

FAT 189

Darstellung des Schwingungsverhaltens von Fahrzeug-Insassen - Symbiose aus Experiment und Simulation

**Darstellung des Schwingungs-
verhaltens von Fahrzeug-Insassen –
Symbiose aus Experiment und
Simulation**

Auftraggeber:
Forschungsvereinigung
Automobiltechnik e.V. (FAT)
Westendstraße 61
60325 Frankfurt am Main

Auftragnehmer:
Lehrstuhl für Ergonomie (LfE), TU München,
Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb
Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braun-
schweig, Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükay

Verfasser:
Dipl.-Ing. Thorsten Bitter, IFT,
TU Braunschweig
Dipl.-Phys. Florian Fritzsche, LfE,
TU München
Dipl.-Ing. Jürgen Hartung, LfE,
TU München

Postanschrift:
Postfach 17 05 63 - 60079 Frankfurt/M.
Telefon (069) 9 75 07 - 0
Internet: <http://www.vda.de>

**Vervielfältigungen, auch auszugsweise, nur
mit ausdrücklicher Genehmigung der FAT.**

7.1	Mathematische Auswerteverfahren	123
7.2	Auswertung Fahrversuche Pkw	124
7.3	Auswertung Fahrversuche Nfz	143
7.4	Auswertung Prüfstand Pkw	148
7.5	Auswertung Prüfstand Nfz.....	154
8	Korrelations-/Regressionsanalyse	156
8.1	Grundlagen	156
8.2	Fahrversuche Pkw.....	160
8.3	Prüfstandsversuche Pkw.....	178
8.4	Fahrversuche Nfz.....	184
8.5	Prüfstandsversuche Nfz	197
9	Zusammenfassung.....	202
10	Literatur.....	204
11	Anhang.....	205
11.1	Fahrzeugdaten, Versuchsfahrzeuge Pkw	205
11.2	Fragebögen Pkw-Versuche	205
11.3	Fragebögen Nutzfahrzeugversuche.....	208
11.4	Sitzschienenbeschleunigungen Pkw-Versuche.....	210
11.5	Sitzkonsolenbeschleunigungen Nutzfahrzeuge	213
11.6	Sitzübertragungsfunktionen Pkw	216
11.7	Sitzübertragungsfunktionen Nfz.....	219

ZUSAMMENHANG ZWISCHEN STATISCHEM UND DYNAMISCHEM SITZEMPFINDEN

1	Einleitung	223
2	Versuchskonzept.....	224
3	Versuchsdurchführung	224
3.1	Versuchsvorbereitung.....	225
3.2	Versuchspersonenkollektiv	227
3.3	Versuchsablauf.....	227
4	Auswertung und Ergebnisse.....	228
5	Interpretation	229
6	Zusammenfassung.....	229

SOFTWARE-SCHWINGUNGS-DUMMY

1	Einleitung	231
2	Vorgehensweise	232
3	Das Simulationsmodell	234
3.1	MKS-Modellierung mit alaska	234
3.2	Struktur und Parameter des Menschmodells	237
4	Schwingungsmessungen am System Mensch	244
4.1	Befestigung der Marker	244
4.2	Schwingungsmessung	247
4.3	Ergebnisse	249
5	Ergebnisse der Simulation	262
5.1	Anregung des Modells in z-Richtung	262
5.2	Anregung des Modells in x-Richtung	266
6	Zusammenfassung und Ausblick	269
	 Projektbegleitender Ausschuss	 277

SITZKOMFORT

STATISCHER SITZKOMFORT

1	Einleitung	7
2	Aufgabenstellung.....	8
3	Komfortmodell	9
3.1	Komfort, Diskomfort.....	9
3.2	Diskomfortpyramide	9
3.3	Ansitz-, Kurzzeit-, Langzeitdiskomfort.....	10
4	Stand der Forschung	11
4.1	Physiologische Wirkung von Druck.....	11
4.2	Körperbau, -muskulatur und -fett	11
4.3	Sitzdruck als Prediktor von Diskomfort	12
4.4	Empfehlungen für die Druckverteilung auf der Sitzfläche.....	13
4.5	Empfehlungen für komfortable Druckwerte für die Sitzfläche.....	15
4.6	Diskomfort durch hohen Sitzbeindruck	15
4.7	Diskomfort im Rücken	16
4.8	Diskomfort durch hohe Lendendrucke	16
4.9	Komfort durch Übertragung hoher Drücke über Beckenkämme.....	17
4.10	Zusammenfassung.....	18
5	Vorgehensweise	19
6	Versuchs- und Messeinrichtungen	20
6.1	Forschungsstuhl	20
6.2	Druckmessmatten	21
6.3	Sitzalterungsmaschine	22
6.4	Mockups.....	23
6.5	Kameras.....	24
6.6	Messschablone zur Übertragung von Sitzeinstellungen.....	24
7	Vorversuchsphase.....	26
7.1	Sitzalterung	26
7.2	Sitzvermessung.....	26
7.3	Sitzversuche.....	26
8	Konzeptentwicklung für die Hauptversuchsphase.....	34
8.1	Diskussion der Ergebnisse der Vorversuchsphase.....	34
8.2	Entwicklung der Fragebögen	34
8.3	Test-Retest-Reliabilität	37

9	Hauptversuchsphase.....	39
9.1	Versuchsdesign.....	39
9.2	Versuchsdurchführung	41
9.3	Vorauswertung 1	42
9.4	Vorauswertung 2	45
9.5	Endauswertung	52
9.6	Ergebnisse und Diskussion	57
10	Validierungsversuche	65
10.1	Versuchsdesign.....	65
10.2	Versuchsdurchführung	66
10.3	Auswertung	67
10.4	Ergebnisse	68
11	Praktische Anwendung der Ergebnisse	70
11.1	Gültigkeitsbereich der optimalen Lastverteilungen.....	70
11.2	Anwendung	70
12	Zusammenfassung.....	73
13	Ausblick.....	75
14	Literatur.....	76

DYNAMISCHER SITZKOMFORT

1	Einleitung	82
2	Vorprojekt.....	82
3	Fahrversuche Pkw.....	83
3.1	Vorbereitung der Fahrversuche	83
3.2	Durchführung der Fahrversuche	87
4	Fahrversuche Nutzfahrzeuge (Nfz).....	91
4.1	Vorbereitung der Fahrversuche	91
4.2	Durchführung der Versuche.....	93
5	Prüfstandsversuche.....	96
5.1	Prüfstands Aufbau	96
5.2	Vorbereitung der Prüfstandsversuche	97
5.3	PKW-Prüfstandsversuche	100
5.4	Nfz-Prüfstandsversuche	104
6	Bildung objektiver Kennparameter	108
6.1	Fahrversuche Pkw.....	109
6.2	Fahrversuche Nfz.....	114
6.3	Prüfstandsversuche.....	122
7	Auswertung der Subjektivnoten.....	123

1 Einleitung

Es war schon immer ein Bestreben des Menschen, die Werkzeuge seines alltäglichen Gebrauchs stetig zu verbessern. Auch das Automobil hat seit seiner Einführung eine Vielzahl von Optimierungszyklen durchlaufen. Nachdem die Verbesserungsmöglichkeiten in der Technik des Automobils gegenüber der Konkurrenz immer kleiner geworden waren, wurde der Fokus auf die ergonomische Gestaltung des Fahrzeuginnenraumes verstärkt. Nachdem die anthropometrischen Optimierungsmöglichkeiten des Fahrerarbeitsplatzes dann weitgehend bekannt waren, verlagerte sich unter anderem der Fokus auf einen Teilaspekt des Fahrerarbeitsplatzes, der Komfortoptimierung des Fahrzeugsitzes.

Im Fahrzeug stellt der Sitz die größte Kontaktfläche mit dem Fahrzeug dar. Der Fahrzeugsitz muss einen Großteil des Körpergewichtes des Fahrers aufnehmen. Es stellt sich nun die Frage in welcher Weise diese Aufnahme des Körpergewichtes für den Menschen am komfortabelsten ist bzw. am wenigsten Diskomfort hervorruft. Meist wird dieser Optimiervorgang hin zu einer guten Lastverteilung, wenn überhaupt, durch subjektive Wertungen von einigen wenigen Sitzexperten oder ausgewählten Versuchspersonen durchgeführt. Es ist allerdings aus der Psychologie bekannt, dass subjektive Wertungen von einer Vielzahl von Parametern abhängen und eine große Schwankungsbreite zwischen verschiedenen Tagen aufweisen können. Solche Parameter können z.B. die Gemütslage, das körperliche Befinden der Versuchsperson, aber auch Umweltfaktoren wie z.B. die Beleuchtung, die Umgebungstemperatur usw. sein.

Um diese bei Menschen immer auftretenden Schwankungen auszugleichen, muss bei Versuchen zur Beurteilung des Diskomforts von Fahrzeugsitzen auf ein entsprechend großes Versuchspersonenkollektiv zurückgegriffen werden, was allerdings immer mit einem sehr hohen Aufwand an Zeit und Kosten verbunden ist.

Aufgrund der oben angeführten Problematik besteht der Wunsch nach einem objektiven Verfahren für die Beurteilung der Kraftverteilung zwischen Mensch und Sitz.

Deshalb wurde im Rahmen des Projektes „FAT-Schwingungsdummy“ ein Teilprojekt mit dem Titel „Statischer Sitzkomfort“ initiiert, welches sich mit der Entwicklung eines Modells zur objektiven Prognose von Diskomfort auf Basis der Kraftverteilung zwischen Mensch und Sitz beschäftigte.

2 Aufgabenstellung

Die angestrebte Zielsetzung des Projektes „Schwingungsdummy“ war es, ein Modell zu entwickeln, welches es erlaubt aus den objektiven Parametern Druckverteilung und Schwingungsanregung den Diskomfort auf einem Fahrzeugsitz zu prognostizieren.

Im Teilprojekt „Statischer Sitzkomfort“ sollten hierzu Sitzversuche auf Realsitzen und auf dem am Lehrstuhl für Ergonomie entwickelten Experimentalstuhl mit 48 Versuchspersonen durchgeführt werden. Dabei sollten die Druckverteilung sowie die Körperhaltung als objektive Parameter erfasst werden. Eine Erfassung des Diskomforts sowie weiterer subjektiver Parameter sollte mit Hilfe von Fragebögen durchgeführt werden.

Primäres Ziel der Auswertung sollte die Ableitung eines Regressionsmodells sein, welches objektive Kennwerte der Druckverteilungen mit den Diskomfortaussagen der Versuchspersonen in Beziehung setzt und welches gegebenenfalls durch den Einfluss der Körperhaltung ergänzt wird.

Statischer Sitzkomfort

3 Komfortmodell

3.1 Komfort, Diskomfort

Zuerst muss eine Klärung der Begriffe Komfort und Diskomfort durchgeführt werden. Jemand, der unbedarft an das Thema Komfort, Diskomfort herangeht, neigt dazu die beiden Begriffe auf einer Achse eines Kontinuums anzuordnen. Untersuchungen von *Zhang et al. (1996)* zeigten aber, dass diese einfache Annahme die Realität falsch beschreibt. Die Analysen von *Zhang et al. (1996)* wiesen auf, dass die Begrifflichkeit Diskomfort in engem Zusammenhang mit biomechanischen Faktoren und Ermüdung, kurz dem Aspekt des Erleidens steht. Die Begrifflichkeit Komfort dagegen hauptsächlich mit dem Aspekt des Gefallens in Zusammenhang gebracht wird. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde von *Zhang et al. (1996)* ein hypothetisches Modell (Abbildung 1) entwickelt, welches die Wahrnehmung von Komfort und Diskomfort beschreibt.

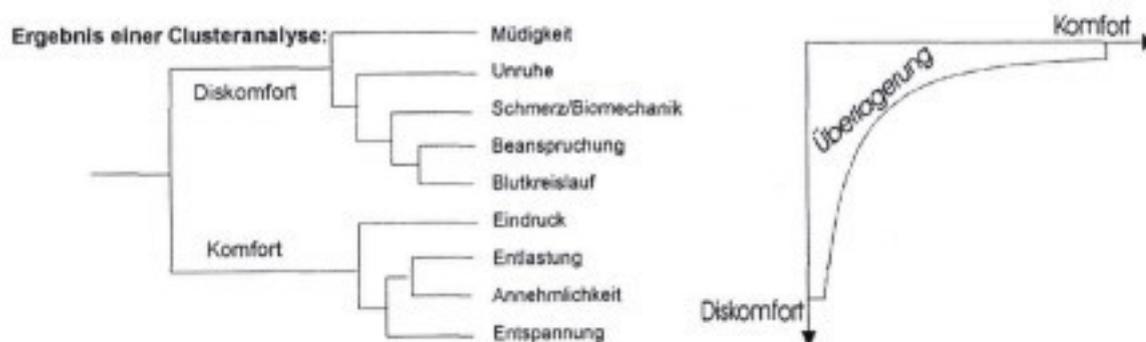


Abbildung 1: Hypothetisches Modell zu Komfort, Diskomfort nach Zhang, Helander & Drury, *Human Factors*, 1996, 38 (3), Abb.3, Seite 388 (entnommen aus Ranhart, 2002)

Ein Beispiel, welches die 2-Dimensionalität des Komfort-Diskomfort-Zusammenhanges verdeutlicht, ist die Betrachtung des Fahrers eines Sportwagens. Auf den Fahrer in einem Sportwagen wirken aufgrund der Auslegung eines Sportwagens wesentlich höhere Kräfte und Schwingungen ein als in einem „normalen“ PKW. Diese stärkeren physikalischen Einflüsse sollten einen höheren Diskomfort als beim „normalen“ PKW hervorrufen. Der Fahrer empfindet aber in der Regel trotzdem einen hohen Komfort, da der Aspekt des Gefallens so stark in den Vordergrund tritt, dass er durch den in Kauf genommenen Diskomfort nicht zerstört wird. An diesem Beispiel wird klar, dass die Begrifflichkeiten Komfort und Diskomfort nicht auf einer Achse liegen können.

Da der Aspekt des Gefallens stark durch individuelle Vorlieben geprägt ist, entzieht er sich der Objektivierung durch physikalische Messwerte. Diskomfort wird dagegen größtenteils durch physikalisch messbare Größen beeinflusst. Da Komfort nur entstehen kann, wenn der Diskomfort auf ein gewisses Maß begrenzt wird, erscheint es sinnvoll, den Fokus auf Diskomfort als primären Untersuchungsgegenstand zu setzen.

3.2 Diskomfortpyramide

In Anlehnung an das Prinzip der Bedürfnispyramide von *Maslow (1978)* wurde von *Krist (1993)* eine Diskomfortpyramide aufgestellt. Die grundlegende Aussage dieser Pyramiden ist, dass zuerst Grundbedürfnisse in einem gewissen Maß erfüllt sein müssen, damit höhere Bedürfnisse in den Vordergrund treten können.

Resultierend aus diesen Überlegungen und Erfahrungswerten wurde die in Abbildung 2 dargestellte Diskomfortpyramide entwickelt.



Abbildung 2: Diskomfortpyramide (Bubb, 2003)

Die Reihenfolge der verschiedenen Modalitäten ist nicht so fest definiert, wie in dem Diagramm dargestellt. Es können sich je nach Höhe und Art des Einflusses Überlappungen und Verschiebungen innerhalb der Diskomfortpyramide ergeben. Wichtig ist die Grundaussage, dass immer zuerst Grundbedürfnisse bzgl. des Diskomforts in einem ausreichenden Maße befriedigt werden müssen, bevor höher stehende Diskomforteinflüsse wahrgenommen werden.

3.3 Ansitz-, Kurzzeit-, Langzeitdiskomfort

Bei der Betrachtung von Diskomfort beim Sitzen ist dieser zeitlich weiter zu untergliedert. Es ist zu unterscheiden zwischen Ansitz-, Kurzzeit- und Langzeitdiskomfort.

Unter Ansitzkomfort versteht man das Empfinden des Menschen beim Vorgang des Hinsetzens und wenige Sekunden danach. Für den Ansitzkomfort spielen vor allem die dynamischen Eigenschaften des Sitzes, sowie dessen Oberflächenbeschaffenheit eine entscheidende Rolle.

Beim weiteren Fortschreiten der Zeit spricht man von Kurzzeitdiskomfort. Dieser Zeitraum ist von etwa 1 Minute nach dem Hinsetzen bis zu ca. 15-30 Minuten danach festzulegen. Es treten noch keine oder nur wenige physiologische Effekte durch die Körperhaltung und die Druckeinwirkung auf den Körper auf. Die Bewertung des Diskomforts stützt sich weitestgehend auf die haptischen Reize, die vom Sitz auf den Menschen wirken. Im Vergleich zum Langzeitdiskomfort scheint die Körperhaltung, wenn sie der Mensch frei wählen kann, eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Nach 15-30 Minuten folgt der Übergang zum Langzeitkomfort. Es beginnen erste physiologische Effekte durch die Haltung und Druckeinwirkung spürbar zu werden. Durch die Unterbindung des Blutflusses in den mit hohem Druck beaufschlagten Körperregionen bilden sich in den Zellen Abfallprodukte, die eine Reizung der Nociceptoren auslöst und dadurch zu extrem unangenehmen Empfindungen bis hin zum Schmerz führen können. Weiterhin scheint mit fortschreitender Sitzdauer die Körperhaltung stärker an Bedeutung zu gewinnen, da bei ungünstiger Körperhaltung zunehmend Verspannungen in der Muskulatur auftreten. Weiterhin können länger einwirkende, hohe Kräfte auf die knöcherne Struktur des Menschen zu Tiefenschmerz führen. Dieser wird als dumpfer, schwer zu lokalisierender Schmerz empfunden, der teilweise auch in andere Körperbereiche ausstrahlt.

4 Stand der Forschung

Die Ausführungen in diesem Kapitel sind aus der Diplomarbeit von *Ranhart (2002)* entnommen, welcher sich am Lehrstuhl für Ergonomie mit einer Literaturstudie bezüglich des statischen Sitzkomforts beschäftigte. Teilweise wurden die Formulierungen zum besseren Verständnis abgeändert.

4.1 Physiologische Wirkung von Druck

Im Folgenden soll die Wirkungsweise des Druckes anhand der Richtlinien des Australian Wound Management Association-Pressure Ulcer Interest Sub-Committee, 2001 erläutert werden. Bei zu hohem Druck, der auf eine lokal begrenzte, kleine Gewebsfläche wirkt, kann es zur Abschnürung des Blutflusses kommen. Dies kann im schlimmsten Fall zur Zellerstörung und anschließendem Absterben der Zelle führen. Durch hohen Druck auf die Zelle wird die Zwischenraumflüssigkeit herausgedrückt, was zum Zelle-Zelle-Kontakt führt. Mögliche Folgen sind der Bruch der Membran und die Freisetzung toxischer Substanzen oder zumindest eine Hemmung des Abtransports der toxischen Stoffe durch die Zerstörung der lokalen, lymphatischen Venen. Auch kann zu hoher Druck eine Schädigung des tiefen Gewebes bewirken, da Druck am Knochen ca. 3 bis 5 mal höher ist als an der Hautoberfläche. Es werden in diesen Richtlinien auch Druckbereiche angegeben. Bei einem Druck von 6-12 mmHg (entspr. 0,08 -0,16 N/cm²) erfolgt ein Versperren des venösen Abflusses. Ein Druckkollaps kann bei einer Schwelle von 32mmHg (entspr. 0,42 N/cm²) auftreten. Die Druckschwelle von 32mmHg wird jedoch in der Nähe der Sitzbeinhöcker meist um das Doppelte bzw. das Dreifache überschritten und ist anscheinend für diesen Bereich nicht gültig.

Aber auch die Art und Weise der Druckeinwirkung ist wichtig. Gleichmäßig zugeführter Druck hat keine oder nur geringe Auswirkung auf das Gewebe, wogegen bei Punkt- oder Lokaldruck leicht Gewebsschädigungen auftreten können. Ebenso spielt die Einwirkdauer des Druckes eine wichtige Rolle. Druck, der nur eine kurze Zeitdauer auf das Gewebe wirkt, zwingt die Blutgefäße sich auszudehnen, um den Blutfluss zu steigern. Dabei wird eine Hautrötung erzeugt, die unter Druck erbleicht. Dies ist ein Hinweis, dass die Kapillaren frei sind und einen ungehinderten Blutfluss aus und in das Gewebe ermöglichen. Dies ist die normale Reaktion auf kurzzeitigen Druck, wobei die Rötung verschwindet, wenn man den Druck entfernt. Auch lang anhaltender Druck bewirkt anfänglich eine Weitung der Blutgefäße im Gewebe, um den Blutfluss zu steigern, wobei eine Rötung entsteht. Jedoch lässt ununterbrochener, lang anhaltender Druck das Blut in den Kapillaren gerinnen, wobei eine beständige Rötung erzeugt wird. Diese erbleicht nicht unter Druck, was bedeutet, dass die Blutgefäße verstopft sind und somit das Blut gehindert wird, aus und in die Blutgefäße zu strömen.

Abschließend kann gesagt werden, dass man Punkt- bzw. Lokaldruck, insbesondere über längere Zeit vermeiden sollte. Gleichzeitig sollte die Abschnürung des Blutflusses durch zu hohen Druck (Orientierungswert: 32 mmHg) unterbunden werden.

4.2 Körperbau, -muskulatur und -fett

Bei den verschiedenen Untersuchungen wurden auch andere Abhängigkeiten bezüglich des Druckes festgestellt. Die Menge des Körperfetts bzw. der Körpermuskulatur übt einen Einfluss auf die Körperdruckverteilung aus. *Treaster (1987)* weist darauf hin, dass je höher der Prozentsatz an Körperfett ist, desto höher ist der Polsterungseffekt über den Knochenerhebungen und desto diffuser ist der resultierende Druck.

Da die Körperdruckverteilung von der Menge des Körperfetts bzw. der Muskulatur abhängt und Männer und Frauen diesbezüglich Unterschiede aufweisen, scheint ein Zusammenhang zwischen Druck und Geschlecht zu existieren. So haben *Gyi & Porter (1999)*, Zusammenhänge zwischen Komfort und Geschlecht herausgefunden. *Zacharkow (1988)* zitiert in *Gyi & Porter (1999)* nimmt an, dass Männer Drücke besser bewerten können, da sie weniger Fett unter der Haut am Gesäß und an den Hüften haben. In eine ähnliche Richtung verweist die Aussage *Yamazaki's (1992)*, der *Hatta et al (1985)* zitiert: „Männliche, junge und schlanke Testpersonen haben einen besseren Übereinstimmungskoeffizienten in ihren Fühlunterscheidungen als weibliche, alte und dicke Testpersonen.“ Männer sind über den Hüften stärker gebaut und die Sitzbeinhöcker und die Acetabula (Gelenkpfanne für den Oberschenkelkopf) liegen näher zusammen. Das weibliche Becken ist im allgemeinen 1/3 größer als das männliche und der Winkel des Beckens läuft nicht so spitz zu wie bei Männern, so *Congleton (1988)*. In den beiden Experimenten (*Gyi & Porter, 1999*) wurden signifikante, positive Korrelationen zwischen Gewicht & Schenkeldruckwerten festgestellt. Dabei spielte der RPI-Index eine wichtige Rolle. Ein hoher RPI-Wert repräsentiert einen gedrungeneren, dünnen Körper; ein niedriger RPI-Wert zeugt hingegen von einer weiten Gestalt. Im 2. Experiment der Studie zeigte sich, dass große Männer, die allgemein dünner waren als andere Personengruppen, die höchsten Druckwerte um die Sitzbeinhöcker hatten.

Auch *Treaster (1987)*, hat festgestellt, dass dünne Personen den Polsterungseffekt verlieren und lokalisierte Bereiche hoher Druckintensitäten über den gewichtstragenden Körperregionen verspüren werden, wobei anschließende Testreihen dies für dünne Personen verifizierten. Die Aussage von *Treaster (1987)* passt zu der von *Gyi & Porter (1999)*. Demnach trägt Muskulatur und Fett am Körper zu einer guten Polsterung bei, d.h., es gilt, je höher der Muskelanteil bzw. Fettanteil ist, um so diffuser ist der resultierende Druck, der am Ende als komfortabler empfunden wird. Der Anteil des Körperfetts bzw. der Körpermuskulatur beeinflusst sowohl die Druckverteilung als auch die Komfortwahrnehmung. Insbesondere dünne Personen verlieren den Polsterungseffekt durch Fett bzw. Muskulatur und werden hohe Druckintensitäten in den gewichtstragenden Regionen verspüren. Andererseits scheinen dünne Personen, Drücke besser bewerten zu können, da sie weniger Fett am Gesäß und über den Hüften haben. Da Frauen und Männer bezüglich Fett und Muskulatur unterschiedliche gebaut sind, erscheint es nicht verwunderlich, dass Frauen den Komfort anders beurteilen und die Druckverteilungen anders aussehen als bei Männern.

4.3 Sitzdruck als Prediktor von Diskomfort

Die Druckverteilung an der Nahtstelle zwischen Mensch und Sitz war bereits Untersuchungsgegenstand zur Vorhersage des Diskomforts auf Fahrzeugsitzen.

Der Druck stellt einen nicht zu unterschätzenden Einflussfaktor auf den Sitzkomfort dar. Dies haben mehrere Untersuchungsergebnisse gezeigt. *Thakurta et al. (1995)* haben festgestellt, dass der Effekt der Druckverteilung einen signifikanten Einfluss auf das subjektive Komfortempfinden hat. *Thakurta et al. (1995)* erwähnen aber auch, dass es sich nur um vorläufige Resultate handelt. Sie weisen ebenfalls am Ende ihres Berichtes darauf hin, dass der Sitzkomfort allgemein nicht linear von einer Variablen abhängt, sondern in der Tat ein komplexes Resultat mehrerer verschiedener Variabler ist. Die Untersuchungsergebnisse von *Thakurta et al. (1995)* haben gezeigt, dass Druck ein nicht zu unterschätzender Einflussfaktor auf den Komfort ist.

Gross et al. (1994) zitiert in *Gyi & Porter (1998)* kommen zum Schluss, dass Körperdruckverteilungen eng mit dem wahrgenommenen Komfort verbunden sind und der wahrgenommene Komfort vorhersagbar ist. Leider machen die Autoren keine

Aussage bezüglich der angewendeten, statistischen Analysen. Dennoch stützt die Aussage der Autoren die These, dass Druck und Komfort zusammenhängen.

Auch bei *Kamijo et al. (1983)* zeigt sich, dass Druck und Komfort im Zusammenhang stehen. Die Autoren schließen damit, dass in der statischen, sensorischen Beurteilung die Bewertungsfaktoren der Körperdruckverteilung und der Fahrhaltung einen großen Einfluss auf die Gesamtbewertung des Sitzes haben. Leider ist die Aussage sehr zweifelhaft, da in diesem Versuch nur von einer Person Druckdaten verwendet wurden, die anschließend in Verbindung mit den subjektiven Bewertungen jedes Sitzes der 15 Testpersonen gebracht wurden. Ebenso erhält der Leser keine Information über die Zeitdauer zur Bewertung der Sitze. Nichts desto trotz, scheint der Druck einen Einfluss auf die Komfortbewertung zu haben.

4.4 Empfehlungen für die Druckverteilung auf der Sitzfläche

Der Versuch von *Ebe und Griffin (2001)* zeigt deutlich, dass der Druck, insbesondere unter den Sitzbeinhöckern, einen hohen Einfluss auf die Komfortbewertung hat. Es bestand, so die Autoren, eine signifikante, lineare Beziehung zwischen dem Gewicht auf eine Fläche, was dem Druck entspricht, und den Komfortbewertungen. Dabei korrelierte insbesondere der Druck um die Sitzbeinhöcker negativ mit dem Sitzkomfort. Der Versuch wurde mit 12 Männern durchgeführt. Frauen werden durch die Untersuchungsergebnisse somit nicht repräsentiert. Für andere Bereiche wie Hüfte oder Oberschenkel wurden keine signifikanten Korrelationen festgestellt. Das legte die Vermutung nahe, dass die Testpersonen das statische Sitzgefühl basierend auf Drücken um die Sitzbeinhöcker bewerteten. Somit könnte durch eine Druckverlagerung von den Sitzbeinen auf die Oberschenkel das Diskomfortempfinden reduziert werden. Besonders der Druck unter den Sitzbeinhöckern scheint bei der Komfortbewertung eine wichtige Rolle zu spielen. Sowohl weiche als auch harte Polsterauflagen gaben hohe Drücke um die Sitzbeinhöcker, was laut *Ebe und Griffin (2001)* zu einem Diskomforteindruck führen wird. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Drücke durch zwei gänzlich unterschiedliche Mechanismen erzeugt werden. Zum einen erzeugen harte Schäume aufgrund ihrer Härte hohe Drücke um die Sitzbeinhöcker, andererseits werden auch durch extrem weiche Schäume hohe Drücke um die Sitzbeinhöcker erzeugt. Grund hierfür ist das so genannte „Bottoming“. Als Bottoming bezeichnet man, wenn der Schaum zusammengedrückt und durch die Verdichtung härter wird. Um möglichst geringen Diskomfort zu erzeugen, sollten hohe Drücke unter den Sitzbeinhöckern vermieden werden. Um den störenden Druck unter den Sitzbeinhöckern zu vermeiden, sollte man den Druck möglichst über die gesamte Sitzfläche angemessen verteilen. Das heißt, man sollte versuchen, der natürlichen Tendenz entgegen zu wirken und den Druck auf die Sitzbeinhöcker derart zu verringern, dass mehr Druck auf die Oberschenkel verlagert wird. Dadurch würde ein höherer Sitzkomfort erreicht und der Sitz wird als angenehmer eingestuft werden. Auch *Garret et al. (2001)* stützen die Aussage, einer angemessenen Druckverteilung. *Garret et al. (2001)* führen aus, dass es am besten ist, den Druck über die gesamte Polsterfläche zu verteilen. So soll verhindert werden, dass der Druck unter den Hüftknochen am höchsten und unter dem Steißbein sowie unter den Oberschenkeln am niedrigsten ist. Dabei soll jedoch verhindert werden, zu viel Druck auf die Oberschenkel zu geben, da dies die Blutzirkulation beschränken und zu starkem Diskomfort führen wird. Auf der anderen Seite kann zu geringe Unterstützung Beanspruchung und Ermüdung der Füße hervorrufen. Das heißt, dass der Druck auf die Oberschenkel angemessen und nicht zu hoch, aber auch nicht zu niedrig sein sollte. Gleichzeitig sollte der Sitzbeindruck erniedrigt werden.

Auch weitere Autoren sprechen sich für eine Verteilung des Druckes aus. So meint *Treaster (1987)*, es wäre besser, den Druck über die ganze Sitzfläche zu verteilen, um dadurch den Benutzerkomfort zu maximieren. Auch *Diebschlag*, ist der Meinung, dass

möglichst die gesamte Berührfläche Rücken/Lehne sowie Gesäß und Oberschenkel/Sitzfläche zur Lastaufnahme herangezogen werden sollte. Bei Diebschlag fällt auf, dass bei zu harter Polsterung hohe Druckwerte um die Sitzbeinhöcker entstehen, die er als ungünstig beurteilt. Dies bekräftigt die Aussage, dass man versuchen sollte, hohe Drücke unter den Sitzbeinen zu vermeiden und mehr Druck auf die Oberschenkel verlagern sollte. *Floyd & Roberts (1958)*, zitiert in *Goonetilleke (1998)*, gingen davon aus, dass sich viele Leute komfortabel fühlen, wenn das Gewicht primär von den Sitzbeinhöcker aufgefangen wird. Untersuchungen haben aber gezeigt, so *Goonetilleke (1998)*, dass bei luxuriösen Fahrzeugen dieser Bereich geringer belastet wird und somit vielen Autoren eine angemessene Druckverteilung als sinnvoll erscheint. Demnach ist es besser, den Bereich um die Sitzbeinhöcker weniger zu belasten und mehr Druck auf die Oberschenkel zu verlagern. Dies zeigen verschiedene Studien. *Diebschlag et al. (1988)* werden in *Ebe & Griffin (2001)* zitiert. Sie nehmen an, dass Polyurethanschaum mit einer linearen Beziehung zwischen zugeführter Kraft und dem Verdichtungsverhältnis der Aufpolsterung den Druck nahe der Sitzbeinhöcker verringert und gleichzeitig eine bessere Druckverteilung erreicht wird.

Ng et al. (1995) haben die Auswirkungen eines neuen, intelligenten Sitzsystems untersucht. Dabei wurden Luftkammern in einem Sitz so gefüllt, dass der Druck mittels aufgepumpter Blasen verteilt wurde. Zuvor wurden die 20 Testpersonen (10 Männer / 10 Frauen) über den Sinn der Untersuchung informiert, worauf ihnen ein kurzer Fragebogen zur Feststellung der Fahrerfahrung sowie der Vertrautheit mit unterschiedlichen Automobilsitzen gegeben wurde. Die Untersuchungsergebnisse sprechen für den neuen Sitz. So wurde der Druck unter dem Gesäß von anteilmäßig 73,9% auf 55,6% des Gesamtdruckes auf die Sitzpfanne reduziert, wobei der Druck auf die Oberschenkel anteilmäßig von 18,5% auf 37,4 % anstieg. Dies legt den Schluss nahe, dass es besser ist, das Gewicht nicht schwerpunktmäßig auf den Bereich um die Sitzbeinhöcker zu konzentrieren, sondern es vielmehr über die Sitzfläche angemessen zu verteilen. Der Druck unter den Sitzbeinen wurde beim neuen, intelligenten Sitz im Vergleich zum alten Sitz um ca. 25 mmHg (entspr. 0,34 N/cm²) auf ca. 50 mmHg (entspricht 0,68 N/cm²) reduziert, wobei mehr Druck auf die Oberschenkel verlagert wurde (ca. 25mmHg entspricht 0,34N/cm²). Die Komfortbewertungen der Testpersonen sprechen für den neuen Sitz und somit für eine angemessene Druckverteilung. Betrachtet man die Untersuchungsergebnisse für die Sitzpfanne, so stärkt es die Theorie, dass man versuchen sollte, Druck von den Sitzbeinen auf die Oberschenkel zu verlagern. Mit der Verringerung von Druck unter den Sitzbeinen bei gleichzeitiger Druckerhöhung unter den Oberschenkel wird der Sitzkomfort erhöht. Das heißt, dass durch eine angemessene Druckverlagerung von den Sitzbeinen auf die Oberschenkel der Sitzkomfort erhöht wird. Dabei scheint ein Sitzbeindruck von 50 mmHg (entspricht 0,68 N/cm²) und ein Oberschenkeldruck von ca. 25mmHg (entspricht 0,34N/cm²) komfortabel zu sein.

Es gibt noch andere Autoren, die der Meinung sind, dass man den Druck über die gesamte Sitzfläche angemessen verteilen sollte, wobei man mehr Druck auf die Sitzbeinhöcker geben sollte als auf die Oberschenkel. Zu hoch gewählter Druck unter den Oberschenkel kann dann leicht zu Diskomfort führen. Der Ansatz von *McCormick & Sanders* zitiert in *Goonetilleke (1998)* unterstützt die Theorie des angemessen verteilten Druckes zur Komfortmaximierung. Sie schlagen vor, das Gewicht mehr über die Gesäßfläche zu verteilen und weniger Gewicht auf die Oberschenkel zu geben. Auch *Treaster (1987)* weist am Anfang ihres Berichts im Rahmen von Sitzrichtlinien auf eine Aussage von *Tichauer (1978)* hin, dass man das Zusammendrücken des Schenkel vermeiden sollte, weil so der Blutfluss zu den Extremitäten eingeschränkt und Nerven eingeklemmt würden, was zu Schmerzen und Taubheit führe. Deshalb ist es im Zuge des Komforts wichtig, mehr Druck bezüglich der Sitzpfanne auf die Sitzbeinhöcker zu geben und die Oberschenkel geringer zu belasten.

Die Beobachtung von *Milivojevic et al. (2000)* stützen diese Aussage eines angemessen verteilten Drucks mit höheren Drücken unter den Sitzbeinhöckern und geringen Drücken

unter den Oberschenkeln. Beim Vergleich der Komfortbewertungen mit den Körperdruckverteilungen, fiel den Autoren auf, dass der Sitz mit der höchsten Komfortbewertung den niedrigsten, mittleren Sitzbein- und Schenkeldruck aufwies, wobei der Druck über die zweitgrößte Kontaktfläche im Test zwischen Mensch und Sitzpfanne wirkte. Wenn der Sitzbeindruck abnimmt, steigt die Komfortbewertung an. Gleiches gilt für den Oberschenkeldruck, sinkt er, bedeutet dies einen Anstieg in der Komfortbewertung. Die Studie hat gezeigt, dass sowohl zu hohe Schenkel- als auch Sitzbeindrücke dazu beitragen, Diskomfort hervorzurufen. Deshalb ist es wichtig, den Druck auf der Sitzpfanne angemessen zu verteilen und die Oberschenkel geringer zu belasten als die Sitzbeine. Betrachtet man das Verhältnis Sitzbeindruck/Oberschenkeldruck, so weisen die beiden Studien von *Milivojević et al. (2000)* und *Ng et al. (1995)* bei einem komfortablen bzw. idealen Sitz ein annähernd gleiches Verhältnis von 2:1 auf. Dies legt die Vermutung nahe, dass es für das Komfortempfinden günstig ist, den Druck auf die Sitzpfanne derart zu verteilen, dass sich ungefähr ein Verhältnis von 2:1 (Sitzbeindruck/Oberschenkeldruck) einstellt.

4.5 Empfehlungen für komfortable Druckwerte für die Sitzfläche

Diebschlag ist einer der wenigen Autoren, der konkrete Druckwerte als Empfehlung angibt. Er empfiehlt Drücke je nach Fahrzeugart von 1 – 3 N/cm² (entspricht 74 mmHg–221 mmHg), um eine gute hintere Beckenkammabstützung zu ermöglichen. Ebenso müssen die Drücke direkt unter den Sitzbeinhöckern 1 – 3 N/cm² (entspricht 74 mmHg–221 mmHg) betragen, um einen sicheren Halt im Sitz zu gewährleisten. Des Weiteren fordert er, dass Drücke im Bereich um die Sitzbeinhöcker 0,8 – 1,5 N/cm² (entspricht 58,8 mmHg–110 mmHg) betragen müssen. Im übrigen Lehnen- und Sitzbereich einschließlich der Sitzvorderkante und der Seitenwangen sollten die Drücke etwa 0,2 – 0,8 N/cm² (entspricht 14,7 mmHg– 58,8 mmHg) betragen. Leider erfährt der Leser nicht, ob es sich bei den angegebenen Werten um Durchschnitts- oder Maximalwerte handelt. Vergleicht man die Drücke von Diebschlag mit denen von *Milivojević et al. (2000)* und *Ng et al. (1995)*, so hat man den Eindruck, dass die Werte von Diebschlag für die Sitzbeinregion etwas zu hoch gewählt wurden. Ein geringerer mittlerer Sitzbeindruck von 57,6 mmHg (entspricht 0,78 N/cm²) wie bei *Milivojević et al. (2000)*, dürfte durch geringere Druckbelastung der Sitzbeine das Komfortempfinden steigern. Die Oberschenkel sollten geringer belastet werden, wobei *Milivojević et al. (2000)* einen Oberschenkeldruck von 26 mmHg (entspricht 0,35 N/cm²) vorschlagen. Dies entspricht ungefähr der Hälfte des Druckes auf die Sitzbeine. Betrachtet man die durchschnittliche Druckverteilung auf der Sitzpfanne bei dem neuen, intelligenten Sitz in der Studie von *Ng et al. (1995)*, der im Vergleich zu einem Standardsitz als komfortabel eingestuft wurde, so beträgt der Druck in der Sitzbeinregion 50–55 mmHg (entspr. 0,68–0,75 N/cm²). Der Druck unter den Oberschenkeln dürfte bei ca. 25–30 mmHg (entspr. 0,34–0,41 N/cm²). Auch bei *Ng et al. (1995)* beträgt das Verhältnis Sitzbeindruck/Oberschenkeldruck ca. 2:1.

Somit erscheint der empfohlene Druck unter den Sitzbeinen von Diebschlag mit 1–3 N/cm² zu hoch gewählt. Aufgrund der Betrachtungen von *Milivojević et al. (2000)* und *Ng et al. (1995)*, erscheint ein mittlerer Sitzbeindruck zwischen 0,65 und 0,8 N/cm² sowie ein mittlerer Schenkeldruck zwischen 0,3 und 0,4 N/cm² als brauchbar.

4.6 Diskomfort durch hohen Sitzbeindruck

Warum hoher Druck unter den Sitzbeinhöckern als extrem unangenehm empfunden wird, liegt höchst wahrscheinlich daran, dass dieser Tiefenschmerz hervorruft. *Reddy et al. (1982)* erstellten ein physikalisches Modell des menschlichen Gesäßes, wobei sie die

Belastungsverteilungen betrachteten. Dabei fanden sie heraus, dass insbesondere in der Nähe des harten Knochens (vergleichbar mit den Sitzbeinhöckern) und an einem Platz seitlich davon hohe Belastungen auftraten. Diese hohen Belastungen könnten der Grund für Tiefenschmerz und damit verbundenem Diskomfort sein. Als Tiefenschmerz werden Schmerzen aus Skelettmuskeln, Knochen, Gelenken und Bindegewebe bezeichnet. Er besitzt einen dumpfen Charakter und ist häufig schlecht zu lokalisieren. Die Tiefenschmerztheorie könnte erklären, warum in Langzeitstudien (*Gyi und Porter, 1999*) viele Personen schon teilweise nach kurzer Testdauer über Rückenschmerzen klagen. Tiefenschmerz strahlt gerne in andere, angrenzende Körperbereiche aus. Deswegen könnte der gefühlte Schmerz im unteren Rückenbereich von Tiefenschmerz herrühren, ausgelöst von der Sitzbeinhöckerregion. Eine weitere Erklärung für Schmerzen im unteren Rückenbereich liefern *Reed et al. (1999)*. Beim Nach-Vorne-Rutschen während des Sitzens und gleichzeitigem Rückendrehen des Beckens biegt sich die Lendenwirbelsäule so lange, bis passive Unterstützungsstrukturen des Rückens (Wirbelsäule, Muskeln, Bänder) eine Rückhaltekraft aufbauen. Diese Kraft erzeugt eine weitere Belastung des unteren Rückengewebes, was bei langer Zeitdauer zu Schmerzen im unteren Rückenbereich führt. Dies könnte erklären, warum viele Fahrer bei langen Fahrten über extreme Schmerzen im unteren Rückenbereich klagen. Um Tiefenschmerz verursacht durch hohe Drücke an den Sitzbeinen zu vermeiden, sollte man versuchen, der natürlichen Tendenz hohen Drucks unter den Sitzbeinen entgegen zu wirken und diesen Bereich durch Umlagerung von Druck auf die Oberschenkel geringer zu belasten.

4.7 Diskomfort im Rücken

Auch der Diskomfort, der im Rücken gefühlt wird, ist wichtig für den Gesamtkomfortempfinden. Einige Autoren sind sogar der Meinung, dass das Komfortempfinden im Rücken am wichtigsten für den Gesamtkomfort ist. So sind *Vergara & Page (2002)* der Meinung, dass nur ein Anstieg des Diskomforts in der Lenden-/Rückenregion und/oder Nackenregion ein Absinken im allgemeinen Komfort hervorruft, d.h., dass Gesäß- und Schenkeldiskomfort eher unwichtig für die Gesamtkomfortbewertung sind. Auch *Yamazaki (1992)*, erwähnt in seinem Bericht, dass das Rückenkomfortgefühl den wichtigsten Faktor bei der Komfortabilitätsbewertung im Sitzen darstellt und somit mit dem Bericht von *Iwaski (1988)* übereinstimmt.

Thomas et al. (1991) fanden heraus, dass der Komfort im unteren Rücken anscheinend den stärksten Einfluss auf den Gesamtkomfort aufweist, da Wahrnehmungen des allgemeinen Komforts stark in Verbindung mit den Komfortempfindungen im unteren Rückenbereich standen.

4.8 Diskomfort durch hohe Lendendrucke

Hoher Druck in der Lendenregion erzeugt Diskomfort und ist zu vermeiden; wie Untersuchungen zeigen. *Lim et al.* testeten verschiedene Lendenunterstützungserhebungen (10mm, 30mm, 50mm). Dabei wurde von den Testpersonen eine Lendenunterstützungserhebung von 10 mm als am angenehmsten empfunden. Auffallend war, dass bei Zunahme der Erhöhung der Lendenunterstützung der Druck in der Lendenregion gleichzeitig zunahm. Dies wurde anhand des Verhältnisses Lendendruck/Rückenlehndruck dargestellt, welches bei einer 10 mm-Erhebung geringer war als bei einer höheren Erhebung der Lendenstütze. Im Gegensatz dazu war das Verhältnis Brustkorbdruck zu Rückenlehndruck bei einer kleinen Erhebung größer. Es existierten ebenfalls signifikante Unterschiede zwischen den Körperdruckverteilungen zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten (vor, während, nach der

Fahrt). Dabei wird als Grund vermutet, dass sich die Testperson im Laufe des Experiments stärker an die Rückenlehne anlehnt als vor der Fahrt. Deswegen finden die Autoren es als nicht aussagekräftig, wenn statische Körperdruckverteilungen auf einem statischen Sitzbock oder einem Simulator gemessen werden.

Ganz im Gegensatz zu diesen Ergebnissen, wurde bei dem intelligenten Sitzsystem von *Ng et al. (1995)* festgestellt, dass das neue Sitzsystem in der Lendenunterstützung eine Komfortbewertung von 9,0 (von 10) erhielt, wobei die Bewertung des alten Sitzes ohne Luftblasen bei 7,8 lag. Schaut man sich die durchschnittlichen Druckverteilungen des neuen, intelligenten Sitzes und des alten Sitzes an und vergleicht sie miteinander, so fällt auf, dass der Druck im Lendenbereich stark zunahm. Betrachtet man die Änderung der Druckprozentätze im Rückenbereich, so kann man feststellen, dass beim neuen Sitz jetzt 76,5 % des Gesamtdruckes auf die Rückenlehne in der Lendenregion wirken. Dies wird jedoch nicht als störend empfunden, sondern scheint im Gegenteil, noch komfortabler zu sein. Beim alten Standardsitz werden nur 55,9 % des Druckes auf die Rückenlehne in der Lendenregion abgetragen, wobei dieser in Bezug auf die Lendenunterstützung mit 8,2 von 10 ebenfalls hoch eingestuft wurde. Der Unterschied zwischen den Studien von *Ng et al. (1995)* und *Lim et al.* liegt im Faktor Zeit. Bei *Lim et al.* musste die Testperson zuerst eine 3km (entspricht ca. 10 min) lange Teststrecke zurücklegen, wobei nach jeder Fahrt eine Bewertung des Diskomforts bezüglich der Lendenunterstützungserhebung seitens der Testperson stattfand. Bei *Ng et al. (1995)* war die Zeit zur Bewertung des Sitzkomforts kürzer, obwohl keine explizite Zeitangabe dem Bericht zu entnehmen ist. Die Zeit zur Urteilsbildung über den Komfort eines Sitzes dürfte zwischen 1-2 Minuten liegen, weil die Komfortbewertung direkt nach dem automatischen Einstellen des Sitzes und Abnahme der 10 Drucksamples erfolgte. Es ist ungünstig, den Druck auf die Lendenregion zu konzentrieren, da dadurch nur ein kurzzeitiger Komforteindruck erzielt wird, der nicht von langer Dauer ist. Wird der Bereich um die Lendenregion mit erhöhtem Druck beaufschlagt, wird dies zwar zuerst als komfortabel angesehen (vgl. *NG et al., 1995*), kurze Zeit später aber als störend empfunden (vgl. *Lim et al.*). Es soll jedoch nicht der Eindruck entstehen, dass der Komfort eines Sitzes maximal ist, wenn kein Lendendruck herrscht. Der Druck in der Lendenregion wird benötigt, um eine ausreichende Unterstützung zu gewährleisten. Diebschlag empfiehlt, die gesamte Berührfläche Rücken/Lehne zur Lastaufnahme heranzuziehen, wobei geringere Drücke in der Lendenregion herrschen sollten. Insgesamt lässt sich folgern, dass geringe Drücke in der Lendenregion den Komfort positiv beeinflussen.

4.9 Komfort durch Übertragung hoher Drücke über Beckenkämme

Weiterhin ist aber auch die Verteilung des Druckes in der Lendenregion wichtig. Die hinteren Beckenkämme können höhere Druckbelastungen aufzunehmen. Deswegen können hier höhere Drücke wirken. Rosemeyer schlägt die hinteren Beckenkämme zur Abstützung vor, um das Becken in aufrechter Stellung zu fixieren. Denn nur ein aufrecht stehendes Becken ermöglicht der Wirbelsäule in allen ihren Abschnitten eine normale Haltung aufzubauen. *Reed et al. (1991)* meinen, dass es besser ist, die Unterstützungskräfte seitlich der Wirbelsäule auf den rückwärtigen Teil des Beckens zu leiten und hohe Drücke entlang der Lendenwirbelsäule sowie dem Kreuzbein zu vermeiden.

4.10 Zusammenfassung

Aus der Literatur lassen sich folgende Aussagen zusammengefasst festhalten:

Die Druckverteilung auf dem Sitz hat einen Einfluss auf den empfundenen Komfort.

Vom medizinischen Standpunkt aus sind Punkt- und Lokaldruck insbesondere über längere Zeit zu vermeiden. Ebenfalls sind hohe Drücke zu vermeiden, die zu einer Abschnürung des Blutflusses führen (Orientierungswert 32 mmHg)

Körperbau, Körpermuskulatur und Körperfett haben einen Einfluss auf Druckverteilungen und die Diskomfortbewertung. Da Mann und Frau bzgl. Muskel- und Fettanteil sowie der knöchernen Struktur Unterschiede aufweisen, ergeben sich auch hier Unterschiede in Druckverteilungen und Diskomfortbewertungen.

Der Druck auf Sitz- und Lehnenfläche ist angemessen zu verteilen. Für die Ableitung der Kräfte sollte eine möglichst große Fläche des Sitzes verwendet werden. Dabei sollte ein höherer Druck in den Sitzbeinregion herrschen als im Oberschenkelbereich. Zu hoher Druck in der Sitzbeinregion ist allerdings zu vermeiden. Ebenso sollte hoher Druck in der Lendenregion sowie entlang der Wirbelsäule und dem Kreuzbein vermieden werden. Günstiger ist es, den Druck neben der Wirbelsäule über die hinteren Beckenkämme abzuleiten.

Berücksichtigt man die Betrachtungen von *Milivojevich et al (2000)* und *Ng et al. (1995)* sollte der mittlere Sitzbeindruck im Bereich von 0,65 und 0,8 N/cm², der mittlere Schenkeldruck zwischen 0,3 und 0,4 N/cm² liegen nach

5 Vorgehensweise

Das Projekt wurde in eine Vorversuchsphase und eine Hauptversuchsphase gegliedert.

Primäre Zielsetzung der Vorversuchsphase war es, die Versuchsmethodik zu entwickeln und dahingehend zu prüfen, ob damit das in der Aufgabenstellung definierte Ziel erreicht werden kann. Die aus der Auswertung und Analyse der Vorversuchsphase abgeleiteten Erkenntnisse wurden dann in der Gestaltung der Hauptversuchsphase umgesetzt.

Weitere Aufgabe in der Vorversuchsphase war es, die technischen Voraussetzungen für die Durchführung der Versuche zu schaffen. Hierzu zählen der Aufbau der Mockups für die Versuche, die Sitzalterung und die Sitzvermessung mit dem Experimentalstuhl für die spätere Simulation der Sitze auf demselben.

Für die Hauptversuchsphase wurde die Versuchsmethodik entsprechend den Erkenntnissen aus der Vorversuchsphase erweitert und modifiziert. Parallel zur Durchführung der Hauptversuchsphase wurden in mehreren Zyklen die gewonnenen Daten ausgewertet und mit dem Arbeitskreis diskutiert. Basierend auf den vorgestellten Zwischenergebnissen wurde dann die weitere Vorgehensweise in Abstimmung mit dem Arbeitskreis definiert.

Nach Abschluss der Hauptversuchsphase wurde die abschließende Auswertung durchgeführt und die Ergebnisse des gesamten Projektes in diesem Bericht zusammengefasst.

6 Versuchs- und Messeinrichtungen

6.1 Forschungsstuhl

6.1.1 Technische Ausführung des Forschungsstuhls

Der Forschungsstuhl (Abbildung 3) wurde von *Balzulat (2000)* entwickelt, um die Nahtstelle zwischen Mensch und Sitz detailliert zu untersuchen.

Sitz- und Lehnenfläche bestehen jeweils aus 81 Pneumatikzylindern, die unabhängig voneinander angesteuert werden können. Jeder der Zylinder ist mit einem Kraft- und einem Wegmesssystem ausgestattet. Dadurch ist es möglich innerhalb eines Hubweges von 120 mm jede beliebige Geometrie und ein breites Spektrum an Kraft-Weg-Charakteristiken zu simulieren.

Die Zylinder sind in einer Verstellmechanik montiert, die es erlaubt den Forschungsstuhl auf verschiedene Längen- und Breitenmaße von Sitzen anzupassen. Für die Simulation der Seitenwangen werden jeweils die beiden äußeren Stößelreihen der Sitz- und Lehnenfläche verwendet. Diese sind mit zusätzlichen Verstellmöglichkeiten ausgestattet, um die Neigung der Seitenwangen zu reproduzieren.



Abbildung 3: Forschungsstuhl zur Vermessung und Simulation von Sitzen

6.1.2 Sitzvermessung

Bei der Sitzvermessung wird mit dem Forschungsstuhl ein definiertes Kraftprofil, das den Mittelwert der Kraftverteilung aus einem Versuchspersonenkollektiv darstellt, auf die Lehnen- bzw. Sitzfläche eines zu vermessenden Sitzes schrittweise aufgebracht. Es wird dieses definierte Kraftprofil verwendet, um zu gewährleisten, dass die Federkennlinien für den Anwendungsfall „sitzender Mensch“ ermittelt werden kann. Dies ist notwendig, da der Forschungsstuhl nur Verformungen senkrecht zur Sitzoberfläche simulieren kann. Querkräfte können nicht simuliert werden. Somit muss der Einfluss der Querkräfte indirekt durch die Verwendung des definierten Kraftprofils berücksichtigt werden.

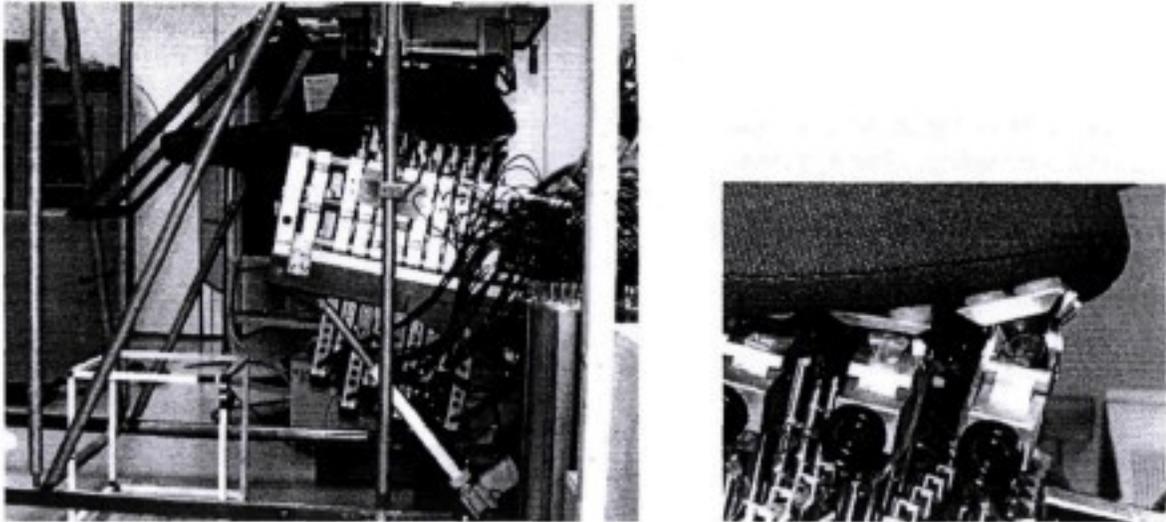


Abbildung 4: Vermessung der Sitzfläche der Sitze mit dem Forschungsstuhl

6.1.3 Sitzsimulation

Auf Basis der aus der Sitzvermessung gewonnenen Daten lässt sich ein vermessener Sitz auf dem Forschungsstuhl wiederum physisch simulieren. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit die Vermessungsdaten zu modifizieren oder gänzlich synthetisch zu generieren, um so mit neuen Sitzkonzepten experimentieren zu können.

6.2 Druckmessmatten

6.2.1 Novel-Druckmesssystem

Für die Messung auf Realsitzen wird am Lehrstuhl für Ergonomie eine Druckmessmatte der Firma Novel verwendet. Die Messmatte verfügt auf einem Messfeld von 400x400 mm über 16x16 quadratische kapazitive Drucksensoren. Für die Messung wird die Matte auf die Sitz- bzw. Lehnenfläche positioniert (Abbildung 5) und danach die Versuchsperson darauf gesetzt. Bei der Lehnenfläche wird die Messmatte ggf. zweimal angelegt, da häufig die Kontaktfläche der Versuchsperson mit der Lehne größer ist als das Messfeld der Druckmessmatte. Die Druckdaten werden von der Messsoftware zunächst als Binärdateien ausgegeben, die mit einer Konvertierungssoftware für die weitere Bearbeitung in eine ASCII-Datei überführt werden.

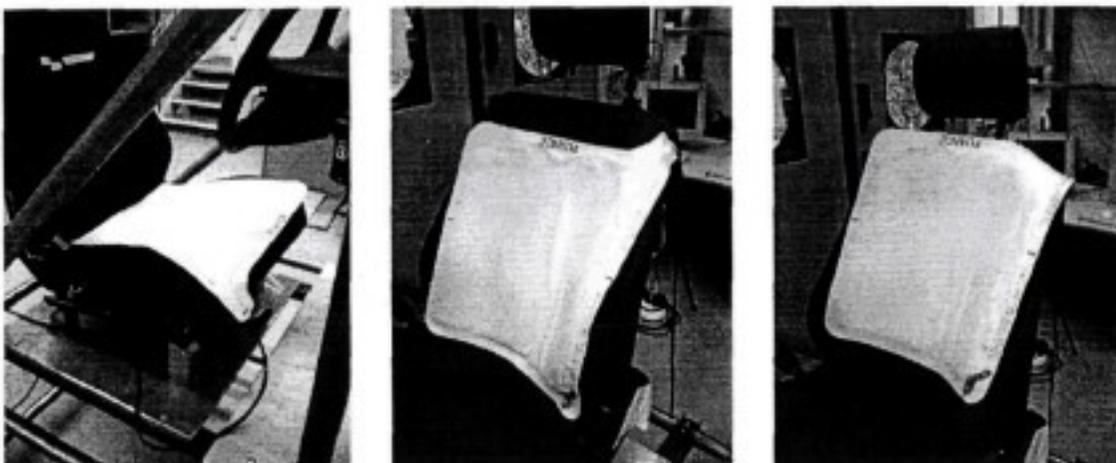


Abbildung 5: Anwendung der Druckmessmatte der Firma Novel

6.2.2 FSA-Druckmesssystem

Weiterhin wird für Versuche auf Realsitzen ein Messmattensystem der Firma FSA eingesetzt, welches resistive Drucksensoren verwendet. Das Messmattensystem besteht aus jeweils einer Messmatte für die Sitzfläche und die Lehnenfläche. Die Messmatte für die Sitzfläche verfügt über ein Messfeld von 400x400 mm, aufgeteilt in 16x16 Sensoren. Die Abmessungen des Messfeldes für die Lehnenfläche betragen 960x510 mm mit ebenfalls 16x16 Messstellen. Im Gegensatz zur Novel-Druckmessmatte kann mit dem FSA-Druckmesssystem die gesamte Druckverteilung (Sitzfläche und gesamte Lehne) auf einem Sitz mit einer Messung erfasst werden. Die Messsoftware speichert die Messwerte als Binärdateien. Der Datentransfer erfolgt aus der Messanwendung über die Zwischenablage von Windows in andere Anwendungen (z.B. Excel).

6.3 Sitzalterungsmaschine

Für die Alterung der zur Verfügung gestellten und unbenutzten Fahrzeugsitze wurde am Lehrstuhl für Ergonomie eine Sitzalterungsmaschine entwickelt. Während der Alterung wurde unter definiertem Klima eine modifizierte H-Punkt-Messmaschine mit einem Pneumatikzylinder periodisch in die Sitzfläche und Rückenlehne gedrückt. Die Last variierte dabei zwischen etwa 630 und 770 N. Die Alterung wurde in 96 Belastungszyklen mit einer Dauer von 15 Minuten unterteilt. Zwischen den Belastungszyklen erfolgte eine einminütige Pause. Innerhalb von 26 Stunden wurden so ca. 130.000 Lastwechsel durchgeführt.

In Abbildung 6 ist die Sitzalterungsmaschine mit ihren Einzelkomponenten dargestellt.

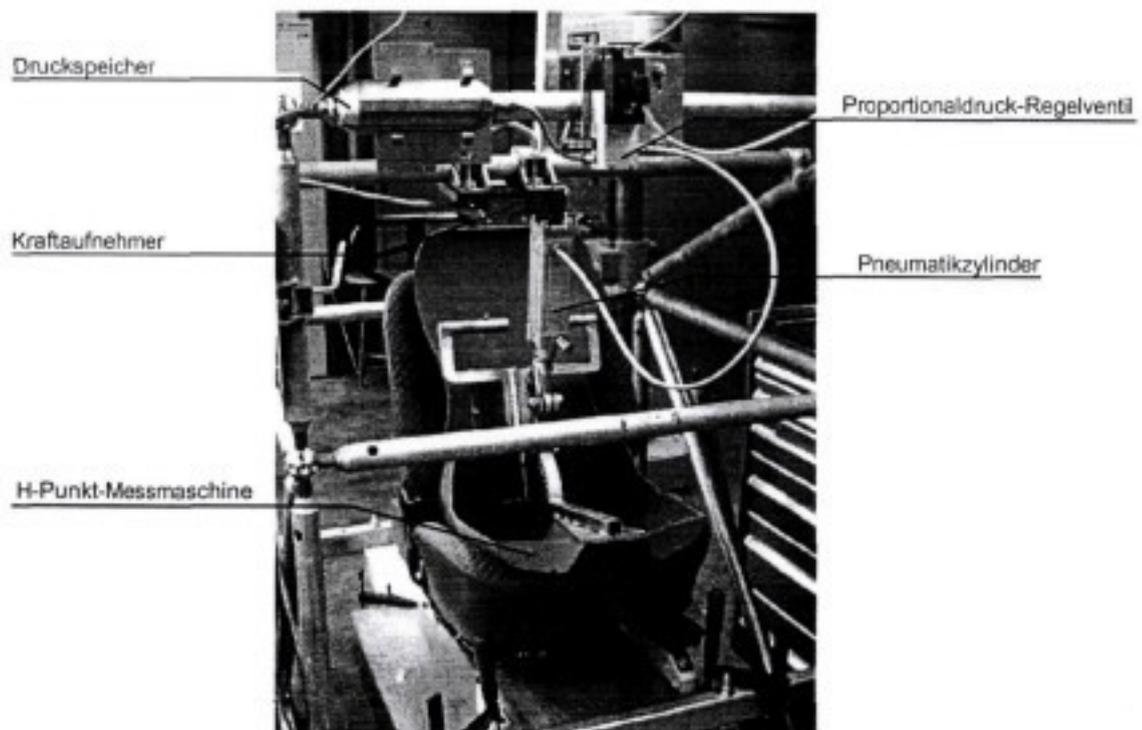


Abbildung 6: Sitzalterungsmaschine

6.4 Mockups

6.4.1 AUDI-Mockup

Das AUDI-Mockup erlaubt es in einem großen Bereich die für ein Fahrzeug relevanten Packagemaße einzustellen. Es verfügt über ein Lenkrad und positionierbare Pedale, über die eine einfache Fahrsimulation angesteuert werden kann. Eine Adapterplatte erlaubt es Sitze von verschiedenen Fahrzeugen zu montieren. Mit dem AUDI-Mockup können somit unterschiedlichste Fahrzeuge bzgl. Ihrer Fahrerplatzauslegung simuliert werden.

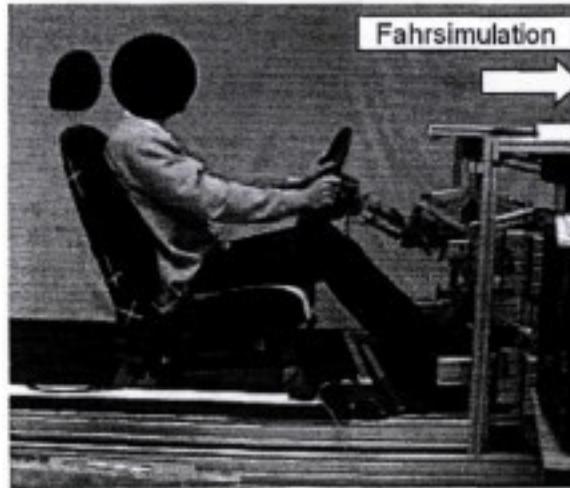


Abbildung 7: AUDI-Mockup mit Versuchsperson

6.4.2 Forschungsstuhlmockup

Das Forschungsstuhlmockup erlaubt es die relevanten Packagemaße der in diesem Projekt bearbeiteten Fahrzeuge zu reproduzieren. Dazu verfügt es über ein Lenkrad, ein positionierbares feststehendes Gaspedal und eine positionierbare feststehende Fußstütze.

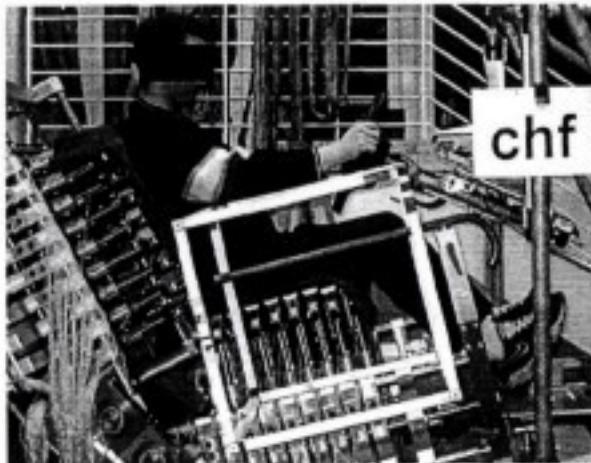


Abbildung 8: Forschungsstuhl-Mockup mit Versuchsperson

6.4.3 Fahrzeugspezifische Mockups

Durch die hohe Anzahl der Versuche in der Hauptversuchsphase war es nicht möglich das AUDI-Mockup als variables Mockup einzusetzen, da für das Einstellen der Packagemaße ein hoher Zeitaufwand notwendig ist. Deshalb wurden am Lehrstuhl für Ergonomie für die Hauptphase fünf Einzelmockups gebaut, die in den Packagemaßen den im Projekt verwendeten Fahrzeugen entsprechen. Die Mockups wurden mit den Originalteilen (Fahrsitz, Lenkrad und Pedalerie) der simulierten Fahrzeuge ausgestattet. Lediglich die Fußstützen für den linken Fuß wurden nach Vorgaben der Automobilhersteller aus Holz angefertigt. Als Beispiel ist in Abbildung 9 das Realsitzmockup für die Mercedes E-Klasse mit Versuchsperson dargestellt.

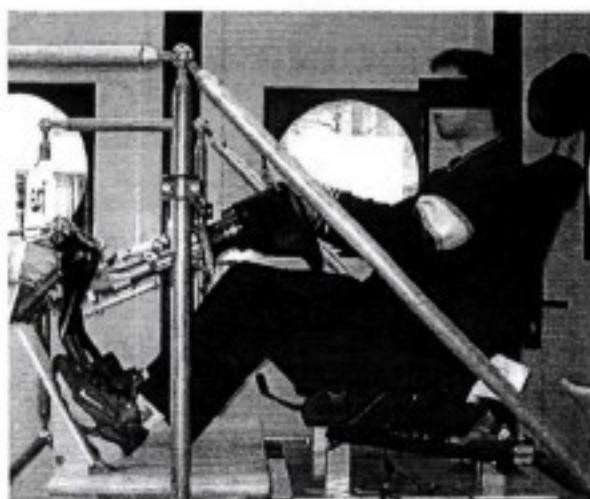


Abbildung 9: Realsitzmockup mit Versuchsperson

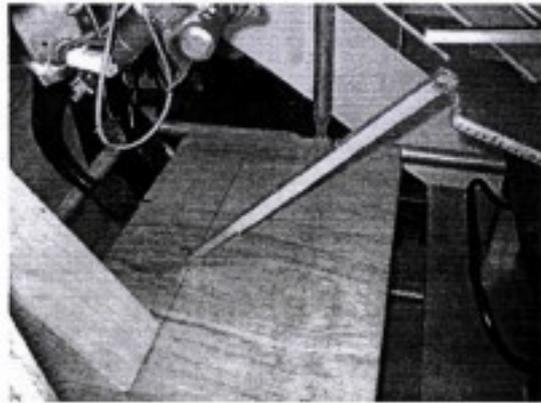
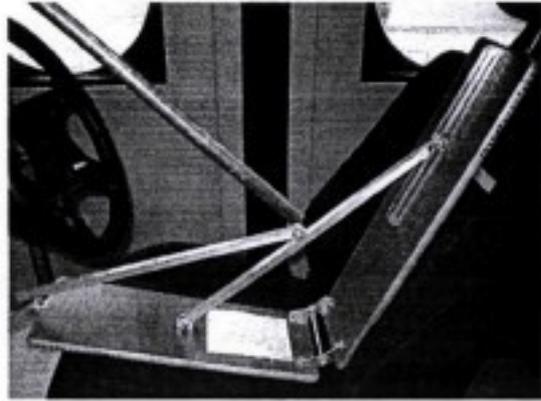
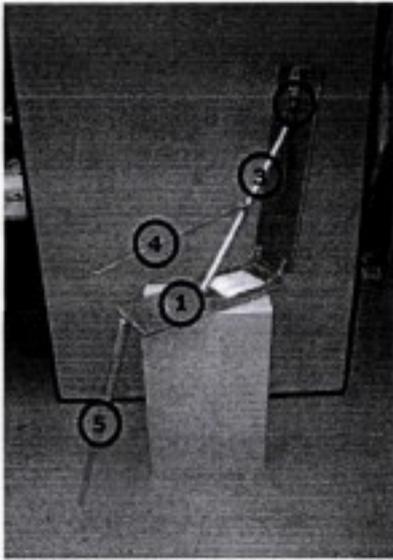
6.5 Kameras

Im Laufe des Projektes wurden verschiedene Kamerasysteme zur Dokumentation der Versuche verwendet. Der Wechsel zwischen den Kamerasystemen erfolgte, da jeder Wechsel eine Verbesserung in Bildqualität und Auflösung zur Folge hatte. Folgende Kamerasysteme wurden verwendet:

- Pulnix S/W Kameras mit Capture-Karte,
- Sony HI-8 Videokameras, Auszug einzelner Bilder über Digitalisierung mit PC,
- Sony Mavica D73, Digitalkamera,
- Olympus C-100, Digitalkamera.

6.6 Messschablone zur Übertragung von Sitzeinstellungen

Im Rahmen der Arbeit ergab sich die Problematik, wie die Fahrersitzeinstellungen an den Realsitzen auf den Forschungsstuhl übertragen werden können. Um diese Aufgabe durchzuführen, wurde eine Messschablone konstruiert, mit der alle für das Mockup relevanten Maße auf den Forschungsstuhl übertragen werden können, unabhängig von den verschiedenen Sitzkinematiken. Die verwendete Schablone ist in Abbildung 10 dargestellt.



- 1: Kontaktplatte Sitzfläche
- 2: Kontaktplatte Lehnenfläche
- 3: Bestimmung Öffnungswinkel zwischen Sitzfläche und Lehne
- 4: Bestimmung der Lenkradposition
- 5: Bestimmung der Hackenposition

Abbildung 10: Schablone zur Übertragung von Sitzeinstellungen

7 Vorversuchsphase

7.1 Sitzalterung

Für das Projekt wurden unbenutzte Fahrzeugsitze von den Automobilherstellern aus der laufenden Fertigung zur Verfügung gestellt. Nach Erfahrungen der Automobil- und Sitzhersteller verändern Sitze in der ersten Gebrauchsphase ihre Polstereigenschaften. Deshalb wurden die Sitze einem Alterungsprozess mit der im Abschnitt 6.3 beschriebenen Sitzalterungsmaschine unterzogen.

7.2 Sitzvermessung

7.2.1 Durchführung der Sitzvermessung

Teil des Projektes war es, die Realsitze auf dem Forschungsstuhl zu simulieren und zu modifizieren. Um dies durchführen zu können ist es notwendig zuerst die bereitgestellten Sitze mit dem Forschungsstuhl zu vermessen. Diese Vermessung wurde zweimal für jeden PKW-Sitz durchgeführt: vor und nach der Sitzalterung. Um die Genauigkeit der Vermessung zu erhöhen, wurde jede Fläche der Sitze fünf Mal vermessen. (siehe auch Abschnitt 6.1.2)

7.2.2 Ergebnisse der Sitzvermessung

Bei den Vermessungen zeigte sich, dass sich die Sitzeigenschaften durch die Alterung in einem hohen Maße veränderten. Hierbei zeigten die beiden Schaumstühle (Opel Corsa, Ford Focus) eine stärkere Veränderung in den Federeigenschaften als der E-Klasse-Sitz.

7.3 Sitzversuche

Mit Hilfe der Sitzversuche in der Vorversuchsphase sollte geprüft werden, ob das gewählte Versuchskonzept für die Untersuchung des Einflusses der Druckverteilung auf den Diskomfort geeignet ist.

In der Vorversuchsphase wurde die verwendete Sitzauswahl auf die PKW-Sitze (Opel Corsa, Mercedes E-Klasse, Ford Focus) begrenzt.

Die Vorversuche wurden mit einer begrenzten Versuchspersonenanzahl von 6 männlichen Probanden durchgeführt. Die Auswahl der Probanden erfolgte möglichst nahe dem 50. Perzentil bzgl. der Körperhöhe (178-182 cm) und dem Körpergewicht (72-76 kg), um den Einfluss durch unterschiedliche Anthropometrien zu minimieren. Weiterhin wurde das geforderte Alter für die Probanden auf einen Bereich von 18-29 Jahre festgelegt.

7.3.1 Versuchsdesign

Die Sitzversuche in der Vorversuchsphase untergliederten sich in zwei Versuchstypen. Es wurden einerseits Langzeitversuche auf den Realsitzen, andererseits Kurzzeitversuche auf dem Forschungsstuhl durchgeführt.

Langzeitversuche

Die Langzeitversuche wurden auf den Realsitzen durchgeführt. Für die Langzeitversuche wurde das in Abschnitt 6.4.1 beschriebene AUDI-Mockup verwendet. Das Mockup wurde

je nach zu simulierendem Fahrzeug mit dem entsprechenden Sitz und den entsprechenden Packagemäßen ausgestattet. Vor dem Mockup wurde für die Versuchsperson eine einfache Fahrsimulation eingespielt, die über Lenkrad, Gaspedal und Bremse des Mockups gesteuert werden konnte.

Die Versuchsperson wurde angewiesen, sich in das Mockup zu setzen und sich den Sitz entsprechend ihren Wünschen einzustellen. Die Versuchsperson wurde dann angewiesen die Fahrsimulation zu steuern. Innerhalb der ersten 5 Minuten wurde es der Versuchsperson erlaubt den Sitz nochmals zu verstellen. Diese Vorgehensweise wurde im Gegensatz zu einer voreingestellten Sitzkonfiguration gewählt, um der Versuchsperson nicht schon im Vorfeld der Untersuchung das Gefühl zu geben, zu einer bestimmten Sitzeinstellung gezwungen zu werden. Dies kann eine beeinflussende Wirkung auf die subjektiven Bewertungen der Versuchsperson ausüben.

Nach 15 Minuten und im Weiteren alle 30 Minuten erfolgte die Befragung der Versuchsperson mit den in Kapitel 7.3.2 dargestellten Fragebögen. Vor jeder Befragung wurden mit Kameras Aufnahmen von der Haltung der Versuchsperson gemacht.

Nach der letzten Messung wurden mit Hilfe der in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Druckmessmatte die Druckverteilungen zwischen Versuchsperson und Sitz erfasst. Für die Druckmessungen wurde die Versuchsperson gebeten kurz aufzustehen, um die Druckmessmatte zu positionieren.

Für die Bestimmung der Test-Retest-Reliabilität wurden für die ersten 3 Versuchspersonen die Langzeitversuche einmal wiederholt.

Kurzzeitversuche

Für die Kurzzeitversuche wurden die mit dem Forschungsstuhl (vgl. Abschnitt 6.1) vermessenen Sitze auf diesem simuliert. Es ist anzunehmen, dass die zur Verfügung gestellten Fahrzeugsitze auf Basis langjähriger Erfahrung der Automobil- und Sitzhersteller entwickelt wurden, und deshalb bereits nahe an einem Komfort-Optimum liegen. Da zudem subjektive Aussagen von Versuchspersonen stark streuen können, kann es sich als schwierig erweisen, den zu untersuchenden Zusammenhang mit ausreichender Güte nachzuweisen. Zur Erweiterung des Spektrums der simulierten Sitze wurden deshalb die vermessenen Federkennlinien modifiziert. Zusätzlich zu den vermessenen Sitzen wurden zwei weitere generiert. Für die erste Variation wurden die Kraft-Wegverläufe für die einzelnen Stöße des Forschungsstuhles so modifiziert, dass sich bei gleicher Kraft nur 50% des Weges ergeben. Bei der zweiten Variation ergeben sich bei gleicher Kraft 200% des Weges im Vergleich zum Kraft-Wegverlauf des vermessenen Sitzes.

Für die Vorversuche am Forschungsstuhl wurde das in Abschnitt 6.4.2 beschriebene Forschungsstuhlmockup verwendet, um das Package der Fahrzeuge zu simulieren. Die Übertragung der Sitzeinstellung erfolgte hierbei durch die in Abschnitt 6.5 beschriebene Schablone. Die so reproduzierten Restriktionen für Hände (Lenkrad) und Füße (Pedale) gewährleisteten eine möglichst gute Reproduzierbarkeit der eingenommenen Haltung auf dem Sitz.

