitt 5.3 vorgespielt, welches das in das Hintergrundsignal eingebettete Referenzereignis enthält. Nach einer dreisekündigen Pause wird das Variantensignal, bestehend aus dem Referenz- und den beiden Maskierungsereignissen, die in das Hintergrundsignal eingebettet sind, vorgespielt. Auf Wunsch des Probanden kann die Signalpaarung wiederholt werden. Im Anschluss erfolgt die Bewertung des Referenzereignisses beider Signale bzgl. der wahrgenommenen Phänomenstärke anhand der 9-Punkte-Skala aus Abschnitt 4.2.2. Die genaue Versuchsreihenfolge ist im Anhang unter den Tabellen B.18 und B.19 zu finden.

5.4.4 Analysegrößen

Zur Berechnung von Einzelmaskierungsfaktoren $G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots)$ sowie $G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots)$ und von Gesamtmaskierungsfaktoren $GK_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots)$ wird erneut Gleichung 5.5 angewandt. Die zugehörigen deskriptiven Statistiken sind im Anhang in Tabelle B.20 aufgeführt.

Aus Kombinationen der Einzelmaskierungsfaktoren $G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots)$ und $G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots)$ aus den Versuchen mit nur einem Maskierungsereignis (z.B. $A_{Mask,+ty} > 0$ und $A_{Mask,+tz} = 0$) sollen die Gesamtmaskierungsfaktoren $GK_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots)$ der Versuche mit zwei Maskierungsereignissen (d.h. $A_{Mask,+ty} > 0$ und $A_{Mask,+tz} > 0$) approximiert werden.

Exemplarisch sind in Tabelle 5.10 zwei Versuche mit einem einzelnen Maskierungsereignis (Versuchsnr. 2 und 10) und der zugehörige Versuch mit der Kombination beider Maskierungsereignisse (Versuchsnr. 21) aufgeführt. Die Tabelle enthält ebenfalls die nach Gleichung 5.5 bestimmten Maskierungsfaktoren.

Tabelle 5.10: Beispiel eines Versuches mit zwei Maskierungsereignissen und dem dazugehörigen Versuch mit nur einem Maskierungsereignis

Versuchsnummer:	2	10	21
Δt_{+ty} in s	0,5825	-	0,5825
Δt_{+tz} in s	-	0,5825	0,5825
$A_{Mask,+ty}$	$2A_{Ref,HBR}$	0	$2A_{Ref,HBR}$
$A_{Mask,+tz}$	0	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
$G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots)$	0,349	-	-
$G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots)$	-	0,674	-
$GK_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots)$	-	-	0,511

Die Tabelle zeigt, dass die maskierende Wirkung einer Querschwingung mit einem Maskierungsfaktor von 0,349 durch eine gleichzeitige Vertikalschwingung abgeschwächt wird. Der resultierende Gesamtmaskierungsfaktor bei einer gleichzeitigen Quer- und Vertikalschwingung beträgt nur 0,511.

Zur Approximation der Gesamtmaskierungsfaktoren $GK_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots)$ aus den Einzelmaskierungsfaktoren $G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots)$ und $G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots)$ werden folgende Ansätze getestet und ihre Ergebnisgüte durch Betrachtung der Korrelationswerte und Residuenquadratsummen überprüft:

$$\widehat{GK}_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots) = G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots) \cdot G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots) \quad (5.6)$$

$$\widehat{GK}_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots) = \sqrt{G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots) \cdot G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots)} \quad (5.7)$$

$$\widehat{GK}_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots) = [G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots) + G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots)]/2 \quad (5.8)$$

$$\widehat{GK}_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots) = \max [G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots); G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots)] \quad (5.9)$$

$$\widehat{GK}_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots) = \min [G_{Mask,+ty}^{LS}(\dots); G_{Mask,+tz}^{LS}(\dots)] \quad (5.10)$$

Dabei bezeichnet $\widehat{GK}_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots)$ die Approximation an das Versuchsergebnis $GK_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots)$.

5.4.5 Versuchsergebnisse

In Tabelle 5.11 sind die Korrelationskoeffizienten r zwischen den aus den Einzelmaskierungsfaktoren geschätzten Gesamtmaskierungsfaktoren $\widehat{GK}_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots)$ und den aus den Versuchen mit zwei enthaltenen Maskierungsereignissen bestimmten Maskierungsfaktoren $GK_{Mask,+ty,+tz}^{LS}(\dots)$ aufgetragen. Zusätzlich sind die Residuenquadratsummen $\sum e_r^2$ und die Wahrscheinlichkeitswerte der Signifikanzrechnungen p dargestellt. Die den Berechnungen zugrunde liegenden Versuche sind im Anhang in den Tabellen B.18 und B.19 aufgeführt.

Alle Korrelationswerte aus Tabelle 5.11 sind für $\xi = 0,05$ signifikant. Der größte Korrelationskoeffizient tritt bei Gleichung 5.7 auf, die geringste Korrelation und die größte Residuenquadratsumme bei Gleichung 5.9. Aus diesem Grund wird letztere im weiteren Verlauf der Arbeit nicht mehr herangezogen. Alle anderen vier Ansätze werden für die Berechnung von Gesamt-

maskierungsfaktoren verwendet, mit deren Hilfe im weiteren Verlauf der Arbeit objektive Kennwerte erzeugt werden. Diese werden dann hinsichtlich ihrer Korrelationsgüte zu den subjektiven Daten geprüft.

Tabelle 5.11: Korrelationen zwischen den geschätzten und im Versuch bestimmten Gesamtmaskierungsfaktoren

	Gl. 5.6	Gl. 5.7	Gl. 5.8	Gl. 5.9	Gl. 5.10
r	0,833	0,903	0,895	0,832	0,868
$\sum e_r^2$	0,763	1,207	1,400	3,492	0,644
p	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

5.5 Untersuchungen zum Audio- und Videoeinfluss

5.5.1 Zielsetzung

Abschließend wird auf dem Ride Simulator die Auswirkung von Audio- und Videosignalen auf die Wahrnehmungsstärke von Schwingungsphänomenen untersucht. Des Weiteren soll die Stärke der Maskierungseffekte mit denen der vorherigen Abschnitte verglichen werden, um eine Aussage treffen zu können, ob mechanische oder audiovisuelle Einflüsse die größere Auswirkung auf die Wahrnehmung eines Schwingungsphänomens haben.

5.5.2 Vorgehensweise

Der Einfluss von Audio- und Videosignalen auf die Wahrnehmungsstärke von Schwingungsphänomenen wird beispielhaft anhand des „Längsstoßens“ untersucht. Dazu wird ein Messsignal der Bahn 9 aus Messkampagne 5 der in Kapitel 4 vorgestellten Untersuchungen herangezogen. Auf Bahn 9 ist ausschließlich das „Längsstoßen“ wahrnehmbar. Die Anregung ist im Vergleich zu anderen Bahnen moderat. Potentiell maskieren oder verstärken die Innenraumgeräusche hier das Schwingungsphänomen am stärksten.

Tabelle 5.12: RMS-Werte der Beschleunigungskomponente tx aller Signalvarianten zur Untersuchung des Audio- und Videoeinflusses

Frequenzbereich	$G_{Freq,3-6}$	RMS_{tx} in m/s^2
3 Hz - 6 Hz	0,5	0,14
Gesamt	0,5	0,32
3 Hz - 6 Hz	1	0,28
Gesamt	1	0,41
3 Hz - 6 Hz	2	0,55
Gesamt	2	0,64

Aus dem Messsignal der Bahn 9 werden mittels Manipulation der Frequenzbereiche drei Signalvarianten erzeugt: Dazu wird das Signal mittels einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) (s. hierzu [62]) in den Frequenzbereich transformiert. Die Frequenzen der Bewegungsrichtung tx werden im Bereich der größten Empfindlichkeit (vgl. Abbildung 5.7 auf Seite 88) zwischen 3 Hz - 6 Hz mit einem Gewichtungsfaktor $G_{Freq,3-6}$ multipliziert. Dieser nimmt die Werte $G_{Freq,3-6} = 0,5$ oder $G_{Freq,3-6} = 2$ an. Nach Multiplikation mit dem Gewichtungsfaktor wird das Signal durch eine inverse FFT wieder in den Zeitbereich rücktransformiert. Somit entstehen neben dem Originalsignal zwei weitere Signalvarianten. Die RMS-Werte des Gesamtsignals und des 3 Hz - 6 Hz bandpassgefilterten Signals aller Signalvarianten sind in Tabelle 5.12 für die Beschleunigungskomponente tx aufgeführt. Für alle Signalvarianten sind die RMS-Werte der anderen Beschleunigungskomponenten konstant und in Tabelle 5.13 aufgeführt.

Die drei Signale werden durch das Hinzufügen von der zur Messung passenden zeitlich synchron aufgenommenen Stereoaudiospur ergänzt. Diese ist mit 48 kHz abgetastet. Der Schalldruckpegel des aufgezeichneten linken Audiosignals entspricht 80 dB(A), der Schalldruckpegel des rechten Audiosignals 79 dB(A).

Tabelle 5.13: RMS-Werte der konstanten Beschleunigungskomponenten t_y , t_z , r_x , r_y und r_z zur Untersuchung des Audio- und Videoeinflusses

Frequenz- bereich	RMS_{t_y} in m/s^2	RMS_{t_z} in m/s^2	RMS_{r_x} in rad/s^2	RMS_{r_y} in rad/s^2	RMS_{r_z} in rad/s^2
3 Hz - 6 Hz	0,12	0,19	0,07	0,1	0,08
Gesamt	0,21	0,45	0,28	0,26	0,14

Das Stereoaudiosignal wird mit drei Faktorstufen versehen: $G_{AS} = 0$ (Audio Signal aus), $G_{AS} = 0,5$ (Reduktion des Schalldruckpegels um -6 dB) und $G_{AS} = 1$ (80 dB(A) bzw. 79 dB(A)). Jedes der drei Audiosignalvarianten wird mit den drei Signalvarianten der Bahn 9 kombiniert. Diese Kombinationen werden einmal mit ($V = 1$) und einmal ohne ($V = 0$) dem zugehörigen Videosignal abgespielt. Dieses enthält die aus Fahrersicht aufgenommene Videosequenz der befahrenen Strecke. Insgesamt entstehen somit 18 Signalvarianten. Eine Zusammenfassung aller Faktorstufen ist in Tabelle 5.14 aufgeführt.

Tabelle 5.14: Faktorstufen der Untersuchungen zum Einfluss von Audio- und Videosignalen auf die Bewertungsabgabe am Simulator

$G_{Freq,3-6}$	G_{AS}	Video
0,5	0	1 (an)
1	0,5	0 (aus)
2	1	

5.5.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche werden mit einem Probandenkollektiv von 14 (männlichen) Personen durchgeführt. Deren Zusammensetzung ist zusammenfassend in Tabelle 5.15 aufgeführt. Detaillierte Informationen sind im Anhang in Abbildung B.2 dargestellt.

Tabelle 5.15: Mittelwerte und Standardabweichungen $\mu(SD)$ der Probandenkollektivdaten zu den Audio/Video-Untersuchungen

n	Alter in Jahren	Größe in cm	Masse in kg	BMI in kg/m²
14	39,36 (12,27)	181,07 (6,63)	82,93 (8,66)	25,34 (2,66)

n: Anzahl Probanden

Die Probanden fahren die Versuche getrennt voneinander in zwei Blöcken. Das Audiosignal der einzelnen Versuche wird über ein USB Audio Interface von Steinberg mit der Modellbezeichnung UR12 an einen Kopfhörer der Marke Sennheiser mit der Modellbezeichnung HD-380 Pro geleitet. Das Videosignal wird auf eine feststehende Leinwand gegenüber des Simulators in Full HD-Auflösung projiziert. Diese ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

Zu Beginn des jeweiligen Versuchsblocks werden den Probanden mit aufgesetztem Kopfhörer die Signale mit dem Gewichtungsfaktor $G_{Freq,3-6} = 0,5$ und $G_{Freq,3-6} = 2$ ohne Audio- und Videosignal präsentiert, damit sie sich in der Bewertungsskala orientieren können. Im Anschluss starten die zu beurteilenden Versuche, die in Form von zu beurteilenden Signalpaaren durchgeführt werden. Das erste Signal wird als Referenzsignal bezeichnet und bleibt bei jedem Signalpaar konstant. Als Referenzsignal wird das Signal mit $G_{Freq,3-6} = 1$ ohne Audio- und Videosignal ($G_{AS} = 0$ und $V=0$) verwendet. Das zweite Signal (Variantensignal) eines jeden Signalpaares variiert nach der im Anhang in den Tabellen B.21 und B.22 dargestellten Versuchsreihenfolge. Jedes Variantensignal wird im Laufe der beiden Versuchsblöcke zweimal abgespielt. Beurteilt wird nach jedem Signalpaar die Phänomenstärke des „Längsstoßens“ jeweils im Referenz- und im Variantensignal für die gesamte Bahn 9. Dies erfolgt unter Verwendung der in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten 9-Punkte-Skala.



Abbildung 5.19: Leinwand des Ride Simulators zur Projektion von Fahrbahnvideos

5.5.4 Analysegrößen

Analog zu den Maskierungsfaktoren in Abschnitt 5.3 werden die probandenabhängigen Audio-Video-Maskierungsfaktoren nach Gleichung 5.11 bestimmt. Diese berechnen sich für jeden Probanden aus den Noten des Variantsignals $N_{AV,Prob}$ und des Referenzsignals $N_{Ref,Prob}$:

$$G_{AV,Prob} = \frac{N_{AV,Prob} - 1}{N_{Ref,Prob} - 1} . \quad (5.11)$$

5.5.5 Versuchsergebnisse

Die resultierenden probandenabhängigen Audio-Video-Maskierungsfaktoren sind in Abbildung 5.20 dargestellt. Die einzelnen Grafiken sind nach den Gewichtungsfaktoren $G_{Freq,3-6}$ aufgeteilt und in die Faktorstufenkombinationen unterteilt. Die Maskierungsfaktorverteilungen sind in Form von Boxplots dargestellt. Der jeweils minimale und maximale Maskierungsfaktor ist durch die Enden der dünnen Linien dargestellt. Das obere und untere Quartil ist durch die Enden der fetten Linien dargestellt. Der Medianwert ist mit Hilfe eines weißen Kreises abgebildet. Ausreißer sind durch ein „x“ markiert.

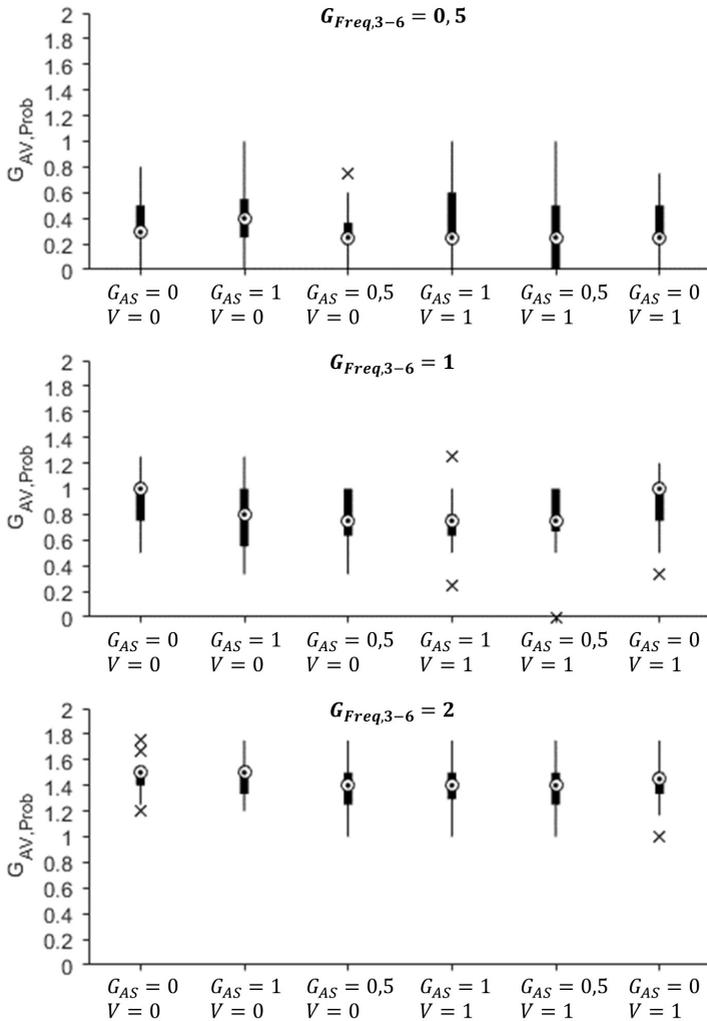


Abbildung 5.20: Verteilung der probandenabhängigen Audio-Video-Maskierungsfaktoren $G_{AV,Prob}$ bei Variation des Audiosignalgewichtungsfaktors G_{AS} , des Videosignals (V) und der Signalstärke durch den Gewichtungsfaktor $G_{Freq,3-6}$

Tabelle 5.16: G_{AV} -Werte aller Variantensignale

$G_{Freq,3-6}$:	0,5	1	2
$G_{AS} = 0; V = 0$	0,292	1	1,5
$G_{AS} = 1; V = 0$	0,4	0,8	1,5
$G_{AS} = 0,5; V = 0$	0,25	0,75	1,4
$G_{AS} = 1; V = 1$	0,25	0,75	1,4
$G_{AS} = 0,5; V = 1$	0,25	0,75	1,4
$G_{AS} = 0; V = 1$	0,25	1	1,45

Tabelle 5.17: Wahrscheinlichkeitswerte p des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bzgl. eines Unterschiedes zwischen den Signalen ohne audiovisuellem Einfluss ($G_{AS} = 0, V = 0$) und denen mit audiovisuellem Einfluss

$G_{Freq,3-6}$:	0,5	1	2
p($G_{AS} = 0; \text{Video aus}$):	1,000	1,000	1,000
p($G_{AS} = 1; V = 0$):	0,151	0,05	0,744
p($G_{AS} = 0,5; V = 0$):	0,027	0,003	0,02
p($G_{AS} = 1; V = 1$):	0,561	0,005	0,024
p($G_{AS} = 0,5; V = 1$):	0,065	0,001	0,066
p($G_{AS} = 0; V = 1$):	0,501	0,202	0,193

Die Medianwerte der einzelnen probandenabhängigen Audio-Video-Maskierungsfaktoren $G_{AV,Prob}$ ergeben die Audio-Video-Maskierungsfaktoren G_{AV} (Tabelle 5.16).

Zur Prüfung auf signifikante Unterschiede der Variantensignale zur Bewertung des $G_{Freq,3-6}$ -abhängigen Signals mit $G_{AS} = 0$ und ohne Videosignal wird ein Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test mit $\xi = 0,05$ angewandt. Die Ergebnisse des Tests sind in Tabelle 5.17 aufgeführt. In Tabelle 5.17 ist zu erkennen, dass sich die probandenabhängigen Audio-Video-Maskierungsfaktoren $G_{AV,Prob}$ bei einem vorhandenen Audiosignal (d.h. $G_{AS} > 0$) für $G_{Freq,3-6} = 1$ signifikant von dem Maskierungsfaktor des

Signals ohne Audio- und Videosignal unterscheiden. Für $G_{Freq,3-6} = 0,5$ gilt dies nur für $G_{AS} = 0,5$ ohne Videosignal. Für $G_{Freq,3-6} = 2$ sind die Unterschiede bis auf $G_{AS} = 1$ ohne Video für alle Variantensignale mit einem Audiosignal signifikant.

Um den isolierten Einfluss des Videosignals zu prüfen, wird ein weiterer Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test angewandt. Dieser soll die Unterschiede der probandenabhängigen Audio-Video-Maskierungsfaktoren bzgl. der Signalvarianten mit Audio- und ohne Videosignal zu jenen mit Audio- und mit Videosignal prüfen. Die resultierenden Wahrscheinlichkeitswerte p sind in Tabelle 5.18 aufgeführt.

Tabelle 5.18: Wahrscheinlichkeitswerte p des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bzgl. eines Unterschiedes der Variantensignale mit $G_{AS} > 0$ und $V = 0$ zu denen mit $G_{AS} > 0$ und $V = 1$

$G_{Freq,3-6}$:	0,5	1	2
$p(G_{AS} = 1)$	0,085	0,346	0,063
$p(G_{AS} = 0,5)$	0,966	0,905	0,658

Aus den Tabellenwerten geht hervor, dass die Unterschiede der $G_{AV,Prob}$ der Variantensignale mit $G_{AS} > 0$ und $V = 0$ zu den Variantensignalen mit $G_{AS} > 0$ und $V = 1$ nicht signifikant sind. In Tabelle 5.17 ist außerdem zu sehen, dass auch das Variantensignal mit $G_{AS} = 0$ und $V = 1$ keinen signifikanten Unterschied zum Signal ohne Video aufweist. Ein vorhandenes Videosignal hat infolgedessen keine signifikante Auswirkung auf die Bewertungsabgabe der Probanden. Diese Ergebnisse zeigen, dass keine merklichen antizipatorischen Effekte durch die zusätzlichen Bildinformationen auf die Bewertung erkennbar sind. Dies könnte daraus resultieren, dass alle Probanden mit der Strecke vertraut waren und die Schwingungsanregungen dem Streckenprofil zuordnen konnten. Ein vorhandenes Audiosignal hat dagegen eine signifikante Auswirkung auf die Bewertung von $G_{Freq,3-6} = 1$ und

$G_{Freq,3-6} = 2$. Die Stärke des Einflusses variiert mit der Stärke des Schwingungssignals. Der Einfluss des Audiosignals ist bei $G_{Freq,3-6} = 1$ am stärksten. Der maximale Unterschied der G_{AV} -Werte von einem Variantensignal mit Audiosignal zu dem Signal ohne Audio- und Videosignal beträgt hier 0,25 (vgl. Abbildung 5.20). Dies entspricht einem Maskierungsfaktor von $G_{AV} = 0,75$. Die größte Maskierungswirkung durch Schwingungsereignisse (Abschnitt 5.3) konnte mit einem Maskierungsfaktor von $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots) = 0$ dargestellt werden. Im Vergleich dazu ist die Maskierung durch Innenraumgeräusche gering.

5.6 Zusammenfassung von Kapitel 5

Mit Hilfe der Ride Simulator-Untersuchungen konnten die für die Wahrnehmung relevanten Frequenzbereiche des „Längsstößens“, des „Nickens“ und des „Wankens“ bestimmt werden. Dazu wurden einzelne Schwingungsereignisse bei konstanter Amplitude zeitlich gestreckt und gestaucht. Durch die Vergabe von Noten zur Bewertung der jeweiligen Phänomenstärke war es möglich, frequenzabhängige Gewichtungsvläufe für jedes Schwingungsphänomen abzuleiten, die im weiteren Verlauf der Arbeit als Frequenzfilter herangezogen werden. Die für die Frequenzgewichtung verwendeten Bewertungen waren bezüglich eines Unterschiedes zu der Note „nicht wahrnehmbar“ durchgehend signifikant.

Des Weiteren konnte die Wirkung eines einzelnen Schwingungsereignisses (Maskierungsereignis), dessen Bewegungsrichtung variiert wurde, auf die Wahrnehmung eines zu beurteilenden Schwingungsereignisses (Referenzereignis) für jedes der drei Schwingungsphänomene bestimmt werden. Die Frequenz des Referenzereignisses und des Maskierungsereignisses entsprach beim „Nicken“ 1,3 Hz und beim „Wanken“ 1 Hz. Die Frequenz des Referenzereignisses beim „Längsstößen“ entsprach 4,5 Hz. Die Frequenz des zum „Längsstößen“ gehörenden Maskierungsereignisses wurde in zwei Stufen variiert: Eine Stufe entsprach 2 Hz, die andere 4,5 Hz. Die Amplitu-

de der Maskierungsereignisse wurde in vier Stufen, der zeitliche Abstand des Maskierungsereignisses zum Referenzereignis in sechs Stufen variiert. Vergleichbare Untersuchungen für fühlbare Schwingungen wurden in den gesichteten Forschungsarbeiten bisher nicht durchgeführt.

Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen für viele Maskierungsbewegungsrichtungen folgenden Zusammenhang: Je größer der zeitliche Abstand des Maskierungsereignisses zum Referenzereignis ist, umso geringer ist dessen Auswirkung auf die Wahrnehmung des Referenzereignisses. Für die Auswirkung der Amplitude des Maskierungsereignisses zeigt sich, dass mit sinkender Amplitude auch die Auswirkung auf die Wahrnehmungsstärke des Referenzereignisses sinkt. Diese Ergebnisse sind konsistent zu denjenigen aus der Psychoakustik (vgl. Abschnitt 5.3.1). Allerdings konnten auch nicht monotone Verläufe festgestellt werden.

Zusätzlich ist zu beobachten, dass mit zunehmender Amplitude des Maskierungsereignisses auch die Dauer der maskierenden Wirkung zunimmt. Die Maskierungswirkungen hängen zudem von der Bewegungsrichtung des Maskierungsereignisses ab.

Das Verhalten der Maskierungswirkungen wurde für jedes Schwingungsphänomen und für jede untersuchte Frequenzstufe des Maskierungsereignisses durch einen Maskierungsfaktor ausgedrückt. Dieser hängt von der Maskierungsbewegungsrichtung, dem zeitlichen Abstand des Maskierungsereignisses vom Referenzereignis und dem Reizzuwachs in Richtung der Maskierungsbewegungsrichtung ab. Für Maskierungsereignisse mit einem geringen zeitlichen Abstand zum Referenzereignis konnten signifikante Maskierungsfaktoren gefunden werden. Dabei traten auch vollständige Maskierungen auf.

Um die Auswirkung mehrerer Maskierungsereignisse auf die Bewertung eines Referenzereignisses zu bestimmen, wurden Versuche mit zwei auftretenden Maskierungsereignissen unterschiedlicher Bewegungsrichtungen, zeitlichen Abständen und Amplituden durchgeführt. Die Auswirkung der zwei Maskierungsereignisse auf die Bewertung der Wahrnehmungsstärke

des Referenzereignisses wurde durch einen Gesamtmaskierungsfaktor erfasst. Die Untersuchungen zeigten, dass es möglich ist, den Gesamtmaskierungsfaktor mit Hilfe von Einzelmaskierungsfaktoren zu approximieren. Letztere geben die Auswirkung eines einzelnen Maskierungsereignisses auf die Bewertung des Referenzereignisses an.

Als Letztes wurde die Auswirkung von Innengeräuschaufnahmen und Videosignalen in Form von Fahrbahnvideos auf die Bewertungsabgabe am Simulator untersucht. Dazu wurden die zu einer Messstrecke zugehörigen Beschleunigungssignale im Frequenzbereich von 3 Hz bis 6 Hz verstärkt bzw. abgeschwächt. Diese Signale wurden ohne Audio- und ohne Videosignal, mit Audiosignal unterschiedlicher Lautstärke und ohne Videosignal, mit Audiosignal unterschiedlicher Lautstärke und mit Videosignal sowie ohne Audiosignal und mit Videosignal von den Probanden bewertet. Hier konnte ein signifikanter Einfluss des Audiosignals auf die Bewertungsabgabe aufgezeigt werden. Dieses Ergebnis korrespondiert zu anderen Forschungsarbeiten aus Abschnitt 3.1.5. Die Auswirkung auf die Bewertungsabgabe ist jedoch im Vergleich zu der Maskierung durch die oben genannten Schwingungsereignisse gering. Für die Videosignale konnte kein signifikanter Einfluss auf die Bewertungsabgabe nachgewiesen werden.

6 Implementierung der Maskierungseffekte in die Signalauswertung

Die Ergebnisse der in Kapitel 5 vorgestellten Untersuchungen auf dem Ride Simulator zeigen, dass eine Analyse von Schwingungsphänomenen im Zeitbereich erfolgen sollte, um Maskierungseffekte vorangegangener Schwingungsereignisse berücksichtigen zu können. Diese Ergebnisse werden hier herangezogen, um eine Methode zur Messsignalverarbeitung zu entwickeln, welche sowohl die schwingungsphänomenabhängigen Frequenzbereiche als auch die Maskierung durch Schwingungsereignisse berücksichtigt.

6.1 Frequenzfilter

Die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Frequenzgewichtungsverläufe $G_{Freq}^{SP}(f)$ werden zur Filterung von Messsignalen herangezogen, um die für das jeweilige Schwingungsphänomen SP relevanten Signalbestandteile zu isolieren und deren Amplituden wahrnehmungsgerecht zu gewichten.

Die Messsignale werden dazu mittels der Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert. Die resultierenden Frequenzspektren des Real- und Imaginärteils werden mit der für das jeweilige Schwingungsphänomen relevanten Frequenzgewichtungskurve $G_{Freq}^{SP}(f)$ multipliziert. Im Anschluss erfolgt eine Rücktransformation der resultierenden Spektren in den Zeitbereich. Der Ablauf ist schematisch in Abbildung 6.1 dargestellt.

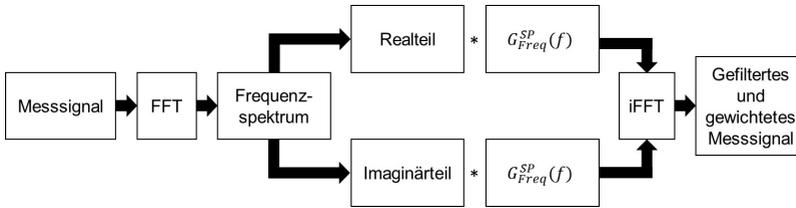


Abbildung 6.1: Ablauf der Frequenzfilterung mit Hilfe der schwingungsphänomenabhängigen Frequenzgewichtungskurven $G_{Freq}^{SP}(f)$

6.2 Maskierungsansatz

Die Verläufe der in Abschnitt 5.3 experimentell bestimmten Maskierungsfaktoren $G_{Mask,MBR}^{SP}(f_{Ref}, f_{Mask}, RRZW_{MBR}, \Delta t)$ weisen für alle untersuchten Schwingungsphänomene SP , Maskierungsbewegungsrichtungen MBR , Referenzereignisfrequenzen f_{Ref} , Maskierungsereignisfrequenzen f_{Mask} und relativen Reizzuwächse $RRZW_{MBR}$ näherungsweise einen exponentiellen Verlauf bzgl. der untersuchten Zeitabstände Δt auf. Um die Maskierungsfaktoren für beliebige Zeitabstände Δt ermitteln zu können, ist eine Näherungsfunktion erforderlich, die deren zeitlichen Verlauf beschreibt. Als Ansatz wird eine gegen „1“ konvergierende exponentielle Funktion gewählt. Diese wird um einen linearen Term ergänzt, um ggf. einen Anstieg der Werte bei $\Delta t = 0$ berücksichtigen zu können. Die resultierende Ansatzfunktion zur Schätzung der Maskierungsfaktoren hängt für festgelegte Frequenzen f_{Ref} und f_{Mask} vom zeitlichen Abstand Δt und dem relativen Reizzuwachs der jeweiligen Maskierungsbewegungsrichtung $RRZW_{MBR}$ ab:

$$\begin{aligned}
 \hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(f_{Ref}, f_{Mask}, RRZW_{MBR}, \Delta t) = & \\
 & [PA_{MBR}^{SP}(f_{Ref}, f_{Mask}, RRZW_{MBR}) \cdot \Delta t + PB_{MBR}^{SP}(f_{Ref}, f_{Mask}, RRZW_{MBR})] \\
 & \cdot \exp[\Delta t \cdot PC_{MBR}^{SP}(f_{Ref}, f_{Mask}, RRZW_{MBR})] + 1.
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

Die von f_{Ref} , f_{Mask} und $RRZW_{MBR}$ abhängigen Schätzparameter PA_{MBR}^{SP} , PB_{MBR}^{SP} und PC_{MBR}^{SP} dienen zur Anpassung der approximierenden Funktion an den jeweiligen Maskierungsfaktorverlauf aus Abschnitt 5.3. Die Parameter werden für jedes Schwingungsphänomen SP bei festgelegten f_{Ref} und f_{Mask} für jeden relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ jeder Maskierungs Bewegungsrichtung MBR durch die Minimierung der Residuenquadratsumme zwischen den Versuchspunkten aus Abschnitt 5.3 und der Ansatzfunktion geschätzt. Um unplausible Verläufe auszuschließen, werden bei Bedarf Parameterrestriktionen vorgenommen. Beispielhaft sind in Abbildung 6.2 die Maskierungsfaktorverläufe von $G_{Mask,-ty}^{WA}(\dots)$ und $G_{Mask,+tz}^{WA}(\dots)$ des „Wankens“ (WA) für $RRZW_{-ty} = 2\text{ m/rad}$ bzw. $RRZW_{+tz} = 2\text{ m/rad}$ (vgl. Abbildung 5.17) und die Näherungen durch die Ansatzfunktion aus Gleichung 6.1 dargestellt. Die jeweiligen Korrelationskoeffizienten nach Pearson betragen 0,97 und 0,99 und sind mit jeweils $p < 0,001$ signifikant. In der Grafik ist zusätzlich die Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren als Boxplot dargestellt.

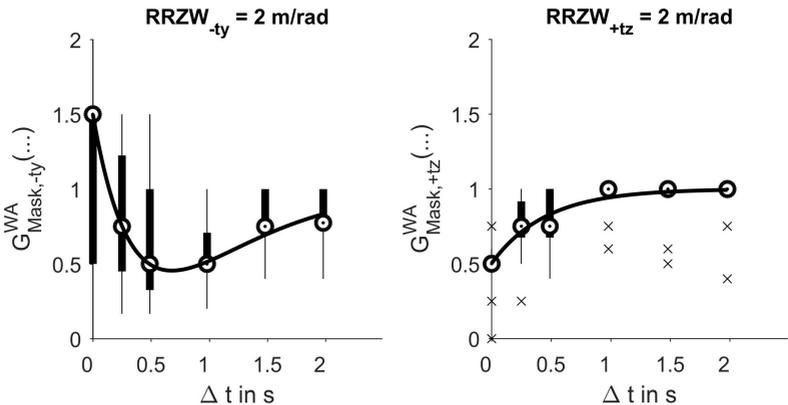


Abbildung 6.2: Darstellung der geschätzten Maskierungsfaktorverläufe für $f_{Ref} = 1\text{ Hz}$, $f_{Mask} = 1\text{ Hz}$ und ausgewählte $RRZW_{MBR}$ der Maskierungs Bewegungsrichtungen $-ty$ und $+tz$ des „Wankens“

Tabelle 6.1: Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r) zum Zusammenhang der geschätzten und den aus Versuchen ermittelten Maskierungsfaktoren aller Schwingungsphänomene

	$LS(2\text{ Hz})$	$LS(4,5\text{ Hz})$	$NI(1,3\text{ Hz})$	$WA(1\text{ Hz})$
r	0,96	0,96	0,94	0,93

LS: Längsstoßen, NI: Nicken, WA: Wanken

Die mittleren Korrelationskoeffizienten für den Zusammenhang des beschriebenen Ansatzes und den Messwerten sind für die 2 Hz- 4,5 Hz-Maskierung des „Längsstoßens“, für die 1,3 Hz-Maskierung des „Nickens“ und für die 1 Hz-Maskierung des „Wankens“ in Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Korrelationskoeffizienten und die Wahrscheinlichkeitswerte der geschätzten Maskierungsverläufe aller untersuchten Maskierungsbewegungsrichtungen, Maskierungsfrequenzen, relativen Reizzuwächse und Schwingungsphänomene sind im Anhang in den Tabellen C.1 bis C.4 aufgelistet. Die zugehörigen Fits sind in den Abbildungen C.1 bis C.24 im Anhang aufgeführt. Aus den Tabellen ist ersichtlich, dass 93% der Fälle signifikant sind. Die von $RRZW_{MBR}$ abhängigen Parameterverläufe $PA_{MBR}^{WA}(\dots)$, $PB_{MBR}^{WA}(\dots)$, $PC_{MBR}^{WA}(\dots)$ des „Wankens“ sind beispielhaft für die beiden Maskierungsbewegungsrichtungen $-ty$ und $+tz$ sowie $f_{Ref} = 1\text{ Hz}$ und $f_{Mask} = 1\text{ Hz}$ in Abbildung 6.3 dargestellt. Die Parameterverläufe aller untersuchten Maskierungsbewegungsrichtungen, Maskierungsfrequenzen, relativen Reizzuwächse und Schwingungsphänomene sind im Anhang in den Abbildungen C.25 bis C.36 dargestellt.

Die aus den Schätzungen ermittelten Parameter $PA_{MBR}^{SP}(\dots)$, $PB_{MBR}^{SP}(\dots)$ und $PC_{MBR}^{SP}(\dots)$ sind vom jeweils untersuchten $RRZW_{MBR}$ -Wert abhängig. Um den Definitionsbereich dieser Parameterfunktionen auch auf die Zwischenwerte der experimentell untersuchten $RRZW_{MBR}$ -Werte auszuweiten, werden die zu zwei aufeinanderfolgenden $RRZW_{MBR}$ -Werten korrespondierenden Parameterwerte für gegebene f_{Ref} und f_{Mask} linear interpoliert.

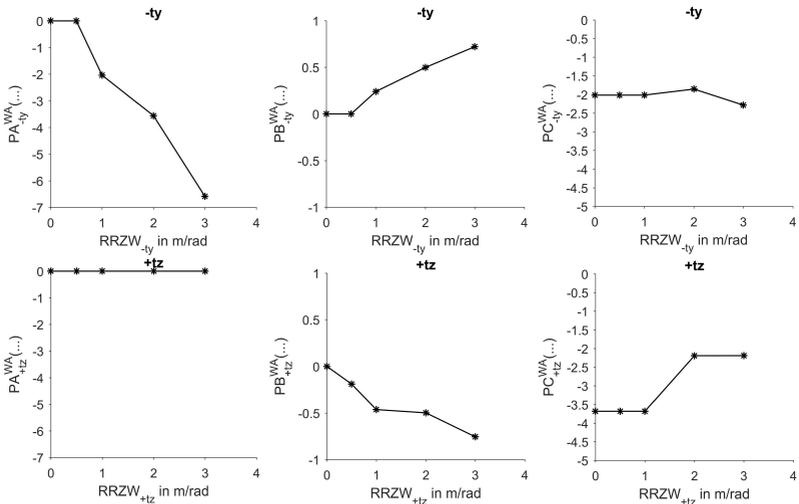


Abbildung 6.3: Darstellung der $RRZW_{MBR}$ -abhängigen Parameterverläufe zu den geschätzten Maskierungsfaktorfunktionen des „Wankens“ für die Maskierungsbewegungsrichtungen $-ty$ und $+tz$ sowie $f_{Ref} = 1 \text{ Hz}$, $f_{Mask} = 1 \text{ Hz}$

Infolgedessen lassen sich mit Hilfe der Ansatzfunktion aus Gleichung 6.1 für jede Bewegungsrichtung eines Schwingungsphänomens der $RRZW_{MBR}$ - und Δt -abhängige Maskierungsfaktor bestimmen. Der Definitionsbereich der Parameterfunktionen wird durch die experimentell untersuchten maximalen $RRZW_{MBR}$ beschränkt. Die zu diesen maximalen relativen Reizzuwächsen korrespondierenden Parameterwerte werden für die rechnerische Auswertung größerer relativer Reizzuwächse übernommen. Somit lassen sich für jedes Schwingungsphänomen bei festgelegten Frequenzen f_{Ref} und f_{Mask} die Maskierungsfaktoren für jeden Zeitabstand Δt und $RRZW_{MBR}$ schätzen. Treten dabei negative Schätzwerte auf, werden diese auf 0 korrigiert. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich stets auf das korrigierte $\hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots)$.

6.3 Signalbewertung

Mit Hilfe der in Abschnitt 6.1 vorgestellten Frequenzgewichtung und dem in Abschnitt 6.2 vorgestellten Ansatz zur Maskierungsgewichtung werden die im Fahrzeug an der Fahrersitzkonsole gemessenen Beschleunigungen $a_{FaSiKo,vl,tx}$, $a_{FaSiKo,vl,ty}$, $a_{FaSiKo,vl,tz}$, $a_{FaSiKo,rx}$, $a_{FaSiKo,ry}$ und $a_{FaSiKo,rz}$ aus Kapitel 4 verarbeitet.

Für die Signalverarbeitung wird folgender Ansatz verwendet: Eine Schwingung wird pro Bewegungsrichtung als eine Folge einzelner Schwingungsereignisse interpretiert, die wiederum Auswirkungen auf die Wahrnehmung eines zeitgleich oder zeitlich nachfolgend auftretenden Schwingungsereignisses haben. Die Einteilung der Schwingungen in Schwingungsereignisse erfolgt über die Berechnung eines Peak-to-Peak Verlaufes. Diese Methode zur Signalverarbeitung gliedert sich in fünf Schritte:

1. **Signalfilterung:** Filterung der für die Wahrnehmung des jeweiligen Schwingungsphänomens relevanten Signalbestandteile
2. **Peak-to-Peak Verlaufsrechnung:** Einteilung der gefilterten Schwingungen in zeitdiskrete Schwingungsereignisse
3. **Bestimmung von Maskierungsfaktoren:** Anwendung des Ansatzes aus Abschnitt 6.2 zur Maskierungsfaktorberechnung
4. **Bestimmung des verstärkungsäquivalenten Reizzuwachses:** Als verstärkungsäquivalenter Reizzuwachs wird derjenige fehlende Signalanteil der Hauptbewegungsrichtung verstanden, der notwendig ist, um die verstärkenden Wirkungen aus vorgelagerten oder gleichzeitig auftretenden Schwingungsereignissen aller Bewegungsrichtungen in der Hauptbewegungsrichtung abzubilden. Der verstärkungsäquivalente Reizzuwachs wird mit Hilfe der Maskierungsfaktoren > 1 aus dem vorherigen Schritt Nr. 3 berechnet und dem Beschleunigungsverlauf der Hauptbewegungsrichtung

hinzugefügt. Da sich die Berechnung der Maskierungsfaktoren auf die Hauptbewegungsrichtung bezieht, ist der verstärkungsäquivalente Reizzuwachs notwendig, um die maskierenden Wirkungen der restlichen Schwingungsereignisse anhand eines Beschleunigungsverlaufs der Hauptbewegungsrichtung berechnen zu können, welcher sämtliche verstärkende Wirkungen enthält. So kann folgendes Szenario vermieden werden: Angenommen es wird ein Maskierungsfaktor von 0 berechnet, der durch die maskierende Wirkung eines Schwingungsereignisses bzgl. des gerade analysierten Schwingungsereignisses der Hauptbewegungsrichtung zustande kommt. Der berechnete Maskierungsfaktor berücksichtigt in diesem Fall nicht die verstärkenden Wirkungen anderer Schwingungsereignisse im Umfeld des gerade betrachteten Schwingungsereignisses. Werden diese jedoch im Beschleunigungsverlauf der Hauptbewegungsrichtung mit Hilfe des verstärkungsäquivalenten Reizzuwachses berücksichtigt, fällt die maskierende Wirkung des betrachteten Schwingungsereignisses geringer aus und der berechnete Maskierungsfaktor ändert sich ggf. zu einem Wert > 0 . Der Ablauf zur Berechnung des verstärkungsäquivalenten Reizzuwachses ist folgender:

- Bestimmung der die Wahrnehmung des Schwingungsphänomens verstärkenden Signalbestandteile aller Bewegungsrichtungen anhand der in Punkt 3 berechneten Maskierungsfaktoren > 1
- Berechnung eines verstärkungsäquivalenten Reizzuwachses für die Hauptbewegungsrichtung des Schwingungsphänomens
- Berechnung eines verstärkten Signalverlaufes der Hauptbewegungsrichtung

5. Berechnung eines Gesamtmaskierungsverlaufes:

- Ausgehend vom verstärkten Signalverlauf der Hauptbewegungsrichtung werden die maskierenden Signalbestandteile

aller Maskierungsbewegungsrichtungen durch die Berechnung der entsprechenden Maskierungsfaktoren bestimmt.