Für die Sitzversuche wurde die Versuchsperson angewiesen im Forschungsstuhl Platz zu nehmen und sich bis zum Versuchsende möglichst nicht mehr zu bewegen. Nach notwendigen technischen Einstellungen am Forschungsstuhl erfolgt nach ca. 10 Minuten die Messung der Druckverteilung über das in den Forschungsstuhl integrierte Druckmesssystem. Weiterhin erfolgt eine Aufnahme der Versuchssituation über Kameras. Im Anschluss daran wurde eine Befragung mit den in Abschnitt 7.3.2 vorgestellten Fragebögen durchgeführt.

7.3.2 Fragebögen

Die Fragebögen für die Vorversuchsphase wurden analog zu den Fragebögen für die Schwingungsbewertung im Teilprojekt „Dynamischer Sitzkomfort“, das am Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) in Braunschweig bearbeitet wurde, erstellt. Diese Vorgehensweise wurde zunächst gewählt, da das IfF bereits gute Erfahrung mit diesen Fragebögen bzgl. der Schwingungsbewertung gemacht hat. Weiterhin schien es im Hinblick auf eine Zusammenführung der Ergebnisse für den statischen und dynamischen Sitzkomfort sinnvoll, ähnliche Fragebögen zu verwenden.

Druck ist kaum spürbar stark spürbar

Nr.	Körperregion	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	
1	Schulter links				X																
2	Schulter rechts			X																	
3	Brustkorb seitlich links							X													
...																					

Druck ist kaum unangenehm sehr unangenehm

Nr.	Körperregion	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	
1	Schulter links				X																
2	Schulter rechts				X																
3	Brustkorb seitlich links									X											
...																					

Abbildung 11: Ausschnitte aus den Fragebögen

Für die Befragung der Versuchspersonen bzgl. der Spürbarkeit des Druckes und dem Diskomfort wurden Fragebögen wie sie in Abbildung 11 beispielhaft dargestellt sind verwendet. Die Bewertung erfolgte für einzelne definierte Körperbereiche. Um den Versuchspersonen die Lokalisierung der Körperbereiche zu erleichtern, wurde eine Bodymap (Abbildung 12) entwickelt.

Bei der Spürbarkeitsbewertung sollten die Probanden möglichst neutral die Höhe des empfundenen Druckes angeben. Bei der Diskomfortbewertung sollten die Versuchspersonen angeben wie unangenehm sie den Druck empfinden. Grundüberlegung hierbei war, dass Druck nicht zwangsweise als unangenehm empfunden wird, sondern ein gewisser Druck in bestimmten Körperbereichen auch erwünscht sein kann. Als Beispiel wäre hierzu der sportlich geprägte Autofahrer zu nennen, der sich eine gute Seitenführung durch den Sitz wünscht. Die Empfindung einer guten Seitenführung ist automatisch mit einem höheren Druck in Bereichen der Seitenwangen verbunden.

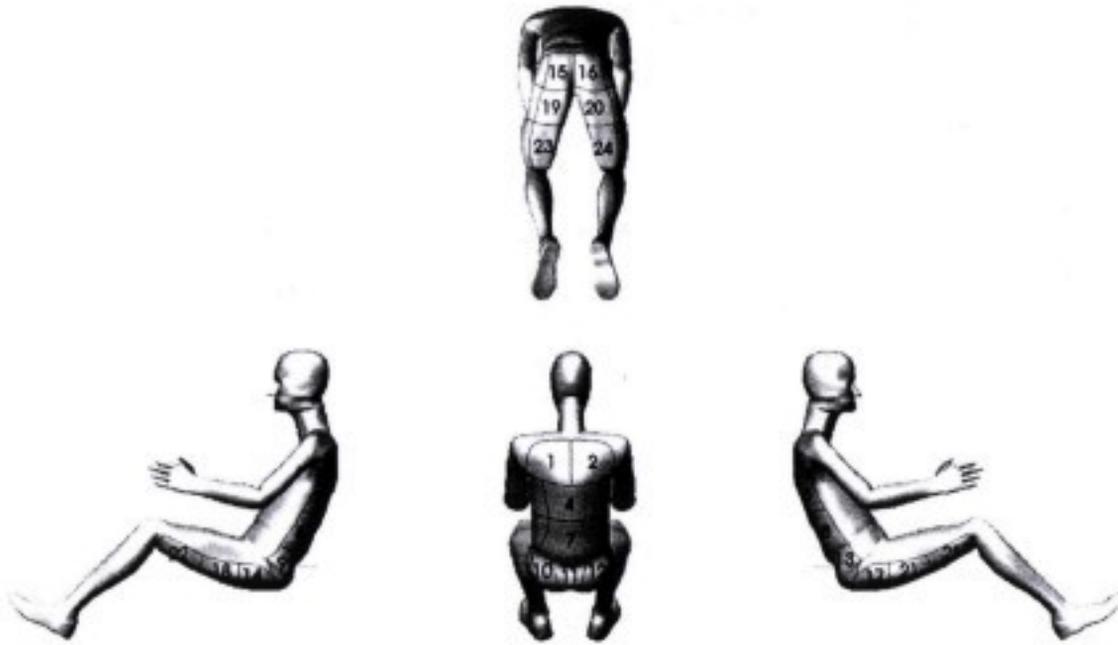


Abbildung 12: Bei den Versuchen verwendete „Bodymap“

7.3.3 Versuchsdurchführung

Die Vorversuche wurden in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Ergonomie von Oktober 2000 bis Februar 2001 durchgeführt.

Die Langzeitversuche für verschiedene Sitze wurden auf Grund der langen Versuchsdauer an verschiedenen Tagen durchgeführt. Die Abstände zwischen den Versuchstagen wurden durch die Verfügbarkeit der Versuchspersonen bestimmt. Die Kurzzeitversuche für jedes Fahrzeug wurden ebenfalls an verschiedenen Versuchstagen durchgeführt.

Nachfolgend einige Beobachtungen, die bei den Langzeit- und Kurzzeitversuchen gemacht wurden.

Einige Versuchspersonen äußerten bei den Langzeitversuchen den Wunsch, den Sitz nach längerer Versuchsdauer nochmals verstellen zu dürfen. Dies wurde verwehrt, um über die Versuchsdauer die Haltung möglichst konstant zu halten. Die Versuchspersonen äußerten sich auch dahingehend, dass die lange Fahraufgabe auf sie ermüdend wirke.

Nach anfänglicher Skepsis gegenüber dem Forschungsstuhl, ausgelöst durch die Schwere des technischen Aufbaus, zeigten sich die Versuchspersonen doch angenehm überrascht über die Qualität der Sitz-Simulation.

7.3.4 Auswertung und Ergebnisse

Die im Folgenden gemachten Ausführungen sind immer vor dem Hintergrund einer Voruntersuchung mit stark eingeschränkter Versuchspersonenzahl zu sehen. Durch die geringe Probandenzahl können die durchgeführten Auswertungen nur Tendenzen aufzeigen.

Subjektive Wertungen der Versuchspersonen

Reliabilität der Messmethodik

Um die Test-Retest-Reliabilität der Messmethode zu überprüfen, wurden die subjektiven Wertungen aus neun Versuchen auf den Realsitzen mit den jeweiligen Wiederholungsversuchen verglichen. Es ergab sich dabei eine Korrelation zwischen den Wertungen für die Spürbarkeit von 0,7 ($p < 0,001$) und für das Diskomfortempfinden von 0,785 ($p < 0,01$). Diese Korrelationen sprechen für eine gute Test-Retest-Reliabilität der verwendeten Messmethodik. Dies ist umso höher zu bewerten, da zwischen Versuch und Wiederholungsversuch eine Zeitspanne von mindestens einem Tag lag und somit Erinnerungseffekte weitestgehend auszuschließen sind.

Zeitabhängigkeit

Es wurde untersucht, ob eine Zeitabhängigkeit bei den subjektiven Wertungen vorliegt. Einen ersten Hinweis auf eine Zeitabhängigkeit lieferte der optische Vergleich der Antwortenverteilungen. Hierbei war mit zunehmender Zeit eine Verschiebung zu höheren Wertungen festzustellen.

Ein Vergleich der Mittelwerte mit Hilfe eines einseitigen T-Tests ergab, dass insgesamt die Bewertungen sowohl für die Spürbarkeit, als auch für den Diskomfort nach 135 Minuten signifikant ($p < 0,01$) höher liegen als nach 15 Minuten.

Zusammenhang zwischen Spürbarkeit und Diskomfort

Die Betrachtung der Antwortenverteilungen führt zu der Annahme, dass die subjektiven Urteile für die beiden Faktoren Spürbarkeit und Diskomfort äquivalent sind. Die Überprüfung des Zusammenhangs zwischen beiden Faktoren mittels einer Korrelationsanalyse über alle Spürbarkeits- und Diskomfortwertungen ergab einen Korrelationskoeffizienten von 0,92 ($p < 0,01$). Somit besteht zwischen den beiden Urteilen ein hochsignifikanter, annähernd funktionaler Zusammenhang, welcher es erlaubt die Spürbarkeit aus dem Diskomfort bzw. umgekehrt mit hoher Wahrscheinlichkeit vorherzusagen. Somit wäre es im Rahmen weiterer Versuche ausreichend, nur nach einer dieser Variablen zu fragen. Dies bedeutet für die Versuchspersonen eine erhebliche Entlastung bei der Abgabe der subjektiven Wertungen, sowie eine Reduktion der Bearbeitungszeit zugunsten der Fahraufgabe während der Versuchsdurchführung.

Vergleich zwischen Realsitz und simuliertem Sitz

Die Ähnlichkeit der Antwortenverteilungen lassen hier die Vermutung zu, dass Realsitz und simulierter Sitz gleich bewertet werden. Die Korrelationen zwischen den Wertungen für die Realsitze nach 15 Minuten und den Wertungen für die simulierten Sitze betragen für den Faktor Spürbarkeit 0,77 ($p < 0,01$) und für den Faktor Diskomfort 0,77 ($p < 0,01$), was nur geringfügig unter der Test-Retest-Reliabilität von 0,785 ($p < 0,01$) liegt. Somit darf davon ausgegangen werden, dass die Bewertungen auf dem Realsitz und dem Forschungsstuhl als äquivalent angesehen werden können.

Unterschied zwischen den Sitzen

Um einen ausreichenden Zusammenhang zwischen Druckverteilung und Diskomfort zu finden, ist es notwendig eine möglichst große Variationsbreite bzgl. der Sitze abzudecken. Einen Hinweis auf die Unterschiedlichkeit der Sitze liefert die Betrachtung

der Verteilung der mittleren Diskomfortwerte für die einzelnen Körperteile (Körperteile sind wie in Abbildung 12, Seite 29 nummeriert).

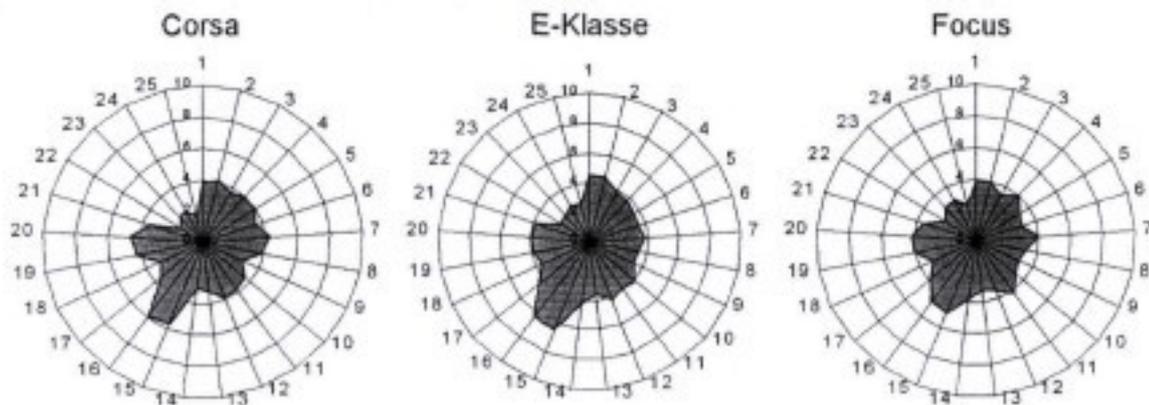


Abbildung 13: Mittlere Diskomfortwerte nach 135 Minuten für die einzelnen Körperteile (1-25)

An den unterschiedlichen Profilen in den Diagrammen ist erkennbar, dass Unterschiede bzgl. der Mittelwerte der Bewertungen der Sitze vorlagen. Allerdings wurde diese Aussage keiner statistischen Überprüfung unterzogen.

Auswertung der Druckverteilungen

Die Aufbereitung der auf den Realsitzen gemessenen Druckverteilungen für die Auswertung erwies sich als äußerst schwierig. Die Druckverteilungen der novel-Druckmessmatte weisen eine Vielzahl von Messartefakten auf, die v.a. bei den Schaumsitzen (Ford Focus, Opel Corsa) durch Knickung der kapazitiven Messmatte entstehen. Erschwerend kommt hinzu, dass durch die unterschiedlichen Haltungen der Versuchspersonen auf den verschiedenen Sitzen die Position des Druckbildes variiert.

Diese beiden Faktoren machten es notwendig, eine äußerst aufwändige Aufbereitung der Daten von Hand durchzuführen. Dabei wurde das Druckbild manuell entsprechend der definierten Körperbereiche aufgeteilt (siehe Abbildung 14). Die Größe der Körperbereiche wurde entsprechend den Körpermaßen der Versuchspersonen angepasst. Offensichtliche Messartefakte wurden ausgeklammert.

Bei der Aufbereitung der Druckverteilungen, die durch den Forschungsstuhl ermittelt wurden, erfolgte eine analoge Vorgehensweise, wobei hier jedoch nur sehr wenige offensichtliche Messartefakte auftraten.

Da die Auswertung der Vorphase engen zeitlichen Begrenzungen unterlag, war die Vorgehensweise bei der Aufteilung in Körperbereiche noch vergleichsweise rudimentär. In der Hauptphase erfolgte eine exaktere, aber auch zeitaufwändigere Zuordnung der Druckwerte zu den einzelnen Körperbereichen.

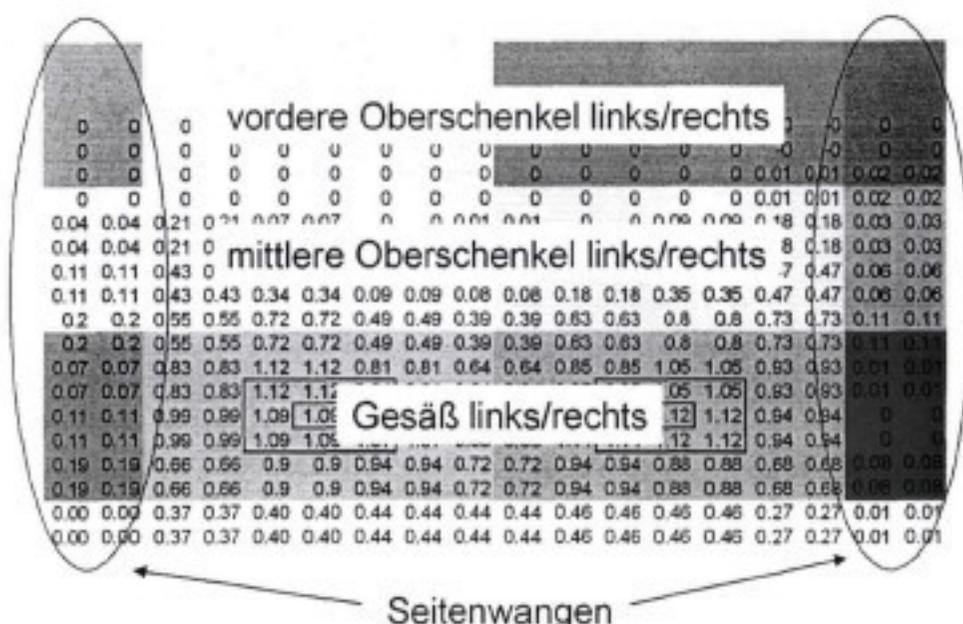


Abbildung 14: Beispiel für die Aufteilung der Druckverteilungen in Körperbereiche (hier: Sitzfläche, Messung auf simuliertem Sitz)

Zusammenhang zwischen Druckverteilung und subjektiven Wertungen

Zur Untersuchung des Zusammenhanges zwischen subjektiven Wertungen und den korrespondierenden Druckverteilungen wurde eine Vielzahl von Korrelationsanalysen durchgeführt. Es erfolgt im Weiteren eine zusammengefasste Darstellung der wichtigsten Ergebnisse.

Normierung der subjektiven Wertungen

Die Normierung von subjektiven Aussagen ist eine gängige Methode, um die Varianz durch unterschiedliche innere Bewertungsskalen zu minimieren.

Die im Rahmen der Auswertung durchgeführten Analysen zeigten, dass sich die Normierung für die vorliegenden Daten als nicht zielführend erweist. Der Grund hierfür ist darin zu sehen, dass prinzipiell nur Wertungen normiert werden dürfen, die den gleichen Reiz bewerten. Da die Druckverteilungen aber für verschiedene Versuchspersonen auf den gleichen Sitzen teilweise stark differieren, ist eine Normierung hier nicht zulässig.

Genereller Zusammenhang

Zunächst war zu überprüfen, ob ein genereller Zusammenhang zwischen Spürbarkeit bzw. Diskomfort und dem gemessenen Druck existiert. Hierzu wurden alle erfassten Spürbarkeitswertungen bzw. Diskomfortwertungen mit den gemessenen mittleren und maximalen Drücken korreliert. Für die Korrelationen ergaben sich die in Tabelle 1 und Tabelle 2 für bestimmte Zeitpunkte beispielhaft dargestellten Werte.

Tabelle 1: Korrelationen: Subjektive Wertungen – Druck Realsitz

	mittlerer Druck	maximaler Druck
Spürbarkeit (15 min)	0,25 (p<0,01)	0,31 (p<0,01)
Diskomfort (135 min)	0,31 (p<0,01)	0,36 (p<0,01)

Tabelle 2: Korrelationen: Subjektive Wertungen – Druck Forschungsstuhl

	mittlerer Druck	maximaler Druck
Spürbarkeit	0,24 ($p < 0,01$)	0,23 ($p < 0,01$)
Diskomfort	0,23 ($p < 0,01$)	0,23 ($p < 0,01$)

Es existieren somit zwar statistisch signifikante, aber schwache Zusammenhänge zwischen den subjektiven Wertungen und den am Körper des Menschen gemessenen Druckwerten.

Zusammenhang auf Versuchspersonenebene

Da der Zusammenhang zwischen den Druckwerten und den subjektiven Wertungen durch die unterschiedlichen inneren Bewertungsskalen der Versuchspersonen geschwächt werden kann, wurde eine Korrelationsanalyse für die Messwerte jeder einzelnen Versuchsperson durchgeführt. Bei der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen subjektiven Wertungen einzelner Versuchspersonen und den Druckwerten zeigten sich tatsächlich höhere Korrelationen als beim generellen Zusammenhang. Die Korrelationen liegen überwiegend in einer Größenordnung zwischen 0,3 und 0,7 und sind statistisch signifikant.

Bei den Maximaldrücken zeigte sich eine Tendenz zu höheren Korrelationen als bei den mittleren Drücken. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass in Bezug auf die subjektiven Empfindungen den Maximaldrücken eine größere Bedeutung beizumessen ist, als den mittleren Druckwerten.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Vorversuchsphase

Die in der Vorversuchsphase durchgeführten Analysen zeigten, dass...

- ein statistisch nachweisbarer Zusammenhang zwischen Druck und den subjektiven Wertungen besteht;
- der generelle Zusammenhang zwischen Druck und den subjektiven Wertungen über alle Versuchspersonen aufgrund unterschiedlicher Bewertungsskalen der Versuchspersonen kleiner ist, als innerhalb einer Versuchsperson;
- die subjektiven Wertungen von Spürbarkeit und Diskomfort als äquivalent anzusehen sind;
- Diskomfort eine Zeitabhängigkeit aufweist;
- Unterschiede im Diskomfort in verschiedenen Körperteilen vorliegen (statistisch nicht überprüft);
- Unterschiede im Diskomfort auf verschiedenen Sitzen vorliegen (statistisch nicht überprüft).

Die gewonnenen Erkenntnisse ließen den Schluss zu, dass die eingesetzte Versuchsmethodik geeignet ist, um den Zusammenhang zwischen Diskomfort und Druckverteilungen zu untersuchen.

8 Konzeptentwicklung für die Hauptversuchsphase

8.1 Diskussion der Ergebnisse der Vorversuchsphase

Die im Rahmen der Voruntersuchungen gewonnenen Ergebnisse stellten die Diskussionsgrundlage für die weitere Ausarbeitung der Vorgehensweise in der Hauptphase dar.

Hauptdiskussionspunkt war das Ergebnis aus der Vorversuchsphase, dass die Spürbarkeits- und die Diskomfortwertungen annähernd gleiche Ergebnisse lieferten. Nach Erfahrung von Automobil- und Sitzherstellern im Arbeitskreis ist dieser eindeutige Zusammenhang so nicht gegeben. Eine nachgeschaltete Befragung eines Teils der Versuchspersonen erhärtete den Verdacht, dass das Konzept von Spürbarkeit und Diskomfort in der Vorversuchsphase nicht richtig verstanden worden ist und von den Versuchspersonen als äquivalent angesehen wurde. Für die Vorversuchsphase wurde auf die vom Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der TU-Braunschweig verwendeten Fragebögen zurückgegriffen, da diese für den Zusammenhang von Diskomfort und Schwingungen bisher gute Ergebnisse geliefert hatten. Für ein gemeinsames Regressionsmodell, das eine Prognose des Diskomforts aus den gemessenen Druckwerten (statischer Sitzkomfort) und Beschleunigungswerten (dynamischer Sitzkomfort) erlaubt, schien es zu Beginn des Projektes sinnvoll, die Fragebögen für die Befragung zum statischen Sitzkomfort analog aufzubauen. Angeregt durch die Bedenken der Arbeitskreismitglieder wurde für die Hauptphase mit Unterstützung eines Psychologen ein neuer Fragebogen zu entwickeln, der besser auf die Problematik des statischen Sitzkomforts abgestimmt ist.

8.2 Entwicklung der Fragebögen

8.2.1 Anleitung für Versuchspersonen

Wichtigster Bestandteil der neuen Fragebögen war die Anleitung für die Versuchspersonen bzgl. der Unterscheidung zwischen Diskomfort- und Druckempfindung. In dieser Anleitung wird den Versuchspersonen allgemein und anhand von Beispielen erklärt, was Druck bzw. Diskomfort bedeuten.

8.2.2 Modifizierte Bodymap

Basierend auf den Diskussionen im Arbeitskreis wurde die in der Vorversuchsphase verwendete Bodymap modifiziert. Das Ergebnis dieser Modifikationen ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Anzahl der Körperteile wurde von 25 auf 17 reduziert. Die Reduktion der Anzahl der Körperteile für die Befragung sollte zu einer Entlastung der Versuchspersonen bei der Befragung führen. Die bisher verwendeten vier Ansichten, in denen die zu bewertenden Körperteile eingezeichnet sind, wurden auf eine reduziert. Durch nur eine Ansicht sowie deren Ausrichtung fällt es der Versuchsperson leichter sich mit der Bodymap zu identifizieren („das bin ich von hinten/unten gesehen“). Zudem ist es für Versuchspersonen ohne technisch geprägtem Hintergrund schwierig, die verschiedenen Ansichten richtig zu interpretieren, da hierzu ein hoher Umcodierungsaufwand betrieben werden muss. D.h. durch die Verwendung von nur einer Ansicht fällt es leichter die Körperteile richtig zuzuordnen und die mentale Belastung für die Versuchsperson wird reduziert.

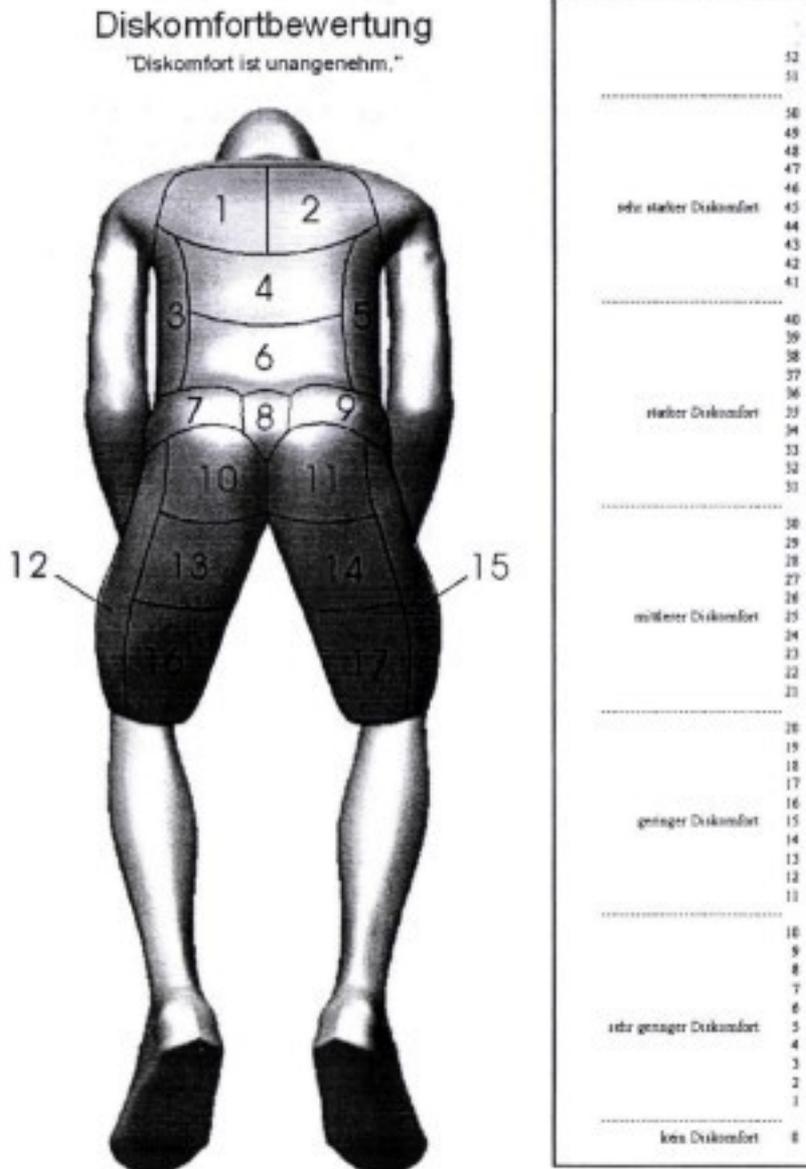


Abbildung 15: Bodymap der Hauptversuchsphase mit CP-50-Skala zur Befragung der Versuchsperson

8.2.3 Modifizierte CP-50 Skalen

Basierend auf der in der Literatur beschriebenen CP-50-Skala (Shen, 1997) wurden Skalen zur Bewertung des Diskomfort- und Druckempfindens entwickelt. Die Skalen teilen sich jeweils in 6 Kategorien, die verbal formuliert sind. Innerhalb dieser Kategorien erfolgt eine weitere Unterteilung in 10 Zahlenwerte anhand derer eine Tendenz innerhalb der Kategorie durch die Versuchsperson zum Ausdruck gebracht werden kann. Die Skala ist so zu verwenden, dass immer zuerst eine Kategorie anhand der Wordings ausgesucht wird, z.B. „mittlerer Diskomfort“ und dann eine feinere Differenzierung innerhalb der Kategorie anhand der Zahlenwerte erfolgt. Die Skala ist nach oben offen, so dass auch Wertungen oberhalb von 50, dem höchsten Zahlenwerte in der obersten Kategorie, auftreten können. In Abbildung 15 ist beispielhaft neben der Bodymap die CP-50-Skala zur Bewertung des Diskomfortempfindens dargestellt.

8.2.4 Interview der Versuchsperson zum Diskomfort, Druckempfinden, Unterstützungswunsch

Kern der neuen Fragebögen für die Hauptversuchsphase stellt das Interview dar. Der Interviewfragebogen wird nicht von der Versuchsperson selbst, sondern vom Versuchsleiter, der die Versuchsperson befragt, ausgefüllt. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, damit die Versuchsperson während des gesamten Versuches in der gleichen Haltung verbleiben kann und nicht die Arme vom Lenkrad nehmen muss. Mit Hilfe der Bodymap wird während des Interviews das Diskomfortempfinden, die Akzeptanz bzgl. des Diskomforts, der Grund für den Diskomfort, die Druckempfindung und der Unterstützungswunsch für die einzelnen Körperbereiche und insgesamt abgefragt. Die einzelnen Abschnitte des Interviews werden im Folgenden kurz erläutert.

Diskomfort

Die Versuchsperson wird nach dem Diskomfortempfinden im jeweiligen Körperteil befragt. Für die Bewertung wird der Versuchsperson eine Schautafel präsentiert, auf der die Bodymap und die modifizierte CP-50 Skala zur Diskomfortbewertung abgebildet sind.

Akzeptanz

Die Versuchsperson soll sich dahingehend äußern, ob der empfundene Diskomfort noch für sie akzeptabel ist oder nicht. Die Bewertung erfolgt in den Abstufungen „akzeptabel“, „eher akzeptabel“, „eher unakzeptabel“, „unakzeptabel“.

Grund für den Diskomfort

Wenn eine Diskomfortbewertung von größer null durch eine Versuchsperson erfolgt, soll diese angeben, was der Grund für den Diskomfort ist. Es werden der Versuchsperson dabei keine Kategorien vorgegeben, sondern sie darf sich frei äußern.

Druckempfindung

Für jedes Körperteil soll die Versuchsperson eine Wertung abgeben, wie hoch sie im Moment den Druck in den einzelnen Körperbereichen empfindet. Für die Bewertung wird der Versuchsperson die Bodymap mit der modifizierten CP-50-Skala für die Druckbewertung präsentiert.

Unterstützungswunsch

Beim Unterstützungswunsch soll die Versuchsperson darüber eine Aussage machen, ob sie in dem jeweiligen Körperteil mehr oder weniger Unterstützung durch den Sitz wünscht. Bei der Befragung wird der Versuchsperson die Bodymap präsentiert. Die Bewertung soll auf einer Skala von -3 bis +3 durchgeführt werden, wobei -3 für „weniger Unterstützung“, 0 für „in Ordnung“ und +3 für „mehr Unterstützung“ steht.

8.2.5 Fragebogen zur Erfassung persönlicher Daten und Gewohnheiten

Mit diesem Fragebogen werden grundlegende, während der Versuche weitgehende unveränderliche Merkmale bzw. Gewohnheiten der Versuchsperson erfasst. Merkmale sind z.B. Alter, Körpergewicht, Größe, Erwerb des Führerscheins, aktuelles Fahrzeug. Abgefragte Gewohnheiten sind z.B. Sitzgewohnheiten, Essgewohnheiten, Vorstellungen über einen guten Sitz.

Dieser Fragebogen wird nur einmalig beim Antritt zum ersten Versuch von der Versuchsperson ausgefüllt.

8.2.6 Fragebogen zur Beurteilung der äußeren Anmutung der Sitze

Ein möglicher Einflussparameter bei den Realsitzversuchen kann die äußere Anmutung der Sitze darstellen. Es wurden deshalb in diesem Fragebogen der Versuchsperson zum Beispiel Fragen zur äußeren Anmutung des Sitzbezuges und seiner Farbe gestellt. Die Versuchspersonen beantworteten den Fragebogen für jeden in der Versuchsreihe verwendeten Realsitz.

Diese Befragung wird nur einmalig beim Antritt zum ersten Versuch für jeden Realsitz durchgeführt.

8.2.7 Fragebogen zur Erfassung der Einflussfaktoren am Versuchstag

Dieser Fragebogen dient dazu Faktoren zu erfassen, die am Versuchstag einen Einfluss auf die Versuchsperson ausüben könnten. Dies sind z.B. die Tätigkeit vor dem Versuch, die letzte Nahrungsaufnahme oder die getragene Kleidung.

Dieser Fragebogen wird jeweils zu Beginn jedes Versuchstages von den Versuchspersonen ausgefüllt.

8.2.8 Fragebögen zur Erfassung der Einflussfaktoren beim Versuch

Mit diesem Fragebogen sollen Faktoren erfasst werden, die während des Versuches einen Einfluss auf das Urteil der Versuchsperson haben könnten. Hierzu zählen Fragen bzgl. des aktuellen Befindens der Versuchsperson wie auch Fragen dazu, wie die Umgebungsbedingungen empfunden werden.

Diese Befragung wird jeweils während eines Sitzversuches auf den Realsitzen oder dem Forschungsstuhl durchgeführt.

8.2.9 Fragebogen zur Befragung zum Versuch

In diesem Fragebogen soll die Versuchspersonen Aussagen abgeben wie sie den Versuchsablauf empfunden haben. Fragen hierbei sind z.B. wie schwierig es für die Versuchsperson war, die Bewertungen durchzuführen oder ob sie sich unsicher auf dem Forschungsstuhl gefühlt haben.

Dieser Fragebogen wird von den Versuchspersonen am Ende eines Versuchstages ausgefüllt.

8.3 Test-Retest-Reliabilität

Die oben angeführten Fragebögen wurden in mehreren Optimierungszyklen entwickelt. Nachdem die Fragebögen zum vorläufig endgültigen Stand entwickelt waren, wurde ein Versuch zur Test-Retest-Reliabilität der Fragebögen durchgeführt.

8.3.1 Versuchsanordnung

Für die Test-Retest-Reliabilitätsversuche wurde das Corsa-Mockup, welches für die Hauptversuche gebaut wurde, verwendet. Die Versuchspersonen durften sich den Fahrersitz nach ihren Vorlieben einstellen und mussten dann in Fahrerhaltung Platz nehmen. Für diese Versuche wurden zwölf Versuchspersonen (neun Männer, drei

Frauen) ausgewählt, von denen bei den Wiederholungsversuchen nach einer Woche sieben (fünf Männer, zwei Frauen) nochmals befragt werden konnten. Die in der Vorwoche gemachten Sitzeinstellungen wurden für den Wiederholungsversuch reproduziert. Zusätzlich zu den vorbereiteten Fragebögen wurden die Versuchspersonen intensiv zum Verständnis der Fragen interviewt.

8.3.2 Ergebnisse

Die Korrelation der Antworten der Versuche mit denen der Wiederholungsversuche ergab eine ausreichende Test-Retest-Reliabilität ($r=0,77$).

Durch die Anleitung zur Bewertung von Diskomfort und Druck wurde es erreicht, dass die Versuchspersonen nun zwischen Diskomfort und Druck unterscheiden konnten. Unter anderem zeigte sich dies auch in der Reduktion der Korrelation zwischen Diskomfort und Druckempfinden von $r=0,92$ in den Vorversuchen auf $r=0,33$.

Es konnte aus der zusätzlichen intensiven Befragung der Versuchspersonen ermittelt werden, dass die Fragebögen sowie die Anleitung zu Diskomfort- und Druckbewertung verständlich formuliert sind.

Nach einer geringfügigen Optimierung des Wordings sowie einer Erweiterung des Interviews um die Akzeptanz und der Befragung nach dem Grund für den Diskomfort resultierte die Endversion der oben beschriebenen Fragebögen.

9 Hauptversuchsphase

9.1 Versuchsdesign

9.1.1 Versuchspersonenkollektiv

Für die Hauptversuchsphase wurden 48 Versuchspersonen (24 männliche, 24 weibliche) rekrutiert. Die Versuchspersonen sollten so ausgesucht werden, dass Sie folgende Kriterien erfüllten:

	Männer	Frauen
Alter	18-29 Jahre	18-29 Jahre
Körperhöhe	178-182 cm	165-169 cm
Gewicht	72-76 kg	58-62

Körperhöhe und Körpergewicht wurden dabei so gewählt, dass sie einen Bereich vom 40. bis zum 60. Perzentil abdecken. Ziel war es, Versuchspersonen möglichst nahe dem 50. Perzentil bzgl. Körpergröße und Körpergewicht zu finden. Dieser enge Bereich wurde gewählt, um den Einfluss unterschiedlicher Anthropometrien zu minimieren. Umgekehrt hat dies allerdings auch zur Folge, dass ein im Rahmen des Projektes entwickeltes Modell vorerst nur für diese Bevölkerungsgruppe gültig sein kann. Um die gewünschte Anzahl an Versuchspersonen überhaupt aufbringen zu können, wurden geringe Abweichungen in den oben aufgeführten Körpermaßen in Kauf genommen.

9.1.2 Sitze

Für die Hauptversuche wurden die drei PKW-Sitze, die bereits in der Vorversuchsphase verwendet wurden, eingesetzt. Zusätzlich wurden von Mitgliedern des Arbeitskreises ein LKW-Sitz und ein Bus-Passagiersitz zur Verfügung gestellt. Diese sollten nur mit einem begrenzten Versuchspersonenkollektiv von 12 Personen untersucht werden.

Auf dem Forschungsstuhl wurden die fünf oben aufgeführten Sitze simuliert. Zusätzlich wurden von jedem Sitz jeweils 2 Variationen erstellt. Wie in der Vorversuchsphase wurde bei der ersten Variation der Kraft-Wegverlauf so verändert, dass bei gleicher Kraft nur 50% des Weges erreicht werden. Bei der zweiten Variation wurde der Kraftwegverlauf so skaliert, dass bei gleicher Kraft 150% des Weges im Vergleich zum Realsitz erreicht werden. In der Vorversuchsphase wurde bei der zweiten Variation noch eine Verdopplung des Weges durchgeführt. Es zeigte sich allerdings während der Versuche, dass der Einsinkweg der Versuchspersonen an manchen Stellen bei dieser Variation so groß war, dass der Fahrweg der Stößel des Forschungsstuhles nicht mehr ausreichte.

Somit standen für die Hauptversuche 5 Realsitze und 15 simulierte Sitze auf dem Forschungsstuhl zu Verfügung.

9.1.3 Haltungen

Wie in der Vorversuchsphase sollten in der Hauptphase Versuche in der Fahrerhaltung durchgeführt werden. In der Fahrerhaltung mussten die Versuchspersonen die Hände an das Lenkrad, den linken Fuß auf die Fußstütze und den rechten Fuß auf das Gaspedal legen. Der Sitz durfte von den Versuchspersonen frei eingestellt werden unter der Prämisse, dass die Pedalerie und Lenkrad bedient werden konnten.

Für die Hauptversuchsphase wurde auf Wunsch des Arbeitskreises zusätzlich zu der Fahrerhaltung eine weitere Haltung hinzugenommen, die im Weiteren als „standardisierte Haltung“ bezeichnet wird. Im Gegenteil zur Fahrerhaltung darf bei der standardisierten Haltung der Sitz nicht verstellt werden. Die Sitzeinstellungen sind fest durch die Automobilhersteller vorgegeben und entsprechen ungefähr der Konstruktionslage der Sitze für das 50. Perzentil, männlich. Bei der standardisierten Haltung sind keine äußeren Restriktionen durch Pedale oder Lenkrad vorgegeben. Die Versuchsperson soll sich so in den Sitz setzen, dass sie mit dem ganzen Rücken an der Rückenlehne anliegt. Die Beine sollen bequem nach vorne abgelegt werden, so dass weder eine Lücke zwischen Oberschenkel und Sitzfläche entsteht noch das Polster am vorderen Ende der Sitzfläche zu stark zusammengedrückt wird. Die Arme sollen bequem auf den Oberschenkel abgelegt werden. Im weitesten Sinne entspricht diese Haltung am ehesten einer Beifahrerhaltung.

Da sich durch Hinzunahme einer weiteren Haltung der geplante Versuchs- und Auswerteaufwand verdoppelt, wurde vom Arbeitskreis beschlossen, die Langzeitversuche ausfallen zu lassen. Dieser Entschluss wurde gefasst, da zudem in der Literatur bereits Erkenntnisse über die Entwicklung des Diskomfortempfindens mit der Zeit vorliegen (Estermann, 1999).

9.1.4 Messwerkzeuge

Für die Durchführung der Versuche wurden folgende Versuchseinrichtungen und Messwerkzeuge verwendet:

- Realsitzmockups (siehe Abschnitt 6.4.3),
- Forschungsstuhlmockup (siehe Abschnitt 6.4.2),
- Forschungsstuhl (siehe Abschnitt 6.1),
- Novel-Druckmessmatte für Druckmessung auf Realsitzmockups (siehe Abschnitt 6.2.1),
- Kameras (siehe Abschnitt 6.5),
- Fragebögen (siehe Abschnitt 8.2),
- Schablone zur Übertragung von Sitzeinstellungen (siehe Abschnitt 6.5).

9.1.5 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wurde für alle Versuche gleich gestaltet. Eine Permutation der Versuchsbedingungen wurde nicht durchgeführt, da eine vollständige Permutation bei der großen Anzahl von Versuchsbedingungen bei der gewählten Anzahl von Versuchspersonen nicht möglich ist. Aus der Kombination von Versuchspersonen mit den verwendeten Sitzen und Haltungen ergibt sich für die Untersuchung eine Gesamtzahl von 1344 Sitzversuchen.

Am ersten Versuchstag müssen die Versuchspersonen nach der Begrüßung den Fragebogen zur Abfrage persönlicher Daten und Gewohnheiten (vgl. Abschnitt 8.2.5) ausfüllen.

Danach werden Körperhöhe und Gewicht der Versuchsperson gemessen. Zusätzlich wird die Versuchsperson in zwei vordefinierten Körperhaltungen mit zwei Kameras aus verschiedenen Blickwinkeln aufgenommen, die später gegebenenfalls für die anthropometrische Vermessung mit PCMAN benötigt werden.

Nach der Vermessung füllen die Versuchspersonen den Fragebogen zur äußeren Anmutung der Sitze aus (vgl. Abschnitt 8.2.6). Dazu wird die Versuchsperson zum

jeweiligen Sitz geführt und der entsprechende Fragebogen übergeben. Die Versuchsperson erhält die Anweisung die Beurteilung nur auf Grund der optischen Erscheinung des Sitzes durchzuführen und die Sitze nicht zu berühren.

Danach erhält die Versuchsperson eine Einweisung bzgl. der Bewertung von Diskomfort und Druck (vgl. Abschnitt 8.2.1). Weiterhin werden der Versuchsperson die Bodymap und die CP50-Bewertungsskala (vgl. Abschnitte 8.2.2, 8.2.3) vorgestellt. Um evtl. Vorbehalte aufgrund der mächtigen Erscheinung des Forschungsstuhls auszuräumen, wird dieser der Versuchsperson kurz vorgestellt und der Versuchsperson versichert, dass die Versuche gänzlich ungefährlich sind.

Die oben beschriebenen Schritte werden nur am ersten Versuchstag durchgeführt. Die nachfolgenden Schritte werden am ersten und den weiteren Versuchstagen immer in der gleichen Reihenfolge durchgeführt.

Nach den Vorbereitungen müssen die Versuchspersonen den Fragebogen zur Erfassung der Einflussfaktoren am Versuchstag (vgl. Abschnitt 8.2.7) ausfüllen.

Danach beginnt die Durchführung der Realsitzversuche. Die Versuchsperson wird angewiesen sich in der standardisierten Haltung auf den vorbereiteten Sitz zu setzen und den Fragebogen zu den Einflussfaktoren während des Versuches (vgl. Abschnitt 8.2.8) auszufüllen. Danach werden die Druckmessungen mit Hilfe der Novel-Druckmessmatte durchgeführt. Im Anschluss erfolgt die Aufnahme der Versuchsperson mit zwei Kameras aus zwei verschiedenen Perspektiven. Darauf folgt das durch den Versuchsleiter geführte Interview (vgl. Abschnitt 8.2.4) mit der Versuchsperson.

Für die Fahrerhaltung wird analog vorgegangen mit dem Unterschied, dass die Sitzeinstellungen frei gewählt werden dürfen. Für die Versuchspersonen gelten ferner die äußeren Restriktionen durch die geforderte Bedienung von Pedalen und Lenkrad. Die Sitzeinstellungen werden nach dem Versuch direkt am Sitz und mit Hilfe der Sitzschablone erfasst.

Nach den Realsitzversuchen wird mit den Forschungsstuhlversuchen begonnen. Zuerst werden die Versuche in der standardisierten Haltung durchgeführt. Dazu werden die Sitzeinstellungen für die standardisierte Haltung auf dem Forschungsstuhl reproduziert. Es werden der Versuchsperson die Sitze in der Reihenfolge normal, 50% Weg, 150% Weg (vgl. Abschnitt 9.1.2) angeboten. Bei jedem Versuch wird der Fragebogen zu den Einflussfaktoren (vgl. Abschnitt 8.2.8) während des Versuches von der Versuchsperson ausgefüllt, eine Druckmessung mit dem Forschungsstuhl durchgeführt, Bilder vom Versuch mit zwei Kameras aus verschiedenen Blickwinkeln angefertigt und das Interview durchgeführt.

Die Forschungsstuhlversuche für die Fahrerhaltung laufen analog zu den Versuchen mit standardisierter Haltung ab. Allerdings werden bei der Fahrerhaltung die individuellen Einstellungen der Realsitze mit Hilfe der Sitzschablone auf dem Forschungsstuhl reproduziert. (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17)

Am Ende eines Versuchstages wird von den Versuchspersonen der Fragebogen zum Versuch ausgefüllt (siehe Abschnitt 8.2.9)

9.2 Versuchsdurchführung

Die Sitzversuche der Hauptversuchsphase wurden in einem Zeitraum von September 2001 bis März 2003 in der Versuchshalle am Lehrstuhl für Ergonomie durchgeführt.

Die Versuchspersonen wurden zur Hälfte aus Braunschweig und zur Hälfte aus München rekrutiert.

Bei den Versuchspersonen aus Braunschweig wurden die Versuche an jeweils drei aufeinander folgenden Tagen durchgeführt. An jedem dieser Tage wurde ein anderer Sitz untersucht.

Mit den Versuchspersonen aus München waren die Abstände zwischen den Versuchstagen je nach Versuchsperson unterschiedlich groß. Die Abstände richteten sich nach der Verfügbarkeit der Versuchspersonen. Ansonsten war der Ablauf wie bei den Versuchspersonen aus Braunschweig und wie in Abschnitt 9.1.4 beschrieben gestaltet.

Die Untersuchung von Bus- und LKW-Sitz wurde mit den 12 männlichen Versuchspersonen aus München durchgeführt.

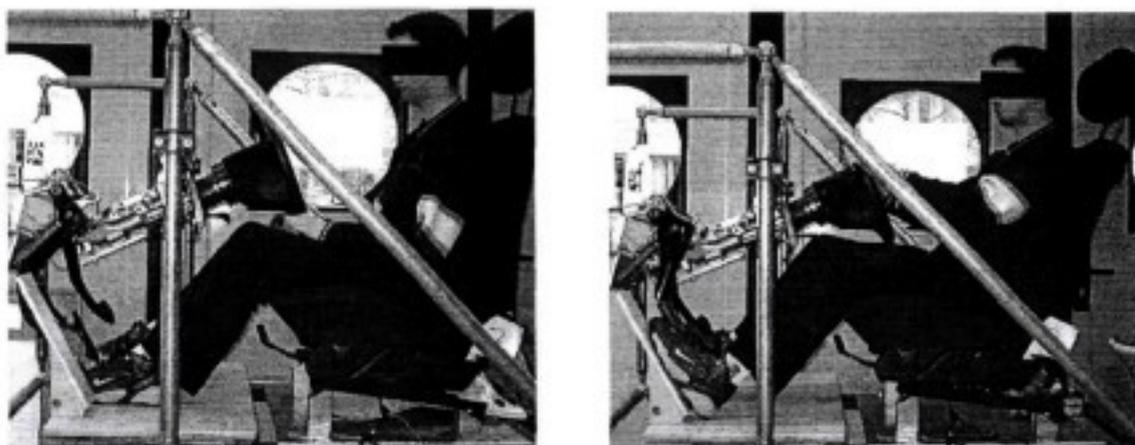


Abbildung 16: Standardisierte Haltung (links) und Fahrerhaltung (rechts) auf dem Realsitz

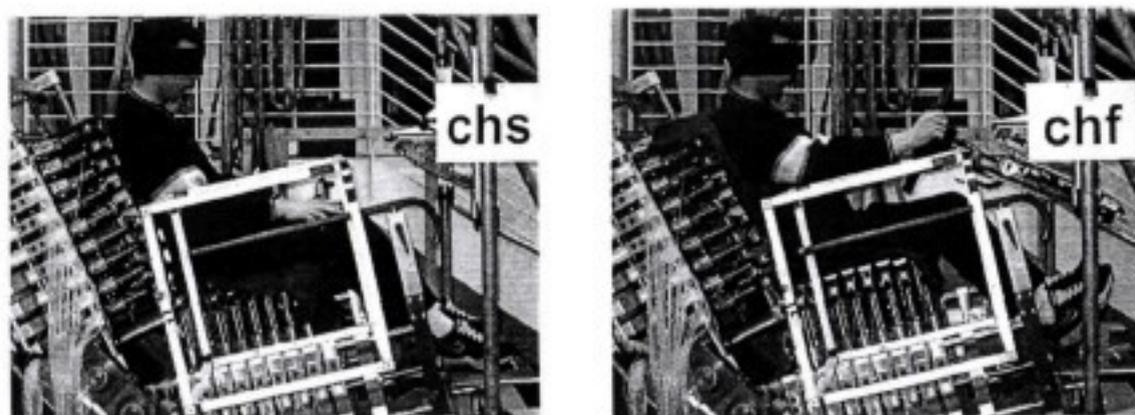


Abbildung 17: Standardisierte Haltung (links) und Fahrerhaltung (rechts) auf dem Forschungsstuhl

9.3 Vorauswertung 1

In der ersten Vorauswertung wurden die Daten von 16 Versuchspersonen betrachtet. Es wurden ausschließlich Druckverteilungen und subjektive Bewertungen miteinbezogen, die auf dem Forschungsstuhl gewonnen wurden.

9.3.1 Auswertung

Für die Aufbereitung der Druckverteilungen wurde eine spezielle Software verwendet, mit der die Einteilung der Druckverteilungen in einzelne Körperbereiche durchgeführt wurde. Die Software erlaubt es ein Gitter, das die Körperbereiche repräsentiert über einer graphisch dargestellten Druckverteilung frei zu positionieren. Damit kann ein vertikaler und horizontaler Versatz der Versuchsperson auf Lehnen- und Sitzfläche ausgeglichen werden. Die Ausrichtung dieses Gitters erfolgte bei der Sitzfläche über die gut sichtbaren Druckmaxima unter den Sitzbeinhöckern. Hierbei ist zu beachten, dass die maximale Positioniergenauigkeit etwa einen halben Stösselabstand des Forschungsstuhles entspricht. Dies sind je nach simuliertem Sitz 2-3 cm. Für die einzelnen Körperbereiche wurde dann mittlerer und maximaler Druck berechnet.

9.3.2 Ergebnisse

Die Analyse des Zusammenhanges zwischen dem Diskomfort in einem Körperteil und den objektiven Parametern brachte für die ersten 16 Versuchspersonen keine klaren Ergebnisse. Für die einzelnen Versuchspersonen konnten nur wenige statistisch signifikante Korrelationen zwischen den objektiven Parametern maximaler und mittlerer Druck in einem Körperteil und dem entsprechenden Diskomforturteil gefunden werden. Die wenigen statistisch signifikanten Korrelationen zeigten zum Teil unterschiedliche Tendenzen auf, so dass ein eindeutiger Trend nicht ablesbar war.

Die Korrelationen der subjektiven Druckempfindung mit den objektiv gemessenen Drücken sind in Abbildung 18 dargestellt. Die gefundenen Korrelationen lassen den Schluss zu, dass Druck, der auf verschiedene Stellen am Körper in unterschiedlicher Höhe einwirkt, auch subjektiv unterschiedlich hoch bewertet wird.

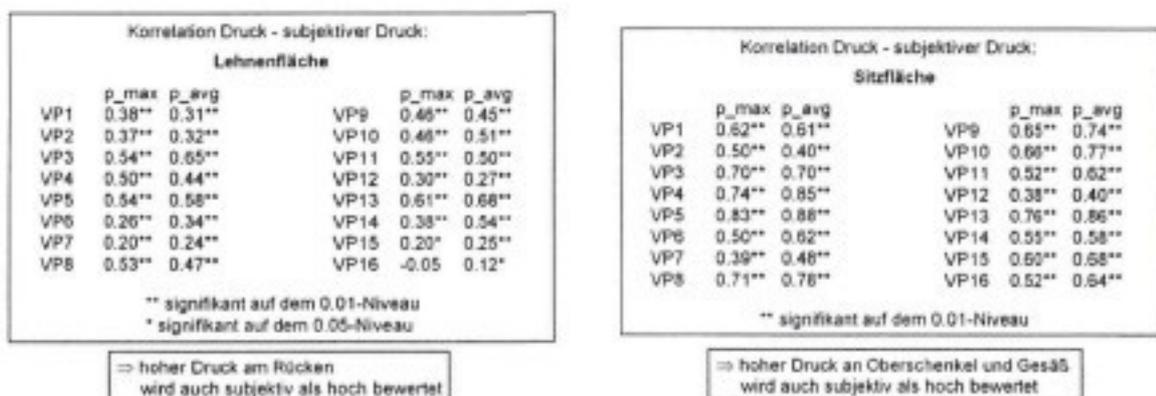


Abbildung 18: Korrelationen zwischen Druckempfindung und Druckmessungen

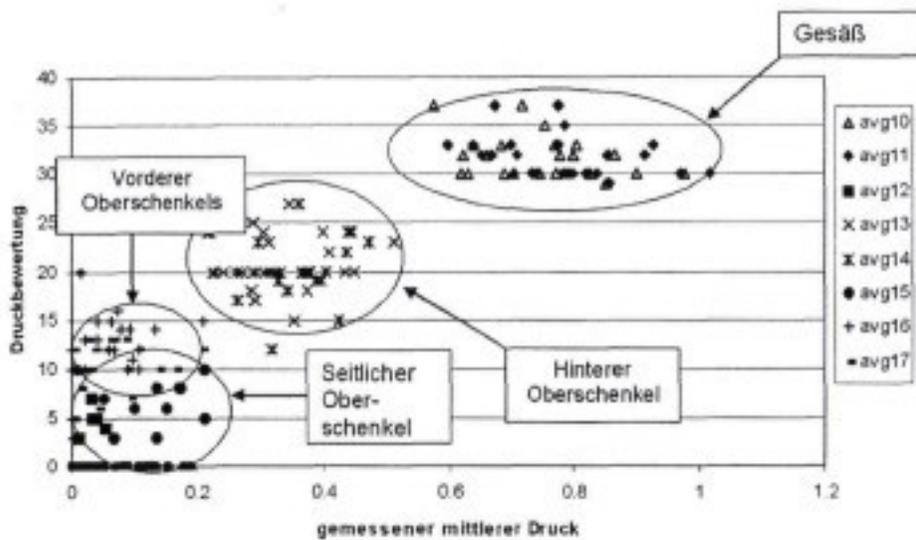


Abbildung 19: Subjektive Druckwertungen aufgetragen über dem gemessenen mittleren Druck in den Körperteilen

Betrachtet man die Punktwolken, aus denen die Korrelationen berechnet wurden, zeigt sich, dass sich für verschiedene Körperteile Cluster bilden. D.h. aus den Versuchen ergab sich für die einzelnen Körperteile nur eine geringe Variation von objektivem Druck und subjektiven Druckempfinden. In Abbildung 19 ist beispielhaft die angesprochene Clusterbildung dargestellt.

Weiterhin wurde untersucht, ob sich ein Zusammenhang zwischen dem Druckgradienten zwischen den einzelnen Körperbereichen und dem Diskomfortempfinden finden lässt. Wie bei den Korrelationen mit den objektiven Druckwerten konnten bzgl. des Druckgradienten keine eindeutigen Ergebnisse gefunden werden.

Aus den Ergebnissen der ersten 16 Versuchspersonen ließ sich ableiten, dass, wenn überhaupt nur ein schwacher Zusammenhang zwischen Diskomfortempfinden und den gemessenen Parametern mittlerer und maximaler Druck besteht. Weitere Betrachtungen der Versuchsdaten führten zur Annahme, dass evtl. der Zusammenhang zwischen Diskomfort und Druck nicht linear ist, sondern ein Optimum aufweist. D.h. sowohl zu hoher Druck als auch zu niedriger Druck in einem Körperteil zu einer Diskomfortempfindung führen. In Abbildung 20 ist dieser angenommene, gegensätzliche Zusammenhang zwischen objektiven Druck und Diskomfortempfinden für unterschiedliche Ursachen des Diskomforts dargestellt. In den weiteren Auswertungen sollte dieser Aspekt genauer untersucht werden.

2 Hauptgründe für Diskomfort: zu hoher Druck, fehlende Unterstützung

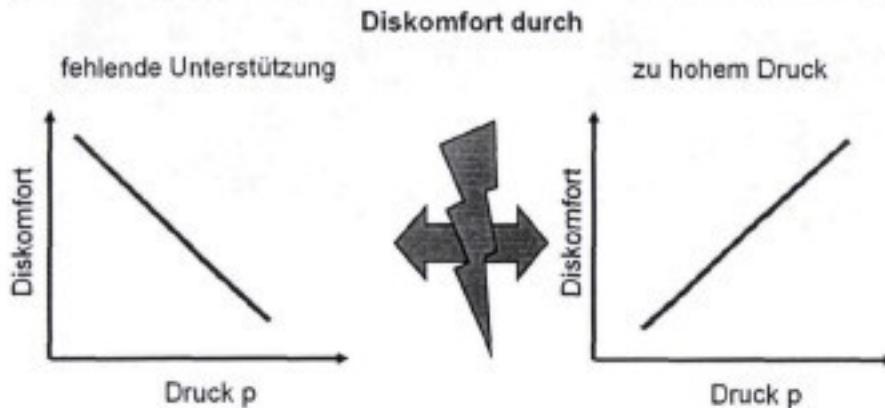


Abbildung 20: gegensätzlicher Zusammenhang zwischen Diskomfort und Druck bei unterschiedlichen Diskomfortursachen

Weiterhin war die Vorgehensweise in dieser Vorauswertung bei der Einteilung der Druckverteilungen in die einzelnen Körperteile zwar bereits besser als in der Voruntersuchung allerdings besonders für die Sitzfläche noch zu stark vereinfacht. Eine Verfeinerung der Methode würde den Fehler bei der Auswertung für die Sitzfläche weiter minimieren.

9.4 Vorauswertung 2

Die zweite Vorauswertung wurde auf Basis von 28 Versuchspersonen und unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der ersten Vorauswertung durchgeführt. Es wurden hierzu Daten verwendet, die auf dem Forschungsstuhl gewonnen wurden.

9.4.1 Auswertung Zusammenhang Diskomfortempfinden, Druckmessung

Für die zweite Vorauswertung der Druckverteilungen wurde das Programm zur Zuordnung der einzelnen Druckwerte auf die Körperbereiche entsprechend erweitert. Die erweiterte Version erlaubte es nun einen Öffnungswinkel zwischen linkem und rechtem Bein einzustellen. Somit war es mit dem erweiterten Programm möglich, eine genauere Zuordnung der Druckwerte zu den einzelnen Körperbereichen durchzuführen. Die systembedingte Beschränkung der Genauigkeit durch die Abstände der Sensoren von Druckmessmatte und Forschungsstuhl hatte natürlich weiterhin Bestand.

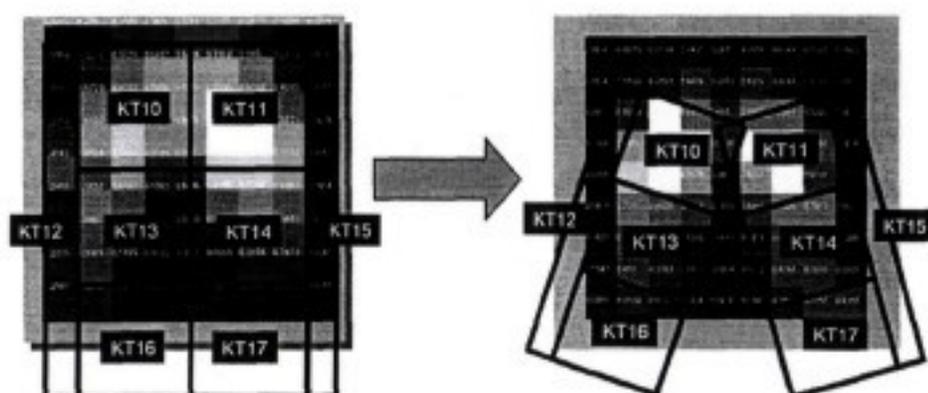


Abbildung 21: Berücksichtigung des Öffnungswinkels der Beine bei der Druckverteilungsauswertung

Für die zweite Vorauswertung wurden die Daten in zwei Datensätze separiert. In einem Datensatz waren alle subjektiven Wertungen enthalten, die als Grund für das Diskomfortempfinden „zu hoher Druck“ enthielten. Entsprechend waren im anderen Datensatz alle Wertungen enthalten, die als Grund für das Diskomfortempfinden „zu wenig Unterstützung“ enthielten. In Abbildung 22 ist dieser Sortiervorgang beispielhaft dargestellt.

KT	D	p	G
10	20	1.1	p
11	20	1.15	p
12	10	0.1	u
13	15	0.6	p
14	15	0.6	p
15	10	0.11	u
16	20	0.1	u
17	20	0.05	u

KT	D	p	G
12	10	0.1	u
15	10	0.11	u
16	20	0.1	u
17	20	0.05	u

KT	D	p	G
10	20	1.1	p
11	20	1.15	p
12			
13	15	0.6	p
14	15	0.6	p
15			
16			
17			

Abbildung 22: Vorgehensweise bei der Separierung der subjektiven Aussagen nach "zu hoher Druck" und "zu wenig Unterstützung"

Für diese beiden Datensätze wurden wie schon bei der ersten Vorauswertung Korrelationen zwischen dem Diskomfortempfinden und den objektiven Parametern mittlerer und maximaler Druck sowie den Druckgradienten zwischen den Körperteilen berechnet.

9.4.2 Ergebnisse Zusammenhang Diskomfortempfinden, Druckmessung

Die Diskomfortaussagen zeigten für den Diskomfortgrund „zu hoher Druck“ nur wenige statistisch signifikante, schwache Korrelationen für die einzelnen Körperbereiche. In Abbildung 23 sind die Korrelationen sowohl zwischen subjektiven Wertungen untereinander wie auch die Korrelationen zwischen Diskomfortaussagen und den

Statischer Sitzkomfort - Hauptversuchsphase

objektiven Parametern mittlerer Druck und maximaler Druck in dem jeweiligen Körperteil dargestellt. In der ersten Spalte ist die Körperteilnummer aufgetragen. In den weiteren Spalten sind für dieses Körperteil folgende Werte in dieser Reihenfolge aufgetragen: Korrelation zwischen Diskomfortempfinden und Druckempfinden, Korrelation zwischen Diskomfortempfinden und Unterstützungswunsch, Korrelation zwischen Druckempfinden und Unterstützungswunsch, Korrelation zwischen Diskomfortempfinden und gemessenem mittlerem Druck, Korrelation zwischen Diskomfortempfinden und gemessenem maximalem Druck. Korrelationen mit zwei Sternen (**) sind signifikant auf dem 1%-Niveau, mit einem Stern (*) auf dem 5%-Niveau und ohne Stern statistisch nicht signifikant. Abbildung 25 zeigt die Anzahl der statisch signifikanten Korrelationen zwischen Diskomfortempfinden und gemessenen Drücken. In Abbildung 26 ist zusammenfassend dargestellt wie viele Korrelationen jeweils auf dem 1%- bzw. dem 5%-Niveau signifikant sind, wenn die Daten nicht nur nach Körperteil sondern zusätzlich auch nach Versuchspersonen differenziert werden.

Für den Diskomfortgrund „zu wenig Unterstützung“ zeigten sich keine statistisch signifikanten Korrelationen zwischen Diskomfortbewertung und den objektiven Parametern maximaler und mittlerer Druck im Körperteil. Die Korrelationen sind Abbildung 24 dargestellt. Die Anzahl der signifikanten Korrelationen bei weiterer Differenzierung nach Versuchspersonen ist in Abbildung 26 zusammengefasst.

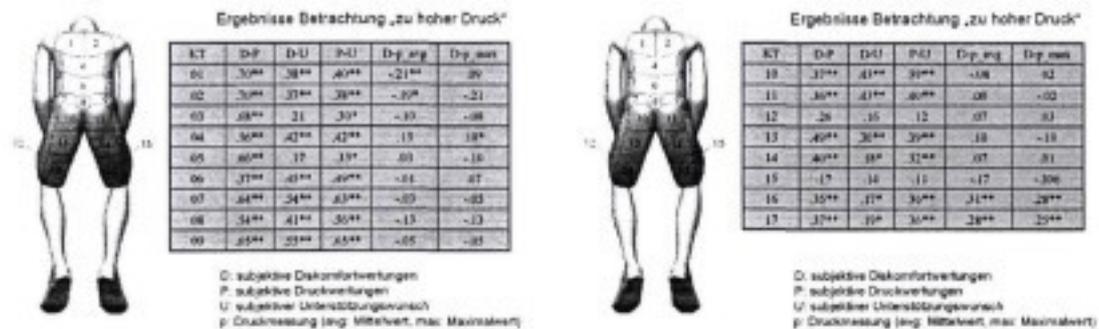


Abbildung 23: Korrelationen zwischen subjektiven Wertungen und objektiven Druckwerten für den Diskomfortgrund „zu hoher Druck“

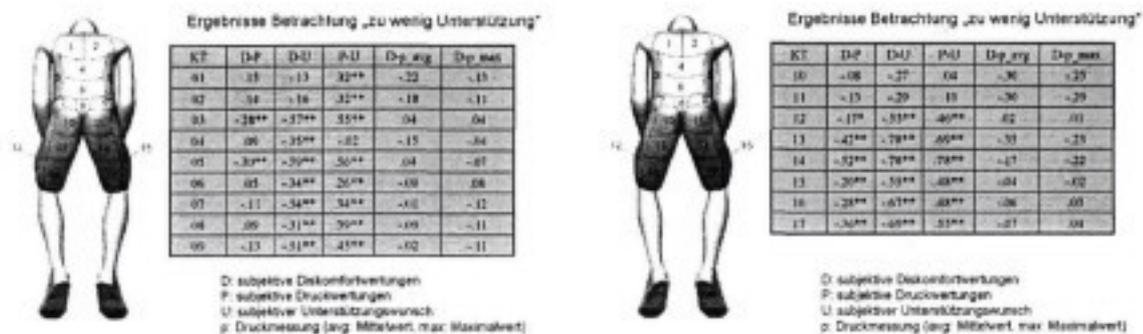


Abbildung 24: Korrelationen zwischen subjektiven Wertungen und objektiven Druckwerten für den Diskomfortgrund „zu wenig Unterstützung“

Korrelation	Sign. Auf 1%-Niveau	Sign. Auf 5%-Niveau
D-p_avg nur Druck	3 von 17	4 von 17
D-p_max nur Druck	2 von 17	3 von 17
D-p_avg nur Unterstützung	0 von 17	0 von 17
D-p_max nur Unterstützung	0 von 17	0 von 17

Abbildung 25: Zusammenfassung der Korrelationen auf Körperteilebene zwischen Diskomfort und den objektiven Druckmessungen separiert nach Diskomfortgrund

Korrelation	Sign. Auf 5%-Niveau
D-p_avg nur Druck	2 von 130
D-p_max nur Druck	10 von 122
D-p_avg nur Unterstützung	10 von 56
D-p_max nur Unterstützung	4 von 63

Abbildung 26: Zusammenfassung der Korrelationen auf Versuchspersonen- und Körperteilebene zwischen Diskomfort und den objektiven Druckmessungen separiert nach Diskomfortgrund

Auch für den Zusammenhang zwischen Diskomfortempfinden und Druckgradienten konnten keine verwertbaren Korrelationen gefunden werden.

Die vorher angeführten Ergebnisse sind immer unter dem Aspekt zu betrachten, dass die Aufteilung in zwei Datensätze und das Herausfiltern weiterer Ursachen für den Diskomfort, wie z.B. Temperatur, zu einer starken Reduktion der für eine Versuchsperson verfügbaren Wertungen geführt hat. So war es oft nicht möglich oder nicht sinnvoll, auf Grund der geringen Anzahl von Messwerten eine statistische Analyse durchzuführen. Dies trifft im Besonderen auf die Betrachtungen des Gradienten zu.

9.4.3 Interpretation der Ergebnisse Diskomfortempfinden, Druckmessung

Schlussfolgerung aus den vorher angeführten Ergebnissen ist, dass sich mit dem gewählten Versuchsdesign und Auswerteverfahren keine verwertbaren Korrelationen zwischen Diskomfortempfinden und mittlerem Druck, maximalem Druck und Druckgradienten bzgl. der einzelnen Körperteile finden lassen, falls diese überhaupt vorhanden sind.

Um diese Behauptung zu untermauern, wurden weitere statistische Analysen durchgeführt, die sich ausschließlich auf die subjektiven Wertungen der Versuchspersonen bezogen.

9.4.4 Analyse der subjektiven Wertungen

Mit Hilfe von T-Tests wurde untersucht, ob sich die gewählten Versuchsbedingungen, d.h. Sitze, Sitzhaltungen, Sitzvariationen bzgl. der Diskomfortwertungen voneinander unterscheiden. Die Analyse zeigte, dass sich die Diskomfortwertungen in den Körperteilen nur in sehr wenigen Fällen bei den unterschiedlichen Versuchsbedingungen

voneinander unterscheiden und dies selbst bei nicht konservativer¹ Betrachtung der Ergebnisse der statistischen Auswertung. Bei einer konservativen Betrachtung zeigten sich praktisch keine Unterschiede zwischen den Diskomfortwertungen in den einzelnen Körperbereichen bei den unterschiedlichen Versuchsbedingungen. Ein Unterschied zwischen den Versuchsbedingungen ist jedoch die grundlegende Voraussetzung, um Zusammenhänge zwischen 2 Variablen mit Hilfe von Korrelationen identifizieren zu können.

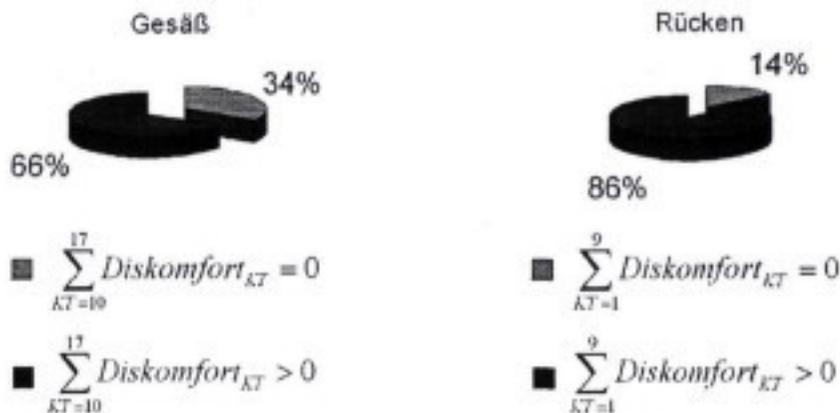


Abbildung 27: Anteil der Wertungen mit 0 Diskomfort für Gesäß und Rücken

Es scheint somit nicht möglich, mit dem gewählten Versuchsdesign einen Zusammenhang zwischen Diskomfortempfinden und gemessenen Druckparametern zu finden. Hierzu wäre ein größerer Unterschied zwischen den Versuchsbedingungen notwendig. Die Hauptproblematik liegt vermutlich in der Auswahl der Sitze und der Variation dieser Sitze auf dem Forschungsstuhl. Bei den nicht modifizierten Sitzen ist davon auszugehen, dass sie das Endprodukt eines langen Optimierungsvorganges von Autositzen sind. Es ist somit zu erwarten, dass diese Sitze sich auch nahe dem Optimum befinden. Diese Annahme wird bekräftigt durch den hohen Anteil von Wertungen mit „0 Diskomfort“ für Rücken bzw. Gesäß (Abbildung 27) und findet seine Fortsetzung, wenn man das Gesamtspektrum der abgegebenen Wertung betrachtet, welche größtenteils im Bereich zwischen „0 Diskomfort“ und „geringer Diskomfort“ liegen. Die Änderung der Sitzsteifigkeit insgesamt um einen festen Faktor auf dem Forschungsstuhl scheint diese Lage der Sitze nahe des Optimums zu wenig zu beeinflussen, als dass es zu einem statistisch signifikanten Unterschied in den subjektiven Wertungen kommt. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse musste nun im Hinblick auf ein verwertbares Ergebnis am Ende des Projektes die am Anfang geplante Vorgehensweise zur Ableitung eines Regressionsmodells fallen gelassen werden.

9.4.5 Alternatives Auswertekonzept

In der Diskussion mit dem Arbeitskreis und unter intensiver Betrachtung der bisherigen Ergebnisse sowie weiterer Auswertungen musste die Zielrichtung des Projektes neu definiert werden. In der Diskussion über die weitere Vorgehensweise wurden auch

¹ Bei konservativer Betrachtung muss das Signifikanzniveau durch die Anzahl der T-Tests geteilt werden, um die vorher festgelegte Irrtumswahrscheinlichkeit zu erhalten

wissensbasierte Systeme und neuronale Netze und deren Anwendbarkeit auf die in diesem Projekt erhobenen Daten erörtert.

Für die Überlegungen zur weiteren Vorgehensweise im Projekt wurde eine Betrachtung der prozentualen Lastverläufe längs der Sitzfläche durchgeführt. Im Folgenden wird kurz erläutert wie die relativen Lastverteilungen ermittelt wurden. Die Druckverteilungen auf dem Forschungsstuhl können als eine 9x9-Matrix dargestellt werden, wobei die Anordnung der Messsensoren quer der Sitzfläche hier als Zeilen bezeichnet werden. Aus gemessenem Druck und bekannter Sensorfläche kann für jede Zelle der Matrix die einwirkende Kraft berechnet werden. Bezieht man diese Kräfte auf die Kraft, die auf die gesamte Sitzfläche wirkt, erhält man die relative Lastverteilung. Summiert man nun über die Zeilen erhält man 9 Werte, die aufgetragen in einem Diagramm den relativen Lastverlauf längs der Sitzfläche darstellen. Die beschriebene Vorgehensweise ist in Abbildung 28 nochmals grafisch dargestellt.

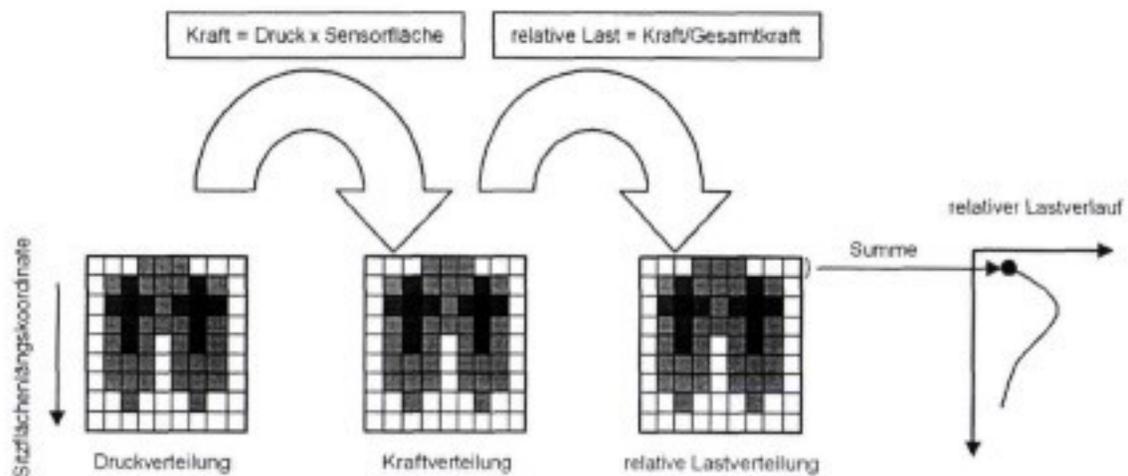


Abbildung 28: Ableitung des relativen Lastverlaufes aus einer Druckverteilung

Eine Betrachtung der prozentualen Lastverläufe längs der Sitzfläche zeigt den Trend, dass ein Lastverlauf, der von den Lastverläufen mit 0-Diskomfort abweicht, mit höherem Diskomfort bewertet wird. Dieser Trend war allerdings nur sehr schwach, was wahrscheinlich darauf zurückzuführen ist, dass die Diskomfortwertungen insgesamt fast ausschließlich im Bereich „sehr geringer Diskomfort“ bis „geringer Diskomfort“ liegen. Ein ausgewähltes Beispiel für eine solche Abweichung von den 0-Diskomfortverläufen ist in Abbildung 29 zu sehen. Die Kurven in dem Diagramm stellen Lastverläufe längs zur Sitzfläche dar. Dargestellt sind hier drei Kurven von Lastverläufen, die mit „0 Diskomfort“ bewertet wurden und ein Lastverlauf mit Diskomfortwertungen größer null. Die Lastverteilungen wurden so ausgerichtet, dass die Maxima, welche in etwa der Position der Sitzbeinhöcker entsprechen, übereinander liegen. Es ist zu erkennen, dass der Lastverlauf mit Diskomfort in Höhe der vorderen Oberschenkel (rechtes Ende der Kurvenverläufe) von denen ohne Diskomfort deutlich abweicht.

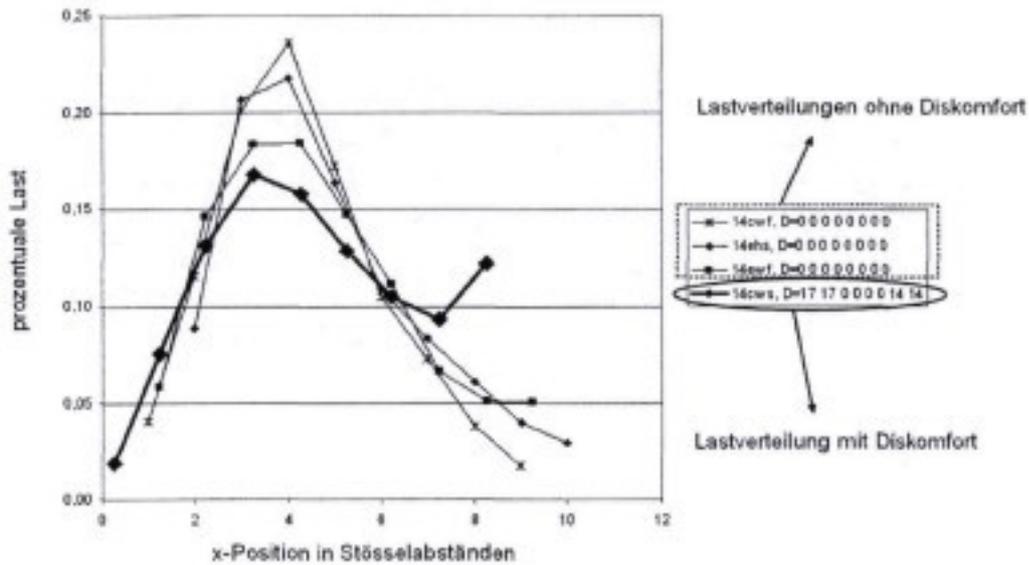


Abbildung 29: Beispiel für die Betrachtung der Lastverläufe längs der Sitzfläche

Als Ergebnis der Diskussion über die weitere Vorgehensweise wurde das Ziel für die weiteren Auswertungen definiert. Ziel war nun die Ableitung einer „optimalen Lastverteilung“.

Um ein erstes Ergebnis hinsichtlich dieser Betrachtung zu erzielen wurde basierend auf den ersten 28 Versuchspersonen die Lastverteilung für die einzelnen Körperbereich für „0 Diskomfort“ berechnet. Die Ergebnisse dieser Berechnungen sind in Abbildung 30 und Abbildung 31 dargestellt.

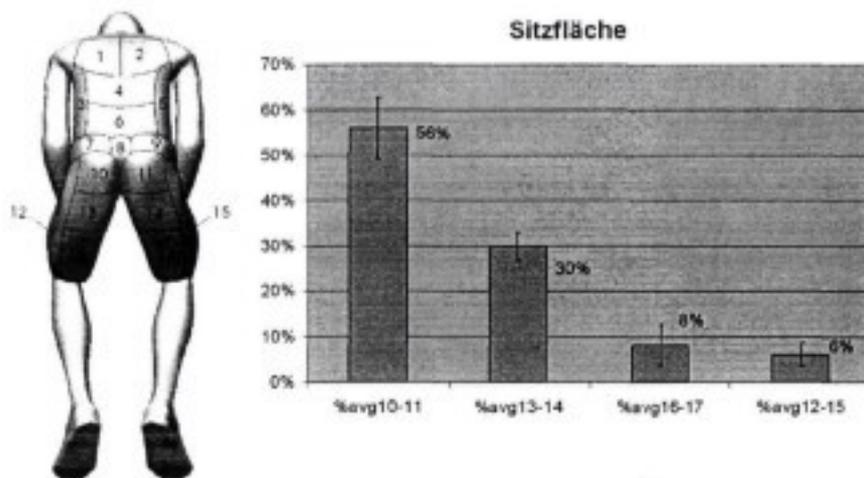


Abbildung 30: Lastverteilung auf der Sitzfläche bei „0 Diskomfort“ ermittelt aus den Versuchen mit den ersten 28 Versuchspersonen

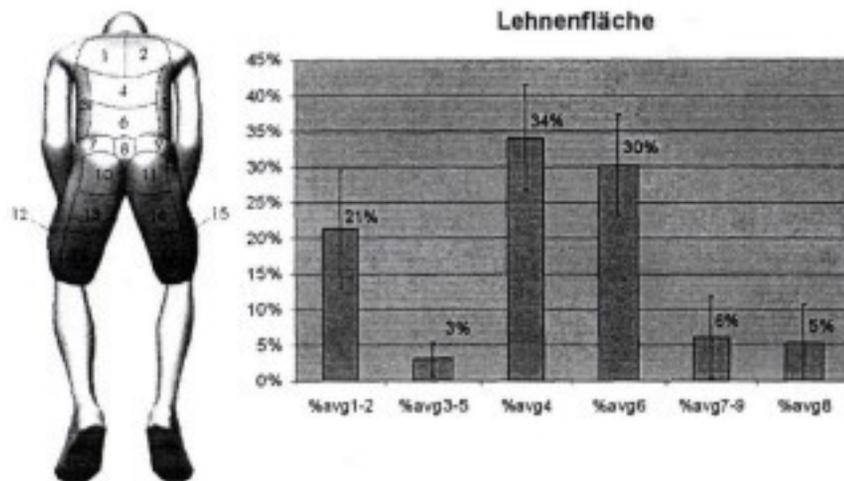


Abbildung 31: Lastverteilung auf der Lehnenfläche bei „0 Diskomfort“ ermittelt aus den Versuchen mit den ersten 28 Versuchspersonen

9.5 Endauswertung

Nach Abschluss der Hauptversuche wurde mit der Endauswertung begonnen. Zielrichtung der Auswertung war die Ableitung einer „optimalen Lastverteilung“, die als Richtlinie für zukünftige Sitzauslegungen herangezogen werden soll.

Für die Ableitung dieser optimalen Lastverteilung sollte eine Mittelung über alle Druckverteilungen erfolgen, bei denen die Versuchspersonen in allen Körperteilen einer zu bewertenden Fläche des Sitzes „0 Diskomfort“ gewertet hatte. Diese Vorgehensweise hätte allerdings einen beträchtlichen Teil der Versuche und der Versuchspersonen ausgeschlossen. In Einverständnis mit dem Arbeitskreis wurde deshalb die Grenze für die noch akzeptierte Diskomfortwertung von „0 Diskomfort“ auf „sehr geringer Diskomfort“ angehoben.

In Tabelle 3 ist eine Übersicht über die Anzahl der für die Auswertung verwendeten Druckverteilungen und Anzahl der Versuchspersonen von denen die Druckverteilungen stammen dargestellt.

Tabelle 3: Anzahl der verwendeten Druckverteilungen und Versuchspersonen für die Ableitung der optimalen Lastverteilungen

	PKW, Rücken, Mann	PKW, Rücken, Frau	PKW, Gesäß, Mann	PKW, Gesäß, Frau	Bus, Rücken	Bus, Gesäß	LKW, Rücken	LKW, Gesäß
Anzahl Druckverteilungen	209	136	216	220	32	42	30	36
Anzahl Versuchspersonen	21	21	22	21	10	10	8	10

Um eine optimale Lastverteilung berechnen zu können, mussten die gemessenen Druckverteilungen so aufbereitet werden, dass eine Berechnung des Mittelwertes für einzelne Messstellen einer Druckverteilung zulässig sind. Damit dies gewährleistet ist, mussten die gemessenen, sitzbezogenen Druckverteilungen in menschenbezogene umgewandelt werden (Abbildung 32). Durch diese Transformation wird erreicht, dass der Druck einer bestimmten Position am menschlichen Körper zugeordnet werden kann.

Dadurch werden alle Variationen in den Druckverteilungen, die sich dadurch ergeben, dass sich Versuchspersonen im Sitz unterschiedlich positionieren oder sich mit unterschiedlichen Beinöffnungswinkeln auf die Sitze setzen, kompensiert.

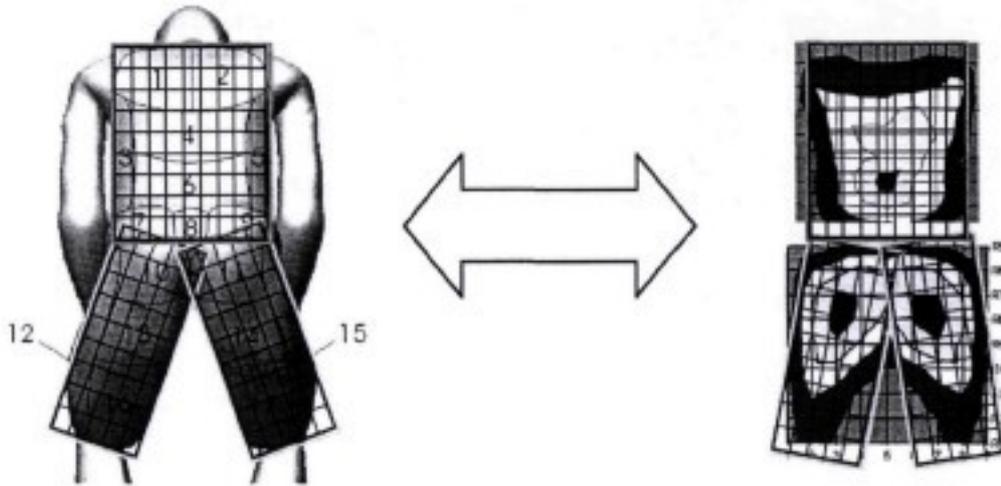


Abbildung 32: Umwandlung der sitzbezogenen Druckverteilungen in menschenbezogene Druckverteilungen mit Hilfe des Bodygrid-Programmes

Um die Auswertung individuell für jede Versuchsperson durchführen zu können, wurden die Rücken- und die Beinlänge der Versuchspersonen vermessen. Rücken- und Beinlänge wurden wie in Abbildung 33 dargestellt definiert.

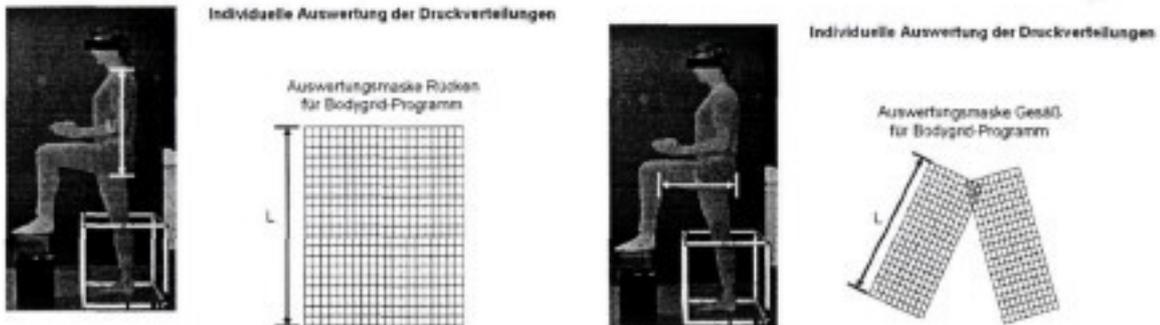


Abbildung 33: Bestimmung der Maße für Rücken und Beinlänge

Die Transformation von sitzbezogenen Druckverteilungen auf menschenbezogene Druckverteilungen wurde mit dem am Lehrstuhl für Ergonomie entwickelten „Body-Grid“-Programm durchgeführt. Dieses Programm erlaubt es, ein rechteckiges Gitter mit einstellbarer Verdrehung, Länge, Breite sowie Anzahl der Zellen in vertikaler und horizontaler Richtung über der Druckverteilung zu positionieren (siehe Abbildung 34). Auf Basis dieses Gitters wird dann die Druckverteilung neu gesampelt.

Auswertung der Sitzfläche

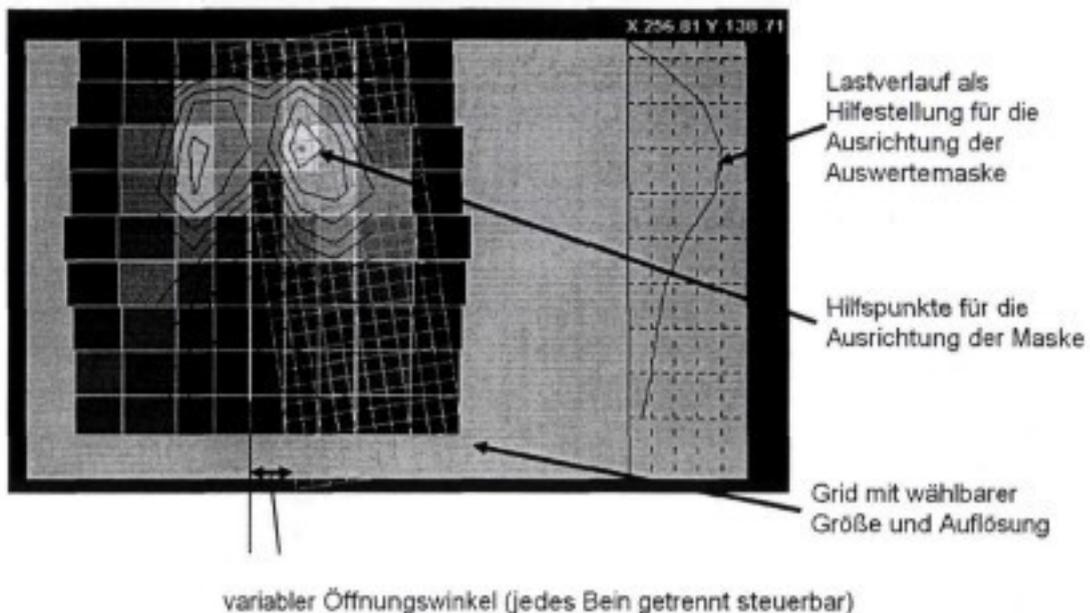


Abbildung 34: Bestimmung der körperbezogenen Lastverteilungen für die Beine mit dem Bodygrid-Programm

Für die Auswertung der Sitzfläche wurde eine konstante Breite des Gitters von 400 mm festgelegt. Die konstante Breite wurde hier gewählt, da keine Daten über die verformte Geometrie der Oberschenkel während des Sitzens vorlagen. In Anbetracht der Versuchspersonenauswahl um das 50. Perzentil wurden die verformten Oberschenkelbreiten als konstant angenommen. Die Länge des Gitters wurde bei gleich bleibender Anzahl der Gitterpunkte individuell auf die Länge des Beines der Versuchsperson angepasst. Je nach Oberschenkelweite wurde das Gitter entsprechend verdreht. Die Positionierung des Gitters quer zur Sitzfläche erfolgte über den als konstant angenommen Abstand zwischen den beiden Sitzbeinhöckern. Der Abstand der Sitzbeinhöcker wurde für das 50. Perzentil aus Ramsis und zwei am Lehrstuhl verfügbaren Skeletten bestimmt. Die Positionierung des Gitters in Längsrichtung erfolgte indem eine Markierung, die die ungefähre Lage des Sitzbeinhöckers repräsentiert auf der Höhe des Maximums der Lastverteilung längs der Sitzfläche gebracht wurde. Die Einstellung der Verdrehung des Gitters zur Korrektur des Öffnungswinkels erfolgte optisch durch die Überlagerung mit der Druckverteilung. Bei schwierig zu interpretierenden Druckverteilungen wurden die Kameraaufnahmen von den Versuchen zu Rate gezogen. Ein Beispiel für die Auswertung der Sitzfläche ist in Abbildung 34 dargestellt.

Für die Auswertung der Rückenlehne wurde die Gitterbreite auf 500 mm festgelegt. Die Gitterhöhe wurde individuell bei gleich bleibender Anzahl der Gitterpunkte nach der Rumpflänge der Versuchsperson eingestellt. Das Gitter wurde anhand der Kameraaufnahmen von der Versuchsdurchführung positioniert. Eine Verdrehung des Gitters wurde nicht durchgeführt.

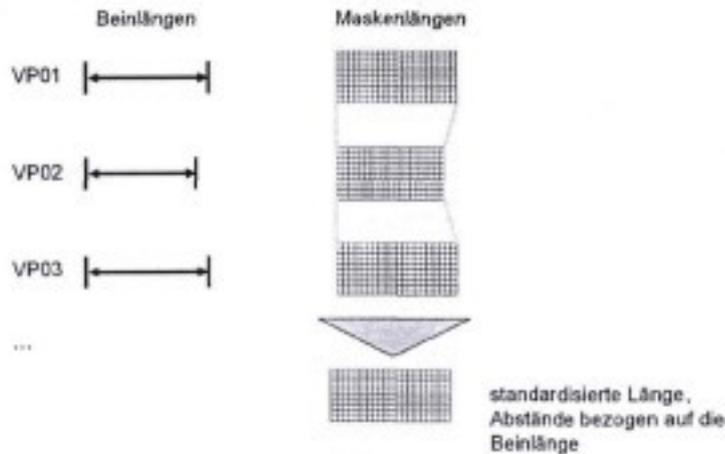


Abbildung 35: Zusammenführung der Lastverteilungen

Ergebnis dieser Auswertung sind relative Lastverteilungen bezogen auf die jeweilige Gesamtkraft für die Lehnenfläche und das linke Bein. Das linke Bein wurde in Abstimmung mit dem Arbeitskreis ausgewählt, da in den Versuchen dieses Bein im Vergleich zum rechten größere Möglichkeiten hatte eine angenehme Position mit einer angenehmen Lastverteilung zu wählen. Das rechte Bein war immer mit der Restriktion belegt, dass das Gaspedal bedient werden kann. Durch die individuelle Anpassung der Gitter auf die Rücken bzw. Beinlänge bei gleich bleibender Anzahl der Gitterpunkte in Längs- bzw. Querrichtung sind die Lastverteilungen direkt vergleichbar, wie dies Abbildung 35 verdeutlicht.

Nun konnte eine Mittelung der Lastwerte für jede Messstelle durchgeführt werden. Diese Mittelung ist allerdings nur zulässig falls es nicht mehrere Maxima in der Verteilung der Messwerte an einer Messstelle gibt. Eine optische Überprüfung der Verteilungen ergab, dass die Verteilungen eingipflig sind und nicht mehrere ausgeprägte Maxima besitzen, was bedeutet hätte, dass kein eindeutiges Optimum abgeleitet werden kann. Diese Betrachtung wurde nur für die PKW-Lastverteilungen durchgeführt. Eine Betrachtung der LKW- und Bus-Lastverteilungen ist aufgrund der geringen Anzahl von Messwerten nicht sinnvoll.

Bei der Lastverteilung am Rücken zeigten sich geringe Unterschiede zwischen der rechten und linken Seite. Diese könnten durch die gewählten Versuchsbedingungen wie z.B. der leichte Versatz der Lenkräder aus der Mittellinie oder die asymmetrische Anordnung von Gaspedal und Fußstütze hervorgerufen worden sein. Da Symmetrie ein Grundprinzip der Natur darstellt, wurde die Annahme getroffen, dass eine optimale Lastverteilung auch symmetrisch sein sollte. Nach der Mittelung wurden die Lastverteilungen für den Rücken deshalb noch symmetriert.

Die oben angeführten Auswertungen wurden ausschließlich für die auf dem Forschungsstuhl gemessenen Druckverteilungen durchgeführt. Es zeigte sich im Laufe der Hauptversuche und bestätigte sich auch in parallel laufenden Projekten, dass die Druckmessungen auf den Realsitzen mit der Novel-Druckmessmatte für eine Auswertung nicht verwendet werden können. Einerseits liefert die Messmatte auf Polstersitzen Druckmessungen, die eine hohe Anzahl von Artefakten aufgrund von Knickungen aufweisen. Die Knickungen resultieren daraus, dass die relativ steife Messmatte nicht der Verformung der Oberfläche des Sitzes folgen kann. Andererseits wurde in einem anderen Zusammenhang die Reliabilität der verwendeten Vorgehensweise bei der Druckmessung überprüft. Es zeigte sich, dass durch ein Aufstehen und wieder Hinsetzen der Versuchsperson die Druckverteilungen teilweise so stark variierten, dass sich selbst nach der 20. Messung kein konstanter Mittelwert einstellte. Dies bedeutet für diese

Untersuchung, dass in Zweifel zu ziehen ist, dass die Versuchspersonen bei der subjektiven Bewertung das bewertet haben, was dann später über die Messmatte von Novel gemessen worden ist. Deshalb wurden die Messungen der Realsitzversuche nicht in die Ermittlung der optimalen Lastverteilungen miteinbezogen.

Fazit aus diesen Ergebnissen bzgl. der Druckmessung mit der Novel-Messmatte ist, dass stets eine annähernd gleichzeitige Messung der Druckwerte und der subjektiven Bewertung der Versuchsperson erfolgen muss. Praktisch umgesetzt bedeutet dies, dass die Versuchsperson bei der Abgabe der subjektiven Wertungen auf der Druckmessmatte bzw. auf dem Druckmesssystem sitzen muss.

Beim Forschungsstuhl tritt die oben dargelegte Problematik nicht auf, da das Messsystem in die Sitz- bzw. Lehnefläche integriert ist und somit die bei der Befragung herrschende Druckverteilung erfasst werden kann.

Die Auswertungen bzgl. der optimalen Lastverteilung wurden getrennt für die PKW-Sitze, den LKW-Sitz und den Bussitz durchgeführt.

9.6 Ergebnisse und Diskussion

9.6.1 Ergebnisse

Im Folgenden werden die optimalen relativen Lastverteilungen für die PKW-Sitze, den LKW-Sitz und den Buspassagiersitz vorgestellt. Die Lastverteilungen sind in Diagrammen dargestellt. Jeder Gitterpunkt in den Diagrammen stellt dabei einen Datenpunkt dar, der durch die Auswertung mit dem Bodygrid-Programm bestimmt wurde.

Bei der Rückenlehne repräsentiert die Höhe des Gitters 100% der gemessenen Rückenlänge. Die Breite des Gitters entspricht 500mm.

Bei der Sitzfläche repräsentieren die Zeilen 5-32 100% der Beinlänge. Zeile 1-4 und 33-36 wurden während der Auswertung zusätzlich hinzugenommen. Die in Zeile 1-4 sichtbaren Messwerte entstehen dadurch, dass sich bei der Versuchsperson das Becken nach hinten neigt und somit sich die Fläche, die mit dem Sitz Kontakt hat über die Beinlänge hinaus verlängert. Zellen 33-36 dienten lediglich zu Kontrolle bei der Auswertung. Die Breite des Messgitters beim Gesäß beträgt 400 mm. Der grau hinterlegte Bereich ist bereits dem anderen Bein zugehörig. Das andere Bein tritt hier in Erscheinung, da die Breite des Gitters für die Auswertung im Bodygrid wesentlich größer gewählt wurde als die tatsächlichen Beinbreiten. Die Neigung der Trennlinien ergibt sich aus dem mittleren Beinöffnungswinkel für die PKW-Sitze (Männer und Frauen) bzw. den LKW- und den Bus-Sitz. Durch eine Spiegelung um diese Trennlinie erhält man die komplette Lastverteilung für das Gesäß.

Anhand von 2 Beispielen (Abbildung 36 und Abbildung 37) werden die dargestellten Lastverteilungen erklärt. Die Zahlenwerte in den Diagrammen sind in Prozent angegeben.

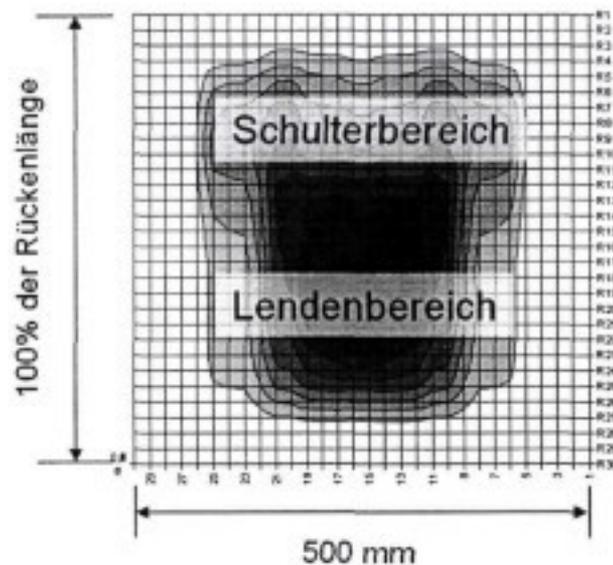


Abbildung 36: Erläuterung für die optimale relative Lastverteilung für den Rücken

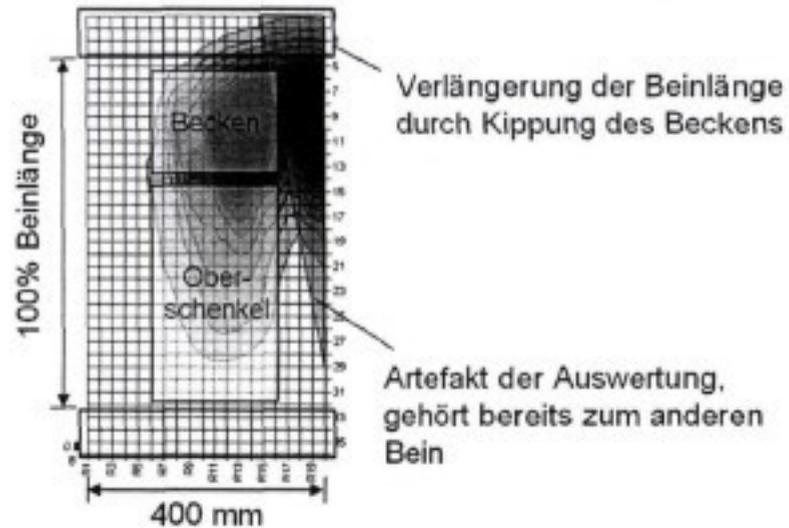


Abbildung 37: Erläuterung für die optimale relative Lastverteilung für das Gesäß

PKW

Statistische Betrachtungen bei der Auswertung der optimalen Lastverteilungen zeigten, dass es notwendig ist, zwischen den Lastverteilungen für Männer und für Frauen zu unterscheiden. Es werden deshalb im Folgenden die Lastverteilung für Männer und Frauen getrennt dargestellt und diskutiert.

Die Betrachtung der Verteilung der Messwerte ergab, dass diese zum Großteil annähernd normalverteilt sind. Die Mittelung zur Bestimmung einer optimalen Druckverteilung ist also zulässig.

Im Folgenden sind die ermittelten optimalen relativen Lastverteilungen dargestellt.

PKW - Männer

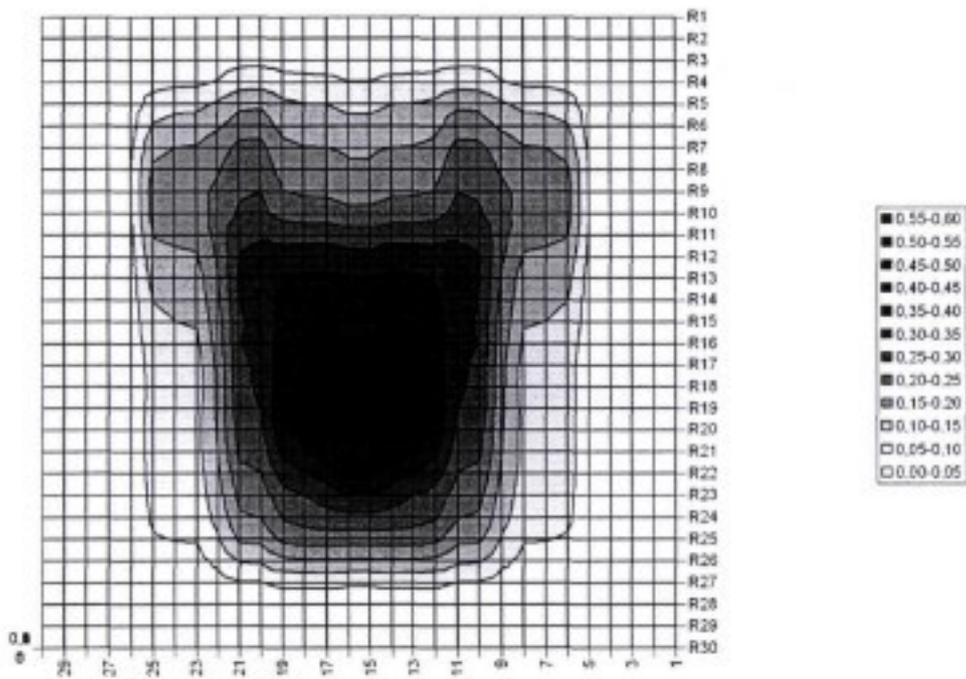


Abbildung 38: Optimale relative Lastverteilung für den Rücken (Männer), bestimmt aus den PKW-Sitzversuchen auf dem Forschungsstuhl (Zahlenwerte in Prozent der Gesamtlast auf die Lehnenfläche)

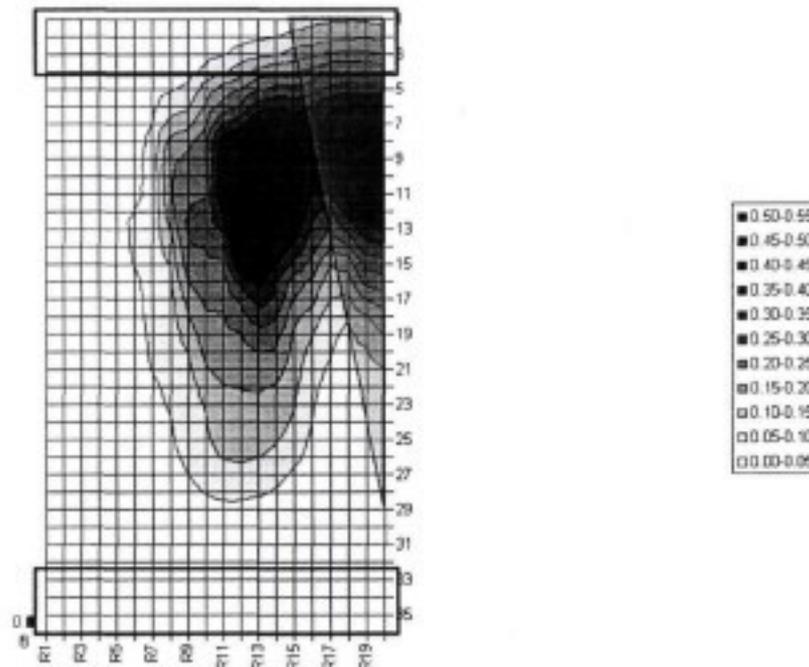


Abbildung 39: Optimale relative Lastverteilung für linke Gesäßhälfte und Oberschenkel (Männer), bestimmt aus den PKW-Sitzversuchen auf dem Forschungsstuhl (Zahlenwerte in Prozent der Gesamtlast auf die Sitzfläche)

PKW - Frauen

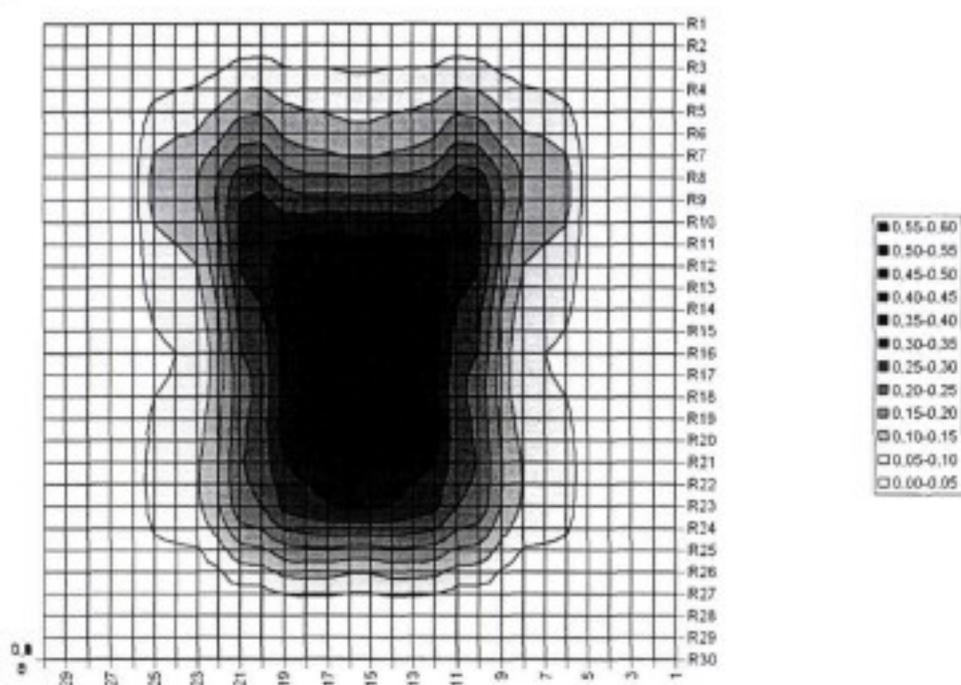


Abbildung 40: Optimale relative Lastverteilung für den Rücken (Frauen), bestimmt aus den PKW-Sitzversuchen auf dem Forschungsstuhl (Zahlenwerte in Prozent der Gesamtlast auf die Lehnenfläche)

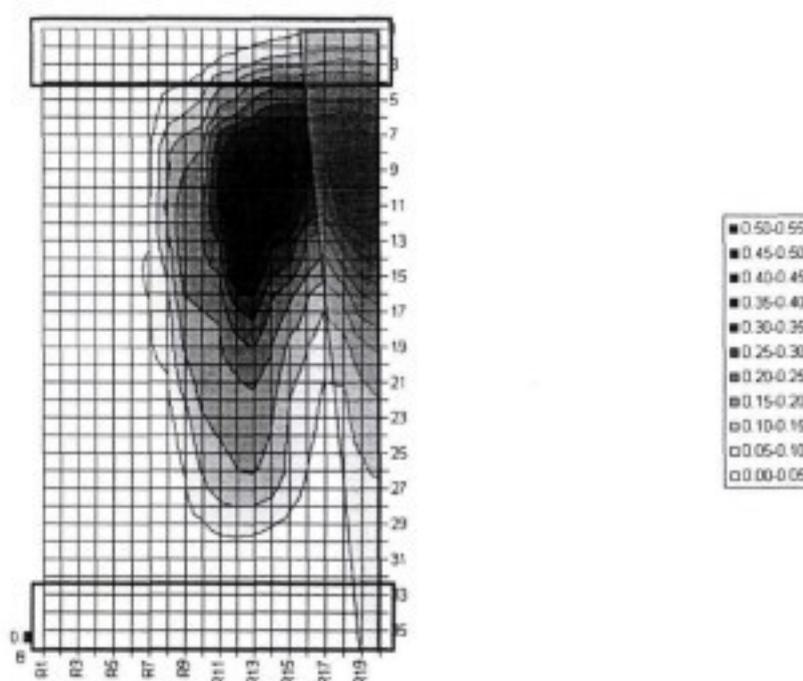


Abbildung 41: Optimale relative Lastverteilung für linke Gesäßhälfte und Oberschenkel (Frauen), bestimmt aus den PKW-Sitzversuchen auf dem Forschungsstuhl (Zahlenwerte in Prozent der Gesamtlast auf die Sitzfläche)

LKW

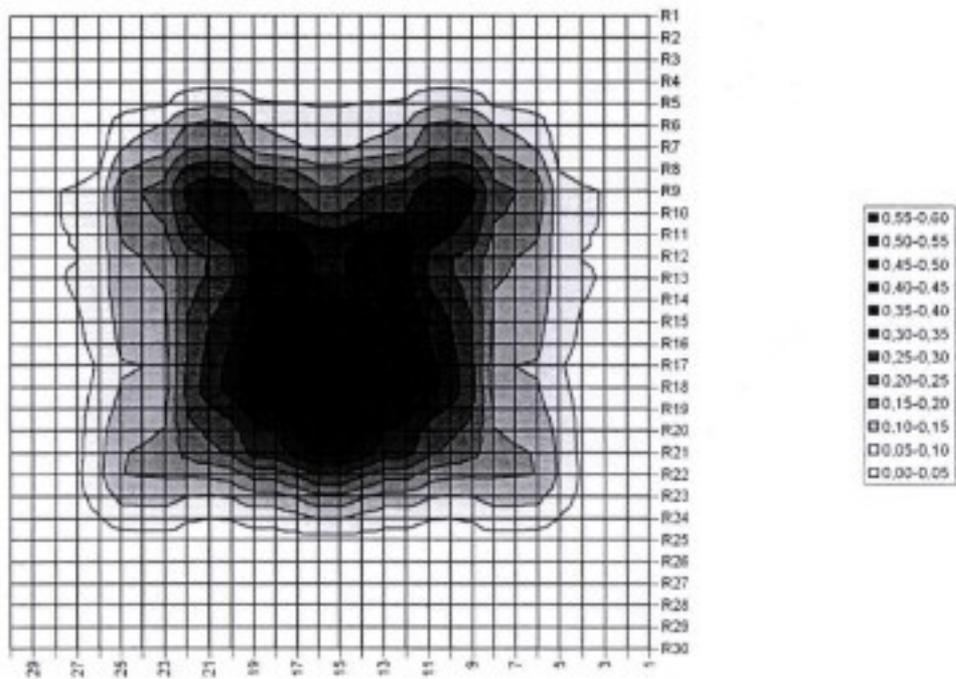


Abbildung 42: Optimale relative Lastverteilung für den Rücken (Männer), bestimmt aus den LKW-Sitzversuchen auf dem Forschungsstuhl (Zahlenwerte in Prozent der Gesamtlast auf die Lehnenfläche)

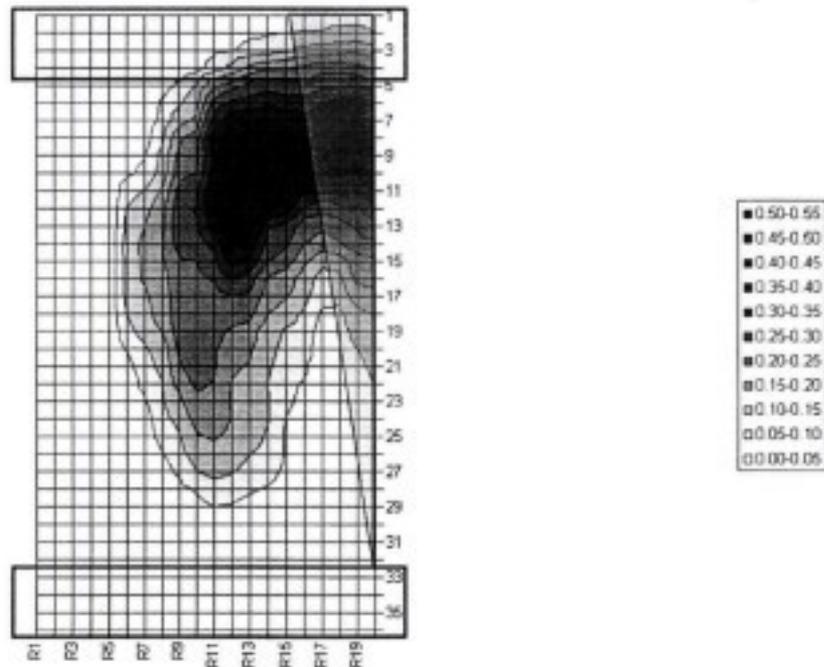


Abbildung 43: Optimale relative Lastverteilung für linke Gesäßhälfte und Oberschenkel (Männer), bestimmt aus den LKW-Sitzversuchen auf dem Forschungsstuhl (Zahlenwerte in Prozent der Gesamtlast auf die Sitzfläche)

Bus-Passagiersitz

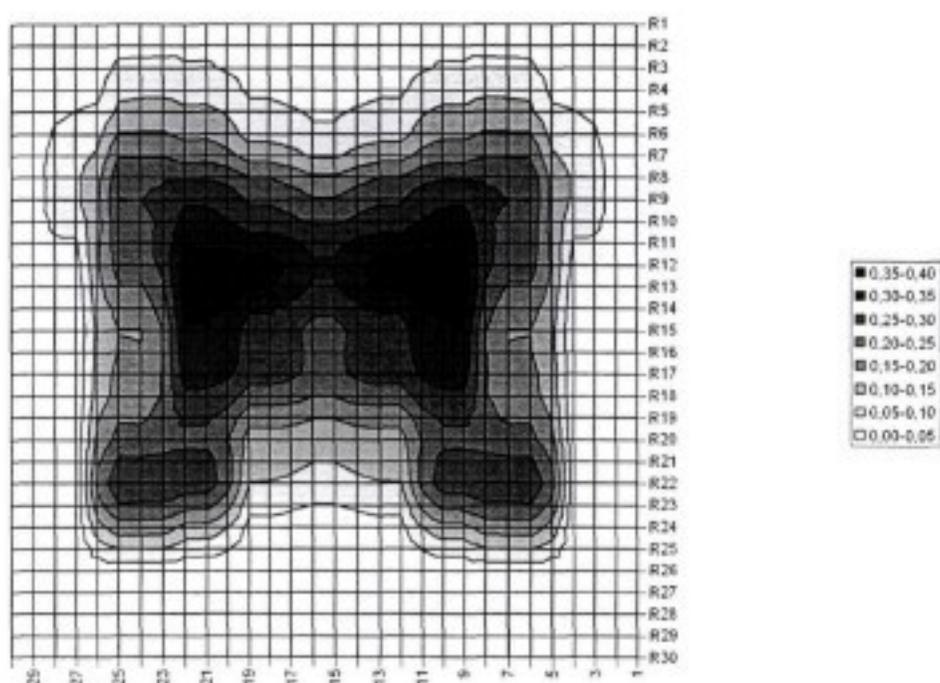


Abbildung 44: Optimale relative Lastverteilung für den Rücken (Männer), bestimmt aus den Bus-Sitzversuchen auf dem Forschungsstuhl (Zahlenwerte in Prozent der Gesamtlast auf die Lehnenfläche)

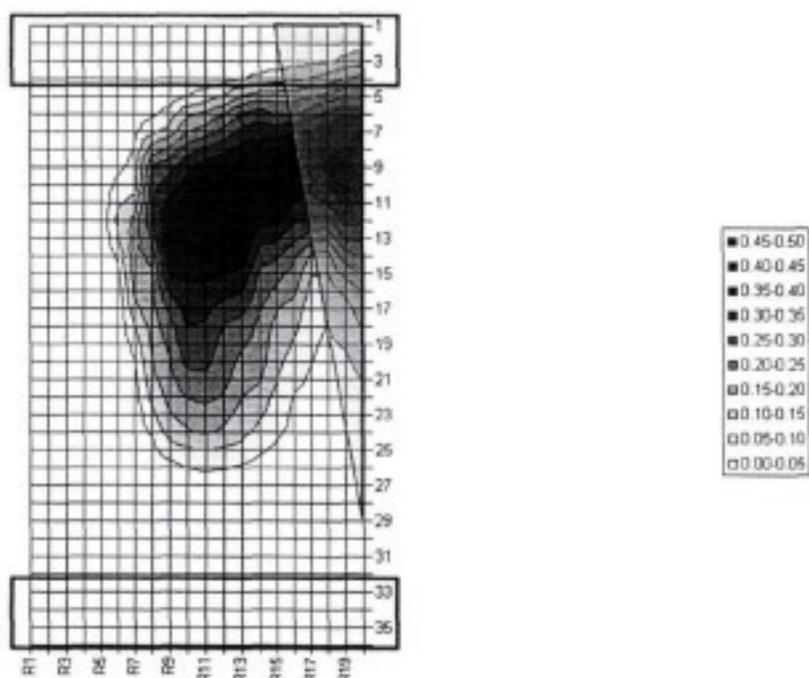


Abbildung 45: Optimale relative Lastverteilung für linke Gesäßhälfte und Oberschenkel (Männer), bestimmt aus den Bus-Sitzversuchen auf dem Forschungsstuhl (Zahlenwerte in Prozent der Gesamtlast auf die Sitzfläche)

Weitere Ergebnisse

Aus den oben dargestellten Lastverteilungen lassen sich weitere Ergebnisse, wie z.B. der Lastverlauf längs oder quer zur Sitzfläche, der Gradientenverlauf, Standardabweichung der Lastverteilungen an jedem Messpunkt usw. ableiten.

9.6.2 Diskussion der Ergebnisse

Generell ist zu beachten, dass die optimalen Lastverteilungen aus den Forschungsstuhldruckverteilungen abgeleitet wurden, welche für die Lehnen- und die Sitzfläche ein Messraster von 9x9 Sensoren aufweisen. Bei der Neurasterung mit dem Bodygrid-Programm wurde ein Raster von 20x36 für jedes Bein (vgl. auch Abbildung 34, Seite 54) bzw. von 30x30 für die Rückenfläche eingesetzt, welches dem 9x9-Raster des Forschungsstuhls überlagert wurde. Diese feineren Rastereinteilungen wurden verwendet, um die Verfälschung der Daten durch die Neurasterung zu minimieren. Ein gröberes Raster hätte aufgrund der bei der Neurasterung durchgeführten Berechnungen eine zu starke Glättung der Daten zur Folge gehabt. Berücksichtigt man die Auflösung der Ausgangsdaten (Forschungsstuhllastverteilungen) kann eine gesicherte Aussage nur für eine kleinere Auflösung als die des dargestellten Rasters gemacht werden. Allerdings ist basierend auf bisherigen Erkenntnissen anzunehmen, dass die Lastverläufe in Gesäß und Rücken keine Sprünge aufweisen und somit auch die im feineren Raster dargestellten Werte verwendet werden können. Kritisch in diesem Zusammenhang könnten sich hier nur die Regionen um die Sitzbeinhöcker und hervorstehender knöcherner Strukturen am Rücken erweisen, da dort hohe Änderungen der Last zwischen Weichteilen und knöcherner Struktur auftreten können, die unterhalb des Auflösungsvermögens des Forschungsstuhles liegen. Bei Betrachtungen bzgl. der Lastverteilungen auf diesen Strukturen am Menschen sollte dieser Sachverhalt immer mit berücksichtigt werden.

PKW

Vergleicht man die optimalen Lastverteilungen des Gesäßes für Männer und Frauen so fällt auf, dass die Kontaktfläche längs des Beines bei den Frauen etwas größer ist als bei den Männern. Es kann hier jedoch keine Aussage darüber gemacht werden, ob dies einen systematischen Unterschied zwischen Männern und Frauen darstellt oder sich dieser Unterschied aus dem Versuchsdesign durch das vorgegebene Package und den beim 50. Perzentil für Männer und Frauen unterschiedlichen Beinlängen so ergibt.

Ansonsten sind die Lastverteilungen ähnlich ausgeprägt. Es ergibt sich ein Maximum nahe der Sitzbeinhöcker. Ausgehend von diesem Maximum fallen die Lastverteilungen in alle Richtungen stetig bis auf null ab.

Die Betrachtung der Standardabweichungen der Lastverteilungen für Rücken und Gesäß macht deutlich, dass die Schwankungsbreite für die optimale Lastverteilung für den Rücken wesentlich größer ist als für das Gesäß. Dies ist auch zu erwarten, da am Rücken wesentlich geringere Kräfte auftreten als am Gesäß, das einen Großteil des Körpergewichtes tragen muss. Somit ergibt sich aus einer gleichgroßen Änderung der relativen Last an der Rückenlehne eine wesentlich kleinere Kraftänderung als am Gesäß.

LKW

Die Anzahl der für die Auswertung verwendeten Druckverteilungen sind beim LKW-Sitz zu gering, um eine allgemeingültige Lastverteilung aufstellen zu können. Die dargestellten Lastverteilungen können deshalb nur als Empfehlung angesehen werden.

Die optimalen Lastverteilungen der Sitz- und Lehnenfläche weisen Ähnlichkeiten mit denen der PKW-Sitze auf. Der belastete Bereich längs der Lehnenfläche ist etwas kleiner als bei den PKW-Sitzen. Dies könnte dadurch erklärt werden, dass durch die geringere Lehnenneigung und Sitzflächenneigung weniger Last über die Lehne aufgebracht werden muss als bei PKW-Sitzen und somit eine kleinere Abstützfläche ausreichend ist.

Die abweichende Form der Lastverteilung auf der Sitzfläche resultiert wahrscheinlich aus Unterschieden in der geometrischen Gestaltung zwischen der Sitzfläche des LKW-Sitzes und der PKW-Sitze. Die Sitzfläche des LKW-Sitzes ist zu den Seitenwangen hin wesentlich enger geschnitten als bei den PKW-Sitzen, somit ergibt sich eine größere Auflagefläche an der Außenseite der Oberschenkel.

Bus

Wie schon beim LKW-Sitz ist die Anzahl der Druckverteilungen beim Bus-Passagier-Sitz zu gering, um eine allgemeingültige Lastverteilung aufstellen zu können. Die dargestellten Lastverteilungen können deshalb nur als Empfehlung angesehen werden.

Bei Betrachtung der Lastverteilungen für den Rücken fällt auf, dass sich diese stark von den PKW-Lastverteilungen unterscheiden. Die Lehne des Bus-Sitzes weist quer zur Lehne eine konkave Wölbung über die ganze Fläche auf. Bei den PKW-Sitzen ist dieser Bereich annähernd eben. Diese Wölbung in Kombination mit der Form des Rückens könnte zu den beobachteten Lastverteilungen führen, bei denen die Last in den Randbereichen des Rückens gegenüber den PKW-Lastverteilungen stark erhöht ist.

Zusätzlich lässt sich sagen, dass die ungewöhnliche Form der Rückenlehne die Ergebnisse der optimalen Lastverteilung für die Lehne in Frage stellt. Die integrierte Kopfstütze zwang die Versuchspersonen in eine stark kyphosierte Haltung. Diese starke Restriktion der Körperhaltung durch die Sitzform lässt den Versuchspersonen nur wenig Spielraum die Druckverteilung an der Rückenlehne zu variieren. Es wird deshalb die Empfehlung gemacht, diese Druckverteilung nicht als Zielrichtung für eine Optimierung zu verwenden und sich eher an der Lastverteilung der PKW-Sitze zu orientieren.

Die optimale Lastverteilung für Sitzfläche des Buspassagiersitzes ähnelt der optimalen Lastverteilung auf den PKW-Sitzen. Allerdings ist die unterstützte Fläche in Sitzlängsrichtung geringer. Dies resultiert vermutlich daraus, dass die Sitzfläche des Bussitzes kürzer ist, als die der PKW-Sitze. Dadurch sind alle gemessenen Lastverteilungen auf diesem Sitz zwangsweise kürzer, was sich dann auch in der optimalen Lastverteilung fortsetzt.

9.6.3 Auswertung der Fragebögen

Es wurde untersucht, ob die Antworten der Versuchspersonen in den Fragebögen (vgl. Abschnitt 8.2.5 bis 8.2.9) mit den Aussagen zum Gesamtdiskomfort bzw. dem Diskomfort in einzelnen Körperbereichen korrelieren. Es ergaben sich nur sehr geringe Zusammenhänge, so dass eine Verwertung im Hinblick auf eine Modellierung nicht sinnvoll ist.

10 Validierungsversuche

Die abgeleiteten optimalen Lastverteilungen für PKWs sollen als Richtlinie für zukünftige Sitzauslegungen dienen. Es muss nun bestätigt werden, dass eine Abweichung von der aus den Versuchsdaten theoretisch hergeleiteten Lastverteilungen zu einer Erhöhung des Diskomforts führt. Hierzu wurden entsprechende Validierungsversuche durchgeführt, die im Folgenden dargelegt werden.

10.1 Versuchsdesign

Die Validierungsversuche wurden mit 6 Versuchspersonen (3 männliche, 3 weibliche) durchgeführt, welche nicht an der Hauptuntersuchung teilgenommen haben. Die Auswahl der Versuchspersonen erfolgte wie in der Hauptversuchsphase so, dass das Alter zwischen 18 und 29 und Körperhöhe und Gewicht möglichst nahe dem 50. Perzentil lagen.

Wichtig bei den Validierungsversuchen war es, möglichst alle Versuchsbedingungen bis auf die Lastverteilung und den Gradientenverlauf konstant zu lassen, um einen Einfluss durch weitere Parameter auszuschließen. Eine Trennung von Lastverteilung und Gradientenverlauf ist aufgrund der direkten Abhängigkeit dieser beiden Größen nicht möglich.

Für die Versuche wurde das Focus-Realsitzmockup verwendet. Das Mockup wurde dahingehend modifiziert, dass Lenkrad und Pedale entfernt und eine Abstellfläche für die Beine montiert wurde.

Der Focussitz wurde in die standardisierte Einstellung gebracht, welche auch in der Hauptversuchsphase verwendet wurde. Um eine Variation des Parameters Lastverteilung zu erreichen, wurde der verwendete Focussitz durch Auflage eines Schaumstoffstreifens mit etwa gleicher Härte wie die des Sitzes modifiziert. Die Abmessungen des Streifens betragen ca. 330 mm x 150 mm x 30 mm. Der Schaumstoffstreifen wurde nacheinander an jeweils 3 verschiedenen Positionen quer auf der Sitzfläche und der Lehnenfläche angebracht, um eine Variation in der Lastverteilung zu erreichen. Somit ergeben sich 6 Versuche mit Sitzmodifikationen. Zum Vergleich wurden 2 Versuche auf dem unmodifizierten Sitz durchgeführt mit dem Ziel den berechneten optimalen Lastverteilungen möglichst nahe zu kommen. Um zu vermeiden, dass die Versuchsperson alleine über die Optik auf die Sitzmodifikationen schließen konnte, wurde der gesamte Sitz mit einem dünnen Tuch bedeckt, so dass jeder Sitz von der äußeren Anmutung nahezu identisch war.

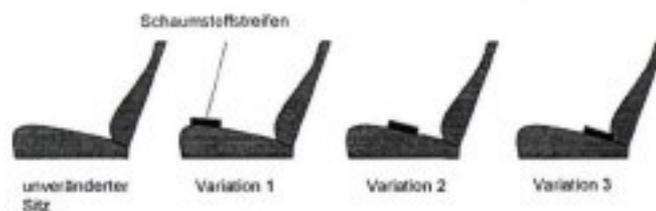


Abbildung 46: Position des Schaumstoffstreifens auf der Sitzfläche

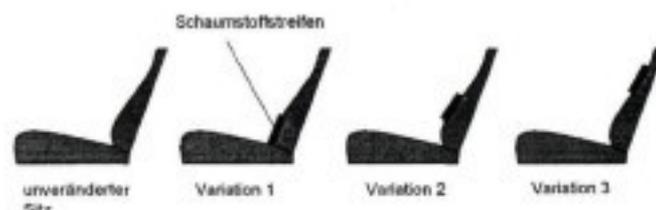


Abbildung 47: Position des Schaumstoffstreifens auf der Lehnenfläche

Zu Beginn der Versuche musste die Versuchsperson den bereits in der Hauptversuchsphase verwendeten Fragebogen zur Erfassung von persönlichen Daten und Gewohnheiten ausfüllen.

Danach wurde die Versuchsperson angewiesen sich auf den bereits vorbereiteten Sitz ohne Modifikationen zu setzen. Der Sitz sollte nun so von der Versuchsperson eingestellt werden, dass die Füße bequem auf der Fußablage liegen. Bei der Position im Sitz ist darauf zu achten, dass der Rücken die Lehne möglichst vollständig berührt. Die Hacke sollte am Übergangspunkt von Fußablage zu Bodenplatte zu liegen kommen. Außerdem sollte die Einstellung so gewählt werden, dass die Oberschenkel locker auf der Sitzfläche aufliegen, so dass weder ein Spalt zwischen Oberschenkel und Sitz entsteht, noch der Schaum am Ende der Sitzfläche zu stark zusammengedrückt wird. Vorversuche haben gezeigt, dass diese Anordnung auf diesem Sitz recht nahe an die hergeleitete „optimale Druckverteilung“ kommt. Das Ergebnis der Sitzeinstellung wurde mit der Druckmessmatte qualitativ überprüft und falls notwendig entsprechend korrigiert.

Die Versuchsperson wurde nun gebeten den Raum zu verlassen, damit sie keine Kenntnis von der Art der Modifikation erhielt. Nach der Modifikation des Sitzes konnte sich die Versuchsperson wieder in den voreingestellten Sitz setzen. Es galten wiederum die Restriktionen für Hacke und Rücken soweit dies am Rücken durch die Modifikation möglich war.

Für die Bewertung des Diskomfortindrucks wurde nicht ein komplettes Diskomfortinterview wie in der Hauptphase durchgeführt, sondern die Versuchspersonen wurden aufgefordert nur den Gesamtdiskomfort für die Lehnen- bzw. Sitzfläche zu äußern.

Nach Durchlauf aller Modifikationen wurde den Versuchspersonen nochmals der Sitz ohne Modifikation präsentiert. Auch für diesen mussten dann Diskomfortwertungen abgegeben werden.

10.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden von Mai bis Juni 2003 in der Versuchshalle des Lehrstuhles für Ergonomie der TU-München durchgeführt. Abbildung 48 zeigt den dabei verwendeten Versuchsaufbau mit Versuchsperson.

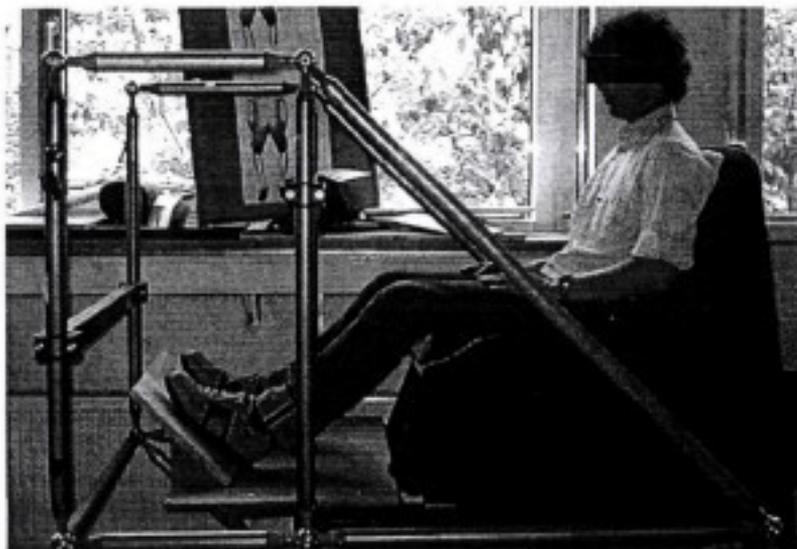


Abbildung 48: Beispiel für die Durchführung der Validierungsversuche

Die Versuche wurden jeweils hintereinander in der gleichen Reihenfolge durchgeführt. Eine vollständige Permutation der Versuchsbedingungen war aufgrund der geringen Versuchspersonenzahl nicht möglich.

Während der Versuchsdurchführung zeigte sich, dass es äußerst schwierig ist, die gewünschten Abweichungen in den Lastverteilungen zu erreichen. Hauptgrund dafür war, dass die Versuchspersonen dazu neigten, der in den Sitz eingebrachten Störung auszuweichen. Dies zeigte sich besonders stark bei den Versuchen am Rücken.

Ebenfalls als schwierig erwies es sich, auf dem unmodifizierten Sitz am Rücken die optimale Lastverteilung zu erreichen, da hier in Gegensatz zum Gesäß kleinste Haltungsänderungen einen großen Einfluss auf die Lastverteilung haben.

10.3 Auswertung

Für die Auswertung wurden die mit dem FSA-System gewonnen Druckverteilungen so konvertiert, dass Sie mit dem Bodygrid-Programm verarbeitbar waren. Im Bodygrid-Programm wurde nun die Auswertung der Druckverteilungen mit den gleichen Gittereinstellungen wie bei den Druckverteilungen aus den Hauptversuchen durchgeführt. Dieser Schritt gewährleistet, dass die Lastverteilungen aus der Hauptphase, die auf dem Forschungsstuhl gewonnen wurden mit den Lastverteilungen aus der Validierungsphase direkt vergleichbar sind.

Zunächst wurden die zweidimensionalen Lastverläufe längs der Sitz- und Lehnenfläche dargestellt und qualitativ miteinander verglichen.

Als numerisches Maß für die Güte der dreidimensionalen Lastverteilungen wird die absolute Differenz zwischen der Validierungslastverteilung und der optimalen Lastverteilung verwendet. D.h. es wird für jede Messstelle die Differenz zwischen optimaler Lastverteilung und gemessener Lastverteilung gebildet und dann die Absolutwerte dieser Differenzen summiert. Die Auswahl dieses numerischen Maßes erfolgte als erste Näherung. Es ist anzunehmen, dass je nach Höhe und Ort einer Abweichung, diese auch unterschiedlich zu gewichten ist und somit ein komplexeres Maß für die Abweichung notwendig ist.

Für die Bestimmung der Unterschiede der Gradienten längs und quer der Lastverteilungen wurde ebenfalls das oben beschriebene numerische Maß herangezogen.

10.4 Ergebnisse

Die qualitative, zweidimensionale Betrachtung der Validierungslastverteilungen längs der Sitzfläche im Vergleich zu den optimalen Lastverteilungen zeigte unter Berücksichtigung der Diskomfortwertungen eindeutig, dass eine starke Abweichung von der optimalen Lastverteilung längs der Sitz- bzw. Lehnenfläche auch entsprechende Diskomfortwertungen zur Folge haben. Umgekehrt haben Lastverteilungen, die nahe an der optimalen Lastverteilung liegen, niedrigere Diskomfortwertungen zur Folge. In Abbildung 49 ist ein Beispiel für diese Betrachtung dargestellt.

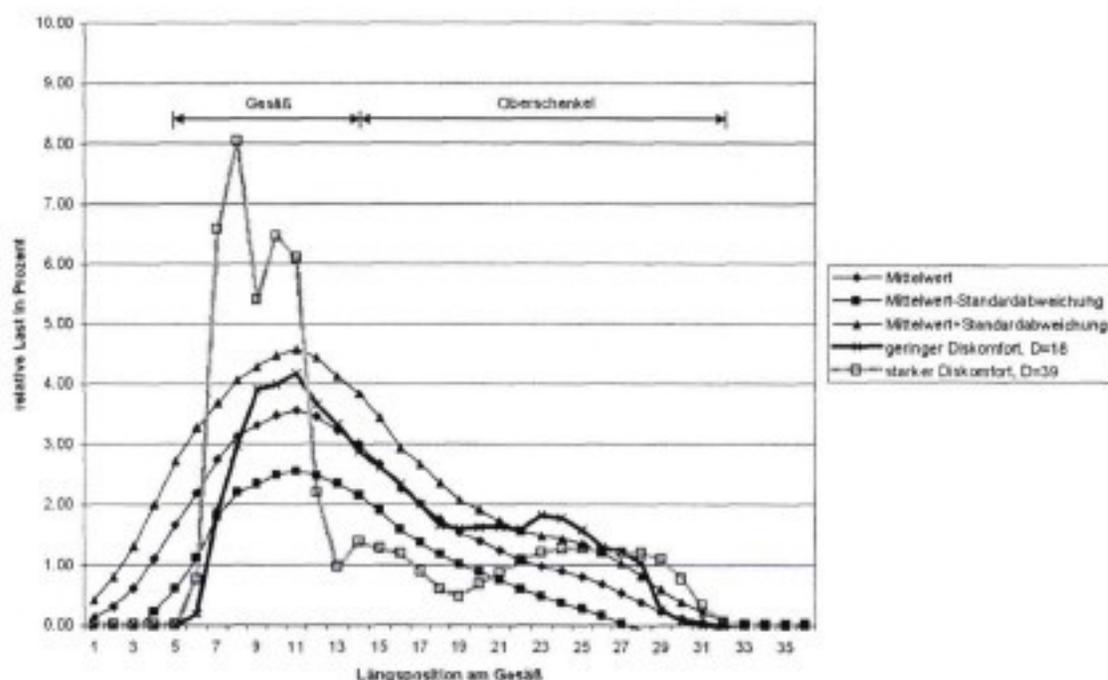


Abbildung 49: Lastverteilungen längs der Sitzfläche mit geringem Diskomfort und hohem Diskomfort von einer Versuchsperson

Die Betrachtung des numerischen Maßes für die Abweichung von der optimalen Lastverteilung zeigte ebenfalls, dass Lastverteilungen, die wenig von der optimalen Lastverteilung abweichen mit niedrigeren Diskomfortwertungen bewertet wurden als Lastverteilungen die stark davon abweichen.

Die oben genannten Beobachtungen zeigten sich für alle Versuchspersonen bei den Validierungsversuchen für Rücken- und Gesäßlastverteilung in gleicher Tendenz, allerdings mehr oder weniger stark ausgeprägt. Diese unterschiedlich starke Ausprägung könnte durch die unterschiedlichen inneren Maßstäbe der Versuchspersonen für die Bewertung von Diskomfort erklärt werden.

Bei den Gesäßlastverteilungen sind die Zusammenhänge deutlicher zu erkennen als bei der Lehnenfläche. Dies war allerdings zu erwarten, da die Kräfte an der Lehnenfläche bedeutend geringer sind als auf der Sitzfläche, so dass eine Änderung der Lastverteilung am Rücken absolut zu einer geringeren Kraftänderung führt als am Gesäß. Dies geht auch konform mit der relativ großen Standardabweichung, die bei der Ermittlung der optimalen Lastverteilung für den Rücken gefunden wurde. In gewissen Grenzen scheint es am Rücken möglich zu sein, die Last zu verschieben, ohne dass sich eine Erhöhung des Diskomforts ergibt.

Weiterhin muss erwähnt werden, dass die numerische Betrachtung den qualitativen optischen Eindruck der Stärke der Abweichung nicht widerspiegelt. Dies könnte, wie bereits erwähnt daran liegen, dass die Position und die Höhe der Abweichung in der Lastverteilung einen Einfluss auf die Diskomfortwertungen haben. Der genaue Zusammenhang zwischen Art und Position der Abweichungen der Lastverteilungen voneinander und dem Diskomfortempfinden könnte nur durch eine größere Versuchsreihe, die auf diesen Aspekt abgestimmt ist, geklärt werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die ermittelten optimalen Lastverteilungen für Rücken und Gesäß als Zielvorgabe für eine Optimierung des Sitzkomforts auf Automobilsitzen als geeignet erscheinen.

11 Praktische Anwendung der Ergebnisse

11.1 Gültigkeitsbereich der optimalen Lastverteilungen

Der Gültigkeitsbereich der Ergebnisse resultiert aus dem Versuchsdesign der Hauptversuche und der Validierungsversuche und erstreckt sich somit streng genommen nur auf die untersuchten Bevölkerungsgruppen (vgl. Abschnitt 9.1.1) und das Spektrum der untersuchten Sitze (vgl. Abschnitt 9.1.2). Es ist allerdings zu erwarten, dass geringe Abweichungen sowohl bzgl. der Spezifikationen der Bevölkerungsgruppen als auch der verwendeten Sitze ähnliche optimale Lastverteilungen liefern. Für stärkere Abweichungen müssen die ermittelten optimalen Lastverteilungen zuerst durch weitere Validierungsversuche bestätigt werden.

11.2 Anwendung

Im Folgenden wird kurz beschrieben, wie die gewonnenen Ergebnisse in der Praxis für die Optimierung von Sitzen verwendet werden können.

Um die Ergebnisse anwenden zu können, sind zunächst Druckverteilungen von Sitzen notwendig, die mit den optimalen Lastverteilungen verglichen werden können. Da wie schon beschrieben die Lastverteilungen bei Personen unter den annähernd gleichen Randbedingungen doch noch erheblich schwanken können, wäre es wünschenswert, eine reproduzierbare Messmethodik für Druckverteilungen einzuführen. Dies könnte z.B. durch einen mit Drucksensoren ausgestatteten Sitzdummy geschehen.

Die gemessenen Druckverteilungen müssen für Gesäß bzw. Lehne auf die Gesamtkraft dieser Fläche bezogen werden. Dadurch erhält man relative Lastverteilungen. Diese sitzbezogenen Lastverteilungen müssen dann in menschenbezogene Lastverteilungen umgewandelt werden. Dies kann manuell oder durch ein Programm, ähnlich dem am Lehrstuhl für Ergonomie verwendeten Bodygrid-Programm geschehen. Bei einer manuellen Umwandlung kann wie folgt vorgegangen werden. Im ersten Schritt müssen in einer maßstabgetreuen Darstellung der Druckmessmatte die Messwerte der Druckmessung aufgetragen werden. Es wird dann das Messgitter für die Neurasterung mit dem entsprechenden Beinöffnungswinkel darüber gezeichnet (analog Abbildung 34, Seite 54). Das Gitter für die Neurasterung ist 20 Zellen breit, was einer Breite von 400 mm entspricht. Die Länge des Gitters für die Neurasterung beträgt 28 Zellen, deren Längsabmessung entsprechend der individuellen Beinlänge der Person skaliert wird. Das Gitter wird jeweils um 4 Zellreihen nach vorne und hinten verlängert. Somit ergeben sich 36 Zellen in Längsrichtung. Für jede Zelle des neuen Rasters kann nun ein darunter liegender Wert des Ausgangsrasters ermittelt werden. Da bei dieser manuellen Vorgehensweise keine Mittelung für die Zellen des Rasters, die sich nur teilweise mit dem Ausgangsraster überschneiden, erfolgt, entsteht ein geringfügiger Fehler bei der Neurasterung. Dieser Fehler kann allerdings bei der praktischen Anwendung unter Berücksichtigung der Auflösung der ermittelten optimalen Lastverteilungen (s.a. Abschnitt 9.6.2) und deren Streubreite vernachlässigt werden.

Die so transformierten Lastverteilungen können nun direkt mit den ermittelten optimalen Lastverteilungen verglichen werden. Dies kann ebenfalls manuell oder über eine entsprechende Software realisiert werden.

Im ersten Schritt sollten die zweidimensionalen Lastverteilungen längs der Sitz- bzw. Lehnenfläche verglichen werden. Zeigen sich hier bereits deutliche Abweichungen vom optimalen Lastverlauf macht es keinen Sinn eine weitergehende Analyse durchzuführen, da die Abweichung in der dreidimensionalen Lastverteilung bestenfalls gleich groß sein kann. Es ist dann am Lastverlauf längs des Sitzes weiter zu optimieren.

Ist der erste Schritt zur Befriedigung gelöst, kann eine weiter gehende Analyse mit den dreidimensionalen Lastverteilungen durchgeführt werden.

Analog zu obiger Vorgehensweise können die dreidimensionalen Lastverteilungen zunächst optisch verglichen werden, um Abweichungen festzustellen. Vereinfacht werden kann dies indem man Schnitte durch die dreidimensionalen Lastverteilungen legt und dann diese zweidimensionalen Lastverteilungen dieser Schnitte auf Abweichungen voneinander überprüft. Als Maß für die Güte der Annäherung an die optimale Lastverteilung kann der 3-D-Lastverteilungsschlauch herangezogen werden, welcher sich aus der Standardabweichung der Messwerte vom Mittelwert ergibt. Innerhalb dieses Schlauches liegen ca. 68 Prozent aller Messwerte der „0-Diskomfort“-Lastverteilungen. Die entsprechenden Daten sind auf der dem Bericht beigelegten CD enthalten.

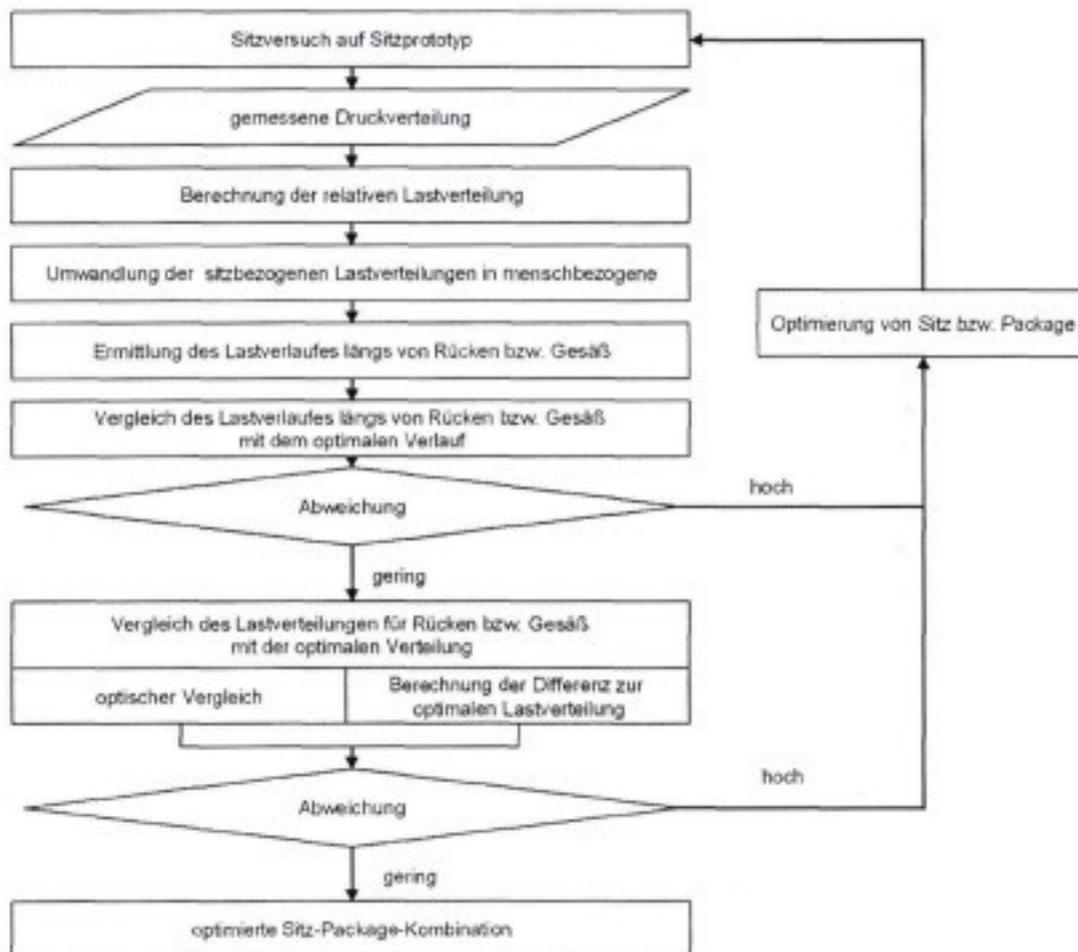


Abbildung 50: Ablauf bei der Anwendung der Ergebnisse zur Optimierung eines Sitzes bzw. Packages

Weiterhin kann als numerische Größe der Unterschied der gemessenen von der optimalen Lastverteilung ermittelt werden, indem für jede Messstelle die Differenz zwischen optimaler und gemessener Lastverteilung gebildet wird. Die Summe der Absolutwerte der Differenzen ist dann ein Maß für die Abweichung von der optimalen Lastverteilung. Analog können diese Kennwerte auch für die Gradienten längs und quer zur Sitzfläche berechnet werden.

Zeigen sich in der detaillierten Betrachtung der Lastverteilung noch Abweichung können weitere Optimierungszyklen durchgeführt werden, bis keine Verbesserung mehr zu erreichen ist.

Bei der oben beschriebenen Vorgehensweise sollten immer die in Abschnitt 9.6 gemachten Aussagen bzgl. der Auflösung der Lastverteilungen Berücksichtigung finden.

Die oben beschriebene Vorgehensweise ist in Abbildung 50 (Seite 71) zur Übersicht nochmals als Flussdiagramm dargestellt.

12 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projektes sollte ein Modell entwickelt werden, welches es erlaubt, Sitzdruckverteilungen von Personen um das 50. Perzentil bezüglich des Diskomforts zu bewerten. Dies sollte durch ein Regressionsmodell realisiert werden, das subjektive Aussagen von Versuchspersonen mit objektiven Parametern der Druckverteilungen kombiniert.

Der Beginn der Vorversuchsphase diente dazu, alle für die Versuche benötigten Vorbereitungen zu treffen. Es wurde eine Alterung der von den Automobilherstellern bereitgestellten Sitze durchgeführt. Die Realsitze wurden mit dem Forschungsstuhl vermessen, damit diese wiederum auf dem Forschungsstuhl simuliert werden können. Ebenfalls erfolgte der Bau der Mockups für Realsitz- und Forschungsstuhlversuche.

In der Vorversuchsphase wurde mit einem reduzierten Probandenkollektiv von sechs Männern überprüft, ob das gewählte Versuchskonzept für die gestellte Aufgabe geeignet war. Es wurden hierzu Langzeitversuche auf drei PKW-Sitzen und Kurzzeitversuche auf dem Forschungsstuhl, der es erlaubt einen großen Bereich an verschiedenartigen Sitzen zu simulieren, durchgeführt. Die Auswertung der Vorversuche zeigte tendenziell, dass die Vorgehensweise grundsätzlich für die Erreichung des Projektzieles geeignet schien. Allerdings wurden auch einige Punkte sichtbar, welche als Grundlage für die weitere Optimierung des Versuchskonzeptes dienten.

Nach einer vollständigen Überarbeitung des Versuchskonzeptes insbesondere einer Neugestaltung der Befragung der Versuchspersonen wurde zur Hauptphase übergegangen.

Die Hauptversuche wurden mit einem Probandenkollektiv von 24 Männern und 24 Frauen durchgeführt. Die Versuchspersonen wurden definiert nach Körperhöhe, Körpergewicht und Alter ausgewählt. Bzgl. der Körpermaße wurden die Probanden so gewählt, dass sie möglichst nahe am 50. Perzentil lagen.

Im Rahmen der Hauptversuche wurden Kurzzeitsitzversuche auf Realsitzen und dem Forschungsstuhl durchgeführt. Während der Versuche wurden Druckverteilungen und subjektive Wertungen der Versuchspersonen erfasst. Im Rahmen der Hauptversuche wurden insgesamt 1344 Sitzversuche durchgeführt.

Während der Versuche in der Hauptphase wurden zur Kontrolle des Projektablaufes laufend Vorauswertungen durchgeführt, jeweils mit den bis dahin vorhandenen Daten.

Die erste Vorauswertung zeigte keine verwertbaren Zusammenhänge zwischen subjektiven Wertungen der Versuchspersonen und objektiven Parametern der Druckverteilungen. Deshalb war es notwendig, in einer zweiten Vorauswertung eine detaillierte Betrachtung der Versuchsergebnisse durchzuführen.

Auch die zweite Vorauswertung zeigte keine verwertbaren Zusammenhänge zwischen subjektiven und objektiven Messwerten. Eine detaillierte Betrachtung der subjektiven Wertungen ergab, dass bei dem gewählten Versuchsdesign die verwendeten Sitze zu ähnlich sind. Dies hatte zur Folge, dass sich die subjektiven Wertungen für die verschiedenen Varianten der Sitzversuche praktisch nicht unterschieden. Der Weg zum angestrebten Ziel musste deshalb von Grund auf neu überdacht werden.

Da bei einem großen Anteil der Versuche die Versuchspersonen keinen oder nur sehr geringen Diskomfort gewertet hatten, wurde die Idee entwickelt, aus den Versuchen für die Rückenlehne und für die Sitzfläche eine „optimale Lastverteilung abzuleiten, welche dann als Vorgabe für die Sitzentwicklung bzw. Sitzbewertung dienen sollte.

Für die Auswertung mit dieser Zielrichtung wurden die erfassten sitzbezogenen Druckverteilungen mit einer speziellen Software auf Beine und Rücken der Versuchspersonen gemappt, um so personenbezogene Druckverteilungen zu erhalten. Diese Datenaufbereitung erlaubte es, die Daten der einzelnen Versuchspersonen zu

einer optimalen Lastverteilung für Rücken bzw. Gesäß zusammenzuführen. Weitergehende statistische Analysen zeigten, dass es notwendig ist, Lastverteilungen für Männer und Frauen getrennt zu erstellen, da statistisch signifikante Unterschiede bestehen.

Die Validierung der Lastverteilungen mit Hilfe von sechs weiteren Versuchspersonen zeigte, dass Lastverteilungen, die näher an der optimalen Lastverteilung liegen, weniger Diskomfort aufweisen als solche die weiter entfernt von dieser liegen. Damit wurde die Anwendbarkeit des Modells belegt.