- Mit den resultierenden Maskierungsfaktoren ≤ 1 der Maskierungsfaktorverläufe jeder einzelnen Bewegungsrichtung wird ein Gesamtmaskierungsverlauf berechnet.

Auf die einzelnen Schritte wird nachfolgend detailliert eingegangen.

6.3.1 Signalfilterung

Zuerst werden die gemessenen Beschleunigungssignale $a_{FaSiKo,vl,tx}$, $a_{FaSiKo,vl,ty}$, $a_{FaSiKo,vl,tz}$, $a_{FaSiKo,rx}$, $a_{FaSiKo,ry}$ und $a_{FaSiKo,rz}$ schwingungsphänomenabhängig nach der in Abschnitt 6.1 vorgestellten Methode gefiltert (Index FG). Daraus ergeben sich die Beschleunigungssignale $a_{FG,tx}$, $a_{FG,ty}$, $a_{FG,tz}$, $a_{FG,rx}$, $a_{FG,ry}$ und $a_{FG,rz}$, welche die für das jeweilige Schwingungsphänomen relevanten und gewichteten Frequenzbereiche aus Abschnitt 5.2 enthalten. Das gefilterte Signal der schwingungsphänomenabhängigen Hauptbewegungsrichtung (LS: tx, NI: ry, WA: rx) wird nachfolgend mit $a_{FG,HBR}$ bezeichnet. Um bei der Analyse des „Längsstoßens“ auch den Einfluss der niederen Frequenzen im Bereich von 1 bis 2,38 Hz zu erfassen (vgl. Tabelle 5.5 auf Seite 89), wird hier eine Bandpassfilterung (FB) der sechs gemessenen Beschleunigungssignale für diesen Frequenzbereich durchgeführt. Im Falle des „Längsstoßens“ entstehen somit sechs weitere Beschleunigungssignale $a_{FB,tx}$, $a_{FB,ty}$, $a_{FB,tz}$, $a_{FB,rx}$, $a_{FB,ry}$ und $a_{FB,rz}$.

6.3.2 Peak-to-Peak Verlaufsrechnung

Aus allen gefilterten Signalen wird im nächsten Schritt ein zeitdiskreter Peak-to-Peak (PtP) Verlauf nach Gleichung 6.2 berechnet:

$$a_{PtP,i}(t_{PtP}(j)) = \frac{|a_i(t_{Extr}(j+1)) - a_i(t_{Extr}(j))|}{2} \quad (6.2)$$

mit $t_{PtP}(j) = (t_{Extr}(j) + t_{Extr}(j+1))/2$. i steht hier als Platzhalter für die Indizes aller gefilterten Signale aus Abschnitt 6.3.1. j ist der Zähler für die aufeinanderfolgenden lokalen Extrema. Aus je zwei aufeinanderfolgenden lokalen Extrema eines Beschleunigungssignals zu den Zeitpunkten $t_{Extr}(j)$ und $t_{Extr}(j+1)$ wird der Abstand beider Extremwerte halbiert, um den Schwingungsverlauf charakterisieren zu können. Dieser PtP-Wert definiert $a_{PtP,i}(t_{PtP}(j))$ und wird im nachfolgenden Abschnitt zur Berechnung des relativen Reizzuwachses verwendet. Der Zusammenhang ist in Abbildung 6.4 beispielhaft verdeutlicht.

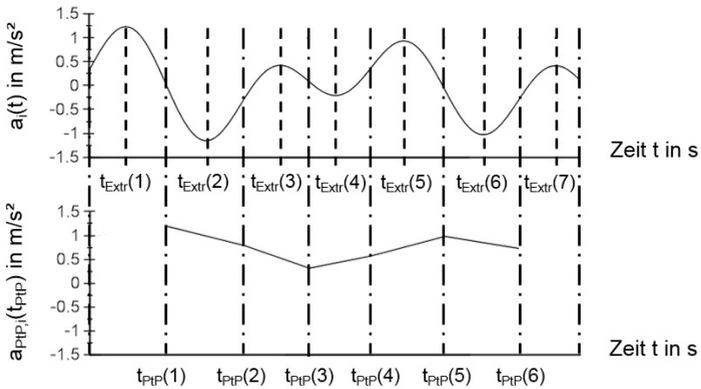


Abbildung 6.4: Schwingungseinteilung zur Kennwertverlaufsrechnung

6.3.3 Bestimmung von Maskierungsfaktoren

Die PtP Verläufe $a_{PtP,FG,tx}$, $a_{PtP,FG,ty}$, $a_{PtP,FG,tz}$, $a_{PtP,FG,rx}$, $a_{PtP,FG,ry}$ und $a_{PtP,FG,rz}$ (beim „Längsstoßen“ zusätzlich die $a_{PtP,FB,...}$) werden nun als Maskierungssignale interpretiert, welche die Maskierungsereignisse enthalten. Die einzelnen Maskierungsbewegungsrichtungen MBR sind durch $tx...rz$ in den Indizes der PtP Verläufe gekennzeichnet. Der PtP Verlauf der Hauptbewegungsrichtung $a_{PtP,FG,HBR}$ wird als Referenzsignal interpretiert, welches die zu beurteilenden Schwingungsphänomenergebnisse

enthält. Für jeden Zeitpunkt $t_0 = t_{PtP,HBR}(j)$ des PtP Verlaufes der Hauptbewegungsrichtung $a_{PtP,FG,HBR}(t_{PtP,HBR}(j))$ werden für alle Zeitpunkte $t_0 - 4s \leq t_{PtP,MBR} \leq t_0$ aller Maskierungssignale die Maskierungsfaktorwerte $\hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots)$ (Gl. 6.1) berechnet. Wie in Abschnitt 5.3.6 beschrieben, sind die maskierenden Wirkungen für Zeitabstände zwischen Maskierungs- und Referenzereignis von $> 4s$ zum Großteil nicht signifikant, weshalb sich hier zu Gunsten der Rechenzeiten auf eine Zeitspanne von $t_0 - 4s$ bis t_0 zur Berechnung von Maskierungsfaktoren beschränkt wird. Somit kann der Einfluss jedes PtP Wertes der jeweiligen Maskierungsbewegungsrichtung $a_{PtP,FG(FB),MBR}(t_{PtP,MBR})$ mit $t_0 - 4s \leq t_{PtP,MBR} \leq t_0$ auf den Wert der Hauptbewegungsrichtung $a_{PtP,FG,HBR}(t_0)$ zum Zeitpunkt t_0 bestimmt werden. Dies ist in Abbildung 6.5 qualitativ dargestellt.

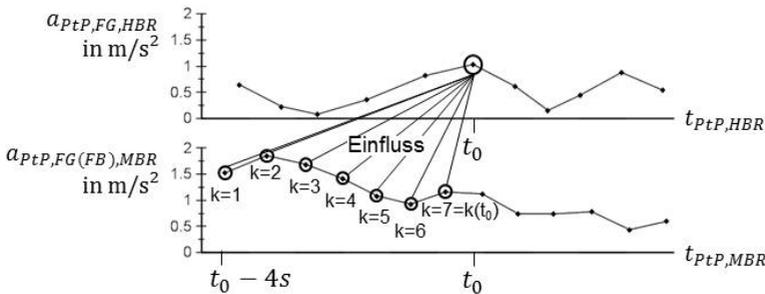


Abbildung 6.5: Qualitative Darstellung der PtP Verläufe $a_{PtP,FG,HBR}(t_{PtP,HBR})$ und $a_{PtP,FG(FB),MBR}(t_{PtP,MBR})$ mit Kennzeichnung der Einflussnahme aller $k(t_0)$ Werte der Maskierungsbewegungsrichtung für $t_0 - 4s \leq t_{PtP,MBR} \leq t_0$ auf einen Wert der Hauptbewegungsrichtung $a_{PtP,FG,HBR}(t_0)$

Für die Berechnung des Maskierungsfaktors zu jedem $t_0 - 4s \leq t_{PtP,MBR} \leq t_0$ einer Maskierungsbewegungsrichtung MBR werden der jeweilige zeitliche Abstand $\Delta t_0(k)$ der Maskierungsereignisse $a_{PtP,FG(FB),MBR}(t_{PtP,MBR}(k))$ vom Referenzereignis $a_{PtP,FG,HBR}(t_0)$ bestimmt. Zu $\Delta t_0(k)$ wird die am Ride Simulator im jeweiligen Referenzsignal vorhandene Amplitude

$A_{Ref,MBR}(\Delta t_0(k))$ aus Abschnitt 5.3 ermittelt. Mit diesen beiden Größen wird der jeweilige relative Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ (Gl. 6.3) berechnet.

$$RRZW_{MBR} = \begin{cases} \frac{\Delta a}{a_{PtP,FG,HBR}(t_0)} & \Delta a \geq 0 \\ 0 & \Delta a < 0 \end{cases} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \Delta a &= a_{PtP,FG(FB),MBR}(t_{PtP,MBR}) - A_{Ref,MBR}(\Delta t_0(k)) \\ \Delta t_0(k) &= t_0 - t_{PtP,MBR}(k), \quad k = 1 \dots k(t_0). \end{aligned} \quad (6.4)$$

Dabei bezeichnet $k(t_0)$ die Anzahl der Maskierungsereignisse, die in der Zeitspanne $t_0 - 4\text{ s}$ bis t_0 auftreten (vgl. Abbildung 6.5).

Für die frequenzgewichteten PtP Verläufe (FG) werden im Folgenden die in Abschnitt 5.3 untersuchten Frequenzen 4,5 Hz (LS), 1,3 Hz (NI) bzw. 1 Hz (WA) für die Maskierungsfrequenz f_{Mask} und die Referenzsignalfrequenz f_{Ref} verwendet. Für die bandpassgefilterten PtP Verläufe (FB) des „Längsstoßens“ wird die Maskierungsfrequenz $f_{Mask} = 2\text{ Hz}$ verwendet.

Mit Hilfe der im Anhang aufgeführten Parameterverläufe $PA_{MBR}^{SP}(\dots)$, $PB_{MBR}^{SP}(\dots)$ und $PC_{MBR}^{SP}(\dots)$ (Abbildungen C.25 bis C.36) lassen sich die zum relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ gehörenden Parameterwerte bestimmen.

Mit diesen Parameterwerten lässt sich mittels Gleichung 6.1 der Maskierungsfaktor $\hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots)$ für alle MBR , für die Maskierungsfrequenzen f_{Mask} sowie für alle $\Delta t_0(k)$ zum betrachteten Zeitpunkt t_0 der Hauptbewegungsrichtung berechnen.

6.3.4 Bestimmung des verstärkungsäquivalenten Reizzuwachses

Die für einen Zeitpunkt t_0 der Hauptbewegungsrichtung berechneten Werte der Maskierungsfaktoren $\hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots)$ für alle $t_0 - 4\text{ s} \leq t_{PtP,MBR} \leq t_0$ einer bestimmten Maskierungsbewegungsrichtung MBR werden auf verstärkende

Wirkungen, d.h. $\hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots) > 1$, geprüft und nach folgenden Regeln in einen Verstärkungsfaktorverlauf $\hat{G}_{VerstAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t)$ übertragen:

$$\hat{G}_{VerstAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t) = \begin{cases} \hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots) & , \hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots) > 1 \\ 1 & , \hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots) \leq 1 . \end{cases} \quad (6.5)$$

Dabei ergibt sich das jeweilige Δt aus der Gleichung 6.4.

Aus dem Verstärkungsfaktorverlauf einer Maskierungsbewegungsrichtung MBR und Maskierungsfrequenz f_{Mask} wird nun ein Δt -unabhängiger Verstärkungsfaktor für den Zeitpunkt t_0 berechnet. Dazu wird zunächst die Anzahl $k(t_0)$ aller $t_0 - 4s \leq t_{PI,MBR} \leq t_0$ bestimmt und die folgenden Berechnungsansätze angewandt, welche sich an den Ergebnissen aus Abschnitt 5.4.5 orientieren. Diese werden in Kapitel 7 auf ihre Eignung überprüft.

$$\widehat{GK}_{Verst,MBR}^{SP}(f_{Mask}) = \left(\prod_{k=1}^{k(t_0)} \hat{G}_{VerstAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(k)) \right)^{(1/k(t_0))} \quad (6.6)$$

$$\widehat{GK}_{Verst,MBR}^{SP}(f_{Mask}) = \prod_{k=1}^{k(t_0)} \hat{G}_{VerstAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(k)) \quad (6.7)$$

$$\widehat{GK}_{Verst,MBR}^{SP}(f_{Mask}) = \frac{\sum_{k=1}^{k(t_0)} \hat{G}_{VerstAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(k))}{k(t_0)} \quad (6.8)$$

$$\widehat{GK}_{Verst,MBR}^{SP}(f_{Mask}) = \max \left[\hat{G}_{VerstAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(1)), \dots, \hat{G}_{VerstAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(k(t_0))) \right] . \quad (6.9)$$

Aus den Δt -unabhängigen Verstärkungsfaktoren für einen bestimmten Zeitpunkt t_0 einer bestimmten Maskierungsbewegungsrichtung MBR und Maskierungsfrequenz f_{Mask} werden nun MBR - und f_{Mask} -unabhängige Gesamtverstärkungsfaktoren für den Zeitpunkt t_0 berechnet. Dazu wird die Anzahl der Maskierungsbewegungsrichtungen n_{MBR} bestimmt, die in den hier betrachteten Untersuchungen alle Bewegungsrichtungen beinhalten und somit

den Wert $n_{MBR} = 6$ annimmt. Zusätzlich wird die Anzahl der betrachteten Maskierungsfrequenzen n_f bestimmt. Für das „Nicken“ und „Wanken“ beträgt $n_f = 1$ (1,3 Hz bzw. 1 Hz), für das „Längsstoßen“ beträgt $n_f = 2$ (4,5 Hz und 2 Hz). Es werden folgende Ansätze zur Berechnung des Gesamtverstärkungsfaktors angewandt, die sich wieder an den Ergebnissen aus Abschnitt 5.4.5 orientieren:

$$\widehat{GK}_{Verst}^{SP} = \left(\prod_{i=1}^{n_{MBR}} \prod_{j=1}^{n_f} \widehat{GK}_{Verst,i}^{SP}(j) \right)^{(1/(n_{MBR} \cdot n_f))} \quad (6.10)$$

$$\widehat{GK}_{Verst}^{SP} = \prod_{i=1}^{n_{MBR}} \prod_{j=1}^{n_f} \widehat{GK}_{Verst,i}^{SP}(j) \quad (6.11)$$

$$\widehat{GK}_{Verst}^{SP} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{MBR}} \sum_{j=1}^{n_f} \widehat{GK}_{Verst,i}^{SP}(j)}{n_{MBR} \cdot n_f} \quad (6.12)$$

$$\widehat{GK}_{Verst}^{SP} = \max \left[\widehat{GK}_{Verst,1}^{SP}(1), \dots, \widehat{GK}_{Verst,n_{MBR}}^{SP}(n_f) \right]. \quad (6.13)$$

Aus dem Gesamtverstärkungsfaktor wird nun ein verstärkungsäquivalenter Reizzuwachs der Hauptbewegungsrichtung HBR abgeleitet. Der Gesamtverstärkungsfaktor $\widehat{GK}_{Verst}(i_t_PtP_HBR)$ zum Zeitpunkt $t_{HBR}(i_t_PtP_HBR)$, was $\Delta t = 0$ entspricht, wird auf einen Reizzuwachs der Hauptbewegungsrichtung umgerechnet. Durch Umformung der Gleichung 6.1 und Verwendung von $\widehat{GK}_{Verst}^{SP}$ ergibt sich für $\Delta t = 0$:

$$PB_{MBR}^{SP}(f_{Ref}, f_{Ref}, RRZW_{HBR}) = \widehat{GK}_{Verst}^{SP} - 1. \quad (6.14)$$

Über die im Anhang in den Abbildungen C.29, C.32 und C.35 dargestellten Parameterverläufe kann auf einen relativen Reizzuwachswert $RRZW_{HBR}$ der Hauptbewegungsrichtung für die Frequenz $f_{Mask} = f_{Ref}$ rückgeschlossen werden. Dieser Reizzuwachs wird für jeden Zeitwert $t_{PtP,HBR}(j)$ bestimmt und zu dem Wert $a_{PtP,FG,HBR}(t_{PtP,HBR}(j))$ addiert. Es entsteht der verstärkte PtP Verlauf der Hauptbewegungsrichtung $a_{PtP,FG,HBR,Verst}(t_{PtP,HBR})$.

6.3.5 Berechnung eines Gesamtmaskierungsverlaufes

Mit dem verstärkten PtP Verlauf $a_{PtP,FG,HBR,Verst}(t_{PtP,HBR})$ als Referenzsignal werden erneut die Maskierungsfaktoren nach der in Abschnitt 6.3.3 vorgestellten Methode berechnet.

Diesmal werden die Maskierungsfaktoren auf die maskierenden Wirkungen geprüft und nach folgenden Regeln in den resultierenden Maskierungsfaktorverlauf $\hat{G}_{MaskAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t)$ übertragen:

$$\hat{G}_{MaskAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t) = \begin{cases} \hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots) & , \hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots) < 1 \\ 1 & , \hat{G}_{Mask,MBR}^{SP,fit}(\dots) \geq 1 . \end{cases} \quad (6.15)$$

Analog zu den Verstärkungsfaktorverläufen aus Abschnitt 6.3.4 werden die zum Zeitpunkt t_0 des verstärkten PtP Verlaufs der Hauptbewegungsrichtung zugehörigen Maskierungswerte für alle $t_0 - 4s \leq t_{PtP,MBR} \leq t_0$ zu einem Δt -unabhängigen Maskierungsfaktor $\widehat{GK}_{Mask,MBR}^{SP}(f_{Mask})$ zusammengefasst. Dies geschieht nach folgenden Berechnungsansätzen (vgl. Abschnitt 5.4.5):

$$\widehat{GK}_{Mask,MBR}^{SP}(f_{Mask}) = \left(\prod_{k=1}^{k(t_0)} \hat{G}_{MaskAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(k)) \right)^{(1/k(t_0))} \quad (6.16)$$

$$\widehat{GK}_{Mask,MBR}^{SP}(f_{Mask}) = \prod_{k=1}^{k(t_0)} \hat{G}_{MaskAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(k)) \quad (6.17)$$

$$\widehat{GK}_{Mask,MBR}^{SP}(f_{Mask}) = \frac{\sum_{k=1}^{k(t_0)} \hat{G}_{MaskAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(k))}{k(t_0)} \quad (6.18)$$

$$\widehat{GK}_{Mask,MBR}^{SP}(f_{Mask}) = \min \left[\hat{G}_{MaskAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(1)), \dots, \hat{G}_{MaskAnt,MBR}^{SP,fit}(f_{Mask}, \Delta t_0(k(t_0))) \right]. \quad (6.19)$$

Aus den Δt -unabhängigen Maskierungsfaktoren für einen bestimmten Zeitpunkt t_0 einer bestimmten Maskierungsbewegungsrichtung MBR

und Maskierungsfrequenz f_{Mask} werden nachfolgend MBR - und f_{Mask} -unabhängige Gesamtmaskierungsfaktoren für den Zeitpunkt t_0 berechnet. Dazu werden folgende Ansätze zur Berechnung des Gesamtmaskierungsfaktors angewandt (vgl. Abschnitt 5.4.5):

$$\widehat{GK}_{Mask}^{SP} = \left(\prod_{i=1}^{n_{MBR}} \prod_{j=1}^{n_f} \widehat{GK}_{Mask,i}^{SP}(j) \right)^{(1/(n_{MBR} \cdot n_f))} \quad (6.20)$$

$$\widehat{GK}_{Mask}^{SP} = \prod_{i=1}^{n_{MBR}} \prod_{j=1}^{n_f} \widehat{GK}_{Mask,i}^{SP}(j) \quad (6.21)$$

$$\widehat{GK}_{Mask}^{SP} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{MBR}} \sum_{j=1}^{n_f} \widehat{GK}_{Mask,i}^{SP}(j)}{n_{MBR} \cdot n_f} \quad (6.22)$$

$$\widehat{GK}_{Mask}^{SP} = \min \left[\widehat{GK}_{Mask,1}^{SP}(1), \dots, \widehat{GK}_{Mask,n_{MBR}}^{SP}(n_f) \right]. \quad (6.23)$$

Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 6.2 aufgeführten Gleichungskombinationen zur Berechnung des Gesamtmaskierungsfaktors \widehat{GK}_{Mask}^{SP} .

Tabelle 6.2: Verwendete Berechnungskombinationen zur Berechnung des Gesamtmaskierungsfaktors \widehat{GK}_{Mask}^{SP}

Variante	Kombination
1	Gl. 6.6 \rightarrow 6.10 \rightarrow 6.16 \rightarrow 6.20
2	Gl. 6.7 \rightarrow 6.11 \rightarrow 6.17 \rightarrow 6.21
3	Gl. 6.8 \rightarrow 6.12 \rightarrow 6.18 \rightarrow 6.22
4	Gl. 6.9 \rightarrow 6.13 \rightarrow 6.19 \rightarrow 6.23
5	Gl. 6.9 \rightarrow 6.10 \rightarrow 6.19 \rightarrow 6.20
6	Gl. 6.9 \rightarrow 6.11 \rightarrow 6.19 \rightarrow 6.21
7	Gl. 6.9 \rightarrow 6.12 \rightarrow 6.19 \rightarrow 6.22

Der Gesamtmaskierungsfaktor \widehat{GK}_{Mask}^{SP} wird für jeden Zeitpunkt $t_{PIP,HBR}(j)$ der verstärkten Hauptbewegungsrichtung $a_{PIP,FG,HBR,Verst}(t_{PIP,HBR})$ berechnet. Daraus entsteht der Gesamtmaskierungsverlauf $\widehat{GK}_{Mask}^{SP}(t_{PIP,HBR})$, wel-

cher in Kapitel 7 für die Berechnung gewichteter Kennwertverläufe verwendet wird.

7 Kennwerte und Wahrnehmung

Die Methodik des Kapitels 6 wird nachfolgend auf die in Kapitel 4 erfassten Messdaten angewandt. Dies umfasst die Frequenzgewichtung aus Abschnitt 6.1 sowie die Anwendung der Gesamtmaskierungsverläufe aus Abschnitt 6.3. Aus den Beschleunigungsdaten werden in Abschnitt 7.1 Kennwertverläufe generiert und in Abschnitt 7.2 dem Verlauf der Wahrnehmungsdaten aus den Triggerbetätigungen gegenübergestellt. In Abschnitt 7.3 werden Kennwertverläufe aus den Messwerten der Druckmessmatten berechnet, um zusätzlich probandenabhängige Größen wie beispielsweise die aus der Sitzhaltung resultierenden Druckschwerpunkte berücksichtigen zu können. In Abschnitt 7.4 werden aus ausgewählten Kennwertverläufen skalare Kennwerte berechnet und in Abschnitt 7.5 auf Korrelation mit den subjektiven Phänomenstärkenoten geprüft. Aus diesen werden in Kapitel 8 objektive Kennwerte ausgewählt, um schwingungsphänomenabhängige Regressionsmodelle zu formulieren.

7.1 Messdaten der Beschleunigungssensoren

Aus allen am Fahrzeug aufgenommenen Beschleunigungssignalen, die jeweils für die einzelnen Bahnen und Messkampagnen aufgenommen und in Kapitel 4 beschrieben wurden (vgl. Tabelle 4.1), werden Kennwertverläufe berechnet, die einen Erklärungsbeitrag zur Wahrnehmung der Schwingungsphänomene liefern sollen. Diese basieren unter anderem auf den von Griffin diskutierten RMS, RMQ und VDV Werten (Abschnitt 3.2). Zunächst wird jedes Beschleunigungssignal je nach betrachtetem Schwingungsphänomen gemäß der in Abschnitt 6.1 vorgestellten Methode bzgl. der

wahrnehmungsrelevanten Frequenzen gefiltert. Das resultierende frequenzgewichtete Beschleunigungssignal wird hier mit $a_i(t)$ bezeichnet. Dabei steht i für die Messstelle des gerade betrachteten Beschleunigungssignals. Die übrigen Bezüge des betrachteten Signals (Schwingungsphänomen, Bahn und Messkampagne) werden nicht gesondert gekennzeichnet und gehen aus dem Kontext hervor. Anschließend werden aus den $a_i(t)$ Kennwertverläufe nach unterschiedlichen Berechnungsvorschriften erstellt. Dazu wird $a_i(t)$ analog zur Methode aus Abschnitt 6.3.2 in aufeinanderfolgende Maxima und Minima eingeteilt, die zu den Zeitpunkten $t_{Ext}(j)$ auftreten, wobei j als Zähler der Extremwerte verwendet wird. Die Zeitpunkte sind in Abbildung 6.4 (S. 137) durch gestrichelte Linien gekennzeichnet. Die zwischen zwei Extrema liegenden zeitlichen Mittelwerte (Strichpunktlinien) werden mit $t_{PiP}(j)$ bezeichnet. Jedes Zeitintervall von $t_{PiP}(j - 1)$ bis $t_{PiP}(j + 1)$ wird gemäß der in Tabelle 7.1 aufgeführten 14 Ansätze ausgewertet und das jeweilige Resultat dem Zeitpunkt $t_{PiP}(j)$ zugeordnet. Über diese Folge der Peak-to-Peak-Zeitpunkte sind die jeweils resultierenden Kennwertverläufe definiert. Um zusätzlich die Maskierungswirkungen durch andere Schwingungen berücksichtigen zu können, werden weitere Kennwertverläufe generiert. Die in Abschnitt 6.3.5 berechneten Gesamtmaskierungsverläufe sagen noch nichts über die absolut wahrgenommene Stärke eines Schwingungsereignisses zu einem bestimmten Zeitpunkt aus. Dies geschieht erst in Kombination mit geeigneten Kennwertverläufen. Dazu wird jeder Kennwertverlauf aus Tabelle 7.1 bzgl. der schwingungsphänomenabhängigen Hauptbewegungsrichtung an der Fahrersitzkonsole (Messstelle vorne links) berechnet und mit jedem der sieben in Tabelle 6.2 aufgeführten Kombinationen zur Berechnung des Gesamtmaskierungsfaktorverlaufes multipliziert. Somit entstehen zusätzlich 7×14 gewichtete Kennwertverläufe, die mit dem zusätzlichen Index „Mask“ und der verwendeten Gleichungskombinationsnummer aus Tabelle 6.2 gekennzeichnet werden.

Tabelle 7.1: Kennwertverläufe aus den Beschleunigungssignalen

Kennwertverlauf	Bezeichnung	Gleichung
Root-Mean-Square (RMS) Verl.	$a_{RMS,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.1
Root-Mean-Quad (RMQ) Verl.	$a_{RMQ,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.2
Vibration-Dose-Value (VDV) Verl.	$a_{VDV,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.3
Maximum (MAX) Verl.	$a_{MAX,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.4
Minimum (MIN) Verl.	$a_{MIN,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.5
Betragsmaximum (MAXB) Verl.	$a_{MAXB,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.6
Peak-to-Peak (PtP) Verl.	$a_{PtP,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. 6.2
Peak-to-Peak- Δt (PtP- Δt) Verl.	$a_{PtP-dt,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.7
PtP/RMS Verl.	$a_{PtP/RMS,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.8
PtP/RMQ Verl.	$a_{PtP/RMQ,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.9
PtP/VDV Verl.	$a_{PtP/VDV,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.10
MAXB/RMS Verl.	$a_{MAXB/RMS,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.11
MAXB/RMQ Verl.	$a_{MAXB/RMQ,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.12
MAXB/VDV Verl.	$a_{MAXB/VDV,i}(t_{PtP}(j))$	Gl. D.13

7.2 Triggerverlaufsanalyse

Die für jedes Schwingungsphänomen mit den Beschleunigungsdaten simultan erfassten Triggerverläufe (vgl. Kapitel 4) werden den in Abschnitt 7.1 berechneten Kennwertverläufen gegenübergestellt.

Zunächst wird eine charakteristische Funktion definiert, die angibt, ob innerhalb eines gleitenden 1 s-Zeitfensters, das über den Triggerverlauf geschoben wird, der Triggerschalter betätigt wurde. Das Zeitfenster soll die Reaktionszeit eines Probanden berücksichtigen. Im Falle einer Triggerbetätigung wird dem Anfangswert des Zeitfensters eine „1“ zugeordnet, andernfalls eine „0“. Dieser quantisierte Triggerverlauf ist für das „Nicken“ auf Bahn 7 der Messkampagne 1 beispielhaft in Abbildung 7.1 a) und b) verdeutlicht.

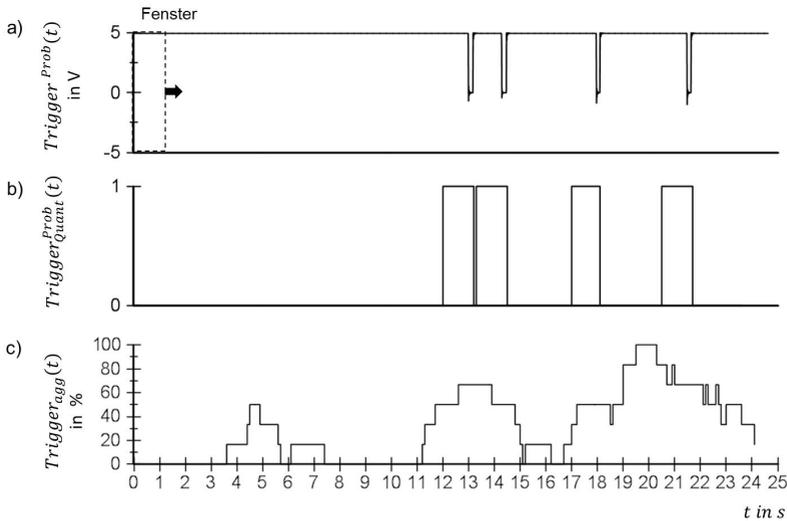


Abbildung 7.1: Erzeugung des globalen Triggerverlaufes: a) Probandenabhängiger Triggerverlauf, b) quantisierter probandenabhängiger Triggerverlauf, c) aggregierter Triggerverlauf

Im nächsten Schritt wird aus den einzelnen probandenabhängigen quantisierten Verläufen für jede Bahn und Messkampagne eines Schwingungsphänomens ein über alle Probanden aggregierter Triggerverlauf gebildet. Dieser gibt an, wie viel Prozent der n_{Prob} Probanden einer Messkampagne innerhalb des vorgegebenen 1 s-Zeitfensters den Triggerschalter betätigt haben.

$$Trigger_{agg}(t) = \frac{\sum_{Prob=1}^{n_{Prob}} Trigger_{Quant}^{Prob}(t)}{n_{Prob}} \cdot 100 . \quad (7.1)$$

$Trigger_{agg}(t)$ gibt insbesondere Auskunft darüber, ob und mit welcher relativen Häufigkeit das betrachtete Schwingungsphänomen von den Probanden wahrgenommen wurde. Er liefert aber keine Informationen über die Stärke der Wahrnehmung. In Abbildung 7.1 c) ist der globale Triggerverlauf für das „Nicken“ auf Bahn 7 der Messkampagne 1 dargestellt.

Die aggregierten Triggerverläufe $Trigger_{agg}(t)$ werden den zugehörigen Kennwertverläufen $a_{KW,i}(t_{PIP})$ aus Abschnitt 7.1 gegenübergestellt. Dabei soll jener Kennwertverlauf identifiziert werden, welcher den aggregierten Triggerverlauf qualitativ am besten nachbildet. Die so ermittelten Kennwertverläufe $a_{KW,i}^*(t_{PIP})$ liefern dann einen formalen Erklärungsbeitrag zum Wahrnehmungsverlauf des betrachteten Schwingungsphänomens.

Für eine Triggerbetätigung muss die Überschreitung der adäquaten Reiz- und Wahrnehmungsschwelle vorliegen. Ein entsprechender Schwellenwert soll für die einzelnen Kennwertverläufe bestimmt werden. Dabei wird implizit vorausgesetzt, dass ein Kennwertverlauf auch die Wahrnehmungsstärke bzgl. des betrachteten Schwingungsphänomens widerspiegelt. Übersteigt der aggregierte Triggerverlauf einen signifikanten Prozentsatz von p_{ξ} , so muss bzgl. des Kennwertverlaufes eine Schwelle $a_{KW,i,Schw}$ überschritten sein. Diese Schwelle wird wie folgt identifiziert: Bei einem signifikanten Triggerereignis zu einem Zeitpunkt t_0 wird im 1 s-Zeitfenster über alle $t_{PIP} \in [t_0, t_0 + 1 \text{ s}]$ der maximale Wert $a_{KW,i,Max}$ des Kennwertverlaufes bestimmt. Dabei ist festzuhalten, dass bei allen untersuchten Kennwertverläufen mindestens ein Kennwert in diesen Zeitintervallen existiert und infolgedessen ein Maximum bestimmt werden kann. Zu jedem Zeitpunkt eines ermittelten Maximums korrespondiert innerhalb einer Sekunde mindestens eine signifikante Triggerbetätigung. Fasst man diese 1 s-Intervalle zusammen, so sind darin sämtliche signifikante Triggerzeitpunkte enthalten. Aus allen $n_{KW,i,Max}$ ermittelten $a_{KW,i,Max}$ wird das Minimum $a_{KW,i,Schw}$ bestimmt und als Schwellenwert des Kennwertverlaufes herangezogen:

$$a_{KW,i,Schw} = \min[a_{KW,i,Max}^1, \dots, a_{KW,i,Max}^{n_{KW,i,Max}}] . \quad (7.2)$$

Jede Überschreitung des Schwellenwertes muss nicht zwangsläufig zu einem signifikanten Triggerereignis korrespondieren. Insofern ist zu prüfen, inwiefern Schwellenüberschreitungen zu Fehlinterpretationen führen. Daher wird die Anzahl $n_{KW,i,Schw}$ der Schwellenüberschreitungen eines Kenn-

wertverlaufes $a_{KW,i}(t_{PIP}) \geq a_{KW,i,Schw}$ ermittelt und für jeden Zeitpunkt der Schwellenüberschreitung geprüft, ob im Zeitraum von +1 s eine signifikante Triggerbetätigung erfolgte. Der Quotient aus $n_{KW,i,Max}$ und $n_{KW,i,Schw}$ wird mit $Q_{Trigger}$ bezeichnet und misst die Güte der Identifizierung signifikanter Wahrnehmungen des betrachteten Schwingungsphänomens:

$$Q_{Trigger} = \frac{n_{KW,i,Max}}{n_{KW,i,Schw}} . \quad (7.3)$$

Diejenigen Kennwertverläufe mit den höchsten $Q_{Trigger}$ -Werten werden in Abschnitt 7.4 herangezogen, um zu prüfen, ob aus diesen auch ein Erklärungsbeitrag für die Phänomenstärkenoten abgeleitet werden kann.

In Tabelle 7.2 sind die anhand der $Q_{Trigger}$ -Werte für jedes Schwingungsphänomen ausgewählten Kennwertverläufe aufgeführt. Aus diesen werden in Abschnitt 7.4 skalare Kennwerte berechnet. Es zeigt sich, dass der beste $Q_{Trigger}$ -Wert beim „Längsstößen“ und „Nicken“ durch einen VDV-Verlauf der Hauptbewegungsrichtung unter Berücksichtigung der Maskierungseffekte nach Berechnungsmethode Nr. 7 aus Tabelle 6.2 erzielt wird (in den Indizes der Kennwertverläufen mit Mask7 gekennzeichnet). Der Gesamtmaskierungsfaktor berechnet sich somit aus dem Mittelwert der minimalen Gewichtungsfaktoren jeder Bewegungsrichtung. Beim „Wanken“ wird die beste Quote durch einen RMS-Verlauf der translatorischen y-Beschleunigung an der Fahrersitzkonsole erzielt. In Abbildung 7.2 ist beispielhaft der aggregierte Triggerverlauf (dünne Linie) und der ausgewählte Kennwertverlauf des „Nickens“ (vgl. Tabelle 7.2, fette Linie) dargestellt.

7.3 Messdaten der Druckmessmatten

Die Druckmessmatten nehmen die zeitabhängige Sitzdruckverteilung eines Probanden auf dem Fahrersitz auf. Dies geschieht durch mehrere in einer Matrix angeordneten Drucksensorelemente.

Tabelle 7.2: Auswahl der Kennwertverläufe zur Berechnung von Einzelkennwerten

Schwingungsphänomen	Kennwertverlauf	Max. $Q_{Trigger}$	Mittleres $Q_{Trigger}$
LS	$a_{VDV, FaSiKo, vl, tx, Mask7}$	98%	63%
NI	$a_{VDV, FaSiKo, ry, Mask7}$	99%	67%
WA	$a_{RMS, FaSiKo, vl, ty}$	91%	53%

Max. $Q_{Trigger}$: maximaler Mittelwert aller Signale einer bestimmten Messkampagne und Bahn

Mittleres $Q_{Trigger}$: Mittelwert über alle Signale

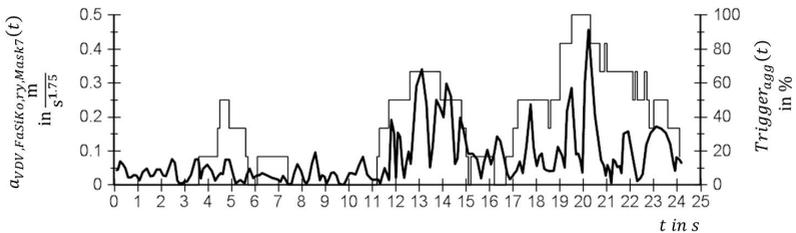


Abbildung 7.2: Gegenüberstellung von aggregiertem Triggerverlauf (dünne Linie) und ausgewähltem Kennwertverlauf (fette Linie) am Beispiel des „Nickens“ auf Bahn 7 der Messkampagne 1

Um einen Bezug der Druckmessmattendaten zu den Ergebnissen aus der Analyse der wahrnehmungsrelevanten Körperbereiche in Abschnitt 4.4.3 herstellen zu können, werden die Drucksensormatrizen der einzelnen Messmatten in verschiedene Analysebereiche aufgeteilt. Die Bereiche und die verwendeten Koordinatensysteme sind in Abbildung 7.3 dargestellt und werden nachfolgend erläutert.

Der insgesamt ausgewertete Bereich der Rückenlehne ist rot umrandet und wird in 11 Bereiche eingeteilt. Die Bereiche 1-3 umfassen den Bereich der Kopfauflagefläche. Der von der Kopfstütze des Sitzes abgedeckte Bereich entspricht dem Bereich 2. Die Bereiche 4-7 umfassen den Bereich des obe-

ren Rückens, wobei 4 und 7 den oberen Bereich der seitlichen Sitzwangen abbilden.

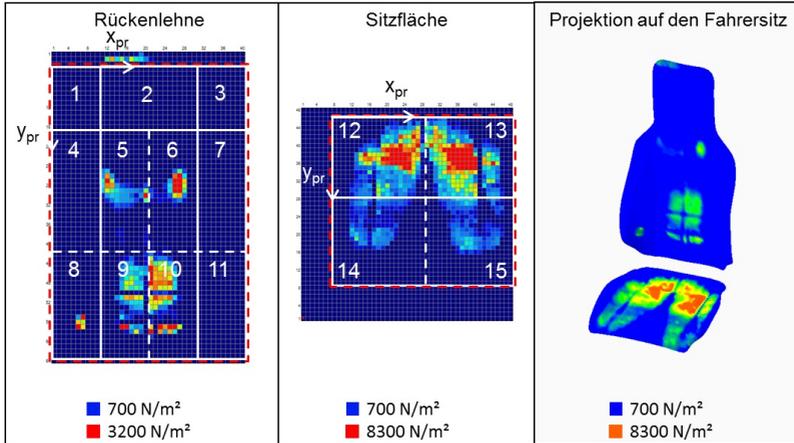


Abbildung 7.3: Einteilung der Druckmessmatten-Sensormatrizen in unterschiedliche Analysebereiche

5 und 6 teilen den mittleren oberen Bereich der Rückenlehne in eine linke und rechte Hälfte ein. Die Bereiche 8-11 umfassen den unteren Rückenbereich. Die außenstehenden Bereiche 8 und 11 bilden den unteren Bereich der Sitzwangen ab. 9 und 10 teilen den mittleren unteren Bereich in eine linke und rechte Hälfte.

Die Sitzfläche wird in vier Bereiche aufgeteilt. Auch hier ist der insgesamt ausgewertete Bereich rot umrandet. Die Bereiche 12 und 13 umfassen den Bereich des Gesäßes. Dieser ist in eine linke und rechte Hälfte aufgeteilt. Die Bereiche 14 und 15 bilden die Oberschenkel ab.

Zur Veranschaulichung der zugeordneten Bereiche sind die Druckdaten im rechten Teil der Abbildung 7.3 auf ein Modell des Fahrersitzes projiziert.

Aus den eingezeichneten Bereichen wird für jedes Schwingungsphänomen eine individuelle Auswahl an Bereichskombinationen zur Berechnung von Kennwerten getroffen. Die Auswahl orientiert sich an den Ergebnissen der

für die Wahrnehmung des jeweiligen Schwingungsphänomens relevanten Bereiche aus Abschnitt 4.4.3. In Tabelle 7.3 sind die ausgewählten Bereichskombinationen für jedes Schwingungsphänomen aufgeführt. Ein „+“ kennzeichnet den Verbund der Teilbereiche zu einem Gesamtbereich. Ein „/“ kennzeichnet das Verhältnis zweier Bereiche. Ein „...“ steht für alle Bereiche zwischen zwei angegebenen Bereichen.

Tabelle 7.3: Übersicht der schwingungsphänomenabhängigen Bereichskombinationen

Nr. (j)	LS	NI	WA
1	1+...+11	1+...+11	1+...+11
2	5+6+9+10	5+6+9+10	5+6+9+10
3	(5+9)/(6+10)	(5+9)/(6+10)	(5+9)/(6+10)
4	5+6	5+6	5+6
5	(5+6)/(9+10)	(5+6)/(9+10)	(5+6)/(9+10)
6	9+10	9+10	9+10
7	12+13	12+13	12+13
8	12/13	12/13	12/13
9	12+...+15	12+...+15	12+...+15
10	14/15	14/15	14/15
11			5+9
12			6+10

LS: Längsstößen

Die Berechnung geeigneter Kennwertverläufe für die einzelnen Körperbereiche orientiert sich an den Arbeiten von Kolich et al. [72], Hartung [46], Mergl [81], Knoll [69], Bitter [22] und Zenk [127] (vgl. Abschnitt 3.1.4).

Für die in Tabelle 7.3 aufgeführten Bereichskombinationen j werden die mittleren Drücke, die resultierenden Lasten (Kräfte), die belasteten Flächen und deren prozentualen Verteilungen berechnet. Zusätzlich wird die Bewegung der Druckschwerpunkte betrachtet. Diese wird bzgl. der zugehörigen

Auslenkungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen ausgewertet. Die Kennwertverläufe und deren Bezeichnungen sind in den Tabellen 7.4 und 7.5 aufgeführt. Die Berechnungsvorschriften sind im Anhang in Abschnitt D.2 angegeben.

Tabelle 7.4: Berechnete Kennwertverläufe aus den Druckmessmattendaten:
Flächen-, Druck- und Kraftverläufe

Kennwertverlauf	Bezeichnung	Gleichung
Belastete Fläche	$AP_{bel}^j(t)$	Gl. D.14
Verhältnis zwischen belasteter Fläche und einer Bezugsfläche	$Q_{AP}^j(t)$	Gl. D.15
Resultierende Kraft	$F(t)^j$	Gl. D.16
Verhältnis zwischen resultierender Kraft und einer Bezugskraft	$Q_F^j(t)$	Gl. D.17
Mittlerer Druck bzgl. der Gesamtfläche des auszuwertenden Bereiches	$pr_{ges}^j(t)$	Gl. D.18
Verhältnis des mittleren Druckes (ges.) bzgl. eines Bezugsdruckes	$Q_{pr,ges}^j(t)$	Gl. D.19
Mittlerer Druck bzgl. der belasteten Fläche des auszuwertenden Bereiches	$pr_{bel}^j(t)$	Gl. D.20
Verhältnis des mittleren Druckes (bel.) bzgl. eines Bezugsdruckes	$Q_{pr,bel}^j(t)$	Gl. D.21

7.4 Berechnung skalarer Kennwerte

Aus den ausgewählten Kennwertverläufen der Beschleunigungssignale (vgl. Tabelle 7.2) werden nachfolgend skalare Kennwerte berechnet und in Abschnitt 7.5 auf deren Korrelation mit den Phänomenstärkenoten untersucht. Aus den Ergebnissen in Abschnitt 4.4.4 geht hervor, dass die Anzahl und Stärke der wahrgenommenen, zu beurteilenden Schwingungsphänomene für die Bewertung ausschlaggebend sind.

Tabelle 7.5: Berechnete Kennwertverläufe aus den Druckmessmattendaten: Druckschwerpunktbewegungen

Kennwertverlauf	Bezeichnung	Gleichung
x_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes	$COP_{x_{pr}}^j(t)$	Gl. D.22
y_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes	$COP_{y_{pr}}^j(t)$	Gl. D.23
Relative x_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Anfangswertes	$COP_{rel,x_{pr},0}^j(t)$	Gl. D.24
Relative y_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Anfangswertes	$COP_{rel,y_{pr},0}^j(t)$	Gl. D.25
Relative x_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Mittelwertes	$COP_{rel,x_{pr},m}^j(t)$	Gl. D.26
Relative y_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Mittelwertes	$COP_{rel,y_{pr},m}^j(t)$	Gl. D.27
Druckschwerpunkts- geschwindigkeit in x_{pr} -Richtung	$vCOP_{x_{pr}}^j(t)$	Gl. D.28
Druckschwerpunkts- geschwindigkeit in y_{pr} -Richtung	$vCOP_{y_{pr}}^j(t)$	Gl. D.29
Druckschwerpunkts- beschleunigung in x_{pr} -Richtung	$aCOP_{x_{pr}}^j(t)$	Gl. D.30
Druckschwerpunkts- beschleunigung in y_{pr} -Richtung	$aCOP_{y_{pr}}^j(t)$	Gl. D.31

Diese Angaben motivieren die verwendeten Auswertungsfunktionale. Dies sind die Berechnung des jeweiligen Summenwertes $Sum_{KW,i}^a$ aus allen Einzelwerten eines Kennwertverlaufes sowie des Integralwertes $Int_{KW,i}^a$ über alle Werte des jeweiligen Kennwertverlaufes und die jeweils auf die Messzeit T bezogenen Durchschnittswerte $SumT_{KW,i}^a$ und $IntT_{KW,i}^a$. Zusätzlich wird der Maximalwert $Max_{KW,i}^a$ berechnet. J bezeichnet die Anzahl aller Einzelwerte des jeweiligen Kennwertverlaufes. Des Weiteren werden die Logarithmen der skalaren Kennwerte berechnet:

$$Sum_{KW,i}^a = \sum_{j=1}^J a_{KW,i}(t_{PIP}(j)) \quad (7.4)$$

$$\text{LnSum}_{KW,i}^a = \ln(\text{Sum}_{KW,i}^a) \quad (7.5)$$

$$\text{SumT}_{KW,i}^a = \frac{\sum_{j=1}^J a_{KW,i}(t_{PtP}(j))}{t_{PtP}(J) - t_{PtP}(1)} \quad (7.6)$$

$$\text{LnSumT}_{KW,i}^a = \ln(\text{LnSumT}_{KW,i}^a) \quad (7.7)$$

$$\text{Int}_{KW,i}^a = \int_{t=t_{PtP}(1)}^{t_{PtP}(J)} a_{KW,i}(t) dt \quad (7.8)$$

$$\text{LnInt}_{KW,i}^a = \ln(\text{Int}_{KW,i}^a) \quad (7.9)$$

$$\text{IntT}_{KW,i}^a = \frac{\int_{t=t_{PtP}(1)}^{t_{PtP}(J)} a_{KW,i}(t) dt}{t_{PtP}(J) - t_{PtP}(1)} \quad (7.10)$$

$$\text{LnIntT}_{KW,i}^a = \ln(\text{IntT}_{KW,i}^a) \quad (7.11)$$

$$\text{Max}_{KW,i}^a = [a_{KW,i}(t_{PtP}(1)), \dots, a_{KW,i}(t_{PtP}(J))] \quad (7.12)$$

$$\text{LnMax}_{KW,i}^a = \ln(\text{Max}_{KW,i}^a) \quad (7.13)$$

Analog werden die skalaren Kennwerte aller Kennwertverläufe der Druckmessmattendaten (DMM) $\text{Sum}_{KW,j}^{DMM}$, $\text{LnSum}_{KW,j}^{DMM}$, $\text{SumT}_{KW,j}^{DMM}$, $\text{LnSumT}_{KW,j}^{DMM}$, $\text{Int}_{KW,j}^{DMM}$, $\text{LnInt}_{KW,j}^{DMM}$, $\text{IntT}_{KW,j}^{DMM}$, $\text{LnIntT}_{KW,j}^{DMM}$, $\text{Max}_{KW,j}^{DMM}$ und $\text{LnMax}_{KW,j}^{DMM}$ für die einzelnen Bereichskombinationen j berechnet.

7.5 Korrelationsanalyse

Die skalaren Kennwerte aus Abschnitt 7.4 werden hinsichtlich ihrer Korrelation zu den transformierten Phänomenstärkenoten untersucht, um geeignete Variablen für ein Regressionsmodell auszuwählen. Die Ausreißer aus den Abbildungen 4.6 bis 4.11 werden dabei aus den Daten entfernt.

Die zur Bewertung der Phänomenstärke verwendete 9-Punkte-Skala weist die beiden Endpunkte „1“ und „9“ auf. Aus diesem Grund wird folgendes Verhalten erwartet: Damit ein Schwingungsphänomen mit mindestens „2“ bewertet wird, muss die Phänomenstärke des Schwingungsphänomens die

Wahrnehmungsschwelle überschreiten. D.h. ein skalarer Kennwert SKW , welcher proportional zur Bewertung der Phänomenstärke ist, muss ebenfalls einen Schwellenwert überschreiten. Das bedeutet, dass es mehrere Werte des Kennwertes gibt, die unterhalb des Schwellenwertes liegen und deren Bewertung mit „1“ ausfällt. Genauso gibt es eine Sättigungsgrenze, oberhalb deren Wert alle Bewertungen mit „9“ ausfallen. Das beschriebene erwartete Verhalten wird durch einen logistischen Ansatz angenähert, welches qualitativ in Abbildung 7.4 a) dargestellt ist.

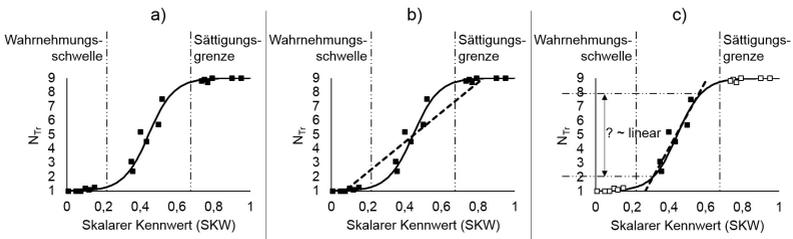


Abbildung 7.4: Logistischer Ansatz zur Berücksichtigung von Wahrnehmungsschwelle und Sättigungsgrenze

Formal wird der logistische Ansatz folgendermaßen ausgedrückt:

$$N_{Tr} = \frac{9 - 1 + 2\bar{\varepsilon}}{\exp(PD \cdot SKW + PE) + 1} + 1 - \bar{\varepsilon} . \quad (7.14)$$

SKW ist der betrachtete skalare Kennwert und PD sowie PE sind die Parameter zur Anpassung der logistischen Funktion an die Daten. Die Konstante $\bar{\varepsilon}$ wird hier auf $\bar{\varepsilon} = 1 \cdot 10^{-10}$ gesetzt.

Eine Korrelationsberechnung drückt jedoch nur den linearen Zusammenhang zweier Größen aus. Bei Nichtberücksichtigung des angenommenen logistischen Verhaltens kann je nach Lage der beobachteten Daten der Fall b) in Abbildung 7.4 auftreten. Dort würde der durch die Korrelationsanalyse angenommene lineare Zusammenhang (gestrichelte Linie) zwischen skalareren Kennwert und Note zu geringen Korrelationswerten führen. Eine Ab-

hilfe wäre die Analyse nur derjenigen Werte, die über der Wahrnehmungsschwelle und unter der Sättigungsgrenze liegen (vgl. Fall c) in Abbildung 7.4). Allerdings ist der Notenbereich, in dem ein näherungsweise linearer Zusammenhang vorliegt, unbekannt.

Um ein logistisches Verhalten in der Korrelationsanalyse zu berücksichtigen, werden die Noten N_{Tr} ein weiteres Mal transformiert, sodass zwischen den logistisch transformierten Noten $N_{Tr,logi}$ und dem betrachteten skalaren Kennwert SKW ein linearer Zusammenhang herrscht:

$$N_{Tr,logi} = \ln \left(\frac{9 - 1 + 2\bar{\epsilon}}{N_{Tr} - 1 + \bar{\epsilon}} - 1 \right) = PD \cdot SKW + PE . \quad (7.15)$$

Abbildung 7.5 verdeutlicht qualitativ die logistische Transformation der Noten.

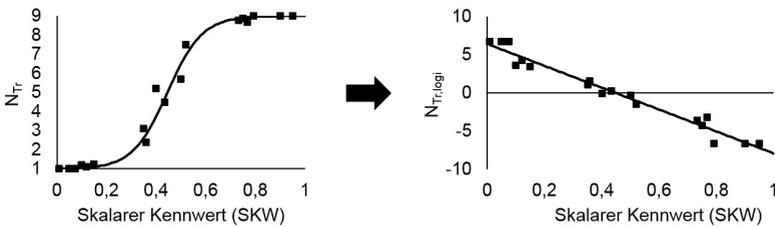


Abbildung 7.5: Logistische Transformation der Noten

Die Korrelationen nach Pearson zwischen den Kennwerten und den logistisch transformierten Noten $N_{Tr,logi}$ bzw. den nicht logistisch transformierten Noten N_{Tr} werden für jedes Schwingungsphänomen der Messkampagnen 1-4 berechnet. Dies erfolgt jeweils bahnspezifisch sowie für alle Bahnen im Aggregat. Die zugehörigen Korrelationskoeffizienten werden mit $r_{logi,B}$, $r_{logi,Ges}$, r_B und r_{Ges} bezeichnet. Der Index „B“ kennzeichnet den Mittelwert der bahnspezifischen Korrelationswerte eines Streckenkollektives und der Index „Ges“ den Korrelationswert bei Betrachtung der Gesamtheit aller Bahnen eines Schwingungsphänomens.

Die skalaren Kennwerte mit den größten Korrelationswerten der Beschleunigungskennwertverläufe und der Druckmessmattenkennwertverläufe sind nachfolgend für alle Schwingungsphänomene in Tabelle 7.6 aufgeführt. Für alle untersuchten Schwingungsphänomene erweisen sich die sitzkonsolebasierten skalaren Kennwerte als aussagekräftig für die Erklärung der wahrgenommenen Phänomenstärke. Diese Ergebnisse sind konsistent mit Resultaten von Maier bzgl. des in [78] untersuchten Diskomforts.

Tabelle 7.6: Skalare Kennwerte mit den größten Korrelationswerten für jedes Schwingungsphänomen SP

SP	Kennwert	r_B	r_{Ges}	$r_{logi,B}$	$r_{logi,Ges}$
LS	$LnSumT_{VDV, FaSiKo, vl, tx, Mask7}^a$	0,75	0,65	-0,76	-0,65
LS	$LnSumT_{QAP:Gesäß/Sitz}^{DMM}$	0,60	0,55	-0,60	-0,55
NI	$LnIntT_{VDV, FaSiKo, ry, Mask7}^a$	0,65	0,73	-0,65	-0,74
NI	$Max_{QF:Rückenlehne/Gesamt}^{DMM}$	0,42	0,59	-0,42	-0,60
WA	$SumT_{RMS, FaSiKo, vl, ty}^a$	0,41	0,15	-0,41	-0,17
WA	$LnMax_{QAP:Gesäß/Sitz}^{DMM}$	0,66	0,65	-0,66	-0,60

Es zeigt sich, dass die Korrelationen zwischen den skalaren Kennwerten und $N_{Tr,logi}$ betragsmäßig tendenziell geringfügig größer ausfallen als zwischen den Kennwerten und N_{Tr} . Beim „Wanken“ gibt es eine Ausnahme beim aufgeführten skalaren Kennwert, der aus den Druckmessmattenkennwertverläufen bestimmt wurde. Des Weiteren ist festzustellen, dass sich für die Korrelationen der einzelnen Bahnen unterschiedliche Parameterwerte für PD und PE ergeben. Diese beeinflussen die Steigung und den y-Achsenabschnitt des Zusammenhanges zwischen skalarem Kennwert SKW und den logistisch transformierten Noten $N_{Tr,logi}$. Entsprechendes gilt für den Zusammenhang zwischen SKW und N_{Tr} . Beispielhaft sind in Tabelle 7.7 die unterschiedlichen Werte für PD und PE des „Längsstoßens“ aufgeführt.

Tabelle 7.7: Parameterwerte PD und PE in Abhängigkeit der Bahn am Beispiel des „Längsstoßens“ anhand des skalaren Kennwertes

$$\text{LnSum}T_{VDV, FaSiKo, vl, tx, Mask7}^a$$

Bahnr.	PD	PE
2	-2,27	1,54
5	-3,07	0,55
9	-2,33	1,35
10	-2,63	2,39
11	-5,16	5,32
12	-3,69	1,29

Die Abhängigkeit der Parameterwerte von der gefahrenen Strecke muss in der Erstellung der Regressionsmodelle durch entsprechende Gewichtungsfaktoren berücksichtigt werden.

8 Modellerstellung und Validierung

8.1 Regressionsmodellerstellung

Die Regressionsmodelle zur Vorhersage der um die Ausreißer reduzierten Phänomenstärkenoten der Messkampagnen 1-4 werden für jedes der drei betrachteten Schwingungsphänomene nach folgendem Ansatz erstellt:

$$\begin{aligned} \hat{N}_{Tr,logi} &= \underline{G}_1^B \odot (b_0 + b_1 \cdot \underline{SKW}_1 + b_2 \cdot \underline{SKW}_2 + \dots) + \underline{G}_2^B & (8.1) \\ &= \begin{bmatrix} \underline{G}_1^{B=1} (b_0 + b_1 \cdot \underline{SKW}_1^{B=1} + b_2 \cdot \underline{SKW}_2^{B=1} + \dots) + \underline{G}_2^{B=1} \\ \underline{G}_1^{B=2} (b_0 + b_1 \cdot \underline{SKW}_1^{B=2} + b_2 \cdot \underline{SKW}_2^{B=2} + \dots) + \underline{G}_2^{B=2} \\ \vdots \\ \underline{G}_1^{B=n_B} (b_0 + b_1 \cdot \underline{SKW}_1^{B=n_B} + b_2 \cdot \underline{SKW}_2^{B=n_B} + \dots) + \underline{G}_2^{B=n_B} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Der Operator „ \odot “ bezeichnet die komponentenweise Multiplikation bei auftretenden Vektoren. Der innerhalb der runden Klammern liegende Teil des Modells mit den Eingangskennwerten \underline{SKW}_i beschreibt den bahnunabhängigen Teil des Zusammenhanges zwischen den skalaren Kennwerten und den logistisch transformierten Noten $\underline{N}_{Tr,logi}$. Aus Abschnitt 7.5 ist bekannt, dass die Steigungen und y-Achsenabschnitte des gesamten Noten-Kennwert-Zusammenhanges auch von spezifischen Parametern der jeweils gefahrenen Bahn B abhängen. Die Gesamtzahl der gefahrenen Bahnen eines Schwingungsphänomens wird mit n_B bezeichnet. Mit Hilfe der bahnabhängigen Gewichtungsfaktoren \underline{G}_1^B und \underline{G}_2^B werden skalare Kennwertgewichtung und Regressionskonstante an die jeweilige Bahn angepasst. Die bahnunabhängigen Parameter b_i und die bahnabhängigen Gewichtungsfaktoren \underline{G}_1^B und \underline{G}_2^B werden im ersten Schritt durch iterative

Minimierung der Residuenquadratsumme geschätzt. Durch Anwendung von Gleichung 8.2 ergeben sich aus den vorhergesagten logistischen Noten $\hat{N}_{Tr,logi}$ die vorhergesagten Noten \hat{N}_{Tr} :

$$\hat{N}_{Tr} = \frac{9 - 1 + 2\bar{\epsilon}}{\exp(\hat{N}_{Tr,logi}) + 1} + 1 - \bar{\epsilon}. \quad (8.2)$$

Die bahnabhängigen Gewichtungsfaktoren \underline{G}_1^B und \underline{G}_2^B beeinflussen den Verlauf der logistischen Funktion. Ein steilerer Anstieg der Funktion bedeutet, dass eine geringe Änderung der skalaren Kennwerte zu einer großen Änderung der Phänomenstärkenote führt. Der Anstieg korrespondiert somit mit der Sensitivität der Probanden gegenüber einer Veränderung der skalaren Kennwerte. Die Verschiebung der logistischen Funktion nach links oder rechts entspricht einer Veränderung der Wahrnehmungsschwellenlage.

Die in das Modell aufgenommenen skalaren Kennwerte werden durch eine schrittweise Regression und Plausibilitätsprüfung ausgewählt. Dabei wird der in Tabelle 7.6 bestimmte Beschleunigungskennwert als erste Eingangsgröße vorgegeben. Die für jedes Schwingungsphänomen ausgewählten skalaren Kennwerte sind in Tabelle 8.1 aufgeführt. Die iterativ bestimmten Gewichtungsfaktoren sind für jedes Schwingungsphänomen und die zugehörigen Bahnen in Tabelle 8.2 zusammengefasst. Die ausgewählten skalaren Kennwerte umfassen ausschließlich Beschleunigungskennwerte.

Tabelle 8.1: Ausgewählte skalare Kennwerte (SKW) für die Regressionsmodelle der Schwingungsphänomene *SP*

SP	SKW-Nr.	SKW
LS	1	$LnSumT_{VDV, FaSiKo, vl, tx, Mask7}^a$
NI	1	$LnIntT_{VDV, FaSiKo, ry, Mask7}^a$
WA	1	$SumT_{RMS, FaSiKo, vl, ty}^a$

Tabelle 8.2: Bahnabhängige Gewichtungsfaktoren für alle Bahnen des Streckenkollektives der jeweiligen Schwingungsphänomene

Bahn	LS		NI		WA	
	G_1^B	G_2^B	G_1^B	G_2^B	G_1^B	G_2^B
2	0,96	1,07	3,52	-0,87	-	-
4	-	-	1,34	0,09	-	-
5	1,33	-1,16	-	-	-	-
7	-	-	3,21	-0,90	0,39	1,35
8.1+8.2	-	-	4,14	0,98	-	-
8.3	-	-	2,76	-0,50	-0,29	0,51
9	1,00	0,91	-	-	-	-
10	1,14	1,88	-	-	-	-
11	2,22	4,30	3,07	0,27	0,17	2,46
12	1,61	0,58	-	-	-	-

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass keine plausiblen skalaren Kennwerte aus den Druckmessmattendaten gefunden werden konnten, deren zusätzliche Informationen zu einer Verbesserung des jeweiligen Regressionsmodells geführt hätten. Für das „Längsstößen“ ergibt sich somit das Regressionsmodell nach Gleichung 8.3, für das „Nicken“ nach Gleichung 8.4 und für das „Wanken“ nach Gleichung 8.5:

$$\hat{N}_{Tr,logi}^{LS} = G_1^B \cdot (-2,31 \cdot LnSumT_{VDV, FaSiKo, vl, tx, Mask7}^a + 0,45) + G_2^B. \quad (8.3)$$

$$\hat{N}_{Tr,logi}^{NI} = G_1^B \cdot (-0,69 \cdot LnIntT_{VDV, FaSiKo, ry, Mask7}^a - 1,68) + G_2^B. \quad (8.4)$$

$$\hat{N}_{Tr,logi}^{WA} = G_1^B \cdot (-3,07 \cdot SumT_{RMS, FaSiKo, vl, ty}^a + 9,88) + G_2^B. \quad (8.5)$$

Tabelle 8.3: Statistiken zu den Regressionsmodellen

Statistik	LS	NI	WA
R^2	0,68	0,65	0,40
R^2_{korr}	0,68	0,64	0,38
Freiheitsgrade	161	151	78
F-Wert Regr. (p)	115,40 (<0,01)	93,47 (<0,01)	17,33 (<0,01)
t-Wert b_1 (p)	17,95 (<0,01)	13,22 (<0,01)	71,35 (<0,01)

In Tabelle 8.3 sind die zugehörigen Statistiken der Regressionsmodelle aufgeführt. Anhand der F-Werte ist ersichtlich, dass alle Modelle signifikant sind. Die einzelnen Regressionskoeffizienten erweisen sich nach einem t-Test bei allen Modellen ebenfalls als signifikant. In den Abbildungen 8.1 bis 8.3 sind in a) die einzelnen Noten $N_{Tr,logi}$ über den aus den Regressionsmodellen vorhergesagten Noten $\hat{N}_{Tr,logi}$ aufgetragen. In b) sind die zugehörigen Mittelwerte zu jeder Bahn und Messkampagne mit den Standardabweichungen als Linien dargestellt. In c) und d) sind jeweils entsprechende Grafiken für die in die eins bis neuner Notenskala rücktransformierten Noten N_{Tr} und \hat{N}_{Tr} dargestellt. Um auch die Wahrnehmungsstärke auf anderen als den getesteten Bahnen auf der Basis der Schätzmodelle bewerten zu können, werden im nächsten Schritt die bahnabhängigen Gewichtungsfaktoren \underline{G}_1^B und \underline{G}_2^B hinsichtlich einer Korrelation zu den berechneten skalaren Kennwerten aller Beschleunigungen analysiert. Es zeigt sich, dass die Gewichtungsfaktoren zu den skalaren Kennwerten der gleich- und wechselseitigen Achsbeschleunigungen (vgl. Gleichungen 4.4 bis 4.7) korrelieren. Die Korrelationskoeffizienten sind in Tabelle 8.4 aufgeführt.

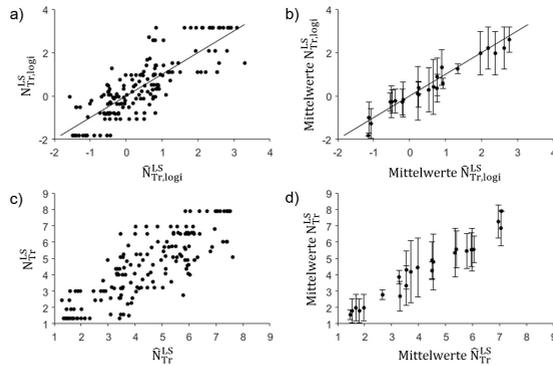


Abbildung 8.1: Regressionsmodell des „Längsstoßes“ mit geschätzten bahnhängigen Gewichtungsfaktoren: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten

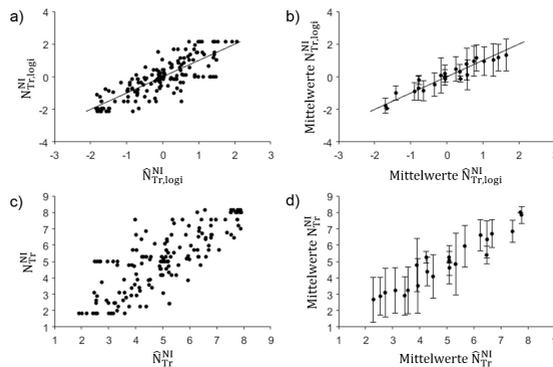


Abbildung 8.2: Regressionsmodell des „Nickens“ mit geschätzten bahnhängigen Gewichtungsfaktoren: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten

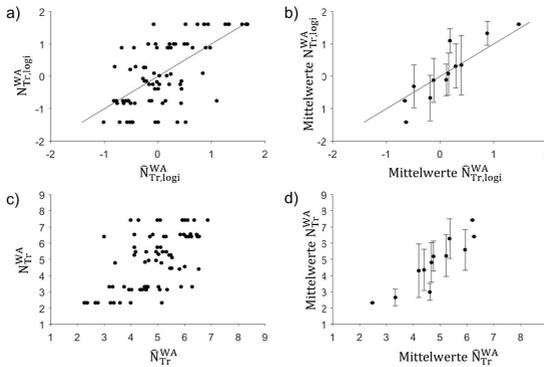


Abbildung 8.3: Regressionsmodell des „Wankens“ mit geschätzten bahnhabhängigen Gewichtungsfaktoren: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnhabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnhabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten

Tabelle 8.4: Korrelierende Achsbeschleunigungskennwerte SKW_{Achs}

SP	G_i^B	SKW_{Achs}	r
LS	G_1^B	$LnIntT_{VDV,HA,ws,tz}^a$	0,88
LS	G_2^B	$LnIntT_{VDV,HA,gs,tz}^a$	0,89
NI	G_1^B	$LnSumT_{VDV/PtP,HA,gs,tz}^a$	0,66
NI	G_2^B	$LnSumT_{VDV/PtP,VA,gs,tz}^a$	0,35
WA	G_1^B	$LnIntT_{VDV,VA,ws,tz}^a$	0,69
WA	G_2^B	$LnIntT_{VDV,HA,ws,tz}^a$	0,96

Bei einer gegebenen Fahrzeugkonfiguration bilden die Achsbeschleunigungen die Streckencharakteristiken am ehesten nach und sind somit am besten geeignet, um die Gewichtungsfaktoren anzunähern. Einzig die G_2^B des „Nicks“ weisen niedrige Korrelationswerte auf.

Tabelle 8.5: Werte der Regressionskoeffizienten $b_{erw,i}$ zu den erweiterten Regressionsmodellen

$b_{erw,i}$	LS	NI	WA
$b_{erw,0}$	3,08	8,98	-3,14
$b_{erw,1}$	1,02	-3,28	5,18
$b_{erw,2}$	1,22	-1,48	-6,79
$b_{erw,11}$	-0,96	-1,66	0,59
$b_{erw,10}$	-3,78	2,99	1,63

Um die bahnhabhängigen Gewichtungsfaktoren \underline{G}_1^B und \underline{G}_2^B durch die in Tabelle 8.4 aufgeführten Kennwerte zu ersetzen, wird die Regressionsgleichung um die Achskennwerte $SKW_{Achs,1}$ und $SKW_{Achs,2}$ sowie die zusätzlichen Regressionskoeffizienten b_{A10} , b_{A11} , b_{A20} und b_{A21} erweitert. Durch Ausmultiplizieren der Gleichung ergeben sich die Regressionskoeffizienten $b_{erw,i}$ des erweiterten Regressionsmodells:

$$\begin{aligned}
 \hat{N}_{Tr,logi} &= (b_{A11} \cdot SKW_{Achs,1} + b_{A10}) \odot (b_0 + b_1 \cdot SKW_1 + b_2 \cdot SKW_2 + \dots) \\
 &\quad + (b_{A21} \cdot SKW_{Achs,2} + b_{A20}) \\
 &= b_{erw,1} \cdot SKW_{Achs,1} + b_{erw,2} \cdot SKW_{Achs,2} \\
 &\quad + b_{erw,11} \cdot SKW_{Achs,1} \odot SKW_1 + b_{erw,10} \cdot SKW_1 \\
 &\quad + b_{erw,21} \cdot SKW_{Achs,1} \odot SKW_2 + b_{erw,20} \cdot SKW_2 \\
 &\quad + \dots + b_{erw,0} .
 \end{aligned} \tag{8.6}$$

Die aus der Schätzung resultierenden Werte der $b_{erw,i}$ der erweiterten Regressionsmodelle sind für alle drei Schwingungsphänomene in Tabelle 8.5 angegeben. Die zugehörigen Regressionsstatistiken sind in Tabelle 8.6 aufgeführt. Die vollständigen Regressionsgleichungen sind im Anhang in Abschnitt E.1 zu finden. Die korrigierten Bestimmtheitsmaße R_{korr}^2 der erweiterten Modelle fallen für alle Schwingungsphänomene im Vergleich

Tabelle 8.6: Statistiken zu den erweiterten Regressionsmodellen

Statistik	LS	NI	WA
R^2	0,61	0,55	0,33
R^2_{korrr}	0,60	0,54	0,30
F-Wert Regr. (p)	61,64 (<0,01)	45,41 (<0,01)	9,188 (<0,01)
t-Wert $b_{\text{erw},1}$ (p)	4,09 (<0,01)	-0,69 (0,49)	5,22 (<0,11)
t-Wert $b_{\text{erw},2}$ (p)	5,42 (<0,01)	-1,14 (0,25)	-4,15 (<0,01)
t-Wert $b_{\text{erw},11}$ (p)	-4,42 (<0,01)	-0,97 (0,34)	1,10 (0,27)
t-Wert $b_{\text{erw},10}$ (p)	-10,98 (<0,01)	-0,65 (0,52)	1,34 (0,18)

zu den Modellen mit den geschätzten Gewichtungsfaktoren geringer aus.

Alle Modelle weisen einen signifikanten F-Wert auf. Allerdings weisen die t-Tests zu den einzelnen Regressionskoeffizienten beim „Nicken“ und zum Teil beim „Wanken“ keine signifikanten Werte auf. Die zugehörigen Grafiken mit den dargestellten Notenverteilungen sind im Anhang in den Abbildungen E.1 bis E.3 zu finden.

8.2 Validierung

Zur Erstellung der Regressionsmodelle wurden Daten aus den Messkampagnen 1 bis 4 verwendet. Zur Validierung der Modelle werden nun die Daten der Messkampagnen 5 und 6 herangezogen. Dazu werden die Residuen der Validierungsdaten bestimmt. Als Residuum wird die Differenz zwischen real vergebener Note und der vorhergesagten Note bezeichnet. Es wird für

die logistisch transformierten Noten und die Noten im 1-9 Skalenbereich berechnet:

$$e_{r,logi} = N_{Tr,logi} - \hat{N}_{Tr,logi} \quad (8.7)$$

$$e_r = N_{Tr} - \hat{N}_{Tr} . \quad (8.8)$$

Ein t-Test zu den Residuen ergibt für alle Validierungsdaten bis auf das erweiterte Modell des „Nickens“ eine signifikante Abweichung der Mittelwerte von dem Wert „0“, welcher bei einer idealen Verteilung der Validierungsnoten um die Regressionsgerade auftreten würde. Die Wahrscheinlichkeitswerte $p_{t,val}$ sind in Tabelle 8.7 dargestellt.

Tabelle 8.7: Ergebnisse des t-Tests zur Validierung der Regressionsmodelle

	LS	NI	WA
$p_{t,val,G}$	<0,01	0,02	<0,01
$p_{t,val,erw}$	<0,01	0,50	<0,01
$p_{t,val,Verkehr}$	<0,01	<0,01	<0,01
$p_{t,val,G,logi}$	<0,01	0,01	<0,01
$p_{t,val,erw,logi}$	<0,01	0,53	<0,01
$p_{t,val,Verkehr,logi}$	<0,01	0,01	<0,01

Für die logistisch transformierten Noten wird der Index „logi“ angehängt. Für die Regressionsmodelle mit Gewichtungsfaktoren wird der Index „G“ und für die erweiterten Regressionsmodelle der Index „erw“ verwendet. Bei den erweiterten Regressionsmodellen sind zusätzlich die Wahrscheinlichkeitswerte der Streckenabschnitte mit Verkehrseinfluss außerhalb des EVZ Wörth's aufgeführt und mit dem Index „Verkehr“ gekennzeichnet.

Aufgrund der signifikanten t-Tests wird zusätzlich geprüft, wie viel Prozent der Residuen der Validierungsdaten im Bereich zwischen dem 5. und 95. Perzentil der Residuen der Testdaten liegen. Die jeweiligen Prozentsätze $p_{95,val}$ sind in Tabelle 8.8 dargestellt.

Tabelle 8.8: Prozentsätze zur Validierung der Regressionsmodelle

	LS	NI	WA
$p_{95, val, G}$	0,82	0,83	0,77
$p_{95, val, erw}$	0,88	0,84	0,82
$p_{95, val, Verkehr}$	0,69	0,93	0,97
$p_{95, val, G, logi}$	0,89	0,84	0,72
$p_{95, val, erw, logi}$	0,90	0,90	0,82
$p_{95, val, Verkehr, logi}$	0,84	0,88	0,91

Die Lage der Validierungsdaten wird beispielhaft am „Längsstoßen“ diskutiert. Sie ist in Abbildung 8.4 dargestellt. Die Abbildungen für die anderen Schwingungsphänomene sind im Anhang in den Abbildungen E.4 und E.5 zu finden.

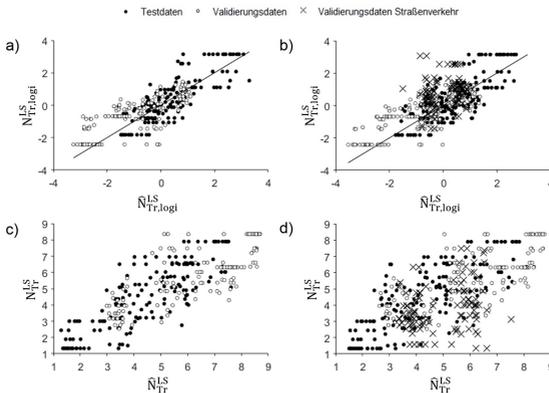


Abbildung 8.4: Lage der Test- und Validierungsdaten des „Längsstoßens“ mit: a) logistisch transformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, b) logistisch transformierte Noten des erweiterten Modells, c) rücktransformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, d) rücktransformierte Noten des erweiterten Modells

In a) sind die logistisch transformierten Noten des Regressionsmodells mit den geschätzten Gewichtungsfaktoren dargestellt, in b) die entsprechenden

logistisch transformierten Noten des erweiterten Regressionsmodells. In c) und d) sind die entsprechenden Noten in der Skala von 1-9 dargestellt.

Die signifikanten Ergebnisse des t-Tests zeigen, dass die Validierungsdaten nicht symmetrisch um die Regressionsgerade verteilt sind. Trotzdem ergeben sich hohe Prozentsätze von 84% bis 90% der im Bereich des 5. bis 95. Perzentsils liegenden Residuen der Validierungsdaten im logistisch transformierten Bereich des „Längsstoßens“. Der Großteil dieser Validierungsdaten liegt somit bzgl. der Regressionsgerade im Streubereich der Testdaten. Im rücktransformierten 1-9 Skalenbereich fallen die Prozentsätze geringer aus. Die Verschiebung des Mittelwertes der Validierungsdaten im Vergleich zur Lage der Regressionsgeraden kann aus der Beteiligung von Laienbewertern in den Messkampagnen 5-6 resultieren, da das Modell ausschließlich aus Expertenbewertungen der Messkampagnen 1-4 entstanden ist. Wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert, weisen Experten und Laien unterschiedliche interne Referenzen auf. Wahrnehmung und Bewertung können zwischen Experten und Laien infolgedessen unterschiedlich ausfallen.

Die logistischen Werte der Validierungsstrecken im Straßenverkehr weichen beim „Längsstoßen“ nur gering von den Werten der Validierungsdaten der im Modell berücksichtigten Strecken ab. Die Auswirkung ist dagegen bei Verwendung der Notenskala von 1-9 größer.

Aufgrund der höheren Bestimmtheitsmaße der Modelle mit geschätzten Gewichtungsfaktoren und der beim „Nicken“ nicht signifikant unsymmetrisch um die Regressionsgerade liegenden Validierungsdaten wird die Anwendung dieser Modelle für Bahnen mit vorliegenden Gewichtungsfaktoren empfohlen.

Für neuartige Bahnen können die erweiterten Regressionsmodelle mit den in Tabelle 8.4 angegebenen Achskennwerten verwendet werden. Hier ergeben sich allerdings geringere Bestimmtheitsmaße. Bzgl. der Beurteilung neuer Bahnen erweisen sich nach Betrachtung der Residuenlage die Modelle für alle untersuchten Schwingungsphänomene aufgrund der hohen Prozentsätze als geeignet.

8.3 Ableitung von Zielwerten

Mit Hilfe der Akzeptanzgrenzen aus Tabelle 4.8 (S. 74) und den Vorhersagemodellen aus dem vorherigen Abschnitt ist es nun möglich, Zielwerte für die Entwicklung neuer Fahrzeuge abzuleiten. Dazu wird jeweils die Obergrenze für die Akzeptanzbewertung „gut“ als Zielbewertung herangezogen. Somit ergeben sich folgende einzuhaltende Grenzwerte für eine „gute“ Bewertung des jeweiligen Schwingungsphänomens:

$$\hat{N}_{Tr}^{LS} \leq 3,63 \quad (8.9)$$

$$\hat{N}_{Tr}^{NI} \leq 3,88 \quad (8.10)$$

$$\hat{N}_{Tr}^{WA} \leq 4,11 . \quad (8.11)$$

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Objektivierung der drei fahrkomfortrelevanten Schwingungsphänomene „Längsstoßen“, „Nicken“ und „Wanken“ durchgeführt, um den subjektiv wahrgenommenen Fahrkomfort zukünftiger LKW-Entwicklungen noch vor der Prototypenphase anhand von Mess- oder Simulationsergebnissen vorhersagen zu können und kennwertbezogene Zielwerte für die Entwicklung ableiten zu können.

Dazu wurden im ersten Schritt auf unterschiedlichen Streckenkollektiven mit mehreren Probanden Messfahrten in unterschiedlich konfigurierten LKW durchgeführt. Dabei wurden Beschleunigungsdaten an verschiedenen Fahrzeugmessstellen und die Druckverteilungen zwischen Fahrer und Fahrersitz aufgenommen. Zusätzlich wurden die drei Schwingungsphänomene für jede LKW-Konfiguration und Strecke von jedem Probanden u.a. hinsichtlich ihrer Phänomenstärke und dessen Akzeptanz bewertet. Dies erfolgte anhand von Absolutbewertungen. Die wahrnehmungsrelevanten Zeitpunkte der Messsignale wurden durch die Probanden mit Hilfe eines Triggers markiert. Anhand der Bewertungen der Probanden konnte gezeigt werden, dass die Anzahl und die Stärke der bewerteten Ereignisse für die Bewertung der Phänomenstärke ausschlaggebend sind.

Zur systematischen Analyse der Messdaten wurden auf dem Ride Simulator der Daimler AG mit weiteren Probandenstudien die wahrnehmungsrelevanten Frequenzbereiche jedes Schwingungsphänomens bestimmt. Aus den Untersuchungen konnten für jedes Schwingungsphänomen Frequenzgewichtungskurven abgeleitet werden.

Des Weiteren wurde der Einfluss von einzelnen in den Bewegungsrichtungen variierten Schwingungsereignissen (Maskierungsereignissen), die vor oder gleichzeitig zu einem zu bewertenden Schwingungsphänomereignis (Referenzereignis) auftreten, auf die Wahrnehmungsstärke des Referenzereignisses untersucht. Hierbei wurden der zeitliche Abstand zum Referenzereignis, die Frequenz und die Amplitude des Maskierungsereignisses variiert. Die Untersuchungen wurden ebenfalls für jedes Schwingungsphänomen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass der Einfluss des Maskierungsereignisses auf die Wahrnehmungsstärke des Referenzereignisses mit zunehmendem zeitlichen Abstand ein abklingendes Verhalten hat. Dabei können sowohl monotone als auch nicht monotone Verläufe auftreten. Der Einfluss ist ebenfalls abhängig von der Amplitude, der Bewegungsrichtung und der Frequenz des Maskierungsereignisses. So können je nach Schwingungsphänomen und Bewegungsrichtung verstärkende und abschwächende (maskierende) Wirkungen auftreten. Dieser Einfluss wird durch amplituden-, frequenz-, zeitabstands- und bewegungsrichtungsabhängige Maskierungsfaktoren ausgedrückt. Mit Hilfe weiterer Untersuchungen wurde eine Berechnungsvorschrift abgeleitet, um einen Gesamtmaskierungsfaktor berechnen zu können.

Neben dem Einfluss einzelner Schwingungsereignisse wurde der Einfluss von LKW-Innengeräuschaufnahmen und Fahrbahnvideos auf die Bewertungsabgabe der Phänomenstärke am Simulator untersucht. Es konnte kein visueller Einfluss nachgewiesen werden. Der akustische Einfluss erweist sich dagegen als signifikant, ist aber im Vergleich zum Einfluss der Maskierungsereignisse gering.

Mit Hilfe der genannten Gewichtungsfaktoren wurde eine Methode entwickelt, um verstärkende und maskierende Effekte vorangegangener oder gleichzeitig auftretender Schwingungsereignisse in der Auswertung von Messsignalen zu berücksichtigen. Dazu wird eine Schwingung als Aneinanderreihung einzelner aufeinanderfolgender Schwingungsereignisse interpretiert. Jedes der drei betrachteten Schwingungsphänomene zeichnet

sich durch eine Hauptbewegungsrichtung aus, ohne die das Schwingungsphänomen nicht auftreten kann. Mit Anwendung der Frequenzgewichtungskurven lassen sich die für das jeweilige Schwingungsphänomen wahrnehmungsrelevanten Signalbestandteile isolieren. Zu jedem Zeitpunkt des resultierenden Signals der Hauptbewegungsrichtung lassen sich mit Hilfe der Gewichtungsfaktoren die Einflüsse auf die Wahrnehmungsstärke aller vorher oder gleichzeitig auftretender Schwingungsereignisse aller Raumrichtungen bestimmen und in der Auswertung berücksichtigen.

Aus den resultierenden Signalen konnten Kennwertverläufe berechnet werden, welche die Triggerbetätigung der Probanden und somit die zeitlich abhängige Wahrnehmung des jeweiligen Schwingungsphänomens abbilden. Aus diesen Kennwertverläufen wurden skalare Kennwerte berechnet, die für jede der beurteilten Strecken mit den subjektiven Phänomenstärkenoten korrelieren. Dabei erwiesen sich Beschleunigungskennwerte an der Fahrersitzkonsole als am besten geeignet. Die Steigungen und y-Achsenabschnitte der Korrelationszusammenhänge zeigten dabei eine Abhängigkeit von der jeweils gefahrenen Strecke.