Um die praktische Anwendung der Ergebnisse zu erleichtern, wurde zu diesem Thema ein kurzer Leitfaden (siehe Abschnitt 11) erstellt.

13 Ausblick

Im Rahmen dieses Projektes wurde mit der Ableitung einer optimalen Lastverteilung bereits ein entscheidender Schritt für die Bewertung und Optimierung von Automobilsitzen getan.

Allerdings gibt es noch eine Vielzahl ungelöster Fragestellungen, die in weiteren Projekten betrachtet werden könnten.

Die im aktuellen Projekt ermittelten Lastverteilungen gelten vorerst nur für das untersuchte Probandenkollektiv mit den ausgewählten Körpermaßen um das 50. Perzentil. Im Weiteren wäre zu überprüfen, ob sich die Untersuchungsergebnisse auch auf andere Perzentile bzgl. der Körpergröße und des Gewichtes übertragen lassen. Ebenfalls zu untersuchen ist, ob die Wahl der Altersgruppe einen Einfluss auf die optimale Lastverteilung ausübt.

Auf Basis der in diesem Projekt gewonnenen Daten kann die Aussage gemacht werden, dass bei Abweichungen von der optimalen Lastverteilung zunehmend Diskomfort auftritt. Über den Zusammenhang zwischen der Höhe der Abweichungen und einer Gesamtdiskomfortnote bzw. der Diskomfortnote in einem bestimmten Körperbereich kann aber keine Aussage gemacht werden. Gegenstand weiterer Untersuchungen könnte deshalb sein, in welchen Körperbereichen eine Abweichung oder eine Kombination von Abweichungen als besonders störend empfunden werden.

Im Hinblick auf die Entwicklung einer objektiven Messmethode für den Diskomfort auf PKW-Sitzen sollte ein Messwerkzeug konstruiert werden, das es erlaubt, reproduzierbar menschenbezogene Lastverteilungen beim Sitzen zu erzeugen. Dies könnte durch einen deformierbaren Sitzdummy realisiert werden, welcher an der Hautoberfläche mit Sensoren ausgestattet ist. Die so gewonnenen Messwerte könnten dann für die Prognose des Diskomforts mit den in diesem Projekt erstellten Lastverteilungen verglichen werden.

Im Laufe des Projektes hatte sich gezeigt, dass die gewählten Sitze nicht unterschiedlich genug waren, um ein Regressionsmodell für den Zusammenhang zwischen Diskomfortempfinden und gemessenem Druck ableiten zu können. Es besteht allerdings weiterhin die Annahme, dass die Ableitung eines solchen Regressionsmodells möglich ist, wenn die Unterschiede zwischen den Sitzen extremer gewählt werden. Diese Annahme wird gestützt durch eine Untersuchung am Lehrstuhl für Ergonomie, auf die in diesem Rahmen nicht näher eingegangen werden darf. Es ist allerdings fraglich, ob eine solche Vorgehensweise überhaupt sinnvoll ist, da man sich mit einer stärkeren Variation der Sitze weit von den bestehenden, annähernd optimalen Sitzen entfernen würde.

Durch den Arbeitskreis angeregte Demonstrationsversuche zeigten, dass die Körperhaltung einen entscheidenden Einfluss auf die Lastverteilung und damit auf den Diskomfort hat. Im Hinblick auf eine Optimierung der Lastverteilung sollte untersucht werden, wie die Körperhaltung die Lastverteilung beeinflussen kann. Diese Fragestellung ist besonders wichtig für das Zusammenspiel zwischen Package und Sitzgestaltung

Die oben aufgeführten Beispiele für weitere Forschungsvorhaben stellen nur einen kleinen Ausschnitt aus den noch offenen Fragestellungen dar. Aufgrund seiner hohen Komplexität wird das Sitzen und der damit verbundene Diskomfort noch Gegenstand zahlreicher Untersuchungen sein müssen, um alle Zusammenhänge aufzudecken.

14 Literatur

- ANDERSSON, MURPHY, ÖRTENGREN, NACHEMSON: The Influence of Backrest Inclination and Lumbar Support on Lumbar Lordosis. Spine, 1978
- AUSTRALIAN WOUND MANAGEMENT ASSOCIATION, PRESSURE ULCER INTEREST SUB-COMMITTEE, Clinical Practice Guidelines for the Prediction and Prevention of Pressure Ulcers, 2001
- AUTOMOBIL ENTWICKLUNG, Virtueller Fahrkomfort, Jan., 2000 Seite 96-97
- BADER D.L., HAWKEN M.B., Pressure distribution under ischium normal subjects, J. Biomed. Eng., Vol. 8, 1986, Seite 353-357
- BALZULAT, J.: Ein holistischer Versuchsansatz zum Sitzverhalten. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2000
- BENETT L., KAVNER D., LEE B.K., TRAINOR F.A., Shear vs Pressure as Causative Factors in Skin Blood Flow Occlusion, Arch Phys Med Rehabil Vol. 60, July, 1979, Seite 309-314
- BERTELSMANN VERLAGSGRUPPE International GmbH, Der Mensch - Körper, Geist, Gesundheit, 1984
- BORTZ, DÖRING: Forschungsmethoden und Evaluation. Springer Verlag, 1995
- BOUCSEIN W., Psychophysiologische Meßmethoden in: GRAF S., HOLLING H. & NICHOLSON N. (Hsg.), Arbeits- und Organisationspsychologie, Internationales Handbuch in Schlüsselbegriffen, München: Psychologie Verlags Union, 1989 Seite 389-396
- BRANTON P., Backshapes of seated persons-how close can the interface be designed?, Applied Ergonomics, June, 1984, 105-107
- BUBB, H.; Skriptum zur Vorlesung Produktergonomie, Lehrstuhl für Ergonomie der TU München, 2003
- BUBB H., Ergonomie und Verkehrssicherheit, Lehrstuhl für Ergonomie der TU München Herbert Utz Verlag München, 2000, ISBN 3-89675-934-5, Seite 141-148
- COELHO D. A., DAHLMAN S., A pilot evaluation of car seat side support: Leading to a redefinition of the problem, Int. Journal of Industrial Ergonomics, 24, 1999, Seite 201-210
- CONGELTON J.J., AYOUB M.M., SMITH J.L., The determination of pressures and patterns for the male human buttocks and thigh in sitting utilizing conductive foam, International Journal of Industrial Ergonomics, 2, 1988, Seite 192-202
- DIEBSCHLAG W., Anatomisch-physiologische Formgebung und Polsterung von Fahrzeugsitzen, Seite 54 -69
- DIEBSCHLAG W., HEIDINGER F., DUPUIS H., HARTUNG E., MEILLER H., Ergonomie des Sitzens: Arbeitsmedizinische und technische Aspekte Sitzgestaltung (Die Bibliothek der Technik Band 68), Verlag Moderne Industrie, 1992, ISBN 3-478-93067-7
- DIEBSCHLAG W., HEIDINGER F., Sitzkomfort in Kraftfahrzeugen (Kfz), Umdruck Lehrstuhl, Seiten 1-9
- DIESCHLAG W., Skriptum zur Vorlesung Arbeitsmedizin von Prof. Dr. med. Dr. Ing. Wilfried Diebschlag, LfE (Lehrstuhl für Ergonomie) der TU München
- EBE K., GRIFFIN M.J., Factors affecting static seat cushion comfort, Ergonomics, Vol. 44 (10), 2001, Seite 901-921
- EBE K., GRIFFIN M.J., Qualitative models of seat discomfort including static and dynamic factors, Ergonomics, Vol. 43 (6), 2000, Seite 771-790

- EBE K., GRIFFIN M.J., Quantitative prediction of overall seat discomfort, *Ergonomics*, Vol. 43 (6), 2000, Seite 791-806
- ESTERMANN: Komfortmodellierung für den 3D-Softdummy RAMSIS unter realen Fahrbedingungen. Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 1999
- FENETY, PUTNAM, WALKER: In-chair movement: validity, reliability and implications for measuring sitting discomfort. *Applied Ergonomics*, Vol.31, 2000
- GARRET T.K., NEWTON K., STEEDS W., *The motor vehicle 13 th edition*, Reed Educational and Professional Publishing Ltd, Artikel 36.21-Seating & 36.22-The pedal controls, 2001, Seite 952-955
- GOONETILLEKE R.S., Designing to minimize discomfort, *Ergonomics in Design*, Vol. 6, No. 3, July, 1998, Seite 12-19
- GOONETILLEKE R.S., ENG T.J., Contact area effects on discomfort, *Proceedings of the human factors and ergonomics society 38 th annual meeting*, Santa Monica, CA:Human Factors Society, 1994, Seite 688-690
- GOONETILLEKE R.S., FEIZHOU S., A methodology to determine the optimum seat depth, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 27, 2001, Seite 207-217
- GYI D. E., PORTER J. M., Interface pressure and the prediction of car seat discomfort, *Applied Ergonomics*, 1999, 30, Seite 99-107
- HABSBURG S. & MDDENDORF L., *Calibrating Comfort: Systematic Studies of Human Responses To Seating*, General Motors Design Staff, G.M. Technical Center, Warren, Michigan 48090-9030, USA, Seite 214-222
- HERTZBERG, H.T.E.: Seat comfort. In R. Hansen, *Annotated Bibliography of Applied Physical Anthropology in Human Engineering* (S. 279-300). Dayton, Ohio, 1958
- HIROSHI U., TAKAOKI T., SHINICHI U., FUMITAKA Y., EIJI I., YOSHIHISA Y., NOBUHIRO H., AKIHIKO K., KUNIHARU N., HIDEKI U., Low back load in two car driver seats, *Int. Journal of Industrial Ergonomics*, 1997, 20, Seite 215-222
- INAGAKI H., TAGUCHI T., YASUDA E., IIZUKA Y., *Evaluation of Riding Comfort: From the Viewpoint of the Interaction of the Human Body and Seat for Static, Dynamic, Long Time Driving*, Human Factors in 2000: Driving, Lighting, Seating Comfort, and Harmony in Vehicle Systems. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania, USA, Publication No.SP-1539. Available from American Technical Publishers, Hitchin, Hertfordshire, 2000, ISBN: 0-7680-0589-2, Seite 197-201
- KAMIJO K., TSUJIMURA H., OBARA H., KATSUMATA M., Evaluation of seating comfort, Central Engineering Laboratories, Nissan Motor Co., 820761, Society of Automotive Engineers, 1983, Seite 2615-2620
- LEE J., FERRAIUOLO P., Seat Comfort, Ford Company, SAE Technical Paper Nr. 930105, 1993
- LIM S., CHUNG M. K., JUNG J., NA S. H., The effect of lumbar support prominence on drivers comfort and body pressure distribution, Department of Industrial Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang, Republic of Korea
- MASLOW A.H.: *Motivation und Persönlichkeit*. Olten und Freiburg im Breisgau. Walter Verlag, 1978
- MILIVOJEVICH, STANCIU, RUSS, BLAIR, VAN HEUMEN, Psychometric and body pressure distribution to automotive seating comfort, SAE Publication-Nr.: SP-1539 SAE Technical Paper Series 200-01-0626, Reprint von: Human Factors in 2000: Driving, Lighting, Seating, Seite 175-181

- MOES C.C.M., HORVÁTH I., Ergonomics considerations for the conceptualization of the shape of body supports, Delft University of Technology, Subfaculty of Industrial Design Engineering, Jaffalaan 9, 2628BX Delft, Netherlands
- NG D., CASSAR T., GROSS M., Evaluation of an intelligent seat system, Applied Ergonomics, Vol. 26 (2), 1995, Seite 109-116
- PARRAMÓN J.M., Handbuch Anatomie, Akt, Selbstportrait, Sonderausgabe Gondrom Verlag, Bindlach, 1991, ISBN: 3-8112-0875-6
- RANHART, M.: Statischer Sitzkomfort. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2002
- REED M.P., LEE N.S., SAITO M. KAKISHIMA Y., SCHNEIDER L.W., An Investigation of Driver Discomfort and Related Seat Design Factors in Extended-Duration Driving, SAE-Paper No. 910117, 1991
- REDDY N.P., COSHRAN G.V.B., KROUSKOP T.A., Interstitial fluid flow as a factor in decubitus ulcer formation, J. Biomech., 1981, 14, Seite 879-881
- REDDY N.P., PATEL H.D, COSHRAN G. V. B., BRUNSKI J., Model experiments to study the stress distributions in a seated buttock, Journal of Biomechanics, Volume 15, No. 7, Seite 493-504, 1982
- REYNOLDS H.M., Automotive seat design for sitting comfort
- RILEY S. BADER D.L., Biomechanical measurements of back shape and interface pressures in unsupported sitting, Clin. Biomech., 3, No. 2, 1988
- ROSEMAYER B., Die Arbeitshaltung „Sitzen im Auto“ aus orthopädischer Sicht, ANHANG, Seite 70-77
- RÜHMANN H., Ergonomie I (für MW), Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, Juli, 1996
- S.A.D. GmbH, Glasklar-Welt des Wissens, CD-ROM: Der Mensch 3D, Ulm, 1997
- SAUERWEIN T., Diplomarbeit, TU Berlin, ISS Fahrzeugtechnik
- SCHMIDT R., THEWS G., Psychologie des Menschen, 23. Auflage, Seite 234-248 sowie Seite 207-209, Springer-Verlag, ISBN 3-540-16685-8, 1987
- SHEN W., GALER I.A.R., Development of a pressure related assessment model of seating discomfort, Proceedings of the human factors and ergonomics society 37 th annual meeting-1993, 2, 1993, Seite 831-835
- SHEN W., PARSONS K.C., Validity and reliability of rating scales for seated pressure discomfort, Int. Journal of Industrial Ergonomics, 1997, 20, Seite 441-461
- THAKURTA K., KOESTER D., BUSH N., BACHLE S., Evaluating Short and Long Term Seating Comfort, Human Factors in Vehicle Design: Lighting, Seating, and Advanced Electronics. Society of Automotive Engineers, Warrendale, Pennsylvania, USA, Publication No.SP-1088, SAE Paper-No.: 950144, Seite 33-37, 1995
- THOMAS R.E. Jr. , CONGLETON J.J., HUCHINGSON R.D., WHITELEY J.R., RODRIGUES C.C., An investigation of relationships between driver comfort, performance and automobile seat type during short term driving tasks, Int. Journal of Industrial Ergonomics, 1991, 8, Seite 103-114
- TREASTER D., MARRAS W.S., Measurement of seat pressure distributions, Human Factors, 29 (5), Seite 563-575, 1987
- VERGARA M., PAGE Á., Relationship between comfort and back posture and mobility in sitting-posture, Applied Ergonomics 33(2002), Seite 1-8, 2002

WOUND CARE ASSOCIATION OF NEW SOUTH WALES INC., Pressure Ulcer Prevention Guidelines – an Expert Consensus Statement, August 2000, www.clininfo.health.nsw.gov.au/wcansw/

WU X., RAKHEJA S., BOILEAU P.-É., Distribution of human-seat interface pressure on a soft automotive seat under vertical vibration, *Int. Journal of Industrial Ergonomics*, 20, 1999, Seite 545-557

WU X., RAKHEJA S., BOILEAU P.-É., Study of human-seat interface pressure distribution under vertical vibration, *Int. Journal of Industrial Ergonomics*, 21, 1998, Seite 433-449

YAMAZAKI N., Analysis of sitting comfortability of driver's seat by contact shape, *Ergonomics*, Vol. 35 (5/6), 1992, Seite 677-692

ZHANG L., HELANDER M.G., DRURY C.G., Identifying factors of comfort and discomfort in sitting, *Human Factors*, 38 (3), 1996, Seite 377-389

Dynamischer Sitzkomfort

1 Einleitung

Das menschliche Schwingungskomfortempfinden im Fahrzeug ist für das Wohlbefinden und damit für die Zufriedenheit des Kunden mit dem Produkt „Auto“ von zentraler Bedeutung. Für eine zielgerichtete Entwicklung in dieser Hinsicht ist die Kenntnis des menschlichen Schwingempfindens Voraussetzung. Um den Entwicklungsprozess effektiver zu gestalten und den Komfort mittels objektiven Kriterien messen zu können, wird vom Arbeitskreis „Schwingungsdummy“ die Entwicklung eines „Komfortdummys“ angestrebt. Um Informationen über die notwendigen Messgrößen dieses Dummys zu gewinnen sowie entsprechende Objektivierungsmodelle zu entwickeln, wurde vom Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der TU Braunschweig das Schwingkomfortempfinden und vom Lehrstuhl für Ergonomie (LfE) der TU München das statische Sitzkomfortempfinden untersucht. Basis für das Modell des Schwingungskomforts sollten reale Fahrzeugschwingungen und deren subjektive Bewertung bilden. Dazu wurden Fahrversuche mit mehreren Fahrzeugen durchgeführt, um repräsentative Anregungen zu ermitteln und subjektive Beurteilungen im Realfahrzeug durchzuführen. Für weitere Untersuchungen wurden die so ermittelten Fahrzeugbewegungen auf einen mehraxialen servo-hydraulischen Sitzprüfstand des IfF übertragen. Die Versuche wurden getrennt für Personenkraftwagen und Nutzfahrzeuge durchgeführt. Im Rahmen eines Vorprojektes war der Nachweis zu erbringen, dass die geplante Vorgehensweise zur Erreichung des Projektzieles geeignet ist.

Der Bericht enthält die Darstellung der Vorgehensweise zur Versuchsdurchführung, der Auswertung sowie der sich daraus ergebenden Ergebnisse.

2 Vorprojekt

Im Rahmen eines Vorprojektes war der Nachweis zu erbringen, dass die geplante Vorgehensweise zur Erreichung des Projektzieles geeignet ist. Dabei gewonnene Erkenntnisse sollten bei der Durchführung der Hauptversuche berücksichtigt werden. Der Versuchsumfang des Vorprojektes umfasste die erste Planung des Versuchsablaufes für Fahr- und Prüfstandsversuche für die PKW-Untersuchungen sowie die entsprechende Durchführung mit geringer Versuchspersonenanzahl. Die Auswertung der gewonnenen Daten erfolgte in einem zur Überprüfung der Zielerreichung ausreichenden Umfang.

Als Ziele des Vorprojektes waren definiert:

- Übertragung der translatorischen Fahrzeugbewegungen auf den Prüfstand
- Gleiche Subjektivbeurteilung von Fahrversuchs- und Prüfstandsanregung
- Erster Nachweis der Korrelation objektiver Kennparameter mit den Subjektivnoten

Diese Ziele wurden erreicht. Eine genaue Darstellung des Inhaltes und der Ergebnisse des Vorprojektes liegt in einem eigenen Bericht zum Abschluss des Vorprojektes vor. Die aus dem Vorprojekt abgeleiteten Verfahren und Vorgehensweisen sind jedoch in diesem Bericht im Rahmen der Beschreibung der Hauptversuche enthalten.

3 Fahrversuche Pkw

Der Versuchsumfang gliedert sich in zwei wesentliche Abschnitte:

- Vorbereitung der Fahrversuche
- Durchführung der Fahrversuche

3.1 Vorbereitung der Fahrversuche

Im Rahmen der Projektplanung erfolgte eine Auswahl von drei Fahrzeugen. Um das Gültigkeitsspektrum des späteren Komfortmodells möglichst groß anzulegen, sollten die drei Fahrzeuge verschiedenen Klassen angehören. Als Vertreter der Kleinwagen wurde ein Opel Corsa, als Vertreter der unteren Mittelklasse ein Ford Focus und als Vertreter der oberen Mittelklasse ein Mercedes E320 ausgewählt. Die genauen Spezifikationen der Fahrzeuge sind im Anhang Tabelle 11.1 aufgeführt. Um Einflüsse durch unterschiedliche Sitzeigenschaften bei den Versuchen zum dynamischen Sitzkomfort des Instituts für Fahrzeugtechnik (IfF) und den Versuchen des Lehrstuhls für Ergonomie (LfE) auszuschließen, wurden die in den Fahrzeugen vorhandenen Fahrersitze gegen neue, für diese Versuche speziell vorbereitete Sitze ausgetauscht. Diese Sitze wurden dann für alle weiteren Versuche im Rahmen des Projektes verwendet. Zur Durchführung der Fahrversuche wurde von der Ford-Werke AG das Testgelände in Lommel, Belgien zur Verfügung gestellt. Vor den eigentlichen Fahrversuchen mit Testpersonen wurde eine Voruntersuchung durchgeführt, bei der die zur Verfügung stehenden Strecken auf dem Testgelände in Hinblick auf ihre Eignung als Bewertungsstrecke untersucht und ein Versuchsplan erstellt wurde. Grundlegende Kriterien für eine zur Komfortbewertung geeignete Strecke waren ein weitgehend gerader Streckenverlauf mit möglichst gleichmäßiger rein stochastischer Anregung und eine ausreichend lange Bewertungszeit. Die Anregungsprofile sollen dabei den Komfort- bis Schlechtwegbereich abdecken. Der Bereich der erforderlichen Effektivwerte der Beschleunigung in z-Richtung wurde auf $0,3\text{--}1,4\text{ m/s}^2$ in einem Frequenzband von $0,1\text{--}30\text{ Hz}$ festgelegt. Ein weiteres Kriterium für die Streckenauswahl ist eine möglichst kurze Fahrzeit zwischen den einzelnen Bewertungsstrecken, da der Mensch Schwingungseindrücke nur kurzzeitig speichern kann. Abschließende Bedingung ist die sowohl messtechnische als auch subjektive Unterscheidbarkeit der Strecken.

Anhand dieser Kriterien wurden vom IfF die in Tabelle 3.1 aufgeführten Strecken ausgewählt und vom Arbeitskreis bestätigt. Im Weiteren werden nur noch die IfF-Streckenbezeichnungen verwendet.

Streckenname (Ford)	Strecken-Nr. (Ford)	Bez. IfF	Fahrgeschwindigkeit
Outer Durability Road (1.Hälfte)	10	10.1	100 km/h
Outer Durability Road (2.Hälfte)	10	10.2	100 km/h
Pecking Stones	11	11.1	60 km/h
Blauwe Kei	14	14.1	60 km/h
California	14	14.2	60 km/h

Tabelle 3.1: Ausgewählte Bewertungsstrecken

Streckenname	Streckenbeschreibung
Outer Durability Road (1. Hälfte)	glatte Asphaltoberfläche, nur gelegentlich geringe Unebenheiten
Outer Durability Road (2. Hälfte)	raue Asphaltoberfläche, geringe, sehr kurzwellige Unebenheiten mit einzelnen kleinen Stößen
Pecking Stones	Kopfsteinpflaster
Blauwe Kei	glatte Asphaltoberfläche, stark wellige Anregung, ausgeprägte Aufbaubewegungen
California	Betonplatten mit Zwischenfugen (Highway), sehr kurzwellige leicht unebene Oberflächenstruktur

Tabelle 3.2 : Streckenbeschreibung

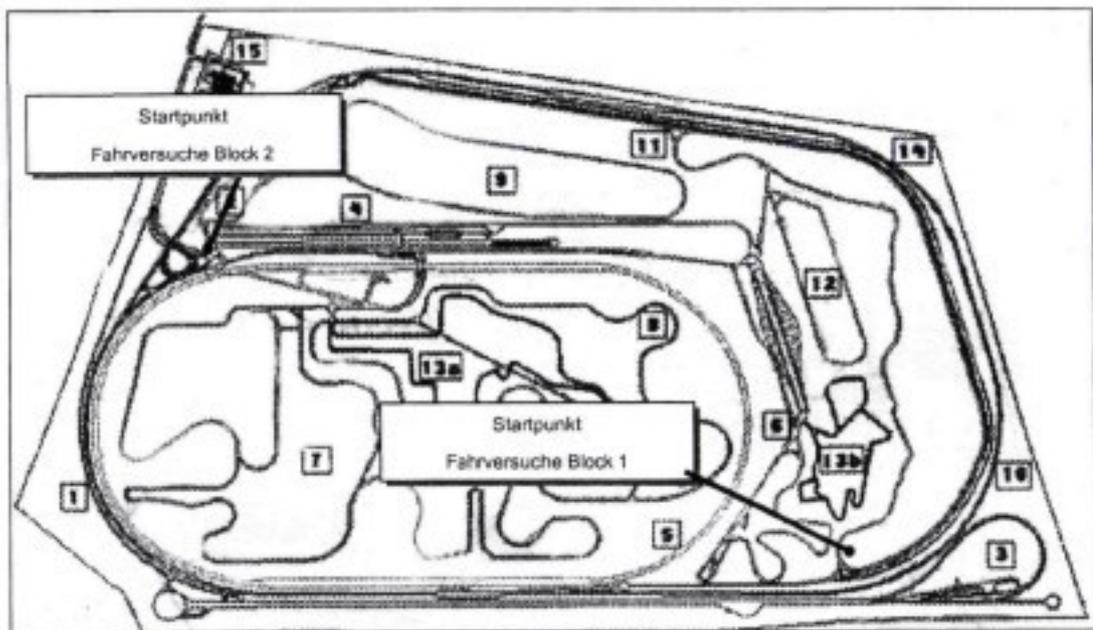


Abbildung 3.1: Streckenplan des Ford-Testgeländes in Lommel, Belgien

Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die an der Sitzschiene (Fahrersitz) gemessenen Beschleunigungseffektivwerte (0,1-30 Hz) in z-Richtung für die drei Fahrzeuge auf den unterschiedlichen Strecken.

		Strecken				
		10.1	10.2	11.1	14.1	14.2
$a_{z,eff} [m/s^2]$						
60 km/h	Opel Corsa	-	-	1,89	1,22	0,93
	Ford Focus	-	-	1,62	1,00	0,79
	Mercedes E-Klasse	-	-	1,46	0,93	0,71
100 km/h	Opel Corsa	0,42	0,64	-	-	-
	Ford Focus	0,37	0,54	-	-	-
	Mercedes E-Klasse	0,32	0,45	-	-	-

Tabelle 3.3: Gesamteffektivwerte (Sitzschiene, z-Richtung) für ausgewählte Bewertungsstrecken

Mit diesen Fahrzeug-Strecken-Geschwindigkeits-Kombinationen ergibt sich für den Effektivwert der Beschleunigung in z-Richtung ein Bereich von **0,32-1,89 m/s²** (Forderung aus Lastenheft : 0,3-1,4 m/s²).

Für die Fahrzeuge werden im Weiteren folgende Abkürzungen verwendet:

Fahrzeug	Abkürzung
Opel Corsa	C
Ford Focus	F
Mercedes E-Klasse	E

Tabelle 3.4: Fahrzeugabkürzungen

In Abbildung 3.2 sind für die verschiedenen Fahrzeug/Streckenkombinationen die Beschleunigungseffektivwerte von 0,1-30 Hz an der Sitzschiene in x-, y- und z-Richtung dargestellt. Die Bezeichnung für die Fahrzeug/Streckenkombination auf der Abszisse setzt sich dabei aus der Streckenbezeichnung nach Tabelle 3.1 und einem Buchstaben für das Fahrzeug zusammen.

Zur Überprüfung der Wiederholgenauigkeit der Anregungen sind in Tabelle 3.5 beispielhaft für den Ford Focus auf der Strecke 14.1 die Gesamt- und Teilbeschleunigungseffektivwerte (0,1-30 Hz) an der Sitzschiene in z-Richtung von sechs Messungen dargestellt.

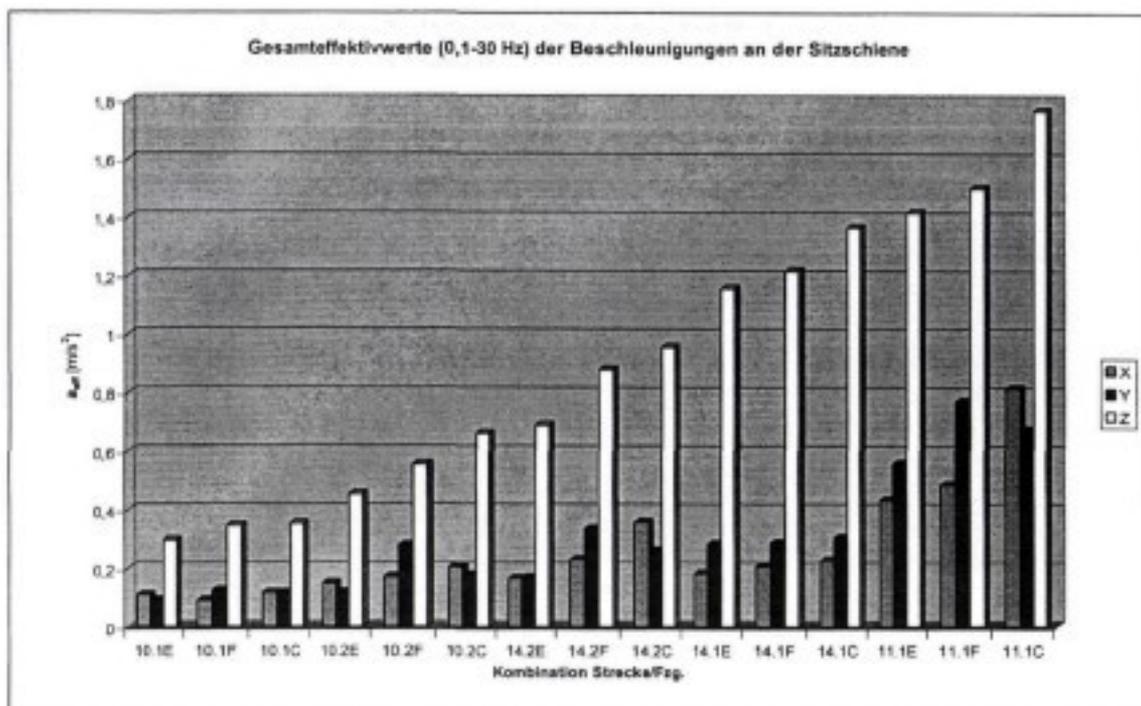


Abbildung 3.2: Verteilung der Beschleunigungseffektivwerte an der Sitzschiene

$a_{z,eff}$ [m/s ²]	Messwiederholung						σ
	1	2	3	4	5	6	
0,1-30 Hz	1,031	1,007	1,014	1,052	1,039	1,034	0,016
1-10 Hz	0,984	0,959	0,970	1,002	0,991	0,989	0,016
10-20 Hz	0,271	0,264	0,262	0,286	0,278	0,271	0,009
20-30 Hz	0,117	0,113	0,110	0,114	0,110	0,109	0,003

Tabelle 3.5: Anregungswiederholgenauigkeit für den Ford Focus auf Strecke 14.1

Die Konstanz der Gesamteffektivwerte als auch der Teileffektivwerte zeigt, dass bei jeder Fahrt über die Bewertungsstrecken die gleiche Anregung angenommen werden kann. Dies ist Voraussetzung, um die abgegebenen Subjektivnoten der Versuchspersonen untereinander vergleichen zu können.

Im Anhang Abbildung 11.10 und folgende sind für die Fahrzeuge auf den verschiedenen Bewertungsstrecken die Effektivwertspektren der gemessenen Beschleunigung in x-, y- und z-Richtung an der Sitzschiene hinten links dargestellt.

3.2 Durchführung der Fahrversuche

Die Fahrversuche bestehen aus *Bewertungsfahrten*, bei denen die Versuchspersonen für die verschiedenen Kombinationen aus Fahrzeug und Strecke Noten für ihr subjektiv empfundenes Schwingungskomfortempfinden abgeben und *Messfahrten*, bei denen die Beschleunigungen triaxial an Sitzschiene, Sitzfläche und Lehne gemessen werden.

3.2.1 Versuchspersonenkollektiv

Im Rahmen der Voruntersuchung wurden die Fahrversuche mit sechs männlichen Versuchspersonen durchgeführt. Die Versuchspersonen lagen entsprechend der Vorgaben bezüglich Körpergröße und Gewicht zwischen dem 40. und 60. Perzentil.

Für die Hauptversuche wurden die Versuche mit weiteren acht männlichen und zehn weiblichen Versuchspersonen durchgeführt. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Subjektivbewertungen bei Fahr- und Prüfstandsversuchen im Vorprojekt wurde die ursprüngliche Zahl von 48 Versuchspersonen nur für die Prüfstandsversuche beibehalten.

3.2.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf war für alle Versuchspersonen inhaltlich und vom zeitlichen Ablauf identisch. Die gesamte Versuchsdauer pro Versuchsperson bzw. Gruppe betrug 2,5 Tage.

Am ersten Tag wurden die Probanden mit dem Versuchsgelände und den Fahrzeugen vertraut gemacht, um bei den späteren Bewertungen Ablenkungen durch Probleme bei der Bedienung des Fahrzeugs oder Streckenführung zu vermeiden. Weiterhin wurde für alle Versuchspersonen die persönliche Sitzposition dokumentiert, die später bei allen Versuchen wieder eingestellt wurde. Die Sitzposition konnte im Wesentlichen frei gewählt werden, wobei jedoch darauf geachtet wurde, dass keine extremen Haltungen eingenommen wurden.

Am zweiten Tag wurden mit den Versuchspersonen in allen Fahrzeugen und auf allen Strecken die Beschleunigungen gemessen (siehe „Messfahrten“) und die Subjektivbeurteilungen mit den Fragebögen 2 und 3 durchgeführt.

Am dritten Tag wurden dann die zeitlich am aufwändigsten Subjektivbeurteilungen mit Fragebogen 1 durchgeführt.

Fragebogen 1 (Abbildung 11.1):

Mit dem Fragebogen 1 sollte das Ganzkörperschwingungsempfinden abgefragt werden. Zur Beurteilung stand eine Skala von 1-10 in 0,5er-Schritten zur Verfügung. Die Skalenendbeschreibung wurde für 1 mit „sehr unangenehm“ und 10 für „kaum unangenehm“ gewählt. Dabei wurde die Skalenendbeschreibung als Tendenz und nicht als Absolutwert definiert. Hauptaugenmerk wurde vielmehr auf eine relative Bewertung der Schwingungsereignisse auf dieser Skala gelegt.

Fragebogen 2 (Abbildung 11.2)

Der Fragebogen 2 enthielt drei Fragestellungen zur Art der störenden Schwingung und dem Ort der Empfindung.

Die erste Fragestellung lautete: „Waren die Schwingungen mehr im Rücken, im Gesäß oder in beiden gleich zu spüren?“

Die zweite Fragestellung lautete: „Waren eher die langwelligen, kurzwelligen oder stoßartigen Schwingungen unangenehm?“. Als „Langwellige Schwingungen“ waren dabei Frequenzen unterhalb von 1,5 Hz definiert, also im Wesentlichen die Schwingungen im Bereich der Aufbaueigenfrequenz. „Kurzwellige Schwingungen“ sollten alle Schwingungen oberhalb dieser Frequenz sein. Als „stoßartige Schwingungen“ waren Einzelereignisse definiert.

Die dritte Fragestellung lautete: „In welcher Körperregion haben Sie die Schwingungen am unangenehmsten empfunden?“

Hier war ein freier Eintrag ohne Vorgaben möglich.

Fragebogen 3 (Abbildung 11.3):

Im dritten Fragebogen sollte eine prozentuale Gewichtung der subjektiv empfundenen Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden vorgenommen werden. Dazu standen die Schwingungsrichtungen „längs“, „quer“, „vertikal“, „Nicken“ (Rotation um die y-Achse), „Wanken“ (Rotation um die x-Achse) zur Verfügung. Das „Gieren“ (Rotation um die z-Achse) wurde hierbei nicht mit aufgenommen, da die Streckenführung der Bewertungsstrecken gerade war. Vor Beginn der Versuche wurde den Probanden noch mal die Bedeutung der einzelnen Richtungsbezeichnungen grafisch und verbal erklärt.

Bewertungsfahrten:

Um das Schwingempfinden nicht durch akustische Eindrücke von Motor und Fahrwerk zu überlagern bzw. zu verfälschen, trugen die Versuchspersonen bei allen Subjektivbeurteilungen Anti-Schall-Kopfhörer (Sennheiser NoiseGuard HDC 200).

Es hat sich bei früheren Versuchen gezeigt, dass gerade die Fahrwerksgeräusche beim Überfahren von Hindernissen das Subjektivurteil stark beeinflussen und die Stärke der Geräusche, gerade beim Vergleich von verschiedenen Fahrzeugklassen, nicht immer mit den Beschleunigungen am Sitz korreliert.

Bei den Subjektivbeurteilungen mit Fragebogen 1 fuhren die Versuchspersonen vor den eigentlichen Bewertungsfahrten alle Strecken mit allen Autos zweimal ab, um sich noch mal mit dem Auto und den Strecken vertraut zu machen. Da bei den Versuchen aufgrund der Streckenanordnung ohne feste Referenz gearbeitet werden musste, diente diese „Kennenlernphase“ vor allem dazu, den Versuchspersonen das zu erwartende Anregungsspektrum vorzuführen und somit bei der Bewertung die Einordnung und Abstufung der Ereignisse zueinander zu verbessern. Die Notenabgabe erfolgte dabei jeweils am Ende einer oder zwei aufeinander folgenden Bewertungsstrecken an festgelegten Punkten. Die Bewertungen für frühere Anregungen waren dabei immer einsehbar, da eine vergleichende Bewertung ausdrücklich erwünscht war. Aufgrund der Lage der Strecken zueinander und der Notwendigkeit, die verschiedenen Schwingungsereignisse (Kombination Fahrzeug/Strecke) in möglichst schneller Abfolge den Versuchspersonen vorzuführen, wurde nach umfangreichen Tests in der Vorbereitungsphase der Fahrversuche folgender Versuchsablauf erstellt.

Die Strecken werden mit den drei Fahrzeugen in zwei Blöcken abgefahren.

Block 1: 11.1 - 14.2 - 14.1 (Kopfsteinpflaster - California - Blauwe Kei)
 Fahrzeugabfolge : Focus, Corsa, Focus, E-Klasse
 Dauer : ca. 60 min

Block 2: 10.1 - 10.2 (Outer Durability Road Teil 1 und 2)
 Fahrzeugabfolge : Focus, Corsa, Focus, E-Klasse
 Dauer : ca. 40 min

Block 2 schließt sich dabei zeitlich direkt an Block 1 an.

Die Fahrzeugabfolge Focus, Corsa, Focus, E-Klasse ist darin begründet, dass der Focus sich bezüglich der Stärke der gemessenen Sitzschienenbeschleunigungen in z-Richtung zwischen dem Corsa und der E-Klasse befindet und damit als Quasi-Referenz eingesetzt wurde. Die wiederholte Vorführung der jeweiligen Focus-Anregungen diente dazu, den Versuchspersonen den Vergleich der Fahrzeuge zu erleichtern und ein Abdriften des Beurteilungsniveaus zu verhindern.

Da die Fragestellungen in Frägbögen 2 und 3 keinen relativen Vergleich erfordern, gab es hier keine Vorgaben für die Bewertungsreihenfolge von Fahrzeugen und Strecken. Die Bewertungsstrecken konnten dabei beliebig oft befahren werden.

Messfahrten:

Die Versuchsfahrten zur Messung der Beschleunigungen wurden getrennt von den Bewertungsfahrten durchgeführt, da die Beschleunigungsaufnehmer auf der Sitzfläche und an der Lehne das Sitzgefühl in starkem Maße beeinträchtigen.

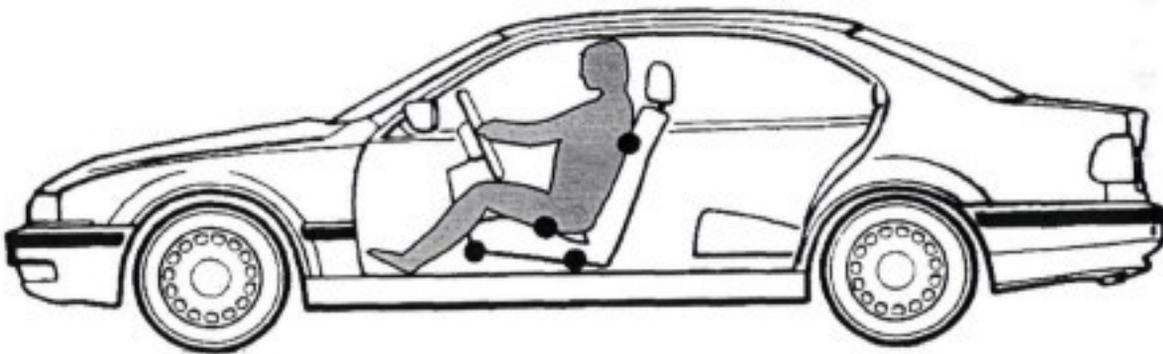


Abbildung 3.3: Beschleunigungsmesspunkte Fahrversuche Hauptversuch

Messpunkte an der Sitzschiene:

Vorne links (VL)	:	z-Richtung
Vorne rechts (VR)	:	z-Richtung
Hinten links (HL)	:	x-, y-, z-Richtung
Sitzfläche (SF)	:	x-, y-, z-Richtung
Lehnenfläche (LF)	:	x-, y-, z-Richtung

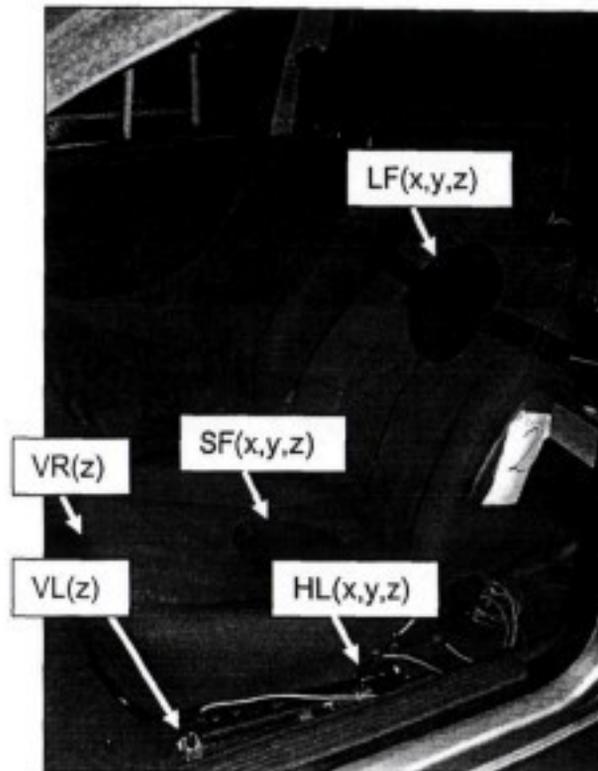


Abbildung 3.4: Corsa-Sitz mit Beschleunigungsaufnehmern

Aus den drei Messsignalen in z-Richtung an der Sitzschiene kann zusätzlich die Nick- und Wankbewegung des Sitzes berechnet werden.

Bei den Vorversuchen wurden zusätzlich die Schwingungen am Lenkrad und am Fersenpunkt gemessen. Für die weiteren Versuche wurden diese Messpunkte jedoch aus verschiedenen Gründen wieder aus dem Versuchsprogramm gestrichen. Zum einen lagen die Korrelationen der Beschleunigungseffektivwerte dieser Messpunkte mit den Beschleunigungseffektivwerten an der Sitzschiene in den jeweiligen Richtungen in einer Größenordnung von größer 0,95. Dies macht den Eingang in ein späteres Regressionsmodell sehr unwahrscheinlich. Zum anderen sind diese Messpunkte kritisch in Bezug auf die gefühlten Schwingungen. Je nachdem, was für Schuhe getragen werden oder wie fest das Lenkrad angefasst wird, ergeben sich Unterschiede im Empfinden. Ein weiterer Grund liegt in der Zielsetzung dieses Projektes, welche sich in erster Linie auf das Schwingempfinden in Hinblick auf den Sitz bezieht. Über den Sitz kann jedoch kein Einfluss auf die Lenkrad- oder Fersenpunktschwingungen genommen werden.

Da die Schwingungen an diesen Stellen bei den verwendeten Fahrzeugen und Strecken bei den Versuchspersonen auch keine störenden Empfindungen hervorriefen, wurde im Weiteren auf diese Messstellen verzichtet.

4 Fahrversuche Nutzfahrzeuge (Nfz)

Der Versuchsumfang gliedert sich in zwei wesentliche Abschnitte:

- Vorbereitung der Fahrversuche
- Durchführung der Fahrversuche

4.1 Vorbereitung der Fahrversuche

Für die Fahrversuche der Nutzfahrzeuguntersuchung standen ein Reisebus vom Typ SETRA S315 GT-HD und MAN T45 8x4 Kipper zur Verfügung. Für die Durchführung der Versuche wurde das Testgelände der ATP Papenburg gewählt.

Die Subjektivbewertungen fanden in beiden Fahrzeugen auf der Fahrerplatzposition und im Bus zusätzlich auf einem Fahrgastsitz (rechte Seite, Platz am Gang, 2 Reihe von vorn) statt. Die Originalsitze in den Fahrzeugen wurden entfernt und durch neue Sitze ersetzt. Diese waren vorher nach dem gleichen Verfahren wie bei den Pkw-Sitzen vorbehandelt. Vor den eigentlichen Fahrversuchen mit Testpersonen wurde eine Voruntersuchung durchgeführt, bei der die zur Verfügung stehenden Strecken auf dem Testgelände in Hinblick auf ihre Eignung als Bewertungsstrecke untersucht und ein Versuchsplan erstellt wurde. Detaillierte Vorgaben bezüglich der Anregungen gab es hierbei nicht, es wurde jedoch im Rahmen der auf diesem Testgelände zur Verfügung stehenden Strecken versucht, den Bereich der Komfort- bis Schlechtweganregung möglichst gut abzudecken. Dazu erfolgte eine Untersuchung der Strecken auf messtechnische als auch subjektive Unterscheidbarkeit der Strecken. Bei der Festlegung der Strecken und des Versuchsablaufes wurde ebenfalls darauf geachtet, dass möglichst kurze Wege zwischen den Bewertungsstrecken lagen. Aufgrund der Größe und des Aufbaus des Testgeländes konnten die Pausen jedoch nicht so kurz gehalten werden wie bei den Pkw-Versuchen.

In Abbildung 4.1 ist ein Streckenplan des Testgeländes dargestellt. Die zur Bewertung genutzten Strecken sind orange markiert und mit einer Nummer versehen. Zu jeder Bewertungsstrecke ist eine kurze verbale Beschreibung der Oberflächenbeschaffenheit angegeben, sowie die Länge der Strecke und die verwendete Fahrgeschwindigkeit. Die Streckennummern geben gleichzeitig die Bewertungsreihenfolge an.

Abkürzung	Sitzposition
BF	Bus Fahrersitz
BFG	Bus Fahrgastsitz
KF	Kipper Fahrersitz

Tabelle 4.1 : Abkürzung Sitzposition

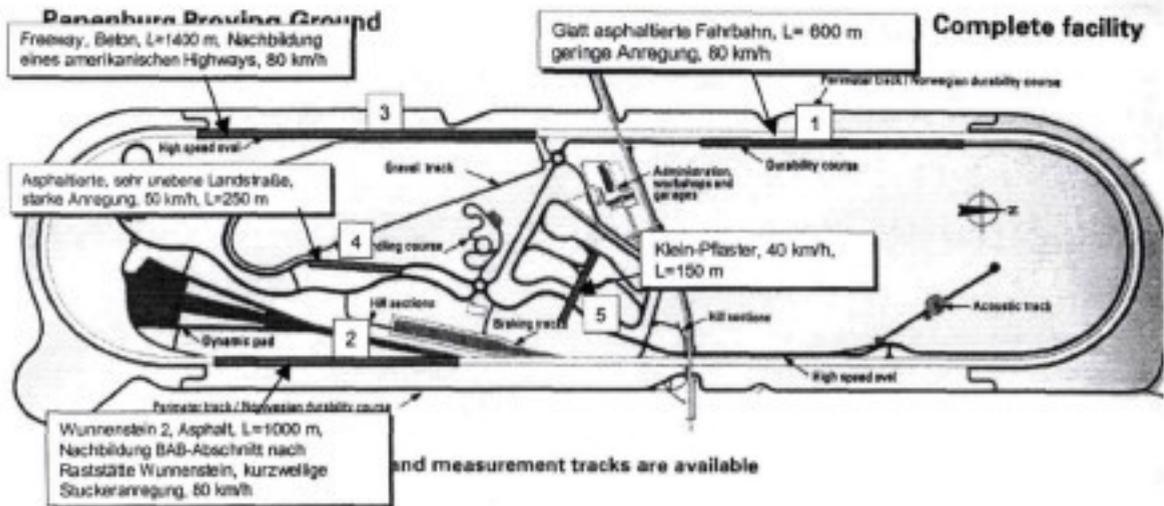


Abbildung 4.1 : Streckenplan des Testgeländes Papenburg

In Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 sind für die verschiedenen Fahrzeug - Strecken - Sitzkombinationen die Beschleunigungseffektivwerte im Bereich 0,1-30 Hz an der Sitzkonsole in x-, y- und z-Richtung dargestellt.

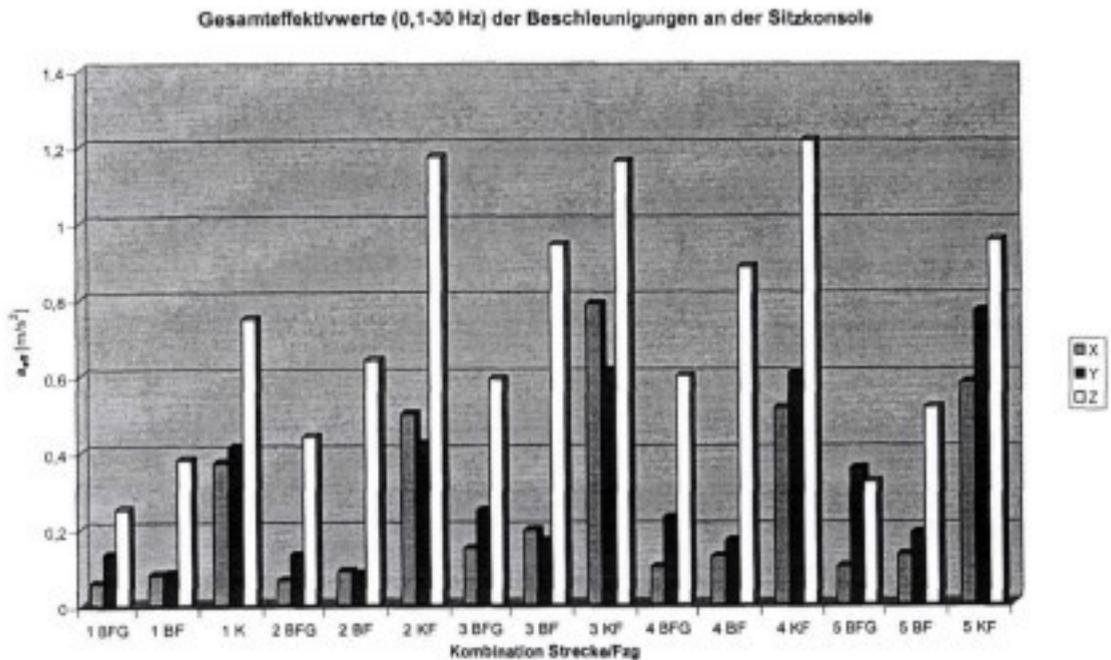


Abbildung 4.2 : Verteilung der Beschleunigungseffektivwerte an der Sitzkonsole, sortiert nach Strecken

Die Bezeichnung für die Fahrzeug/Streckenkombination auf der Abszisse setzt sich dabei aus der Streckenbezeichnung nach Abbildung 4.1 und einer Buchstabenkombination für das Fahrzeug nach Tabelle 4.1 zusammen.

In Abbildung 4.2 sind die Werte sortiert nach Strecken dargestellt, in Abbildung 4.3 aufsteigend sortiert nach dem Wert des Beschleunigungseffektivwertes in z-Richtung.

Hier ist gut erkennbar, dass ebenso wie bei den Pkw-Versuchen eine gleichmäßige Verteilung zwischen Minimum und Maximum erzielt werden konnte.

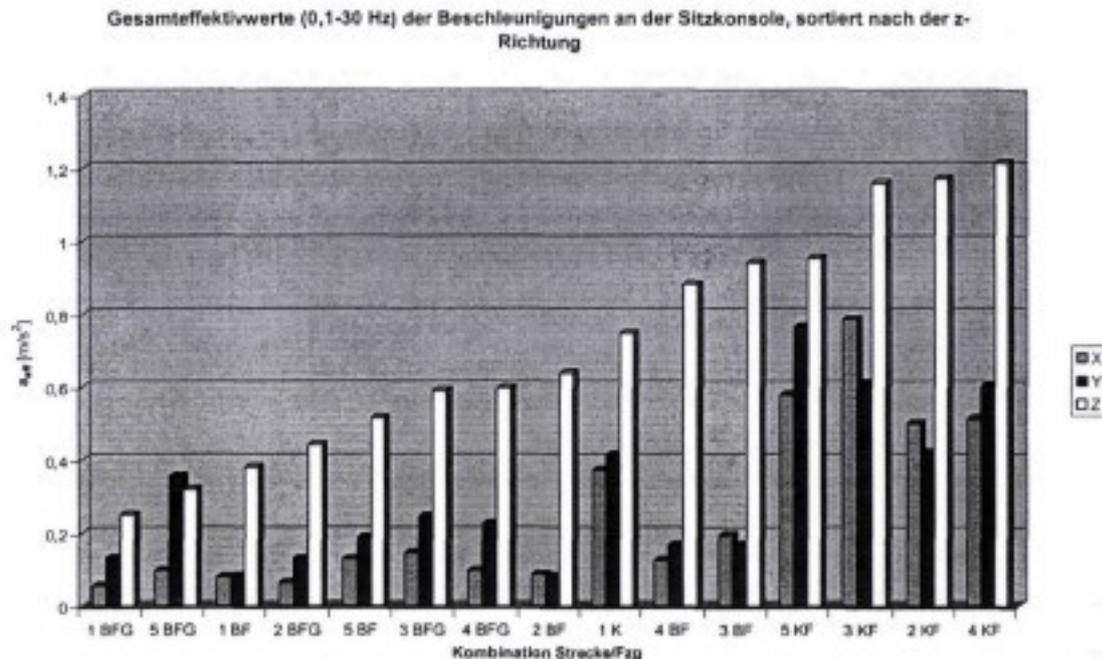


Abbildung 4.3 : Verteilung der Beschleunigungseffektivwerte am Sitzbefestigungspunkt, sortiert nach dem Wert des Beschleunigungseffektivwertes in z-Richtung

4.2 Durchführung der Versuche

Die Fahrversuche bestehen aus *Bewertungsfahrten*, bei denen die Versuchspersonen für die verschiedenen Kombinationen aus Fahrzeug und Strecke Noten für ihr subjektiv empfundenes Schwingungskomfortempfinden abgeben und *Messfahrten*, bei denen die Beschleunigungen triaxial an Sitzschiene, Sitzfläche und Lehne gemessen werden.

4.2.1 Versuchspersonenkollektiv

Die Fahrversuche wurden mit sechs männlichen Versuchspersonen durchgeführt. Vorgaben bezüglich der körperlichen Eigenschaften waren aus organisatorischen Gründen nicht gegeben. Die Versuchspersonen setzten sich dabei aus vier Vertretern der beteiligten Nfz-Firmen (MAN, EVOBUS, IVECO, Isringhausen) zusammen sowie zwei Mitarbeitern mit Lkw-Erfahrung des IfF.

4.2.2 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf war für alle Versuchspersonen inhaltlich und vom zeitlichen Ablauf identisch. Die Versuchsdauer betrug 1 Tag. Der Ablauf war in drei Teile, die Einführung, Versuchsblock 1 und 2 geteilt. Im Rahmen der Einführung wurde den Versuchspersonen das Versuchsprogramm erklärt sowie nach einer Sicherheitseinweisung eine Einführungsfahrt mit den beiden Fahrzeugen auf beiden Sitzposition, Fahrer- und Fahrgastsitz durchgeführt. Dabei wurde auch jeweils die Sitzeinstellung festgelegt und dokumentiert, um sie bei allen folgenden Versuchen wieder ebenso einzustellen. Die

Sitzeinstellung konnte im Wesentlichen frei gewählt werden, wobei jedoch darauf geachtet wurde, dass keine extremen Haltungen eingenommen wurden.

Im Versuchsblock 1 erfolgten im Wechsel zwischen den beiden Fahrzeugen die Subjektivbewertungen mit Fragebogen 2 und 3 sowie die Beschleunigungsmessungen. Im Versuchsblock 2 wurde dann die Bewertung mit Fragebogen 1 durchgeführt.

Fragebogen 1 (Abbildung 11.7):

Mit dem Fragebogen 1 sollte das Ganzkörperschwingungsempfinden abgefragt werden. Zur Beurteilung stand eine Skala von 1-10 in 0,5er-Schritten zur Verfügung. Die Skalenendbeschreibung wurde für 1 mit „sehr unangenehm“ und 10 für „kaum unangenehm“ gewählt. Dabei wurde die Skalenendbeschreibung als Tendenz und nicht als Absolutwert definiert. Hauptaugenmerk wurde vielmehr auf eine relative Bewertung der Schwingungsereignisse auf dieser Skala gelegt.

Fragebogen 2 (Abbildung 11.8):

Der Fragebogen 2 enthielt drei Fragestellung zur Art der störenden Schwingung und dem Ort der Empfindung.

Die erste Fragestellung lautete: „Waren die Schwingungen mehr im Rücken, im Gesäß oder in beiden gleich zu spüren?“

Die zweite Fragestellung lautete: „Waren eher die langwelligen, kurzwelligen oder stoßartigen Schwingungen unangenehm?“. „Langwellige Schwingungen“ waren dabei Frequenzen unterhalb von 1,5 Hz definiert, also im Wesentlichen die Schwingungen im Bereich der Aufbaueigenfrequenz. „Kurzwellige Schwingungen“ sollten alle Schwingungen oberhalb dieser Frequenz sein. Als „stoßartige Schwingungen“ waren Einzelereignisse definiert.

Die dritte Fragestellung lautete: „In welcher Körperregion haben Sie die Schwingungen am unangenehmsten empfunden?“ Hier war ein freier Eintrag ohne Vorgaben möglich.

Fragebogen 3 (Abbildung 11.9):

Im dritten Fragebogen sollte eine prozentuale Gewichtung der subjektiv empfundenen Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden vorgenommen werden. Dazu standen die Schwingungsrichtungen „längs“, „quer“, „vertikal“, „Nicken“ (Rotation um die y-Achse), „Wanken“ (Rotation um die x-Achse) zur Verfügung. Das „Gieren“ (Rotation um die z-Achse) wurde hierbei nicht mit aufgenommen, da die Streckenführung der Bewertungsstrecken gerade war.

Bewertungsfahrten:

Um das Schwingempfinden nicht durch akustische Eindrücke von Motor und Fahrwerk zu überlagern bzw. zu verfälschen, trugen die Versuchspersonen bei allen Subjektivbeurteilungen Anti-Schall-Kopfhörer (Sennheiser NoiseGuard HDC 200).

Im Versuchsblock 1 wurden die Bewertungsfahrten mit Fragebogen 2 und 3 parallel zu den Messfahrten durchgeführt. Dabei war jeweils eine Sitzposition mit Messtechnik bestückt, während die anderen beiden bewertet wurden.

Im zweiten Versuchsblock erfolgte die Bewertung mit Fragebogen 1. Da die Versuchspersonen mit den Anregungen durch den vorangegangenen Versuchsblock bereits ausreichend vertraut waren, wurde hier auf eine vorherige „Kennenlernphase“, wie bei den Pkw verzichtet, sondern direkt jede Strecke bewertet. Auf eine zusätzliche

„Referenzfahrt“, siehe doppelte Focus-Fahrt bei den Pkw, konnte ebenfalls verzichtet werden. Die Bewertungsreihenfolge sah wie folgt aus. Zuerst wurden die Strecken 1 bis 3 hintereinander auf den Sitzpositionen Bus-Fahrersitz, Bus-Fahrgastsitz, Kipper-Fahrersitz gefahren und anschließend die Strecken 4 und 5 in gleicher Sitzpositionsreihenfolge. Dieser Ablauf ergab sich aus dem Ziel, die Pausen zwischen den Anregungen möglichst kurz zu halten.

Messfahrten:

Zur Aufnahme der Beschleunigungen wurden die Sitze mit Beschleunigungsaufnehmern an den unten abgebildeten Stellen ausgerüstet.

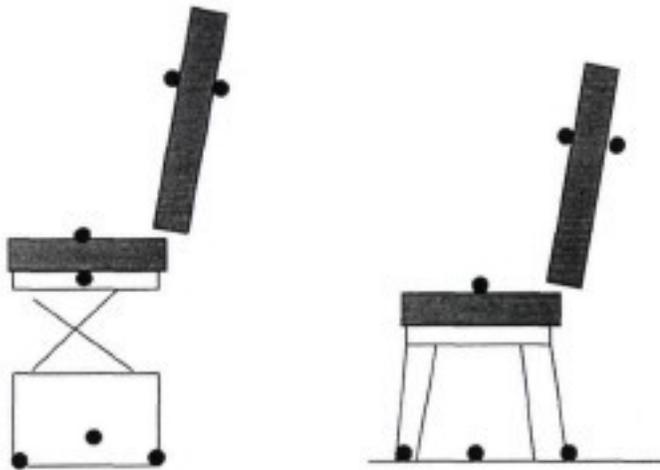


Abbildung 4.4: Messpunkte Fahrersitz/Fahrgastsitz, Nfz-Fahrversuche

Messstellen Fahrersitz:

- Sitzkonsole : x-, y-, z-Richtung + z-Richtung hinten links (HL), vorne links (VL), vorne rechts (VR)
- Sitzrahmen : x-, y-, z-Richtung
- Sitzfläche : x-, y-, z-Richtung
- Lehnenfläche : x-, y-, z-Richtung
- Lehnenrahmen : x-, y-, z-Richtung

Messstellen Fahrgastsitz:

- Sitzkonsole : x-, y-, z-Richtung + z-Richtung hinten links (HL), vorne links (VL), vorne rechts (VR)
- Sitzfläche : x-, y-, z-Richtung
- Lehnenfläche : x-, y-, z-Richtung
- Lehnenrahmen : x-, y-, z-Richtung

5 Prüfstandsversuche

5.1 Prüfstands Aufbau

Die Prüfstandsversuche fanden auf einem am IfF entwickelten servohydraulischen Sitzprüfstand statt. Der Prüfstand konnte zu Beginn des Projektes Fahrzeugbewegungen in den drei translatorischen Freiheitsgraden x-, y-, z- Richtung nachbilden. In dieser Konfiguration wurde das Vorprojekt durchgeführt. Für die Hauptversuche wurde der Prüfstand um einen rotatorischen Freiheitsgrad erweitert.

In dieser Konfiguration ist es möglich, Fahrzeugbewegungen in x-, y-, z-Richtung und Nicken oder Wanken nachzubilden.

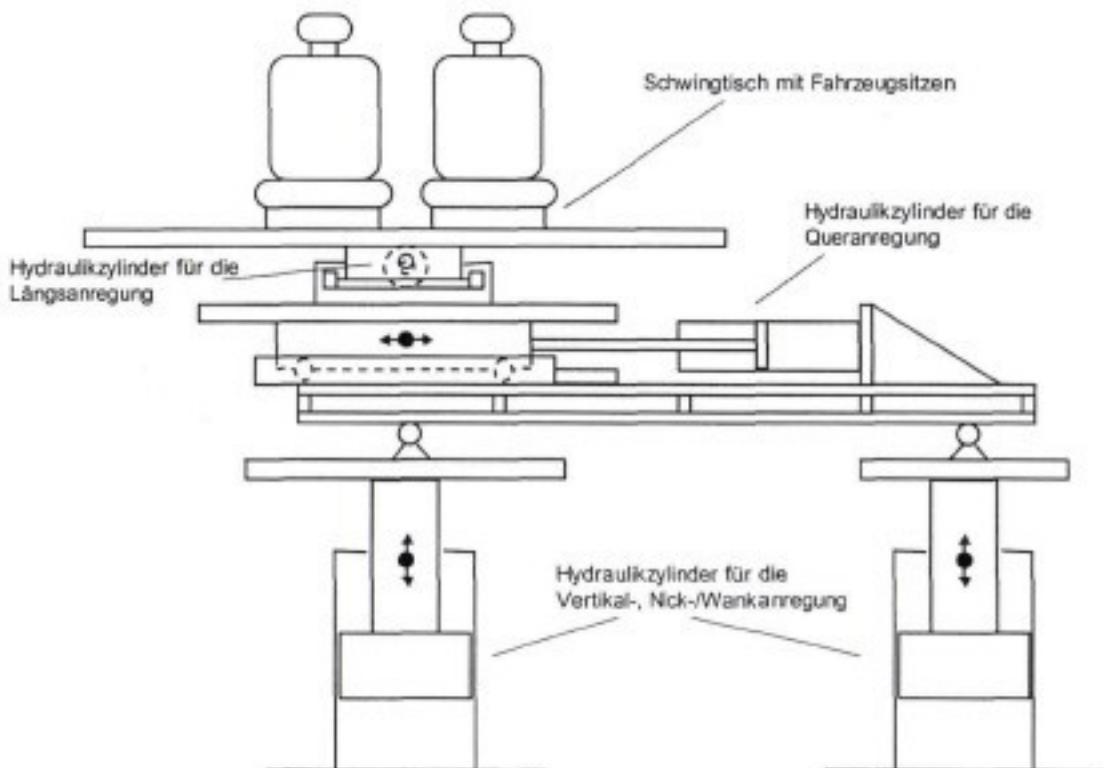


Abbildung 5.1: Prüfstands Aufbau, Wankkonfiguration

In Abbildung 4.1 ist der prinzipielle Aufbau des Prüfstandes dargestellt. Basis des Prüfstandes ist ein querkraftverstärkter 100 kN-Zylinder. Dieser Zylinder übernimmt die Vertikalanregung (z-Richtung), sowie die Abstützung aller Querkräfte und Momente. Der Zylinder ist mit vier Servo-Ventilen bestückt und ermöglicht damit schnelle und hochgenaue Bewegungen. Parallel zu diesem Zylinder arbeitet ebenfalls in Vertikalrichtung ein 63kN-Zylinder, der über eine entsprechend phasenverschobene Anregung die Nick- oder Wankbewegung des Aufbaus realisiert. Die beiden Zylinder sind über ein fachwerkartiges Brückenelement verbunden. Die Lagerung erfolgt jeweils über eine spielfreie Kegelrollenlagerung. Zum Längenausgleich ist diese auf dem 63 kN-Zylinder mit einer vorgespannten, spielfreien Linearführung kombiniert. Auf diesem Brückenelement sind übereinander zwei um 90° versetzte bewegliche Ebenen angeordnet, die die Bewegungen in x- und y-Richtung realisieren. Diese Ebenen sind jeweils wieder über vorgespannte, spielfreie Linearführungen gelagert.

Die Bewegung dieser Ebenen erfolgt über einen auf dem Brückenelement liegenden 63 kN-Zylinder und einem 7kN-Zylinder zwischen den oberen beiden Ebenen. Der Arbeitsbereich der Hydropulszylinder ist im Wegbereich beschränkt auf Verfahrwege von ± 25 mm in x- und y-Richtung sowie ± 50 mm in z-Richtung. Der maximale Nick- bzw. Wankwinkel beträgt $2,5^\circ$.

Die Steuerung erfolgt durch eine digitale Instron 8800-Anlage in Wegregelung über die in den Zylindern eingebauten induktiven Wegaufnehmer.

5.2 Vorbereitung der Prüfstandsversuche

Die Prüfstandsvorbereitung besteht aus dem Aufbau der fahrzeugspezifischen Fahrerstände auf dem Hydropuls-Prüfstand des Instituts und der Erzeugung der Anregungssignale aus den Messungen der Fahrversuche.

5.2.1 Aufbau der Fahrerstände auf dem Prüfstand

Der Sitzprüfstand besitzt eine universell bestückbare Aufnahmeplatte, auf der jeweils zwei Fahrzeugkonfigurationen bestehend aus Sitz, Lenkrad und Pedaltrappen aufgebaut werden können. Die Elemente wurden entsprechend der Package-Daten für die drei Fahrzeuge angeordnet. Damit ist auf dem Prüfstand die gleiche Sitzhaltung wie im Fahrzeug gewährleistet.

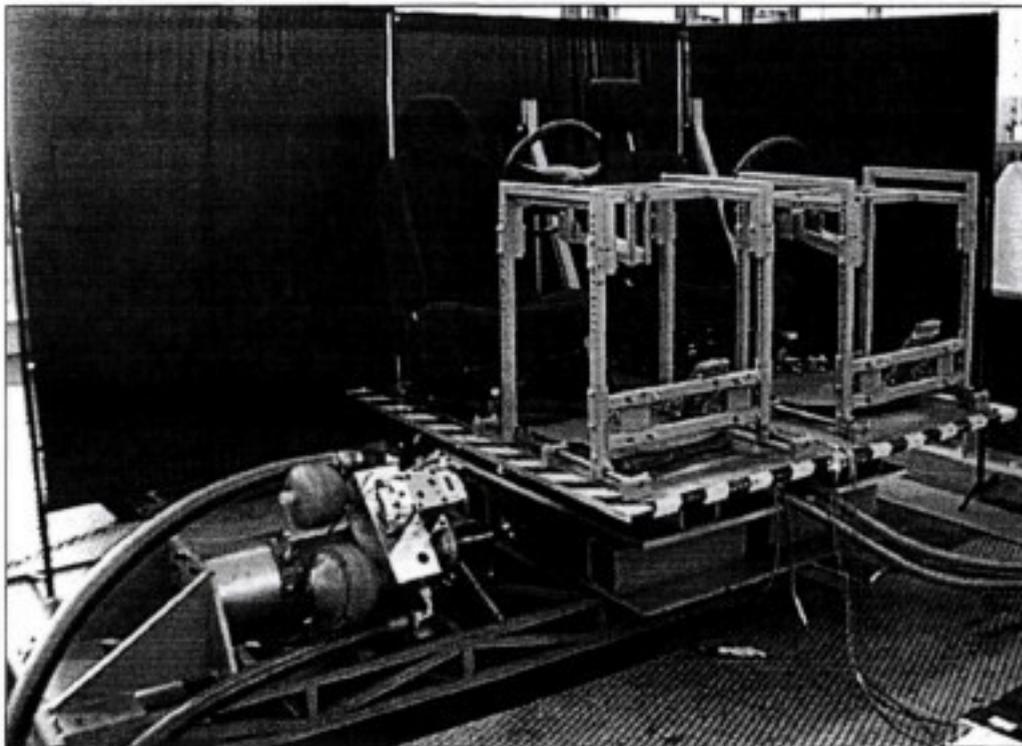


Abbildung 5.2 : Sitzprüfstand, Wankkonfiguration, Pkw

5.2.2 Erzeugung der Prüfstandsanzregungssignale

Aufgrund der begrenzten Zylinderdynamik müssen die Anregungssignale tiefpassgefiltert werden (Eckfrequenz 30 Hz). Da Frequenzen oberhalb dieses Bereiches auf das Schwingungskomfortempfinden des Menschen keinen wesentlichen Einfluss mehr haben, stellt dies für diese Untersuchungen keinen Nachteil dar. Um stationäre bzw. quasistationäre Beschleunigungen, die zur Überschreitung der Kolbenhöhe führen würden, zu entfernen, ist zusätzlich eine Hochpassfilterung mit 0,5 Hz Eckfrequenz notwendig. Die Bewertungsstrecken aus dem Fahrversuch haben jedoch bis auf Strecke 10.1/10.2 der Pkw-Versuche einen geraden Verlauf. Die Kurvenradien der Strecke 10 sind jedoch so groß, dass mit der gefahrenen Geschwindigkeit von 100 km/h keine quasistationären Querbearbeitungen auftreten, deren Entfernung einen signifikanten Einfluss auf das streckenspezifische Schwingungsgefühl hat.

Die hoch- und tiefpassgefilterten Beschleunigungssignale (Messstelle: Sitzschiene hinten links) werden in den Wegbereich integriert und dienen als Basis-Drivesignal für die Prüfstandssteuerung. Die Abstimmung des Prüfstandes auf die Soll-Bearbeitungen erfolgt mittels eines iterativen Abstimmungsalgorithmus. Dieser Algorithmus ist im Laufe des Projektes entwickelt worden und basiert in seiner Grundidee auf dem ITFC-Algorithmus (Iterativ Transfer Function Compensation) der Carl Schenck AG. Versuche mit dem original Algorithmus führten jedoch zu keinen befriedigenden Ergebnissen, da das Verfahren von einer konstanten Übertragungsfunktion des Systems ausgeht, die bei dem Sitz-Prüfstand nicht gegeben ist. Der neu entwickelte Algorithmus berücksichtigt die amplitudenabhängige Übertragungsfunktionsänderung und ermöglicht zudem vom Systemaufbau eine Abstimmung auf die Beschleunigungen an der Sitzschiene bei gleichzeitig stabilem Betrieb der Zylinder in Wegregelung.

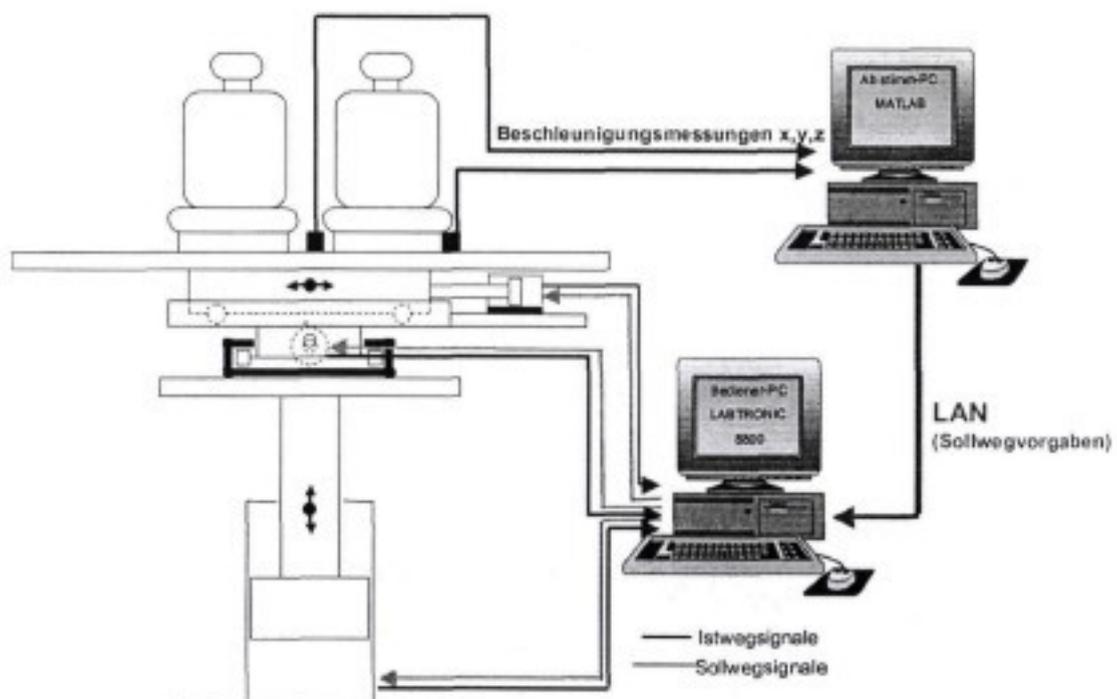


Abbildung 5.3: Prinzip des Abstimmungssystems

Abbildung 5.3 zeigt den Systemaufbau der Prüfstandssteuerung und -abstimmung. Die eigentliche Steuerung des Prüfstandes erfolgt über die digitale Labtronic 8800-Steuerung der Firma Instron Schenck. Diese Anlage steuert die einzelnen Zylinder in Wegregelung auf Basis eines so genannten Drive-Signals, welches im ersten Abstimmungsschritt die aus den Soll-Beschleunigungen an der Sitzschiene berechneten Wegsignale enthält. Triaxiale Beschleunigungsaufnehmer auf der obersten Prüfstandsebene messen die tatsächlich dort ankommenden Beschleunigungen. Im Abstimm-PC werden die gemessenen Beschleunigungen mit den Soll-Beschleunigungen verglichen und bei Abweichung eine entsprechende Korrektur berechnet. Dieses korrigierte Signal wird dann als neues Drive-Signal an die Prüfstandssteuerung gesendet. In mehreren Schritten wird damit iterativ eine Angleichung der Ist-Beschleunigungen an der Sitzschiene an die Soll-Beschleunigungen erreicht.

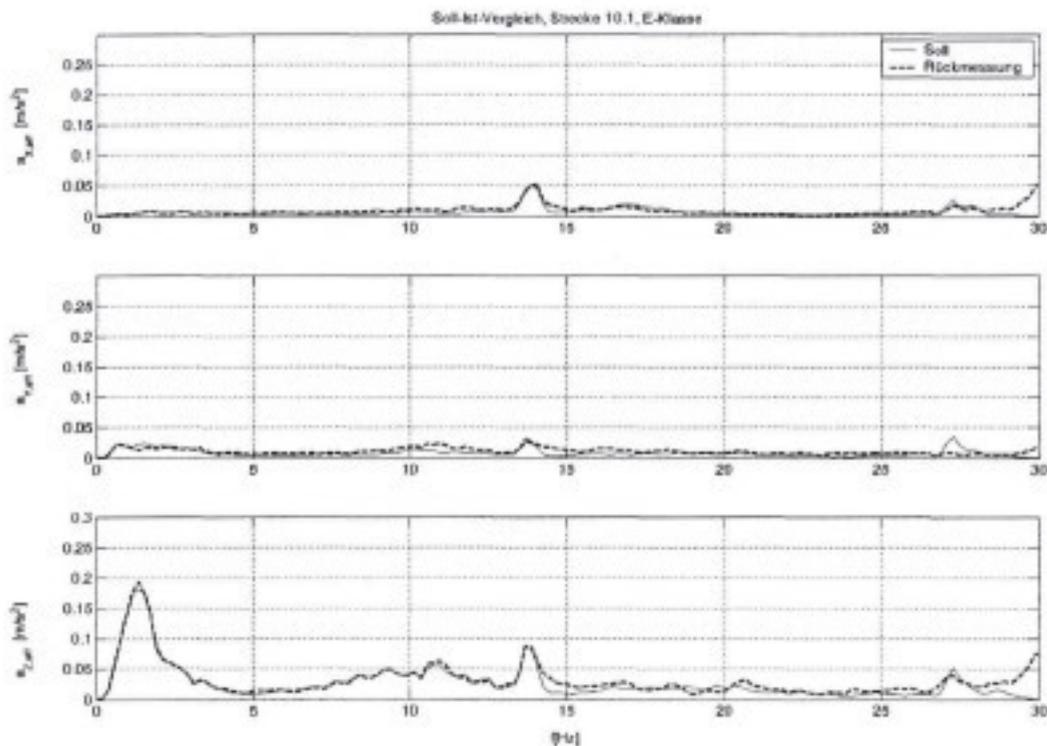


Abbildung 5.5: Soll-Ist-Vergleich der Sitzschienenbeschleunigungen am Prüfstand

In Abbildung 5.5 ist beispielhaft anhand der Anregung der Mercedes E-Klasse auf der Strecke 10.1 die Güte der Prüfstandsanregung in Form von Beschleunigungseffektivwert-Spektren für die Soll- und Ist-Beschleunigung dargestellt. Die Soll-Beschleunigungen sind dabei das entsprechend gefilterte Beschleunigungssignal (0,5 - 30 Hz) aus der Fahrzeugmessung. Die Ist-Beschleunigungen sind die rückgemessenen Prüfstandsbeschleunigungen an der Sitzschiene.