Mit Hilfe der korrelierenden skalaren Kennwerte und der Berücksichtigung von streckenabhängigen Gewichtungsfaktoren zur Anpassung der unterschiedlichen Steigungen und y-Achsenabschnitte wurden Regressionsmodelle zur Vorhersage der Phänomenstärkenoten entwickelt. Die streckenabhängigen Gewichtungsfaktoren konnten mit Kennwerten aus den gemessenen Achsbeschleunigungen der jeweiligen Strecke korreliert werden, sodass für jedes Schwingungsphänomen ein von einer spezifischen Strecke unabhängiges Regressionsmodell erarbeitet werden konnte. Mit Hilfe der Modelle zur Vorhersage der Phänomenstärkebewertung und der auf die Phänomenstärkebewertungen bezogenen Akzeptanzbewertungen konnten schließlich Zielwerte für ein gutes Fahrkomfortverhalten bzgl. jedes der drei Schwingungsphänomene abgeleitet werden.

9.2 Ausblick

Zur Verbesserung der Vorhersagegüte der Regressionsmodelle sind ergänzende Untersuchungen von maskierenden Einflüssen notwendig, die auf die Wahrnehmungsstärke eines Schwingungsphänomens wirken. Dies umfasst insbesondere den Einfluss der Erwartungshaltung eines Probanden durch dessen visuelle Erfassung der befahrenen Strecke. Optisch relevante Fahrbahnunebenheiten können die erwartete Fahrzeugreaktion und damit die Bewertung beeinflussen. Die Korrelation der streckenspezifischen Gewichtungsfaktoren der Regressionsmodelle mit den Achskennwerten, welche die Streckencharakteristik bei konstanter Fahrzeugkonfiguration grob nachbilden, geben einen Hinweis darauf.

Des Weiteren können zusätzliche Untersuchungen zum Einfluss der Innenraumgeräusche im Fahrzeug und dessen Integration in die Vorhersagemodelle eine weitere Verbesserung der Vorhersagegüte herbeiführen.

Ein zusätzliches Verbesserungspotential in der Prognosegüte der Modelle bietet die Berücksichtigung von Einflüssen durch den Straßenverkehr. Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Differenzen zwischen den modellbasierten Phänomenstärkenoten und den real vergebenen Noten auf Strecken im öffentlichen Straßenverkehr größer ausfallen, als auf den Teststrecken. Hierzu sind weitere Untersuchungen erforderlich, welche den Einfluss von Straßenverkehr und Fahraufgabe auf die Phänomenstärkebewertung bestimmen. Mit der systematischen Analyse dieser Einflüsse kann das Vorhersagemodell an weitere reale Gegebenheiten im Straßenverkehr angepasst werden.

A Anhang zu Kapitel 4

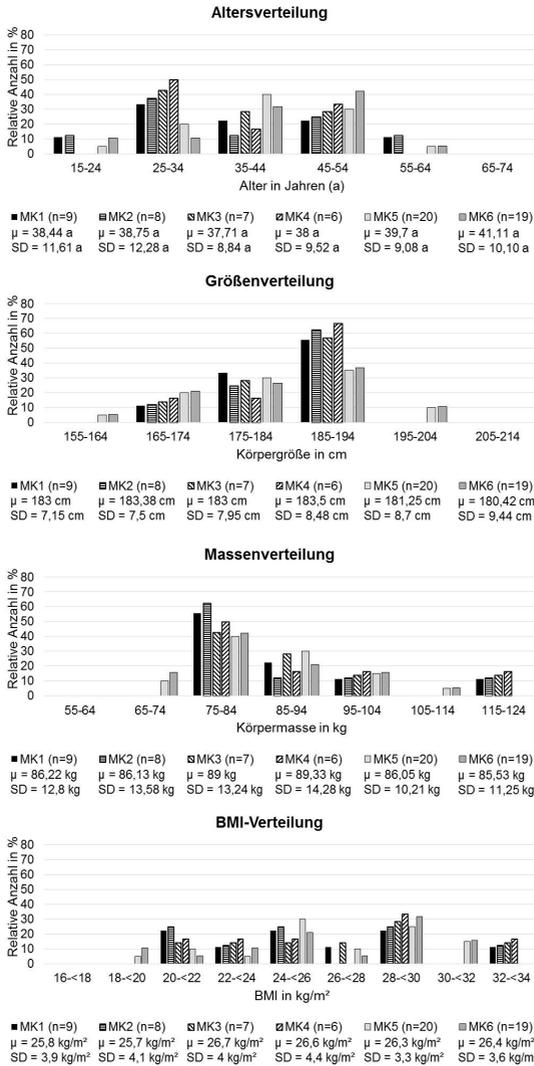


Abbildung A.1: Darstellung der messkampagnenabhängigen Probandenkollektive in Abhängigkeit des Alters, der Körpermasse, der Körpergröße und des BMIs (alle Probanden sind männlich)

Tabelle A.1: Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Variantenfahrzeugs bzgl. des „Längsstößens“

Bahn	MK	μ	<i>SD</i>	Med.	Min	Max
2	1	7,89	0,00	7,89	7,89	7,89
2	2	5,38	1,01	5,16	4,00	6,50
2	3	5,53	1,03	5,14	4,07	6,57
2	4	2,54	0,65	2,72	1,33	3,00
5	1	5,34	1,48	5,43	3,21	6,95
5	2	4,30	1,17	4,18	2,75	6,50
5	3	3,34	1,19	3,24	1,57	4,90
5	4	1,79	0,74	1,33	1,33	3,00
9	1	4,52	1,68	4,61	2,27	6,95
9	2	3,90	1,38	4,00	1,50	6,50
9	3	2,69	0,92	2,57	1,57	4,07
9	4	1,80	0,65	1,61	1,33	3,00
9	5	5,99	1,67	5,45	3,35	8,35
9	6	3,64	0,90	3,47	2,53	6,32
10	1	7,25	1,02	7,89	5,43	7,89
10	2	5,54	1,32	6,09	2,75	6,50
10	3	5,55	0,81	5,57	4,57	6,57
10	4	1,79	0,74	1,33	1,33	3,00
10	5	8,08	0,48	8,35	6,95	8,35
10	6	5,90	0,83	6,32	2,93	6,32
11	1	6,85	1,09	6,95	5,08	7,89
11	2	4,89	1,12	5,25	3,17	6,50
11	3	4,99	1,82	5,74	1,57	6,57
11	4	1,98	0,82	1,61	1,33	3,00
11	5	7,69	0,81	8,35	6,35	8,35
11	6	5,84	0,79	6,32	3,95	6,32
12	1	4,78	1,71	5,08	1,33	6,95
12	2	4,18	1,90	4,83	1,50	6,50
12	3	4,26	0,54	4,07	3,57	4,90
12	4	1,98	0,82	1,61	1,33	3,00

12	5	6,02	1,02	6,02	4,35	8,35
12	6	4,14	0,86	3,95	2,76	5,64
21	5	4,62	1,64	4,85	2,23	7,48
21	6	3,53	1,17	3,16	1,58	6,32
24	5	4,43	1,81	4,16	1,35	7,35
24	6	3,32	1,36	3,16	1,58	6,32
27	5	4,16	1,40	3,98	1,35	7,48
27	6	3,39	1,29	3,16	1,58	6,32

MK: Messkampagne, μ : Mittelwert

SD: Standardabweichung, *Med.*: Median

Tabelle A.2: Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Referenzfahrzeugs bzgl. des „Längsstoßens“

Bahn	MK	μ	SD	Med.	Min	Max
2	1	2,89	1,95	2,27	1,33	5,08
2	2	2,69	1,07	2,93	1,50	4,00
2	3	2,48	1,07	2,40	1,57	4,43
2	4	2,54	0,65	2,72	1,33	3,00
5	1	2,33	0,78	2,27	1,33	3,52
5	2	2,04	0,66	1,86	1,50	3,17
5	3	1,93	0,46	1,57	1,57	2,57
5	4	1,79	0,74	1,33	1,33	3,00
9	1	1,45	0,37	1,33	1,33	2,43
9	2	1,76	0,49	1,50	1,50	2,75
9	3	1,57	0,00	1,57	1,57	1,57
9	4	1,80	0,65	1,61	1,33	3,00
9	5	1,70	0,87	1,35	1,35	4,85
9	6	1,75	0,42	1,58	1,58	2,76
10	1	2,38	0,87	2,27	1,33	4,14
10	2	2,01	0,88	1,50	1,50	4,00
10	3	1,77	0,54	1,57	1,57	3,00
10	4	1,79	0,74	1,33	1,33	3,00
10	5	2,23	0,73	2,23	1,35	3,98
10	6	2,93	0,83	3,16	1,58	4,42
11	1	3,32	1,36	3,21	2,27	6,25
11	2	2,70	0,79	2,75	1,50	4,00
11	3	2,64	0,83	2,57	1,57	3,71
11	4	1,98	0,82	1,61	1,33	3,00
11	5	3,29	1,42	3,35	1,35	6,02
11	6	3,28	1,07	3,47	1,58	4,74
12	1	2,38	1,01	2,97	1,33	3,52
12	2	2,24	1,00	1,50	1,50	4,00
12	3	2,36	0,83	2,40	1,57	3,57
12	4	1,98	0,82	1,61	1,33	3,00

12	5	2,22	1,27	1,35	1,35	6,02
12	6	2,18	1,02	1,58	1,58	4,74

MK: Messkampagne, μ : Mittelwert

SD: Standardabweichung, *Med.*: Median

Tabelle A.3: Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Variantenfahrzeugs bzgl. des „Nickens“

Bahn	MK	μ	<i>SD</i>	Med.	Min	Max
2	1	6,29	1,44	6,63	3,11	7,56
2	2	4,75	0,99	4,63	3,07	6,08
2	3	5,26	1,14	5,29	3,38	7,19
2	4	2,88	1,17	2,76	1,83	5,00
2	5	5,46	1,32	6,16	3,35	6,65
2	6	3,96	1,00	4,07	1,89	5,16
4	1	4,77	1,62	4,78	2,79	7,56
4	2	4,08	1,33	3,89	2,25	6,36
4	3	4,91	1,63	4,88	3,38	8,14
4	4	2,92	1,17	2,86	1,83	5,00
4	5	4,29	1,40	4,18	1,70	6,65
4	6	3,97	0,89	4,07	2,71	5,16
7	1	5,40	0,53	5,70	4,78	5,70
7	2	6,61	0,97	6,85	5,13	8,00
7	3	6,34	1,12	6,51	5,29	8,14
7	4	3,23	1,40	2,55	1,83	5,00
11	1	5,94	1,27	5,97	3,85	7,56
11	2	5,06	0,92	4,55	4,17	6,36
11	3	4,84	1,88	5,29	2,43	7,33
11	4	3,10	1,50	2,47	1,83	5,00
11	5	5,78	1,18	6,65	3,35	6,65
11	6	4,07	1,00	4,07	1,89	5,16
83	1	3,23	1,41	2,93	2,00	4,78
83	2	3,51	1,65	3,21	2,25	6,85
83	3	5,13	1,42	5,29	2,43	7,19
83	4	2,68	1,37	1,83	1,83	5,00
83	5	3,81	1,25	3,52	1,70	6,65
83	6	3,33	1,02	3,53	1,89	5,16
812	1	6,50	1,18	6,63	3,85	7,56
812	2	7,76	0,68	8,00	6,08	8,00

812	3	7,84	0,51	8,14	7,00	8,14
812	4	5,00	0,00	5,00	5,00	5,00
22	5	3,46	1,42	3,35	1,70	6,65
22	6	3,27	1,06	2,98	1,89	5,16
26	5	3,12	1,15	2,94	1,70	5,94
26	6	3,10	1,11	2,98	1,89	5,16
28	5	3,84	1,08	3,68	2,32	6,65
28	6	2,98	0,95	2,98	1,89	5,16

MK: Messkampagne, μ : Mittelwert

SD: Standardabweichung, *Med.*: Median

Tabelle A.4: Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Referenzfahrzeugs bzgl. des „Nickens“

Bahn	MK	μ	<i>SD</i>	Med.	Min	Max
2	1	2,91	1,01	2,79	2,00	4,38
2	2	3,10	0,77	3,30	2,25	4,17
2	3	3,55	1,14	3,86	2,43	5,29
2	4	2,88	1,17	2,76	1,83	5,00
2	5	2,88	0,96	2,69	1,70	5,00
2	6	3,00	0,83	2,98	1,89	4,34
4	1	2,62	1,54	2,00	2,00	6,63
4	2	2,76	0,67	2,25	2,25	3,89
4	3	3,48	1,37	3,38	2,43	6,24
4	4	2,92	1,17	2,86	1,83	5,00
4	5	2,68	1,01	2,41	1,70	4,67
4	6	2,75	0,86	2,71	1,89	4,34
7	1	3,54	1,41	3,85	2,00	4,78
7	2	4,42	1,43	4,55	2,25	6,08
7	3	4,17	1,44	4,33	2,43	6,24
7	4	3,23	1,40	2,55	1,83	5,00
11	1	3,22	0,99	3,11	2,00	5,17
11	2	3,03	0,81	3,21	2,25	4,17
11	3	3,55	0,83	3,86	2,43	4,33
11	4	3,10	1,50	2,47	1,83	5,00
11	5	3,09	1,30	2,69	1,70	6,65
11	6	3,25	0,92	3,53	1,89	5,16
83	1	2,31	0,53	2,00	2,00	2,93
83	2	2,72	0,93	2,25	2,25	4,71
83	3	3,14	1,43	2,43	2,43	6,24
83	4	2,68	1,37	1,83	1,83	5,00
83	5	2,63	1,14	2,01	1,70	5,00
83	6	2,47	0,95	1,89	1,89	5,16
812	1	5,65	1,15	5,33	4,78	7,56
812	2	4,73	1,65	4,36	3,07	7,04

812	3	5,51	0,96	5,69	3,57	6,24
812	4	5,00	0,00	5,00	5,00	5,00

MK: Messkampagne, μ : Mittelwert

SD: Standardabweichung, *Med.*: Median

Tabelle A.5: Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Variantenfahrzeugs bzgl. des „Wankens“

Bahn	MK	μ	<i>SD</i>	Med.	Min	Max
7	1	5,60	1,25	6,56	3,33	6,56
7	2	6,31	0,31	6,43	5,61	6,43
7	3	6,29	1,22	6,57	4,57	7,43
7	4	2,67	0,52	2,33	2,33	3,33
7	5	4,66	1,29	5,60	1,85	5,60
7	6	4,42	1,24	5,42	1,68	5,42
11	1	4,83	1,22	4,94	3,33	6,56
11	2	5,24	1,28	5,33	3,14	6,43
11	3	4,31	1,65	3,14	3,14	7,43
11	4	2,33	0,00	2,33	2,33	2,33
11	5	3,70	1,30	3,73	1,85	5,60
11	6	3,44	1,14	3,55	1,68	5,42
83	1	5,30	1,19	5,48	3,33	6,56
83	2	4,36	1,27	4,79	3,14	6,43
83	3	7,06	0,97	7,43	4,86	7,43
83	4	3,00	0,52	3,33	2,33	3,33
83	5	3,80	1,25	3,73	1,85	5,60
83	6	4,29	1,15	4,18	1,68	5,42
23	5	1,85	0,00	1,85	1,85	1,85
23	6	1,83	0,64	1,68	1,68	4,49
25	5	2,25	0,67	1,85	1,85	3,73
25	6	2,80	1,23	2,43	1,68	5,42

MK: Messkampagne, μ : Mittelwert*SD*: Standardabweichung, *Med.*: Median

Tabelle A.6: Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Referenzfahrzeugs bzgl. des „Wankens“

Bahn	MK	μ	<i>SD</i>	Med.	Min	Max
7	1	5,00	1,18	4,94	3,33	6,56
7	2	5,22	1,32	5,33	3,14	6,43
7	3	4,90	1,01	5,29	3,14	6,00
7	4	2,67	0,52	2,33	2,33	3,33
7	5	4,35	1,22	4,60	1,85	5,60
7	6	4,55	1,03	4,67	1,68	5,42
11	1	4,88	1,53	5,48	3,33	6,56
11	2	3,73	0,78	3,14	3,14	4,79
11	3	4,06	1,02	3,86	3,14	5,71
11	4	2,33	0,00	2,33	2,33	2,33
11	5	3,37	1,17	3,40	1,85	5,60
11	6	3,85	1,27	3,93	1,68	5,42
83	1	4,62	1,02	4,41	3,33	6,56
83	2	3,75	1,08	3,14	3,14	5,77
83	3	4,99	1,81	5,71	3,14	7,43
83	4	3,00	0,52	3,33	2,33	3,33
83	5	3,88	1,28	3,91	1,85	5,60
83	6	3,21	1,56	2,43	1,68	5,42

MK: Messkampagne, μ : Mittelwert

SD: Standardabweichung, *Med.*: Median

Tabelle A.7: Schwingungsphänomenabhängige Medianwerte der Phänomenstärkenoten zu jedem Akzeptanzkriterium

Akzeptanz- kriterium	LS	Nicken	Wanken
sehr gut	1,58	2,25	1,85
gut	3	3,21	3,33
akzeptabel	4,25	4,55	4,89
gerade noch akzeptabel	5,74	5,69	5,6
unakzeptabel	7,07	7,19	5,42

LS: Längsstößen

B Anhang zu Kapitel 5

B.1 Anhang zu Abschnitt 5.2

Tabelle B.1: Schwingungsphänomenabhängige untersuchte Frequenzen

Längsstößen	Nicken	Wanken
0,79 Hz	0,88 Hz	0,63 Hz
1,59 Hz	1,67 Hz	1,12 Hz
2,38 Hz	2,5 Hz	1,64 Hz
3,16 Hz	3,33 Hz	2,19 Hz
3,97 Hz	4,17 Hz	2,75 Hz
4,76 Hz	5,05 Hz	3,29 Hz
5,56 Hz	5,88 Hz	3,85 Hz
6,33 Hz	6,67 Hz	4,39 Hz
7,14 Hz	7,58 Hz	4,95 Hz
7,94 Hz	8,47 Hz	5,49 Hz
8,62 Hz	9,26 Hz	6,1 Hz
9,43 Hz	10,2 Hz	6,58 Hz
10,2 Hz	10,87 Hz	7,14 Hz
11,11 Hz	11,9 Hz	7,69 Hz
11,9 Hz	12,5 Hz	8,33 Hz
12,5 Hz	13,51 Hz	8,93 Hz
13,51 Hz	14,71 Hz	9,43 Hz
14,29 Hz	15,15 Hz	10 Hz
15,15 Hz	16,13 Hz	10,42 Hz
15,63 Hz	16,67 Hz	11,11 Hz

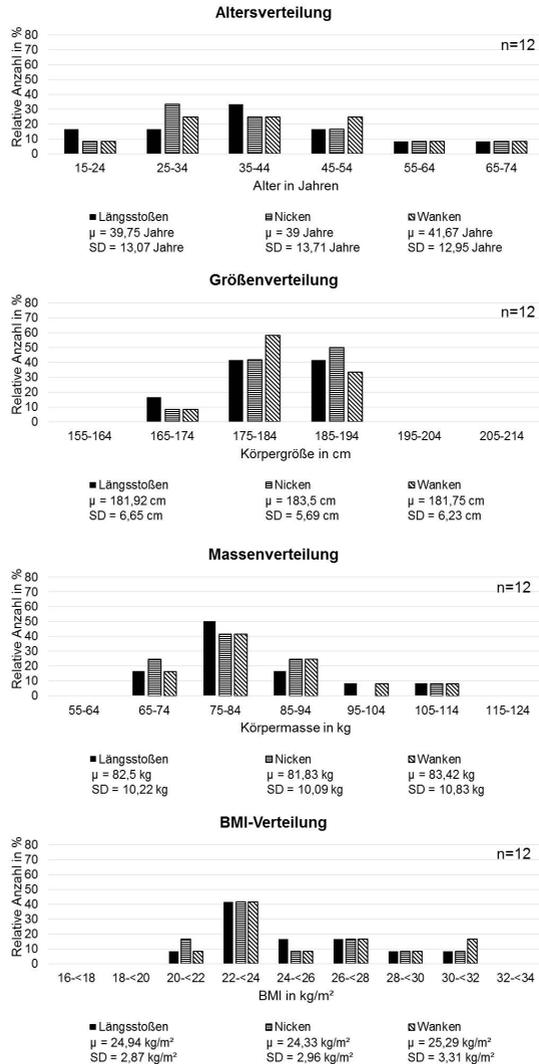


Abbildung B.1: Darstellung der schwingungsphänomenabhängigen Probandenkollektive in Abhängigkeit des Alters, der Körpermasse, der Körpergröße und des BMIs (alle Probanden sind männlich)

Tabelle B.2: Deskriptive Statistiken zu den frequenzabhängigen Bewertungen der Phänomenstärke des Längsstößens

f in Hz	μ	<i>SD</i>	Med.	u. Qu.	o. Qu.	Min	Max	<i>p_{WC}</i>
0,79	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
1,59	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
2,38	3,50	2,50	3,50	1,00	6,00	1,00	7,00	0,0156
3,16	5,25	2,77	6,00	3,00	7,50	1,00	8,00	0,0039
3,97	6,42	1,24	7,00	6,00	7,00	3,00	8,00	0,0005
4,76	6,33	0,89	6,50	6,00	7,00	4,00	7,00	0,0005
5,56	5,92	0,90	6,00	5,50	6,50	4,00	7,00	0,0005
6,33	5,17	1,03	5,00	5,00	6,00	3,00	7,00	0,0005
7,14	4,75	1,22	5,00	3,50	6,00	3,00	6,00	0,0005
7,94	4,08	1,24	4,00	3,00	5,00	3,00	7,00	0,0005
8,62	3,75	1,42	3,50	3,00	4,50	2,00	7,00	0,0005
9,43	2,92	1,51	3,00	2,00	3,50	1,00	6,00	0,0020
10,2	2,42	1,38	2,00	1,50	3,00	1,00	5,00	0,0039
11,11	2,00	1,48	1,50	1,00	2,00	1,00	5,00	0,0313
11,9	1,92	1,51	1,00	1,00	2,00	1,00	5,00	0,0625
12,5	1,33	0,89	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	0,5000
13,51	1,25	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,0000
14,29	1,25	0,87	1,00	1,00	1,00	1,00	4,00	1,0000
15,15	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
15,63	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000

μ : Mittelwert, *SD*: Standardabweichung, *Qu.*: Quartil, *Med.*: Median

p_{WC}: Wahrscheinlichkeitswert eines zweiseitigen

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests

Tabelle B.3: Deskriptive Statistiken zu den frequenzabhängigen Bewertungen der Phänomenstärke des Nickens

f in Hz	μ	<i>SD</i>	Med.	u. Qu.	o. Qu.	Min	Max	<i>p_{WC}</i>
0,88	2,17	1,70	2,00	1,00	2,50	1,00	7,00	0,0156
1,67	3,42	1,56	3,00	2,50	4,00	1,00	7,00	0,0010
2,5	4,67	0,89	4,50	4,00	5,00	4,00	7,00	0,0005
3,33	4,83	0,83	5,00	4,50	5,00	3,00	6,00	0,0005
4,17	4,67	1,30	5,00	4,00	5,00	2,00	7,00	0,0005
5,05	3,67	1,44	4,00	2,50	4,50	1,00	6,00	0,0010
5,88	2,75	1,48	3,00	1,50	3,50	1,00	6,00	0,0039
6,67	1,75	1,48	1,00	1,00	2,00	1,00	6,00	0,1250
7,58	1,58	1,24	1,00	1,00	1,50	1,00	5,00	0,2500
8,47	1,08	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,0000
9,26	1,08	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,0000
10,2	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
10,87	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
11,9	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
12,5	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
13,51	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
14,71	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
15,15	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
16,13	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
16,67	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000

μ : Mittelwert, *SD*: Standardabweichung, *Qu.*: Quartil, *Med.*: Median

p_{WC}: Wahrscheinlichkeitswert eines zweiseitigen

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests

Tabelle B.4: Deskriptive Statistiken zu den frequenzabhängigen Bewertungen der Phänomenstärke des Wankens

f in Hz	μ	<i>SD</i>	Med.	u. Qu.	o. Qu.	Min	Max	<i>p_{WC}</i>
0,63	2,58	1,08	3,00	2,00	3,00	1,00	5,00	0,0020
1,12	4,17	1,59	4,00	3,00	5,50	2,00	7,00	0,0005
1,64	4,83	1,11	5,00	4,00	5,50	3,00	7,00	0,0005
2,19	4,50	1,31	5,00	3,00	5,00	3,00	7,00	0,0005
2,75	3,83	1,85	4,00	2,00	5,00	1,00	7,00	0,0010
3,29	3,25	1,96	2,50	2,00	4,50	1,00	7,00	0,0020
3,85	3,17	1,99	2,50	1,50	5,00	1,00	6,00	0,0039
4,39	2,58	1,51	2,50	1,00	3,50	1,00	5,00	0,0078
4,95	2,33	1,72	1,50	1,00	3,00	1,00	6,00	0,0313
5,49	2,08	1,83	1,00	1,00	2,50	1,00	7,00	0,0625
6,1	1,83	1,34	1,00	1,00	2,00	1,00	5,00	0,0625
6,58	1,33	0,65	1,00	1,00	1,50	1,00	3,00	0,2500
7,14	1,17	0,39	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	0,5000
7,69	1,08	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,0000
8,33	1,08	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,0000
8,93	1,08	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,0000
9,43	1,08	0,29	1,00	1,00	1,00	1,00	2,00	1,0000
10	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
10,42	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000
11,11	1,00	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,0000

μ : Mittelwert, *SD*: Standardabweichung, *Qu.*: Quartil, *Med.*: Median

p_{WC}: Wahrscheinlichkeitswert eines zweiseitigen

Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests

B.2 Anhang zu Abschnitt 5.3

Tabelle B.5: Variationsstufen der niederfrequenten Maskierungsparameter beim “Längsstoßen“

Δt in s	$A_{Mask,MBR}$	MBR	$f_{Mask,MBR}$ in Hz
0	$0,5 * A_{Ref,HBR}$	+tx	2
0,5825	$1 * A_{Ref,HBR}$	+ty	
1,0825	$2 * A_{Ref,HBR}$	+tz	
1,5825	$4 * A_{Ref,HBR}$	+rx	
2,5825		+ry	
4,5825		+rz	

Tabelle B.6: Variationsstufen der höherfrequenten Maskierungsparameter beim “Längsstoßen“

Δt in s	$A_{Mask,MBR}$	MBR	$f_{Mask,MBR}$ in Hz
0	$0,5 * A_{Ref,HBR}$	+tx	4,5
0,265	$1 * A_{Ref,HBR}$	+ty	
0,765	$2 * A_{Ref,HBR}$	+tz	
1,265	$3 * A_{Ref,HBR}$	+rx	
2,265		+ry	
4,265		+rz	

Tabelle B.7: Variationsstufen der Maskierungsparameter beim “Wanken“

Δt in s	$A_{Mask,MBR}$	MBR	$f_{Mask,MBR}$ in Hz
0	$0,5 * A_{Ref,HBR}$	+tx	1
0,245	$1 * A_{Ref,HBR}$	-ty	
0,49	$2 * A_{Ref,HBR}$	+tz	
0,98	$3 * A_{Ref,HBR}$	+rx	
1,48		+ry	
1,98		-rz	

Tabelle B.8: Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 1

Versuchs- nummer	Δt	$A_{Mask,MBR}$	MBR
1	1. Abstand	1. Niveau	tx
2	1. Abstand	1. Niveau	ty
3	1. Abstand	1. Niveau	tz
4	1. Abstand	1. Niveau	rx
5	1. Abstand	1. Niveau	ry
6	1. Abstand	1. Niveau	rz
7	1. Abstand	2. Niveau	tx
8	1. Abstand	2. Niveau	ty
9	1. Abstand	2. Niveau	tz
10	1. Abstand	2. Niveau	rx
11	1. Abstand	2. Niveau	ry
12	1. Abstand	2. Niveau	rz
13	1. Abstand	3. Niveau	tx
14	1. Abstand	3. Niveau	ty
15	1. Abstand	3. Niveau	tz
16	1. Abstand	3. Niveau	rx
17	1. Abstand	3. Niveau	ry
18	1. Abstand	3. Niveau	rz
19	1. Abstand	4. Niveau	tx
20	1. Abstand	4. Niveau	ty
21	1. Abstand	4. Niveau	tz
22	1. Abstand	4. Niveau	rx
23	1. Abstand	4. Niveau	ry
24	1. Abstand	4. Niveau	rz

Tabelle B.9: Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 2

Versuchs- nummer	Δt	$A_{Mask,MBR}$	MBR
25	2. Abstand	1. Niveau	tx
26	2. Abstand	1. Niveau	ty
27	2. Abstand	1. Niveau	tz
28	2. Abstand	1. Niveau	rx
29	2. Abstand	1. Niveau	ry
30	2. Abstand	1. Niveau	rz
31	2. Abstand	2. Niveau	tx
32	2. Abstand	2. Niveau	ty
33	2. Abstand	2. Niveau	tz
34	2. Abstand	2. Niveau	rx
35	2. Abstand	2. Niveau	ry
36	2. Abstand	2. Niveau	rz
37	2. Abstand	3. Niveau	tx
38	2. Abstand	3. Niveau	ty
39	2. Abstand	3. Niveau	tz
40	2. Abstand	3. Niveau	rx
41	2. Abstand	3. Niveau	ry
42	2. Abstand	3. Niveau	rz
43	2. Abstand	4. Niveau	tx
44	2. Abstand	4. Niveau	ty
45	2. Abstand	4. Niveau	tz
46	2. Abstand	4. Niveau	rx
47	2. Abstand	4. Niveau	ry
48	2. Abstand	4. Niveau	rz

Tabelle B.10: Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 3

Versuchs- nummer	Δt	$A_{Mask,MBR}$	MBR
49	3. Abstand	1. Niveau	tx
50	3. Abstand	1. Niveau	ty
51	3. Abstand	1. Niveau	tz
52	3. Abstand	1. Niveau	rx
53	3. Abstand	1. Niveau	ry
54	3. Abstand	1. Niveau	rz
55	3. Abstand	2. Niveau	tx
56	3. Abstand	2. Niveau	ty
57	3. Abstand	2. Niveau	tz
58	3. Abstand	2. Niveau	rx
59	3. Abstand	2. Niveau	ry
60	3. Abstand	2. Niveau	rz
61	3. Abstand	3. Niveau	tx
62	3. Abstand	3. Niveau	ty
63	3. Abstand	3. Niveau	tz
64	3. Abstand	3. Niveau	rx
65	3. Abstand	3. Niveau	ry
66	3. Abstand	3. Niveau	rz
67	3. Abstand	4. Niveau	tx
68	3. Abstand	4. Niveau	ty
69	3. Abstand	4. Niveau	tz
70	3. Abstand	4. Niveau	rx
71	3. Abstand	4. Niveau	ry
72	3. Abstand	4. Niveau	rz

Tabelle B.11: Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 4

Versuchs- nummer	Δt	$A_{Mask,MBR}$	MBR
73	4. Abstand	1. Niveau	tx
74	4. Abstand	1. Niveau	ty
75	4. Abstand	1. Niveau	tz
76	4. Abstand	1. Niveau	rx
77	4. Abstand	1. Niveau	ry
78	4. Abstand	1. Niveau	rz
79	4. Abstand	2. Niveau	tx
80	4. Abstand	2. Niveau	ty
81	4. Abstand	2. Niveau	tz
82	4. Abstand	2. Niveau	rx
83	4. Abstand	2. Niveau	ry
84	4. Abstand	2. Niveau	rz
85	4. Abstand	3. Niveau	tx
86	4. Abstand	3. Niveau	ty
87	4. Abstand	3. Niveau	tz
88	4. Abstand	3. Niveau	rx
89	4. Abstand	3. Niveau	ry
90	4. Abstand	3. Niveau	rz
91	4. Abstand	4. Niveau	tx
92	4. Abstand	4. Niveau	ty
93	4. Abstand	4. Niveau	tz
94	4. Abstand	4. Niveau	rx
95	4. Abstand	4. Niveau	ry
96	4. Abstand	4. Niveau	rz

Tabelle B.12: Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 5

Versuchs- nummer	Δt	$A_{Mask,MBR}$	MBR
97	5. Abstand	1. Niveau	tx
98	5. Abstand	1. Niveau	ty
99	5. Abstand	1. Niveau	tz
100	5. Abstand	1. Niveau	rx
101	5. Abstand	1. Niveau	ry
102	5. Abstand	1. Niveau	rz
103	5. Abstand	2. Niveau	tx
104	5. Abstand	2. Niveau	ty
105	5. Abstand	2. Niveau	tz
106	5. Abstand	2. Niveau	rx
107	5. Abstand	2. Niveau	ry
108	5. Abstand	2. Niveau	rz
109	5. Abstand	3. Niveau	tx
110	5. Abstand	3. Niveau	ty
111	5. Abstand	3. Niveau	tz
112	5. Abstand	3. Niveau	rx
113	5. Abstand	3. Niveau	ry
114	5. Abstand	3. Niveau	rz
115	5. Abstand	4. Niveau	tx
116	5. Abstand	4. Niveau	ty
117	5. Abstand	4. Niveau	tz
118	5. Abstand	4. Niveau	rx
119	5. Abstand	4. Niveau	ry
120	5. Abstand	4. Niveau	rz

Tabelle B.13: Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 6

Versuchs- nummer	Δt	$A_{Mask,MBR}$	MBR
121	6. Abstand	1. Niveau	tx
122	6. Abstand	1. Niveau	ty
123	6. Abstand	1. Niveau	tz
124	6. Abstand	1. Niveau	rx
125	6. Abstand	1. Niveau	ry
126	6. Abstand	1. Niveau	rz
127	6. Abstand	2. Niveau	tx
128	6. Abstand	2. Niveau	ty
129	6. Abstand	2. Niveau	tz
130	6. Abstand	2. Niveau	rx
131	6. Abstand	2. Niveau	ry
132	6. Abstand	2. Niveau	rz
133	6. Abstand	3. Niveau	tx
134	6. Abstand	3. Niveau	ty
135	6. Abstand	3. Niveau	tz
136	6. Abstand	3. Niveau	rx
137	6. Abstand	3. Niveau	ry
138	6. Abstand	3. Niveau	rz
139	6. Abstand	4. Niveau	tx
140	6. Abstand	4. Niveau	ty
141	6. Abstand	4. Niveau	tz
142	6. Abstand	4. Niveau	rx
143	6. Abstand	4. Niveau	ry
144	6. Abstand	4. Niveau	rz

Tabelle B.14: Wahrscheinlichkeitswerte des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bzgl. des Unterschiedes der Bewertungen zum Referenzsignal bei einer 2 Hz Maskierung des ‘‘Langsstoens‘‘

$\Delta t = 0 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0469	0,0005	0,0078	0,0005	0,0195	0,0010
$1A_{Ref,HBR}$	0,1094	0,0005	0,0005	0,0005	0,001	0,0005
$2A_{Ref,HBR}$	0,4604	0,0005	0,0005	0,0005	0,0122	0,0005
$4A_{Ref,HBR}$	0,4429	0,0005	0,0005	0,0005	0,0015	0,0005
$\Delta t = 0,5825 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,0078	0,0313	0,0078	0,0625	0,125
$1A_{Ref,HBR}$	0,0234	0,001	0,1875	0,0039	0,0156	0,0313
$2A_{Ref,HBR}$	0,0762	0,0005	0,0039	0,0005	0,001	0,001
$4A_{Ref,HBR}$	1,0000	0,0005	0,001	0,0005	0,0005	0,0005
$\Delta t = 1,0825 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0156	0,0039	0,125	0,0078	0,25	0,25
$1A_{Ref,HBR}$	0,0156	0,001	0,25	0,0078	0,0313	0,0313
$2A_{Ref,HBR}$	0,0010	0,0005	0,0625	0,002	0,0039	0,0156
$4A_{Ref,HBR}$	0,0264	0,0005	0,001	0,001	0,0005	0,0039

$\Delta t = 1,5825 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0313	0,0625	0,125	0,125	1	0,25
$1A_{Ref,HBR}$	0,0625	0,0078	0,25	0,0156	0,125	0,125
$2A_{Ref,HBR}$	0,0039	0,002	0,125	0,002	0,0039	0,125
$4A_{Ref,HBR}$	0,0010	0,0005	0,0156	0,001	0,002	0,0156
$\Delta t = 2,5825 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0625	0,125	0,125	0,25	0,5	0,125
$1A_{Ref,HBR}$	1,0000	0,125	1	1	1	1
$2A_{Ref,HBR}$	0,1563	0,0156	0,25	0,0625	0,0625	0,5
$4A_{Ref,HBR}$	0,0020	0,001	0,125	0,0039	0,0156	0,5
$\Delta t = 4,5825 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,5000	0,25	0,5	0,5	1	1
$1A_{Ref,HBR}$	0,7500	0,5	1	1	1	1
$2A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,0625	0,5	0,0625	0,25	0,25
$4A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,0625	0,125	0,0313	0,125	0,5

Tabelle B.15: Wahrscheinlichkeitswerte des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bzgl. des Unterschiedes der Bewertungen zum Referenzsignal bei einer 4,5 Hz Maskierung des "Längsstoßens"

$\Delta t = 0 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,5625	0,0313	0,75	0,0313	0,375	0,0625
$1A_{Ref,HBR}$	0,0005	0,0020	0,5	0,0078	0,0039	0,0625
$2A_{Ref,HBR}$	0,0005	0,0010	0,3145	0,0010	0,0005	0,0161
$3A_{Ref,HBR}$	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,4204	0,0005
$\Delta t = 0,265 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0010	0,001	0,1875	0,002	0,0313	0,0156
$1A_{Ref,HBR}$	0,3125	0,0005	0,0005	0,001	0,002	0,002
$2A_{Ref,HBR}$	0,3555	0,0005	0,001	0,0005	0,0039	0,001
$3A_{Ref,HBR}$	0,4482	0,0005	0,0005	0,0005	0,043	0,0005
$\Delta t = 0,765 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0078	0,1563	1	0,0625	0,125	0,0625
$1A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,0078	0,0625	0,0625	0,0156	0,125
$2A_{Ref,HBR}$	0,1875	0,0005	0,0156	0,0078	0,0039	0,0078
$3A_{Ref,HBR}$	0,3511	0,0005	0,001	0,002	0,001	0,0078

$\Delta t = 1,265 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,25	0,5	0,125	0,25	0,0625
$1A_{Ref,HBR}$	0,6250	0,125	0,125	0,125	0,0625	0,125
$2A_{Ref,HBR}$	0,4375	0,0078	0,0625	0,0313	0,0313	0,125
$3A_{Ref,HBR}$	0,0020	0,0039	0,002	0,0156	0,0039	0,0625
$\Delta t = 2,265 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0625	0,125	1	0,0625	1	0,5
$1A_{Ref,HBR}$	0,5000	1	0,5	1	1	1
$2A_{Ref,HBR}$	0,0313	0,0313	0,25	0,25	0,25	0,5
$3A_{Ref,HBR}$	0,0156	0,125	0,0156	0,125	0,5	0,25
$\Delta t = 4,265 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	1,0000	1	1	0,5	0,5	1
$1A_{Ref,HBR}$	0,5000	1	0,5	1	0,5	0,5
$2A_{Ref,HBR}$	1,0000	0,5	0,25	0,5	0,75	1
$3A_{Ref,HBR}$	0,2500	1	0,125	1	0,5	0,5

Tabelle B.16: Wahrscheinlichkeitswerte des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bzgl. des Unterschiedes der Bewertungen zum Referenzsignal bei einer 1,3 Hz Maskierung des "Nickens"

$\Delta t = 0 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0938	0,0039	0,1719	0,0059	0,7813	0,1250
$1A_{Ref,HBR}$	0,3906	0,0020	0,875	0,0039	0,0078	0,0664
$2A_{Ref,HBR}$	0,5640	0,0024	0,1885	0,0327	0,0068	0,0938
$3A_{Ref,HBR}$	0,9048	0,0005	0,0005	0,0005	0,002	0,0005
$\Delta t = 0,186 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0078	0,002	0,0313	0,0039	0,0078	0,0039
$1A_{Ref,HBR}$	0,0020	0,001	0,1016	0,0039	0,0005	0,002
$2A_{Ref,HBR}$	0,0005	0,0015	0,0156	0,002	0,0005	0,001
$3A_{Ref,HBR}$	0,0005	0,0015	0,0005	0,0005	0,0005	0,001
$\Delta t = 0,372 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0156	0,002	0,0078	0,0039	0,0078	0,0078
$1A_{Ref,HBR}$	0,0078	0,0078	0,0039	0,002	0,1816	0,0313
$2A_{Ref,HBR}$	0,2188	0,001	0,0059	0,001	0,9023	0,0039
$3A_{Ref,HBR}$	0,0068	0,0024	0,0039	0,001	0,002	0,0039

$\Delta t = 0,744 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0156	0,0156	0,25	0,0078	0,125	0,125
$1A_{Ref,HBR}$	0,0625	0,0625	0,0313	0,0313	0,25	0,375
$2A_{Ref,HBR}$	0,0781	0,0078	0,0156	0,0039	0,8906	0,0625
$3A_{Ref,HBR}$	0,0820	0,002	0,002	0,002	0,4609	0,0039
$\Delta t = 1,244 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,25	1	0,0938	0,0938	0,25
$1A_{Ref,HBR}$	0,1875	0,0625	0,25	0,125	0,2188	0,125
$2A_{Ref,HBR}$	0,1484	0,0078	0,125	0,1406	0,3359	0,0625
$3A_{Ref,HBR}$	0,1406	0,0273	0,125	0,0469	0,0469	0,0625
$\Delta t = 1,744 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,5000	0,5	0,375	0,25	0,25	0,25
$1A_{Ref,HBR}$	0,5000	0,1875	0,875	0,375	0,3125	0,75
$2A_{Ref,HBR}$	0,1328	0,0313	0,375	0,125	0,5781	0,125
$3A_{Ref,HBR}$	0,0313	0,0078	0,125	0,0313	0,0313	0,625

Tabelle B.17: Wahrscheinlichkeitswerte des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bzgl. des Unterschiedes der Bewertungen zum Referenzsignal bei einer 1 Hz Maskierung des "Wankens"

$\Delta t = 0 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0078	0,3750	0,1172	0,1875	0,1094	0,2500
$1A_{Ref,HBR}$	0,0005	0,4844	0,0156	0,0010	0,001	0,0859
$2A_{Ref,HBR}$	0,0005	0,6626	0,0005	0,0005	0,0005	0,0093
$3A_{Ref,HBR}$	0,0005	1,0000	0,0005	0,0005	0,0005	0,0015
$\Delta t = 0,245 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,0625	0,0625	0,125	0,0625	0,0625	0,0313
$1A_{Ref,HBR}$	0,0039	0,0469	0,002	0,0938	0,002	0,0156
$2A_{Ref,HBR}$	0,0010	0,1426	0,0039	0,9102	0,0005	0,002
$3A_{Ref,HBR}$	0,0010	0,1572	0,001	0,7578	0,0005	0,002
$\Delta t = 0,49 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,0625	0,0625	0,0313	0,25	0,125
$1A_{Ref,HBR}$	0,0078	0,0352	0,25	0,3125	0,0313	0,0156
$2A_{Ref,HBR}$	0,0020	0,041	0,0156	0,2969	0,0039	0,0039
$3A_{Ref,HBR}$	0,0020	0,0479	0,0078	0,5586	0,001	0,0005

$\Delta t = 0,98 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	0,2500	0,0625	1	0,5	0,125	0,125
$1A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,0078	0,75	0,0078	0,125	0,0313
$2A_{Ref,HBR}$	0,0313	0,001	0,5	0,002	0,0547	0,0156
$3A_{Ref,HBR}$	0,0039	0,0005	0,125	0,002	0,0078	0,002
$\Delta t = 1,48 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	1,0000	0,5	1	0,125	0,125	0,5
$1A_{Ref,HBR}$	0,2500	0,0156	0,75	0,0625	0,5	0,25
$2A_{Ref,HBR}$	1,0000	0,0078	0,5	0,0156	0,25	0,125
$3A_{Ref,HBR}$	0,0625	0,002	0,3125	0,0039	0,0039	0,125
$\Delta t = 1,98 \text{ s}$						
Amplitude	tx	ty	tz	rx	ry	rz
$0,5A_{Ref,HBR}$	1,0000	1	0,5	1	1	0,5
$1A_{Ref,HBR}$	1,0000	1	0,25	1	1	1
$2A_{Ref,HBR}$	0,5000	0,0078	0,5	0,125	0,25	0,5
$3A_{Ref,HBR}$	0,1250	0,0039	1	0,0313	0,0313	1

B.3 Anhang zu Abschnitt 5.4

Tabelle B.18: Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche mit zwei Maskierungsereignissen - Block 1

Versuchsnummer	Δt_{ty} in s	Δt_{tz} in s	$A_{Mask,ty}$	$A_{Mask,tz}$
1	0	-	$2A_{Ref,HBR}$	0
2	0,5825	-	$2A_{Ref,HBR}$	0
3	1,0825	-	$2A_{Ref,HBR}$	0
4	1,5825	-	$2A_{Ref,HBR}$	0
5	0	-	$1A_{Ref,HBR}$	0
6	0,5825	-	$1A_{Ref,HBR}$	0
7	1,0825	-	$1A_{Ref,HBR}$	0
8	1,5825	-	$1A_{Ref,HBR}$	0
9	-	0	0	$2A_{Ref,HBR}$
10	-	0,5825	0	$2A_{Ref,HBR}$
11	-	1,0825	0	$2A_{Ref,HBR}$
12	-	1,5825	0	$2A_{Ref,HBR}$
13	-	0	0	$1A_{Ref,HBR}$
14	-	0,5825	0	$1A_{Ref,HBR}$
15	-	1,0825	0	$1A_{Ref,HBR}$
16	-	1,5825	0	$1A_{Ref,HBR}$
17	0	0	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
18	0	0	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
19	0	0	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
20	0	0	$1A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
21	0,5825	0,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
22	0,5825	0,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
23	0,5825	0,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
24	0,5825	0,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
25	0,5825	1,0825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
26	1,0825	0,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$

Tabelle B.19: Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche mit zwei Maskierungsereignissen - Block 2

Versuchsnummer	Δt_{ty} in s	Δt_{tz} in s	$A_{Mask,ty}$	$A_{Mask,tz}$
27	0,5825	1,0825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
28	1,0825	0,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
29	0,5825	1,0825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
30	1,0825	0,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
31	1,0825	1,0825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
32	1,0825	1,0825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
33	1,0825	1,0825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
34	1,0825	1,0825	$1A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
35	1,0825	1,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
36	1,5825	1,0825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
37	1,0825	1,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
38	1,5825	1,0825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
39	1,0825	1,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
40	1,5825	1,0825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
41	1,5825	1,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
42	1,5825	1,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
43	1,5825	1,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
44	1,5825	1,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
45	1,5825	0,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
46	1,5825	0,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
47	1,5825	0,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
48	1,5825	0,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
49	0,5825	1,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
50	0,5825	1,5825	$2A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$
51	0,5825	1,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$2A_{Ref,HBR}$
52	0,5825	1,5825	$1A_{Ref,HBR}$	$1A_{Ref,HBR}$

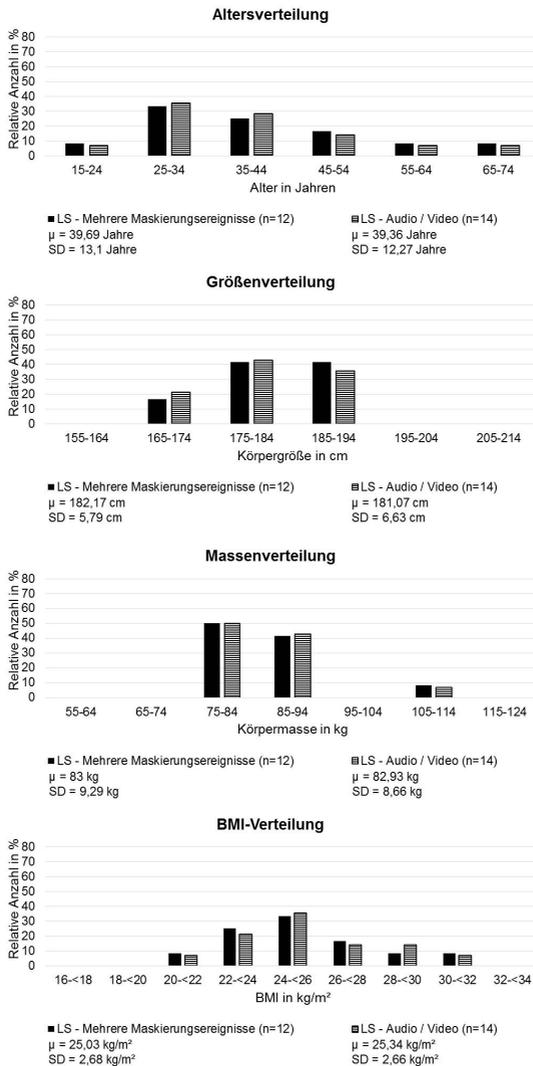


Abbildung B.2: Darstellung der Probandenkollektive zu den Untersuchungen mit mehreren Maskierungsereignissen sowie den Audio / Video Untersuchungen in Abhängigkeit des Alters, der Körpermasse, der Körpergröße und des BMIs (alle Probanden sind männlich)

Tabelle B.20: Deskriptive Statistiken zu den Maskierungsfaktoren bei mehreren Maskierungsereignissen

Nr.	μ	SD	Med.	u. Qu.	o. Qu.	Min	Max
1	0,021	0,069	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250
2	0,382	0,188	0,417	0,250	0,500	0,250	0,750
3	0,603	0,211	0,625	0,475	0,750	0,475	1,000
4	0,799	0,273	1,000	0,688	1,000	0,688	1,000
5	0,336	0,236	0,250	0,238	0,500	0,238	0,750
6	0,540	0,195	0,500	0,475	0,563	0,475	1,000
7	0,731	0,233	0,750	0,575	1,000	0,575	1,000
8	0,875	0,191	1,000	0,750	1,000	0,750	1,000
9	0,042	0,093	0,000	0,000	0,000	0,000	0,250
10	0,651	0,165	0,708	0,500	0,750	0,500	1,000
11	0,810	0,153	0,750	0,750	1,000	0,750	1,000
12	0,799	0,208	0,750	0,750	1,000	0,750	1,000
13	0,332	0,148	0,292	0,250	0,500	0,250	0,500
14	0,731	0,209	0,750	0,650	0,813	0,650	1,000
15	0,856	0,208	1,000	0,650	1,000	0,650	1,000
16	0,938	0,149	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
17	0,063	0,149	0,000	0,000	0,000	0,000	0,500
18	0,083	0,156	0,000	0,000	0,063	0,000	0,500
19	0,083	0,156	0,000	0,000	0,063	0,000	0,500
20	0,188	0,231	0,125	0,000	0,250	0,000	0,750
21	0,524	0,296	0,500	0,250	0,750	0,250	1,250
22	0,440	0,207	0,417	0,250	0,563	0,250	0,750
23	0,503	0,249	0,500	0,250	0,750	0,250	1,000
24	0,624	0,257	0,500	0,475	0,813	0,475	1,000
25	0,482	0,214	0,500	0,250	0,750	0,250	0,750
26	0,531	0,172	0,500	0,500	0,688	0,500	0,750
27	0,540	0,263	0,500	0,313	0,750	0,313	1,000
28	0,661	0,266	0,550	0,500	1,000	0,500	1,000
29	0,461	0,266	0,292	0,250	0,750	0,250	1,000
30	0,610	0,220	0,500	0,500	0,750	0,500	1,000

31	0,551	0,254	0,500	0,438	0,688	0,438	1,000
32	0,606	0,210	0,500	0,500	0,688	0,500	1,000
33	0,731	0,209	0,708	0,500	1,000	0,500	1,000
34	0,689	0,201	0,750	0,575	0,750	0,575	1,000
35	0,640	0,202	0,550	0,500	0,750	0,500	1,000
36	0,731	0,254	0,708	0,500	1,000	0,500	1,000
37	0,751	0,169	0,750	0,650	0,813	0,650	1,000
38	0,814	0,172	0,750	0,729	1,000	0,729	1,000
39	0,710	0,262	0,750	0,575	1,000	0,575	1,000
40	0,633	0,277	0,550	0,500	0,813	0,500	1,000
41	0,647	0,233	0,708	0,500	0,750	0,500	1,000
42	0,685	0,253	0,750	0,500	0,850	0,500	1,000
43	0,726	0,162	0,750	0,625	0,763	0,625	1,000
44	0,768	0,240	0,775	0,625	1,000	0,625	1,000
45	0,494	0,212	0,500	0,313	0,525	0,313	1,000
46	0,599	0,247	0,550	0,458	0,750	0,458	1,000
47	0,668	0,148	0,708	0,500	0,750	0,500	1,000
48	0,668	0,272	0,633	0,500	1,000	0,500	1,000
49	0,415	0,252	0,367	0,250	0,500	0,250	1,000
50	0,482	0,237	0,500	0,250	0,563	0,250	1,000
51	0,544	0,222	0,500	0,458	0,750	0,458	1,000
52	0,672	0,160	0,750	0,500	0,750	0,500	1,000

μ : Mittelwert, SD : Standardabweichung, $Qu.$: Quartil, $Med.$: Median

B.4 Anhang zu Abschnitt 5.5

Tabelle B.21: Versuchsreihenfolge der Variantensignale zu den Audio / Video Untersuchungen: Block 1

Nr.	$G_{Freq,3-6}$	G_{AS}	Video
1	0,5	0	aus (0)
2	1	0	aus (0)
3	2	0	aus (0)
4	0,5	0	aus (0)
5	2	0	aus (0)
6	1	0	aus (0)
7	0,5	1	aus (0)
8	1	1	aus (0)
9	2	1	aus (0)
10	0,5	1	aus (0)
11	2	1	aus (0)
12	1	1	aus (0)
13	0,5	0,5	aus (0)
14	1	0,5	aus (0)
15	2	0,5	aus (0)
16	0,5	0,5	aus (0)
17	2	0,5	aus (0)
18	1	0,5	aus (0)

Tabelle B.22: Versuchsreihenfolge der Variantensignale zu den Audio / Video Untersuchungen: Block 2

Nr.	$G_{Freq,3-6}$	G_{AS}	Video
19	0,5	1	an (1)
20	1	1	an (1)
21	2	1	an (1)
22	0,5	1	an (1)
23	2	1	an (1)
24	1	1	an (1)
25	0,5	0,5	an (1)
26	1	0,5	an (1)
27	2	0,5	an (1)
28	0,5	0,5	an (1)
29	2	0,5	an (1)
30	1	0,5	an (1)
31	0,5	0	an (1)
32	1	0	an (1)
33	2	0	an (1)
34	0,5	0	an (1)
35	2	0	an (1)
36	1	0	an (1)

C Anhang zu Kapitel 6

Tabelle C.1: Gerundete Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_{MBR}) und deren Wahrscheinlichkeitswerte (p_{MBR}) zum Zusammenhang zwischen den geschätzten Maskierungsfaktoren und den durch Versuche bestimmten Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem Maskierungsergebnis von 2 Hz

r_{MBR} / p_{MBR}	$RRZW_{MBR}$ Nr. 1	$RRZW_{MBR}$ Nr. 2	$RRZW_{MBR}$ Nr. 3	$RRZW_{MBR}$ Nr. 4
r_{tx}	0,65	0,86	0,89	0,88
r_{ty}	0,98	0,99	1	0,98
r_{tz}	1	0,98	1	1
r_{rx}	0,96	0,98	0,99	1
r_{ry}	0,94	1	0,97	0,98
r_{rz}	0,99	0,99	0,98	1
p_{tx}	0,164	0,029	0,019	0,021
p_{ty}	<0,001	<0,029	<0,001	<0,001
p_{tz}	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
p_{rx}	0,002	<0,001	<0,001	<0,001
p_{ry}	0,006	<0,001	0,002	<0,001
p_{rz}	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Tabelle C.2: Gerundete Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_{MBR}) und deren Wahrscheinlichkeitswerte (p_{MBR}) zum Zusammenhang zwischen den geschätzten Maskierungsfaktoren und den durch Versuche bestimmten Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem Maskierungsergebnis von 4,5 Hz

r_{MBR} / p_{MBR}	$RRZW_{MBR}$ Nr. 1	$RRZW_{MBR}$ Nr. 2	$RRZW_{MBR}$ Nr. 3	$RRZW_{MBR}$ Nr. 4
r_{tx}	0,99	0,94	0,96	0,91
r_{ty}	0,95	0,97	0,98	1
r_{tz}	NaN	0,93	1	0,97
r_{rx}	0,94	0,93	1	1
r_{ry}	0,90	0,99	1	0,97
r_{rz}	0,93	0,89	0,96	0,97
p_{tx}	<0,001	0,005	0,003	0,011
p_{ty}	0,004	<0,001	<0,001	<0,001
p_{tz}	NaN	0,007	<0,001	0,001
p_{rx}	0,005	0,008	<0,001	<0,001
p_{ry}	0,015	<0,001	<0,001	<0,001
p_{rz}	0,007	0,019	0,002	0,001

Tabelle C.3: Gerundete Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_{MBR}) und deren Wahrscheinlichkeitswerte (p_{MBR}) zum Zusammenhang zwischen den geschätzten Maskierungsfaktoren und den durch Versuche bestimmten Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem Maskierungsereignis von 1,3 Hz

r_{MBR} / p_{MBR}	$RRZW_{MBR}$ Nr. 1	$RRZW_{MBR}$ Nr. 2	$RRZW_{MBR}$ Nr. 3	$RRZW_{MBR}$ Nr. 4
r_{tx}	0,93	1	0,90	0,99
r_{ty}	0,93	0,96	0,98	0,99
r_{tz}	0,83	0,80	0,90	0,98
r_{rx}	0,89	0,93	0,91	0,98
r_{ry}	0,97	1	0,91	0,77
r_{rz}	0,99	0,94	1	0,96
p_{tx}	0,007	<0,001	0,014	<0,001
p_{ty}	0,006	0,002	<0,001	<0,001
p_{tz}	0,04	0,055	0,014	<0,001
p_{rx}	0,016	0,008	0,013	<0,001
p_{ry}	0,002	<0,001	0,011	0,073
p_{rz}	<0,001	0,005	<0,001	0,003

Tabelle C.4: Gerundete Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_{MBR}) und deren Wahrscheinlichkeitswerte (p_{MBR}) zum Zusammenhang zwischen den geschätzten Maskierungsfaktoren und den durch Versuche bestimmten Maskierungsfaktoren des "Wankens" bei einem Maskierungsereignis von 2 Hz

r_{MBR} / p_{MBR}	$RRZW_{MBR}$ Nr. 1	$RRZW_{MBR}$ Nr. 2	$RRZW_{MBR}$ Nr. 3	$RRZW_{MBR}$ Nr. 4
r_{tx}	0,83	0,97	0,98	0,98
r_{ty}	NaN	0,96	1	0,98
r_{tz}	0,92	0,97	0,97	1
r_{rx}	0,59	0,82	0,97	0,96
r_{ry}	0,81	0,97	0,94	0,97
r_{rz}	0,84	0,98	0,97	0,97
p_{tx}	0,041	0,001	<0,001	<0,001
p_{ty}	NaN	0,002	<0,001	<0,001
p_{tz}	0,009	0,001	0,001	<0,001
p_{rx}	0,221	0,048	0,002	0,002
p_{ry}	0,052	0,002	0,005	0,001
p_{rz}	0,035	<0,001	0,001	0,001

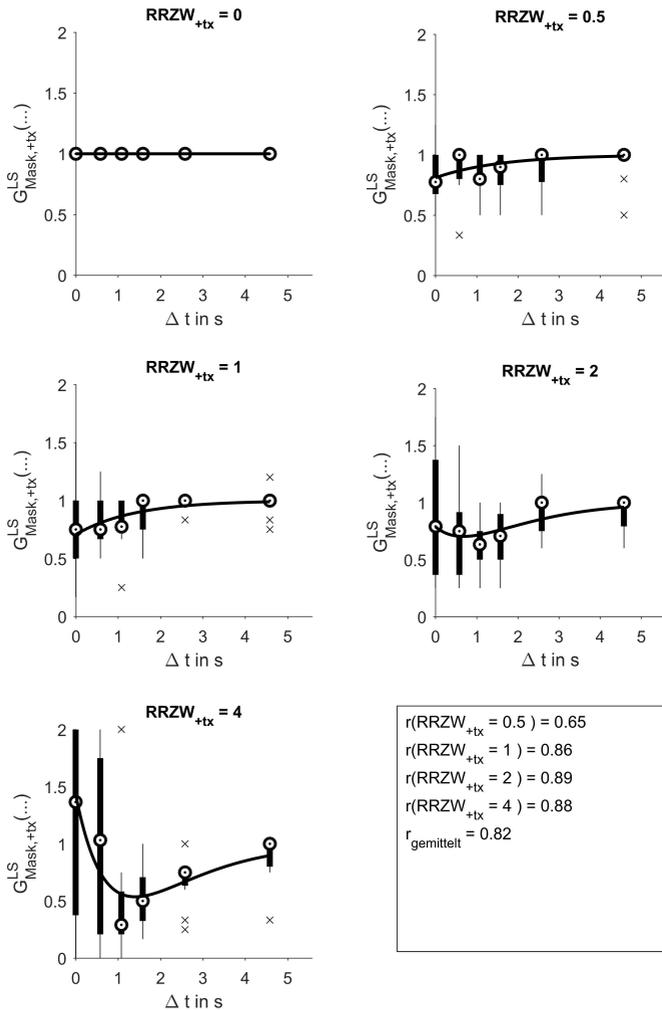


Abbildung C.1: Fits für $MBR = +tx$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

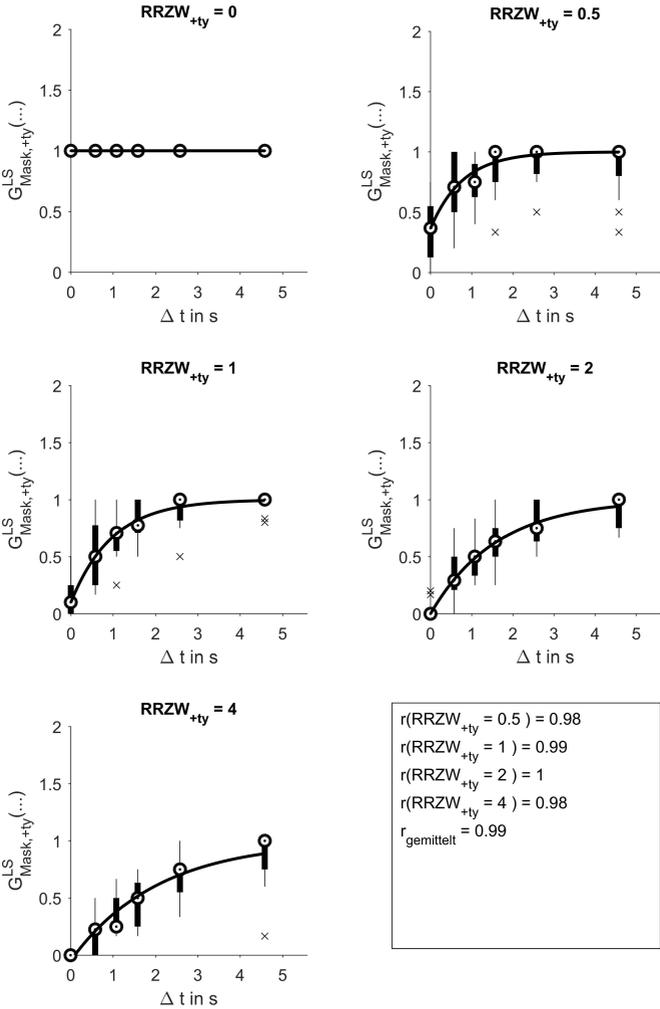


Abbildung C.2: Fits für $MBR = +ty$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstößens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der pro-
bandenabhängigen Maskierungsfaktoren

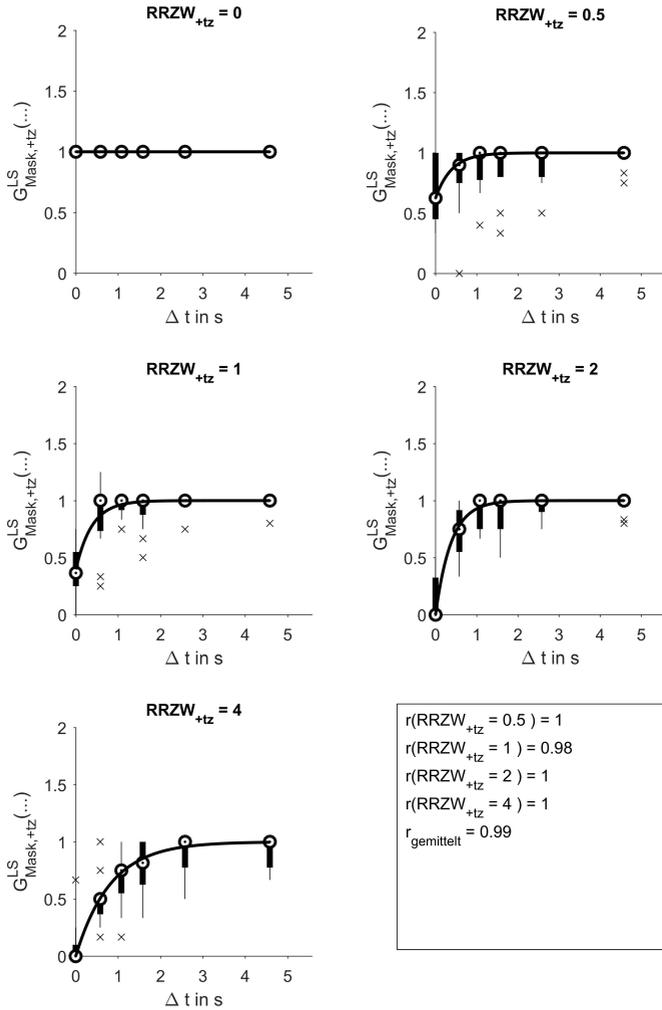


Abbildung C.3: Fits für $MBR = +tz$ zu den Maskierungsfaktoren des ‘‘Langsstoens‘‘ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhangigen Maskierungsfaktoren

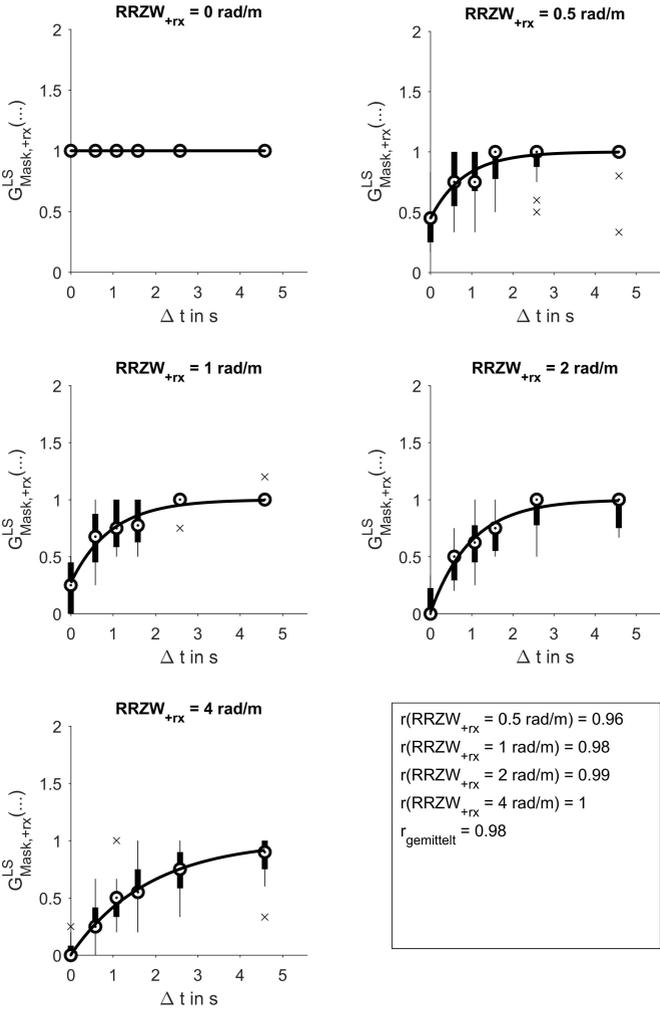


Abbildung C.4: Fits für $MBR = +rx$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstößens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der pro-
bandenabhängigen Maskierungsfaktoren

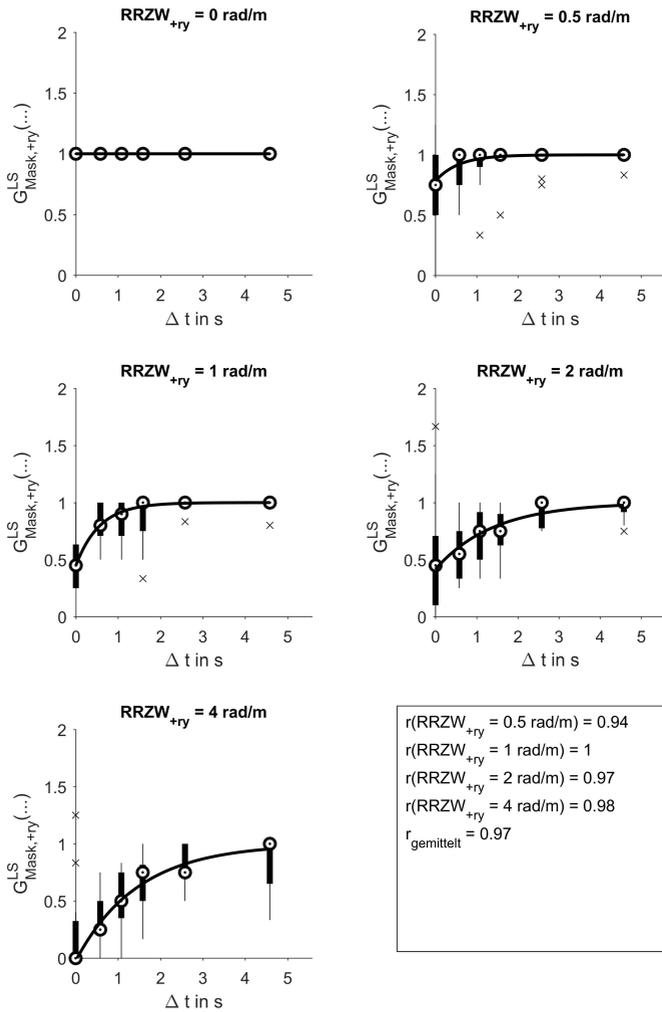


Abbildung C.5: Fits für $MBR = +ry$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstöbens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

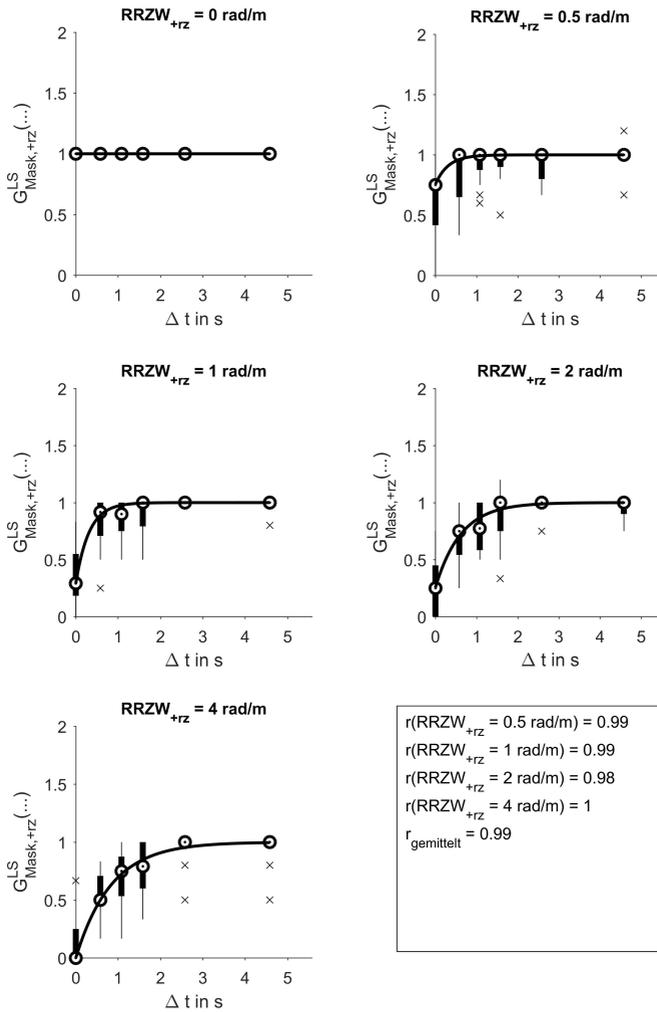


Abbildung C.6: Fits für $\text{MBR} = +rz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstößens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der pro-
bandenabhängigen Maskierungsfaktoren

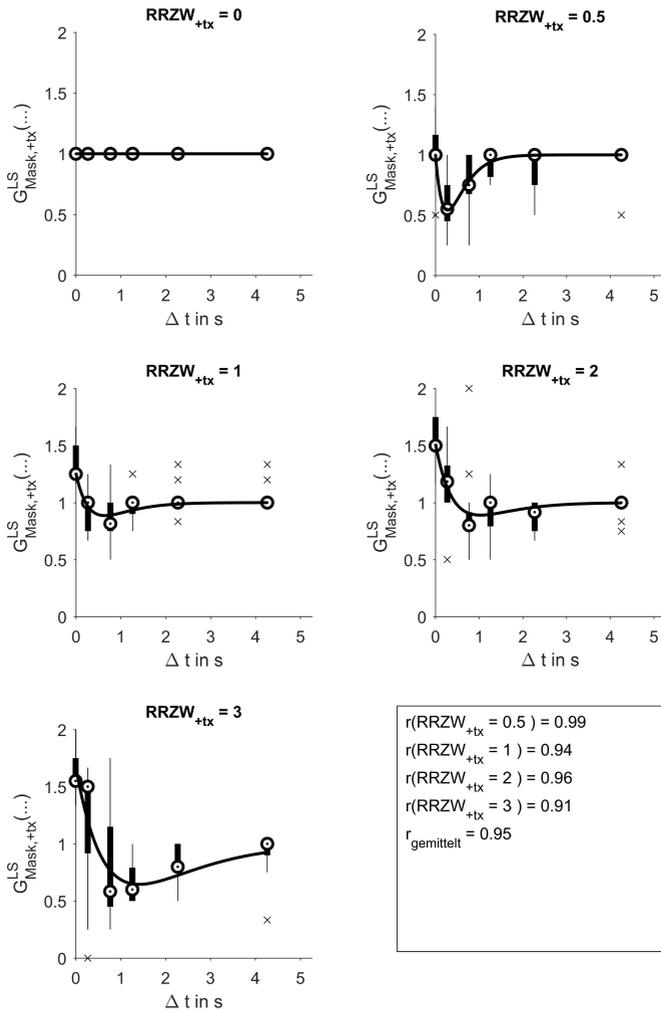


Abbildung C.7: Fits für $MBR = +tx$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

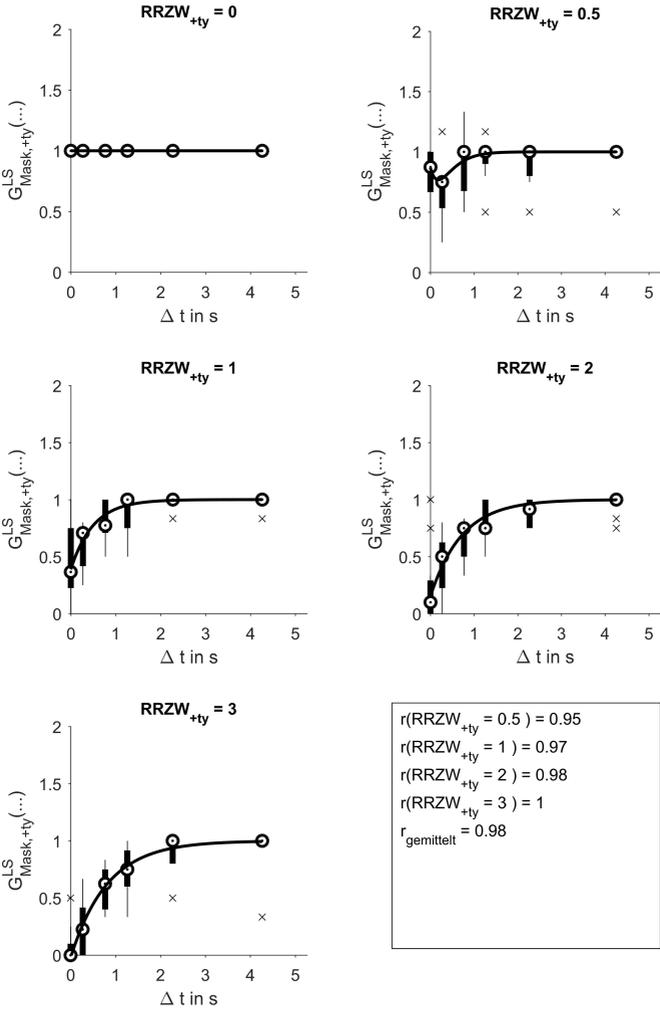


Abbildung C.8: Fits für $\text{MBR} = +ty$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstößens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

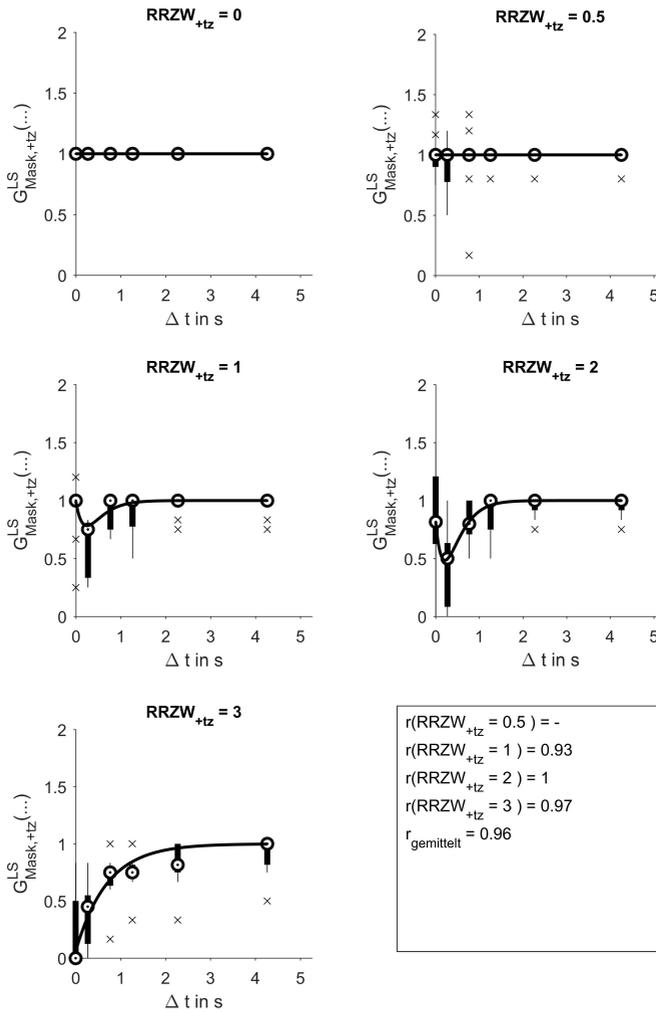


Abbildung C.9: Fits für $MBR = +tz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

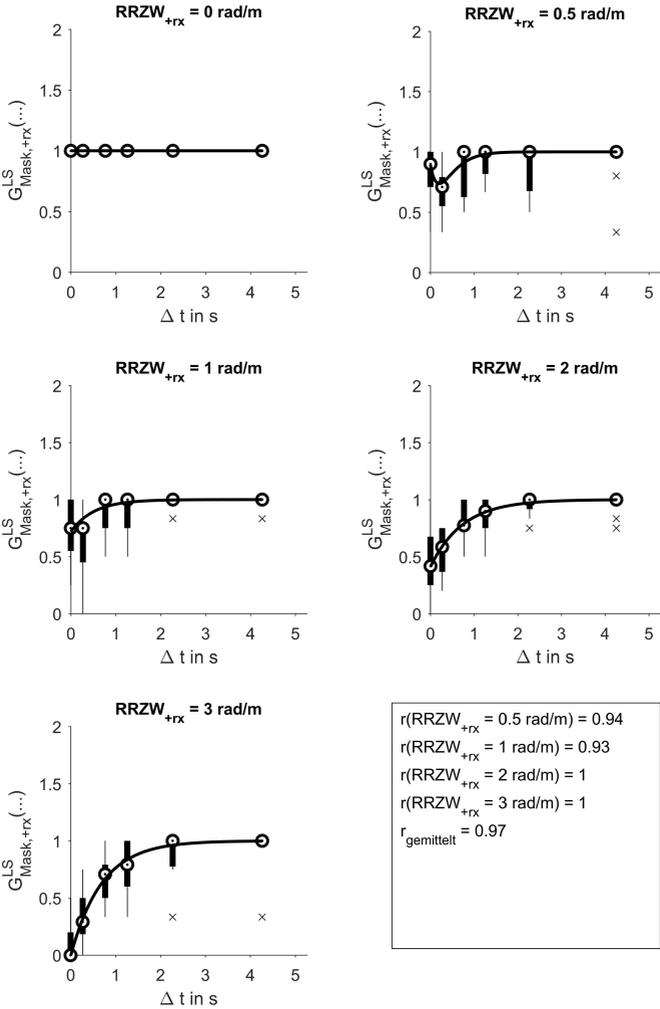


Abbildung C.10: Fits für $MBR = +rx$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

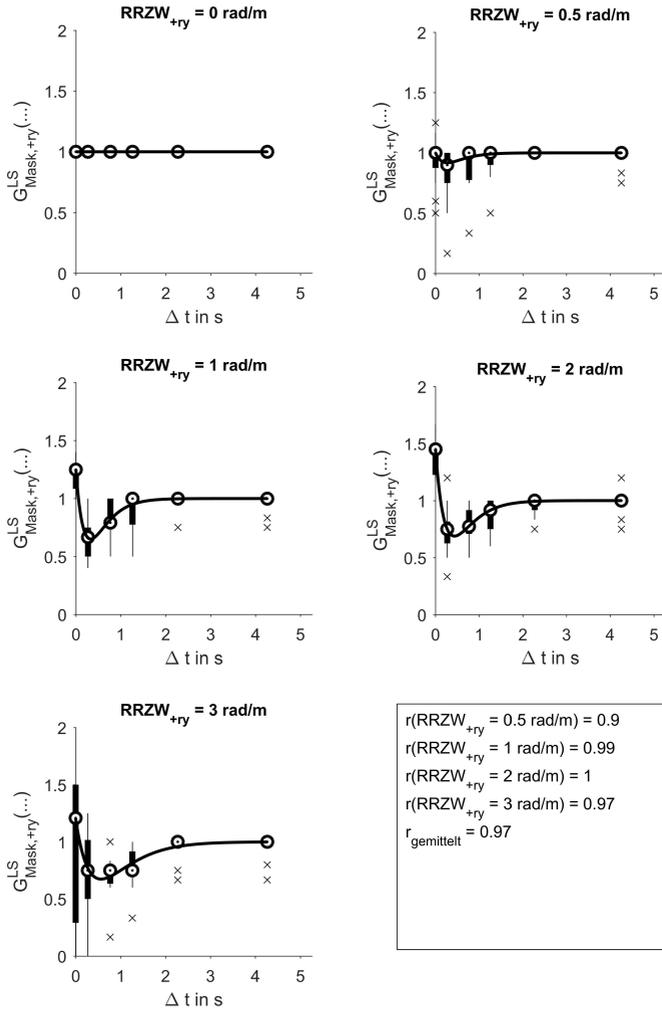


Abbildung C.11: Fits für $MBR = +ryz$ u den Maskierungsfaktoren des “Längsstößens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

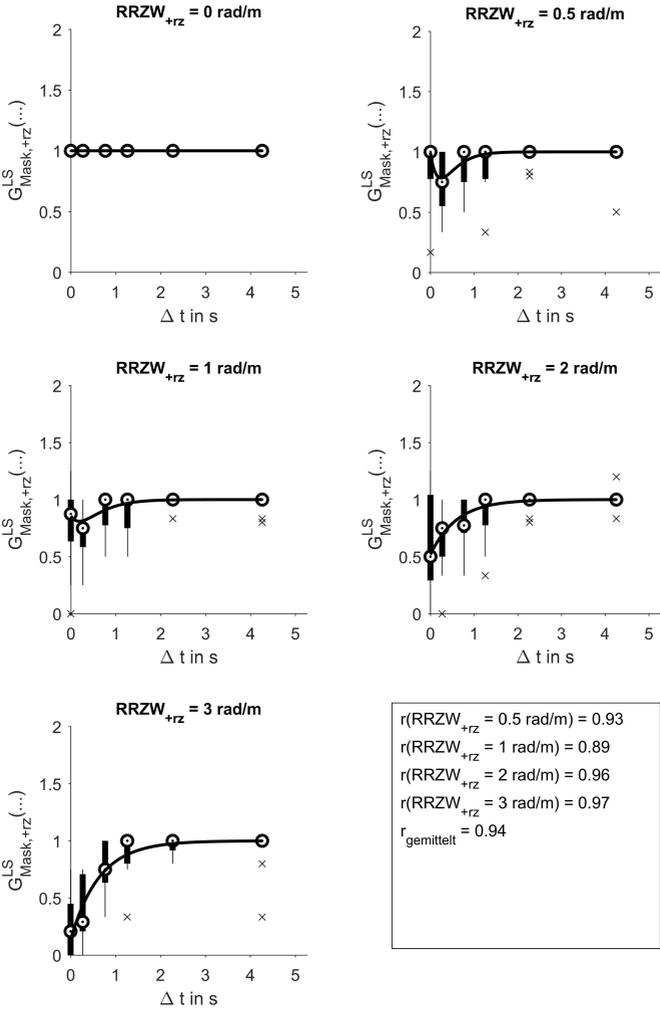


Abbildung C.12: Fits für $MBR = +rz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstößens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