5.3 PKW-Prüfstandsversuche

5.3.1 Versuchspersonenkollektiv

Die Prüfstandsversuche wurden mit dem vollen Versuchspersonenkollektiv von 48 Personen (24 Männer, 24 Frauen) durchgeführt. Die Versuchspersonen lagen bezüglich der Körpergröße und Gewicht entsprechend der Vorgaben zwischen dem 40. und 60. Perzentil.

5.3.2 Durchführung der Prüfstandsversuche

Für die Prüfstandsversuche wurden fünf Sitzschienenanregungen aus der Kombination Fahrzeug/Strecke als Anregung für die weiteren Subjektivbewertungen ausgewählt. Um die gesamte Spreizung der Anregungsstärke und auch alle streckenbedingten Schwingungscharakteristiken beizubehalten, wurden dabei für jede der fünf Strecken die Sitzschienenbeschleunigungen eines Fahrzeugs ausgewählt. Als Minimum und Maximum der Anregungsstärke wurde nach Tabelle 3.3 bzw. Abbildung 3.2 für die geringste Fahrbahnanregung das Signal der Mercedes E-Klasse gewählt und für die stärkste Fahrbahnanregung das Signal des Opel Corsa. Die weitere Auswahl erfolgte nach dem Kriterium einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der Anregungsstärke innerhalb dieses Bereiches. Um bei den Versuchspersonen, die bereits an den Fahrversuchen teilgenommen haben, zu verhindern, dass es durch die eventuell noch in der Erinnerung vorhandenen Zuordnung von Streckenbezeichnung und Bewertung zu einer Beeinflussung kommt, wurden die fünf Sitzschienenbeschleunigungssignale mit neuen Bezeichnungen versehen. Als Bezeichnungen wurden die Buchstaben von A-E verwendet. In Tabelle 5.1 sind die Zuordnungen der Fahrzeug/Strecken-Anregungen zu den neuen Bezeichnungen für die Prüfstandsanregungen aufgeführt.

Bezeichnung für Prüfstandsanregung	Streckenbezeichnung Fahrversuch	Fahrzeug	$a_{Z,eff,0,1-30Hz}$ [m/s ²]
A	10.1	E	0,32
B	10.2	F	0,54
C	11.1	C	1,89
D	14.1	C	1,22
E	14.2	F	0,79

Tabelle 5.1: Prüfstandsanregungen, Zuordnung der Fahrzeug/Streckenkombinationen

Für die Prüfstandsversuche wurden zwei Fragestellungen verwendet, zum einen die Fragestellung nach dem Ganzkörperschwingempfinden analog zum Fragebogen 1 aus den Fahrversuchen, zum anderen wurde nach dem Schwingempfinden in verschiedenen Körperregionen gefragt. Im Gegensatz zu den Fahrversuchen werden bei den Prüfstandsversuchen für alle Sitze die gleichen Sitzschienenbeschleunigungen verwendet. Dies ermöglicht nun einen direkten Vergleich der Sitze. Zur Abschirmung der

Umgebungsgeräusche trugen die Versuchspersonen Anti-Schall-Kopfhörer. Eine detailliertere Darstellung dieser Versuche wird nun im Folgenden gegeben.

Fragebogen 1 (Abbildung 5.6):

Mit dem Fragebogen 1 sollte das Ganzkörperschwingungsempfinden abgefragt werden. Zur Beurteilung stand eine Skala von 1 - 10 in 0,5er-Schritten zur Verfügung. Die Skalenendbeschreibung wurde für 1 mit „sehr unangenehm“ und für 10 mit „kaum unangenehm“ gewählt. Dabei wurde die Skalenendbeschreibung als Tendenz und nicht als Absolutwert definiert. Hauptaugenmerk wurde vielmehr auf eine relative Bewertung der Schwingungsereignisse auf dieser Skala gelegt.

Als Basisanregungen wurden die in Tabelle 5.1 aufgeführten Sitzschienen-Signale A bis E verwendet. Daraus wurden 35 zu bewertende Anregungen gebildet, die jeweils die Einzelrichtungen des Gesamtsignals oder Kombinationen daraus enthalten. Daraus ergeben sich sieben Versuchsreihen zu je fünf Anregungen. In Tabelle 5.2 sind die verschiedenen Anregungen mit der im Weiteren verwendeten Codierung aufgeführt. Die Großbuchstaben A- E bezeichnen dabei das Gesamtsignal nach Tabelle 5.1. Ein nachgestelltes „-n“ oder „-w“ bedeutet eine Kombination der drei translatorischen Richtungen plus der Wank- oder Nickrichtung. Vorgestellte Richtungsbezeichnungen bedeuten, dass nur die entsprechende Einzelrichtung des Gesamtsignals angeregt wird.

Versuchsreihe	Anregungsrichtungen	Anregungsbezeichnung
1	Kombination der x-, y-, z-, Wankrichtung der Signale A-E	A-w, B-w, C-w, D-w, E-w
2	Kombination der x-, y-, z-, Nickrichtung der Signale A-E	A-n, B-n, C-n, D-n, E-n
3	x-Richtung der Signale A-E	xA, xB, xC, xD, xE
4	y-Richtung der Signale A-E	yA, yB, yC, yD, yE
5	z-Richtung der Signale A-E	zA, zB, zC, zD, zE
6	n-Richtung der Signale A-E	nA, nB, nC, nD, nE
7	w-Richtung der Signale A-E	wA, wB, wC, wD, wE

Tabelle 5.2 : Versuchsreihen Prüfstandsversuche, Anregungsbezeichnungen

Für diese Versuche waren jeweils zwei Sitze gleichzeitig auf dem Prüfstand aufgebaut. Der Vergleich aller drei Sitze erfolgte über einen Vergleich zu einem Referenzsitz, für den der Focus-Sitz verwendet wurde. Somit gab es für jede Versuchsreihe noch eine Unterteilung in zwei Blöcke. In einem Block wurde der Focus- mit dem Corsa-Sitz verglichen, im anderen Block der Focus-Sitz mit dem E-Klasse-Sitz.

Die Bewertungen innerhalb eines Blockes erfolgten in drei Abschnitten.

Abschnitt 1: „Kennenlernen der Anregungen und Sitze“

Den Versuchspersonen wurde analog zum Verfahren bei den Fahrversuchen zum „Kennenlernen“ der Anregungen und Sitze alle Anregungen A bis E auf beiden Sitzen vorgespielt. Somit hatten die Versuchspersonen bei der eigentlichen Bewertung eine Vorstellung von der Spreizung der Anregungsstärke und ihrer Empfindungen und konnten für sich bereits eine grobe Einteilung festlegen.

Abschnitt 2: „Haupteinteilung“

Im zweiten Abschnitt erfolgte eine Bewertung der Anregungen A bis E auf dem Focus-Sitz als Referenz. Da der Unterschied zwischen den einzelnen Sitzschienenanregungen größer war als der Einfluß der Sitze, wurde damit für den späteren Sitzvergleich als Basis und Orientierung die Haupteinteilung der Anregung auf der 10er-Skala vorgenommen.

Abschnitt 3: „Sitzvergleich“

Im dritten Abschnitt wurde dann der eigentliche Sitzvergleich durchgeführt. Dabei wurde jeweils bei gleicher Sitzschienenanregung zwischen den beiden auf dem Prüfstand aufgebauten Sitzen gewechselt. Zuerst wurde jeweils die Anregung auf dem Focus-Sitz vorgespielt. Für dieses Ereignis lag die Bewertung bereits aus Abschnitt 2 vor. Danach wurde auf den zweiten Sitz gewechselt und bei gleicher Sitzschienenanregung dafür eine Bewertung abgegeben.

Um die Beurteilungen der Versuchspersonen nicht durch eventuell vorhandene Vorurteile gegenüber den verwendeten Fahrzeugen bzw. Sitzen zu beeinflussen, wurden die Sitze während der Versuche nur mit Nummern bezeichnet.

In Tabelle 5.3 ist die entsprechende Zuordnung dargestellt.

Sitznummer	Fahrzeugsitz
I	Corsa
II	Focus
III	E-Klasse

Tabelle 5.3: Sitznummernzuordnung, Prüfstandsversuche

In Abbildung 5.6 ist beispielhaft ein Fragebogen des Typs 1 für die überlagerte Anregung in x-,y-,z- und Wank-Richtung dargestellt. Für jede der Versuchsreihen und Blöcke gab es einen entsprechend aufgebauten Fragebogen.

5.4.2 Durchführung der Prüfstandsversuche

Die Durchführung der Nfz-Prüfstandsversuche erfolgt im Wesentlichen analog zu den Pkw-Versuchen. Auch hier wurden fünf Sitzschienensignale aus der Kombination Fahrzeug/Strecke als Anregung für die weiteren Subjektivbewertungen ausgewählt. Um die gesamte Spreizung der Anregungsstärke und auch alle streckenbedingten Schwingungscharakteristiken beizubehalten, wurden dabei für jede Strecke die Sitzkonsolenbeschleunigungen eines Fahrzeugs ausgewählt. Als Minimum und Maximum der Anregungsstärke wurde für die geringste Fahrbahnanregung das Signal des Busses gewählt und für die stärkste Fahrbahnanregung das Signal des Kippers. Die weitere Auswahl erfolgte nach dem Kriterium einer möglichst gleichmäßigen Verteilung der Anregungsstärke.

Um bei den Versuchspersonen, die bereits an den Fahrversuchen teilgenommen haben, zu verhindern, dass es durch die eventuell noch in Erinnerung vorhandene Zuordnung von Streckenbezeichnung zur Bewertung zu einer Beeinflussung kommt, wurden die fünf Sitzschienenbeschleunigungssignalen mit neuen Bezeichnungen versehen. Als Bezeichnungen wurden ebenfalls die Buchstaben von A-E verwendet. In Tabelle 5.4 sind die Zuordnungen der Fahrzeug/Strecken-Anregungen zu den neuen Bezeichnungen für die Prüfstandsanregungen aufgeführt.

Bezeichnung für Prüfstandsanregung	Streckenbezeichnung Fahrversuch	Sitzposition
A	1	BFG
B	2	BF
C	3	KF
D	4	KF
E	5	BF

Tabelle 5.4: Prüfstandsanregungen, Zuordnung der Fahrzeug/Streckenkombinationen

Die Befragung der Versuchspersonen bezüglich ihres Schwingempfindens erfolgte ebenfalls mit zwei Fragestellungen, nach dem Gesamtkörperschwingempfinden und nach dem Empfinden in einzelnen Körperregionen. Zur Abschirmung der Umgebungsgeräusche trugen die Versuchspersonen Anti-Schall-Kopfhörer. Eine detailliertere Darstellung dieser Versuche wird nun im Folgenden gegeben.

Fragebogen 1 (Abbildung 5.8):

Mit dem Fragebogen 1 sollte das Ganzkörperschwingempfinden abgefragt werden. Zur Beurteilung stand eine Skala von 1 - 10 in 0,5er-Schritten zur Verfügung. Die Skalenendbeschreibung wurde für 1 mit „sehr unangenehm“ und für 10 mit „kaum unangenehm“ gewählt. Dabei wurde die Skalenendbeschreibung als Tendenz und nicht als Absolutwert definiert. Hauptaugenmerk wurde vielmehr auf eine relative Bewertung der Schwingungsereignisse auf dieser Skala gelegt. Als Basisanregungen dienten die in Tabelle 5.5 aufgeführten Sitzschienen-Signale A bis E. Daraus wurden 35 zu bewertende Anregungen gebildet, die jeweils die Einzelrichtungen des Gesamtsignals oder

Kombinationen daraus enthalten. Daraus ergeben sich sieben Versuchsreihen zu je fünf Anregungen.

Versuchsreihe	Anregungsrichtungen	Anregungsbezeichnung
1	Kombination der x-, y-, z-, Wankrichtung der Signale A-E	A-w, B-w, C-w, D-w, E-w
2	Kombination der x-, y-, z-, Nickrichtung der Signale A-E	A-n, B-n, C-n, D-n, E-n
3	x-Richtung der Signale A-E	xA, xB, xC, xD, xE
4	y-Richtung der Signale A-E	yA, yB, yC, yD, yE
5	z-Richtung der Signale A-E	zA, zB, zC, zD, zE
6	n-Richtung der Signale A-E	nA, nB, nC, nD, nE
7	w-Richtung der Signale A-E	wA, wB, wC, wD, wE

Tabelle 5.5 : Versuchsreihen Prüfstandsversuche, Anregungsbezeichnungen

Im Gegensatz zu den Fahrversuchen war es bei den Nfz-Versuchen aufgrund der Größe der Sitze nicht möglich, beide gleichzeitig auf dem Prüfstand aufzubauen. Ein direkter Sitzvergleich konnte daher nicht stattfinden. Die Bewertung der beiden Sitze erfolgte in zwei Versuchsblöcken nacheinander. Die Bewertungen innerhalb dieser beiden Blöcke erfolgten in zwei Abschnitten.

Abschnitt 1: „Kennenlernen der Anregungen und Sitze“

Den Versuchspersonen wurde analog zum Verfahren bei den Fahrversuchen zum „Kennenlernen“ der Anregungen und Sitze alle Anregungen A bis E auf beiden Sitzen vorgespielt. Somit hatten die Versuchspersonen bei der eigentlichen Bewertung eine Vorstellung von der Spreizung der Anregungsstärke und ihren Empfindungen und konnten so für sich bereits eine grobe Einteilung festlegen.

Abschnitt 2: „Haupteinteilung“

Im zweiten Abschnitt erfolgte die eigentliche Bewertung der Anregungen.

In Abbildung 5.8 ist beispielhaft ein Fragebogen des Typs 1 für den Fahrersitz (FS) für die überlagerte Anregung in x-,y-,z- und Wank-Richtung dargestellt. Für jede der Versuchsreihen gab es einen entsprechend aufgebauten Fragebogen.

6 Bildung objektiver Kennparameter

Aus den Beschleunigungsmessungen wurden objektive Kennparameter zur Beschreibung der auf die Versuchspersonen einwirkenden Schwingungsanregungen gebildet.

Im Rahmen der Vorversuche wurde gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, zwischen Effektivwerten der Beschleunigungen als objektive Kennparameter und den abgegebenen Subjektivnoten einen Zusammenhang mit hoher Korrelation herzustellen. Im Rahmen der Vorversuche wurden für erste Untersuchungen lediglich drei Frequenzbereiche verwandt, die eine erste Einschätzung ermöglichten. Für die Auswertung der Hauptversuche wurden im Bereich von 0,1- 30 Hz alle möglichen Frequenzbereiche in 1 Hz Schrittweite gebildet.

Es ergeben sich auf diese Weise insgesamt 465 Frequenzbereiche.

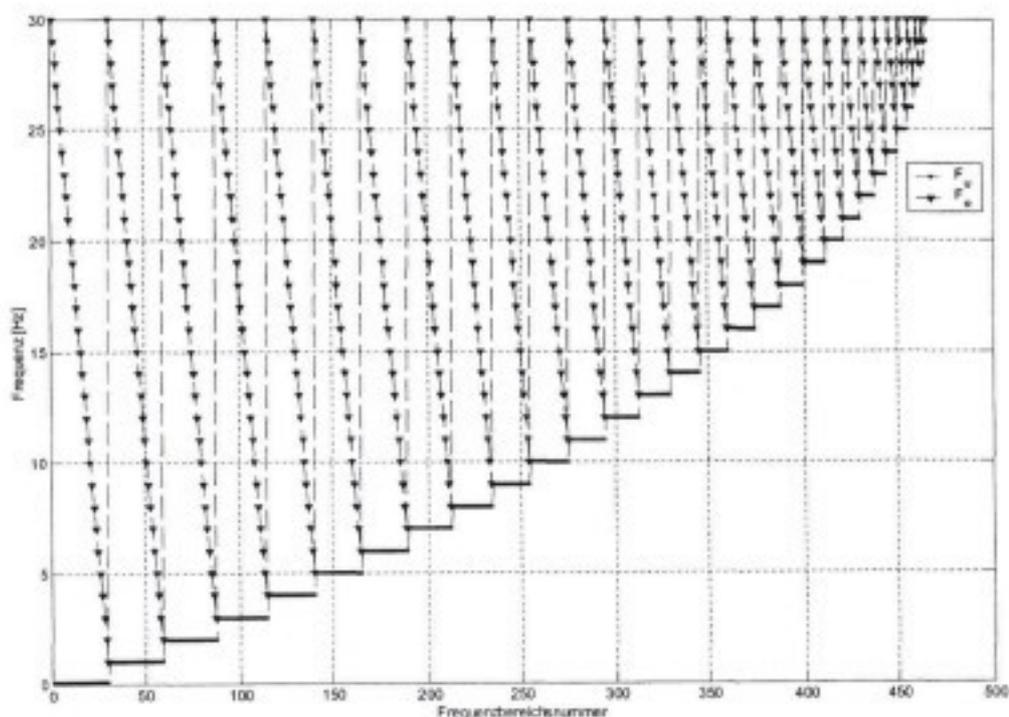


Abbildung 6.1 : Grafische Darstellung der Frequenzbereiche

In Abbildung 6.1 sind die 465 Frequenzbereiche grafisch mit ihren Grenzen und in entsprechender Reihenfolge dargestellt. Für jede Frequenzbereichsnummer ist die obere (F_o) und untere Frequenzgrenze (F_u) durch ein Dreieck bzw. ein Quadrat markiert. Dabei wird mit aufsteigender Frequenzbereichsnummer die untere Frequenzgrenze jeweils um 1 Hz erhöht und solange konstant gehalten, bis die von 30 Hz abnehmende obere Frequenzgrenze 1 Hz über der unteren Frequenzgrenze liegt.

Für die Bildung der Effektivwerte werden die gemessenen Beschleunigungs-Zeit-Verläufe mit dem CAE-Tool Matlab mittels einer Fast-Fourier-Transformation in ein diskretes Effektivwertspektrum mit 1024 Frequenzstützstellen überführt. Die Effektivwerte für die entsprechenden Frequenzbereiche berechnen sich dann nach folgender Gleichung.

$$a_{\text{eff,FB}} = \sqrt{\sum_{i=\eta_u}^{\eta_o} a_{\text{eff},i}^2} \quad \text{Gl. 6-1}$$

- $a_{\text{eff,FB}}$: Beschleunigungseffektivwert für den entsprechenden Frequenzbereich
 $a_{\text{eff},i}$: Teil-Beschleunigungseffektivwert für die Frequenzstützstelle i des Spektrums
 i : Frequenzbereichsstützstellennummer i des Spektrums
 η_u : Nummer der Frequenzstützstelle des Spektrums für untere Frequenzgrenze
 η_o : Nummer der Frequenzstützstelle des Spektrums für obere Frequenzgrenze

6.1 Fahrversuche Pkw

In Abbildung 6.2 bis Abbildung 6.11 sind die nach Gl.6.1 ermittelten Beschleunigungseffektivwerte an den zwei mit dem Menschen in Verbindung stehenden Messstellen (Sitzfläche, Lehnenfläche) jeweils triaxial für alle Strecken und alle drei Fahrzeuge im Vergleich dargestellt. Jede Abbildung besteht aus vier Diagrammen. In den oberen drei sind jeweils für die drei Fahrzeuge die Beschleunigungseffektivwerte in x-, y- und z-Richtung dargestellt. Auf der Abszisse sind jeweils die 465 Frequenzbereiche, wie oben beschrieben, aufgetragen, auf der Ordinate der Beschleunigungseffektivwert. Im untersten Diagramm sind für die einzelnen Frequenzbereiche jeweils die entsprechenden Grenzen dargestellt. Wenn man nun eine Senkrechte durch alle Diagramme einer Abbildung zieht, kann man auf diese Weise für jeden Frequenzbereich die entsprechenden Beschleunigungseffektivwerte ablesen.

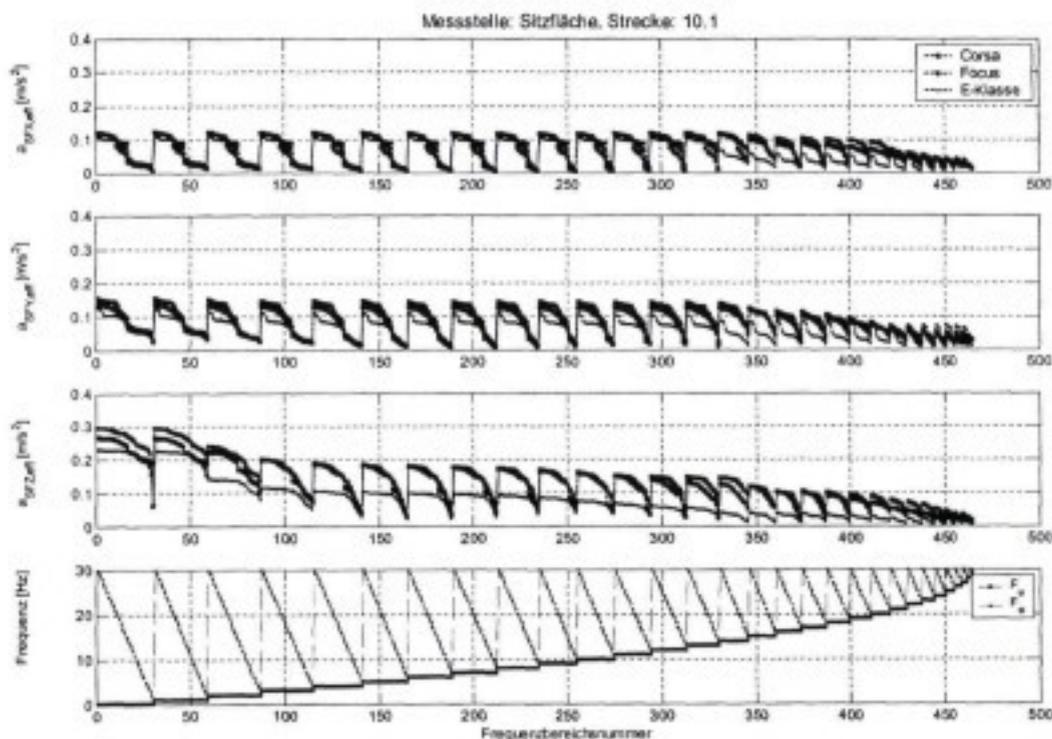


Abbildung 6.2 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 10.1

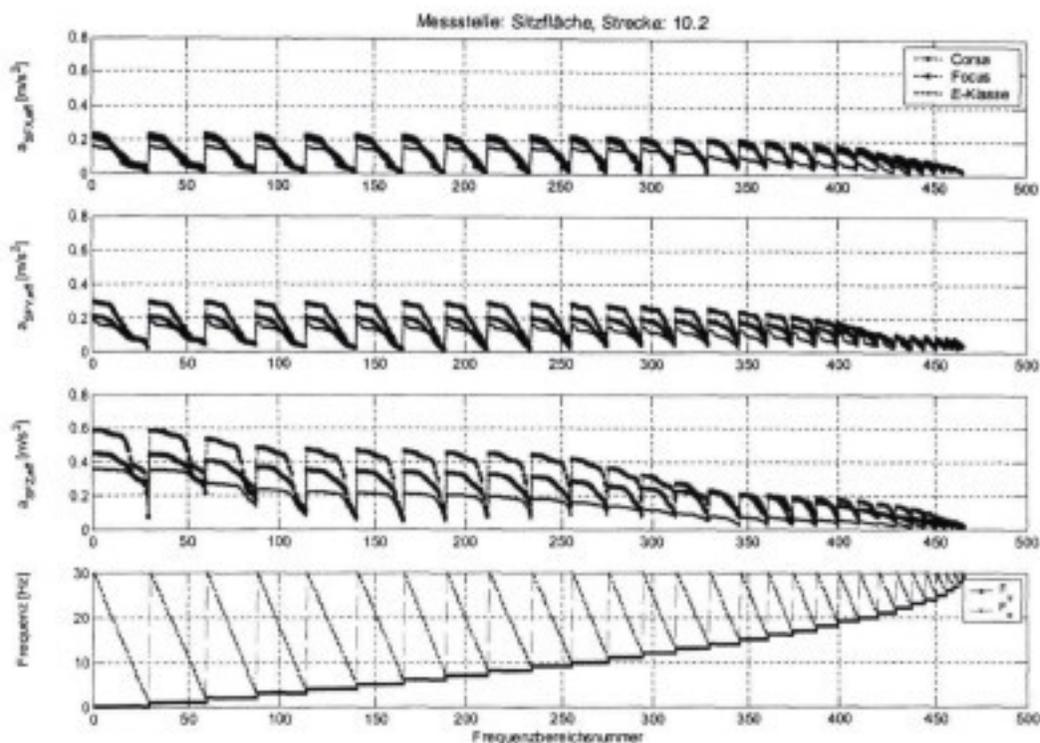


Abbildung 6.3 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 10.2

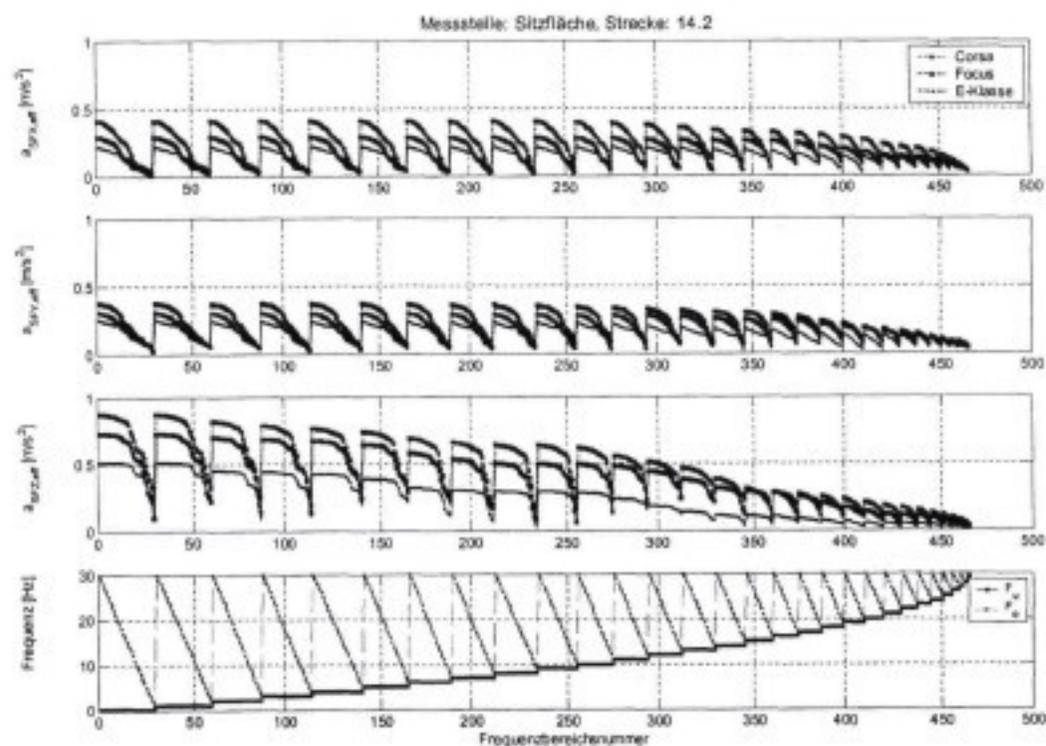


Abbildung 6.4 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 14.2

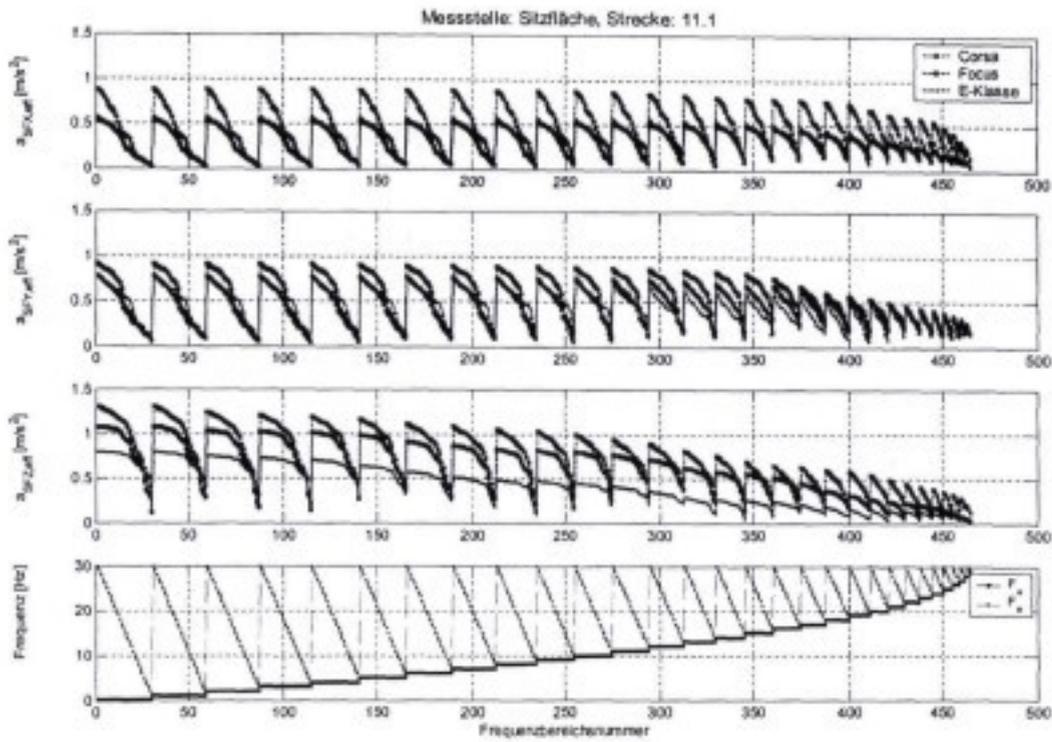


Abbildung 6.5 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 11

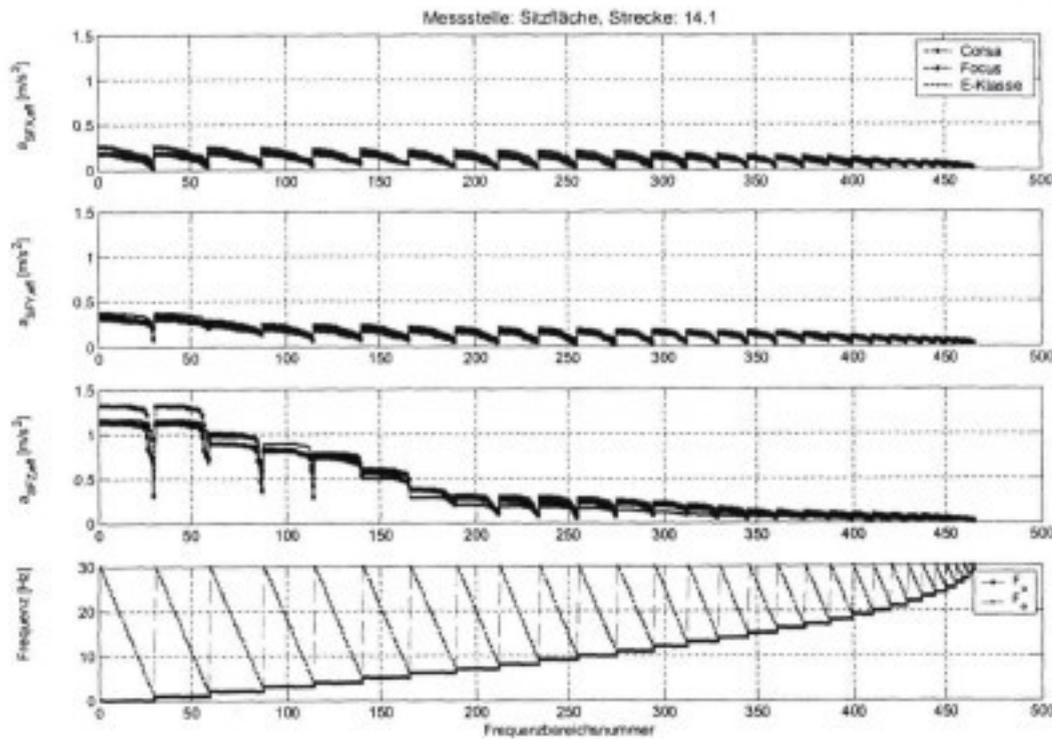


Abbildung 6.6 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 14.1

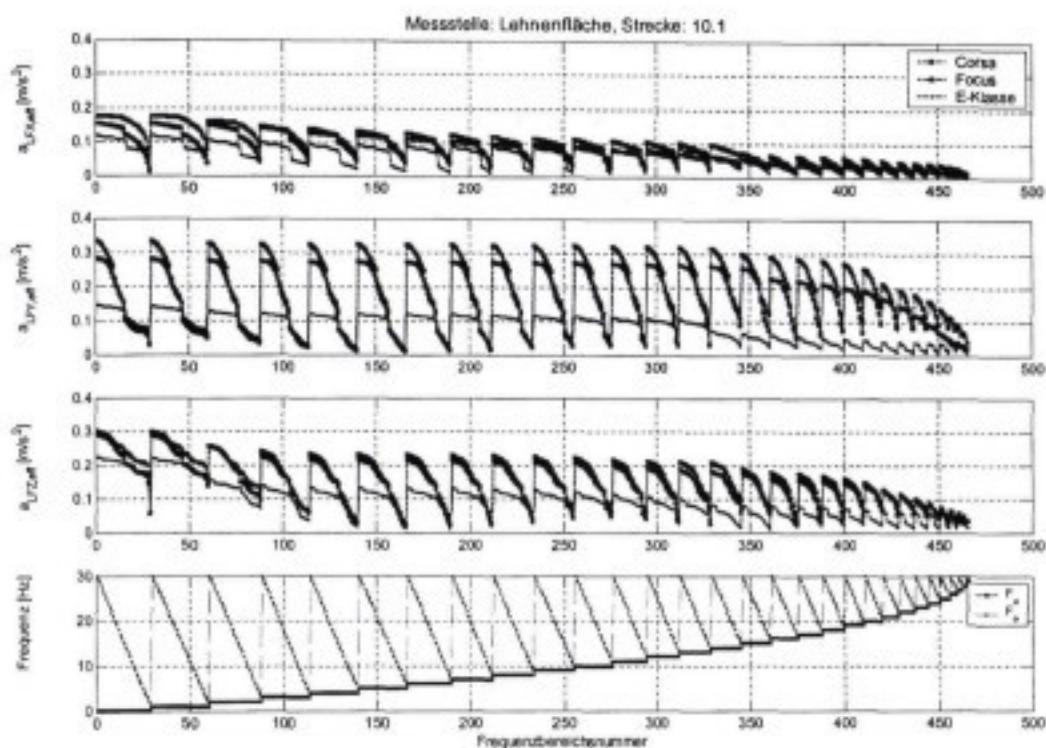


Abbildung 6.7 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 10.1

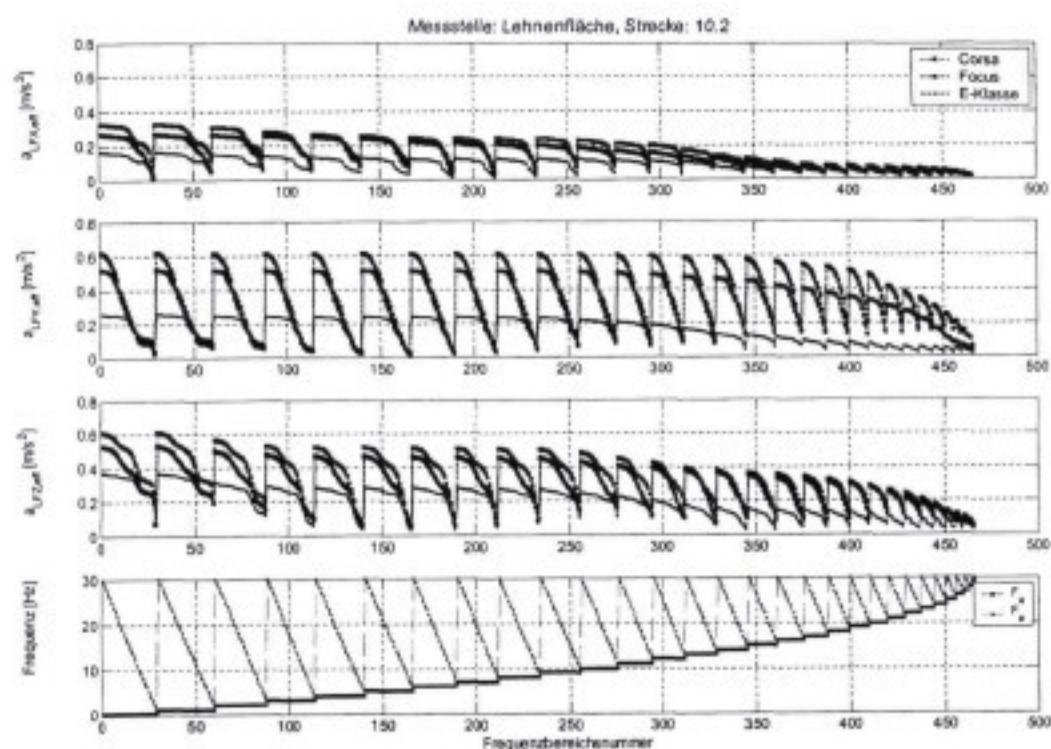


Abbildung 6.8 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 10.2

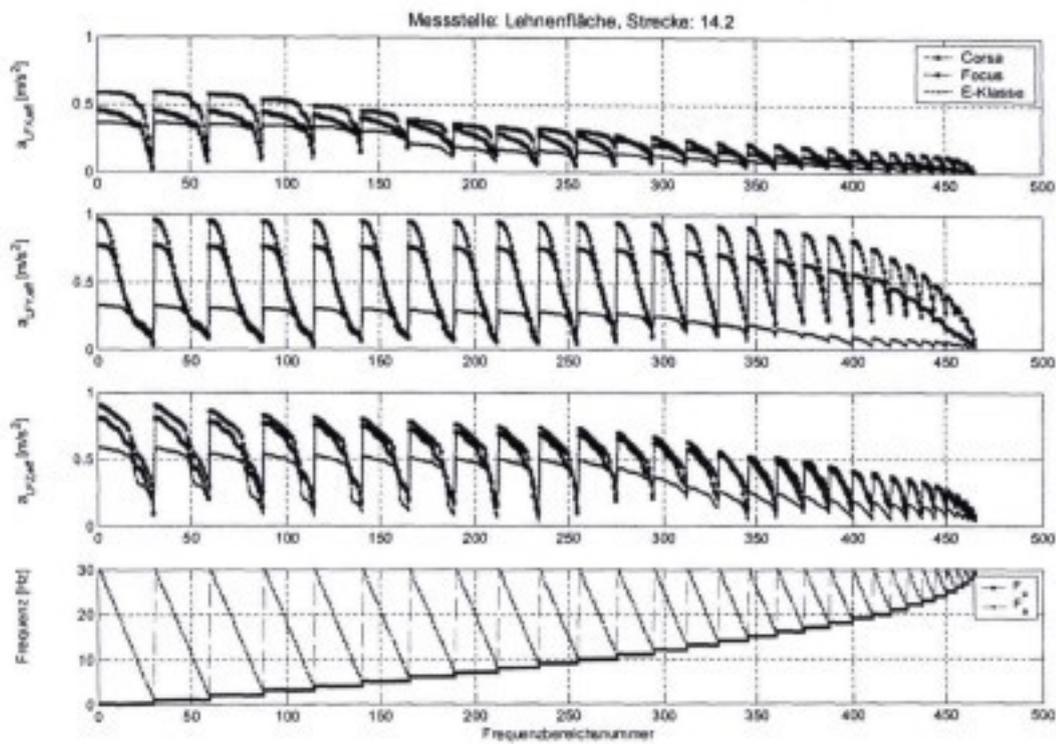


Abbildung 6.9 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 14.2

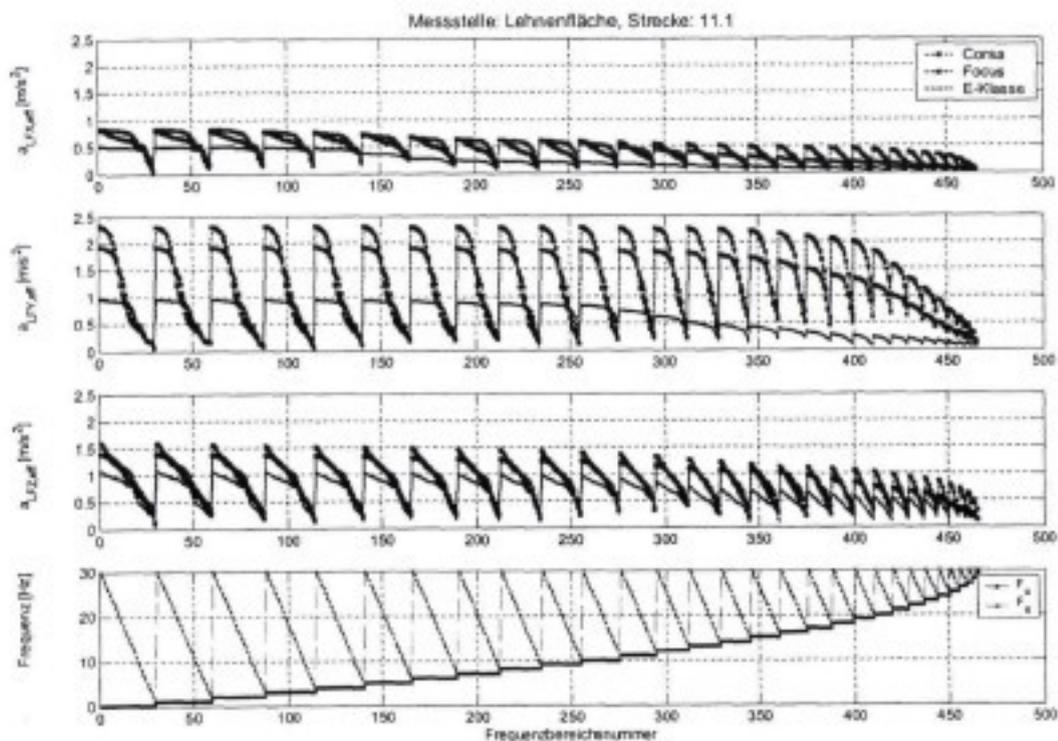


Abbildung 6.10 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 11.1

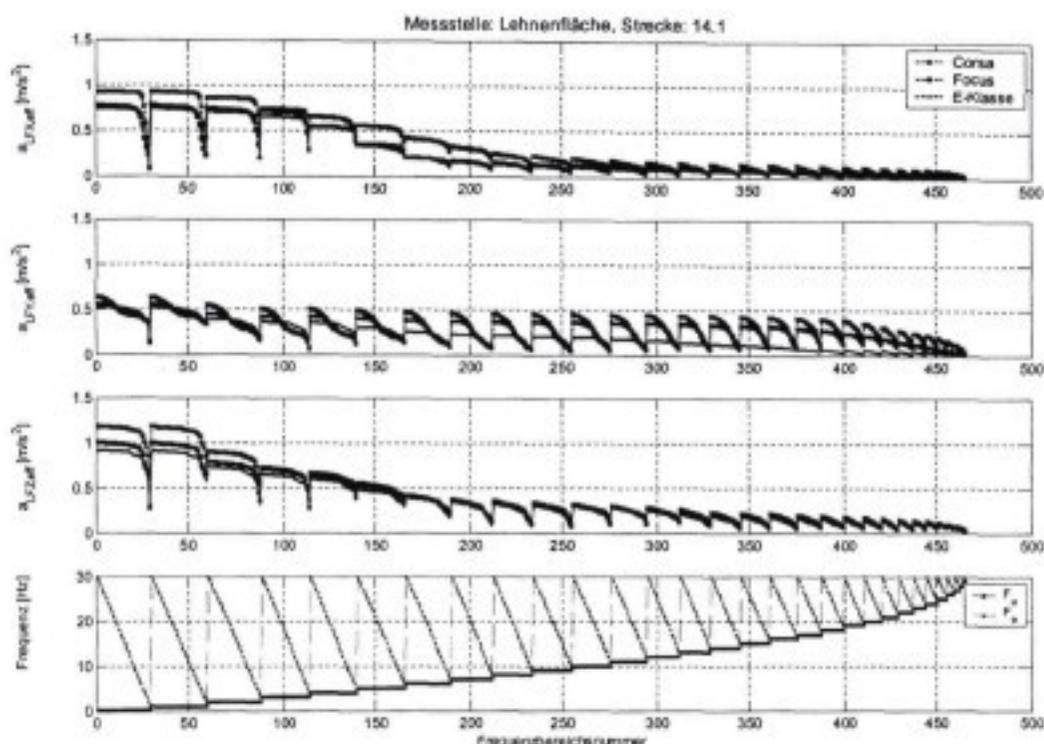


Abbildung 6.11 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 14.1

6.2 Fahrversuche Nfz

In Abbildung 6.12 bis Abbildung 6.26 sind die nach Gl.6.1 ermittelten Beschleunigungseffektivwerte an den Messstellen Sitzkonsole, Sitzfläche, Lehnenfläche jeweils triaxial für alle Strecken und alle drei Fahrzeuge im Vergleich dargestellt. Die Darstellung erfolgt analog zu den vorhergehenden Diagrammen. In den oberen drei sind jeweils für die drei Sitzpositionen die Beschleunigungseffektivwerte in x-, y- und z-Richtung dargestellt. Auf der Abszisse sind jeweils die 465 Frequenzbereiche aufgetragen, auf der Ordinate der Beschleunigungseffektivwert. Im untersten Diagramm sind für die einzelnen Frequenzbereiche jeweils die entsprechenden Grenzen dargestellt. Auch hier kann durch eine Senkrechte durch alle Diagramme der Beschleunigungseffektivwert für jeden Frequenzbereich ablesen werden. Auf Strecke 1, die aufgrund ihrer Beschaffenheit nur sehr geringe Nick- und Wankbewegungen hervorgerufen hat, liegen die Effektivwerte für die Fahrer- und Fahrgastsitzposition im Bus erwartungsgemäß nahe beieinander. Bei den weiteren Strecken mit stärkerer Anregung unterscheiden sich die Effektivwerte je nach Anregungsform vor allem in z- und y-Richtung. Dies ergibt sich aus der unterschiedlichen Lage des Fahrer- und Fahrgastsitzes zum Nick- und Wankpol des Fahrzeugs. Die x-Richtung bleibt davon weitgehend unbeeinflusst. Die Beschleunigungen im Kipper sind durchgehend wesentlich höher als im Bus.

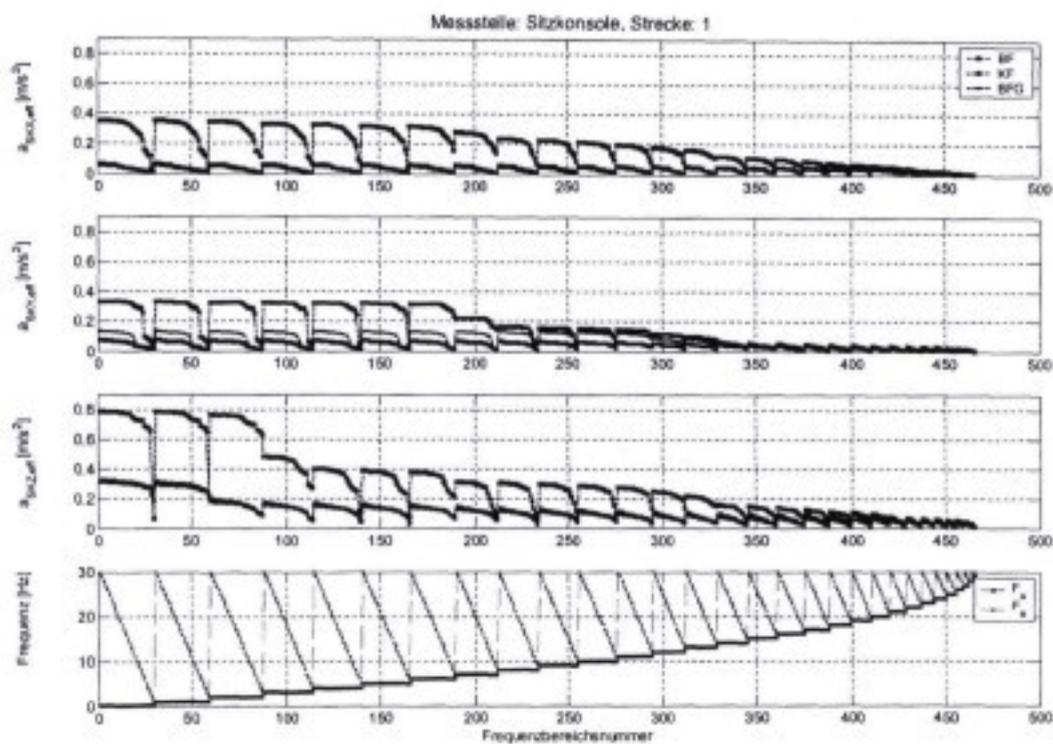


Abbildung 6.12 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzkonsole, Strecke 1

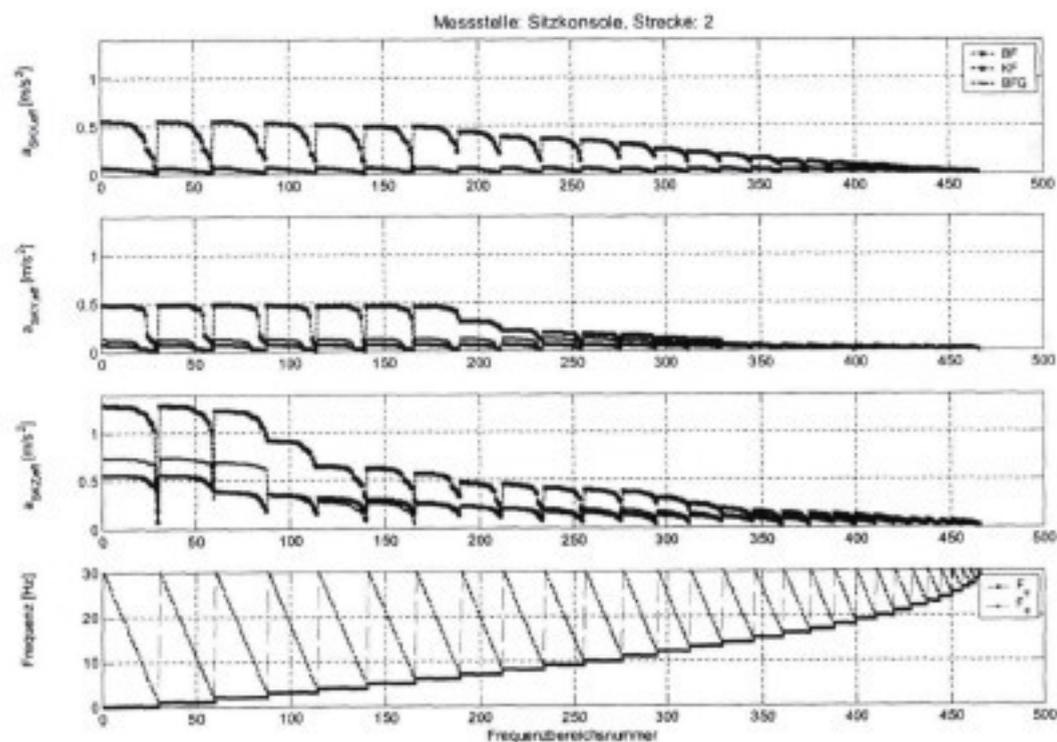


Abbildung 6.13 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzkonsole, Strecke 2

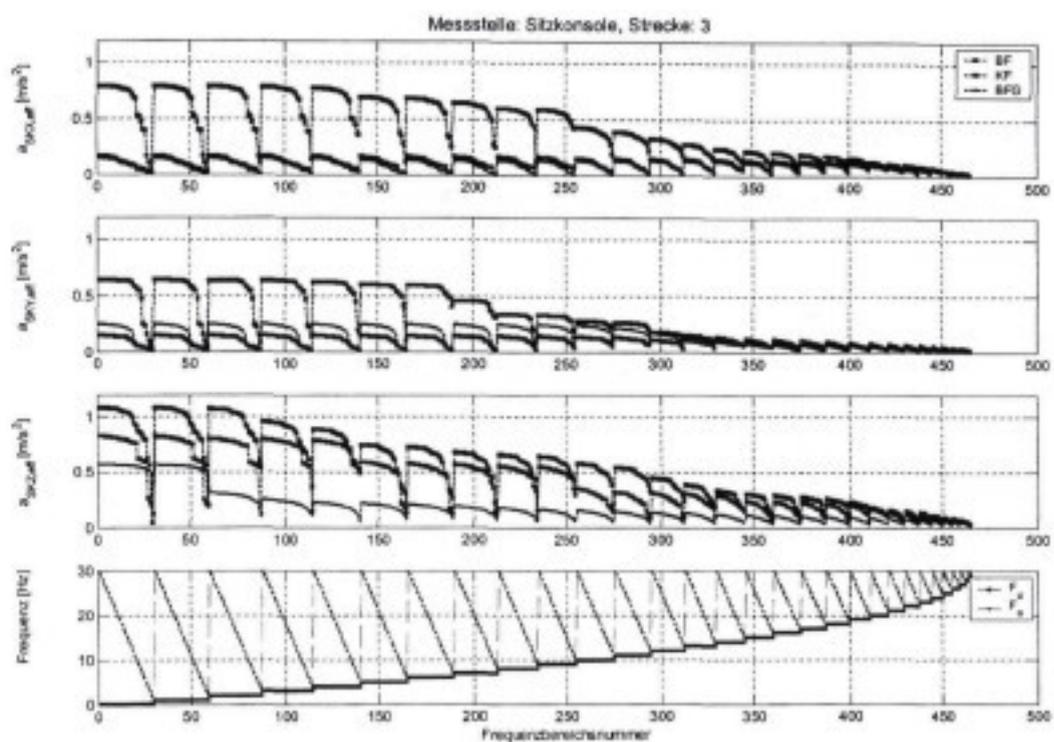


Abbildung 6.14 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzkonsole, Strecke 3

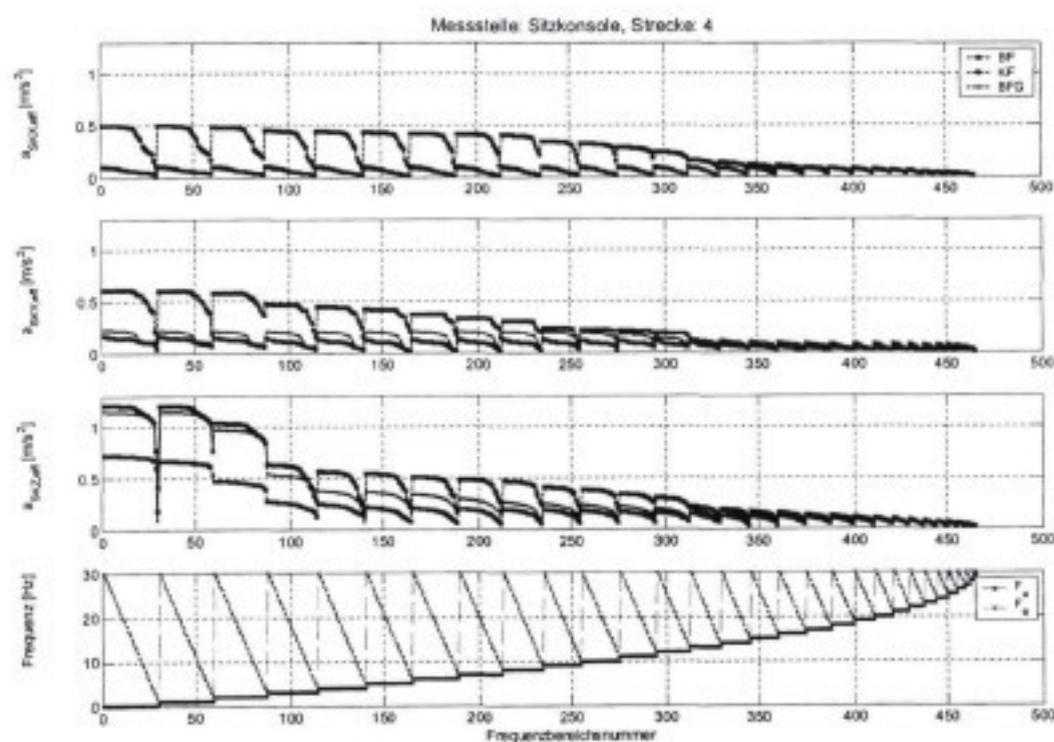


Abbildung 6.15 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzkonsole, Strecke 4

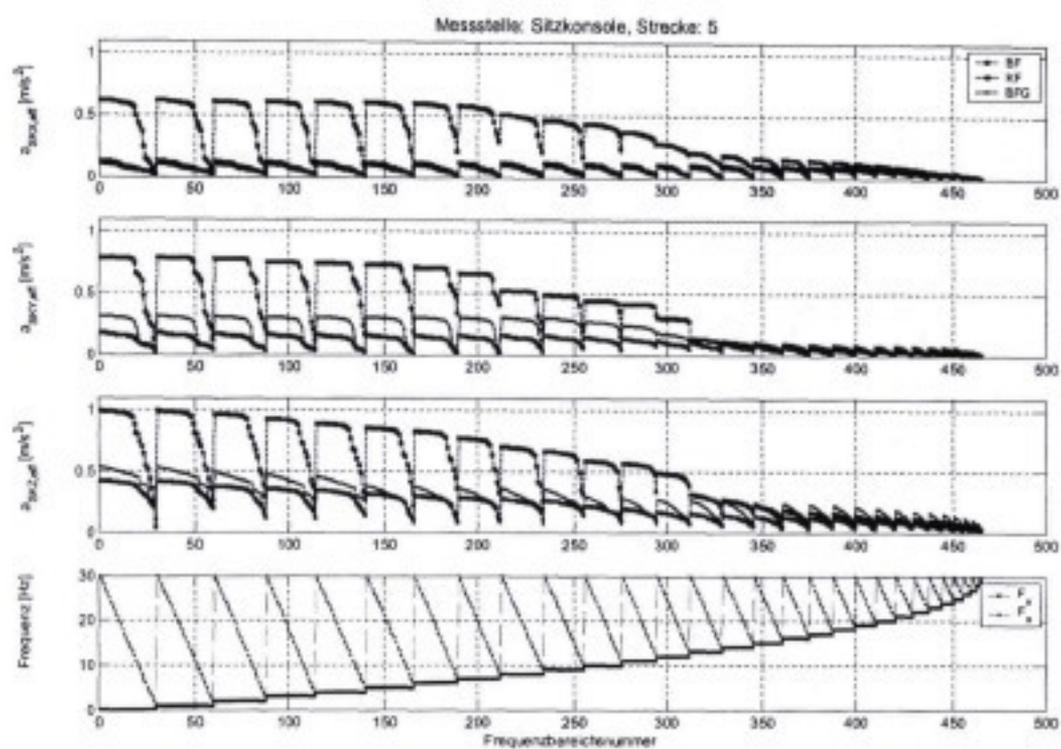


Abbildung 6.16 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzkonsole, Strecke 5

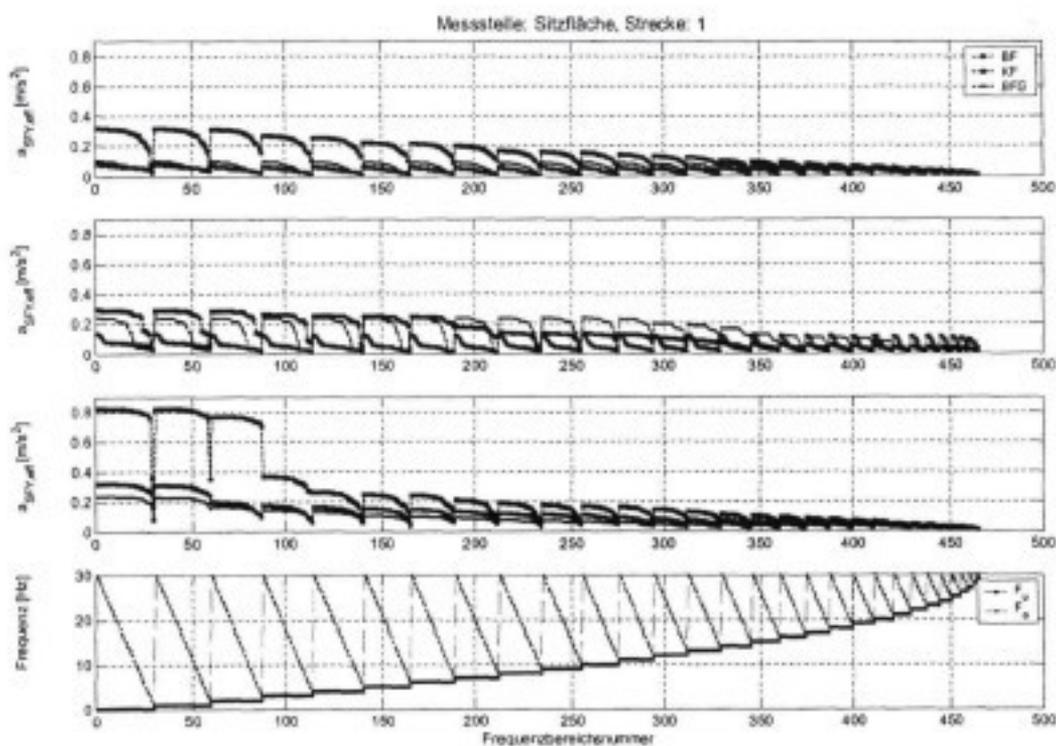


Abbildung 6.17 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 1

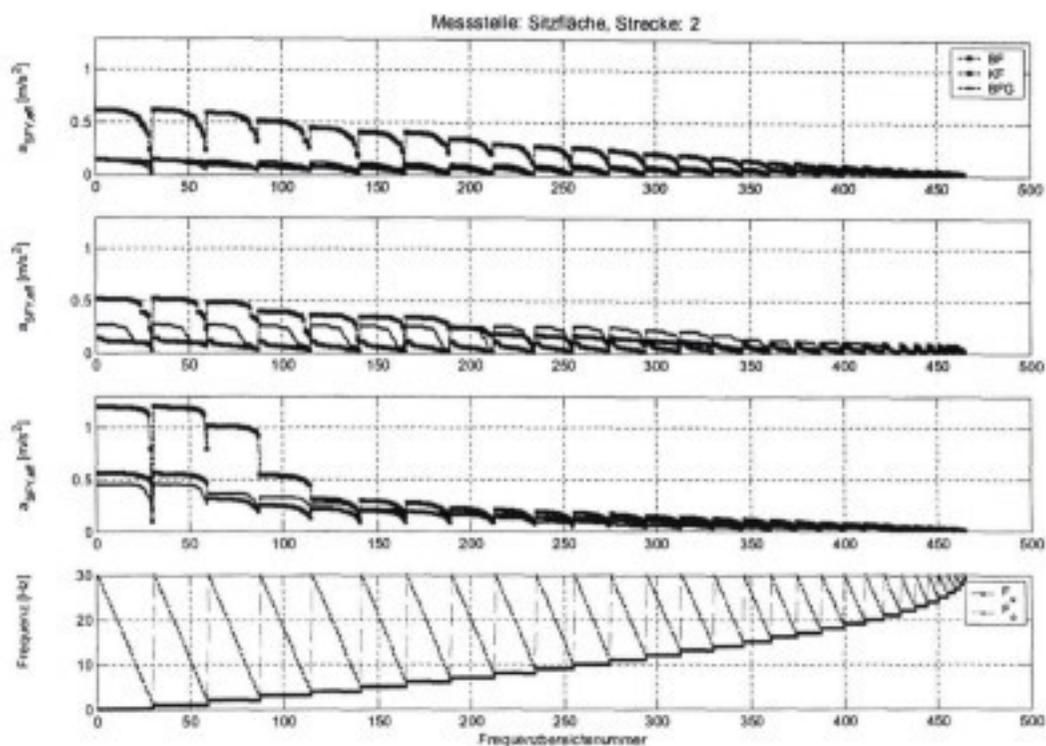


Abbildung 6.18 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 2

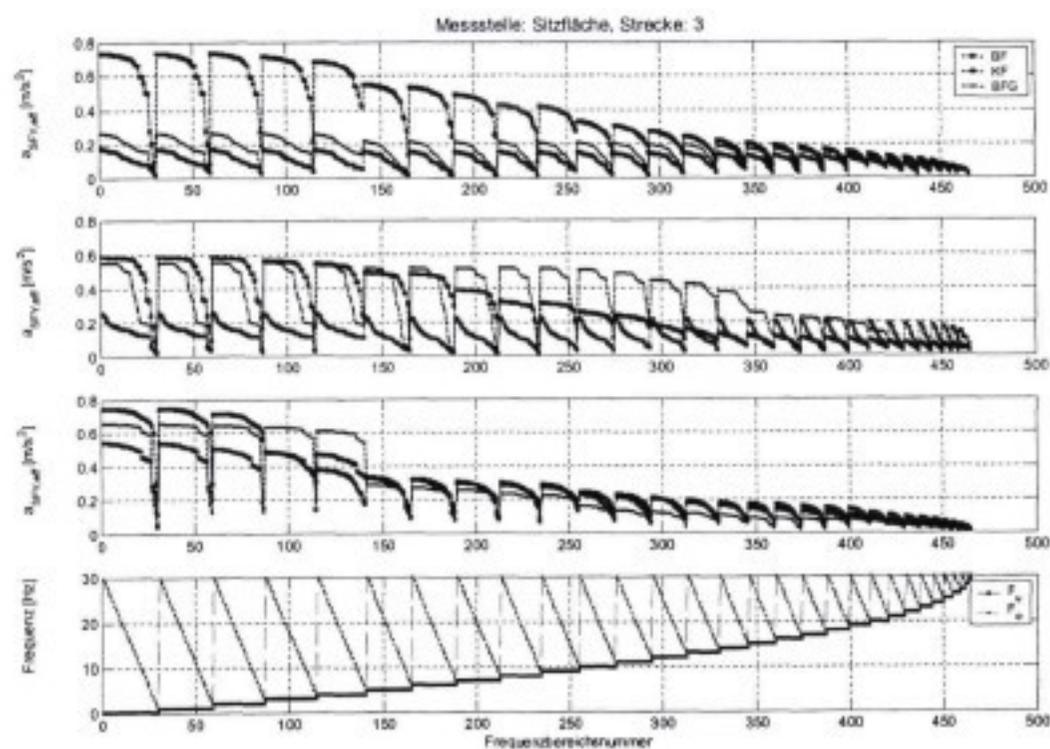


Abbildung 6.19 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 3

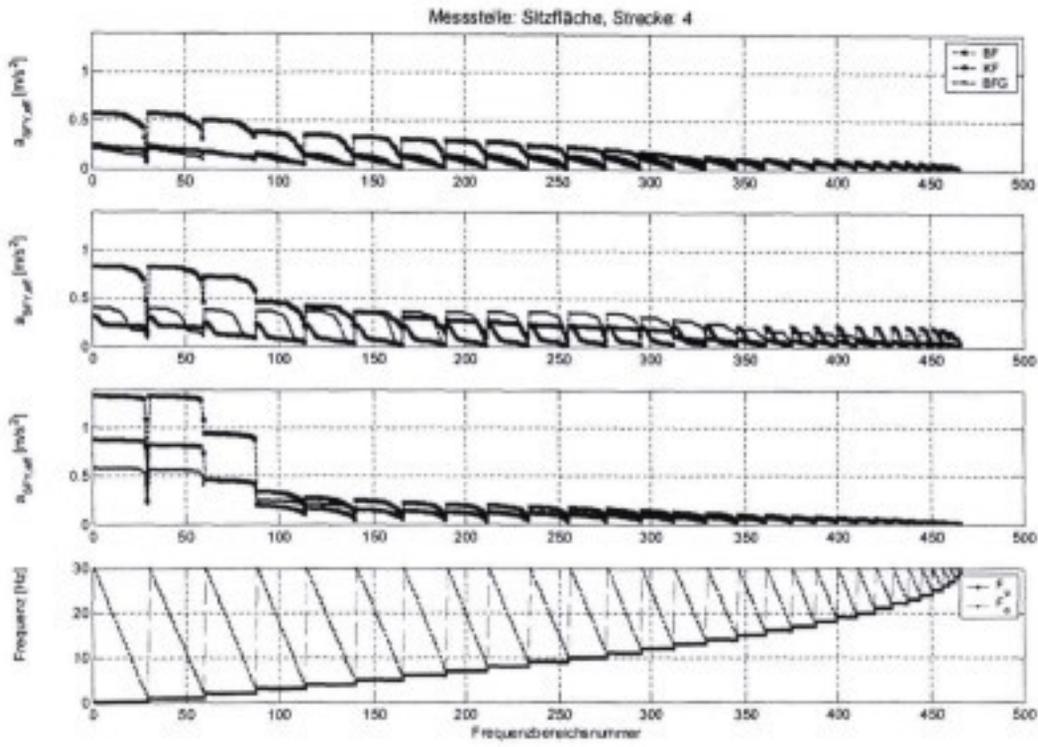


Abbildung 6.20 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 4

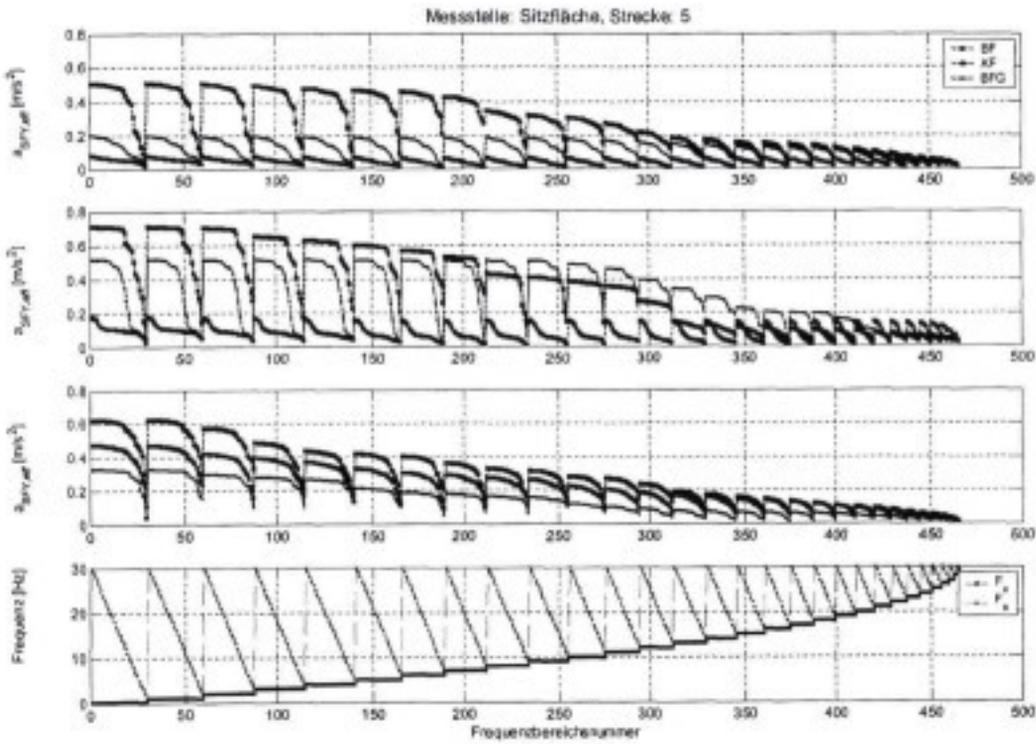


Abbildung 6.21 : Beschleunigungseffektivwerte für die Sitzfläche, Strecke 5

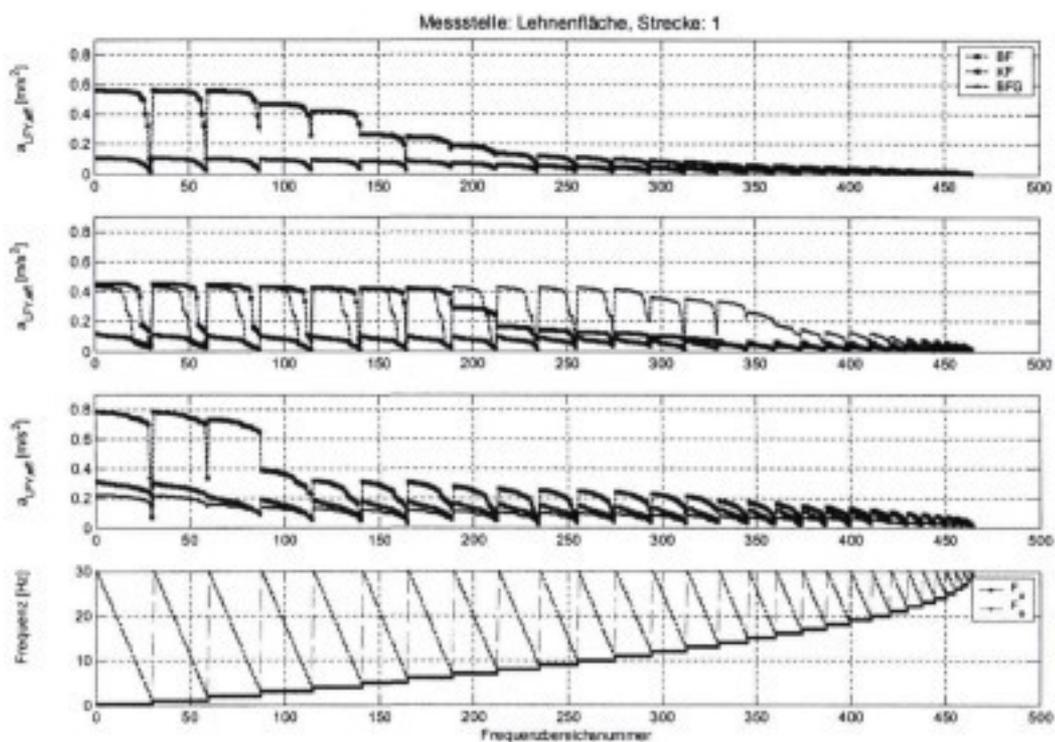


Abbildung 6.22 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 1

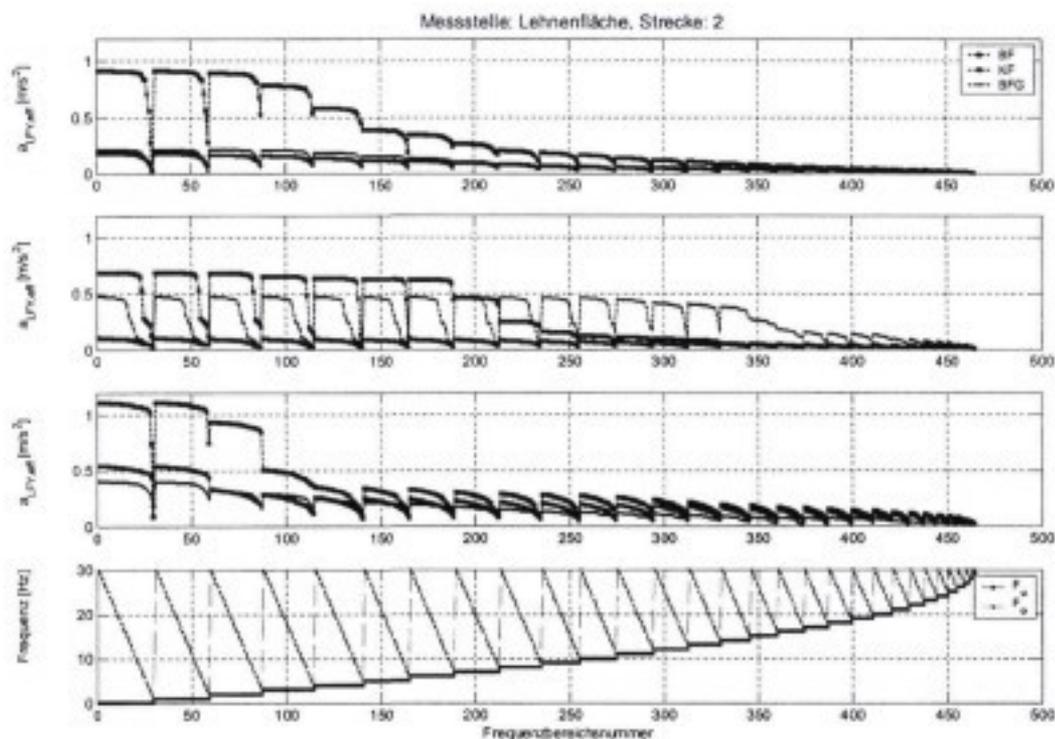


Abbildung 6.23 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 2

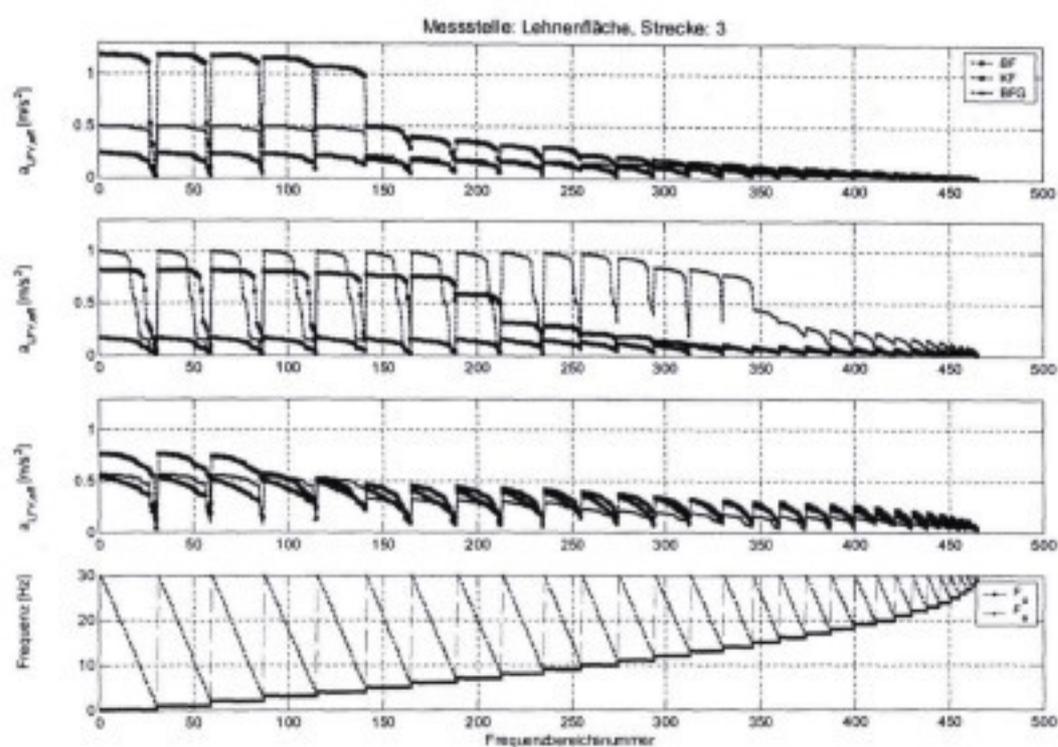


Abbildung 6.24 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 3

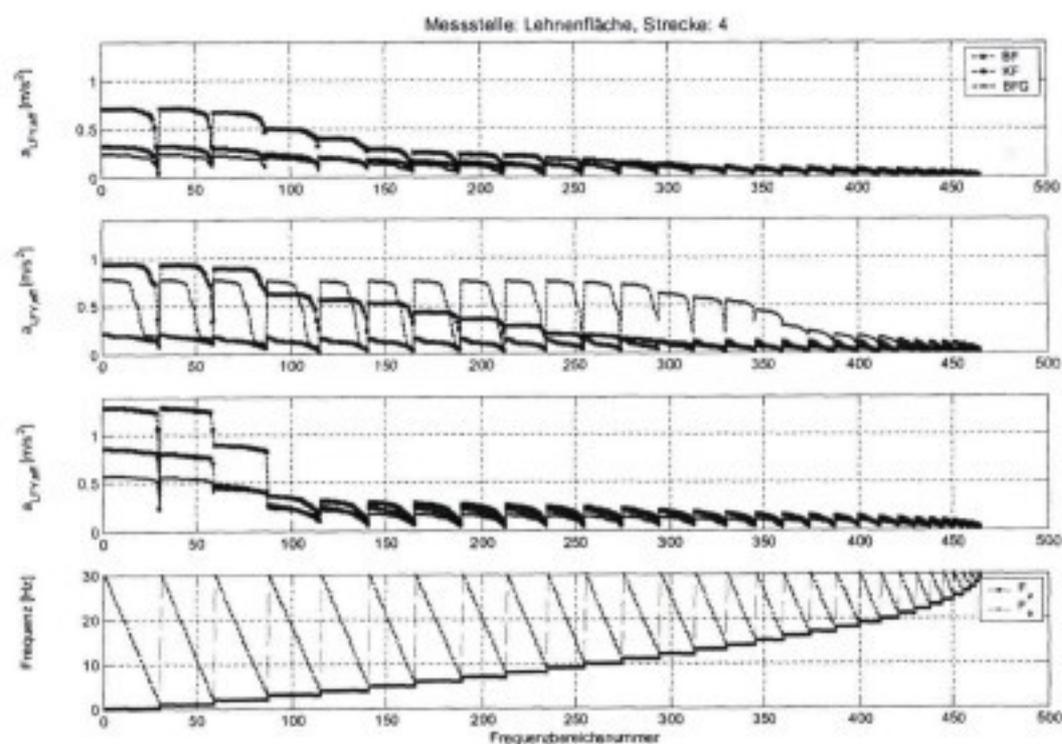


Abbildung 6.25 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 4

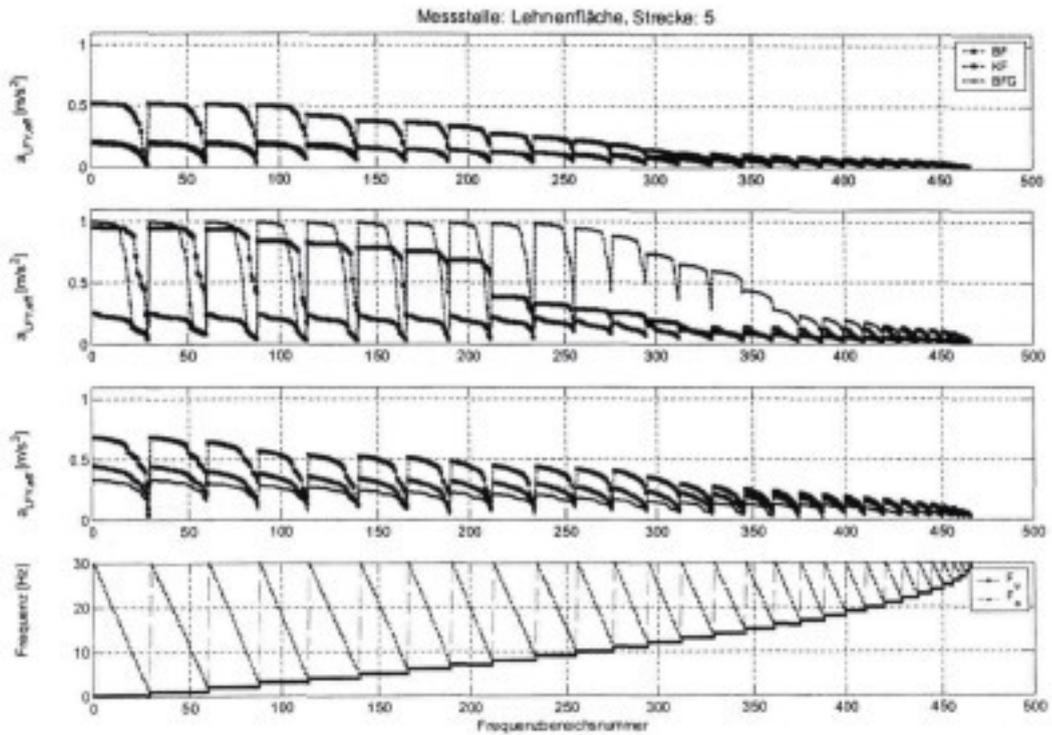


Abbildung 6.26 : Beschleunigungseffektivwerte für die Lehnenfläche, Strecke 5

6.3 Prüfstandsversuche

Auf die Darstellung der objektiven Kennparameter für die Prüfstandsversuche soll hier verzichtet werden, da sie mit einer gewissen Toleranz denen aus den Fahrversuchen entsprechen.

7 Auswertung der Subjektivnoten

7.1 Mathematische Auswerteverfahren

Die in den Versuchen gewonnenen Rohdaten müssen mit Hilfe von mathematischen Verfahren so aufbereitet werden, dass sie zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse liefern. In diesem Kapitel erfolgt die Darstellung der notwendigen Berechnungsabläufe. Zunächst wird mit der Standardisierung eine Möglichkeit zur Harmonisierung von Daten erläutert.

7.1.1 Standardisierung

Die Standardisierung dient zur Angleichung unterschiedlicher Wertebereiche oder Skalenumfänge von Variablen. Dabei wird jedem Variablenwert ein Platz auf einer Standardskala zugewiesen. Dieses Verfahren ist notwendig, da bei der Beurteilung keine Notenvorgaben (Referenznoten) für bestimmte Ereignisse erfolgten. Jede Testperson legte sich einen eigenen Beurteilungsmaßstab innerhalb der zur Verfügung stehenden Noten von 1-10 fest. Zum Notenvergleich müssen diese unterschiedlichen Bewertungsmaßstäbe, charakterisiert durch Mittelwert und Standardabweichung, auf einen einheitlichen Bezugsmaßstab transformiert werden. Dies geschieht häufig schon im Vorhinein bei der Durchführung der Versuche, indem für mindestens zwei Ereignisse Referenznoten festgelegt werden. Dadurch legt man sowohl das Bewertungsniveau als auch die Spreizung fest. Da aufgrund des Versuchsablaufes kein wiederholtes Vorspielen solcher Referenzereignisse möglich war, wird diese „Referenzierung“ im Nachhinein durch die Standardisierung erzielt.

Durch Einsetzen von zweckmäßig gewählten Werten für den Mittelwert \bar{z} und die Standardabweichung σ_{stand} , also den verteilungsbeschreibenden Parametern nach der Transformation, können mit Gl. 7-1 die standardisierten Noten berechnet werden.

Aufgrund des Versuchsablaufes und der Bewertung mit frei wählbarem Bewertungsmaßstab wird die Standardisierung am sinnvollsten auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Grundgesamtheit (Noten aller Testpersonen für alle Ereignisse) bezogen.

Daraus ergibt sich wie folgt:

$$z = \bar{z} + \frac{\sigma_{\text{stand}}}{\sigma} \cdot (x - \bar{x}) \quad \text{Gl. 7-1}$$

z	=	standardisierte Note
\bar{z}	=	Mittelwert aller abgegebenen Noten
σ_{stand}	=	Standardabweichung aller abgegebenen Noten
σ	=	Standardabweichung aller Noten einer Testperson
x	=	zu transformierende Note
\bar{x}	=	Mittelwert aller Noten einer Testperson

Die standardisierten Noten der einzelnen Versuchspersonen sind dann direkt untereinander vergleichbar.

7.1.2 Ausreißertest nach Nalimov

Um eventuelle Ausreißer aus dem Datenmaterial zu eliminieren, wird der Ausreißertest nach Nalimov verwendet. Dieser Test kann ab drei Vergleichsmessungen angewandt werden. Die Größe der Entscheidungsschärfe steigt mit der Anzahl der Vergleichsmessungen.

Berechnungsweg :

Man berechnet r^* , indem man x^* , den ausreißerverdächtigen Wert, in die Gleichung 7.2 einsetzt. Man entscheidet, indem man r^* mit r_t (aus r-Tabelle, abhängig von n und P%) vergleicht.

$$r^* = \frac{|x^* - \bar{x}|}{s} \cdot \sqrt{\frac{n}{n-1}} \quad \text{Gl. 7-2}$$

n = Anzahl der Vergleichsmessungen

s = Standardabweichung der Vergleichsmessungen

\bar{x} = Mittelwert der Vergleichsmessungen

x^* = ausreißerverdächtigen Wert

Bezogen auf die Auswertung der Subjektivnoten bedeutet dies, dass Bewertungen, die mit diesem Test als Ausreißer identifiziert werden und damit stark von den Beurteilungen der anderen Versuchspersonen abweichen, bei der weiteren Auswertung nicht mehr berücksichtigt werden. Damit vermeidet man die verfälschende Wirkung von Versuchspersonen, die entweder nicht in der Lage sind Schwingungseinwirkungen differenziert zu bewerten oder einen Beurteilungsmaßstab anlegen, der nicht dem Durchschnitt entspricht und damit bei der Entwicklung eines einheitlichen Bewertungsmaßstabes nicht berücksichtigt werden können.

7.2 Auswertung Fahrversuche Pkw

Im Folgenden wird die Auswertung der drei Fragebögen aus den Fahrversuchen dargestellt.

Dies geschieht für Frauen und Männer getrennt. Es werden dabei nur die Versuchspersonen aus den Hauptversuchen berücksichtigt. Auf die Hinzunahme der sechs Versuchspersonen aus den Vorversuchen wurde verzichtet, da die Versuche etwa ein halbes Jahr auseinander lagen und damit auch zu verschiedenen Jahreszeiten mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen stattfanden. Etwaige Einflüsse daraus konnten daher nicht ausgeschlossen werden. Ein Vergleich hat jedoch gezeigt, dass die Bewertungen weitgehend identisch sind und eine Hinzunahme dieser Bewertungen das Ergebnis nicht verändern würde.

Fragebogen 1 (Abbildung 11.1):

Zu Beginn der Auswertung stehen die Noten, wie sie von den Versuchspersonen für die einzelnen Fahrzeug-Streckenkombinationen während der Versuche abgegeben wurden.

Dynamischer Sitzkomfort - Auswertung der Subjektivnoten

Anreg.		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VP8	VP9	VP10	μ	σ	Min	Max
10.1	C	8,0	9,0	8,5	8,0	8,0	9,0	8,0	8,0	7,5	7,5	8,15	0,53	7,5	9,0
10.1	F	9,0	9,5	9,0	9,0	9,0	9,0	8,5	9,0	9,0	8,5	8,95	0,28	8,5	9,5
10.1	E	10,0	9,5	9,5	10,0	9,5	10,0	9,0	10,0	10,0	9,5	9,70	0,35	9,0	10,0
10.2	C	7,0	8,0	7,0	6,0	6,5	7,5	6,5	6,0	5,5	7,0	6,70	0,75	5,5	8,0
10.2	F	8,0	8,5	8,0	8,0	8,0	8,0	7,5	7,5	7,0	8,0	7,85	0,41	7,0	8,5
10.2	E	9,0	8,5	8,5	9,0	8,5	8,5	8,0	9,0	9,0	9,0	8,70	0,35	8,0	9,0
14.2	C	4,5	6,5	4,0	4,0	3,0	3,0	5,0	4,0	4,5	4,0	4,25	1,01	3,0	6,5
14.2	F	6,0	8,0	5,0	6,0	5,0	3,5	5,5	6,0	5,5	5,0	5,55	1,14	3,5	8,0
14.2	E	7,5	9,0	5,5	7,0	5,0	7,0	7,5	8,0	7,0	7,0	7,05	1,14	5,0	9,0
11.1	C	3,5	5,0	3,5	4,0	2,0	3,5	3,0	2,5	2,5	3,0	3,25	0,86	2,0	5,0
11.1	F	4,5	6,5	4,5	5,0	3,5	5,0	4,0	4,5	3,5	4,5	4,55	0,86	3,5	6,5
11.1	E	6,0	8,0	5,0	7,0	6,0	7,5	6,0	6,5	5,5	6,0	6,35	0,91	5,0	8,0
14.1	C	2,0	4,0	2,0	3,0	2,5	1,5	5,5	2,5	1,5	2,5	2,70	1,23	1,5	5,5
14.1	F	1,0	5,5	3,0	4,0	4,0	2,5	6,0	4,0	3,0	3,5	3,65	1,43	1,0	6,0
14.1	E	3,5	4,0	3,5	5,0	4,5	4,5	6,5	5,5	4,5	5,0	4,65	0,91	3,5	6,5
Min		1,0	4,0	2,0	3,0	2,0	1,5	3,0	2,5	1,5	2,5				
Max		10,0	9,5	9,5	10,0	9,5	10,0	9,0	10,0	10,0	9,5				
μ		5,97	7,30	5,77	6,33	5,67	6,00	6,43	6,20	5,70	6,00				
σ		2,72	1,92	2,45	2,16	2,48	2,76	1,69	2,37	2,53	2,26				

μ_{ges} 6,14
 σ_{ges} 2,33

Tabelle 7.1: Fragebogen 1, Frauen, Rohdaten

Anreg.		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VP8	μ	σ	Min	Max
10.1	C	9,0	8,0	8,0	7,0	8,0	8,5	8,0	8,5	8,13	0,58	7,0	9,0
10.1	F	9,5	8,5	9,0	9,0	8,5	9,0	8,5	9,0	8,88	0,35	8,5	9,5
10.1	E	10,0	9,0	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,50	0,27	9,0	10,0
10.2	C	8,0	7,0	6,0	6,0	7,0	7,0	7,0	7,5	6,94	0,68	6,0	8,0
10.2	F	8,5	7,5	7,5	7,5	7,5	8,0	7,5	8,0	7,75	0,38	7,5	8,5
10.2	E	9,0	8,5	8,5	9,0	8,5	8,5	8,5	9,0	8,69	0,26	8,5	9,0
14.2	C	6,0	4,0	5,0	4,0	5,0	4,0	3,0	3,5	4,31	0,96	3,0	6,0
14.2	F	6,5	4,5	5,0	4,5	5,0	6,0	4,5	5,5	5,19	0,75	4,5	6,5
14.2	E	7,5	6,5	6,0	8,0	7,0	6,5	5,5	8,0	6,88	0,92	5,5	8,0
11.1	C	3,0	3,0	3,5	4,5	4,5	3,5	2,5	4,0	3,56	0,73	2,5	4,5
11.1	F	4,5	3,5	3,0	5,0	5,5	5,0	3,5	5,0	4,38	0,92	3,0	5,5
11.1	E	5,0	4,5	5,5	8,0	6,5	6,0	5,0	7,0	5,94	1,18	4,5	8,0
14.1	C	3,5	1,0	2,5	4,0	2,0	2,0	1,0	2,0	2,25	1,07	1,0	4,0
14.1	F	5,0	2,5	3,5	7,0	3,0	3,5	2,5	3,0	3,75	1,54	2,5	7,0
14.1	E	6,0	2,5	3,0	8,0	4,0	4,5	2,5	5,0	4,44	1,90	2,5	8,0
Min		3,0	1,0	2,5	4,0	2,0	2,0	1,0	2,0				
Max		10,0	9,0	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5				
μ		6,73	5,37	5,70	6,73	6,10	6,10	5,27	6,30				
σ		2,24	2,62	2,35	1,93	2,18	2,31	2,73	2,45				

μ_{ges} 6,04
 σ_{ges} 2,35

Tabelle 7.2: Fragebogen 1, Männer, Rohdaten

Diese Noten werden im nächsten Schritt zunächst auf den Mittelwert und die Standardabweichung aller abgegebenen Noten (siehe Tabelle 7.1 und Tabelle 7.2 rechts unten) standardisiert und dann auf einen gemeinsamen Mittelwert und Standardabweichung für Männer und Frauen, um auch hier einen direkten Vergleich zu ermöglichen.

Wie man sieht, liegen Mittelwert und Standardabweichung der Rohdaten für Männer und Frauen bereits sehr dicht beieinander, so dass nur eine sehr geringe Anpassung notwendig ist. Für die Standardisierung werden für Männer und Frauen jeweils ein $\mu_{ges} = 6,0$ und ein $\sigma_{ges} = 2,33$ gewählt. Damit ergeben sich die in Tabelle 7.1- Tabelle 7.4 dargestellten Werte. Diese werden mit dem Verfahren nach Nalimov auf Ausreißer überprüft. Die grau markierten Felder sind die als Ausreißer identifizierten Bewertungen. Diese werden bei der weiteren Analyse nicht mehr berücksichtigt. In Abbildung 7.1 bis Abbildung 7.4 sind jeweils getrennt für Frauen und Männer alle unbearbeiteten und standardisierten Noten grafisch dargestellt. Man erkennt, dass die Standardisierung keinen Einfluss auf die „Struktur“ der Bewertung hat.

Die Mittelwerte bleiben weitgehend identisch, jedoch sinkt die Standardabweichung durch die Anpassung der Spreizung.

Anr.		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VP8	VP9	VP10	μ	σ	Min	Max
10.1	C	7,7	8,1	8,6	7,8	8,2	8,5	8,2	7,8	7,7	7,5	8,01	0,36	7,55	8,60
10.1	F	8,6	8,7	9,1	8,9	9,1	8,5	8,9	8,7	9,0	8,6	8,81	0,22	8,53	9,14
10.1	E	9,5	8,7	9,6	10,0	9,6	9,4	9,5	9,7	10,0	9,6	9,55	0,36	8,68	9,95
10.2	C	6,9	6,9	7,2	5,6	6,8	7,3	6,1	5,8	5,8	7,0	6,53	0,63	5,64	7,26
10.2	F	7,7	7,5	8,1	7,8	8,2	7,7	7,5	7,3	7,2	8,1	7,70	0,35	7,20	8,20
10.2	E	8,6	7,5	8,6	8,9	8,7	8,1	8,2	8,7	9,0	9,1	8,53	0,50	7,46	9,09
14.2	C	4,7	5,0	4,3	3,5	3,5	3,5	4,0	3,8	4,9	3,9	4,12	0,60	3,47	5,03
14.2	F	6,0	6,9	5,3	5,6	5,4	3,9	4,7	5,8	5,8	5,0	5,44	0,80	3,89	6,85
14.2	E	7,3	8,1	5,7	6,7	5,4	6,8	7,5	7,8	7,2	7,0	6,95	0,84	5,37	8,07
11.1	C	3,9	3,2	3,8	3,5	2,5	3,9	1,3	2,4	3,1	2,9	3,05	0,83	1,26	3,89
11.1	F	4,7	5,0	4,8	4,6	4,0	5,2	2,6	4,3	4,0	4,5	4,36	0,72	2,64	5,16
11.1	E	6,0	6,9	5,3	6,7	6,3	7,3	5,4	6,3	5,8	6,0	6,20	0,63	5,27	7,26
14.1	C	2,6	2,0	2,4	2,4	3,0	2,2	4,7	2,4	2,1	2,4	2,62	0,78	1,99	4,71
14.1	F	1,7	3,8	3,4	3,5	4,4	3,1	5,4	3,8	3,5	3,4	3,61	0,94	1,74	5,40
14.1	E	3,9	2,0	3,8	4,6	4,9	4,7	6,1	5,3	4,9	5,0	4,52	1,10	1,99	6,09
Min		1,7	2,0	2,4	2,4	2,5	2,2	1,3	2,4	2,1	2,4				
Max		9,5	8,7	9,6	10,0	9,6	9,4	9,5	9,7	10,0	9,6				
μ		6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00				
σ		2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33				

Tabelle 7.3 : Fragebogen 1, Frauen, standardisierte Noten

Dynamischer Sitzkomfort - Auswertung der Subjektivnoten

Anr.		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	VP6	VP7	VP8	μ	σ	Min	Max
10.1	C	8,4	8,3	8,3	6,3	8,0	8,4	8,3	8,1	8,02	0,70	6,3	8,4
10.1	F	8,9	8,8	9,3	8,7	8,6	8,9	8,8	8,6	8,81	0,23	8,6	9,3
10.1	E	9,4	9,2	9,8	9,3	9,6	9,4	9,6	9,0	9,43	0,23	9,0	9,8
10.2	C	7,3	7,5	6,3	5,1	7,0	6,9	7,5	7,1	6,83	0,79	5,1	7,5
10.2	F	7,8	7,9	7,8	6,9	7,5	7,9	7,9	7,6	7,67	0,34	6,9	7,9
10.2	E	8,4	8,8	8,8	8,7	8,6	8,4	8,8	8,6	8,62	0,17	8,4	8,8
14.2	C	5,2	4,8	5,3	2,7	4,8	3,9	4,1	3,3	4,27	0,94	2,7	5,3
14.2	F	5,8	5,2	5,3	3,3	4,8	5,9	5,3	5,2	5,11	0,80	3,3	5,9
14.2	E	6,8	7,0	6,3	7,5	7,0	6,4	6,2	7,6	6,85	0,54	6,2	7,6
11.1	C	2,1	3,9	3,8	3,3	4,3	3,4	3,6	3,8	3,53	0,65	2,1	4,3
11.1	F	3,7	4,3	3,3	3,9	5,4	4,9	4,5	4,8	4,34	0,68	3,3	5,4
11.1	E	4,2	5,2	5,8	7,5	6,4	5,9	5,8	6,7	5,94	0,99	4,2	7,5
14.1	C	2,6	2,1	2,8	2,7	1,6	1,9	2,4	1,9	2,25	0,44	1,6	2,8
14.1	F	4,2	3,5	3,8	6,3	2,7	3,4	3,6	2,9	3,79	1,13	2,7	6,3
14.1	E	5,2	3,5	3,3	7,5	3,8	4,4	3,6	4,8	4,51	1,39	3,3	7,5
Min		2,1	2,1	2,8	2,7	1,6	1,9	2,4	1,9				
Max		9,4	9,2	9,8	9,3	9,6	9,4	9,6	9,0				
μ		6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00				
σ		2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33	2,33				

Tabelle 7.4: Fragebogen 1, Männer, standardisierte Noten

Subjektivnoten, Frauen, Rohdaten

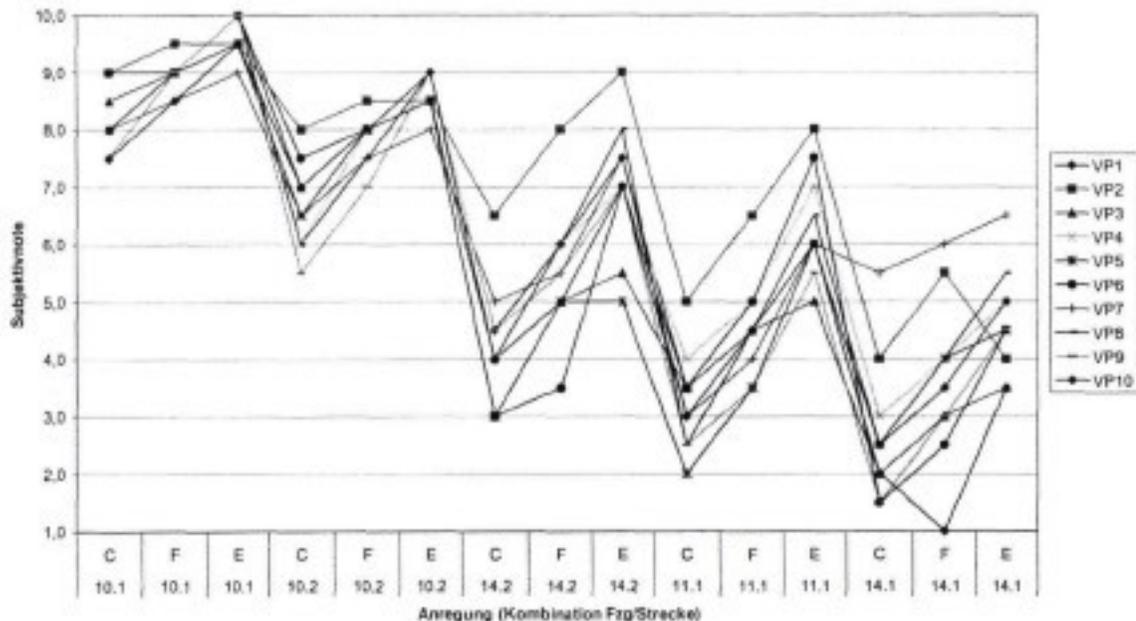


Abbildung 7.1: Fragebogen 1, Frauen, Rohdaten

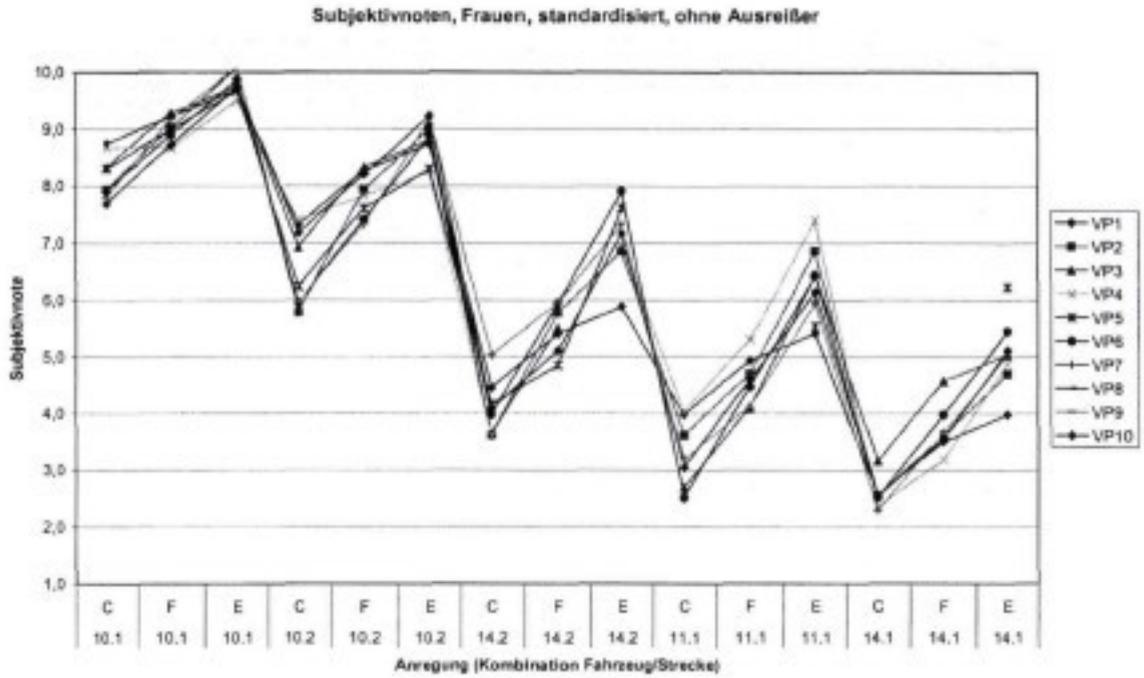


Abbildung 7.2: Fragebogen 1, Frauen, standardisierte Noten ohne Ausreißer

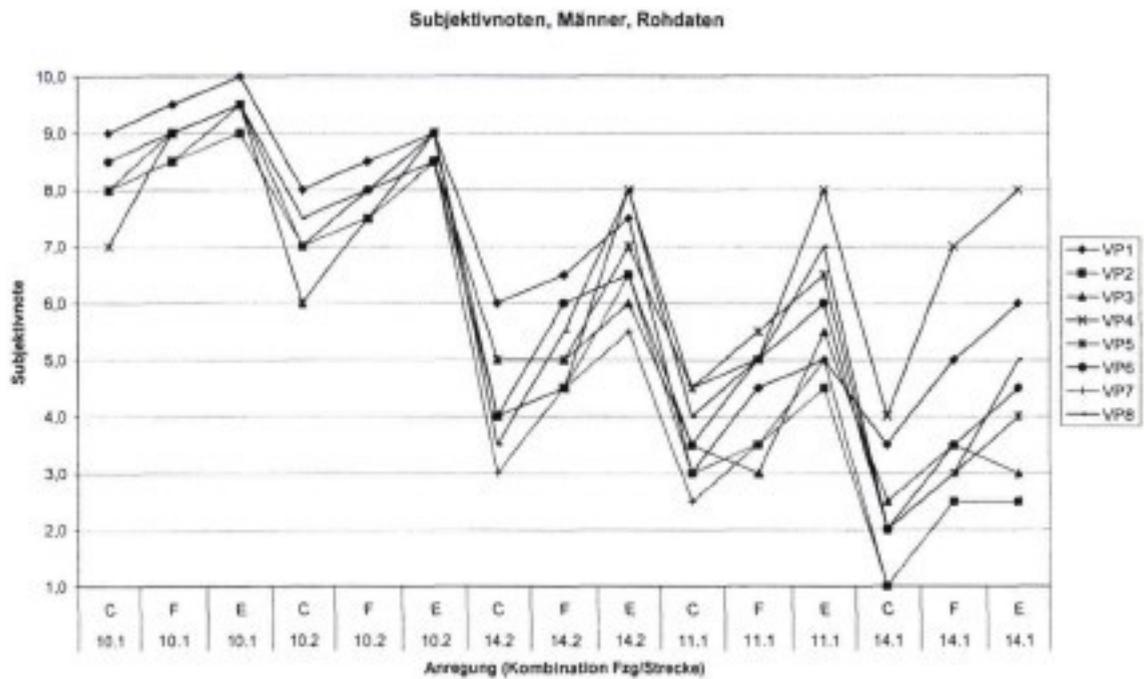


Abbildung 7.3 : Fragebogen 1, Männer, Rohdaten

Dynamischer Sitzkomfort - Auswertung der Subjektivnoten

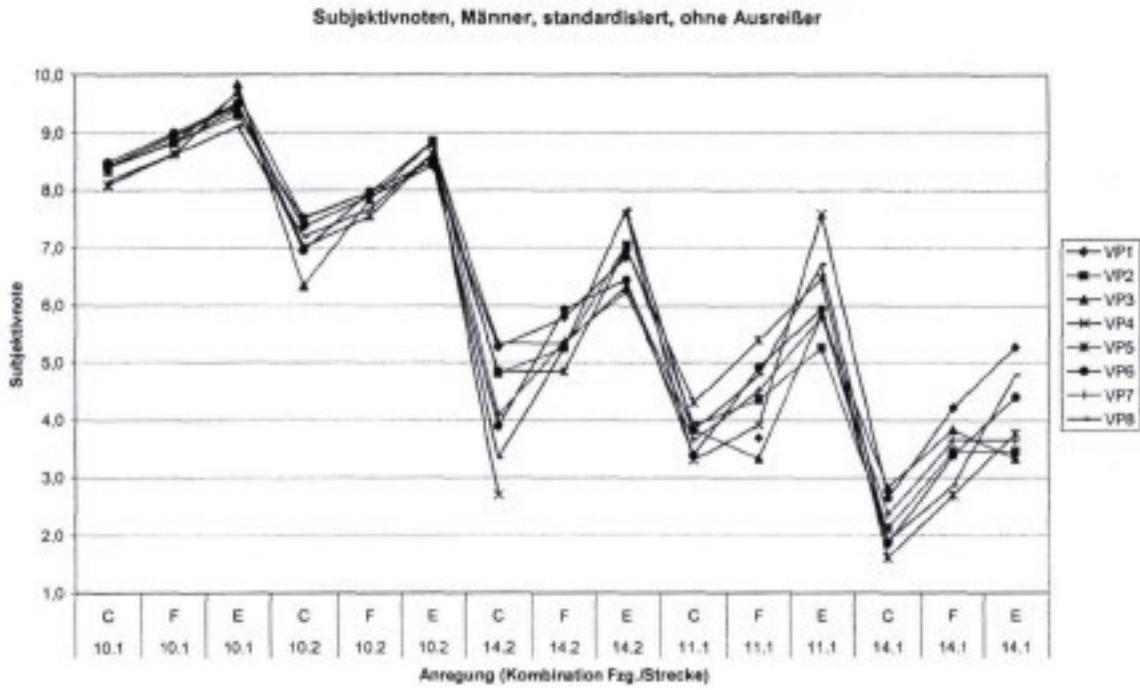


Abbildung 7.4 : Fragebogen 1, Männer, standardisierte Noten ohne Ausreißer

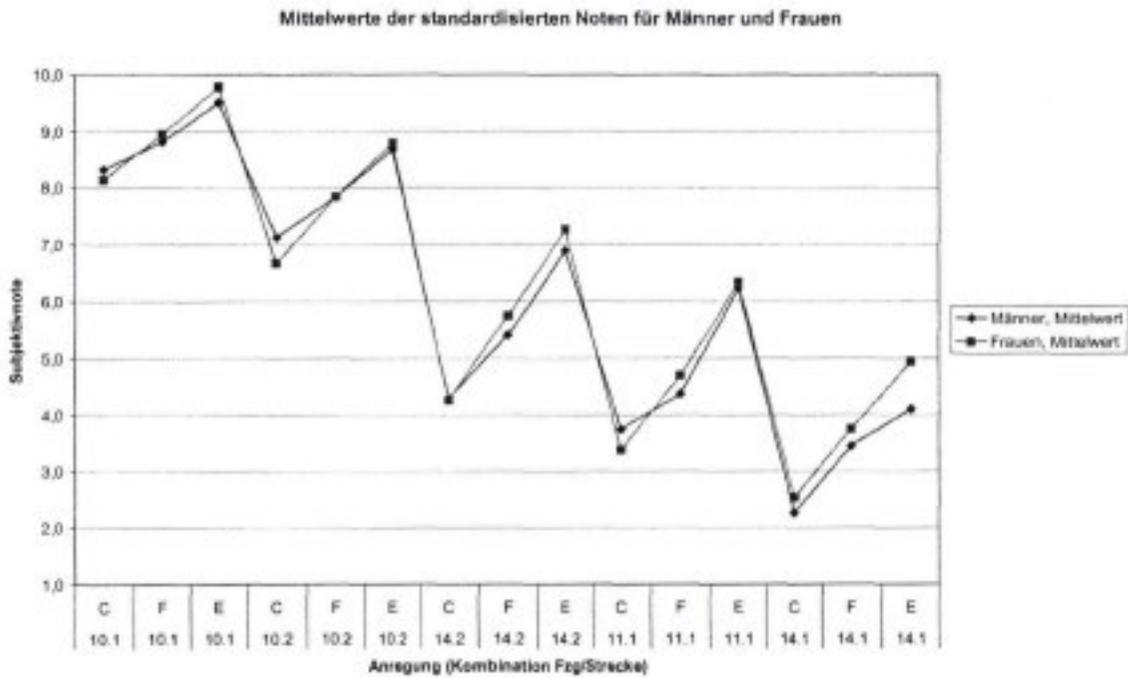


Abbildung 7.5 : Vergleich der Mittelwerte der standardisierten Noten für Männer und Frauen

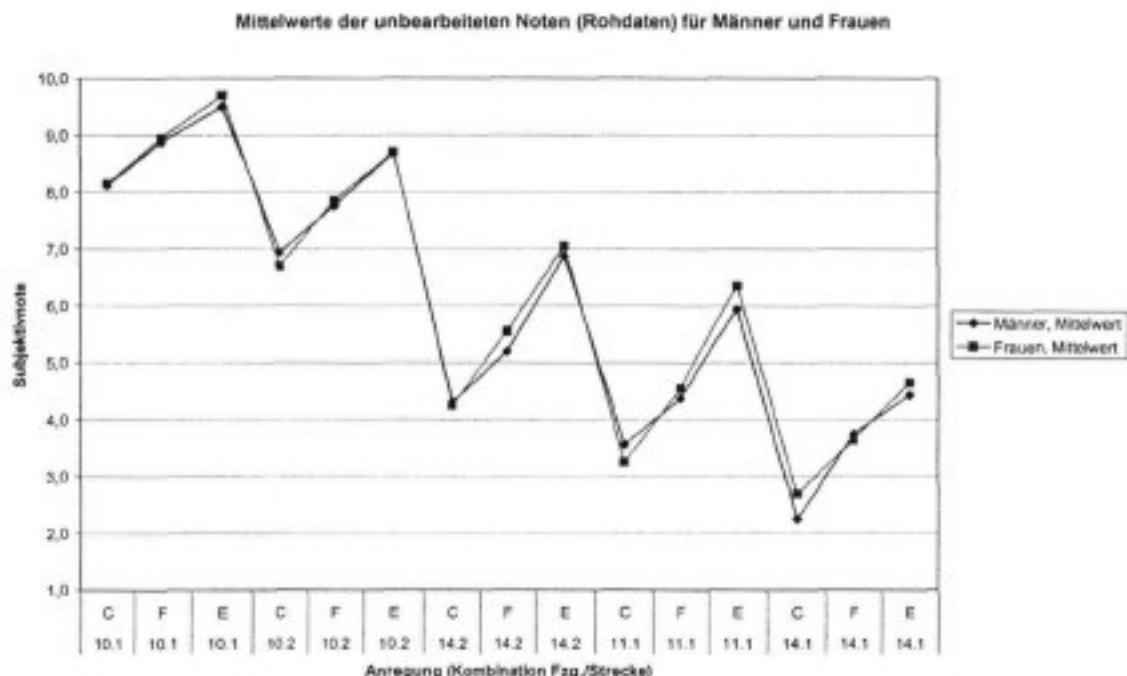


Abbildung 7.6 : Vergleich der Mittelwerte der unbearbeiteten Noten (Rohdaten) für Männer und Frauen

In Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6 ist zu erkennen, dass die männlichen und weiblichen Versuchspersonen die Anregungen weitgehend identisch bewertet haben.

Fragebogen 2 (Abbildung 11.2) :

Der Fragebogen 2 enthielt drei Fragestellungen zur Art der störenden Schwingung und dem Ort der Empfindung. Im Weiteren werden nun die Ergebnisse dieser Befragungen dargestellt.

Die erste Fragestellung lautete: „Waren die Schwingungen mehr im Rücken, im Gesäß oder in beiden gleich zu spüren?“

In Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8 sind getrennt für Männer und Frauen jeweils für alle Anregungen die Nennungen für stärkeres Empfinden der Schwingungen im Gesäß, Rücken oder in beiden gleich dargestellt. Auf der Abszisse sind jeweils alle 15 Kombinationen aus Fahrzeug und Strecke aufgetragen, auf der Ordinate die prozentualen Anteile der Versuchspersonenpopulation, die den jeweiligen Empfindungs-ort genannt haben. Die Summe aller drei Empfindungs-ort für jeweils eine Anregung ergibt 100%.

Es ist zu erkennen, dass auf vier von fünf Strecken in allen Fahrzeugen von einer Mehrzahl der Versuchspersonen die Schwingungen im Gesäß oder in Rücken und Gesäß gleich empfunden wurden. Lediglich auf der Strecke 14.1, die starke Anregungen im Bereich der Aufbaueigenfrequenz erzeugt, empfindet etwa die Hälfte der Versuchspersonen, die Schwingungen vor allem im Rücken. Bei den Männern ist die Verteilung wesentlich weniger eindeutig. Grundsätzlich erkennt man, dass ein höherer Anteil der Versuchspersonen angegeben hat, die Schwingungen hauptsächlich im Rücken zu spüren. Besonders auffällig ist die Anregung 14.1 C, wo fast 90% der Versuchspersonen die Schwingungen besonders im Rücken gespürt haben, während beim Focus und der E-Klasse die Verteilung wenig eindeutig ist. In Abbildung 7.9 und Abbildung 7.10 sind für alle Strecken jeweils die Mittelwerte über die drei Fahrzeuge

gebildet mit dem Ziel, einen eventuellen fahrzeugunabhängigen Streckeneinfluss zu ermitteln. Zusätzlich ist jeweils die Standardabweichung eingetragen. Bei den Männern liegen die Mittelwerte qualitativ auf ähnlichem Niveau, so dass in Verbindung mit den großen Standardabweichungen hieraus keine Schlüsse auf eine Empfindungstendenz zu ziehen sind.

Bei den Frauen sind die Ergebnisse etwas aussagekräftiger. Das Niveau der Mittelwerte für die Anzahl der Versuchspersonen, die die Schwingungen im Rücken an stärksten gespürt haben, liegt deutlich unter den Mittelwerten für Gesäß und gleichem Empfinden in Gesäß und Rücken. Die Standardabweichung ist im Schnitt etwas geringer als bei den Männern. Trotzdem kann auch hier nur ein signifikanter Unterschied zwischen der Strecke 14.1 und den übrigen Strecken festgestellt werden. Für eine quantitative Analyse bieten die Daten aufgrund ihrer Undifferenziertheit kaum Ansatzpunkte. In Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12 sind die Mittelwerte über alle Strecken mit Standardabweichungen für die drei Fahrzeuge dargestellt. Auch hier sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den Fahrzeugen erkennbar.

Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frauen, Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

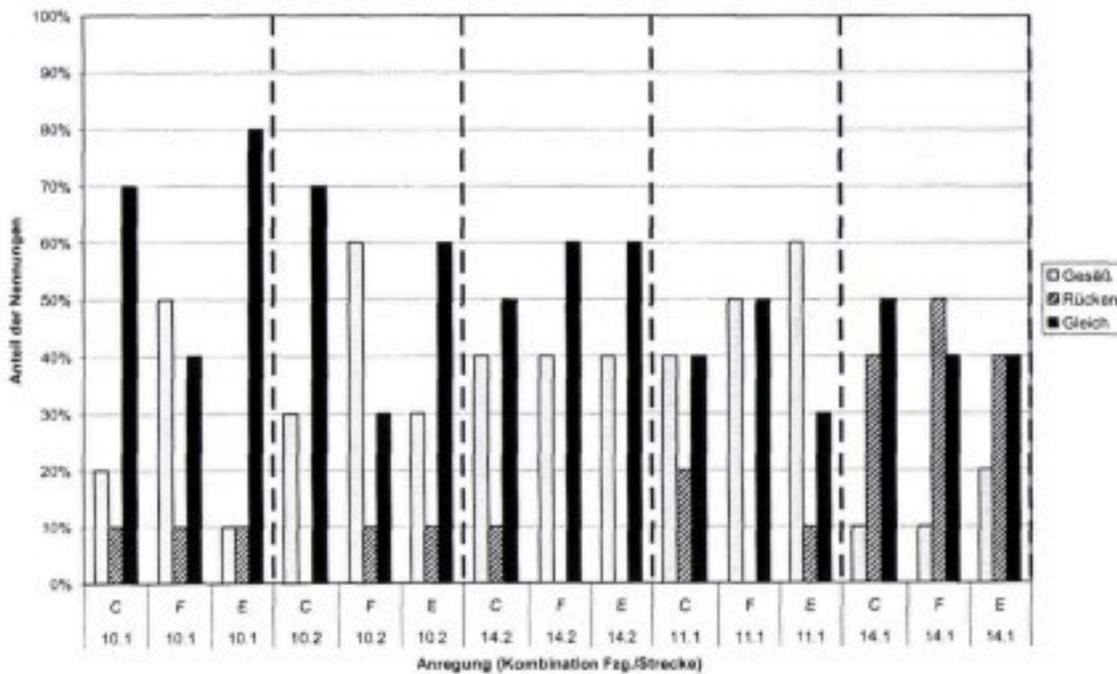


Abbildung 7.7: Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frauen, Frage 1 „Gesäß, Rücken, oder gleich“

Auswertung nach einzelnen Anregungen, Männer, Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

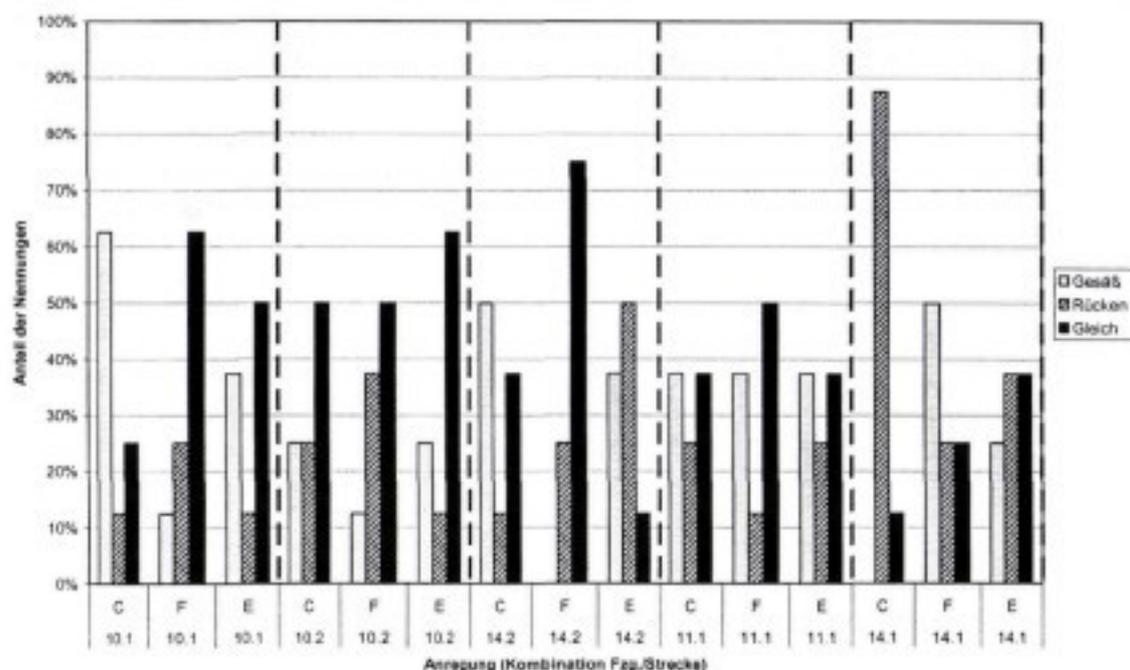


Abbildung 7.8: Auswertung nach einzelnen Anregungen, Männer, Frage 1 „Gesäß, Rücken, oder gleich“

Mittelwert der Nennungen für die Fzg. auf den verschiedenen Teststrecken (Männer), Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

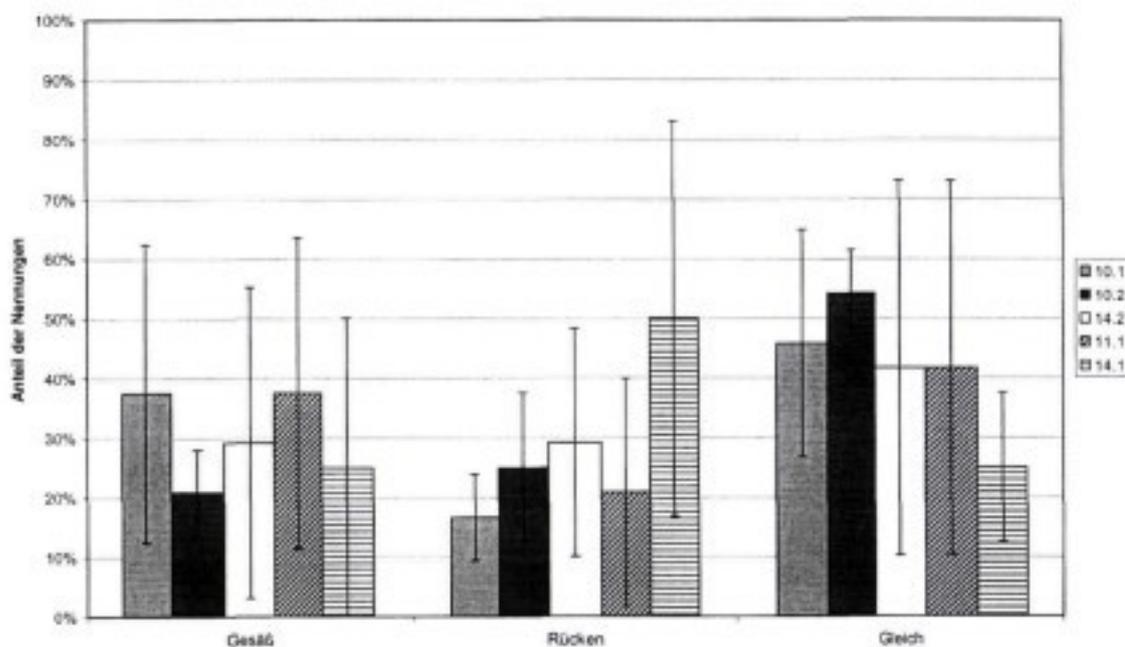


Abbildung 7.9 : Mittelwert der Nennungen für die Fzg. auf den verschiedenen Teststrecken (Männer), Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

Dynamischer Sitzkomfort - Auswertung der Subjektivnoten

Mittelwert der Nennungen für die Fzg. auf den verschiedenen Teststrecken (Frauen), Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

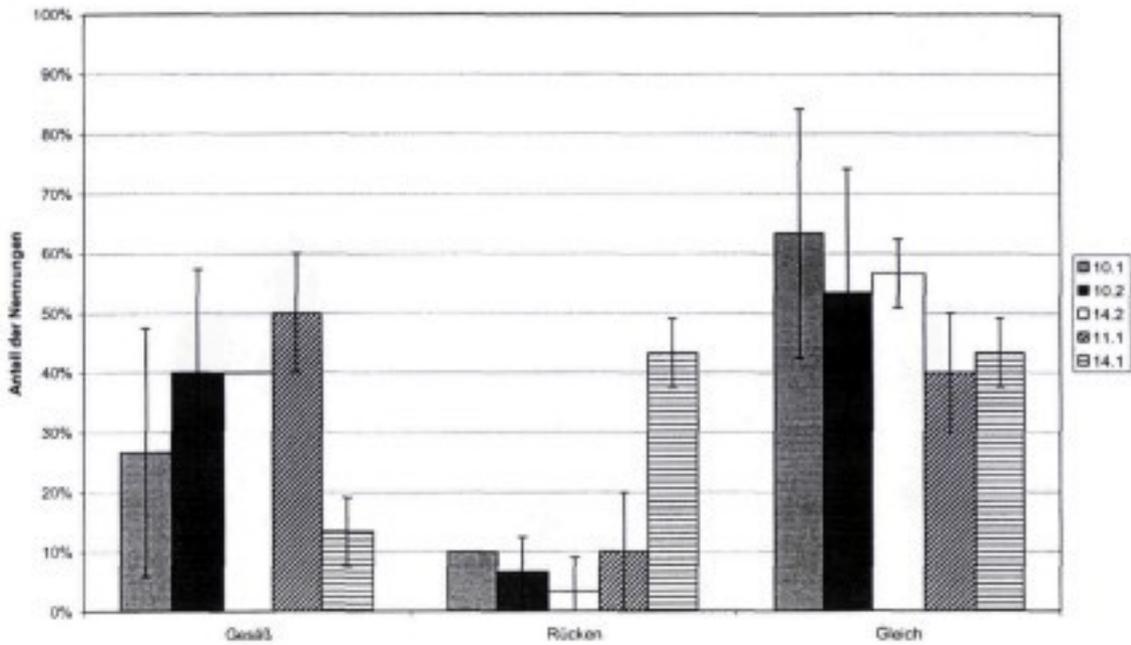


Abbildung 7.10 : Mittelwert der Nennungen für die Fzg. auf den verschiedenen Teststrecken (Frauen), Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

Mittelwert der Nennungen für die verschiedenen Fzg. (Männer), Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

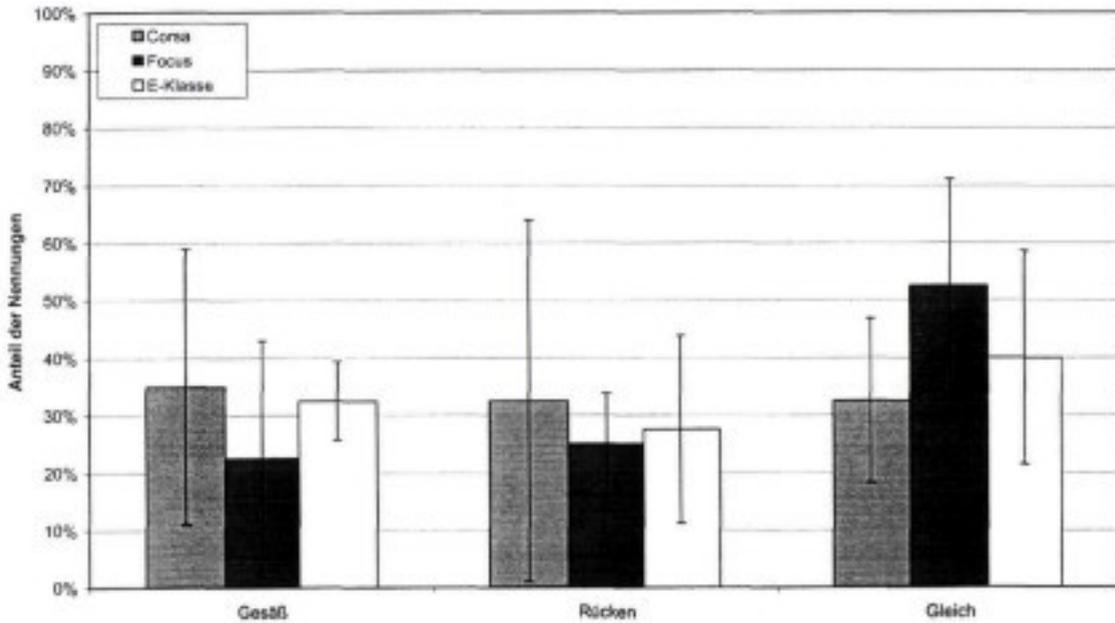


Abbildung 7.11 : Mittelwert der Nennungen für die verschiedenen Fzg. (Männer), Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

Mittelwert der Nennungen für die verschiedenen Fzg. (Frauen),
Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

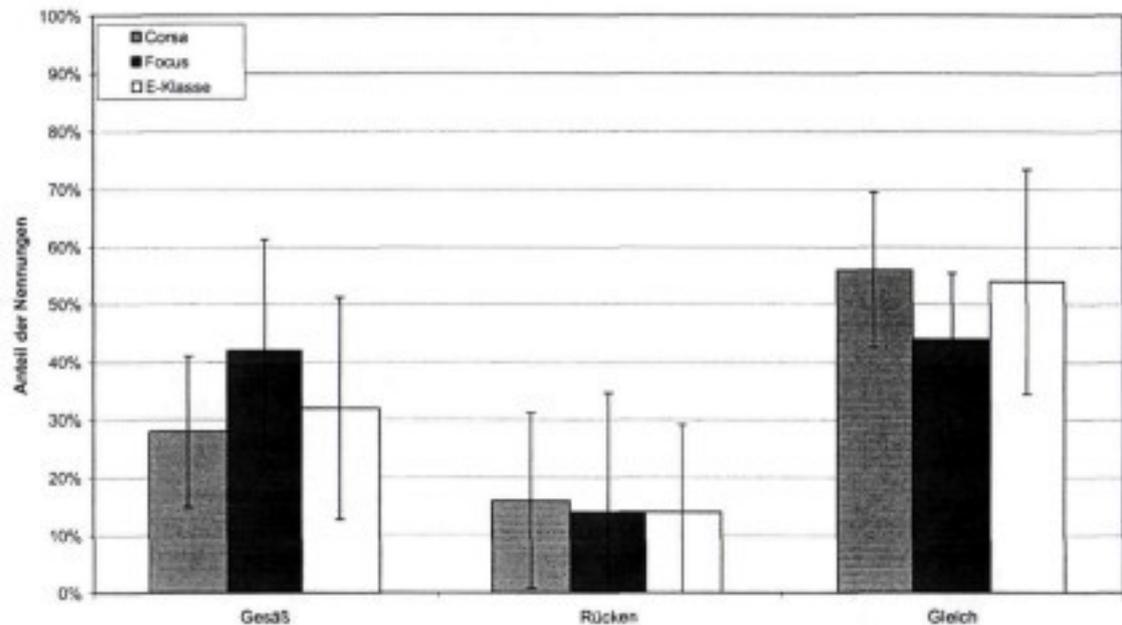


Abbildung 7.12 : Mittelwert der Nennungen für die verschiedenen Fzg. (Frauen), Frage 1 "Gesäß, Rücken oder gleich"

Die zweite Fragestellung lautete: „Waren eher die langwelligen, kurzwelligen oder stoßartigen Schwingungen unangenehm?“. In den folgenden Abbildungen sind die Aussagen der Versuchspersonen grafisch dargestellt.

In Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 sind getrennt für Männer und Frauen jeweils für alle Anregungen die Nennungen für die am unangenehmsten empfundene Schwingungsart dargestellt. Auf der Abszisse sind jeweils alle 15 Kombinationen aus Fahrzeug und Strecke aufgetragen, auf der Ordinate die prozentualen Anteile der Versuchspersonenpopulation, die die jeweilige Schwingungsart genannt haben. Die Summe aller drei Schwingungsarten für jeweils eine Anregung ergibt 100%. Bei Strecke 10.1 fällt auf, dass eine große Mehrheit von 70% der weiblichen Versuchspersonen besonders die langwelligen Schwingungen am unangenehmsten empfunden hat, während im Corsa und im Focus keine eindeutige Mehrheit für eine Schwingungsart vorliegt. Dies kann damit erklärt werden, dass es auf dieser Strecke grundsätzlich nur sehr geringe Anregungen gibt, die in ihrer Art keine eindeutige Ausprägung zeigen. Die E-Klasse absorbiert durch ihre weicherer Aufbau- und Sitz-Federung die kurzwelligen Schwingungen und leichte Stöße am besten, so dass im Wesentlichen nur noch die langwellige Aufbaubewegung für die Insassen spürbar ist. Bei stärkeren Anregungen im kurzwelligen und stoßartigen Bereich auf den anderen Strecken treten jedoch die langwelligen Schwingungen bezüglich des Diskomfortempfindens in den Hintergrund. Bei den Männern ist grundsätzlich eine qualitativ ähnliche Verteilung zu beobachten, jedoch liegt der Anteil der Männer, der die stoßartigen Schwingungen am unangenehmsten empfunden hat, leicht über dem der Frauen. In Abbildung 7.15 und Abbildung 7.16 sind die Mittelwerte über alle Strecken mit Standardabweichungen für die drei Fahrzeuge dargestellt. Sowohl bei den Frauen als auch bei den Männern liegt der Mittelwert für die langwelligen Schwingungen unterhalb von dem für die kurzwelligen und stoßartigen Schwingungen. Die Mittelwerte für die kurzwelligen und stoßartigen Schwingungen liegen in etwa auf gleichem Niveau. Unter Berücksichtigung der Standardabweichungen sind keine Unterschiede zwischen den Fahrzeugen erkennbar. In Abbildung 7.17 und

Dynamischer Sitzkomfort - Auswertung der Subjektivnoten

Abbildung 7.18 sind für alle Strecken jeweils die Mittelwerte über die drei Fahrzeuge gebildet mit dem Ziel, einen eventuellen fahrzeugunabhängigen Streckeneinfluss zu ermitteln. Zusätzlich ist jeweils die Standardabweichung eingetragen.

Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frauen, Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

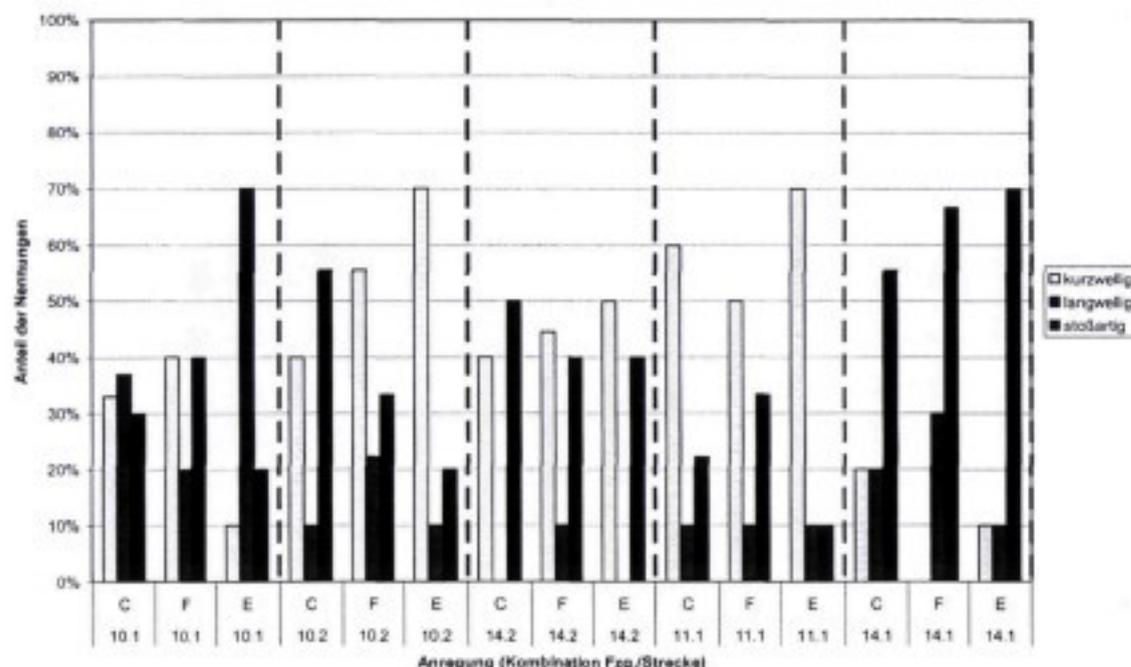


Abbildung 7.13 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frauen, Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

Auswertung nach einzelnen Anregungen, Männer, Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

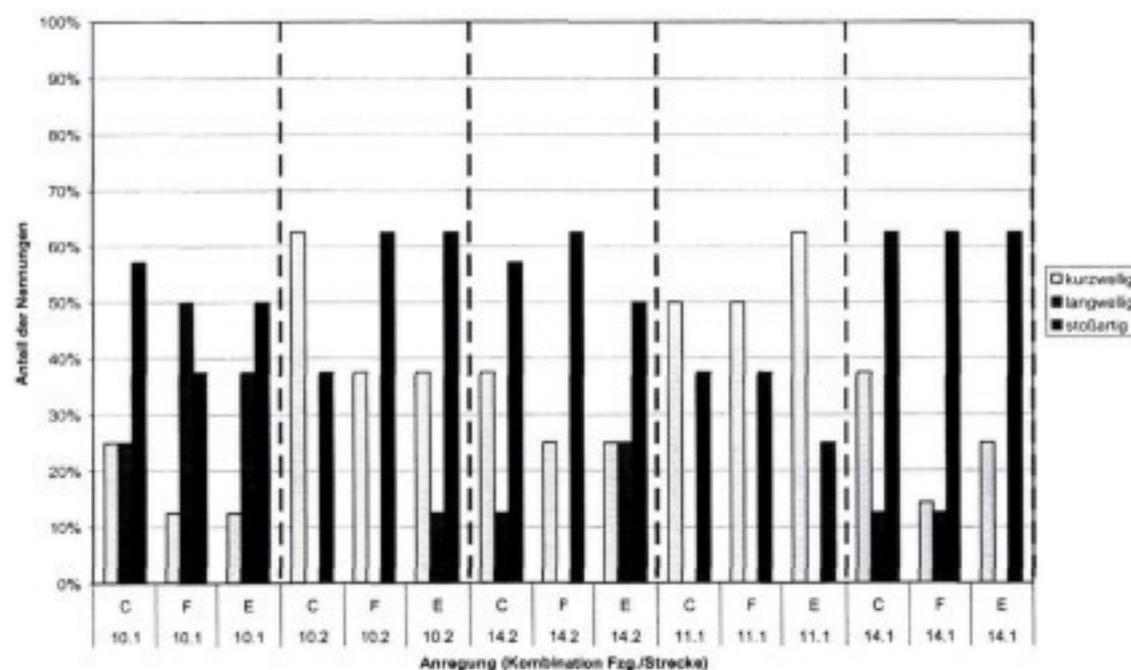


Abbildung 7.14 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Männer, Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

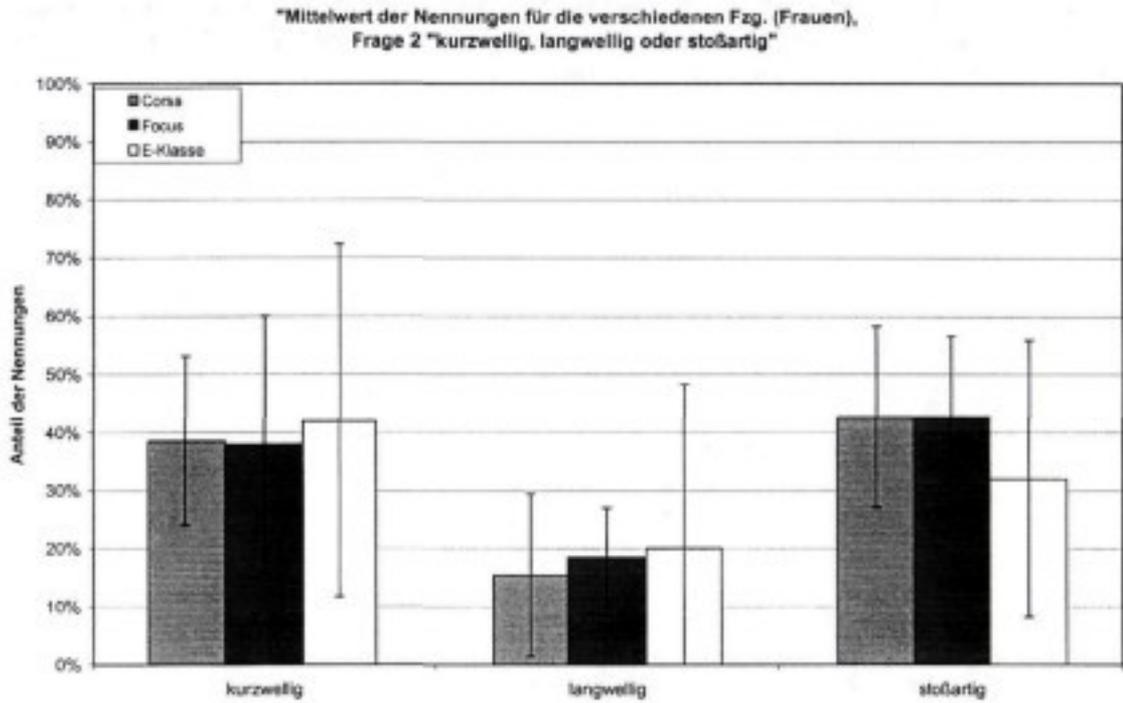


Abbildung 7.15 : Mittelwert der Nennungen für die verschiedenen Fzg. (Frauen), Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

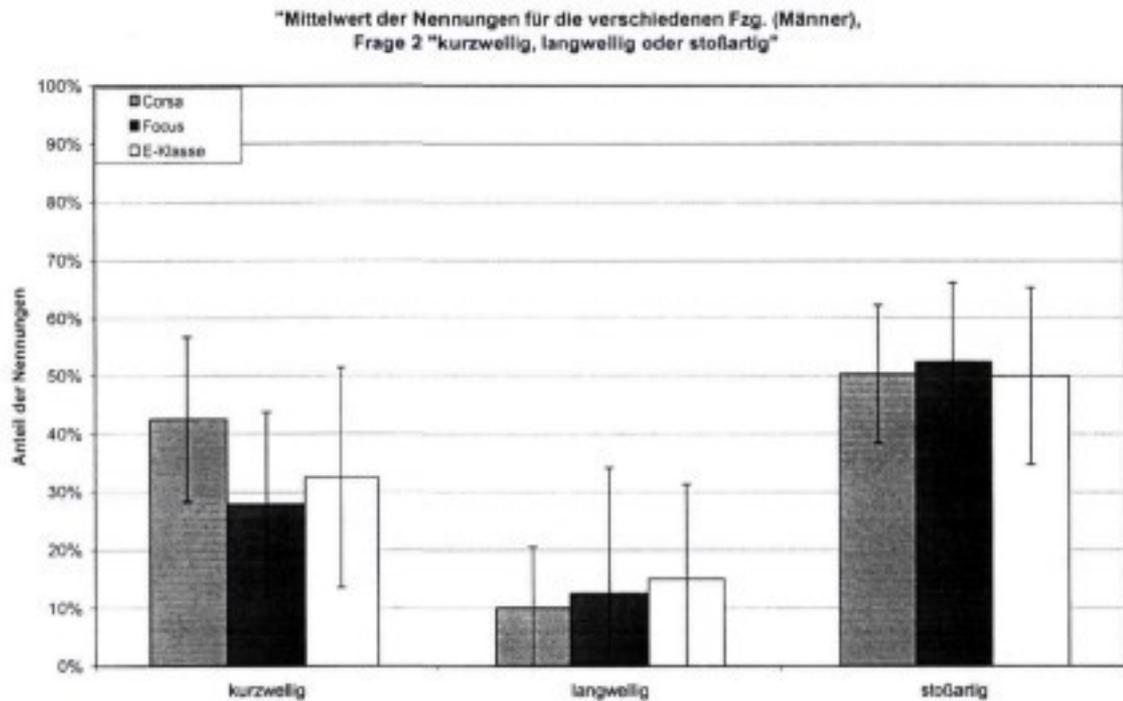


Abbildung 7.16 : Mittelwert der Nennungen für die verschiedenen Fzg. (Frauen), Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

Dynamischer Sitzkomfort – Auswertung der Subjektivnoten

Mittelwert der Nennungen für die Fzg. auf den verschiedenen Teststrecken (Männer),
Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

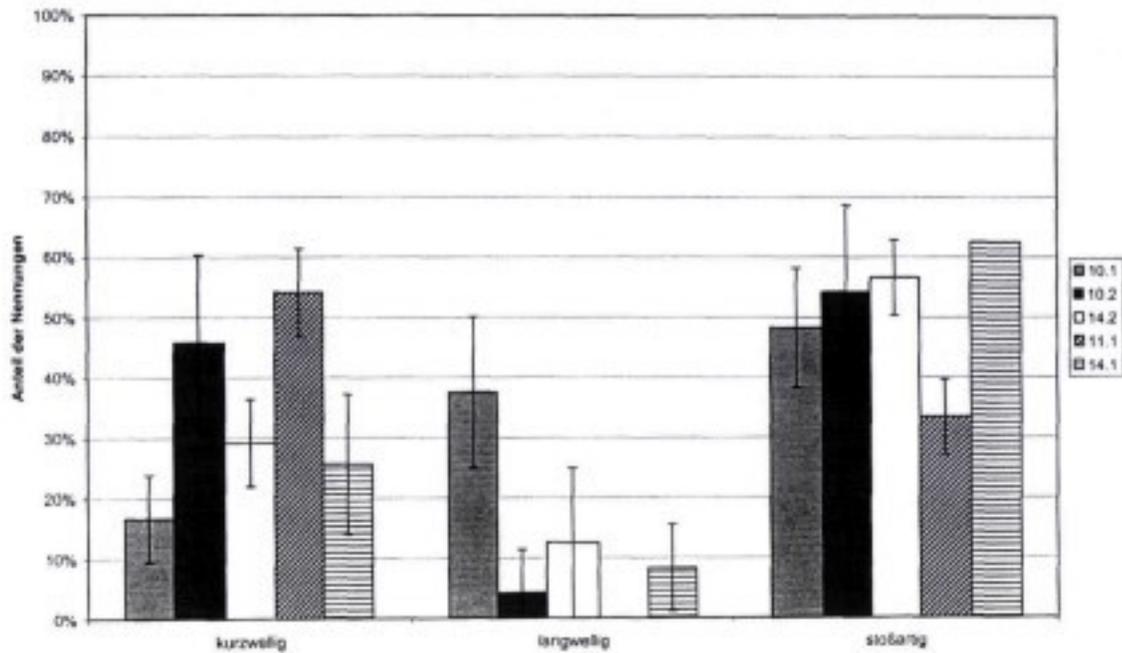


Abbildung 7.17 : Mittelwert der Nennungen für die Fzg. auf den verschiedenen Teststrecken (Männer), Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

Mittelwert der Nennungen für die Fzg. auf den verschiedenen Teststrecken (Frauen),
Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

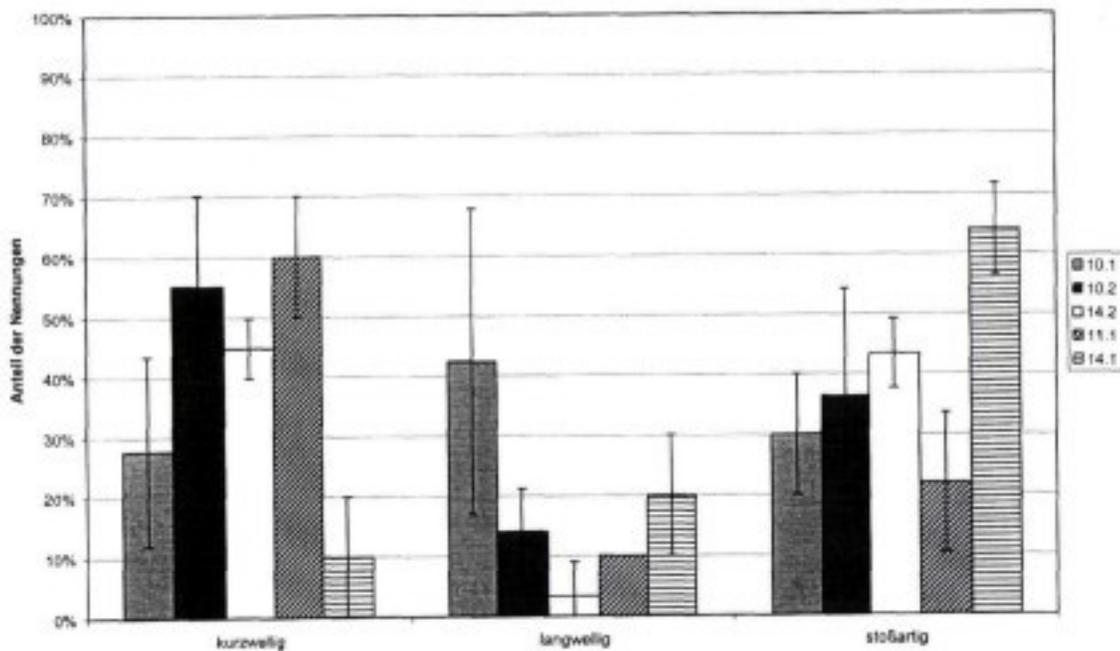


Abbildung 7.18 : Mittelwert der Nennungen für die Fzg. auf den verschiedenen Teststrecken (Frauen), Frage 2 "kurzweilig, langweilig oder stoßartig"

Die dritte Fragestellung lautete: „In welcher Körperregion haben Sie die Schwingungen am unangenehmsten empfunden?“ Hier war ein freier Eintrag auch von mehreren Körperteilen ohne Vorgaben möglich.

Die von den Versuchspersonen genannten Körperteile wurden in die in den Abbildungen aufgeführten Körperbereiche eingeteilt. In Abbildung 7.19 und Abbildung 7.20 sind getrennt für Männer und Frauen jeweils für alle Anregungen die prozentualen Anteile am Versuchspersonenkollektiv dargestellt, die bei dieser Anregung den entsprechenden Körperbereich genannt haben. Bei den Frauen erkennt man sehr deutlich den hohen Anteil vor allem der Gesäßnennungen aber auch des unteren Rückens. Alle anderen Körperteile werden nur von sehr wenigen oder nur einer Versuchsperson (10%) genannt.

Bei den Männern erkennt man eine größere Streuung der genannten Körperbereiche. Die Nennung von Gesäß und unterem Rücken sind hier nicht so ausgeprägt, wobei die Nennungen des unteren Rückens überwiegen.

In Abbildung 7.21 und Abbildung 7.22 sind die Mittelwerte mit Standardabweichung über alle Strecken für die drei Fahrzeuge dargestellt. Auch hier sind die deutlich herausragenden Werte für den unteren Rücken und Gesäß zu erkennen. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung ist bei dieser Darstellung jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Fahrzeugen festzustellen.

Abbildung 7.23 und Abbildung 7.24 zeigen für alle Strecken die über die Fahrzeuge gemittelten Werte für Mittelwert und Standardabweichung. Auch neben den hohen Mittelwerten für den unteren Rücken und Gesäß ist hier sowohl bei den Frauen als auch bei den Männern ein deutlich höherer Anteil bei Kopf/Nacken und Brust bei Strecke 14.1 zu beobachten. Dies ist auf die dort mit hohen Beschleunigungen auftretenden Aufbaubewegungen im Bereich von 1-2 Hz zurückzuführen.