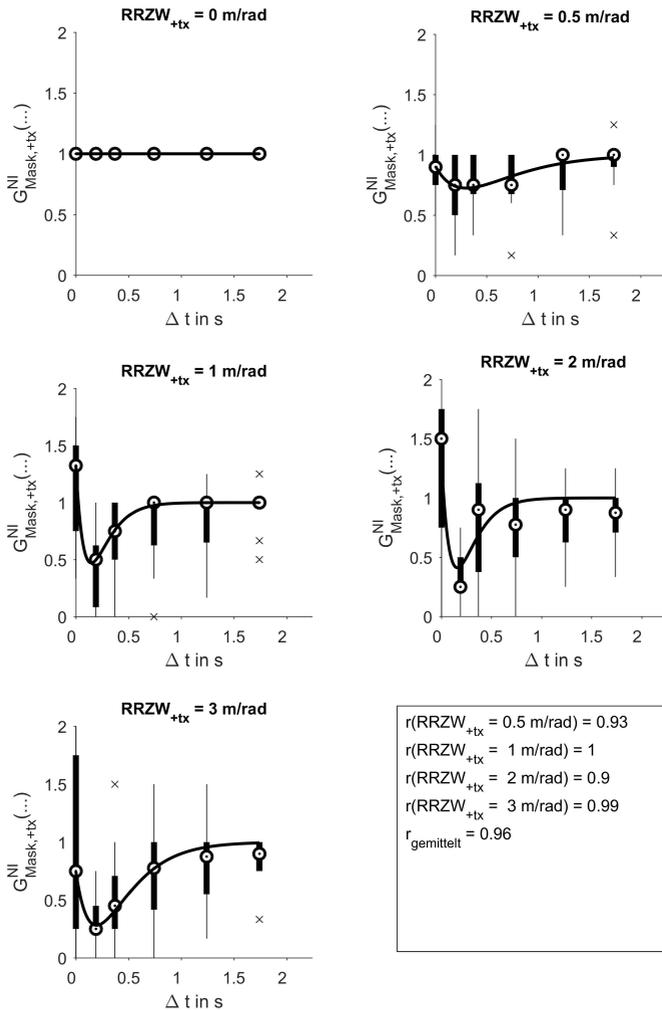


Abbildung C.13: Fits für $MBR = +tx$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

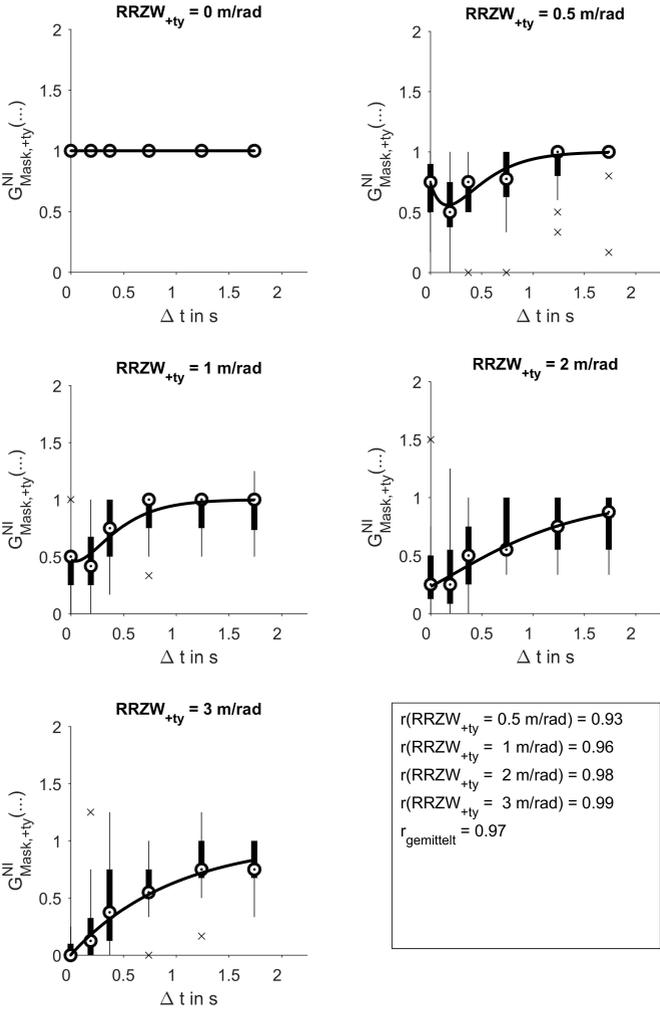


Abbildung C.14: Fits für $MBR = +ty$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

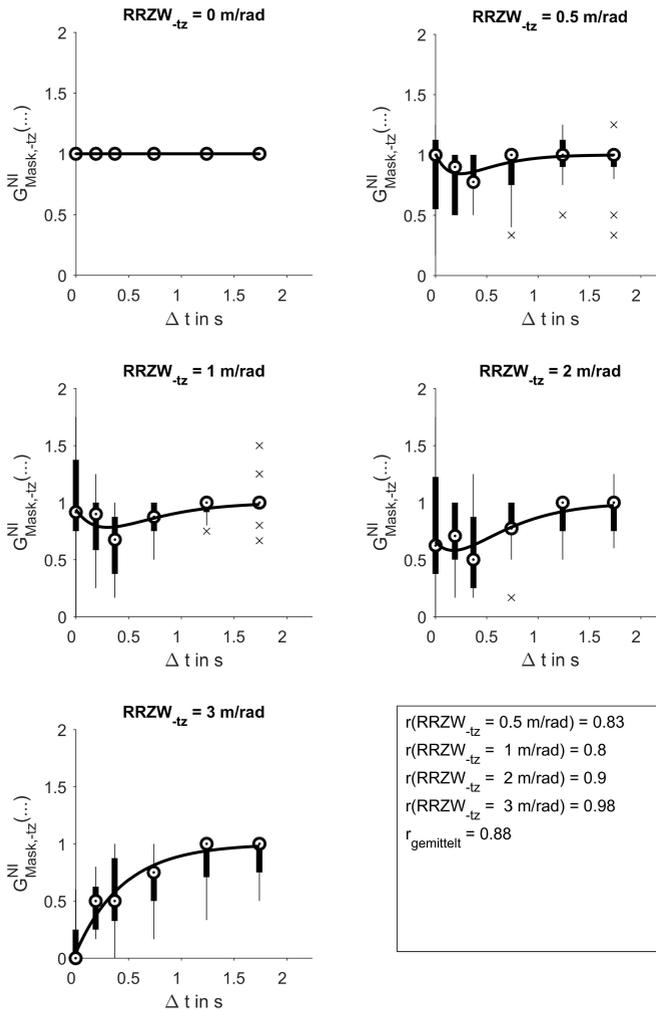


Abbildung C.15: Fits für $MBR = -tz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

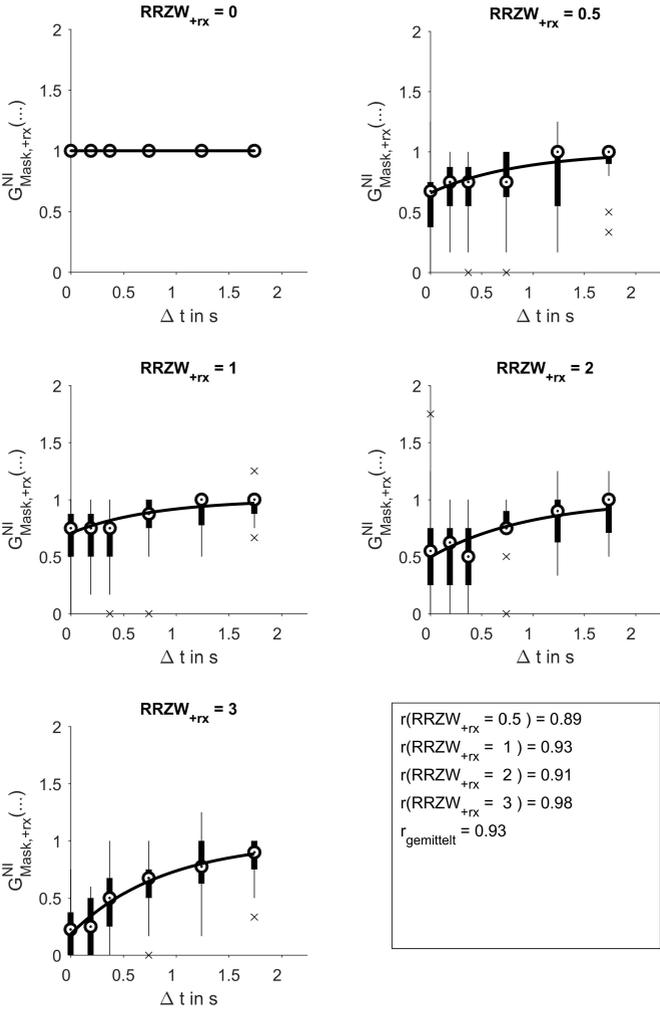


Abbildung C.16: Fits für $MBR = +rx$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

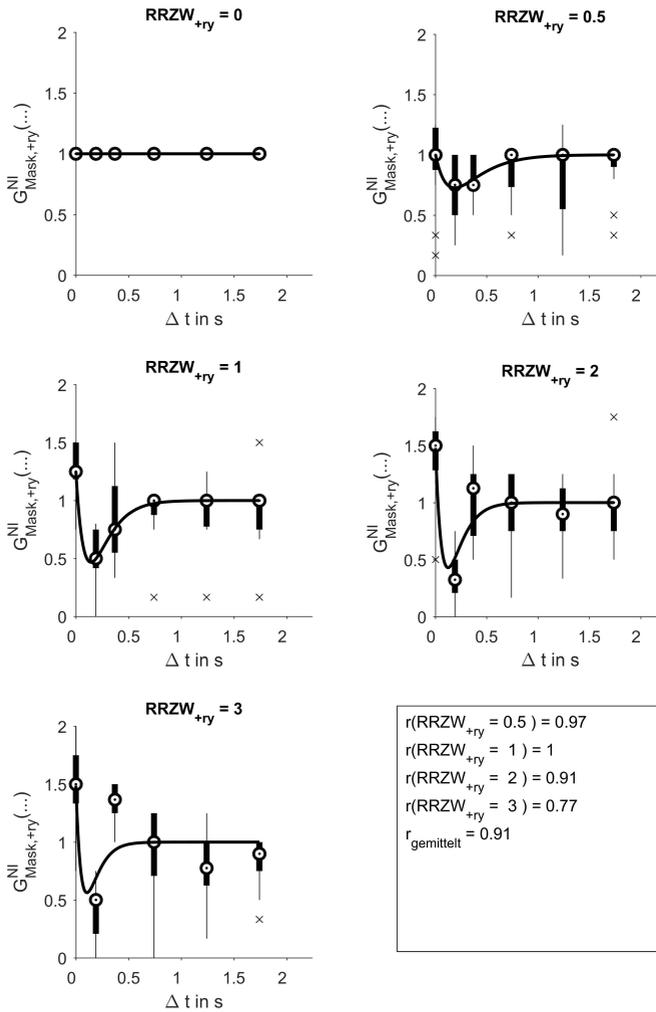


Abbildung C.17: Fits für $MBR = +ryzu$ den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

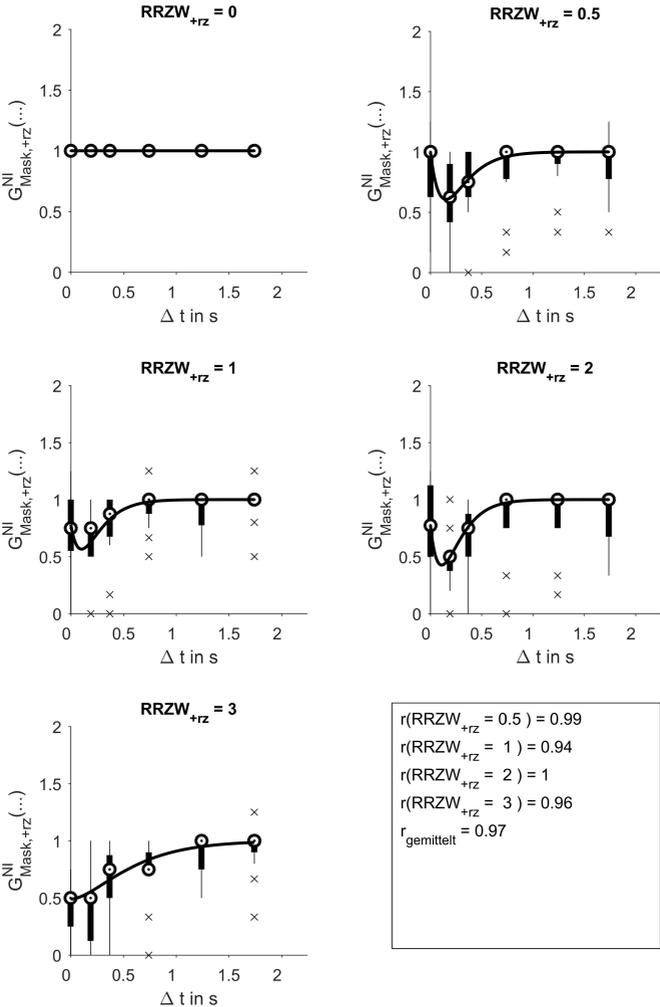


Abbildung C.18: Fits für $MBR = +rz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

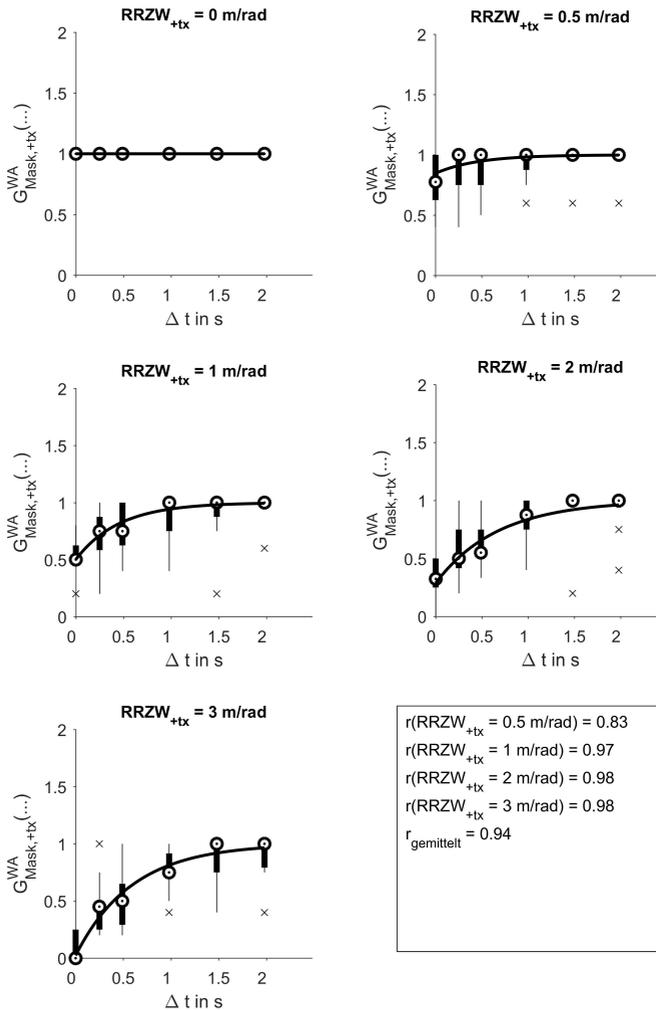


Abbildung C.19: Fits für $MBR = +txz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

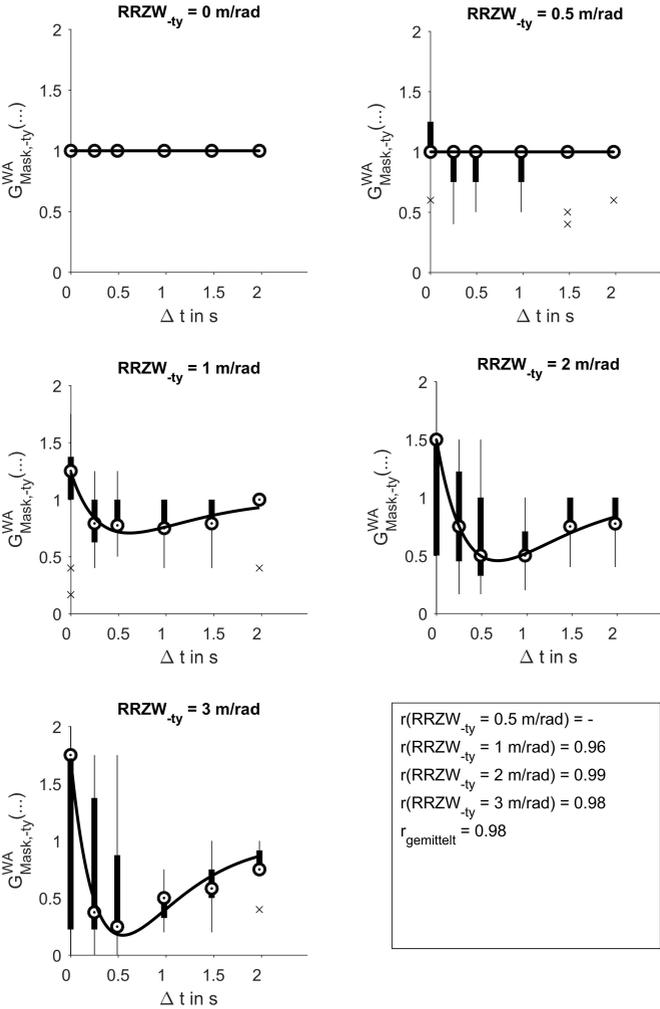


Abbildung C.20: Fits für $MBR = -ty$ zu den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

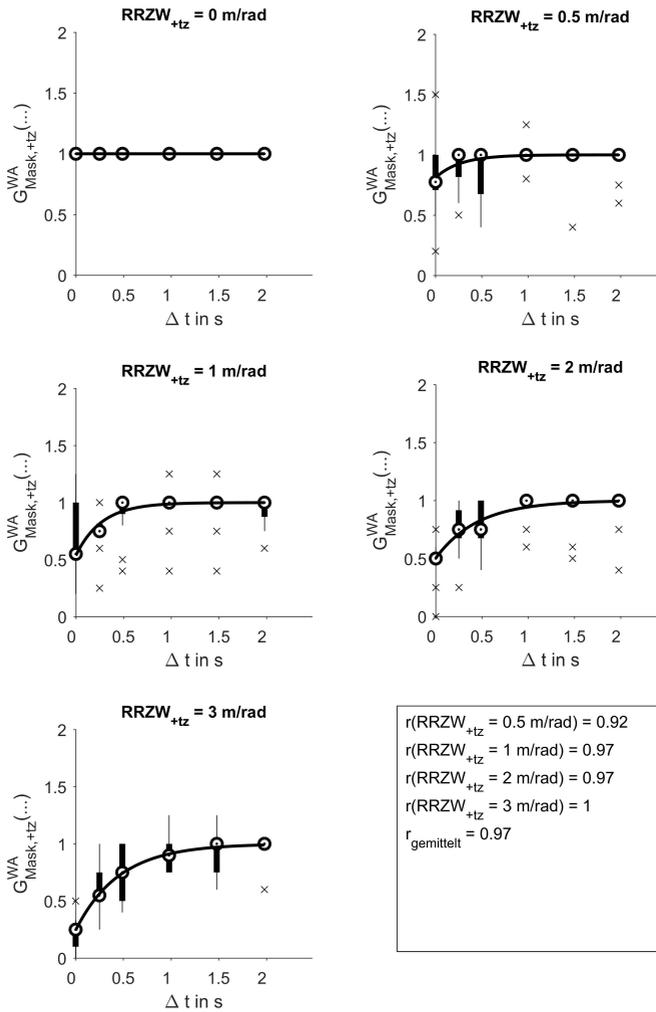


Abbildung C.21: Fits für $MBR = +tz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

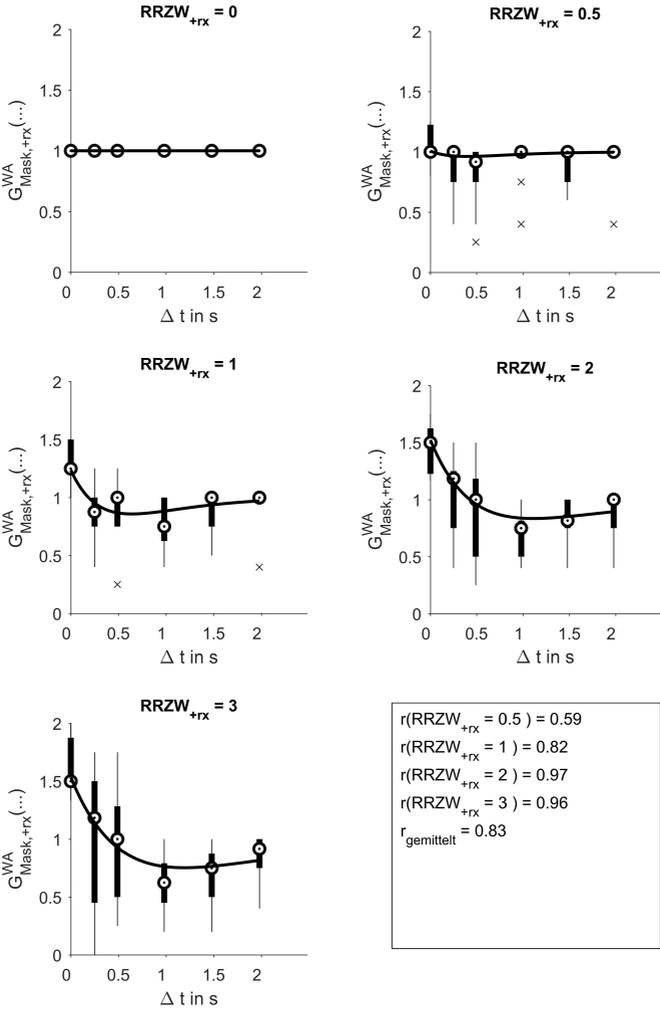


Abbildung C.22: Fits für $MBR = +rx$ zu den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

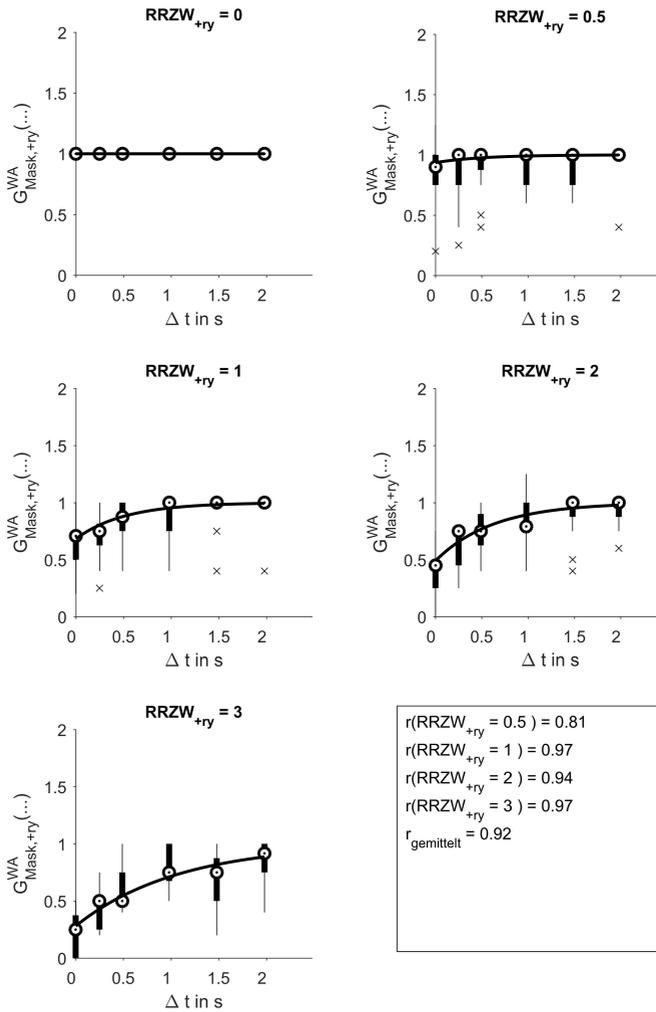


Abbildung C.23: Fits für $MBR = +ryzu$ den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

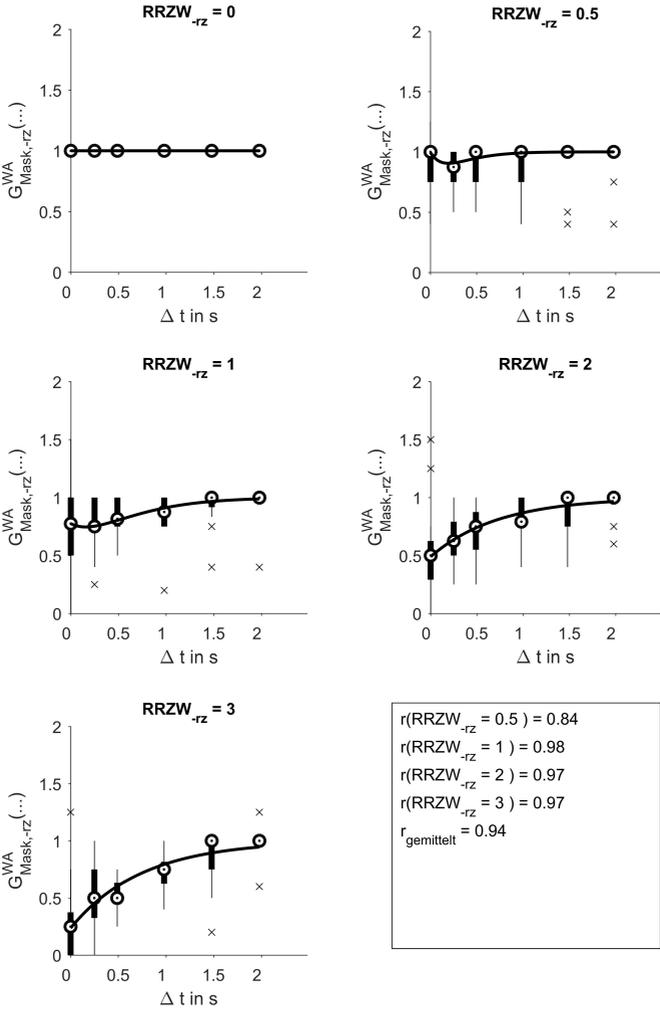


Abbildung C.24: Fits für $MBR = -r_z$ zu den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren

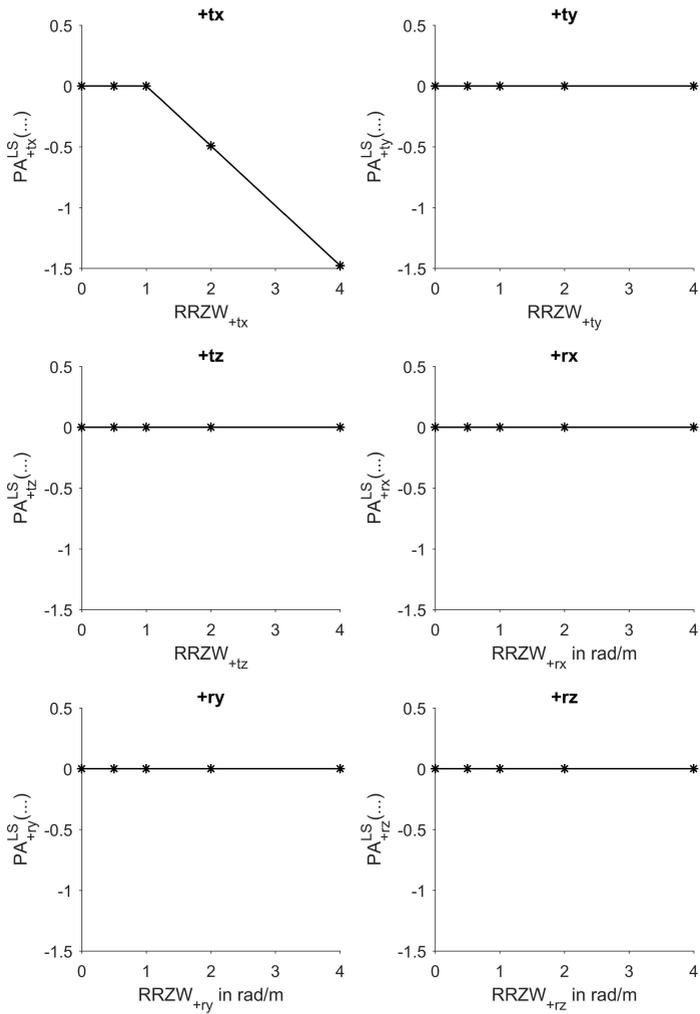


Abbildung C.25: Parameterverläufe von $PA^LS_{MBR}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem 2 Hz Maskierungsereignis

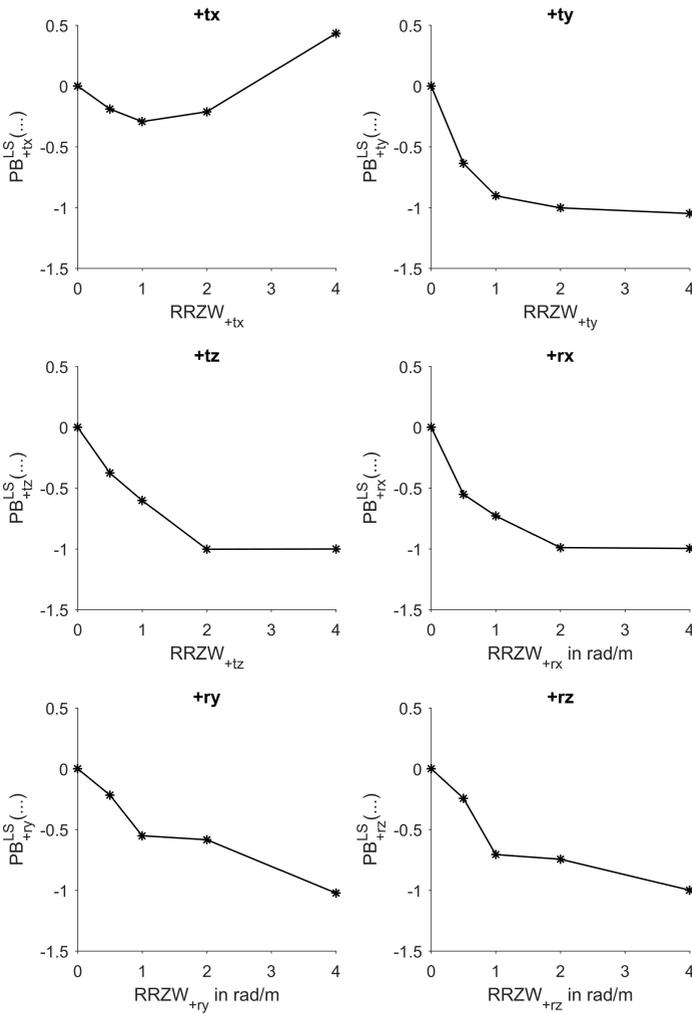


Abbildung C.26: Parameterverläufe von $PBL_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßes" bei einem 2 Hz Maskierungsereignis

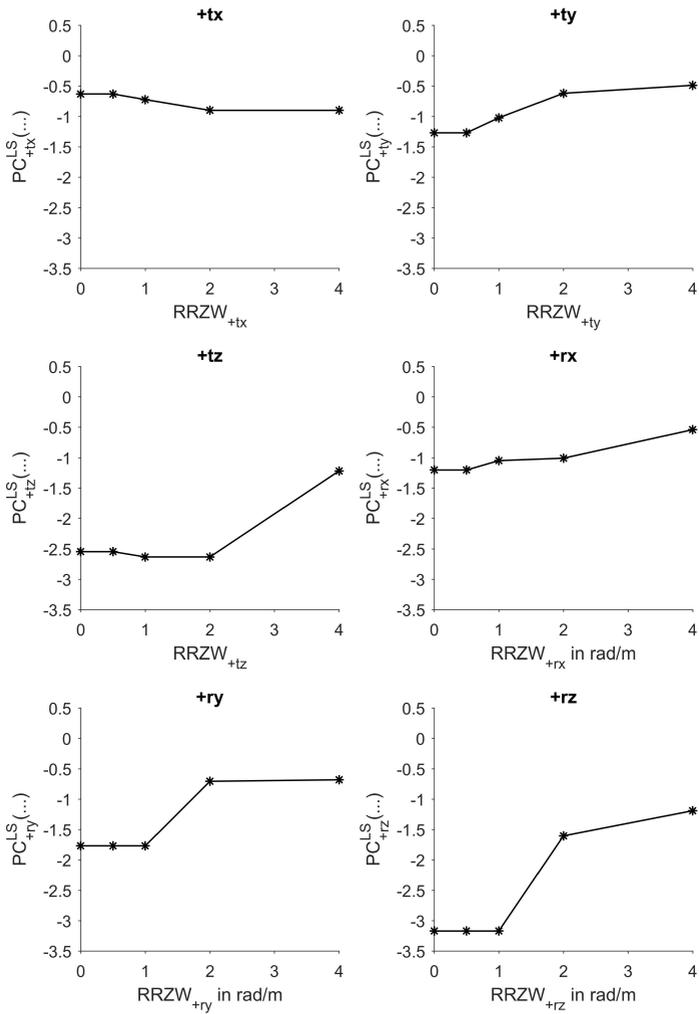


Abbildung C.27: Parameterverläufe von $PC_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem 2 Hz Maskierungsergebnis

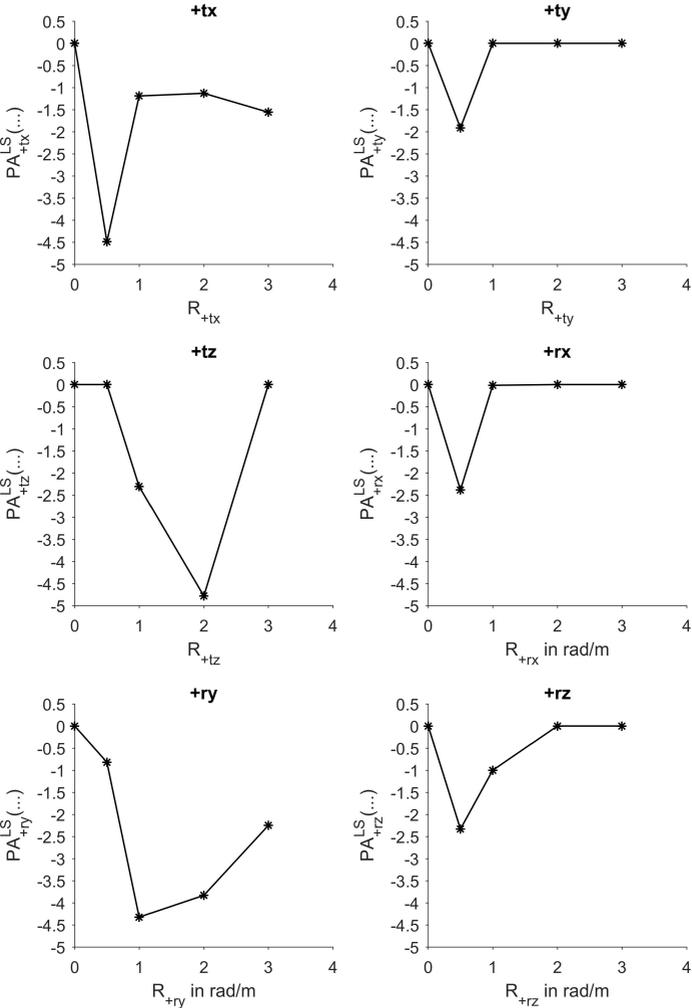


Abbildung C.28: Parameterverläufe von $PA_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßes" bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis

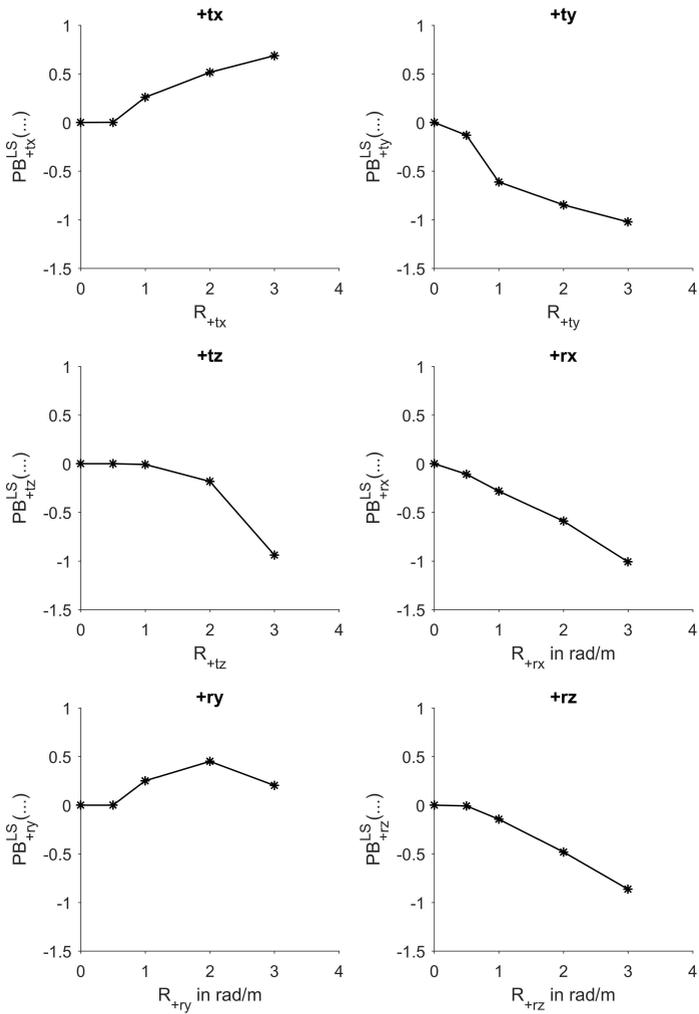


Abbildung C.29: Parameterverläufe von $PBL^S_{MBR}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis

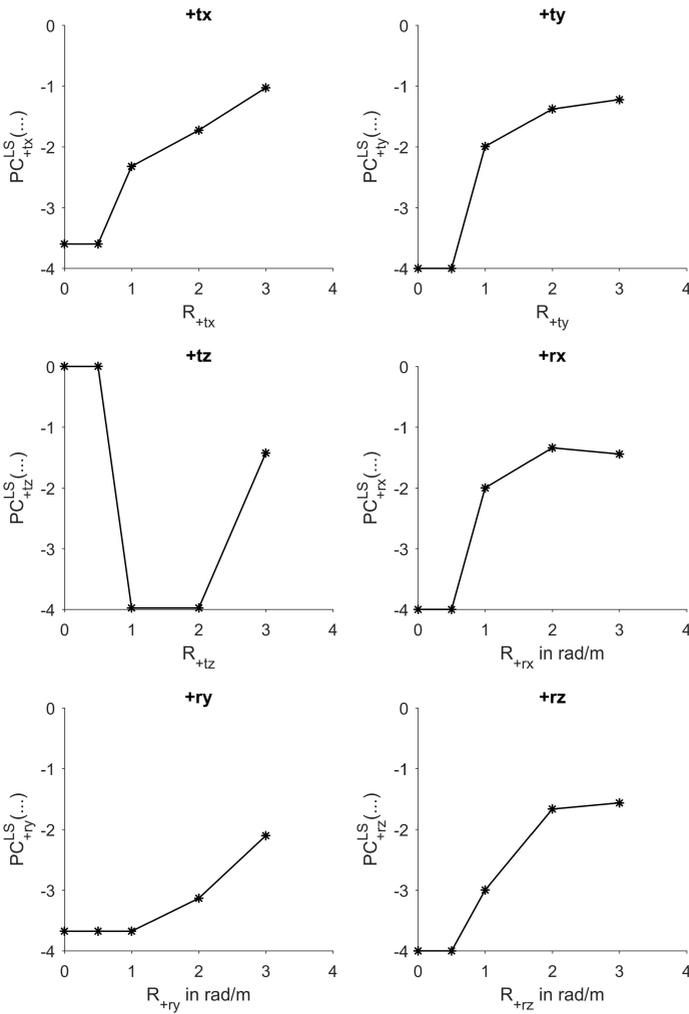


Abbildung C.30: Parameterverläufe von $PCCLS_{MBR}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßes" bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis

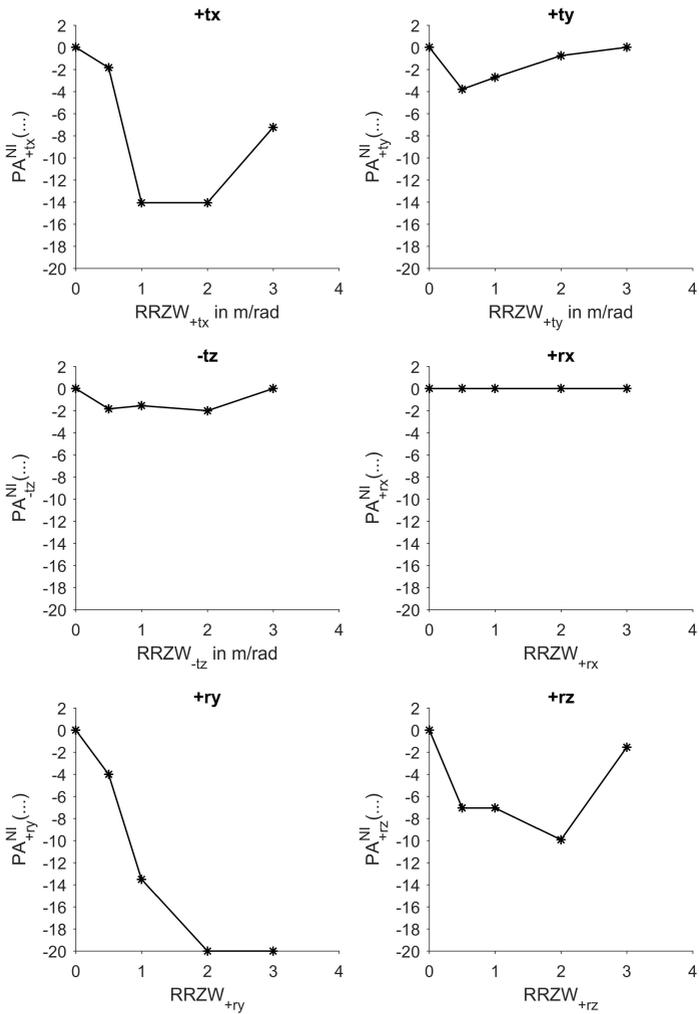


Abbildung C.31: Parameterverläufe von $PA_{MBR}^{NI}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Nickens" bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis

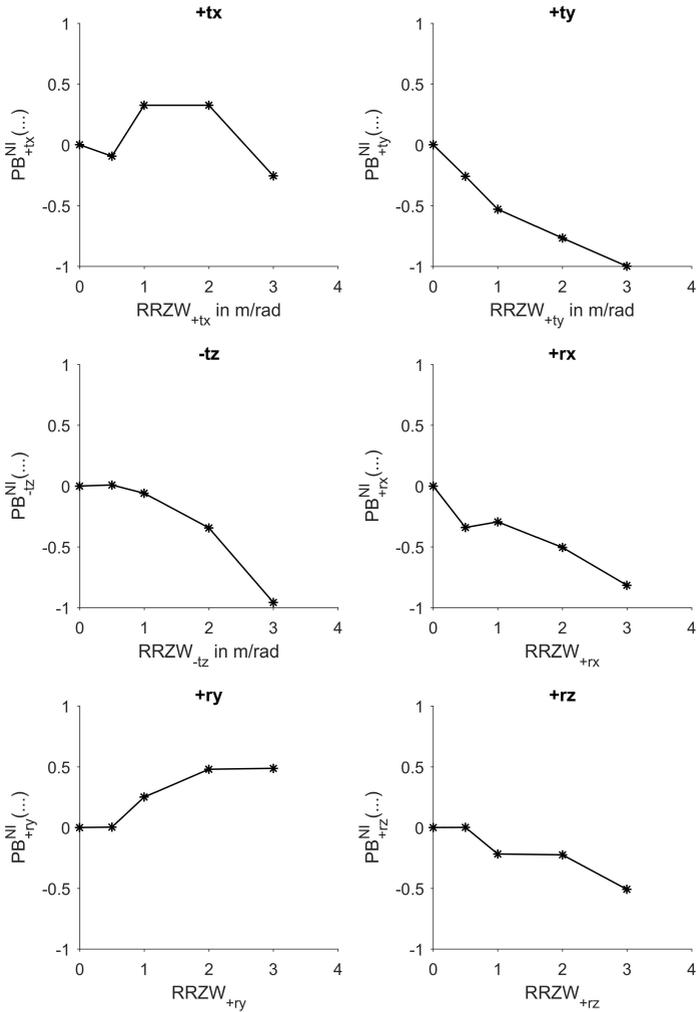


Abbildung C.32: Parameterverläufe von $PB_{MBR}^{NI}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Nickens" bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis

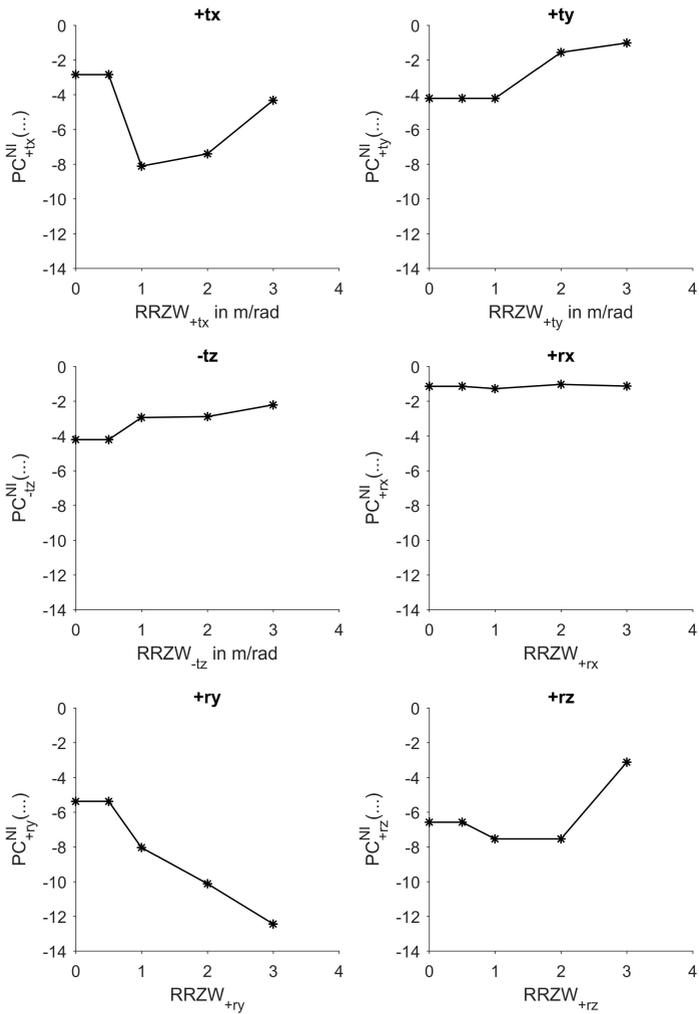


Abbildung C.33: Parameterverläufe von $PC_{MBR}^{NI}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Nickens" bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis

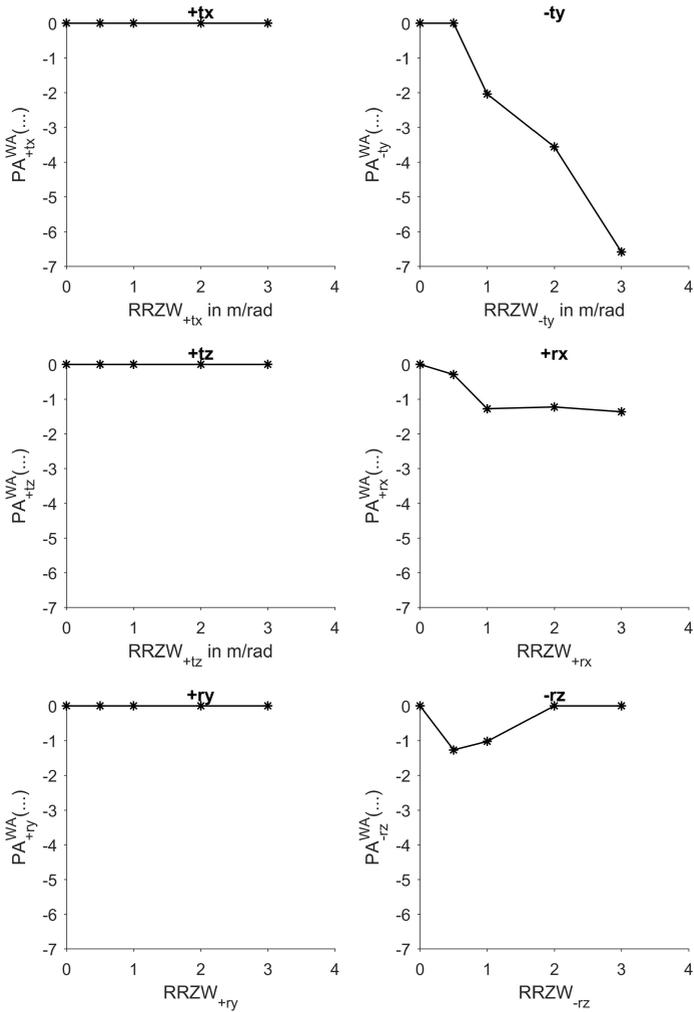


Abbildung C.34: Parameterverläufe von $PA_{MBR}^{WA}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Wankens" bei einem 1 Hz Maskierungsereignis

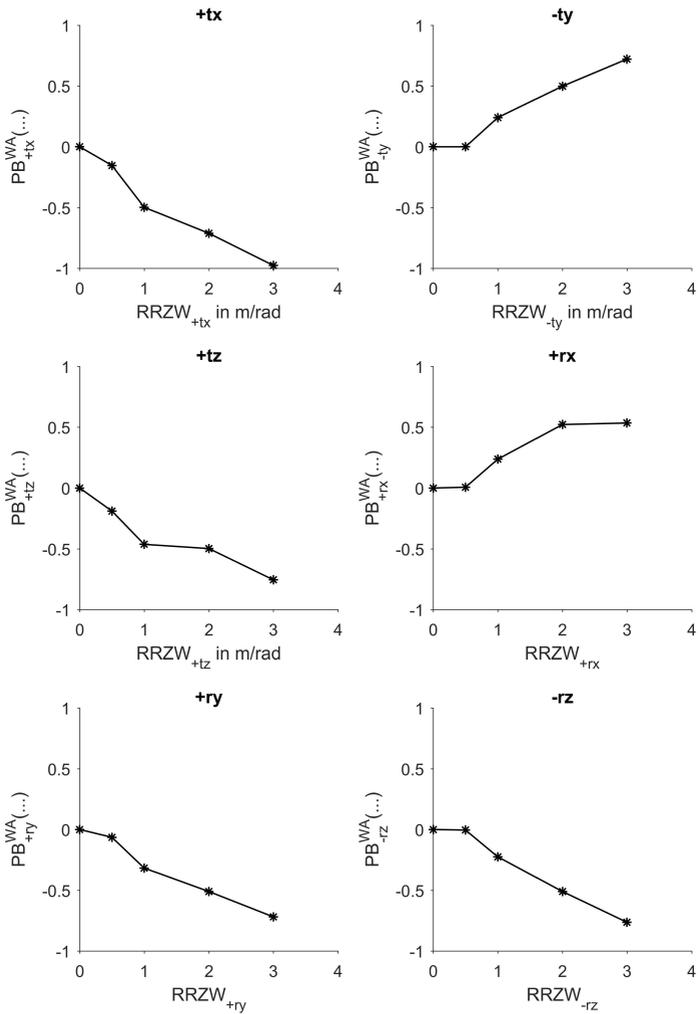


Abbildung C.35: Parameterverläufe von $PB_{MBR}^{WA}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Wankens" bei einem 1 Hz Maskierungsereignis

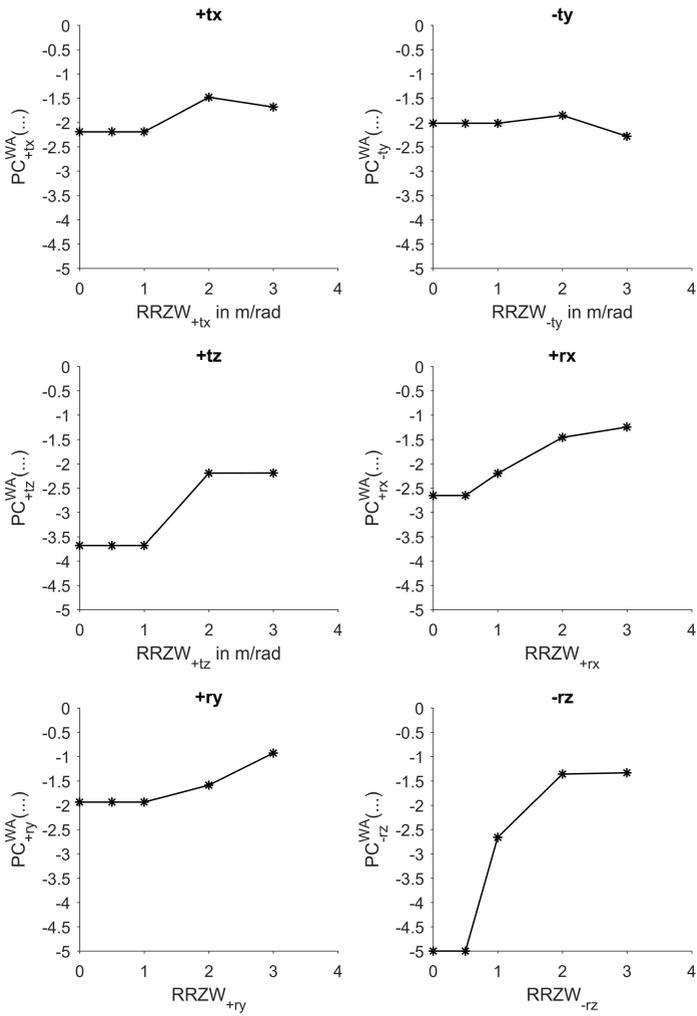


Abbildung C.36: Parameterverläufe von $PC_{MBR}^{WA}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Wankens" bei einem 1 Hz Maskierungsereignis

D Anhang zu Kapitel 7

D.1 Anhang zu Abschnitt 7.1

Root-Mean-Square (RMS) Verlauf

$$a_{RMS,i}(t_{PiP}(j)) = \left[\frac{1}{t_{PiP}(j+1) - t_{PiP}(j-1)} \int_{t=t_{PiP}(j-1)}^{t_{PiP}(j+1)} a_i^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (D.1)$$

Root-Mean-Quad (RMQ) Verlauf

$$a_{RMQ,i}(t_{PiP}(j)) = \left[\frac{1}{t_{PiP}(j+1) - t_{PiP}(j-1)} \int_{t=t_{PiP}(j-1)}^{t_{PiP}(j+1)} a_i^4(t) dt \right]^{1/4} \quad (D.2)$$

Vibration-Dose-Value (VDV) Verlauf

$$a_{VDV,i}(t_{PiP}(j)) = \left[\int_{t=t_{PiP}(j-1)}^{t_{PiP}(j+1)} a_i^4(t) dt \right]^{1/4} \quad (D.3)$$

Maximum (MAX) Verlauf

$$a_{MAX,i}(t_{PiP}(j)) = \max(a_i(t = t_{PiP}(j-1)), \dots, a_i(t = t_{PiP}(j+1))) \quad (D.4)$$

Minimum (MIN) Verlauf

$$a_{MIN,i}(t_{PiP}(j)) = \min(a_i(t = t_{PiP}(j-1)), \dots, a_i(t = t_{PiP}(j+1))) \quad (D.5)$$

Betragsmaximum (MAXB) Verlauf

$$a_{MAXB,i}(t_{PiP}(j)) = \max(|a_{MAX,i}(t_{PiP}(j))|, |a_{MIN,i}(t_{PiP}(j))|) \quad (D.6)$$

Peak-to-Peak- Δt (PtP-Delta t) Verlauf

$$a_{PtP-dt,i}(t_{PtP}(j)) = \frac{a_{PtP,i}(t_{PtP}(j))}{t_{PtP}(j+1) - t_{PtP}(j-1)} \quad (D.7)$$

PtP/RMS Verlauf

$$a_{PtP/RMS,i}(t_{PtP}(j)) = \frac{a_{PtP,i}(t_{PtP}(j))}{a_{RMS}(t_{PtP}(j))} \quad (D.8)$$

PtP/RMQ Verlauf

$$a_{PtP/RMQ,i}(t_{PtP}(j)) = \frac{a_{PtP,i}(t_{PtP}(j))}{a_{RMQ,i}(t_{PtP}(j))} \quad (D.9)$$

PtP/VDV Verlauf

$$a_{PtP/VDV,i}(t_{PtP}(j)) = \frac{a_{PtP,i}(t_{PtP}(j))}{a_{VDV,i}(t_{PtP}(j))} \quad (D.10)$$

MAXB/RMS Verlauf

$$a_{MAXB/RMS,i}(t_{PtP}(j)) = \frac{a_{MAXB,i}(t_{PtP}(j))}{a_{RMS,i}(t_{PtP}(j))} \quad (D.11)$$

MAXB/RMQ Verlauf

$$a_{MAXB/RMQ,i}(t_{PtP}(j)) = \frac{a_{MAXB,i}(t_{PtP}(j))}{a_{RMQ,i}(t_{PtP}(j))} \quad (D.12)$$

MAXB/VDV Verlauf

$$a_{MAXB/VDV,i}(t_{PtP}(j)) = \frac{a_{MAXB,i}(t_{PtP}(j))}{a_{VDV,i}(t_{PtP}(j))} \quad (D.13)$$

D.2 Anhang zu Abschnitt 7.3

Für die Berechnung der Kennwertverläufe werden folgende Notationen verwendet: AP_{Sens} bezeichnet die Fläche eines Sensorelementes (quadratisch). $pr_{R,S}^j$ ist der gemessene Druck eines Sensorelementes in der Reihe R und der Spalte S des Auswertebereiches j . n_R^j und n_S^j bezeichnen die Anzahl der Sensorelemente in Reihen- und Spaltenrichtung eines Auswertebereiches. Die Berechnungsvorschriften aller Kennwertverläufe sind nachfolgend aufgeführt:

Belastete Fläche

$$AP_{bel}^j(t) = \left[\sum_{R=1}^{n_R^j} \sum_{S=1}^{n_S^j} \text{sign}(pr_{R,S}^j(t)) \right] \cdot AP_{Sens} \quad (\text{D.14})$$

Verhältnis der belasteten Fläche des Auswertebereiches und der Fläche eines Bezugsbereiches A_{Bezug}

$$Q_{AP}^j(t) = \frac{AP_{bel}^j(t)}{AP_{Bezug}(t)} \quad (\text{D.15})$$

Resultierende Kraft

$$F(t)^j = \left[\sum_{R=1}^{n_R^j} \sum_{S=1}^{n_S^j} pr_{R,S}^j(t) \right] \cdot AP_{Sens} \quad (\text{D.16})$$

Verhältnis der resultierenden Kraft des Auswertebereiches und der resultierenden Kraft eines Bezugsbereiches F_{Bezug}

$$Q_F^j(t) = \frac{F^j(t)}{F_{Bezug}(t)} \quad (\text{D.17})$$

Mittlerer Druck bzgl. der Gesamtfläche des auszuwertenden Bereiches

$$pr_{ges}^j(t) = \frac{F(t)^j}{AP_{Sens} \cdot n_R^j \cdot n_S^j} \quad (D.18)$$

Verhältnis der mittleren Drücke bzgl. der gesamten Fläche des Auswertebereiches und eines Bezugsbereiches

$$Q_{pr,ges}^j(t) = \frac{pr_{ges}^j(t)}{pr_{ges,Bezug}(t)} \quad (D.19)$$

Mittlerer Druck bzgl. der belasteten Fläche des auszuwertenden Bereiches

$$pr_{bel}^j(t) = \frac{F(t)^j}{AP_{bel}^j(t)} \quad (D.20)$$

Verhältnis der mittleren Drücke bzgl. der belasteten Fläche des Auswertebereiches und eines Bezugsbereiches

$$Q_{pr,bel}^j(t) = \frac{pr_{bel}^j(t)}{pr_{bel,Bezug}(t)} \quad (D.21)$$

x_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes

$$COP_{x_{pr}}^j(t) = \frac{\sum_{R=1}^{n_R^j} \sum_{S=1}^{n_S^j} pr_{R,S}^j(t) \cdot S}{\sum_{R=1}^{n_R^j} \sum_{S=1}^{n_S^j} pr_{R,S}^j(t)} \cdot \sqrt{AP_{Sens}} - 0,5 \sqrt{AP_{Sens}} \quad (D.22)$$

y_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes

$$COP_{y_{pr}}^j(t) = \frac{\sum_{R=1}^{n_R^j} \sum_{S=1}^{n_S^j} pr_{R,S}^j(t) \cdot R}{\sum_{R=1}^{n_R^j} \sum_{S=1}^{n_S^j} pr_{R,S}^j(t)} \cdot \sqrt{AP_{Sens}} - 0,5 \sqrt{AP_{Sens}} \quad (D.23)$$

Relative x_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Anfangswertes

$$COP_{rel,x_{pr},0}^j(t) = COP_{x_{pr}}^j(t) - COP_{x_{pr}}^j(0) \quad (D.24)$$

Relative y_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Anfangswertes

$$COP_{rel,y_{pr},0}^j(t) = COP_{y_{pr}}^j(t) - COP_{y_{pr}}^j(0) \quad (D.25)$$

Relative x_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Mittelwertes der Gesamtmessdauer T

$$COP_{rel,x_{pr},m}^j(t) = COP_{x_{pr}}^j(t) - \frac{\sum_{t=0}^T COP_{x_{pr}}^j(t)}{T} \quad (D.26)$$

Relative y_{pr} -Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Mittelwertes

$$COP_{rel,y_{pr},m}^j(t) = COP_{y_{pr}}^j(t) - \frac{\sum_{t=0}^T COP_{y_{pr}}^j(t)}{T} \quad (D.27)$$

Druckschwerpunktsgeschwindigkeit in x_{pr} -Richtung

$$vCOP_{x_{pr}}^j(t) = \frac{d}{dt} COP_{x_{pr}}^j(t) \quad (D.28)$$

Druckschwerpunktsgeschwindigkeit in y_{pr} -Richtung

$$vCOP_{y_{pr}}^j(t) = \frac{d}{dt} COP_{y_{pr}}^j(t) \quad (D.29)$$

Druckschwerpunktbeschleunigung in x_{pr} -Richtung

$$aCOP_{x_{pr}}^j(t) = \frac{d^2}{dt^2} COP_{x_{pr}}^j(t) \quad (D.30)$$

Druckschwerpunktsbeschleunigung in y_{pr} -Richtung

$$aCOP_{y_{pr}}^j(t) = \frac{d^2}{dt^2} COP_{y_{pr}}^j(t) \quad (\text{D.31})$$

E Anhang zu Kapitel 8

E.1 Anhang zu Abschnitt 8.1

$$\begin{aligned}
 \hat{N}_{Tr,logi}^{LS} = & 1,02 \cdot \text{LnInt}T_{VDV,HA,ws,tz}^a + 1,22 \cdot \text{LnInt}T_{VDV,VA,gs,tz}^a \\
 & - 0,96 \cdot \text{LnInt}T_{VDV,HA,ws,tz}^a \cdot \text{LnSum}T_{VDV,FaSiKo,vl,t,x,Mask7}^a \\
 & - 3,78 \cdot \text{LnSum}T_{VDV,FaSiKo,vl,t,x,Mask7}^a + 3,08. \quad (E.1)
 \end{aligned}$$

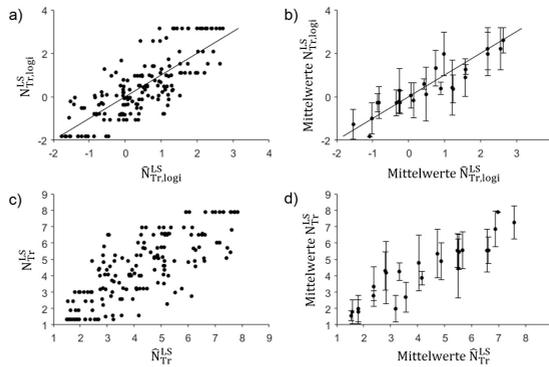


Abbildung E.1: Erweitertes Regressionsmodell des „Längsstoßes“: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten

$$\hat{N}_{Tr,logi}^{NI} = -3,28 \cdot LnSumT_{VDV/PtP,HA,gs,tz}^a - 1,48 \cdot LnSumT_{VDV/PtP,VA,gs,tz}^a - 1,66 \cdot LnSumT_{VDV/PtP,HA,gs,tz}^a \cdot LnSumT_{VDV,FaSiKo,ry,Mask7}^a + 2,99 \cdot LnSumT_{VDV,FaSiKo,ry,Mask7}^a + 8,98. \quad (E.2)$$

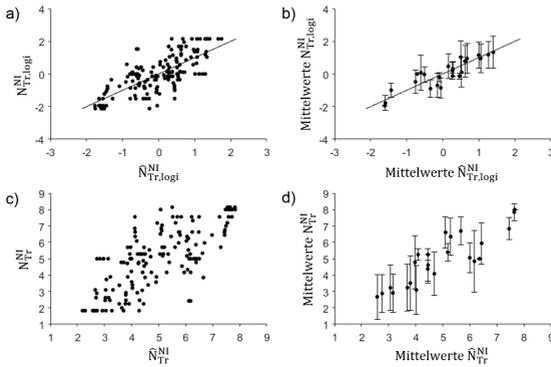


Abbildung E.2: Erweitertes Regressionsmodell des „Nickens“: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten

$$\begin{aligned}
 \hat{N}_{Tr,logi}^{WA} = & 5,18 \cdot \text{LnInt}T_{VDV,VA,ws,tz}^a - 6,79 \cdot \text{LnInt}T_{VDV,HA,ws,tz}^a \\
 & + 0,59 \cdot \text{LnInt}T_{VDV,VA,ws,tz}^a \cdot \text{Sum}T_{RMS,FaSiKo,vl,ty}^a \\
 & + 1,63 \cdot \text{Sum}T_{RMS,FaSiKo,vl,ty}^a - 3,14 . \quad (E.3)
 \end{aligned}$$

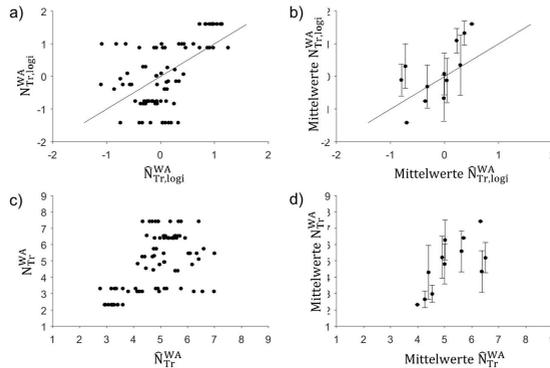


Abbildung E.3: Erweitertes Regressionsmodell des „Wankens“: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten

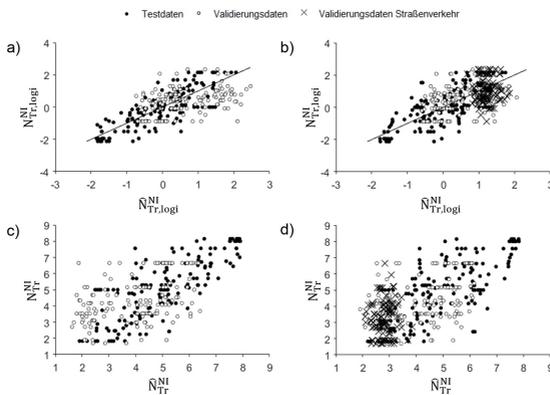


Abbildung E.4: Lage der Test- und Validierungsdaten des „Nickens“ mit: a) logistisch transformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, b) logistisch transformierte Noten des erweiterten Modells, c) rücktransformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, d) rücktransformierte Noten des erweiterten Modells

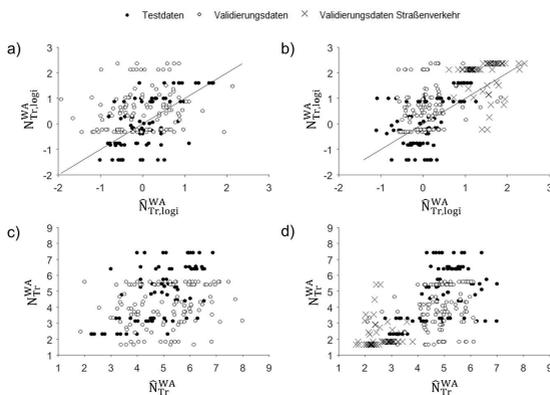


Abbildung E.5: Lage der Test- und Validierungsdaten des „Wankens“ mit: a) logistisch transformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, b) logistisch transformierte Noten des erweiterten Modells, c) rücktransformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, d) rücktransformierte Noten des erweiterten Modells

Abbildungsverzeichnis

2.1	Komfortmodell nach Zhang et al. [128]	6
2.2	Darstellung des Komforts als Ergebnis aus Gefallen und Nicht-Erleiden nach Knoll [69]	6
2.3	Komfortpyramide nach Bubb [23]	7
2.4	Actros 4x2 Sattelzugmaschine [27]	8
2.5	Vereinfachte Darstellung einer 4x2 Sattelzugmaschine als Mehrmassenschwinger	8
2.6	Draufsicht auf das Interieur eines Actros Fahrerhauses aus [27] mit eingezeichneten Fahrer-LKW-Schnittstellen	10
2.7	Qualitativer Zusammenhang zwischen dem Verlauf eines Reizes und den Aktionspotenzialen von Merkel-Zelle, Ruffini-, Meissner- und Pacini-Körperchen (nach [75])	13
2.8	Aufbau des Vestibularapparates (aus [111])	14
2.9	Verwendetes Koordinatensystem am Beispiel eines Actros aus [27]	19
2.10	Hauptbewegungsrichtung des „Längsstößens“ am Beispiel eines Actros aus [27]	20
2.11	Hauptbewegungsrichtung des „Nickens“ am Beispiel eines Actros aus [27]	21
2.12	Hauptbewegungsrichtung des „Wankens“ am Beispiel eines Actros aus [27]	22

3.1	Äquivalente Komfortkonturen für Wahrnehmungsstärken von 25-300 nach Gleichung 2.4 relativ zu einer Schwingungsstärke von $1,0 \text{ m/s}^2$ RMS (Vertikalschwingungen) oder $0,5 \text{ m/s}^2$ RMS (Longitudinal- und Lateralschwingungen) bei 20 Hz nach [86]	25
3.2	Kurven gleicher „Bewerteter Schwingstärken“ K in Abhängigkeit von Frequenz und Schwingbeschleunigung bei Einwirkung in z-Richtung (KZ) für den sitzenden Menschen [120]	37
3.3	Bewertungsfunktionen für periodische Anregungen: a) Sitz in Längs- und Querrichtung, b) Sitz in vertikaler Richtung, c) Fuß in vertikaler Richtung, d) Hand in vertikaler Richtung, e) Fuß in Längs- und Querrichtung, f) Rückenlehne in Längs- und Querrichtung, g) „Nicken“, h) „Wanken“ [82]	38
3.4	Frequenzbewertungskurven nach ISO 2631-1 von 1997 [58] und VDI 2057-1 von 2002 [122]	40
4.1	Qualitative Darstellung der Sensorplatzierungen am Fahrzeug unter Verwendung eines Actros aus [27]	52
4.2	Endpunktbenannte 9-Punkte-Skala zur Bewertung der Schwingungsphänomenstärke	57
4.3	Einteilung des Körpers in Wahrnehmungsbereiche mit Hilfe einer [8] nachempfundenen und erweiterten Bodymap	58
4.4	Teststrecke EVZ Wörth nach [26]	61
4.5	Lineare Notentransformation für das „Längsstößen“ in MK1	67
4.6	Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkennoten des Variantenfahrzeuges für das „Längsstößen“ (LS) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives	67

4.7	Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Referenzfahrzeuges für das „Längsstößen“ (LS) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives	68
4.8	Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Variantenfahrzeuges für das „Nicken“ (NI) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives	69
4.9	Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Referenzfahrzeuges für das „Nicken“ (NI) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives	70
4.10	Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Variantenfahrzeuges für das „Wanken“ (WA) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives	71
4.11	Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten des Referenzfahrzeuges für das „Wanken“ (WA) bzgl. aller Messkampagnen und Bahnen des korrespondierenden Streckenkollektives	71
4.12	Notenverteilung der transformierten Phänomenstärkenoten bzgl. der Akzeptanz	73
4.13	Wahrnehmungsrelevante Körperbereiche zu den untersuchten Schwingungsphänomenen	75
4.14	Für die Bewertung der Phänomenstärke relevante Faktoren	76
5.1	Darstellung des Ride Simulators der Daimler AG nach [61] und des verwendeten Koordinatensystems	78
5.2	Ride Simulator Versuchsaufbau	79
5.3	Ride Simulator Sensoranordnung	80

5.4	Vorgang zur Isolation eines Schwingungsereignisses am Beispiel des „Längsstoßes“ mit Hilfe des Beschleunigungssignals $a_{Sim,tx}$	82
5.5	z-Komponente des Hintergrundsignals	83
5.6	a) x-Komponente des Beschleunigungssignals b) x-Komponente des Beschleunigungssignals bei zeitlich gestrecktem Ereignis, jeweils für das „Längsstoßen“	84
5.7	Links: Boxplots der Phänomenstärkenbewertungen bei variiertem Frequenz. Rechts: Frequenzabhängige Gewichtungsfaktoren	88
5.8	Schematische Darstellung der Maskierungswirkung eines Tons bestimmten Schalldruckpegels mit den drei Maskierungsbereichen „Vormaskierung“, „Simultanmaskierung“ und „Nachmaskierung“ aus [33]	90
5.9	Qualitative Darstellung des Untersuchungsziels zur Maskierung von Schwingungsereignissen	93
5.10	Darstellung des Referenzsignals und eines Variantensignals am Beispiel des „Nickens“	95
5.11	Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots)$ für translatorische Maskierungsereignisse ($f_{Mask} = 2\text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung eines „Längsstoßes“ ($f_{Ref} = 4,5\text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiertem Maskierungsbewegungsrichtung MBR	101
5.12	Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots)$ für Rotationsmaskierungsereignisse ($f_{Mask} = 2\text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung eines „Längsstoßes“ ($f_{Ref} = 4,5\text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiertem Maskierungsbewegungsrichtung MBR	102

-
- 5.13 Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots)$ für translatorische Maskierungsereignisse ($f_{Mask} = 4,5 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung eines „Längsstoßes“ ($f_{Ref} = 4,5 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbewegungsrichtung MBR 104
- 5.14 Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{LS}(\dots)$ für Rotationsmaskierungsereignisse ($f_{Mask} = 4,5 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung eines „Längsstoßes“ ($f_{Ref} = 4,5 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbewegungsrichtung MBR 105
- 5.15 Verlauf des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{NI}(\dots)$ für translatorische Maskierungsereignisse ($f_{Mask} = 1,3 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung des „Nickens“ ($f_{Ref} = 1,3 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbewegungsrichtung MBR 107
- 5.16 Verlauf des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{NI}(\dots)$ für Rotationsmaskierungsereignisse ($f_{Mask} = 1,3 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung des „Nickens“ ($f_{Ref} = 1,3 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbewegungsrichtung MBR 108
- 5.17 Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{WA}(\dots)$ für translatorische Maskierungsereignisse ($f_{Mask} = 1 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung des „Wankens“ ($f_{Ref} = 1 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbewegungsrichtung MBR 111
- 5.18 Verhalten des Maskierungsfaktors $G_{Mask,MBR}^{WA}(\dots)$ für Rotationsmaskierungsereignisse ($f_{Mask} = 1 \text{ Hz}$) bzgl. der Bewertung des „Wankens“ ($f_{Ref} = 1 \text{ Hz}$) bei variiertem zeitlichen Abstand Δt , relativen Reizzuwachs $RRZW_{MBR}$ und variiert Maskierungsbewegungsrichtung MBR 112
- 5.19 Leinwand des Ride Simulators zur Projektion von Fahrbahnvideos 122

5.20	Verteilung der probandenabhängigen Audio-Video-Maskierungsfaktoren $G_{AV,Prob}$ bei Variation des Audiosignalgewichtungsfaktors G_{AS} , des Videosignals(V) und der Signalstärke durch den Gewichtungsfaktor $G_{Freq,3-6}$	123
6.1	Ablauf der Frequenzfilterung mit Hilfe der schwingungsphänomenabhängigen Frequenzgewichtungskurven $G_{Freq}^{SP}(f)$	130
6.2	Darstellung der geschätzten Maskierungsfaktorverläufe für $f_{Ref} = 1\text{ Hz}$, $f_{Mask} = 1\text{ Hz}$ und ausgewählte $RRZW_{MBR}$ der Maskierungsbewegungsrichtungen $-ty$ und $+tz$ des „Wankens“	131
6.3	Darstellung der $RRZW_{MBR}$ -abhängigen Parameterverläufe zu den geschätzten Maskierungsfaktorfunktionen des „Wankens“ für die Maskierungsbewegungsrichtungen $-ty$ und $+tz$ sowie $f_{Ref} = 1\text{ Hz}$, $f_{Mask} = 1\text{ Hz}$	133
6.4	Schwingungseinteilung zur Kennwertverlaufsberechnung	137
6.5	Qualitative Darstellung der PtP Verläufe $a_{PtP,FG, HBR}(t_{PtP, HBR})$ und $a_{PtP,FG(FB), MBR}(t_{PtP, MBR})$ mit Kennzeichnung der Einflussnahme aller $k(t_0)$ Werte der Maskierungsbewegungsrichtung für $t_0 - 4\text{ s} \leq t_{PtP, MBR} \leq t_0$ auf einen Wert der Hauptbewegungsrichtung $a_{PtP,FG, HBR}(t_0)$	138
7.1	Erzeugung des globalen Triggerverlaufes: a) Probandenabhängiger Triggerverlauf, b) quantisierter probandenabhängiger Triggerverlauf, c) aggregierter Triggerverlauf	148
7.2	Gegenüberstellung von aggregiertem Triggerverlauf (dünne Linie) und ausgewähltem Kennwertverlauf (fette Linie) am Beispiel des „Nickens“ auf Bahn 7 der Messkampagne 1	151
7.3	Einteilung der Druckmessmatten-Sensormatrizen in unterschiedliche Analysebereiche	152
7.4	Logistischer Ansatz zur Berücksichtigung von Wahrnehmungsschwelle und Sättigungsgrenze	157

7.5	Logistische Transformation der Noten	158
8.1	Regressionsmodell des „Längsstoßens“ mit geschätzten bahnabhängigen Gewichtungsfaktoren: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten	165
8.2	Regressionsmodell des „Nickens“ mit geschätzten bahnabhängigen Gewichtungsfaktoren: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten	165
8.3	Regressionsmodell des „Wankens“ mit geschätzten bahnabhängigen Gewichtungsfaktoren: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten	166
8.4	Lage der Test- und Validierungsdaten des „Längsstoßens“ mit: a) logistisch transformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, b) logistisch transformierte Noten des erweiterten Modells, c) rücktransformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, d) rücktransformierte Noten des erweiterten Modells	170

A.1 Darstellung der messkampagnenabhängigen Probandenkollektive in Abhängigkeit des Alters, der Körpermasse, der Körpergröße und des BMIs (alle Probanden sind männlich) 178

B.1 Darstellung der schwingungsphänomenabhängigen Probandenkollektive in Abhängigkeit des Alters, der Körpermasse, der Körpergröße und des BMIs (alle Probanden sind männlich) . . . 193

B.2 Darstellung der Probandenkollektive zu den Untersuchungen mit mehreren Maskierungsereignissen sowie den Audio / Video Untersuchungen in Abhängigkeit des Alters, der Körpermasse, der Körpergröße und des BMIs (alle Probanden sind männlich) . 216

C.1 Fits für $MBR = +txzu$ den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 225

C.2 Fits für $MBR = +tyzu$ den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 226

C.3 Fits für $MBR = +tzzu$ den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 227

C.4 Fits für $MBR = +rxzu$ den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 228

C.5 Fits für $MBR = +ryzu$ den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 229

C.6 Fits für $MBR = +rzzu$ den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 230

C.7	Fits für $MBR = +txz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	231
C.8	Fits für $MBR = +tyz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	232
C.9	Fits für $MBR = +tzz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	233
C.10	Fits für $MBR = +rxz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	234
C.11	Fits für $MBR = +ryz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	235
C.12	Fits für $MBR = +rzz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	236
C.13	Fits für $MBR = +txz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	237
C.14	Fits für $MBR = +tyz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	238
C.15	Fits für $MBR = -tzz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	239
C.16	Fits für $MBR = +rxz$ zu den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren	240

C.17 Fits für $MBR = +ryzu$ den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 241

C.18 Fits für $MBR = +rzzu$ den Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 242

C.19 Fits für $MBR = +txzu$ den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 243

C.20 Fits für $MBR = -tyzu$ den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 244

C.21 Fits für $MBR = +tzzu$ den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 245

C.22 Fits für $MBR = +rxzu$ den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 246

C.23 Fits für $MBR = +ryzu$ den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 247

C.24 Fits für $MBR = -rzzu$ den Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem 1 Hz Maskierungsereignis und Verteilung der probandenabhängigen Maskierungsfaktoren 248

C.25 Parameterverläufe von $PA_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis 249

C.26 Parameterverläufe von $PB_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem 2 Hz Maskierungsereignis 250

C.27	Parameterverläufe von $PC_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem 2 Hz Maskierungsereignis	251
C.28	Parameterverläufe von $PA_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis	252
C.29	Parameterverläufe von $PB_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis	253
C.30	Parameterverläufe von $PC_{MBR}^{LS}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Längsstoßens" bei einem 4,5 Hz Maskierungsereignis	254
C.31	Parameterverläufe von $PA_{MBR}^{NI}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Nickens" bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis	255
C.32	Parameterverläufe von $PB_{MBR}^{NI}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Nickens" bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis	256
C.33	Parameterverläufe von $PC_{MBR}^{NI}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Nickens" bei einem 1,3 Hz Maskierungsereignis	257
C.34	Parameterverläufe von $PA_{MBR}^{WA}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Wankens" bei einem 1 Hz Maskierungsereignis	258
C.35	Parameterverläufe von $PB_{MBR}^{WA}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Wankens" bei einem 1 Hz Maskierungsereignis	259
C.36	Parameterverläufe von $PC_{MBR}^{WA}(RRZW_{MBR})$ zur Schätzung der Maskierungsfaktoren des "Wankens" bei einem 1 Hz Maskierungsereignis	260

E.1 Erweitertes Regressionsmodell des „Längsstößens“: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten 267

E.2 Erweitertes Regressionsmodell des „Nickens“: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten 268

E.3 Erweitertes Regressionsmodell des „Wankens“: a) logistisch transformierte Noten, b) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der logistisch transformierten Noten, c) rücktransformierte Noten, d) messkampagnen- und bahnabhängige Mittelwerte und Standardabweichungen der rücktransformierten Noten 269

E.4 Lage der Test- und Validierungsdaten des „Nickens“ mit: a) logistisch transformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, b) logistisch transformierte Noten des erweiterten Modells, c) rücktransformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, d) rücktransformierte Noten des erweiterten Modells 270

E.5 Lage der Test- und Validierungsdaten des „Wankens“ mit: a) logistisch transformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, b) logistisch transformierte Noten des erweiterten Modells, c) rücktransformierte Noten mit geschätzten Gewichtungsfaktoren, d) rücktransformierte Noten des erweiterten Modells 270

Tabellenverzeichnis

2.1	Resonanzfrequenzen f_{Res} des menschlichen Körpers aus [106]. . .	10
2.2	Notationen zur Beschreibung von Bewegungsrichtungen	19
3.1	Zusammenhang zwischen dem Effektivwert a_{RMS} der frequenz- bewerteten Beschleunigung $a_w(t)$ und der subjektiven Wahr- nehmung bei sinusförmiger Schwingung nach VDI 2057-1 von 2002 [122]	40
4.1	Übersicht aller Messstellen	56
4.2	Sitzeinstellungen	59
4.3	Übersicht der Fahrzeugkonfigurationen aller Messkampagnen . .	60
4.4	Übersicht der verwendeten Bahnen des EVZ Wörth	61
4.5	Streckenkollektive	62
4.6	Mittelwerte und Standardabweichungen $\mu(SD)$ der messkam- pagnenabhängigen Probandenkollektivdaten	64
4.7	Übersicht der Validierungsstrecken außerhalb des EVZ Wörth .	65
4.8	Schwingungsphänomenabhängige Phänomenstärkenotengren- zen zu jedem Akzeptanzkriterium	74
5.1	RMS-Werte aller Beschleunigungskomponenten des Hinter- grundsignals	83
5.2	Untersuchte Frequenzbereiche	84
5.3	Untersuchte Beschleunigungsamplituden des Einzelereignisses .	85
5.4	Mittelwerte und Standardabweichungen $\mu(SD)$ der Probanden- kollektivdaten zu den Frequenzuntersuchungen am Simulator . .	86