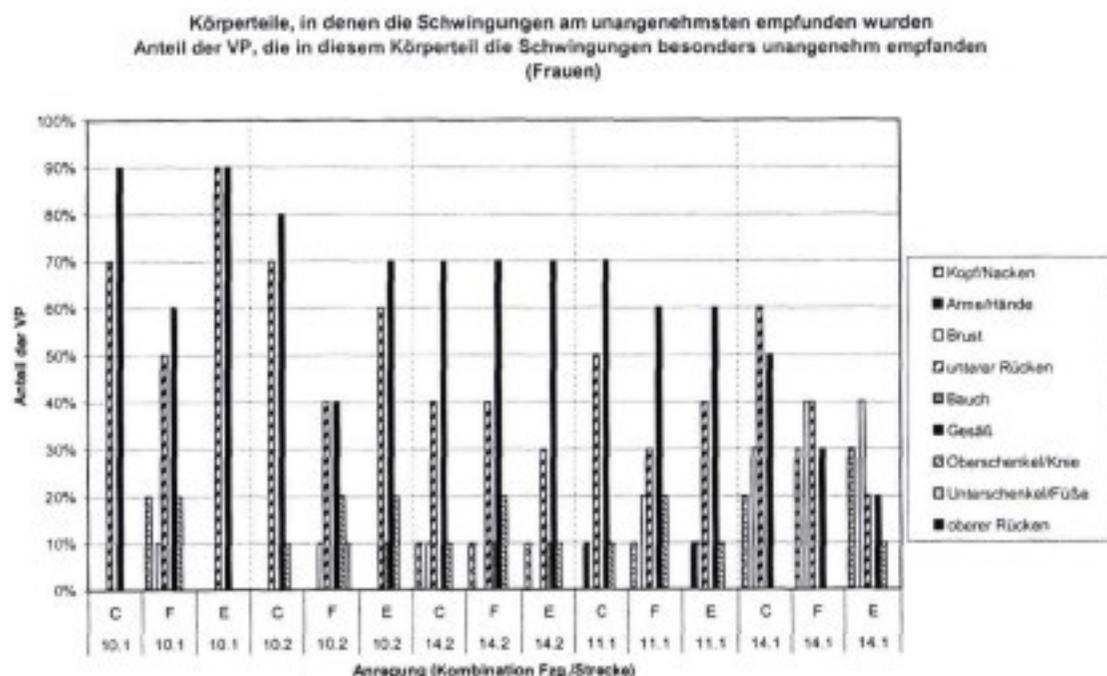


Abbildung 7.19 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frauen, Frage 3 „Körperbereiche“

Dynamischer Sitzkomfort - Auswertung der Subjektivnoten

Körperteile, in denen die Schwingungen am unangenehmsten empfunden wurden
 Anteil der VP, die in diesem Körperteil die Schwingungen besonders unangenehm empfanden
 (Männer)

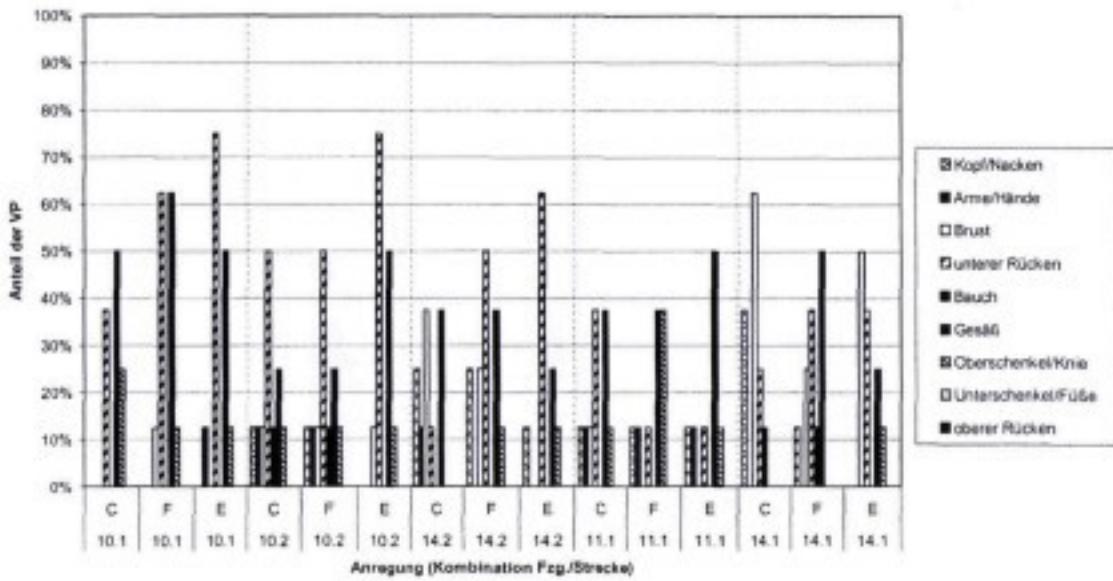


Abbildung 7.20 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Männer, Frage 3 „Körperbereiche“

Körperteile, in denen die Schwingungen am unangenehmsten empfunden wurden
 Mittelwerte aller VP (Frauen) und Strecken für die einzelnen Fahrzeuge

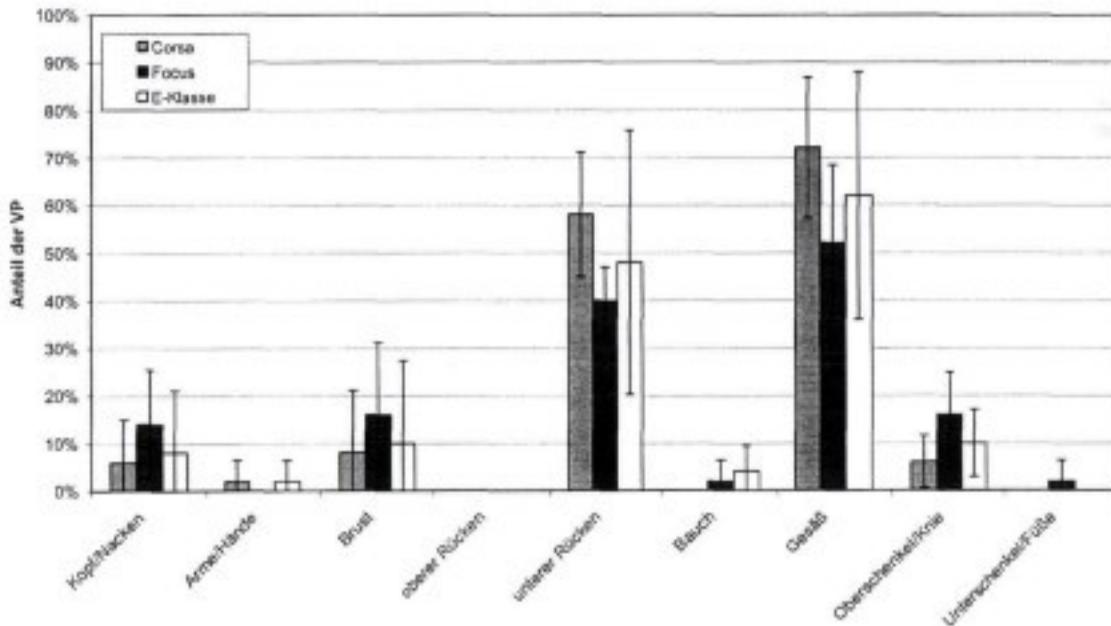


Abbildung 7.21: Mittelwerte aller VP und Strecken in den verschiedenen Fzg.(Frauen)

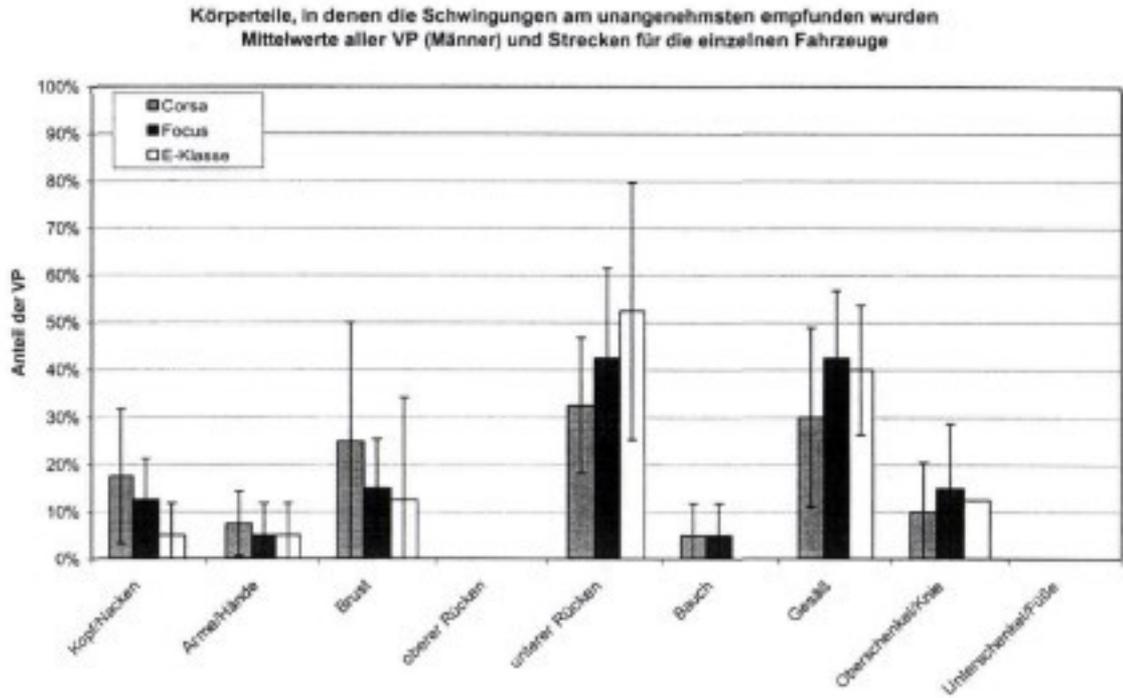


Abbildung 7.22 : Mittelwerte aller VP und Strecken in den verschiedenen Fzg. (Männer)

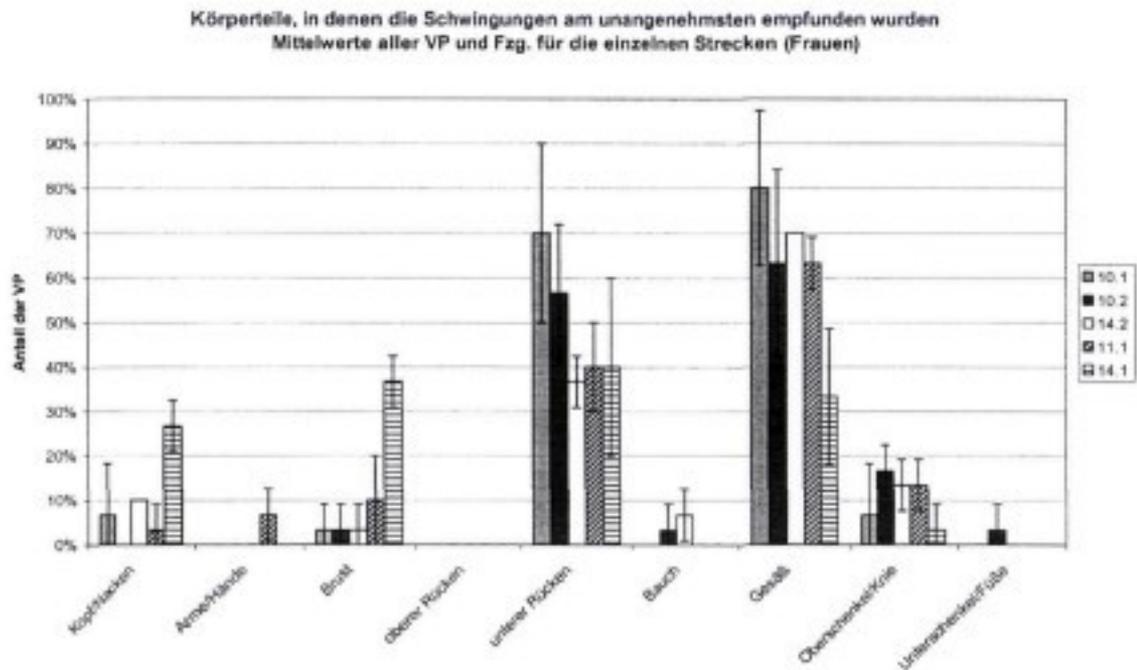


Abbildung 7.23 : Über Fzg. und VP gemittelte Anteile für die verschiedenen Strecken (Frauen)

Körperteile, in denen die Schwingungen am unangenehmsten empfunden wurden
Mittelwerte aller VP und Fzg. für die einzelnen Strecken (Männer)

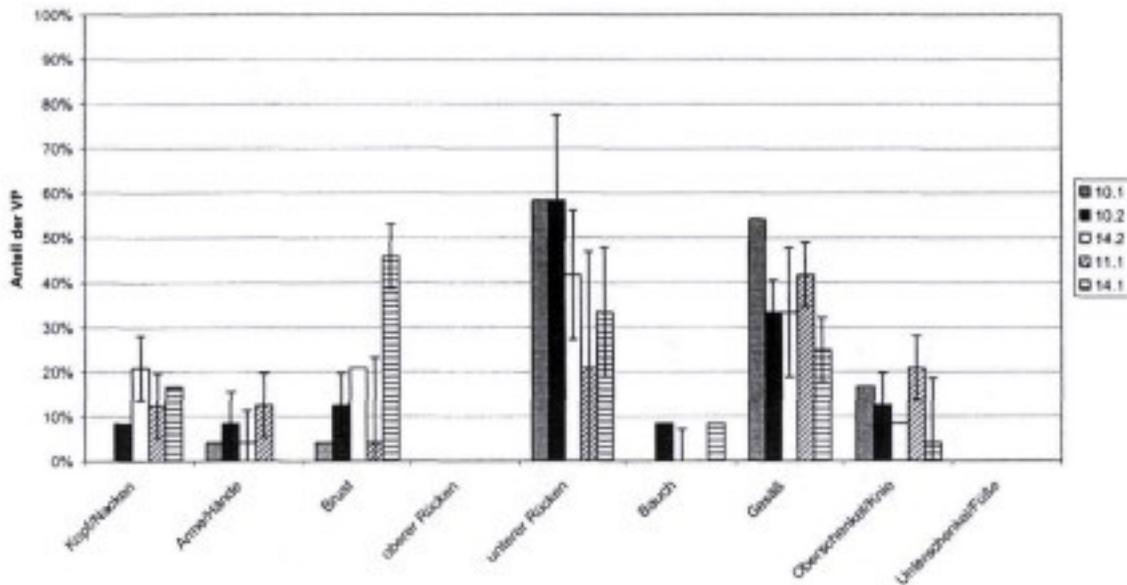


Abbildung 7.24 : Über Fzg. und VP gemittelte Anteile für die verschiedenen Strecken (Männer)

Fragebogen 3 (Abbildung 11.3) :

Im dritten Fragebogen sollte eine prozentuale Gewichtung der subjektiv empfundenen Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden vorgenommen werden.

In Abbildung 7.25 und Abbildung 7.26 sind getrennt für Männer und Frauen jeweils für alle Anregungen die über die Versuchspersonen gemittelten, subjektiv empfundenen Schwingungsanteile dargestellt. Die Daten wurden vorher mit dem Verfahren nach Nalimov auf Ausreißer geprüft und bereinigt. Auf der Abszisse sind jeweils alle 15 Kombinationen aus Fahrzeug und Strecke aufgetragen, auf der Ordinate die gemittelten subjektiven Anteile der einzelnen Schwingrichtungen am Gesamtempfinden. Die Summe aller fünf Schwingungsrichtungen für jeweils eine Anregung ergibt 100%.

Sowohl bei den Frauen als auch bei den Männern ist eindeutig eine subjektiv empfundene Dominanz der Vertikal-Richtung zu erkennen. Danach folgt in der Empfindungsreihenfolge das Wanken, welches gerade von den Frauen auf Strecke 14.1 als sehr störend empfunden wird. Von den Männern wird dies nur bei der E-Klasse in ähnlichem Maße angegeben.

Eine gewisse Einschränkung bezüglich der Verwertbarkeit der Ergebnisse ist durch die relativ große Standardabweichung gegeben. Viele Versuchspersonen haben schon bei den Versuchen ihre Schwierigkeiten bei der Zuordnung der empfundenen Schwingungen zu den Koordinatenrichtungen geäußert. Qualitativ stimmt das Empfinden der Versuchspersonen im Groben mit den tatsächlichen Beschleunigungseffektivwerten überein (siehe dazu Abbildung 3.2). Eine Korrelationsanalyse der Verhältnisse der Beschleunigungseffektivwerte für die verschiedenen Richtungen untereinander hat jedoch für keinen Frequenzbereich eine signifikante Korrelation mit den empfundenen Verhältnissen ergeben. Somit kann man sagen, dass die Versuchspersonen in der Lage waren, die z-Richtung als Hauptanregungsrichtungen zu identifizieren, nicht jedoch die weiteren Richtungen in ihrer quantitativen Ausprägung. Dies kann zum einen an einer mangelnden Differenzierungsfähigkeit von ungeübten Beurteilern bzw. „normalen“ Autofahrern liegen oder an Verdeckungseffekten, die verschiedenen

Schwingungsrichtungen bis zu einem bestimmten Verhältnis zur Hauptanregungsrichtung, kaum spüren lassen. Letzteres ist in der menschlichen Wahrnehmung ein bekannter Effekt und wurde ansatzweise in Bezug auf die hier verwendeten Anregungen auf dem Prüfstand untersucht und bestätigt.

Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage " Anteil der Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden" (Männer)

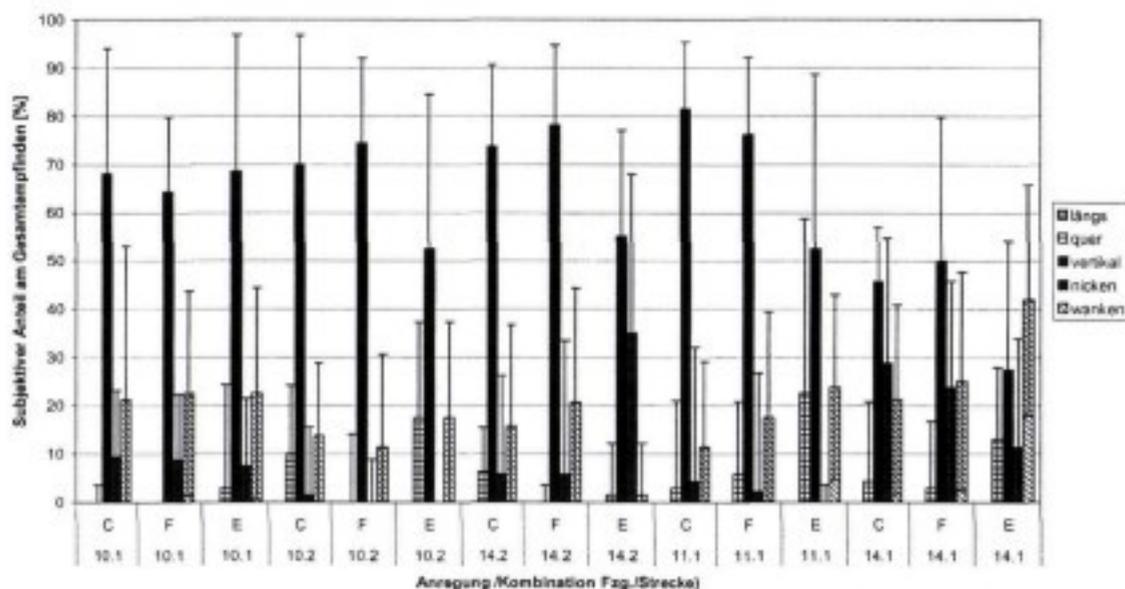


Abbildung 7.25 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage " Anteil der Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden" (Männer)

Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage " Anteil der Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden" (Frauen)

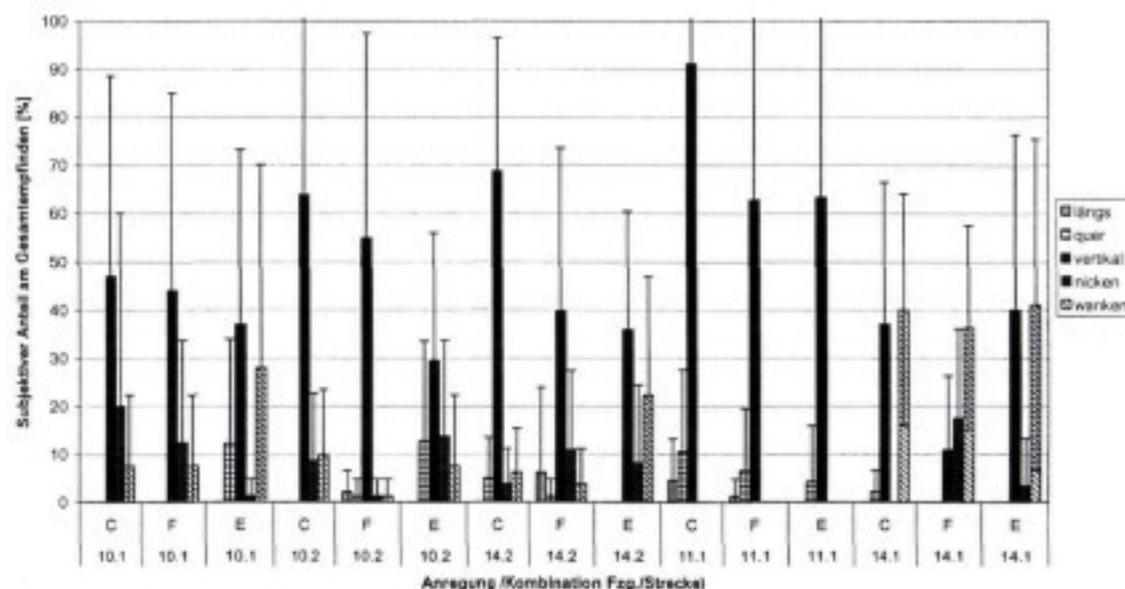


Abbildung 7.26 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage " Anteil der Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden" (Frauen)

7.3 Auswertung Fahrversuche Nfz

Im Folgenden wird die Auswertung der drei Fragebögen aus den Fahrversuchen dargestellt.

Fragebogen 1 (Abbildung 11.7):

In Abbildung 7.27 sind die unbearbeiteten Subjektivnoten sortiert nach Strecke und Sitzposition für alle sechs Versuchspersonen dargestellt. Auf der Abszisse sind die zu bewertenden Schwingungsanregungen als Kombination aus der Strecke und der Sitzposition aufgetragen. In der oberen Zeile stehen jeweils die Abkürzungen für die Sitzposition nach Tabelle 7.5, in der unteren Zeile die Streckennummern nach Abbildung 4.1.

Abkürzung	Sitzposition
BF	Bus Fahrersitz
BFG	Bus Fahrgastsitz
KF	Kipper Fahrersitz

Tabelle 7.5 : Abkürzungen für Sitzposition

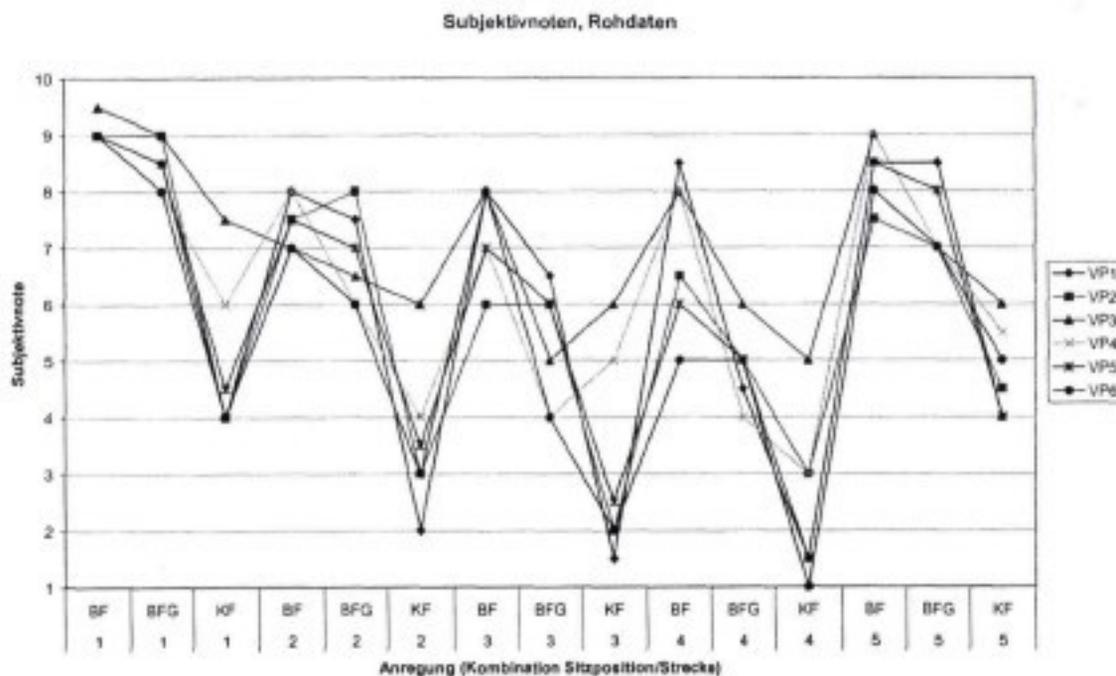


Abbildung 7.27 : Fragebogen 1, Rohdaten

Im nächsten Schritt werden nun die abgegebenen Subjektivnoten standardisiert auf den Mittelwert und die Standardabweichung der Grundgesamtheit sowie die Ausreißer nach dem Verfahren von Nalimov entfernt. In Abbildung 7.28 sind die entsprechenden Ergebnisse dargestellt. Die gemittelten Noten mit Standardabweichung für jede Anregung zeigt Abbildung 7.29.

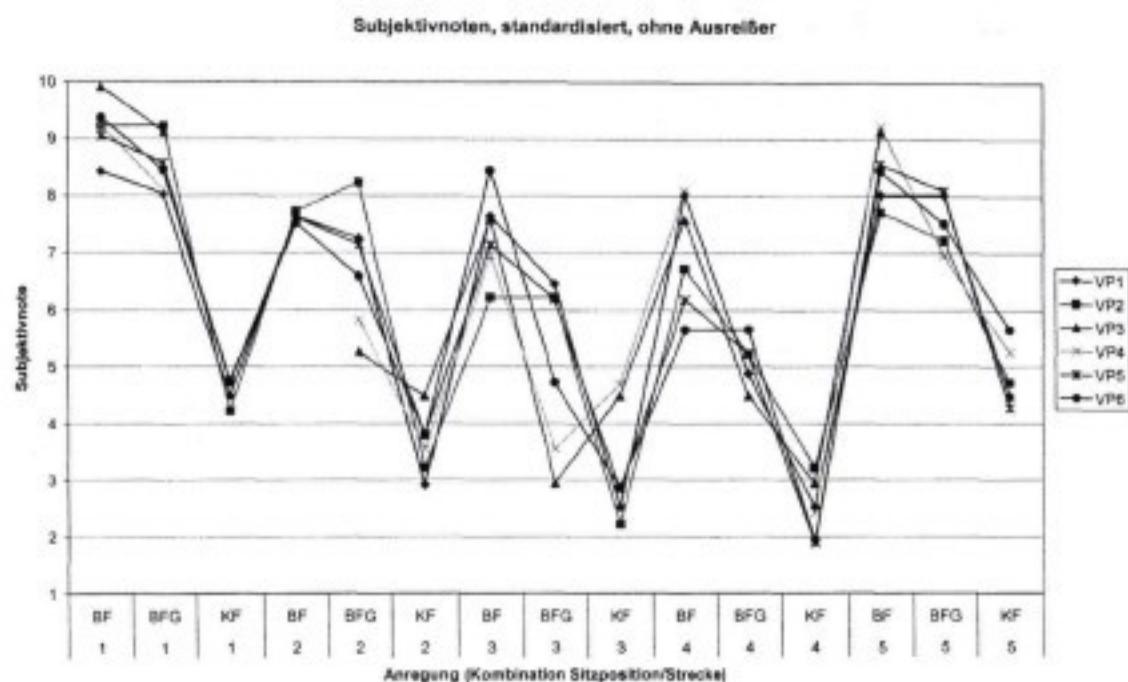


Abbildung 7.28 : Fragebogen 1, standardisierte Noten, ohne Ausreißer nach Nalimov

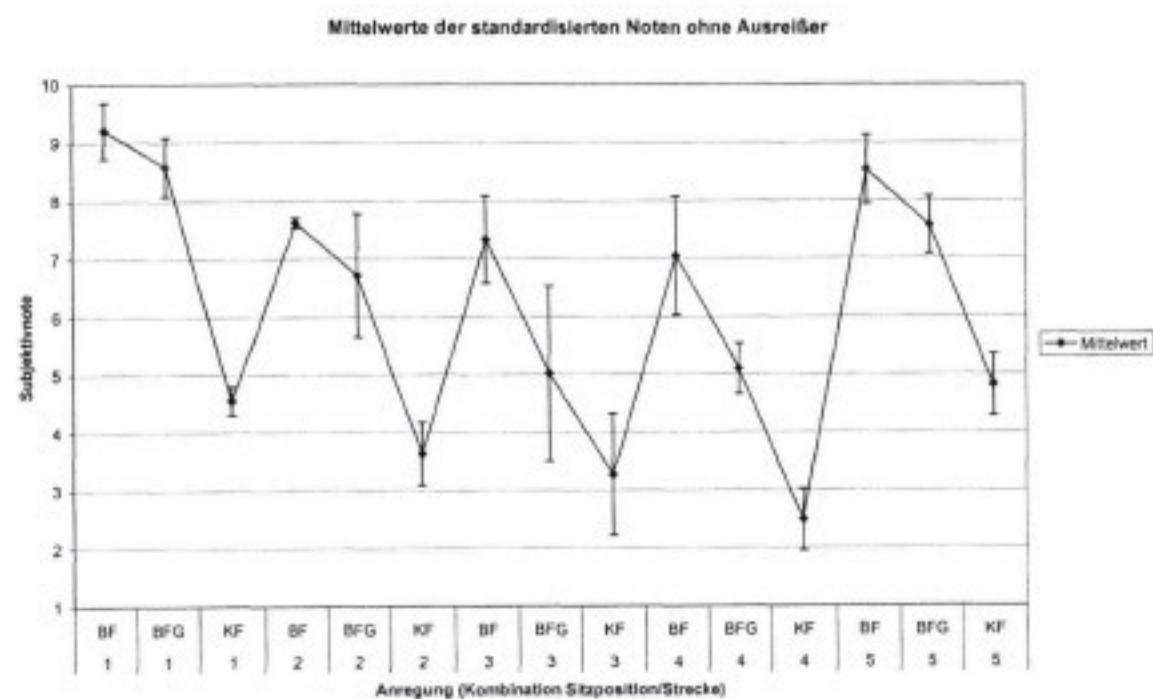


Abbildung 7.29 : Mittelwerte der standardisierten Noten

Fragebogen 2 (Abbildung 11.8) :

Der Fragebogen 2 enthielt drei Fragestellung zur Art der störenden Schwingung und dem Ort der Empfindung. Im Weiteren werden nun die Ergebnisse dieser Befragungen dargestellt.

Die erste Fragestellung lautete: „Waren die Schwingungen mehr im Rücken, im Gesäß oder in beiden gleich zu spüren?“

Abbildung 7.30 zeigt für alle Anregungen die Nennungen für stärkeres Empfinden der Schwingungen im Gesäß, Rücken oder in beiden gleich. Auf der Abszisse sind jeweils alle 15 Kombinationen aus Fahrzeug und Strecke aufgetragen - in der ersten Zeile die Sitzposition, in der zweiten Zeile die Streckennummer - auf der Ordinate die prozentualen Anteile der Versuchspersonenpopulation, die den jeweiligen Empfindungsort genannt haben. Die Summe aller drei Empfindungsorte für jeweils eine Anregung ergibt 100%.

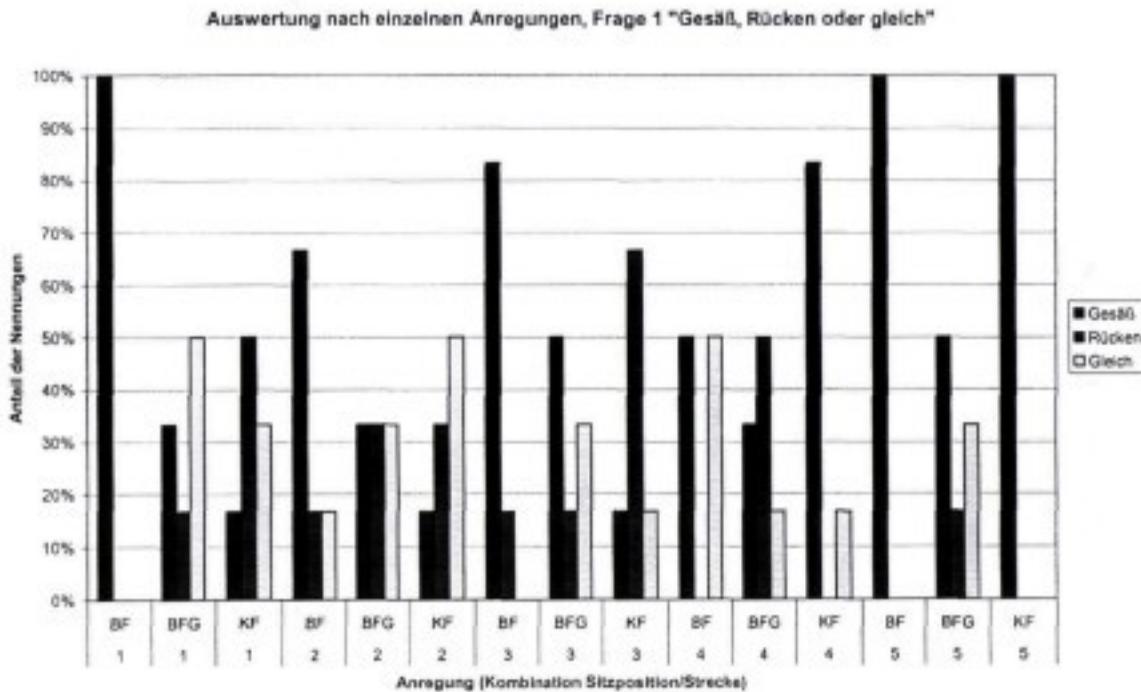


Abbildung 7.30 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage 1 „Gesäß, Rücken, gleich“

Die zweite Fragestellung lautete: „Waren eher die langwelligen, kurzwelligen oder stoßartigen Schwingungen unangenehm?“

In Abbildung 7.31 sind für alle Anregungen die Nennungen für die am unangenehmsten empfundene Schwingungsart dargestellt. Auf der Abszisse sind jeweils alle 15 Kombinationen aus Fahrzeug und Strecke aufgetragen, auf der Ordinate die prozentualen Anteile der Versuchspersonenpopulation, die die jeweilige Schwingungsart genannt haben. Die Summe aller drei Schwingungsarten für jeweils eine Anregung ergibt 100%.

Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage 2 "kurzwellig, langwellig, stoßartig"

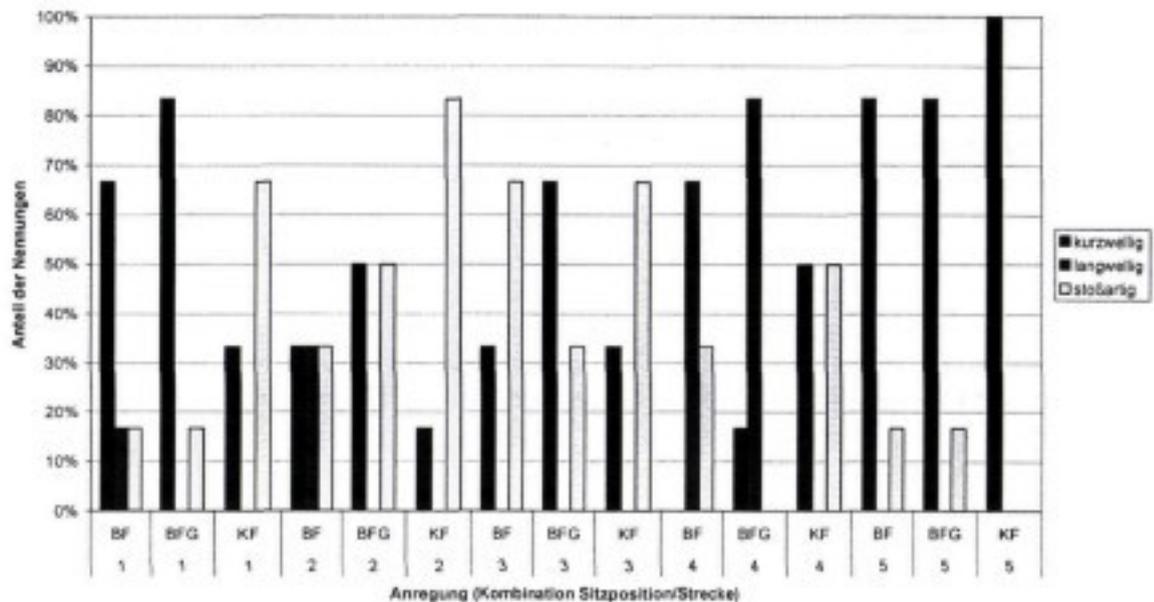


Abbildung 7.31 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage 2 „kurzwellig, langwellig, stoßartig“

Die dritte Fragestellung lautete: „In welcher Körperregion haben Sie die Schwingungen am unangenehmsten empfunden?“ Hier war ein freier Eintrag auch von mehreren Körperteilen ohne Vorgaben möglich.

Die von den Versuchspersonen genannten Körperteile wurden analog zu den Pkw-Versuchen in die in den Abbildungen aufgeführten Körperbereiche eingeteilt.

In Abbildung 7.32 sind für alle Anregungen die prozentualen Anteile am Versuchspersonenkollektiv dargestellt, die bei dieser Anregung den entsprechenden Körperbereich genannt haben. Die Balken mit 17% entsprechen einer Versuchsperson. Nur die Bereiche „Gesäß“ und „unterer Rücken“ werden für einzelne Anregungen von mehr als der Hälfte der Versuchspersonen genannt. Alle anderen Bereiche werden maximal von zwei Personen genannt und stellen damit keine statistisch verwertbaren Größen dar.

Körperteile in denen die Schwingungen am unangenehmsten empfunden wurden
 Anteil der VP, die in diesem Körperteil die Schwingungen am unangenehmsten empfanden

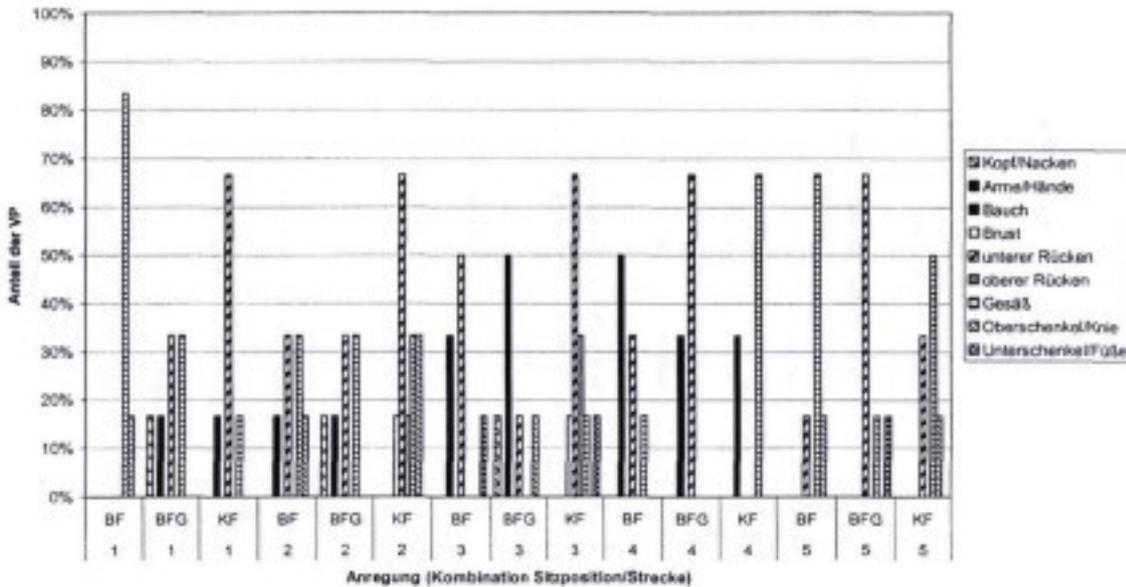


Abbildung 7.32 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage 3 „Körperbereiche“

Fragebogen 3 (Abbildung 11.9) :

Im dritten Fragebogen sollte eine prozentuale Gewichtung der subjektiv empfundenen Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden vorgenommen werden.

In Abbildung 7.33 sind für alle Anregungen die über die Versuchspersonen gemittelten, subjektiv empfundenen Schwingungsanteile dargestellt. Die Daten wurden vorher mit dem Verfahren nach Nalimov auf Ausreißer geprüft und bereinigt. Auf der Abszisse sind jeweils alle 15 Kombinationen aus Fahrzeug und Strecke aufgetragen, auf der Ordinate die gemittelten subjektiven Anteile der einzelnen Schwingrichtungen am Gesamtempfinden. Die Summe aller fünf Schwingungsrichtungen für jeweils eine Anregung ergibt 100%.

Man erkennt, dass bei fast allen Anregungen die Vertikalrichtung den größten subjektiv empfundenen Anteil aus macht. Ausnahmen bilden die Anregung KF3, bei der das Fahrzeug in Längseigenschwingungen geraten ist und die Anregungen BFG4 und KF4, die starke Wankbewegungen aufweisen.

Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage "Anteil der Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden"

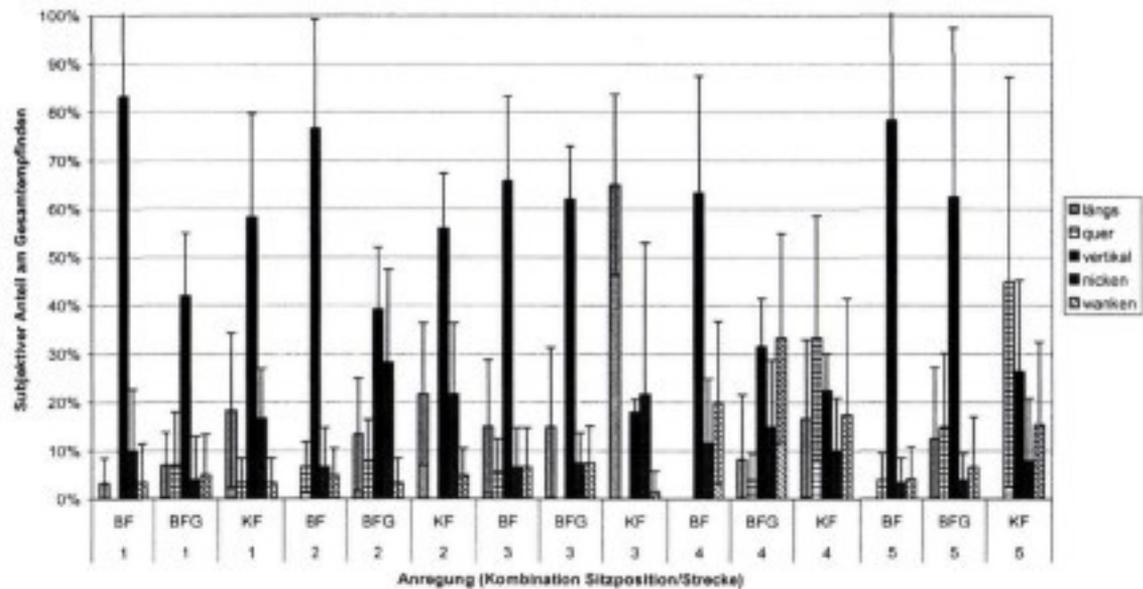


Abbildung 7.33 : Auswertung nach einzelnen Anregungen, Frage „Anteil der Schwingungsrichtungen am Gesamtempfinden“

7.4 Auswertung Prüfstand Pkw

Die Auswertung der Prüfstandsnoten erfolgt nach dem gleichen Schema wie bei den Fahrversuchen. Diese Noten werden auf den Mittelwert und die Standardabweichung aller abgegebenen Noten standardisiert und mit dem Verfahren nach Nalimov um Ausreißer bereinigt. Die in den Abbildungen dargestellten Werte sind die Mittelwerte über die so bearbeiteten Noten aller Versuchspersonen. Zusätzlich sind die Standardabweichungen dargestellt. Das absolute Niveau der Bewertungen darf nur innerhalb eines Diagramms bzw. zwischen Männern und Frauen verglichen werden, nicht jedoch zwischen den einzelnen Richtungen, da die Bewertungen für die einzelnen Richtungen in unabhängigen Versuchsreihen ermittelt wurden.

7.4.1 Subjektivnoten Fragebogen1, Gesamtempfinden

In Abbildung 7.34 sind für Männer und Frauen die Mittelwerte und Standardabweichungen der Subjektivnoten für die fünf Prüfstandsanregung mit kombinierter x-, y-, z- und Wank-Anregung dargestellt. Der Focus- und Corsa-Sitz erhalten im Mittel für die gleiche Sitzschienenanregung auch die gleiche Subjektivnote für das Gesamtschwingempfinden. Die Bewertungen für die E-Klasse liegen im Mittel etwas darüber. In den weiteren Abbildungen sind nach gleichem Prinzip die Subjektivnoten für die anderen Prüfstandsanregungen dargestellt. Auch hier liegen die Bewertungen für die Sitze sehr nahe beieinander. Wenn man den Verlauf der Bewertungen für die überlagerten Anregungen (Abbildung 7.34, Abbildung 7.35) mit dem für die z-Richtung (Abbildung 7.38) vergleicht, erkennt man die hohe Korrelation. In Abbildung 7.41 ist dies noch mal in einem Diagramm dargestellt. Dies beweist auf experimentellem Wege den

Dynamischer Sitzkomfort - Auswertung der Subjektivnoten

großen Einfluss der z-Beschleunigung der Sitzfläche auf das Gesamturteil, der mittels der Regressionsanalyse der Fahrversuche bereits auf mathematischem Wege ermittelt wurde.

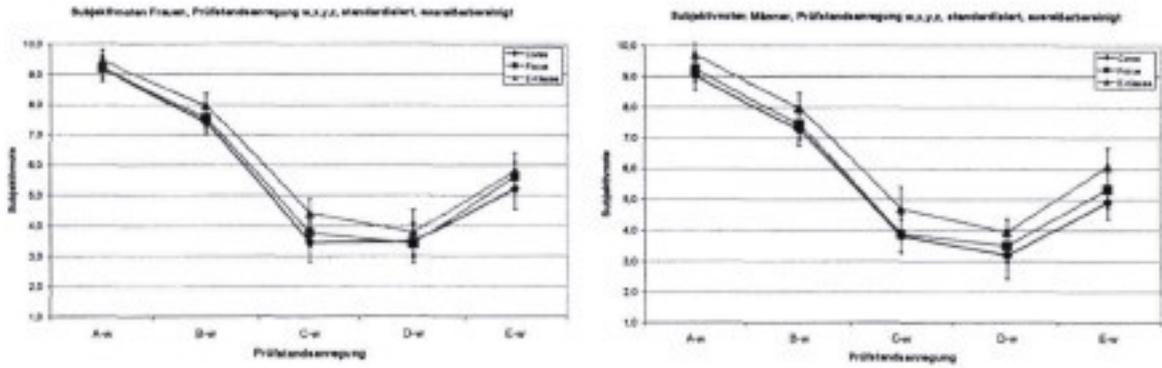


Abbildung 7.34: Subjektivnoten Männer/Frauen, Prüfstandsanregung w-,x-,y-,z-Richtung kombiniert, Fragebogen 1

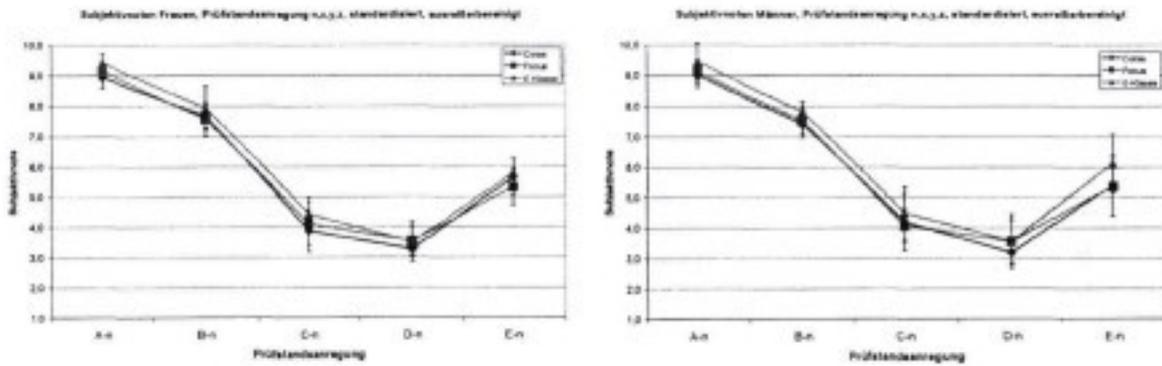


Abbildung 7.35: Subjektivnote Männer/Frauen, Prüfstandsanregung n-,x-,y-,z-Richtung kombiniert, Fragebogen 1

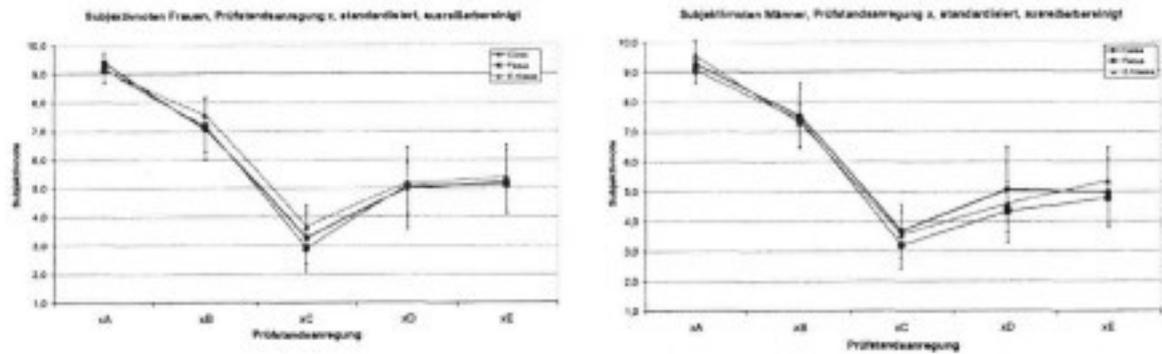


Abbildung 7.36 : Subjektivnote Männer/Frauen, Prüfstandsanregung nur x-Richtung, Fragebogen 1

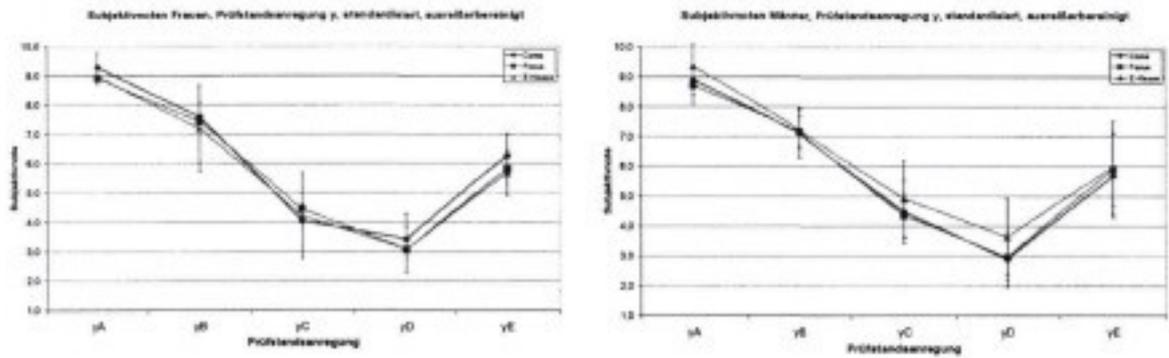


Abbildung 7.37 : Subjektivnote Männer/Frauen, Prüfstandsanregung nur y-Richtung, Fragebogen 1

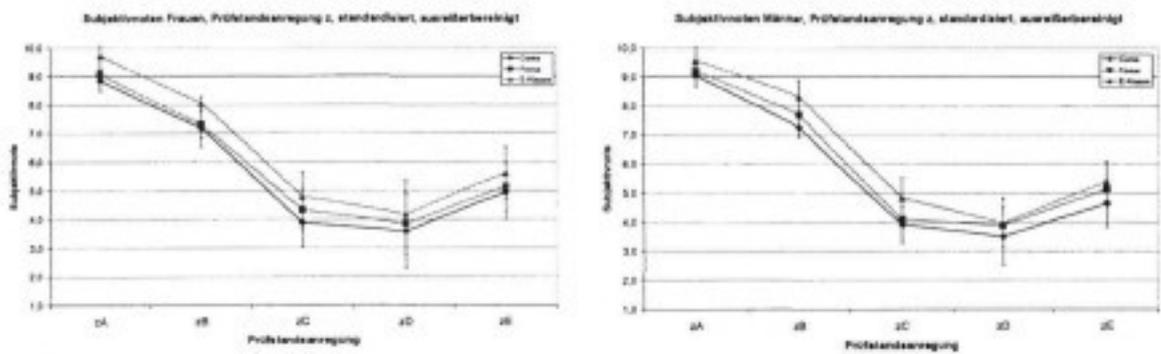


Abbildung 7.38: Subjektivnote Männer/Frauen, Prüfstandsanregung nur z-Richtung, Fragebogen 1

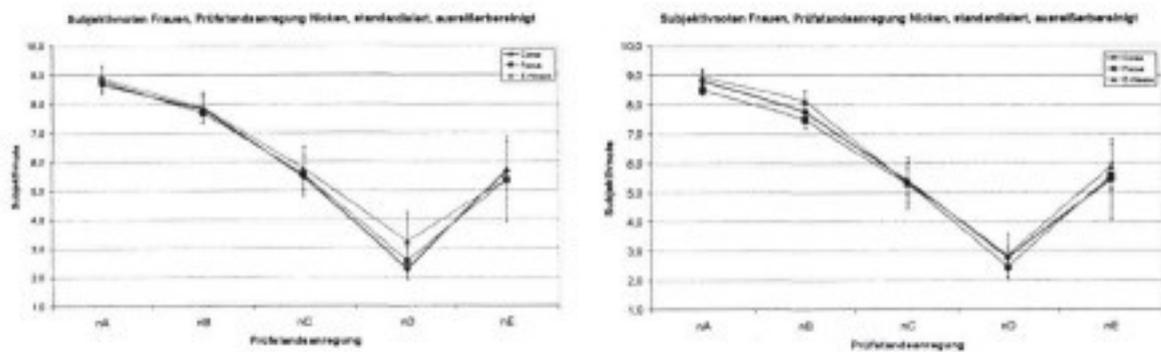


Abbildung 7.39 : Subjektivnote Männer/Frauen, Prüfstandsanregung nur Nick-Richtung, Fragebogen 1

Dynamischer Sitzkomfort - Auswertung der Subjektivnoten

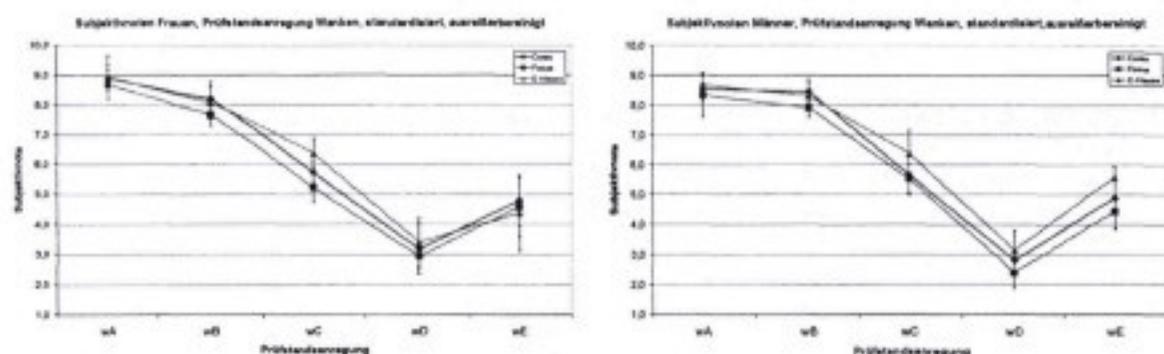


Abbildung 7.40 : Subjektivnote Männer/Frauen, Prüfstandsanregung nur Wank-Richtung, Fragebogen 1

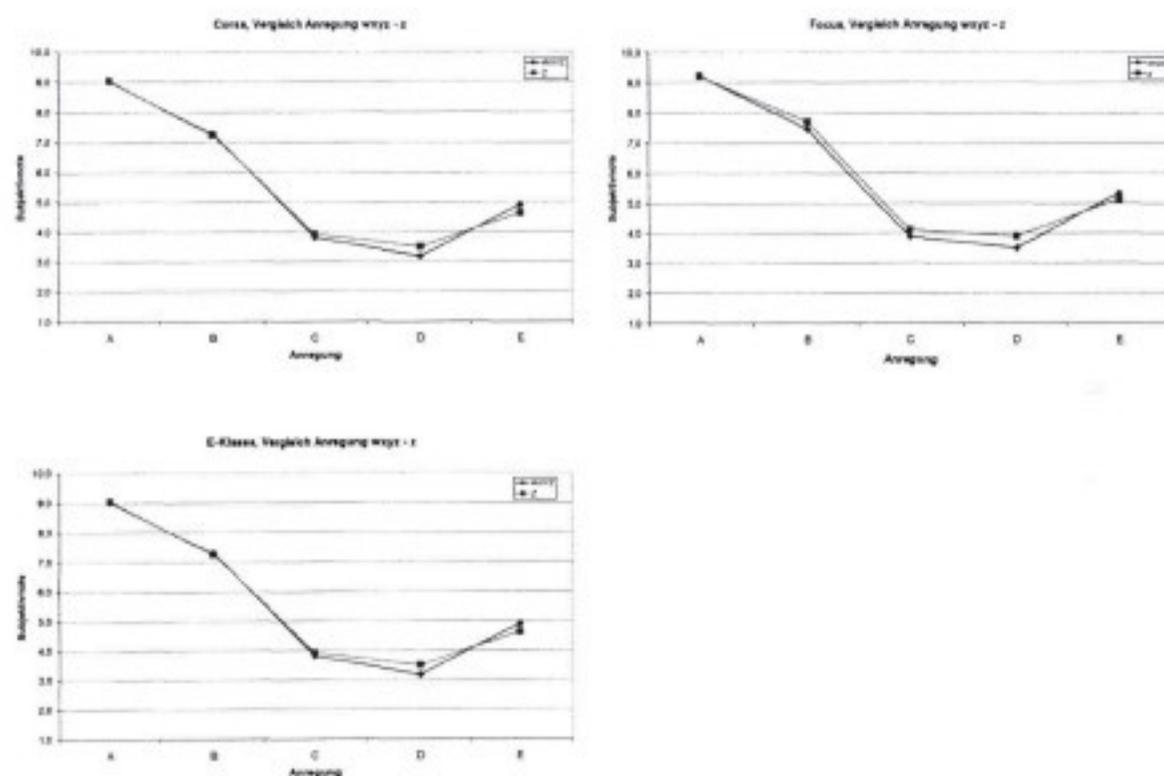


Abbildung 7.41 : Vergleich der Bewertungen für die überlagerte Anregung aus w,x,y,z-Richtung und z-Richtung

In Abbildung 7.41 sind die Bewertungen für die überlagerte Anregung aus x-,y-,z- und Wank-Richtung im Vergleich zur reinen z-Anregung dargestellt. Zum besseren Vergleich sind die Bewertungen auf das gleiche Niveau transformiert, da sie aufgrund der Ermittlung in verschiedenen Versuchsreihen nicht das gleiche Niveau haben. Relevant für den Vergleich sind jedoch nur die relativen Bewertungen zwischen den Ereignissen.

7.4.2 Subjektivnoten Fragebogen 2, Körperregionen

In den folgenden drei Abbildungen sind getrennt für Frauen und Männer jeweils für einen Sitz in einem Diagramm die Mittelwerte und Standardabweichungen der Körperteilbewertungen für die fünf Anregungen dargestellt. Gut zu erkennen sind die verschiedenen Niveaus der Bewertungen im gleichen Verhältnis wie die Gesamtbewertungen aus Fragebogen1. Auffällig ist die im Mittel relativ gleichmäßige Bewertung der verschiedenen Körperbereiche.

Dies hat sich jedoch auch schon direkt bei den Versuchen gezeigt und wurde in gleicher Weise auch von bei den Nfz-Versuchen teilgenommenen Vertretern von MAN und Evobus bewertet. Die Absolutwerte der Bewertungen dürfen jedoch nur innerhalb eines Diagramms verglichen werden und nicht zwischen den Diagrammen, da diesen keine gemeinsame Referenz zugrunde liegt. Bei den Frauen zeigt sich bei Anregung A und B auf allen Sitzen eine etwas schlechtere Bewertung, also ein verstärktes Diskomfortempfinden, bei den Bereichen „Gesäß“ und „unterer Rücken“. Bei den anderen Anregungen liegen die schlechteren Bewertungen eher in den Bereichen „Brust“ und „Bauch“. Ein systematischer Unterschied der Bewertungen zwischen den drei Sitzen ist nicht erkennbar. Eine Korrelationsanalyse konnte keine signifikanten Zusammenhänge ermitteln, so dass man davon ausgehen muss, dass die verwendeten Anregungen im Wesentlichen als Ganzkörperschwingungen empfunden wurden und keine Körperteile besonders angeregt wurden.

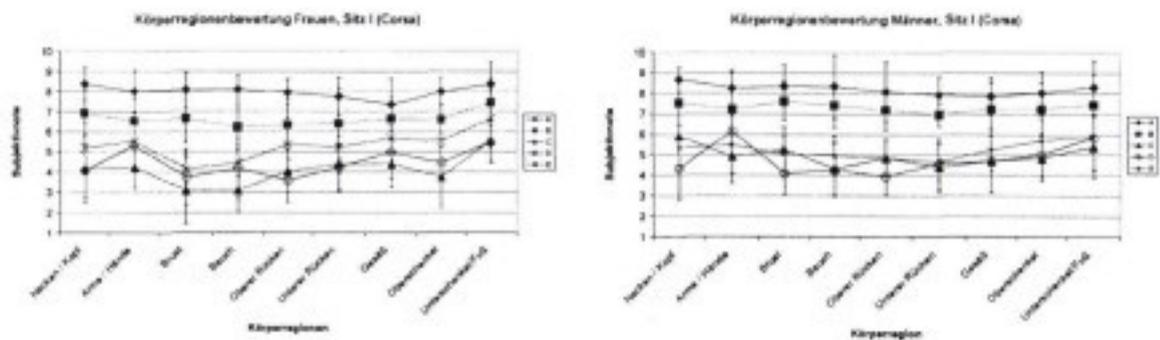


Abbildung 7.42 : Subjektivnoten Männer/Frauen, Sitz I (Corsa), Körperregionen, Fragebogen 2

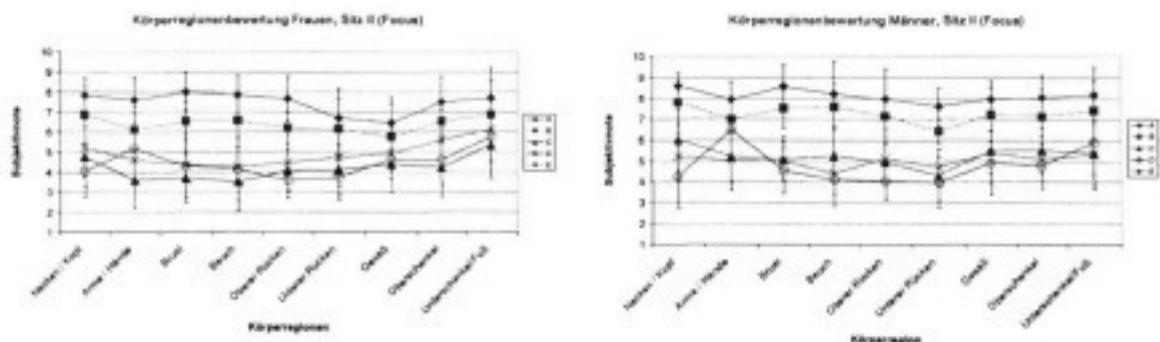


Abbildung 7.43 : Subjektivnoten Männer/Frauen, Sitz II (Focus), Körperregionen, Fragebogen 2

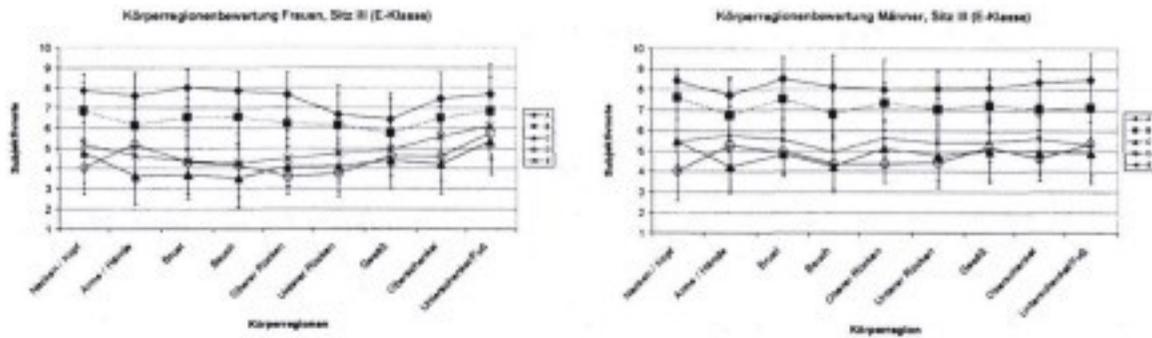


Abbildung 7.44 : Subjektivnoten Männer/Frauen, Sitz III (E-Klasse), Körperregionen, Fragebogen 2

7.4.3 Vergleich Noten Prüfstand – Fahrversuche Pkw

In Abbildung 7.45 und Abbildung 7.46 sind die Subjektivnoten für die fünf, für die Prüfstandsversuche ausgewählten Anregungen aus dem Fahrversuch und dem Prüfstandsversuch dargestellt. Auf der Abszisse steht in der oberen Reihe die Codierung für die Fahrversuchsanregung und in der unteren Reihe, die zum Vergleich aufgetragene Prüfstands-anregung. Man erkennt die gute Übereinstimmung bei den Anregungen A, B, C, E. Die größere Abweichung bei Strecke D ist wahrscheinlich auf die jeweils eine fehlende rotatorische Anregung (Nicken/Wanken) zurückzuführen, die nur bei dieser Strecke bzw. Anregung in relevantem Maße vorhanden ist.

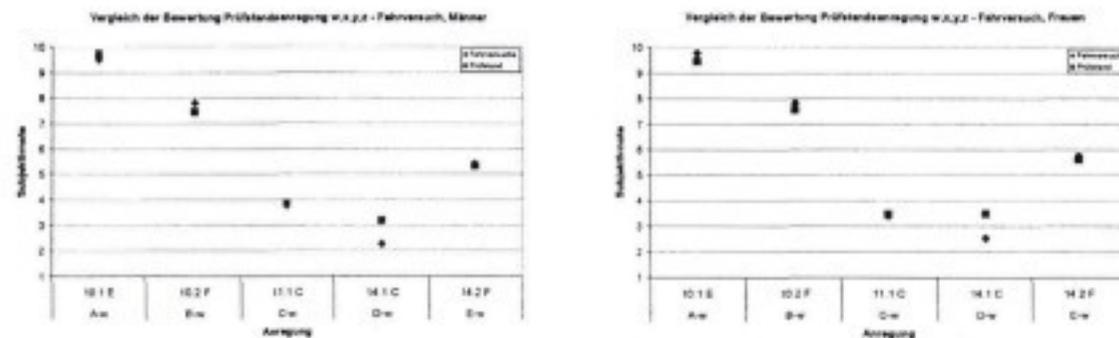


Abbildung 7.45 : Vergleich der Noten aus Fahrversuch und Prüfstand, kombinierte x-,y-,z-,Wank-Anregung

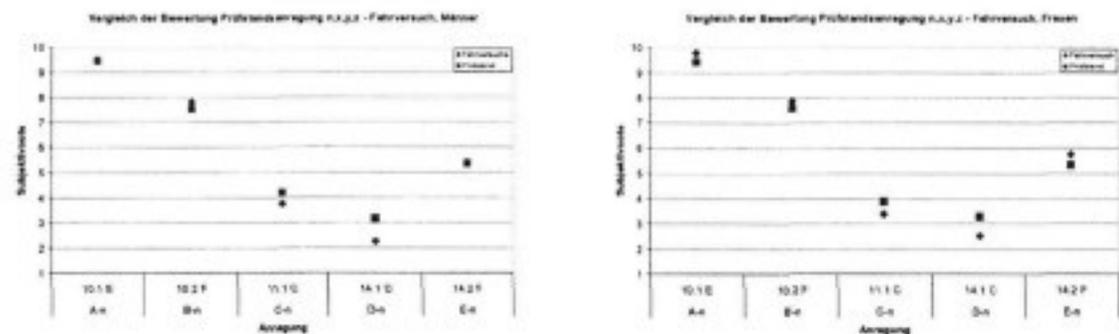


Abbildung 7.46 : Vergleich der Noten aus Fahrversuch und Prüfstand, kombinierte x-,y-,z-,Nick-Anregung

7.5 Auswertung Prüfstand Nfz

Analog zu den Pkw-Versuchen werden im Folgenden die Subjektivbewertungen der Prüfstandsversuche dargestellt.

7.5.1 Subjektivnoten Fragebogen 1, Gesamtschwingempfinden

In Abbildung 7.47 bis Abbildung 7.50 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Subjektivnoten für die sieben Versuchsreihen und zwei Sitze dargestellt. Hier ist es wichtig, zu beachten, dass die Bewertungen für die zwei Sitze zwar in einem Diagramm dargestellt sind, die Absolutwerte jedoch nicht miteinander verglichen werden dürfen, da die beiden Sitze nicht in Bezug auf die gleiche Referenz bewertet wurden. Dies war im Gegensatz zu den Pkw-Versuchen nicht möglich, da die beiden Sitze nicht gleichzeitig auf dem Prüfstand aufgebaut werden konnten. Die Darstellung dient vielmehr dazu, zu zeigen, dass auf beiden Sitzen die verschiedenen Sitzschienenanregungen relativ zueinander im Wesentlichen gleich bewertet wurden, was jedoch noch keine Aussage über das absolute Diskomfortempfinden zulässt.

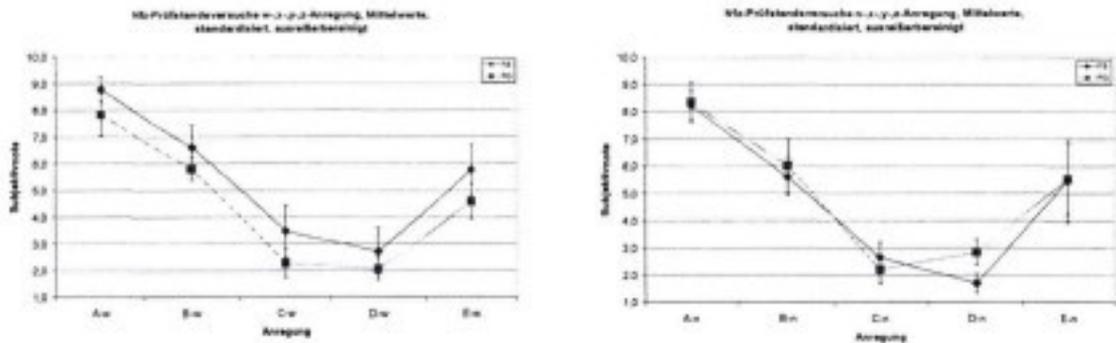


Abbildung 7.47: Subjektivnote Nfz, Prüfstands-anregung w-,x-,y-,z-Richtung, n-,x-,y-,z-Richtung, Fragebogen 1

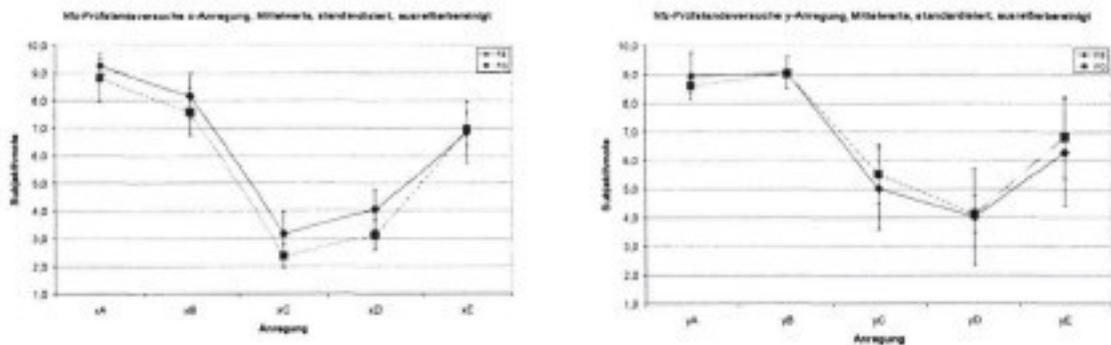


Abbildung 7.48 : Subjektivnote Nfz, Prüfstands-anregung x-Richtung, y-Richtung, Fragebogen 1

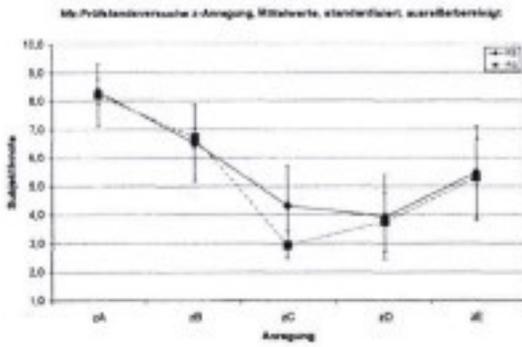


Abbildung 7.49 : Subjektivnote Nfz, Prüfstandsanregung z-Richtung, Fragebogen 1

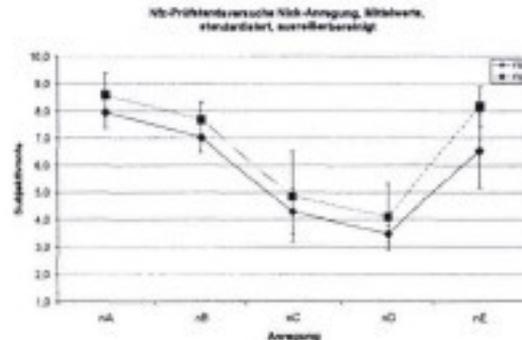
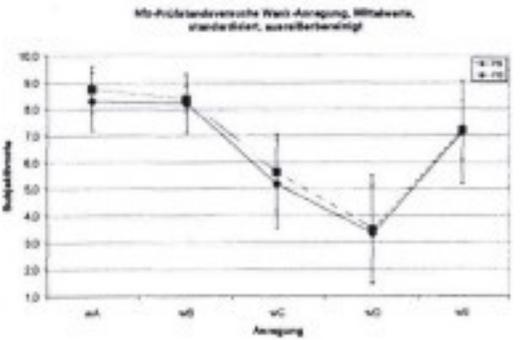


Abbildung 7.50 : Subjektivnote Nfz, Prüfstandsanregung Wank-Richtung/Nick-Richtung, Fragebogen 1

7.5.2 Fragebogen 2, Körperregionen

In der folgenden Abbildung sind getrennt in zwei Diagramme für den Fahrgastsitz und den Fahrersitz die Mittelwerte und Standardabweichungen der Körperteilbewertungen für die fünf Anregungen dargestellt. Auch liegt im Mittel eine relativ gleichmäßige Bewertung der verschiedenen Körperbereiche vor. Wie schon bei den Pkw-Versuchen angesprochen, ist dies nicht ein Ergebnis der Mittelung, sondern wurde von der Mehrzahl der Versuchspersonen, unter anderem von den beiden Vertretern von MAN und Evobus in dieser Weise bewertet. Damit zeigt sich auch hier, dass die verwendeten Anregungen im Wesentlichen als Ganzkörperschwingungen empfunden wurden und keine Körperteile besonders angeregt wurden. Auch hier dürfen die Absolutwerte der Bewertungen nur innerhalb eines Diagramms verglichen werden und nicht zwischen den Diagrammen, da diesen keine gemeinsame Referenz zugrunde liegt. Ein systematischer Unterschied der Bewertungen zwischen den Sitzen ist nicht erkennbar.

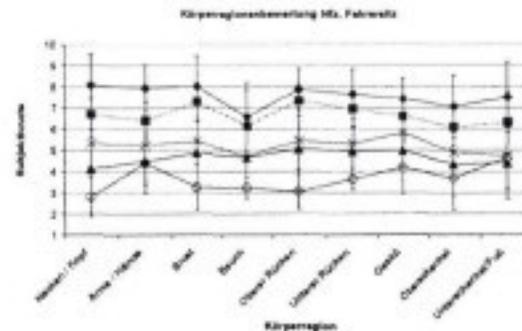
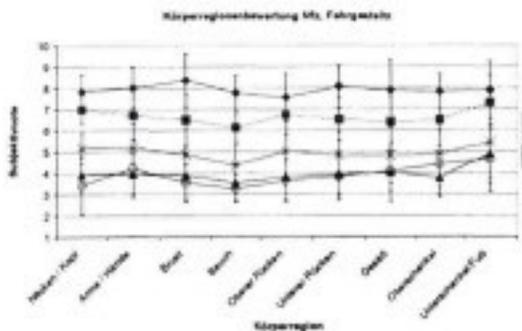


Abbildung 7.51 : Subjektivnoten Körperregionen, Nfz, Fragebogen 2, Fahrersitz/Fahrgastsitz

8 Korrelations-/Regressionsanalyse

8.1 Grundlagen

8.1.1 Einfache Korrelation

Zur Identifizierung unterstellter funktionaler Zusammenhänge zwischen verschiedenen Merkmalen werden Korrelationsverfahren angewendet. Der Grad des linearen Zusammenhanges zwischen zwei Merkmalen wird durch den Wert des Korrelationskoeffizienten im Wertebereich $-1 \leq r_{xy} \leq 1$ beschrieben. Ist der Wert des Koeffizienten Null, so sind die Merkmale unkorreliert, d. h. es besteht keine Abhängigkeit. Bei 1 besteht ein linearer, bei -1 ein ungleichsinniger Zusammenhang.