5.5	Zusammenfassende Ergebnisse der Frequenzuntersuchungen . . .	89
5.6	Schwingungsphänomenabhängige Amplituden der Beschleunigungskomponenten des Referenzereignisses	94
5.7	Variationsstufen der Maskierungsparameter beim „Nicken“	97
5.8	Variationsstufen der Maskierungsparameter bei zwei Maskierungsereignissen	114
5.9	Mittelwerte und Standardabweichungen $\mu(SD)$ der Probandenkollektivdaten zu den Untersuchungen mit mehreren Maskierungsereignissen	115
5.10	Beispiel eines Versuches mit zwei Maskierungsereignissen und dem dazugehörigen Versuch mit nur einem Maskierungsereignis	116
5.11	Korrelationen zwischen den geschätzten und im Versuch bestimmten Gesamtmaskierungsfaktoren	118
5.12	RMS-Werte der Beschleunigungskomponente tx aller Signalvarianten zur Untersuchung des Audio- und Videoeinflusses	119
5.13	RMS-Werte der konstanten Beschleunigungskomponenten ty, tz, rx, ry und rz zur Untersuchung des Audio- und Videoeinflusses	120
5.14	Faktorstufen der Untersuchungen zum Einfluss von Audio- und Videosignalen auf die Bewertungsabgabe am Simulator	120
5.15	Mittelwerte und Standardabweichungen $\mu(SD)$ der Probandenkollektivdaten zu den Audio/Video-Untersuchungen	121
5.16	G_{AV} -Werte aller Variantensignale	124
5.17	Wahrscheinlichkeitswerte p des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bzgl. eines Unterschiedes zwischen den Signalen ohne audiovisuellem Einfluss ($G_{AS} = 0, V = 0$) und denen mit audiovisuellem Einfluss	124
5.18	Wahrscheinlichkeitswerte p des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests bzgl. eines Unterschiedes der Variantensignale mit $G_{AS} > 0$ und $V = 0$ zu denen mit $G_{AS} > 0$ und $V = 1$	125

6.1	Mittelwerte der Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r) zum Zusammenhang der geschätzten und den aus Versuchen ermittelten Maskierungsfaktoren aller Schwingungsphänomene	132
6.2	Verwendete Berechnungskombinationen zur Berechnung des Gesamtmaskierungsfaktors \widehat{GK}_{Mask}^{SP}	143
7.1	Kennwertverläufe aus den Beschleunigungssignalen	147
7.2	Auswahl der Kennwertverläufe zur Berechnung von Einzelkennwerten	151
7.3	Übersicht der schwingungsphänomenabhängigen Bereichskombinationen	153
7.4	Berechnete Kennwertverläufe aus den Druckmessmattendaten: Flächen-, Druck- und Kraftverläufe	154
7.5	Berechnete Kennwertverläufe aus den Druckmessmattendaten: Druckschwerpunktsbewegungen	155
7.6	Skalare Kennwerte mit den größten Korrelationswerten für jedes Schwingungsphänomen SP	159
7.7	Parameterwerte PD und PE in Abhängigkeit der Bahn am Beispiel des „Längsstoßens“ anhand des skalaren Kennwertes $LnSumT_{VDV, FaSiKo, vl, tx, Mask7}^a$	160
8.1	Ausgewählte skalare Kennwerte (SKW) für die Regressionsmodelle der Schwingungsphänomene SP	162
8.2	Bahnabhängige Gewichtungsfaktoren für alle Bahnen des Streckenkollektives der jeweiligen Schwingungsphänomene	163
8.3	Statistiken zu den Regressionsmodellen	164
8.4	Korrelierende Achsbeschleunigungskennwerte SKW_{Achs}	166
8.5	Werte der Regressionskoeffizienten $b_{erw,i}$ zu den erweiterten Regressionsmodellen	167
8.6	Statistiken zu den erweiterten Regressionsmodellen	168
8.7	Ergebnisse des t-Tests zur Validierung der Regressionsmodelle	169

8.8	Prozentsätze zur Validierung der Regressionsmodelle	170
A.1	Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Variantenfahrzeugs bzgl. des „Längsstoßens“	179
A.2	Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Referenzfahrzeugs bzgl. des „Längsstoßens“	181
A.3	Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Variantenfahrzeugs bzgl. des „Nickens“	183
A.4	Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Referenzfahrzeugs bzgl. des „Nickens“	185
A.5	Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Variantenfahrzeugs bzgl. des „Wankens“	187
A.6	Deskriptive Statistiken zu den Phänomenstärkebewertungen des Referenzfahrzeugs bzgl. des „Wankens“	188
A.7	Schwingungsphänomenabhängige Medianwerte der Phäno- menstärkenoten zu jedem Akzeptanzkriterium	189
B.1	Schwingungsphänomenabhängige untersuchte Frequenzen . . .	192
B.2	Deskriptive Statistiken zu den frequenzabhängigen Bewertun- gen der Phänomenstärke des Längsstoßens	194
B.3	Deskriptive Statistiken zu den frequenzabhängigen Bewertun- gen der Phänomenstärke des Nickens	195
B.4	Deskriptive Statistiken zu den frequenzabhängigen Bewertun- gen der Phänomenstärke des Wankens	196
B.5	Variationsstufen der niederfrequenten Maskierungsparameter beim „Längsstoßen“	197
B.6	Variationsstufen der höherfrequenten Maskierungsparameter beim „Längsstoßen“	197
B.7	Variationsstufen der Maskierungsparameter beim „Wanken“ . .	198
B.8	Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 1	199
B.9	Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 2	200

B.10	Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 3	201
B.11	Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 4	202
B.12	Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 5	203
B.13	Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche - Block 6	204
B.14	Wahrscheinlichkeitswerte des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang- Tests bzgl. des Unterschiedes der Bewertungen zum Referenz- signal bei einer 2 Hz Maskierung des "Längsstoßens"	205
B.15	Wahrscheinlichkeitswerte des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang- Tests bzgl. des Unterschiedes der Bewertungen zum Referenz- signal bei einer 4,5 Hz Maskierung des "Längsstoßens"	207
B.16	Wahrscheinlichkeitswerte des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang- Tests bzgl. des Unterschiedes der Bewertungen zum Referenz- signal bei einer 1,3 Hz Maskierung des "Nickens"	209
B.17	Wahrscheinlichkeitswerte des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang- Tests bzgl. des Unterschiedes der Bewertungen zum Referenz- signal bei einer 1 Hz Maskierung des "Wankens"	211
B.18	Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche mit zwei Mas- kierungsereignissen - Block 1	214
B.19	Versuchsreihenfolge der Maskierungsversuche mit zwei Mas- kierungsereignissen - Block 2	215
B.20	Deskriptive Statistiken zu den Maskierungsfaktoren bei mehre- ren Maskierungsereignissen	217
B.21	Versuchsreihenfolge der Variantensignale zu den Audio / Video Untersuchungen: Block 1	219
B.22	Versuchsreihenfolge der Variantensignale zu den Audio / Video Untersuchungen: Block 2	220

C.1 Gerundete Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_{MBR}) und deren Wahrscheinlichkeitswerte (p_{MBR}) zum Zusammenhang zwischen den geschätzten Maskierungsfaktoren und den durch Versuche bestimmten Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem Maskierungsereignis von 2 Hz 221

C.2 Gerundete Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_{MBR}) und deren Wahrscheinlichkeitswerte (p_{MBR}) zum Zusammenhang zwischen den geschätzten Maskierungsfaktoren und den durch Versuche bestimmten Maskierungsfaktoren des “Längsstoßens“ bei einem Maskierungsereignis von 4,5 Hz 222

C.3 Gerundete Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_{MBR}) und deren Wahrscheinlichkeitswerte (p_{MBR}) zum Zusammenhang zwischen den geschätzten Maskierungsfaktoren und den durch Versuche bestimmten Maskierungsfaktoren des “Nickens“ bei einem Maskierungsereignis von 1,3 Hz 223

C.4 Gerundete Korrelationskoeffizienten nach Pearson (r_{MBR}) und deren Wahrscheinlichkeitswerte (p_{MBR}) zum Zusammenhang zwischen den geschätzten Maskierungsfaktoren und den durch Versuche bestimmten Maskierungsfaktoren des “Wankens“ bei einem Maskierungsereignis von 2 Hz 224

Formelverzeichnis

2.1:	Weber Gesetz	17
2.2:	Anwendung des Weber Gesetzes	17
2.3:	Weber-Fechner Gesetz	17
2.4:	Stevens Potenzgesetz	18
3.1:	Bewertete Schwingstärke	36
3.2:	Erweiterte Bewertete Schwingstärke nach Hennecke	37
3.3:	Bewertete Schwingstärke für periodische Schwingungen nach Klingner	38
3.4:	Bewertete Schwingstärke für stochastische Schwingungen nach Klingner	39
3.5:	Insgesamt wirkende Bewertete Schwingstärke nach Klingner .	39
3.6:	Effektivwert der frequenzbewerteten Beschleunigung	39
3.7:	Gleitender Effektivwert	41
3.8:	Maximum des gleitenden Effektivwertes	41
3.10:	Crestfaktor	41
3.11:	Schwingungsgesamtwert	41
3.12:	RMQ-Wert	42
3.13:	VDV-Wert	42
4.1:	Berechnung der Rotationsbeschleunigung um die x-Achse . .	53
4.2:	Berechnung der Rotationsbeschleunigung um die y-Achse . .	53
4.3:	Berechnung der Rotationsbeschleunigung um die z-Achse . . .	53
4.4:	Berechnung der gleichseitigen Beschleunigung der Vorder- achse in z-Richtung	54

4.5:	Berechnung der wechselseitigen Beschleunigung der Vorderachse in z-Richtung	54
4.6:	Berechnung der gleichseitigen Beschleunigung der Hinterachse in z-Richtung	54
4.7:	Berechnung der wechselseitigen Beschleunigung der Hinterachse in z-Richtung	54
4.8:	Lineare Transformation der Phänomenstärkenoten für einen einzelnen Probanden	66
4.9:	Lineare Transformation der Phänomenstärkenoten	66
4.10:	Berechnung von phänomenstärkenotensabhängigen Akzeptanzgrenzen	73
5.1:	Normierungsvorschrift der frequenzabhängigen Medianwerte	87
5.2:	Berechnung des relativen Reizzuwachses	98
5.3:	Definition des probandenspezifischen Maskierungsfaktors	99
5.4:	Vektor der probandenspezifischen Maskierungsfaktoren	99
5.5:	Definition des Maskierungsfaktors	99
5.6:	Aus Einzelmaskierungsfaktoren geschätzter Gesamtmaskierungsfaktor - Variante 1	117
5.7:	Aus Einzelmaskierungsfaktoren geschätzter Gesamtmaskierungsfaktor - Variante 2	117
5.8:	Aus Einzelmaskierungsfaktoren geschätzter Gesamtmaskierungsfaktor - Variante 3	117
5.9:	Aus Einzelmaskierungsfaktoren geschätzter Gesamtmaskierungsfaktor - Variante 4	117
5.10:	Aus Einzelmaskierungsfaktoren geschätzter Gesamtmaskierungsfaktor - Variante 5	117
5.11:	Definition des Audio-Video-Maskierungsfaktors	122
6.1:	Ansatz zur zeitabhängigen Schätzung der Maskierungsfaktorverläufe	130

6.2:	Peak-to-Peak Verlaufsrechnung	136
6.3:	Berechnung des relativen Reizzuwachses im Messsignal.	139
6.4:	Berechnung des zeitlichen Abstandes zwischen Maskierungs- und Referenzereignis im Messsignal.	139
6.5:	Zuordnungsvorschrift des Verstärkungsfaktorverlaufes.	140
6.6:	Berechnung eines zeitabstandsunabhängigen Verstärkungs- faktors - Variante 1.	140
6.7:	Berechnung eines zeitabstandsunabhängigen Verstärkungs- faktors - Variante 2.	140
6.8:	Berechnung eines zeitabstandsunabhängigen Verstärkungs- faktors - Variante 3.	140
6.9:	Berechnung eines zeitabstandsunabhängigen Verstärkungs- faktors - Variante 4.	140
6.10:	Berechnung eines Gesamtverstärkungsfaktors - Variante 1.	141
6.11:	Berechnung eines Gesamtverstärkungsfaktors - Variante 2.	141
6.12:	Berechnung eines Gesamtverstärkungsfaktors - Variante 3.	141
6.13:	Berechnung eines Gesamtverstärkungsfaktors - Variante 4.	141
6.14:	Berechnung des Parameters PB.	141
6.15:	Zuordnungsvorschrift des Maskierungsfaktorverlaufes.	142
6.16:	Berechnung eines zeitabstandsunabhängigen Maskierungs- faktors - Variante 1.	142
6.17:	Berechnung eines zeitabstandsunabhängigen Maskierungs- faktors - Variante 2.	142
6.18:	Berechnung eines zeitabstandsunabhängigen Maskierungs- faktors - Variante 3.	142
6.19:	Berechnung eines zeitabstandsunabhängigen Maskierungs- faktors - Variante 4.	142
6.20:	Berechnung eines Gesamtmaskierungsfaktors - Variante 1.	143
6.21:	Berechnung eines Gesamtmaskierungsfaktors - Variante 2.	143
6.22:	Berechnung eines Gesamtmaskierungsfaktors - Variante 3.	143
6.23:	Berechnung eines Gesamtmaskierungsfaktors - Variante 4.	143

7.1: Berechnung des globalen Triggerverlaufes 148

7.2: Berechnung des minimalen Maximums eines Kennwertverlaufes 149

7.3: Gütekriterium zur Identifizierung von signifikanten Wahrnehmungszeitpunkten eines Schwingungsphänomens 150

7.4: Einzelkennwert: Summe 155

7.5: Einzelkennwert: Logarithmus der Summe 156

7.6: Einzelkennwert: auf die Messzeit bezogene Summe 156

7.7: Einzelkennwert: Logarithmus der auf die Messzeit bezogenen Summe 156

7.8: Einzelkennwert: Integralwert 156

7.9: Einzelkennwert: Logarithmus des Integralwertes 156

7.10: Einzelkennwert: auf die Messzeit bezogener Integralwert . . . 156

7.11: Einzelkennwert: Logarithmus des auf die Messzeit bezogenen Integralwertes 156

7.12: Einzelkennwert: Maximalwert 156

7.13: Einzelkennwert: Logarithmus des Maximalwertes 156

7.14: Logistischer Ansatz 157

7.15: Logistisch transformierte Noten 158

8.1: Mathematischer Ansatz des Regressionsmodells 161

8.2: Logistischer Ansatz 162

8.3: Regressionsmodell für das Längsstoßen. 163

8.4: Regressionsmodell für das Nicken. 163

8.5: Regressionsmodell für das Wanken. 163

8.6: Erweitertes Regressionsmodell 167

8.7: Residuum der logistisch transformierten Noten 169

8.8: Residuum der Noten im 1-9 Skalenbereich 169

8.9: Zielwert für das Längsstoßen 172

8.10: Zielwert für das Nicken 172

8.11: Zielwert für das Wanken 172

D.1:	RMS Verlauf	261
D.2:	RMQ Verlauf	261
D.3:	VDV Verlauf	261
D.4:	MAX Verlauf	261
D.5:	MIN Verlauf	261
D.6:	MAXB Verlauf	261
D.7:	PtP-dt Verlauf	262
D.8:	PtP/RMS Verlauf	262
D.9:	PtP/RMQ Verlauf	262
D.10:	PtP/VDV Verlauf	262
D.11:	MAXB/RMS Verlauf	262
D.12:	MAXB/RMQ Verlauf	262
D.13:	MAXB/VDV Verlauf	262
D.14:	Belastete Fläche	263
D.15:	Prozentualer Anteil der belasteten Fläche bzgl. einer Bezugs- fläche	263
D.16:	Resultierende Kraft	263
D.17:	Prozentualer Anteil der resultierenden Kraft	263
D.18:	Mittlerer Druck bzgl. der Gesamtfläche des auszuwertenden Bereiches	264
D.19:	Verhältnis der mittleren Drucke bzgl. der gesamten Fläche des Auswertebereiches und eines Bezugsbereiches	264
D.20:	Mittlerer Druck bzgl. der belasteten Fläche des auszuwerten- den Bereiches	264
D.21:	Verhältnis der mittleren Drucke bzgl. der belasteten Fläche des Auswertebereiches und eines Bezugsbereiches	264
D.22:	x-Koordinate des Druckschwerpunktes	264
D.23:	y-Koordinate des Druckschwerpunktes	264
D.24:	Relative x-Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des An- fangswertes	265

D.25: Relative y-Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Anfangswertes 265

D.26: Relative x-Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Mittelwertes 265

D.27: Relative y-Koordinate des Druckschwerpunktes bzgl. des Mittelwertes 265

D.28: Druckschwerpunktsgeschwindigkeit in x-Richtung 265

D.29: Druckschwerpunktsgeschwindigkeit in y-Richtung 265

D.30: Druckschwerpunktsbeschleunigung in x-Richtung 265

D.31: Druckschwerpunktsbeschleunigung in y-Richtung 266

E.1: Erweitertes Regressionsmodell für das Längsstoßen. 267

E.2: Erweitertes Regressionsmodell für das Nicken. 268

E.3: Erweitertes Regressionsmodell für das Wanken. 269

Literaturverzeichnis

- [1] AHN, S. J.: Discomfort of the vertical whole-body shock-type vibration in the frequency range of 0.5 to 16 Hz. In: *International Journal of Automotive Technology* 11 (2010), Nr. 6, S. 909 – 916
- [2] AHN, S.-J. ; GRIFFIN, M. J.: Effects of frequency, magnitude, damping, and direction on the discomfort of vertical whole-body mechanical shocks. In: *Journal of Sound and Vibration* 311 (2008), Nr. 1-2, S. 485–497
- [3] ANSORGE, U. ; LEDER, H.: *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. Basiswissen Psychologie*. 1. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011
- [4] BACKHAUS, K. ; ERICHSON, B. ; PLINKE, W. ; WEIBER, R.: *Multivariate Analysemethoden*. 10. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 2003
- [5] BACKHAUS, K. ; ERICHSON, B. ; WEIBER, R.: *Fortgeschrittene Multivariate Analysemethoden*. 2. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2013
- [6] BASRI, B. ; GRIFFIN, M. J.: The vibration of inclined backrests: perception and discomfort of vibration applied normal to the back in the x-axis of the body. In: *Journal of Sound and Vibration* 330 (2011), Nr. 18-19, S. 4646 – 4659
- [7] BASRI, B. ; GRIFFIN, M. J.: The vibration of inclined backrests: perception and discomfort of vibration applied parallel to the back in

- the z-axis of the body. In: *Ergonomics* 54 (2011), Nr. 12, S. 1214–1227
- [8] BASRI, B. ; GRIFFIN, M. J.: Predicting discomfort from whole-body vertical vibration when sitting with an inclined backrest. In: *Applied Ergonomics* 44 (2013), Nr. 3, S. 423 – 434
- [9] BASRI, B. ; GRIFFIN, M. J.: The application of SEAT values for predicting how compliant seats with backrests influence vibration discomfort. In: *Applied Ergonomics* 45 (2014), Nr. 6, S. 1461 – 1474
- [10] BAUMANN, I. ; BELLMANN, M. A. ; MELLERT, V. ; WEBER, R.: Wahrnehmungs- und Unterschiedsschwellen von Vibrationen auf einem Kraftfahrzeugsitz. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2001*. Hamburg : Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2001, S. 292–293
- [11] BEARD, G. F. ; GRIFFIN, M. J.: Discomfort during lateral acceleration: Influence of seat cushion and backrest. In: *Applied Ergonomics* 44 (2013), Nr. 4, S. 588 – 594
- [12] BEARD, G. F. ; GRIFFIN, M. J.: Discomfort of seated persons exposed to low frequency lateral and roll oscillation: Effect of seat cushion. In: *Applied Ergonomics* 45 (2014), Nr. 6, S. 1547 – 1557
- [13] BEARD, G. F. ; GRIFFIN, M. J.: Discomfort of seated persons exposed to low frequency lateral and roll oscillation: Effect of backrest height. In: *Applied Ergonomics* 54 (2016), S. 51 – 61
- [14] BELLMANN, M. A.: *Perception of Whole-Body Vibrations: From basic experiments to effects of seat and steering-wheel vibrations on the passenger's comfort inside vehicles*, Universität Oldenburg, Diss., 2002
- [15] BELLMANN, M. A. ; MELLERT, V. ; RECKHARDT, C. ; REMMERS, H.: Experimente zur Wahrnehmung von Vibrationen. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2000*. Oldenburg : Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2000, S. 494–495

- [16] BELLMANN, M. A. ; REMMERS, H.: Evaluation of vibration perception in passenger cabin. In: *Proceedings of the joint congress CFA/DAGA'04*. Strasbourg : Societe Francaise d'Acoustique, 2004, S. 597–598
- [17] BELLMANN, M. A. ; REMMERS, H. ; MELLERT, V.: Grundlegende Experimente zur Wahrnehmung von vertikalen Ganzkörpervibrationen - Basic Experiments on the Perception of vertical Whole-Body Vibrations. In: *VDI-Bericht 1821*. Darmstadt : VDI-Verlag, 2004, S. 251–270
- [18] BELLMANN, M. A. ; WEBER, R.: Psycho-physikalische Untersuchungen zur Wahrnehmung von Sitzvibrationen. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2006*. Braunschweig : Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2006, S. 507–508
- [19] BELLMANN, M. A. ; WEBER, R. ; BAUMANN, I. ; HILLEBRAND, P. ; MELLERT, V.: Methoden zur Verbesserung der objektiven Beschreibung subjektiver Qualitätsurteile der Sitz- und Lenkadvibrationen im Fahrzeug. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2001*. Hamburg : Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2001, S. 294–295
- [20] BIRBAUMER, N. ; SCHMIDT, R. F.: *Biologische Psychologie*. 7. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2010
- [21] BIRKHOLD, J.-M.: *Komfortobjektivierung und funktionale Bewertung als Methoden zur Unterstützung der Entwicklung des Wiederstartsysteams in parallelen Hybridantrieben*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2013
- [22] BITTER, T.: *Objektivierung des dynamischen Sitzkomforts*. Aachen, Technische Universität Braunschweig, Diss., 2006
- [23] BUBB, H.: Komfort und Diskomfort - Definition und Überblick. In: *Ergonomie aktuell, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München* 4 (2003), S. 5–8

- [24] BULTHAUPT, N. ; GAUTERIN, F.: Time and magnitude dependent masking effects of vehicle's 2 Hz shock-type vibrations on the perception of vehicle's 4.5 Hz longitudinal shock-type vibrations for seated human subjects. In: *International Journal of Vehicle Noise and Vibration* 15 (2019), Nr. 4, S. 256–278
- [25] CUCUZ, S.: *Schwingempfinden von Pkw-Insassen, Auswirkung von stochastischen Unebenheiten und Einzelhindernissen der realen Fahrbahn.*, Technische Universität Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik, Diss., 1993
- [26] DAIMLER AG: *Daimler interne Unterlage.* 2008
- [27] DAIMLER AG: *Daimler Global Media Site*, <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko.xhtml?oid=9266055>. 2011, abgerufen am 19.04.2017
- [28] DEATHERAGE, B.H. ; EVANS, T.R.: Binaural Masking: Backward, Forward, and Simultaneous Effects. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 46 (1969), Nr. 2, S. 362–371
- [29] DEWANGAN, K. N. ; SHAHMIR, A. ; RAKHEJA, S. ; MARCOTTE, P.: Seated body apparent mass response to vertical whole body vibration: Gender and anthropometric effects. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 43 (2013), Nr. 4, S. 375–391
- [30] ELLIOTT, L.L.: Backward and Forward Masking of Probe Tones of Different Frequencies. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 34 (1962), Nr. 8, S. 1116–1117
- [31] ELLIOTT, L.L.: Backward Masking: Monotic and Dichotic Conditions. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 34 (1962), Nr. 8, S. 1108–1115
- [32] FAHRMEIR, L. ; KÜNSTLER, R. ; PIGEOT, I. ; TUTZ, G.: *Statistik.* Bd. 6. Berlin, Heidelberg, New York : Springer-Verlag, 2007

- [33] FASTL, H. ; ZWICKER, E.: *Psychoacoustics*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2007
- [34] FISCHER-VON RÖNN, N.: *Erstellung von Prädiktionsmodellen für die Vorhersage des subjektiven Fahrkomforts von PKW bei Einzelhindernisüberfahrten*, Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg, Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2014
- [35] FORTA, N. G. ; GRIFFIN, M. J. ; MORIOKA, M.: Difference thresholds for vibration of the foot: Dependence on frequency and magnitude of vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 330 (2011), Nr. 4, S. 805–815
- [36] FORTA, N. G. ; MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Difference thresholds for the perception of whole-body vertical vibration: dependence on the frequency and magnitude of vibration. In: *Ergonomics* 52 (2009), Nr. 10, S. 1305 – 1310
- [37] FRITZ, M.: Three-dimensional biomechanical model for simulating the response of the human body to vibration stress. In: *Medical & Biological Engineering & Computing* 36 (1998), S. 686–692
- [38] FÜLBIER, K.-P.: *Systemansatz zur Untersuchung und Beurteilung des Abrollkomforts von Kraftfahrzeugen bei der Überfahrt von Einzelhindernissen*, RWTH Aachen, Diss., 2001
- [39] GAN, Z. ; HILLIS, A. J. ; DARLING, J.: Biodynamic modelling of seated human subjects exposed to whole-body vibration in both vertical and fore-and-aft directions. In: *Journal of Vibration Engineering and Technologies* 3 (2015), Nr. 3, S. 301–314
- [40] GASKELL, H. ; HENNING, G.B.: Forward and backward masking with brief impulsive stimuli. In: *Hearing Research* 129 (1999), Nr. 1-2, S. 92–100

- [41] GOHARI, M. ; RAHMAN, R. A. ; TAHMASEBI, M.: Prediction Head Acceleration from Hand and Seat Vibration via Artificial Neural Network Model. In: *Applied Mechanics and Materials* 471 (2014), S. 161 – 166
- [42] GRIFFIN, M. J.: *Handbook of Human Vibration*. London : Elsevier Academic Press, 1996
- [43] GRIFFIN, M. J.: Discomfort from feeling vehicle vibration. In: *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility* 45 (2007), August, Nr. 7 - 8, S. 679 – 698
- [44] GYI, D. E. ; PORTER, J. M.: Interface pressure and the prediction of car seat discomfort. In: *Applied Ergonomics* 30 (1999), Nr. 2, S. 99–107
- [45] HAGENDORF, H. ; KRUMMENACHER, J. ; MÜLLER, H.-J. ; SCHUBERT, T.: *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit. Allgemeine Psychologie für Bachelor*. Heidelberg : Springer-Verlag, 2011
- [46] HARTUNG, J.: *Objektivierung des statischen Sitzkomforts auf Fahrzeugsitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz*, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2006
- [47] HEISSING, B. ; ERSOY, M. ; GIES, S.: *Fahrwerkhandbuch*. 4. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2013
- [48] HENNECKE, D.: *Zur Bewertung des Schwingungskomforts von Pkw bei instationären Anregungen*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1995
- [49] HINZ, B. ; SEIDEL, H. ; MENZEL, G. ; BLÜTHNER, R.: Effects related to random whole-body vibration and posture on a suspended seat with and without backrest. In: *Journal of Sound and Vibration* 253 (2002), Nr. 1, S. 256–282

- [50] HINZ, B. ; SEIDEL, H. ; MENZEL, G. ; KEITEL, J. ; GERICKE, L.: Laborstudie zu Druckverteilungen an Pkw-Sitzen - Untersuchungen an Kollektiven von Frauen und Männern mit repräsentativer Verteilung von Körpergröße und Körpergewicht. In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 57 (2003), Nr. 5, S. 169–187
- [51] HINZA, B. ; RÜTZEL, S. ; BLÜTHNER, R. ; MENZELA, G. ; WÖLFEL, H. P. ; SEIDEL, H.: Apparent mass of seated man - First determination with a soft seat and dynamic seat pressure distributions. In: *Journal of Sound and Vibration* 298 (2006), Nr. 3, S. 704–724
- [52] HOSTENS, I. ; PAPAIOANNOU, G. ; SPAEPEN, A. ; RAMON, H.: Buttock and back pressure distribution tests on seats of mobile agricultural machinery. In: *Applied Ergonomics* 32 (2001), Nr. 4, S. 347–355
- [53] HUANG, S. ; ZHANG, Z. ; XU, Z. ; HE, Y.: Modeling of human model for static pressure distribution prediction. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 50 (2015), S. 186–195
- [54] HUANG, Y. ; GRIFFIN, M. J.: The effects of sound level and vibration magnitude on the relative discomfort of noise and vibration. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 131 (2012), Nr. 11, S. 4558–4569
- [55] HUANG, Y. ; GRIFFIN, M. J.: Comparison of absolute magnitude estimation and relative magnitude estimation for judging the subjective intensity of noise and vibration. In: *Applied Acoustics* 77 (2014), S. 82–88
- [56] HUANG, Y. ; GRIFFIN, M. J.: The discomfort produced by noise and wholebody vertical vibration presented separately and in combination. In: *Ergonomics* 57 (2014), Nr. 11, S. 1724–1738
- [57] HUANG, Y. ; GRIFFIN, M. J.: The relative discomfort of noise and vibration: effects of stimulus duration. In: *Ergonomics* 57 (2014), Nr. 8, S. 1244–1255

- [58] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION: *ISO2631-1: Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements*. Beuth Verlag, 1997
- [59] JALIL, N. A. A. ; GRIFFIN, M. J.: Fore-and-aft transmissibility of backrests: Effect of backrest inclination, seat-pan inclination, and measurement location. In: *Journal of Sound and Vibration* 299 (2007), Nr. 1-2, S. 99 – 108
- [60] JESTEADT, W. ; BACON, S.P. ; LEHMAN, J.R.: Forward masking as a function of frequency, masker level, and signal delay. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 71 (1982), Nr. 4, S. 950–962
- [61] JÖRISSEN, B.: *Objektivierung der menschlichen Schwingungswahrnehmung unter Einfluss realer Fahrbahnanregungen*, Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Diss., 2012
- [62] KAMMEYER, K.-D. ; KROSCHER, K.: *Digitale Signalverarbeitung. Filterung und Spektralanalyse mit MATLAB-Übungen*. 5. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2002
- [63] KANG, J. S. ; CHOI, Y.-S. ; CHOE, K.: Whole-body vibration analysis for assessment of railway vehicle ride quality. In: *Journal of Mechanical Science and Technology* 25 (2011), Nr. 3, S. 577–587
- [64] KAUFMANN, A. ; BELLMANN, M. ; WEBER, R.: „Cross-Modality-Matching“ zwischen Schall- und Vibrationssignalen. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2007*. Stuttgart : Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2007, S. 861–862
- [65] KIDD, G. ; FETH, L.L.: Effects of masker duration in pure-tone forward masking. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 72 (1982), Nr. 5, S. 1384–1386

- [66] KITAZAKI, S. ; GRIFFIN, M. J.: A modal analysis of whole-body vertical vibration, using a finite element model of the human body. In: *Journal of Sound and Vibration* 200 (1997), Nr. 1, S. 83–103
- [67] KLINGNER, B.: *Einfluß der Motorlagerung auf Schwingungskomfort und Geräuschanregung im Kraftfahrzeug*, Technische Universität Braunschweig, Diss., 1996
- [68] KNAUER, P.: *Objektivierung des Schwingungskomforts bei instationärer Fahrbahnanregung*, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2010
- [69] KNOLL, C.: *Einfluss des visuellen Urteils auf den physisch erlebten Komfort am Beispiel von Sitzen. Ein Beitrag zu dem Verhältnis von Ergonomie und Industriedesign.*, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2006
- [70] KOHN, W.: *Statistik - Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2005
- [71] KOLICH, M.: Predicting automobile seat comfort using a neural network. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 33 (2004), Nr. 4, S. 285–293
- [72] KOLICH, M. ; SEAL, N. ; TABOUN, S.: Automobile seat comfort prediction: statistical model vs. artificial neural network. In: *Applied Ergonomics* 35 (2004), Nr. 3, S. 275–284
- [73] KOLLMEIER, B. ; GILKEY, R.H.: Binaural forward and backward masking: Evidence for sluggishness in binaural detection. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 87 (1990), Nr. 4, S. 1709–1719
- [74] KRAFT, C.: *Gezielte Variation und Analyse des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen mittels elektrischer Linearaktuatoren im Fahrwerksbereich*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2010

- [75] LANG, F. ; LANG, P.: *Basiswissen Physiologie*. 2. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2007
- [76] LERSPALUNGSANTI, S. ; ALBERS, A. ; OTT, S. ; DÜSER, T.: Human ride comfort prediction of drive train using modeling method based on artificial neural networks. In: *International Journal of Automotive Technology* 16 (2015), Nr. 1, S. 153–166
- [77] LJUNGGREN, F. ; WANG, J. ; ÅGREN, A.: Human vibration perception from single- and dual-frequency components. In: *Journal of Sound and Vibration* 300 (2007), Nr. 1-2, S. 13–24
- [78] MAIER, P.: *Entwicklung einer Methode zur Objektivierung der subjektiven Wahrnehmung von antriebsstrangerregten Fahrzeugschwingungen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2011
- [79] MATSUMOTO, Y. ; GRIFFIN, M. J.: Modelling the dynamic mechanisms associated with the principal resonance of the seated human body. In: *Clinical Biomechanics* 16 (2001), Nr. 1, S. 31–44
- [80] MATSUMOTOA, Y. ; GRIFFIN, M. J.: Nonlinear subjective and biodynamic responses to continuous and transient whole-body vibration in the vertical direction. In: *Journal of Sound and Vibration* 287 (2005), Nr. 4-5, S. 919–937
- [81] MERGL, C.: *Entwicklung eines Verfahrens zu Optimierung des Sitzkomforts auf Automobilsitzen*, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2006
- [82] MITSCHKE, M. ; KLINGNER, B.: Schwingungskomfort im Kraftfahrzeug. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 100 (1998), Nr. 1, S. 18–24
- [83] MOELLER, S.: *Quality Engineering. Qualität kommunikationstechnischer Systeme*. 1. Berlin Heidelberg : Springer Verlag, 2010

- [84] MOORE, B.C.J.: Psychophysical tuning curves measured in simultaneous and forward masking. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 63 (1978), Nr. 2, S. 524–532
- [85] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Independent responses of Pacinian and Non-Pacinian systems with hand-transmitted vibration detected from masked thresholds. In: *Somatosensory and Motor Research* 22 (2005), Nr. 1/2, S. 69–84
- [86] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical whole-body vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 298 (2006), Nr. 3, S. 755–772
- [87] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Magnitude-dependence of equivalent comfort contours for fore-and-aft, lateral and vertical vibration at the foot for seated persons. In: *Journal of Sound and Vibration* 329 (2010), Nr. 14, S. 2939–2952
- [88] MORIOKA, M. ; GRIFFIN, M. J.: Masking of thresholds for the perception of fore-and-aft vibration of seat backrests. In: *Applied Ergonomics* 50 (2015), S. 200–206
- [89] MOZAFFARINA, A. ; PANKOKE, S. ; WÖLFEL, H.-P.: MEMOSIK V - An active dummy for determining three-directional transfer functions of vehicle seats and vibration exposure ratings for the seated occupant. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 38 (2008), Nr. 5-6, S. 471–482
- [90] MULDER, M. ; ABBINK, D. A.: Subjective Perception of Discomfort due to Vehicle Vibrations in the Sagittal Plane. In: *IFAC-PapersOnLine* 49 (2016), Nr. 19, S. 494–499
- [91] N. J. MANSFIELD, M. J. G.: Difference thresholds for automobile seat vibration. In: *Applied Ergonomics* 31 (2000), Nr. 3, S. 255–261

- [92] NAG, P. K. ; PAL, S. ; KOTADIYA, S. M. ; NAG, A. ; GOSAI, K.: Human-seat interface analysis of upper and lower body weight distribution. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 38 (2008), Nr. 5-6, S. 539–545
- [93] NAWAYSEH, N.: Effect of the seating condition on the transmission of vibration through the seat pan and backrest. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 45 (2015), S. 82–90
- [94] NAWAYSEH, N. ; GRIFFIN, M. J.: Non-linear dual-axis biodynamic response to vertical whole-body vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 268 (2003), Nr. 3, S. 503–523
- [95] NAWAYSEH, N. ; GRIFFIN, M. J.: Tri-axial forces at the seat and backrest during whole-body vertical vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 277 (2004), Nr. 1-2, S. 309–326
- [96] NAWAYSEH, N. ; GRIFFIN, M. J.: Non-linear dual-axis biodynamic response to fore-and-aft whole-body vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 282 (2005), Nr. 3-5, S. 831–862
- [97] NAWAYSEH, N. ; GRIFFIN, M. J.: Tri-axial forces at the seat and backrest during whole-body fore-and-aft vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 281 (2005), Nr. 3-5, S. 921–942
- [98] NEUHAUS, W.: Wahrnehmungsschwelle und Erkennungsschwelle beim Riechen des Hundes im Vergleich zu den Riechwahrnehmungen des Menschen. In: *Zeitschrift für vergleichende Physiologie* 39 (1957), S. 624–633
- [99] OXENHAM, A.J. ; PLACK, C.J.: Effects of masker frequency and duration in forward masking: further evidence for the influence of peripheral nonlinearity. In: *Hearing Research* 150 (2000), Nr. 1-2, S. 258–266

- [100] PENNER, M.J. ; CUDAHY, E. ; JENKINS, G.W.: The effect of masker duration on forward and backward masking. In: *Perception & Psychophysics* 15 (1974), Nr. 3, S. 405–410
- [101] PIES, D.: *Reifenungleichförmigkeitserregter Schwingungskomfort - Quantifizierung und Bewertung komfortrelevanter Fahrzeugschwingungen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2011
- [102] PORST, R.: *Fragebogen - Ein Arbeitsbuch*. 3. Wiesbaden : VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011
- [103] QIU, Y. ; GRIFFIN, M. J.: Transmission of roll, pitch and yaw vibration to the backrest of a seat supported on a non-rigid car floor. In: *Journal of Sound and Vibration* 288 (2005), Nr. 4-5, S. 1197–1222
- [104] QIU, Y. ; GRIFFIN, M. J.: Biodynamic Response of the Seated Human Body to Single-axis and Dual-axis Vibration: Effect of Backrest and Non-linearity. In: *Industrial Health* 50 (2012), Nr. 1, S. 37–51
- [105] RAKHEJA, S. ; STIHARU, I.: Seated occupant apparent mass characteristics under automotive postures and vertical vibration. In: *Journal of Sound and Vibration* 253 (2002), Nr. 1, S. 57–75
- [106] RASMUSSEN, G.: Human body vibration exposure and its measurement. In: *Bruel & Kjaer Technical Paper* 1 (1982), S. 1–27
- [107] REICHART, U.: *Objektive Kriterien für Langstreckenkomfort bei Personenwagen*, Technische Universität Berlin, Diss., 2013
- [108] SCHIEBLER, T. H.: *Anatomie*. 9. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2005
- [109] SCHMID, S.: *Objektivierung des Schwingungsphänomens Wanken bei schweren Nutzfahrzeugen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Fahrzeugsystemtechnik, Masterarbeit, 2016

- [110] SCHMIDT, R. F. ; LANG, F. ; HECKMANN, M.: *Physiologie des Menschen*. 31. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2010
- [111] SCHMIDT, R. F. ; SCHAIBLE, H.-G.: *Neuro- und Sinnesphysiologie*. 5. Heidelberg : Springer Medizin Verlag, 2006
- [112] SHIBATA, N.: Effect of phase difference on biodynamic response of seated body to dual-axis vibration. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 45 (2015), S. 55–63
- [113] SIEFERT, A. ; PANKOKE, S. ; WÖLFEL, H.-P.: Virtual optimisation of car passenger seats: Simulation of static and dynamic effects on drivers' seating comfort. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 38 (2008), Nr. 5-6, S. 410–424
- [114] SLATER, K.: *Human comfort*. C. C. Thomas, Springfield, Ill., U.S.A., 1985
- [115] TIEMESSEN, I. J. ; HULSHOF, C. T. J. ; FRINGS-DRESEN, M. H. W.: An overview of strategies to reduce whole-body vibration exposure on drivers: A systematic review. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 37 (2007), Nr. 3, S. 245–256
- [116] TÖPKEN, S. ; BELLMANN, M. ; WEBER, R.: Cross-Modality-Matching für Schall und Ganzkörpervibrationen. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA 2008*. Dresden : Deutsche Gesellschaft für Akustik, 2008, S. 379–380
- [117] TOWARD, M. G. R. ; GRIFFIN, M. J.: The transmission of vertical vibration through seats: Influence of the characteristics of the human body. In: *Journal of Sound and Vibration* 330 (2011), Nr. 26, S. 6526–6543
- [118] TUFANO, S. ; GRIFFIN, M.: Nonlinearity in the vertical transmissibility of seating: the role of the human body apparent mass and seat dynamic stiffness. In: *Vehicle System Dynamics* 51 (2013), Nr. 1, S. 122–138

- [119] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2057 - Blatt 1: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Grundlagen, Gliederung, Begriffe*. Beuth Verlag, 1987
- [120] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2057 - Blatt 2: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Bewertung*. Beuth Verlag, 1987
- [121] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2057 - Blatt 3: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Beurteilung*. Beuth Verlag, 1987
- [122] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: *VDI 2057 - Blatt 1: Einwirkung mechanischer Schwingungen auf den Menschen - Ganzkörper-Schwingungen*. Beuth Verlag, 2002
- [123] WETHERILL, G.B. ; LEVITT, H.: Sequential estimation of points on a psychometric function. In: *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology* 18 (1965), Nr. 1, S. 1 – 10
- [124] WU, X. ; RAKHEJA, S. ; BOILEAU, P.-É.: Study of human-seat interface pressure distribution under vertical vibration. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 21 (1998), Nr. 6, S. 433–449
- [125] WU, X. ; RAKHEJA, S. ; BOILEAU, P.-É.: Distribution of human-seat interface pressure on a soft automotive seat under vertical vibration. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 24 (1999), Nr. 5, S. 545–557
- [126] WYLLIE, I. H. ; GRIFFIN, M. J.: Discomfort from sinusoidal oscillation in the pitch and fore-and-aft axes at frequencies between 0.2 and 1.6 Hz. In: *Journal of Sound and Vibration* 324 (2009), Nr. 1-2, S. 453–467
- [127] ZENK, R.: *Objektivierung des Sitzkomforts und seine automatische Anpassung*, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Diss., 2008

- [128] ZHANG, L. ; HELANDER, M. G. ; DRURY, C. G.: Identifying Factors of Comfort and Discomfort in Sitting. In: *Human Factors* 38 (1996), Nr. 3, S. 377–389
- [129] ZHANG, X. ; QIU, Y. ; GRIFFIN, M. J.: Transmission of vertical vibration through a seat: Effect of thickness of foam cushions at the seat pan and the backrest. In: *International Journal of Industrial Ergonomics* 48 (2015), S. 36–45
- [130] ZHOU, Z. ; GRIFFIN, M. J.: Response of the seated human body to whole-body vertical vibration: biodynamic responses to sinusoidal and random vibration. In: *Ergonomics* 57 (2014), Nr. 5, S. 693 – 713
- [131] ZHOU, Z. ; GRIFFIN, M. J.: Response of the seated human body to whole-body vertical vibration: discomfort caused by sinusoidal vibration. In: *Ergonomics* 57 (2014), Nr. 5, S. 714–732
- [132] ZWICKER, E.: Temporal Effects in Simultaneous Masking and Loudness. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 38 (1965), Nr. 1, S. 132–141
- [133] ZWICKER, E.: Dependence of post-masking on masker duration and its relation to temporal effects in loudness. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 75 (1984), Nr. 1, S. 219–223
- [134] ZWICKER, E. ; ZWICKER, U. T.: Binaural masking-level differences in non-simultaneous masking. In: *Hearing Research* 13 (1984), Nr. 3, S. 221–228
- [135] ZWISLOCKI, J. ; PIRODDA, E. ; RUBIN, H.: On Some Poststimulatory Effects at the Threshold of Audibility. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 31 (1959), Nr. 1, S. 9–14