Bei einem Zufallsvektor (X, Y) ergibt eine Stichprobe (vom Umfang n) n Paare $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ von Merkmalswerten. Damit berechnet sich der einfache (oder empirische) Korrelationskoeffizient r_{xy} zu

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad , \quad -1 \leq r_{xy} \leq 1 \quad ,$$

Dies ist der Korrelationskoeffizient nach Pearson oder Bravais in der Stichprobe. Es ist der Schätzwert für den wahren Korrelationskoeffizienten in der Grundgesamtheit.

8.1.2 Partielle Korrelation

Die Bestimmung eines linearen Zusammenhanges ist mittels des oben beschriebenen Verfahrens sehr einfach. Der Korrelationskoeffizient gibt mit seinem Betrag ein Maß des Zusammenhanges an und das Vorzeichen die Richtung. Eine solche Vorgehensweise kann jedoch auch zu falschen Schlussfolgerungen führen, denn die Stärke des linearen Zusammenhanges zwischen zwei Variablen wird durch den Korrelationskoeffizienten möglicherweise nicht richtig abgebildet, wenn die beiden Variablen zugleich von weiteren Faktoren beeinflusst werden. In einem solchen Fall ist es möglich, dass der Einfluss der unberücksichtigten Faktoren ebenfalls dem Zusammenhang zwischen den beiden untersuchten Variablen zugeschrieben und dadurch der Korrelationskoeffizient entweder nach oben oder nach unten verzerrt wird.

Bezogen auf die Korrelation der Beschleunigungseffektivwerte mit den Subjektivnoten bedeutet dies, dass die Höhe der Korrelation von einem Kennparameter zu den Subjektivnoten möglicherweise von einem anderen Kennparameter beeinflusst wird. Da die Schwingungsrichtungen durch die mechanische Kopplung, wie in Abbildung 8.1 und folgende dargestellt, stark korrelieren, ist es möglich, dass z.B. die Höhe des stark korrelierenden Kennparameters der x-Richtung gar nicht in diesem Maße kausal begründet ist, sondern durch die hohe Korrelation mit einem anderen Kennparameter, z.B. der z-Richtung, hervorgerufen wird.

Die partielle Korrelation $r_{xy.z}$ (Korrelation erster Ordnung) ist die sich ergebende Korrelation zwischen zwei Variablen X und Y, wenn man den linearen Einfluss einer dritten Variablen Z auspartialisiert.

$$r_{xy.z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} \cdot r_{yz}}{\sqrt{1 - r_{xz}^2} \cdot \sqrt{1 - r_{yz}^2}}$$

8.1.3 Definition der Regression

Die Regressionsanalyse ist eine Methode zur Untersuchung der Art der funktionalen Abhängigkeit (linear, quadratisch etc.) eines Merkmals Y von einem oder mehreren, insgesamt k verschiedenen, unabhängigen Merkmalen X_j . Mit dem Verfahren der multiplen linearen Regression lässt sich für die k Regressoren x_j und den Regressand y eine Geradengleichung bestimmen.

Liegt nun eine Stichprobe vom Umfang n für die abhängige Variable y und die k unabhängigen Variablen x_1, x_2, \dots, x_k aus der Grundgesamtheit vor, so werden die Daten üblicherweise wie folgt dargestellt:

Nr. der Beobachtung	y	x_1	x_2	$x_3 \dots \dots x_k$
1	y_1	x_{11}	x_{21}	x_{k1}
2	y_2	x_{12}	x_{22}	x_{k2}
3	y_3	x_{13}	x_{23}	x_{k3}
.
.
.
n	y_n	x_{1n}	x_{2n}	x_{kn}

Die Beziehung zwischen y und x_1, x_2, \dots, x_k wird als lineares Modell

$$y_i = b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + \dots + b_kx_{ki} + u_i \tag{Gl 8.1}$$

oder zusammengefasst als

$$y_i = b_0 + \sum_{j=1}^k b_j x_{ji} + u_i = \hat{y}_i + u_i \tag{Gl 8.2}$$

formuliert. Darin sind b_0, b_1, \dots, b_k Konstanten, die als partielle Regressionskoeffizienten (oder einfach Regressionskoeffizienten) des Modells bezeichnet werden und zur Lösung abgeschätzt werden müssen. u_i stellt einen Störterm dar, der die Streuung der abhängigen Variablen durch unberücksichtigte oder unbekannte Einflüsse stochastischer Art beschreibt. \hat{y}_i stellt den streng deterministischen Zusammenhang zwischen der abhängigen Variablen y_i und den unabhängigen Variablen x_j dar.

Es wird unterstellt, dass die lineare Gleichung 8.1 bzw. 8.2 für jede innerhalb der Daten mögliche feste Wertemenge von x_1, x_2, \dots, x_k eine akzeptable Approximation an die tatsächliche Beziehung zwischen y und den x-Variablen darstellt. Somit ist y näherungsweise linear von den x-Variablen abhängig und u_i gibt in dieser Näherung die Abweichung bei der i-ten Beobachtung an. Es ist wichtig, dass die u_i keine

systematischen, für die Bestimmung der y-Werte nutzbaren Informationen enthalten, die nicht bereits in den unabhängigen Variablen berücksichtigt worden sind. Dazu wird unterstellt, dass die u_i unabhängig verteilt sind sowie den Mittelwert Null und die konstante Varianz σ^2 aufweisen.

Der Regressionskoeffizient b_j kann als Zuwachs von y bei einem Anstieg von x_j um eine Einheit aufgefasst werden, wobei aber angenommen wird, dass alle anderen Variablen konstant sind. Diese Interpretation ist unabhängig vom jeweiligen Wert von x_j .

Um die Regressionskoeffizienten abschätzen zu können, benötigt man ein Gleichungssystem mit mindestens $n = k + 1$ Gleichungen. Somit ergibt sich für die mathematische Beschreibung des Regressionsmodells mit k potentiellen Einflussgrößen:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & \dots & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & \dots & \dots & x_{k2} \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ 1 & x_{1n} & \dots & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_n \end{bmatrix} \quad \text{Gl. 8.3}$$

oder entsprechend

$$\bar{y} = \underline{X} \cdot \bar{b} + \bar{u}. \quad \text{Gl. 8.4}$$

Die Regressionskoeffizienten b_j werden mit der Methode der Kleinsten Quadrate geschätzt. Dazu muss die Summe der quadrierten Residuen minimal werden. Formal heißt das, dass

$$\begin{aligned} S(b_0, b_1, \dots, b_k) &= \sum_{i=1}^n u_i^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_{i1} - b_2 x_{i2} - \dots - b_k x_{ik})^2 \end{aligned} \quad \text{Gl. 8.5}$$

minimiert werden muss.

Zur Lösung werden die Kleinste-Quadrate Schätzer b_0, b_1, \dots, b_k durch Lösen des folgenden Gleichungssystems gewonnen:

$$\begin{aligned} S_{11}b_1 + S_{12}b_2 + \dots + S_{1k}b_k &= S_{y1} \\ S_{12}b_1 + S_{22}b_2 + \dots + S_{2k}b_k &= S_{y2} \\ \cdot & \\ \cdot & \end{aligned} \quad \text{Gl. 8.6}$$

$$S_{1k}b_1 + S_{2k}b_2 + \dots + S_{kk}b_k = S_{yk}$$

wobei

$$S_{ij} = \sum_{p=1}^n (x_{ip} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jp} - \bar{x}_j) \quad , \quad i, j = 1, 2, \dots, k; \tag{Gl. 8.7}$$

$$S_{yi} = \sum_{p=1}^n (y_p - \bar{y}) \cdot (x_{ip} - \bar{x}_i) \quad , \quad i = 1, 2, \dots, k; \tag{Gl. 8.8}$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{p=1}^n x_{ip}}{n} \quad , \quad \bar{y} = \frac{\sum_{p=1}^n y_p}{n} \quad , \tag{Gl. 8.9, Gl. 8.10}$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1\bar{x}_1 - b_2\bar{x}_2 - \dots - b_k\bar{x}_k \quad . \tag{Gl. 8.11}$$

Dabei werden die Gleichungen des obigen Gleichungssystems als Normalgleichungen bezeichnet. Üblicherweise heißt b_0 Achsenabschnitt und b_i der Schätzer für den (partiellen) Regressionskoeffizienten der Grundgesamtheit bei x_i .

Durch Einsetzen der b_i in Gleichung 8.1 bzw. 8.2 ergibt sich die gesuchte Regressionsgleichung. Stellt sich heraus, dass der Regressand y nur von einem Regressor x abhängig ist, so geht das multiple lineare Regressionsmodell über in das einfache lineare Modell.

Um die Qualität der Schätzung zu bewerten, wird das Quadrat des multiplen Regressionskoeffizienten (oder auch Bestimmtheitsmaß) R^2 als globale Kennziffer herangezogen. Bei nur einer unabhängigen Variablen ist R der Wert des einfachen Korrelationskoeffizienten zwischen y und x .

$$R^2 = \frac{\text{var}(\hat{y})}{\text{var}(y)} = \frac{\sum_{j=1}^n (\hat{y}_j - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\text{var}(u)}{\text{var}(y)} \tag{Gl. 8.12}$$

Das Bestimmtheitsmaß gibt somit an, wie groß der durch die Regressionsgleichung erklärte Anteil an der beobachteten Gesamtvarianz ist.

R^2 liegt im Intervall von 0 bis 1. Wenn das Modell die Daten gut beschreibt, liegt R^2 nahe bei 1 (etwa, $0,9 < R^2 < 1$), d. h. bei einer guten Datenanpassung liegen die beobachteten und die geschätzten Werte dicht beieinander. Es besteht dann also praktisch ein vollkommener linearer Zusammenhang.

Besteht andererseits keine lineare Beziehung zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variablen, so liefert das lineare Modell eine schlechte Datenanpassung. R^2 liegt dann sehr nahe bei Null (etwa $0 < R^2 < 0,05$). In diesem Falle wäre \bar{y} die bestmögliche Prognose für die Beobachtung y_i . Wenn kein lineares Modell existiert, liefert der Stichprobenmittelwert die beste Schätzung, weil in diesem Fall der Mittelwert der Stichprobe die Summe der quadrierten Abweichungen minimiert.

Bei der multiplen Regressionsanalyse besteht jedoch bei der Verwendung des Bestimmtheitsmaßes R^2 als Gütekriterium die Gefahr, dass Variablen in die Regressionsgleichung aufgenommen werden, die keinen signifikanten Beitrag leisten. Solche Variablen bewirken zwar die Zunahme des R^2 -Wertes, weisen aber nur eine geringe Korrelation mit der abhängigen Variablen auf. Vorteilhafter ist es deshalb, das bereinigte (oder angepasste) Bestimmtheitsmaß nach Gleichung 8.13 bzw. 8.14 zu verwenden, das um die Anzahl der Freiheitsgrade korrigiert ist.

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - k - 1)}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 / (n - 1)} \quad \text{Gl. 8.13}$$

$$= 1 - \frac{n - 1}{n - k - 1} \cdot (1 - R^2) \quad \text{Gl. 8.14}$$

8.2 Fahrversuche Pkw

In diesem Kapitel werden die Korrelationen der in Kapitel 6 „Bildung objektiver Kennparameter“ ermittelten Beschleunigungseffektivwerte untereinander als auch mit den Subjektivnoten untersucht.

8.2.1 Korrelationen der Kennparameter untereinander

In den Abbildung 8.1 bis Abbildung 8.6 sind die Korrelationen der Kennparameter untereinander dargestellt. Aufgrund des konstruktiven Aufbaus von Fahrwerk und Sitz ist weder davon auszugehen, dass die Beschleunigungen an den verschiedenen Messstellen in gleicher Richtung noch innerhalb der Richtungen unabhängig voneinander sind. Durch die Korrelationsanalyse der Kennparameter untereinander soll das Maß dieses Zusammenhanges ermittelt werden. Dies ist auch in Hinblick auf das Verständnis der späteren Regressionsergebnisse wichtig, da hierbei stark voneinander abhängige Parameter nicht gleichzeitig in das Modell eingehen können. Die Ergebnisse werden beispielhaft für die Messungen mit den männlichen Versuchspersonen dargestellt. Dabei werden die Messstellen Sitzschiene, Sitzfläche und Lehne betrachtet. Die Korrelation wird für jeden Frequenzbereich und jedes Fahrzeug über die fünf Strecken ermittelt. Die Abbildungen sind dabei analog der Darstellung der Kennparameter aufgebaut.

In Abbildung 8.1 bis Abbildung 8.3 sind die Korrelationen der Richtungen untereinander dargestellt. Die Korrelation wird dabei für jeden Frequenzbereich einzeln über alle 5 Strecken gebildet. In den oberen drei Diagrammen sind jeweils für die drei Fahrzeuge die Korrelationskoeffizienten zwischen x- und z-Richtung (r_{xz}), y- und z-Richtung (r_{yz}) sowie x- und y-Richtung (r_{xy}) dargestellt. Auf der Abszisse sind jeweils die 465 Frequenzbereiche aufgetragen, auf der Ordinate der Korrelationskoeffizient. Im untersten Diagramm sind für die einzelnen Frequenzbereiche jeweils die entsprechenden Grenzen

dargestellt. Die blauen Punkte markieren die untere Frequenzgrenze, die roten Punkte die obere Frequenzgrenze.

Man erkennt für den Großteil der Frequenzbereiche eine sehr hohe Korrelation zwischen den Richtungen, besonders an der Sitzschiene. Dies bedeutet, dass die bei den Versuchen verwendeten Fahrbahnanregungen sowie Fahrwerkseigenschaften der Fahrzeuge Anregungen hervorgerufen haben, bei denen die Beschleunigungsstärke in den einzelnen Richtungen im Wesentlichen jeweils im gleichen Maße verändert wurde. Statistisch signifikant auf dem 5%-Niveau sind dabei alle Korrelationsmaße größer als 0,87.

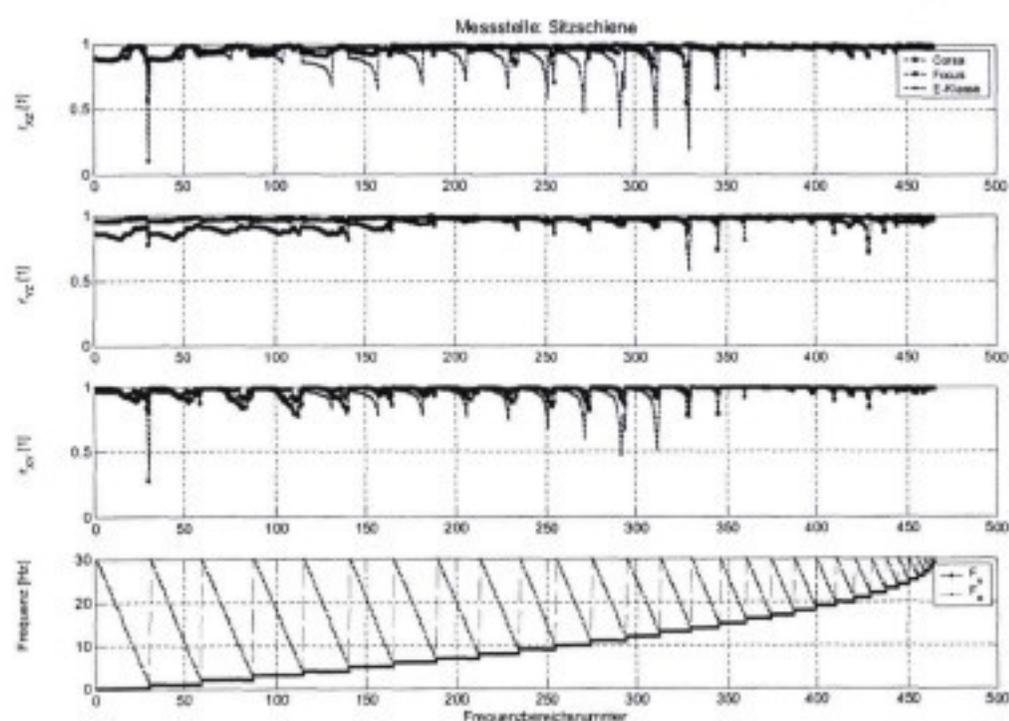


Abbildung 8.1 : Korrelation der Richtungen zueinander, Messstelle Sitzschiene, Pkw

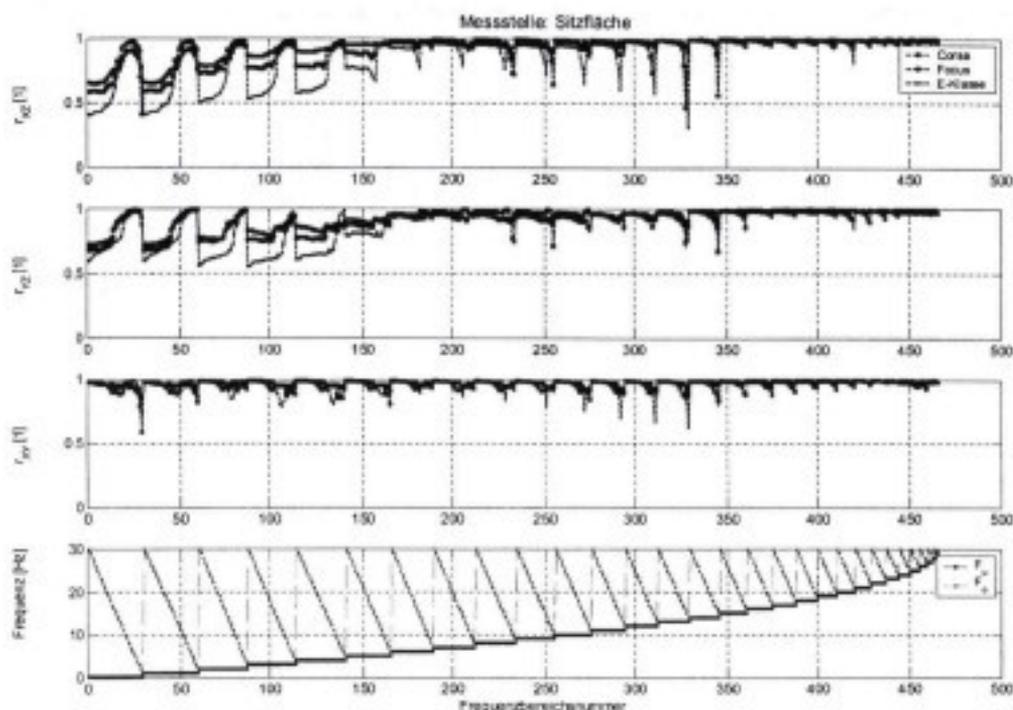


Abbildung 8.2 : Korrelation der Richtungen zueinander, Messstelle Sitzfläche, Pkw

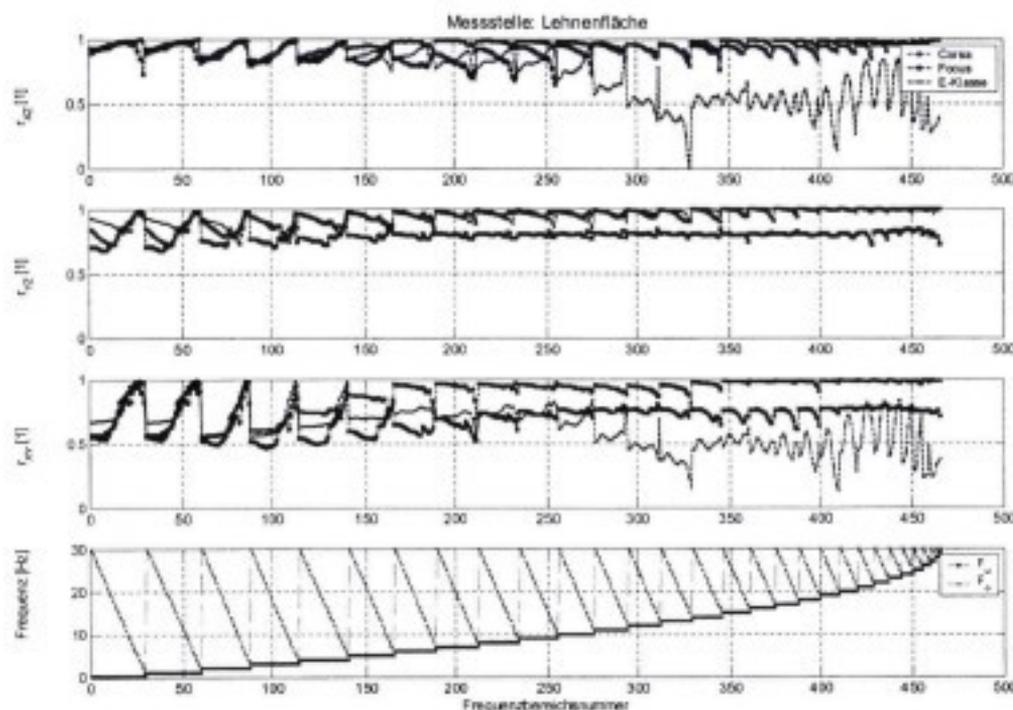


Abbildung 8.3 : Korrelation der Richtungen zueinander, Messstelle Lehnenfläche, Pkw

In Abbildung 8.4 bis Abbildung 8.6 sind nun für die x-, y- und z-Richtung die Korrelationen der Beschleunigungseffektive für jeweils zwei Messstellen untereinander dargestellt.

Für die x- und y-Richtung liegt der Korrelationskoeffizient der Sitzschiene zu Sitzfläche über den gesamten Frequenzbereich nahezu bei Eins. Dies lässt auf ein weitgehend

konstantes Übertragungsverhalten schließen. In der z-Richtung liegen die Koeffizienten bei den Frequenzbereichen, die den ganzen oder einen großen Teil des Gesamtfrequenzbereichs beinhalten etwas niedriger. Das Übertragungsverhalten in z-Richtung ist insbesondere bei der E-Klasse stärker anregungsabhängig.

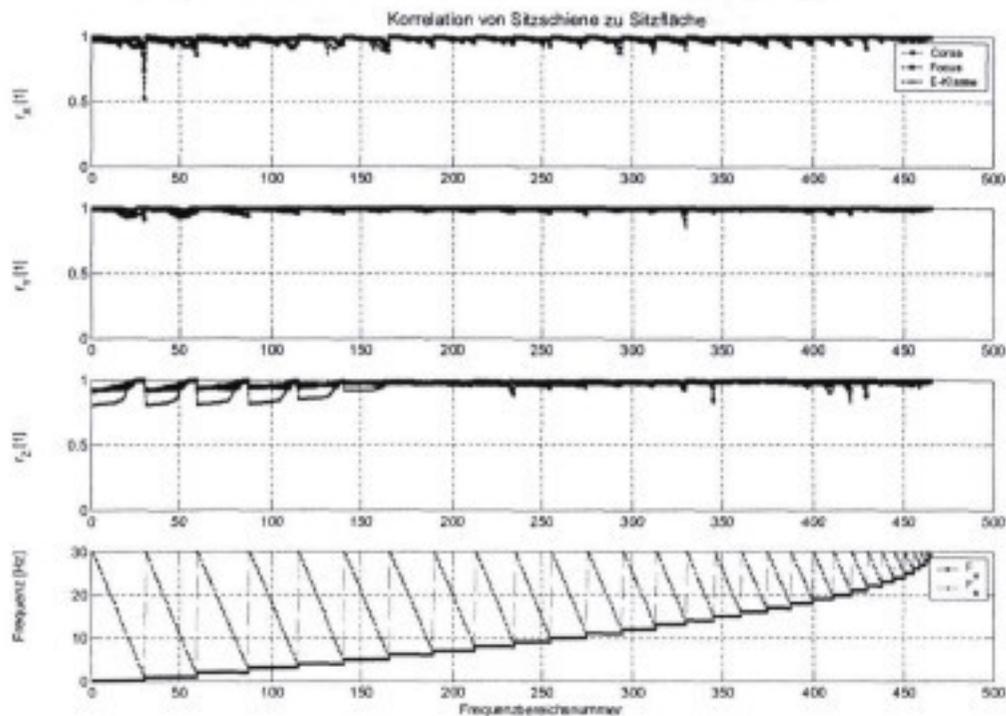


Abbildung 8.4 : Korrelation der Messstellen zueinander, Sitzschiene/Sitzfläche, Pkw

Bei der Korrelation der Sitzschiene mit der Lehnenfläche fallen zum einen die durchgehend hohen Werte in z-Richtung auf, die durch die in dieser Richtung steifen Rahmenkonstruktion und Lehnenflächenbespannung erklärt werden können, zum anderen die zum Teil sehr niedrigen Werte in x-Richtung. In dieser Richtung ist die Lehne am flexibelsten und wird durch die z-Anregungen und durch das Nicken zusätzlich angeregt. Der E-Klasse-Sitz weist hier gerade im höheren Frequenzbereich die größten Streuungen im Übertragungsverhalten auf.

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Korrelation von Sitzfläche mit Lehnenfläche, da die Sitzfläche mit der Sitzschiene hoch korreliert ist.

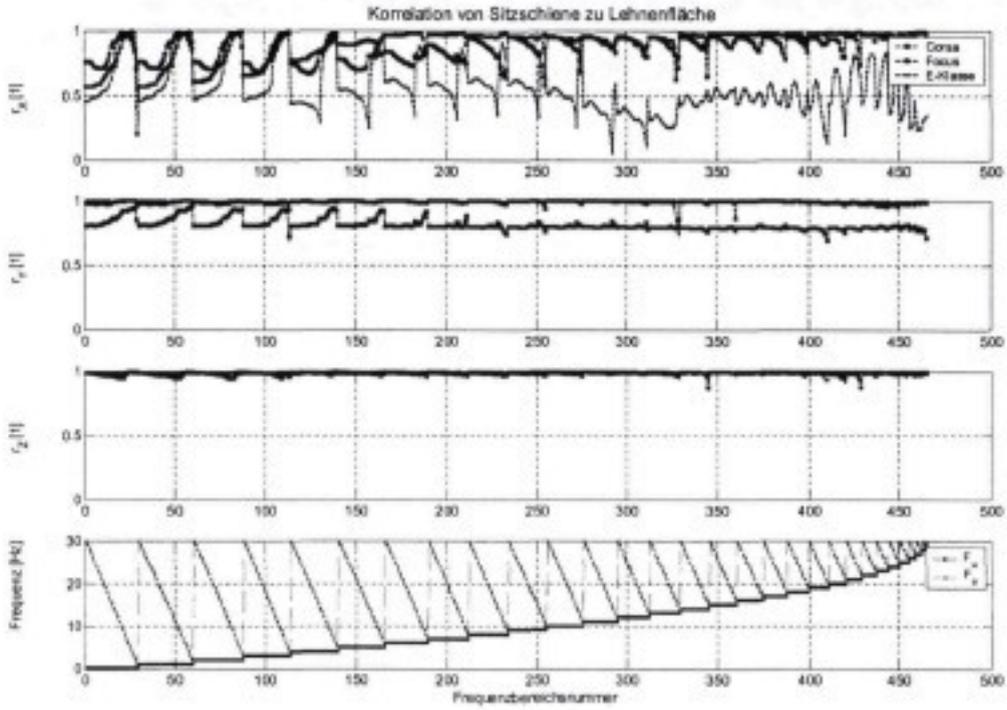


Abbildung 8.5 : Korrelation der Messstellen zueinander, Sitzschiene/Lehnenfläche, Pkw

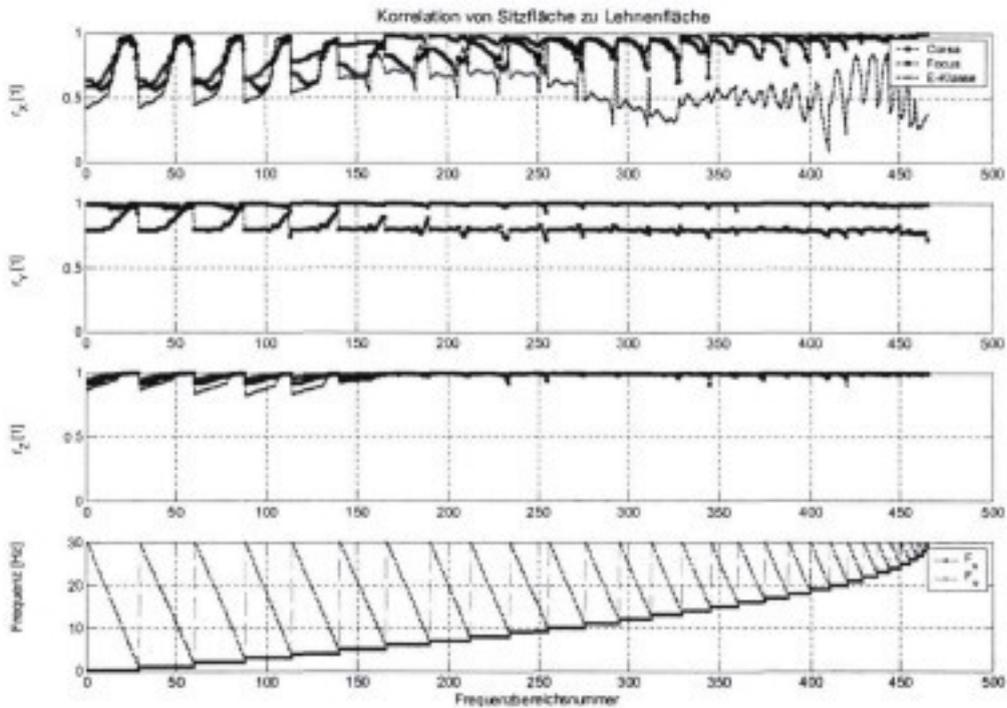


Abbildung 8.6 : Korrelation der Messstellen zueinander, Sitzfläche/Lehnenfläche, Pkw

8.2.2 Korrelation der Kennparameter mit den Subjektivnoten aus Fragebogen 1

Im Folgenden werden die Korrelationen der Kennparameter mit den Subjektivnoten für das globale Schwingungsdiskomfortempfinden aus Fragebogen 1 untersucht.

In Abbildung 8.7 bis Abbildung 8.10 sind für die Messstellen Sitzschiene, Sitzfläche und –lehne jeweils für alle drei Fahrzeuge und translatorischen Richtungen die Korrelationen der Beschleunigungseffektivwerte mit den Subjektivnoten dargestellt. Die Korrelation erfolgt für jeden Frequenzbereich über die fünf Strecken. Statistisch signifikant auf dem 5%-Niveau sind dabei Korrelationsmaße betragsmäßig größer als 0,87. Die Fahrzeuge weisen einen sehr ähnlichen Verlauf der Korrelationskoeffizienten über dem Frequenzbereich auf, was darauf schließen lässt, dass für jedes Fahrzeug die gleichen Bewertungskriterien angelegt wurden. Bei allen Messstellen und Richtungen liegen die Korrelationen für die Frequenzbereiche am höchsten, bei denen die obere Frequenzgrenze um 15 Hz liegt und die untere Frequenzgrenze unterhalb von 5 Hz. Gleichzeitig sind die Korrelationen für Frequenzbereiche, die hauptsächlich den oberen Frequenzbereich abdecken, sehr niedrig und häufig auch nicht mehr signifikant - d.h. nur zufällig von Null verschieden.

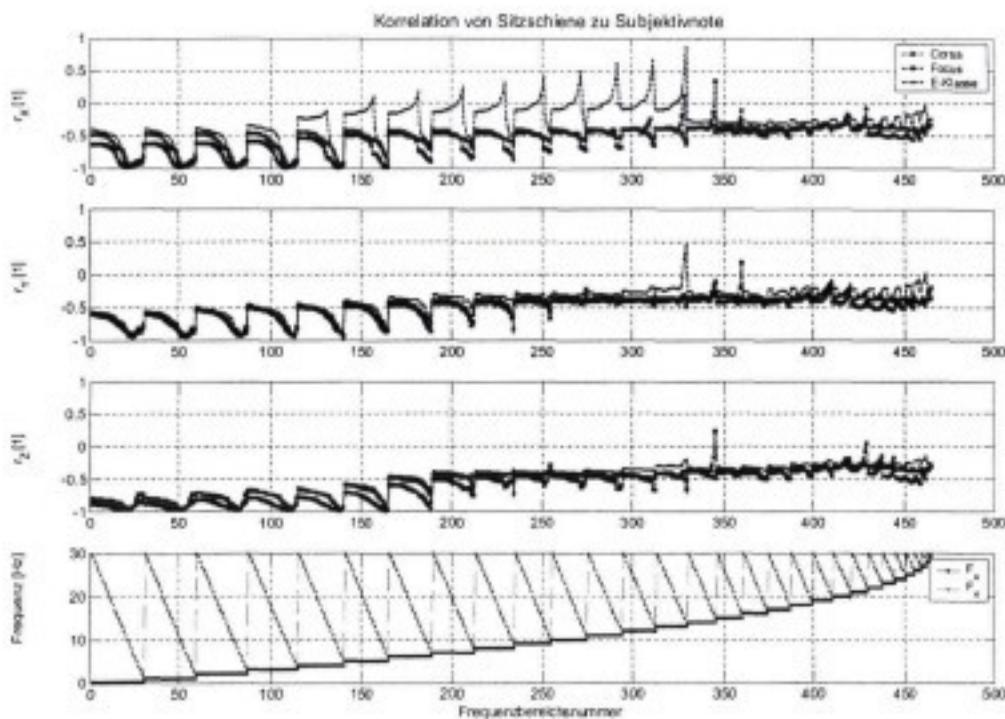


Abbildung 8.7 : Korrelation der Subjektivnoten (Männer) mit den Beschleunigungseffektivwerten an der Sitzschiene, getrennt nach Fahrzeugen

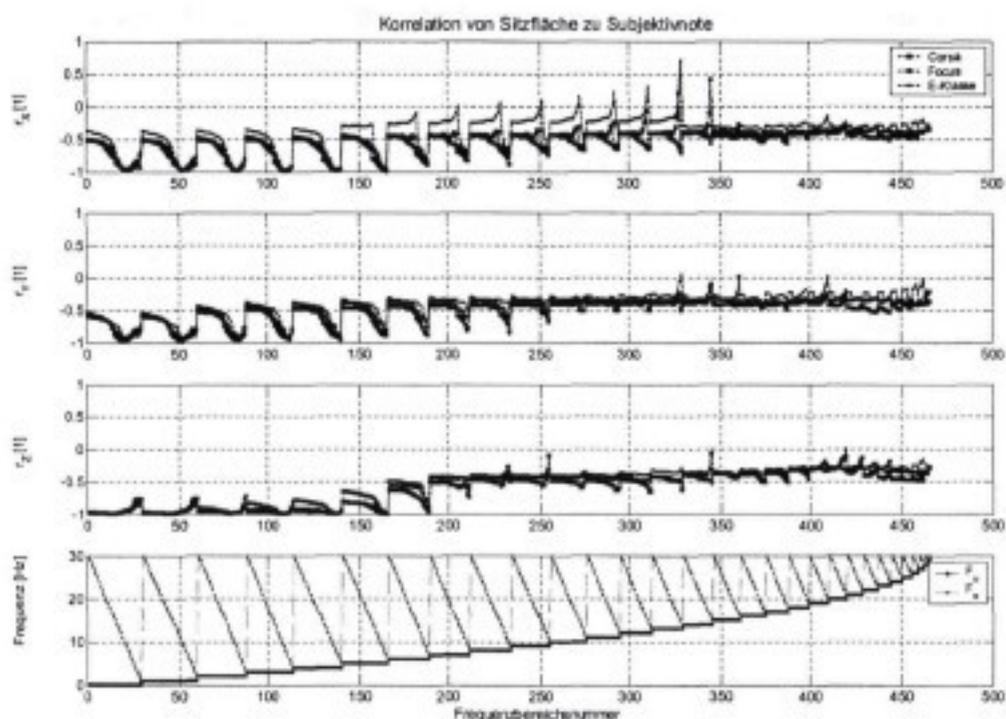


Abbildung 8.8 : Korrelation der Subjektivnoten (Männer) mit den Beschleunigungseffektivwerten an der Sitzfläche, getrennt nach Fahrzeugen

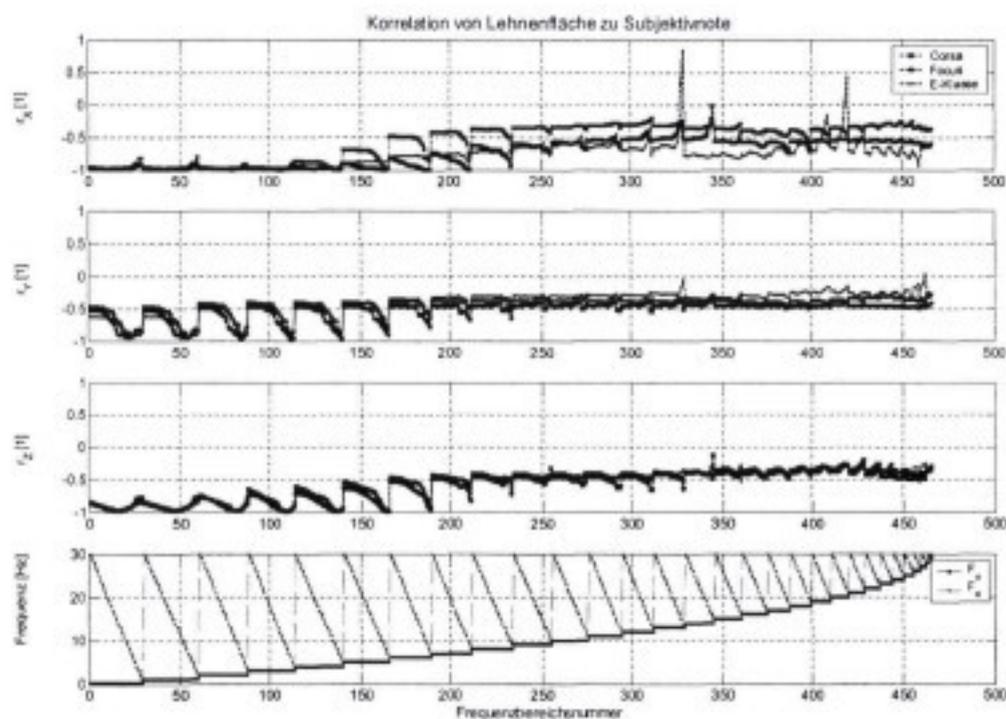


Abbildung 8.9 : Korrelation der Subjektivnoten (Männer) mit den Beschleunigungseffektivwerten an der Lehnenfläche, getrennt nach Fahrzeugen

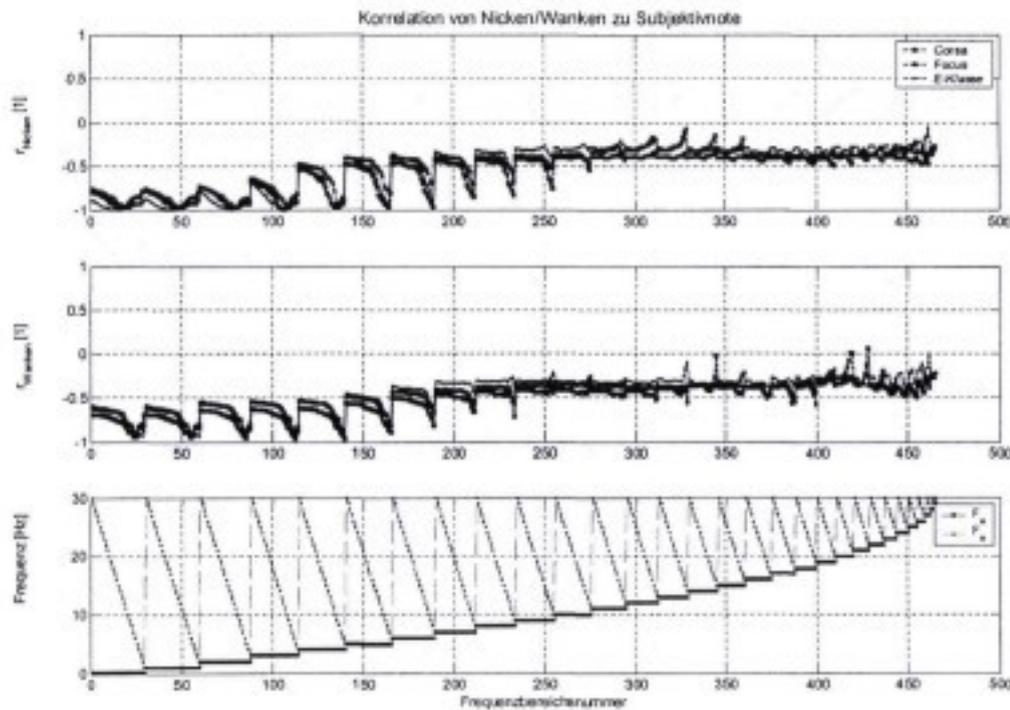


Abbildung 8.10 : Korrelation der Subjektivnoten (Männer) mit den Beschleunigungseffektivwerten der Nick- und Wankbeschleunigung, getrennt nach Fahrzeugen

Im Gegensatz zu den vorhergehenden Korrelationen sind die in Abbildung 8.11 bis Abbildung 8.13 nun nicht für jedes Fahrzeug einzeln gebildet (5 Ereignisse), sondern über alle Fahrzeuge und Strecken (15 Ereignisse). Hierbei werden aber nur noch die Messstellen betrachtet, die einen direkten Kontakt zum Insassen haben. Die Sitzschienenbeschleunigung ist kein Parameter, der sich für ein Komfortmodell eignet, da die Sitzeigenschaften nicht berücksichtigt werden. Da sich bei der Betrachtung des gesamten Ereignisraumes ein gleiches Ergebnis wie bei der Einzelfahrzeugbetrachtung ergibt, folgt daraus, dass nicht nur für jedes Fahrzeug die gleichen Parameter einen linearen Einfluss auf den Schwingungsdiskomfort haben, sondern auch, dass dieser Zusammenhang im Wesentlichen jeweils der gleiche ist. Da sich die Anzahl der Freiheitsgrade für die Korrelation hier von 5 Ereignissen auf 15 erhöht hat, liegt die Signifikanzgrenze auf dem 5%-Niveau bei -0,514.

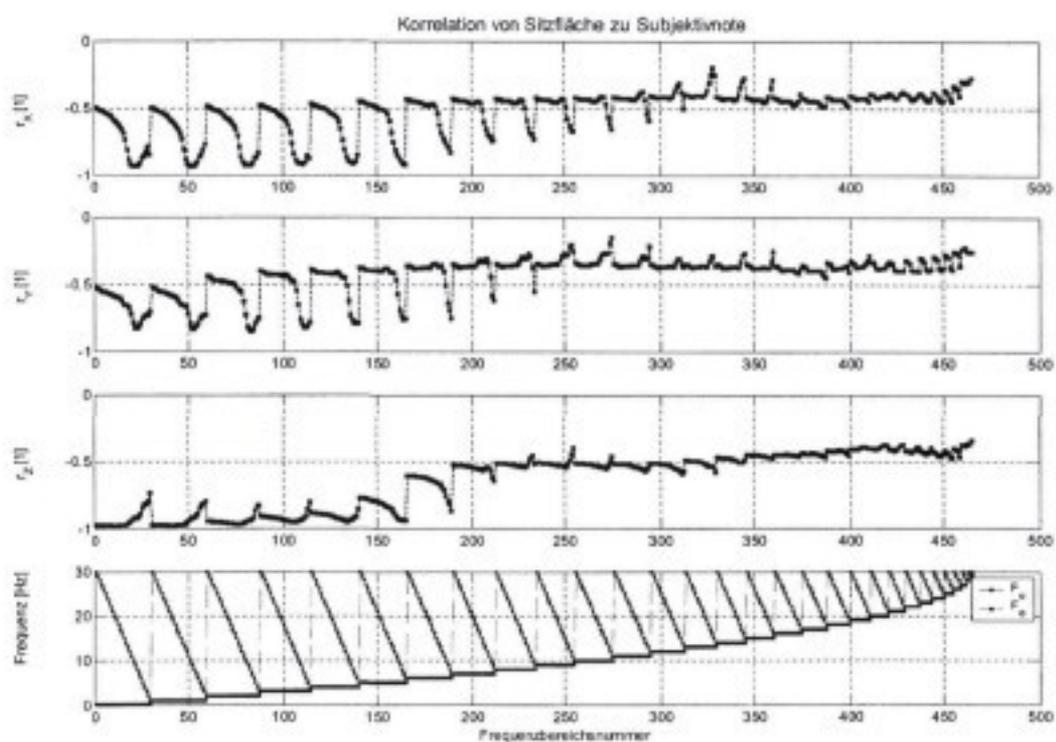


Abbildung 8.11 : Korrelation der Subjektivnoten (Männer) mit den Beschleunigungseffektivwerten der Sitzfläche, über alle 15 Ereignisse (5 Strecken x 3 Fahrzeuge)

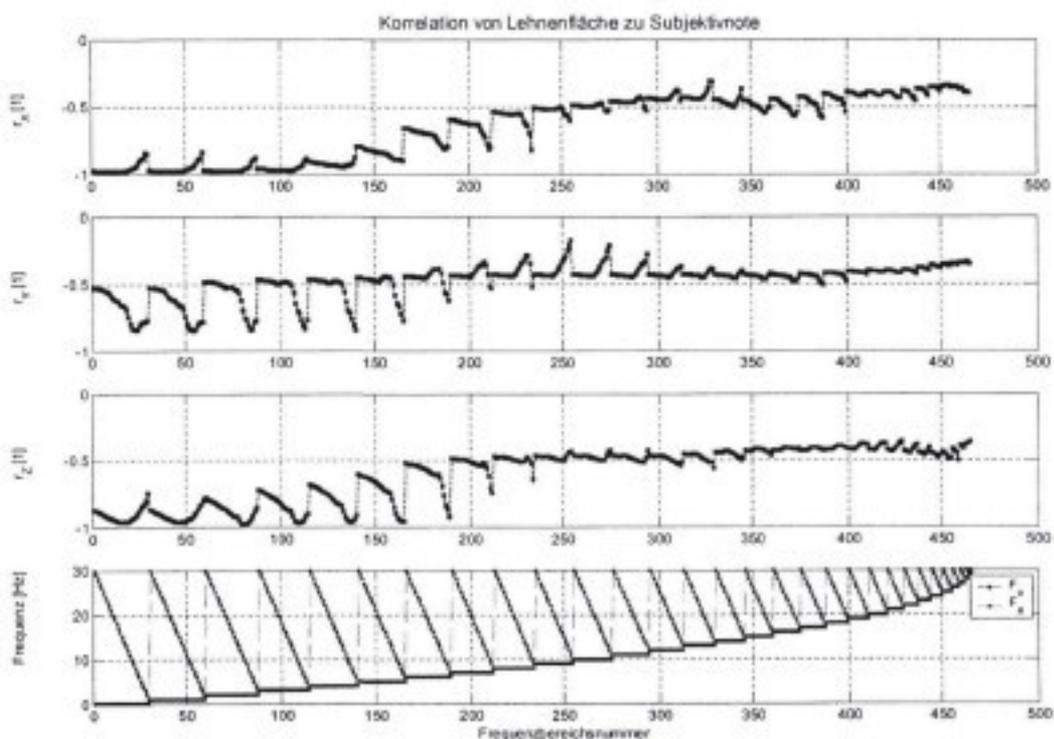


Abbildung 8.12 : Korrelation der Subjektivnoten (Männer) mit den Beschleunigungseffektivwerten der Lehnenfläche, über alle 15 Ereignisse (5 Strecken x 3 Fahrzeuge)

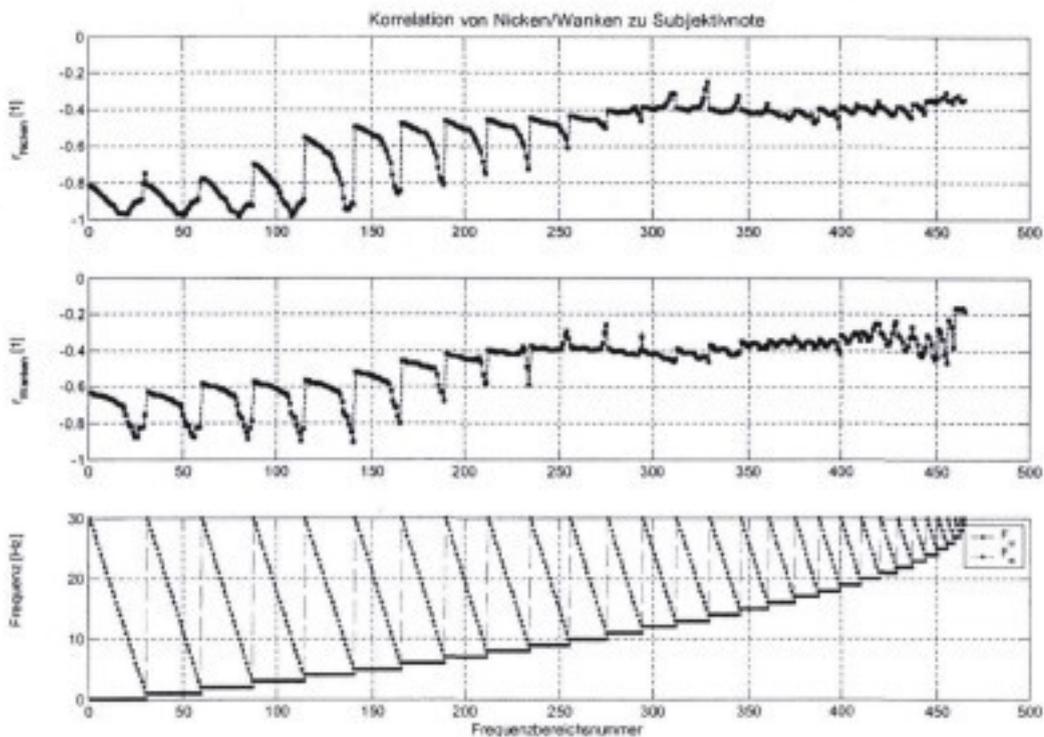


Abbildung 8.13 : Korrelation der Subjektivnoten (Männer) mit den Beschleunigungseffektivwerten der Nick- und Wankbeschleunigung, über alle 15 Ereignisse (5 Strecken x 3 Fahrzeuge)

Unter Punkt „Partielle Korrelation“ wurde schon auf die mögliche Beeinflussung des Korrelationsmaßes von mehreren Kennparametern mit der Zielgröße durch die Abhängigkeit untereinander hingewiesen. Wie die dargestellten Korrelationen der Kennparameter untereinander zeigen, liegt eine solche Abhängigkeit oft in hohem Maße vor. Ebenfalls stellt sich die Frage, wenn man sich z.B. bei Korrelation der Sitzfläche z-Richtung zur Subjektivnote die ersten 15 Frequenzbereiche anschaut, welcher tatsächlich relevant ist. Der Frequenzbereich von 0,1-30 Hz z.B. weist fast die gleiche Korrelation wie der Frequenzbereich von 2-15 Hz auf, der im ersten Bereich enthalten ist. Zur Untersuchung dieser Zusammenhänge wird im Weiteren die partielle Korrelation angewandt.

Da die z-Richtung bezüglich der physikalischen Anregungsstärke sowie für das Subjektivempfinden im Allgemeinen die dominante Anregungsrichtung ist und dies, wie auch in Abbildung 7.25 und Abbildung 7.26 dargestellt, von den Probanden bei diesen Versuchen durch eigene Aussage bestätigt wurde, wird der Einfluss der Beschleunigungseffektivwerte dieser Anregungsrichtung auf die Korrelation der Beschleunigungseffektivwerte anderer Anregungsrichtung mit den Subjektivnoten durch Auspartialisierung untersucht.

Diese Auspartialisierung kann bei Bedarf auch auf mehrere Partialisierungsparameter ausgeweitet werden.

In Abbildung 8.14 bis Abbildung 8.16 sind die partiellen, um den Einfluss von der Sitzfläche in z-Richtung (SF_z) bereinigten, Korrelationskoeffizienten der Beschleunigungseffektivwerte mit den Subjektivnoten dargestellt. Diese Bereinigung erfolgte jeweils innerhalb eines Frequenzbereiches. In den einzelnen Diagrammen sind jeweils die einfachen Korrelationsmaße nach Pearson dargestellt sowie im Vergleich dazu die partiellen Korrelationskoeffizienten. Weiterhin sind die Signifikanzgrenzen für die Korrelationskoeffizienten auf dem 1%- und 5%-Niveau eingezeichnet. Alle

Korrelationskoeffizienten, die betragsmäßig oberhalb dieser Grenzen liegen, sind mit 95%- oder 99%iger Sicherheit nicht zufällig von Null verschieden. Bei Korrelationskoeffizienten, die betragsmäßig unterhalb dieser Grenzen liegen, kann nicht davon ausgegangen werden, dass dieser Wert nicht zufällig ist. Sie dürfen daher nicht weiter berücksichtigt werden.

In den Fällen, in denen der partielle Korrelationskoeffizient das Vorzeichen wechselt, d.h. in diesem Fall ein positives Vorzeichen hat, ist die Korrelation des untersuchten Parameters zum auspartialisierten Parameter, der Sitzfläche in z-Richtung, größer als zur Subjektivnote. Dies bedeutet, dass auch diese Parameter keinen Erklärungsbeitrag liefern und für ein Regressionsmodell nicht in Betracht kommen.

Bei den Partialkorrelationskoeffizienten der Sitzfläche erkennt man fast durchgängig eine starke Abnahme des Korrelationsmaßes durch die Bereinigung des Einflusses der Sitzfläche in z-Richtung. Dies bedeutet, dass der tatsächliche Zusammenhang mit dem Subjektivurteil bei weitem nicht so stark ist, wie es der einfache Korrelationskoeffizient vermuten lässt.

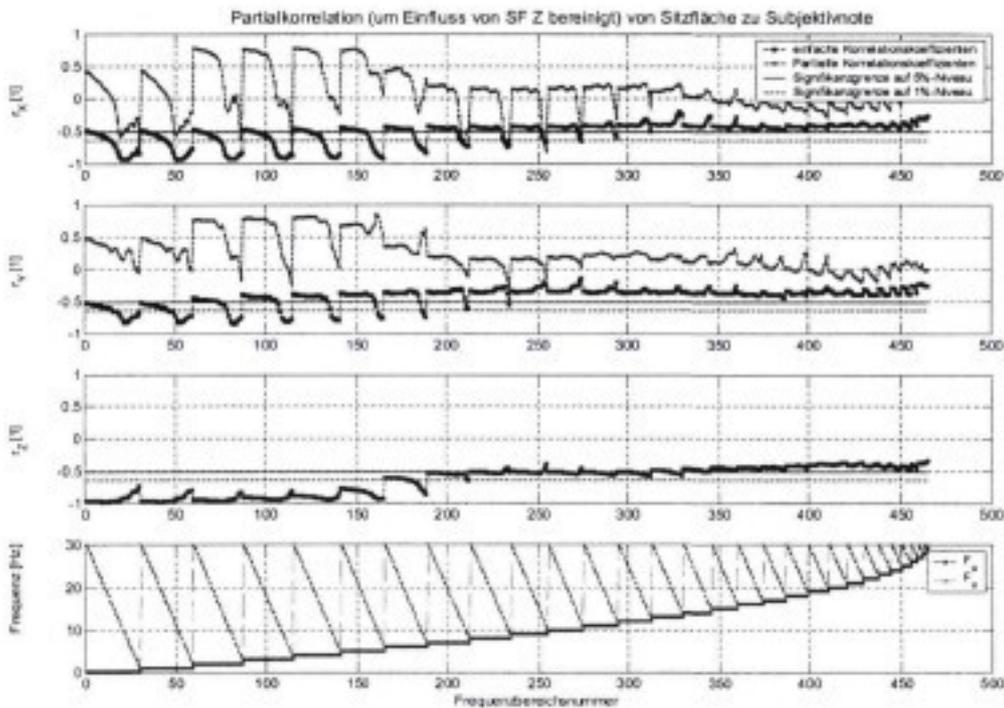


Abbildung 8.14 : Partialkorrelation (um Einfluss von SF_z bereinigt) von Sitzfläche zu Subjektivnote

Weitgehend unbeeinflusst bleiben einige Frequenzbereiche zwischen Frequenzbereichsummer 200 und 300. Diese Beschleunigungseffektivwerte korrelieren unabhängig von der z-Richtung in diesem Maße mit den Subjektivnoten.

In y-Richtung auf der Sitzfläche ergeben sich nach der Partialisierung keine signifikanten Korrelationen mehr.

An der Lehnenfläche ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Partialkorrelationskoeffizienten weisen eine starke Abnahme gegenüber den einfachen Korrelationskoeffizienten auf. In y-Richtung ergeben sich ebenfalls keine signifikanten Partialkorrelationen mehr.

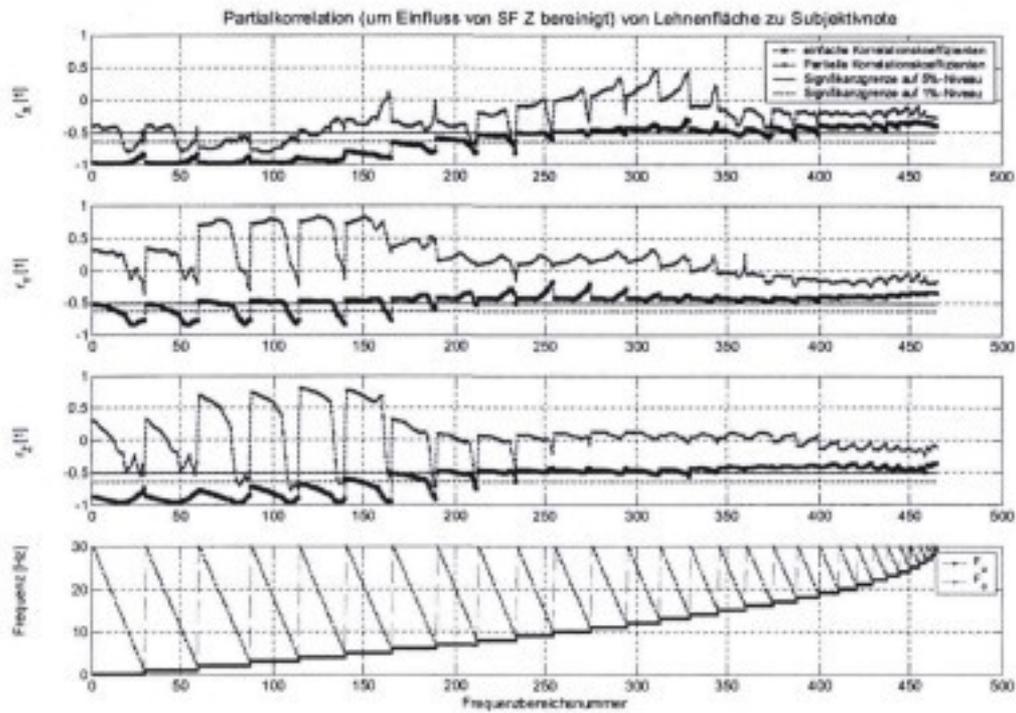


Abbildung 8.15 : Partialkorrelation (um Einfluss von SF_Z bereinigt) von Lehnenfläche zu Subjektivnote

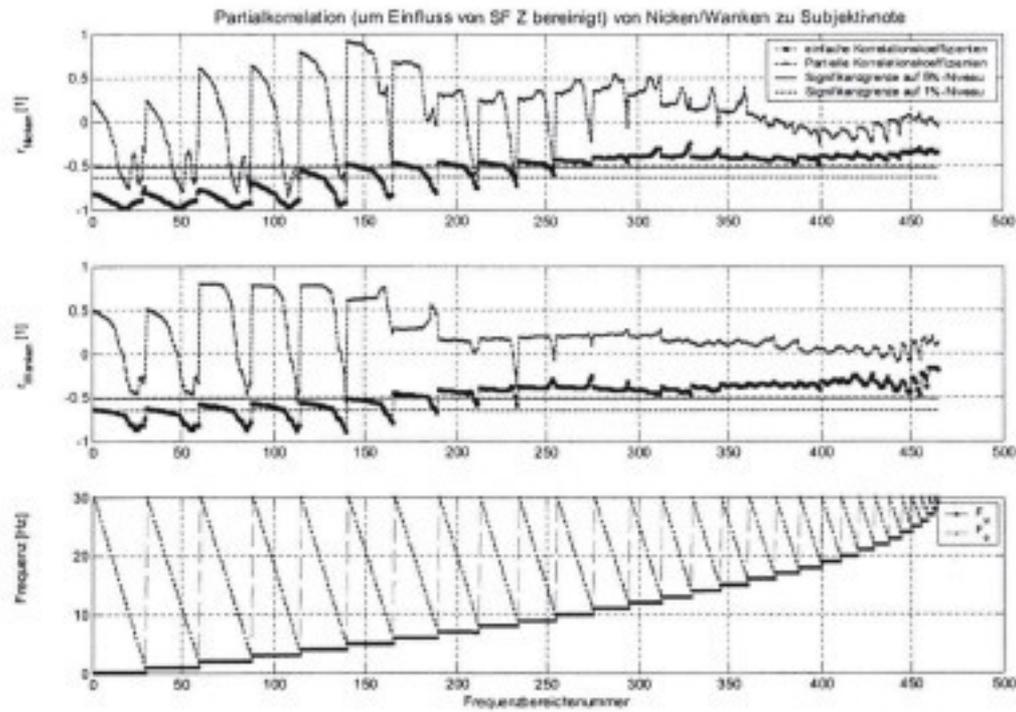


Abbildung 8.16 : Partialkorrelation (um Einfluss von SF_Z bereinigt) von Nicken/Wanken zu Subjektivnote

Analog zur y-Richtung an der Lehnenfläche (LF) ergeben sich auch für die Wankbeschleunigungen keine signifikanten Partialkorrelationskoeffizienten. Für die Nickbeschleunigungen hingegen bleiben eine Reihe von Frequenzbereiche signifikant, wenngleich auf niedrigerem Niveau. Die verbleibenden Frequenzbereiche für jede Messstelle und -richtung, bei denen signifikante Partialkorrelationen vorliegen, bilden im Wesentlichen die Basis für die Regressionsanalyse.

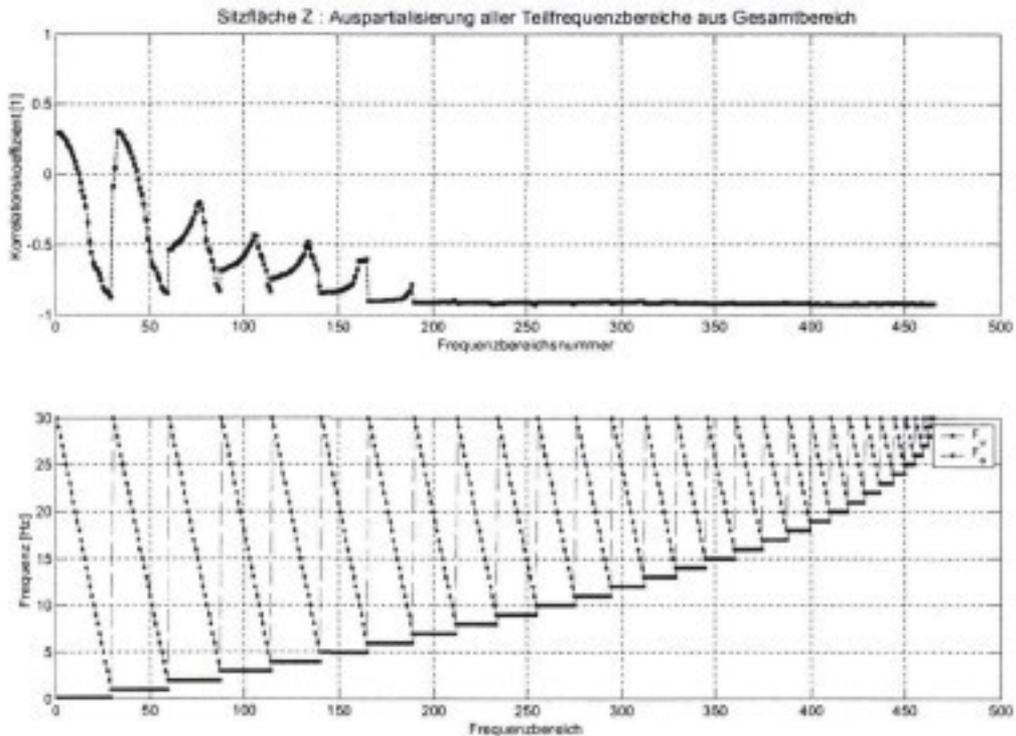


Abbildung 8.17 : Partialkorrelation von SF_Z 0,1-30 Hz zur Subjektivnote um jeden einzelnen Teilfrequenzbereich von SF_Z bereinigt

Wie bereits oben angesprochen, stellt sich auch innerhalb einer Anregungsrichtung zum Teil die Frage, wenn mehrere Frequenzbereiche fast die gleiche Korrelation aufweisen und diese Frequenzbereiche zum Teil ineinander liegen, welcher tatsächlich relevant ist. Bei der Hauptanregung in z-Richtung ist dies in Abbildung 8.11 und Abbildung 8.14 im vorderen Bereich der Frequenzbereiche zu erkennen. Der Frequenzbereich von 0,1-30 Hz weist z.B. fast die gleiche Korrelation wie der Frequenzbereich von 2-15 Hz auf, der im ersten Bereich enthalten ist. Um den tatsächlich relevanten Bereich zu ermitteln kann auch hier die partielle Korrelation angewandt werden. Dazu sind in Abbildung 8.17 die partiellen Korrelationskoeffizienten des Beschleunigungseffektivwertes im Bereich von 0,1-30 Hz zur Subjektivnote, jeweils bereinigt um den Einfluss des auf der Abszisse aufgetragenen Teilfrequenzbereiches der gleichen Messstelle, dargestellt. Damit kann der Teilfrequenzbereich ermittelt werden, der innerhalb des gesamten Frequenzbereiches (0,1-30 Hz) den größten Einfluss auf dessen Korrelation zur Subjektivnote hat. Der Teilfrequenzbereich mit dem größten Einfluss erzeugt dabei den betragsmäßig geringsten negativen partiellen Korrelationskoeffizient. Dies ist, wie in Abbildung 8.17 ersichtlich, der Frequenzbereich 44, der den Bereich von 1-17 Hz abdeckt. Frequenzbereiche, die nur den oberen Teil abdecken, ab etwa Frequenzbereichsnummer 200, dagegen liefern kaum einen Betrag zur Erklärung der Korrelationskoeffizienten des Gesamtfrequenzbereiches. Dies ist am durchgehend hohen nahe bei Eins liegenden Partialkorrelationskoeffizienten erkennbar.

8.2.3 Regression, Kennparameter – Subjektivnoten Fragebogen 1

Auf Basis der Partiiellen Korrelationsanalyse wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt. Aufbauend auf dem Parameter „Beschleunigungseffektivwert Sitzfläche in z-Richtung 1-17 Hz (SF_z 1-17 Hz)“ wurden versucht, das Regressionsmodell schrittweise um andere Frequenzbereiche und Richtungen zu erweitern. Aufgrund der bereits sehr hohen Korrelation des Parameters SF_z 1-17 Hz mit den Subjektivnoten und der hohen Korrelation der Effektivwerte untereinander ist eine Verbesserung oder überhaupt ein gültiges Modell nur mit wenigen zusätzlichen Parametern möglich. Wie bereits die Partielle Korrelation gezeigt hat, ergeben sich bei der y-Richtung keine signifikanten Korrelationsmaße mehr. Eine Hinzunahme ungeachtet dessen führt zwar zu mathematische gültigen, aber physikalisch unlogischen Modellen (Vorzeichenwechsel innerhalb der Regressionsformel = Zunahme der Beschleunigung bewirkt bessere Komfortnote). Gleiches gilt für die Wankbewegung. Dies bedeutet grundsätzlich nicht, dass die Wank- und y-Beschleunigung keinen Einfluss auf das subjektive Empfinden hat. Jedoch steht die z- Beschleunigung bei den durchgeführten Versuchen in den relevanten Frequenzbereichen in zu hoher Korrelation zu diesen Richtungen, so dass hier kein zusätzlicher Erklärungsgehalt gefunden werden kann.

In Tabelle 8.1 und Tabelle 8.2 sind die Regressionsmodelle mit den besten Bestimmtheitsgraden getrennt für die Männer und Frauen aufgeführt. Zusätzlich sind noch einige Modelle mit aufgeführt, um den Einfluss der Hinzunahme von einigen Parametern zu verdeutlichen. In der Spalte „Parameter“ sind die Beschleunigungseffektivwerte aufgeführt, die jeweils in das Modell eingehen, in den weiteren Spalten das Bestimmtheitsmaß R^2 (s. Gl. 8.12) und das bereinigte Bestimmtheitsmaß R^2 (s. Gl. 8.13).

Modell-Nr	Parameter (Beschleunigungseffektivwert)			R^2	R^2
1	SF_z 1-17 Hz			0,953	0,949
2	SF_z 1-17 Hz	SF_x 10-11 Hz		0,955	0,948
3	SF_z 1-17 Hz	SF_x 10-11 Hz	LF_x 2-4 Hz	0,957	0,945
4	SF_z 1-17 Hz		LF_x 2-4 Hz	0,953	0,945
5	SF_z 1-17 Hz		LF_x 5-9 Hz	0,962	0,957
6	SF_z 1-17 Hz	SF_x 10-11 Hz	LF_x 5-9 Hz	0,965	0,955
7	SF_z 1-17 Hz	SF_x 10-11 Hz	Nicken 2-4 Hz	0,978	0,972

Tabelle 8.1 : Regressionsmodelle, Fahrversuch Pkw, Männer

Bereits das einfachste Regressionsmodell Nr. 1 mit nur einem Parameter erzielt ein bereinigtes Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,949$ und ist damit gut geeignet das Subjektive Empfinden der Versuchspersonen bei diesen Fahrversuchen abzubilden.

Bei einer Hinzunahme der Beschleunigung an der Sitzfläche in x-Richtung (SF_x) ergibt der Effektivwert im Frequenzbereich von 10-11 Hz das höchste Regressionsmaß. Das Bereinigte Bestimmtheitsmaß sinkt durch die höhere Parameterzahl leicht ab. Mit der Hinzunahme des Effektivwertes der Nickbeschleunigung im Frequenzbereich von 2- 4 Hz (Modell 7) ergibt sich das höchste Bestimmtheitsmaß R^2 sowie das bereinigte

Bestimmtheitsmaß R^2 . Der Parameter Nicken lässt sich jedoch mit einem Dummy nicht auf dem Sitz messen. Für den praktischen Einsatz wären zusätzliche Beschleunigungsaufnehmer an der Sitzschiene notwendig, was einen erheblichen Mehraufwand bei der Versuchsdurchführung bedeuten würde. Aus diesem Grund wurde versucht, den Parameter Nicken 2-4 Hz durch die Beschleunigung in x-Richtung an der Lehne (LF_x) im gleichen Frequenzbereich zu ersetzen (Modell 3). Dies führt allerdings zu einem verringerten (bereinigten) Bestimmtheitsmaß. Bei Verwendung des Parameters LF_x führt der Frequenzbereich von 5-9 Hz zu einem besseren Ergebnis. Dabei kann auf den Parameter SF_x zugunsten eines höheren Bereinigten Bestimmtheitsmaßes verzichtet werden (Modell 5).

Für die Frauen ergeben sich im Wesentlichen die gleichen Modelle, jedoch mit etwas geringeren (bereinigten) Bestimmtheitsmaßen. Das beste Ergebnis mit den Parametern SF_z und LF_x liefert jedoch für LF_x ein Frequenzbereich von 10-11 Hz (Modell 7).

Modell-Nr	Parameter (Beschleunigungseffektivwert)			R^2	R^2
1	SF _z 1-17 Hz			0,911	0,904
2	SF _z 1-17 Hz	SF _x 10-11 Hz		0,931	0,92
3	SF _z 1-17 Hz	SF _x 10-11 Hz	LF _x 2-4 Hz	0,944	0,928
4	SF _z 1-17 Hz		LF _x 2-4 Hz	0,912	0,897
5	SF _z 1-17 Hz		LF _x 5-9 Hz	0,918	0,904
6	SF _z 1-17 Hz	SF _x 10-11 Hz	LF _x 5-9 Hz	0,933	0,915
7	SF _z 1-17 Hz		LF _x 10-11 Hz	0,943	0,933
8	SF _z 1-17 Hz	SF _x 10-11 Hz	Nicken 2-4 Hz	0,974	0,967

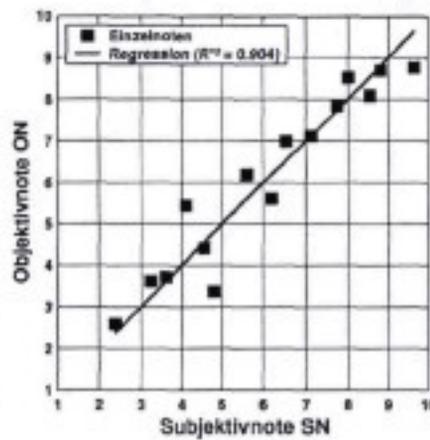
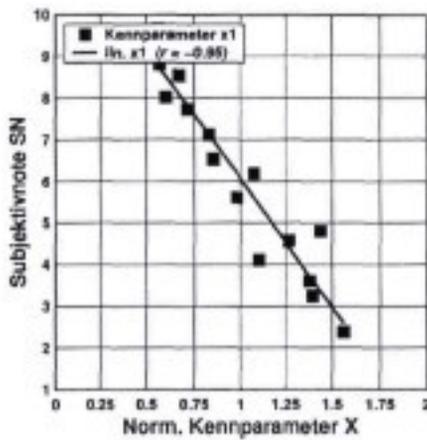
Tabelle 8.2 : Regressionsmodelle, Fahrversuch Pkw, Frauen

Im Folgenden sind die besten Regressionsmodelle für die Männer und Frauen mit ihren Gleichungen und Gültigkeitsbereichen dargestellt. Die Gleichungen sind dabei in auf die Höchstnote 10 normierter Form angegeben. Das bedeutet, dass sich bei Parameterwerten von Null die Höchstnote 10 ergibt. Zusätzlich sind die Messgrößen auf den jeweils kleinsten Wert, also die untere Grenze des Geltungsbereiches bezogen. Dadurch ist besser erkennbar, dass die Anwendung der Regressionsgleichung nur in dem durch die Stichprobe festgelegten Wertebereich erlaubt ist. Die Gültigkeitsbereiche sind für jeden Parameter angegeben. Über diesen Bereich hinaus darf nicht extrapoliert werden.

In den aufgestellten Beziehungen besitzen alle Koeffizienten ein negatives Vorzeichen, das heißt, die Benotung verringert sich (das Diskomfortempfinden steigt) mit zunehmenden Beschleunigungseffektivwerten. Um die Zusammenhänge anschaulich sichtbar zu machen, sind diese in den folgenden Abbildungen grafisch dargestellt. Im jeweils linken Diagramm sind die Korrelationen der Einzelparameter zur Subjektivnote dargestellt. Dabei ist auf der Abszisse der normierte Kennparameter aufgetragen und auf der Ordinate die Subjektivnoten. Die Normierung des Kennparameters dient hier nur der grafischen Darstellung der Korrelationen in einem Diagramm. Da die Parameter in verschiedenen Größenordnungen liegen, wäre ohne diese Transformation eine Darstellung in einem Diagramm nur schlecht möglich. Die Normierung erfolgt dergestalt nach Gl. 8.15, dass der Mittelwert eines jeden Parameters auf Eins liegt und die Spreizung entsprechend angepasst wird.

$$x_{\text{norm}} = \frac{x - \bar{x}}{x_{\text{max}} - x_{\text{min}}} + 1 \quad \text{Gl. 8.15}$$

Im rechten Diagramm sind die nach der Regressionsgleichung berechneten Objektivnoten über den zugehörigen Subjektivnoten aufgetragen. Die Streuung um die eingezeichnete Einheitsgerade kennzeichnet den verbleibenden Modellfehler.



Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 : SF_2 1-17 Hz / m/s^2

Einzelkorrelation r:

	SN	x_1
SN	1	-0.95
x_1	-0.95	1

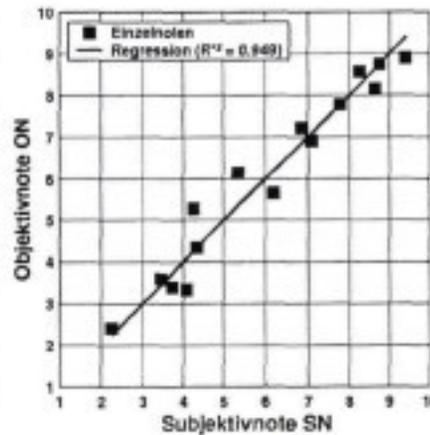
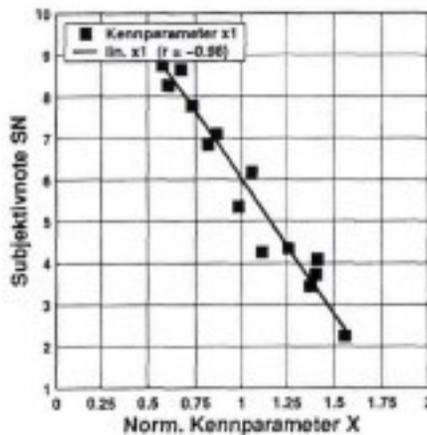
Objektivierung: $R^2 = 0.904$

ON = 10

$$= \frac{1.3063 \cdot x_1 - 0.015353}{0.22802}$$

Geltungsbereich:
 x_1 : $1 < x_1 / 0.228 < 5.7205$

Abbildung 8.18 : Regressionsmodell 1, Fahrversuch Pkw, Frauen



Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 : SF_2 1-17 Hz / m/s^2

Einzelkorrelation r:

	SN	x_1
SN	1	-0.98
x_1	-0.98	1

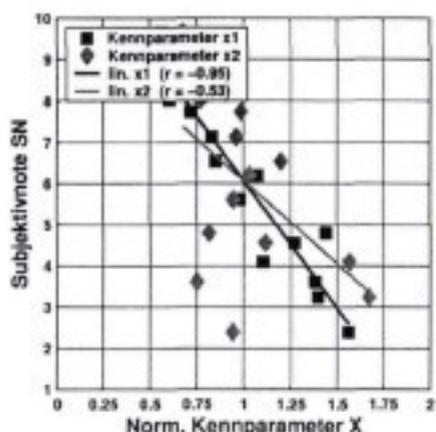
Objektivierung: $R^2 = 0.949$

ON = 10

$$= \frac{1.3209 \cdot x_1 - 0.047563}{0.2222}$$

Geltungsbereich:
 x_1 : $1 < x_1 / 0.2222 < 5.9042$

Abbildung 8.19 : Regressionsmodell 1, Fahrversuch Pkw, Männer

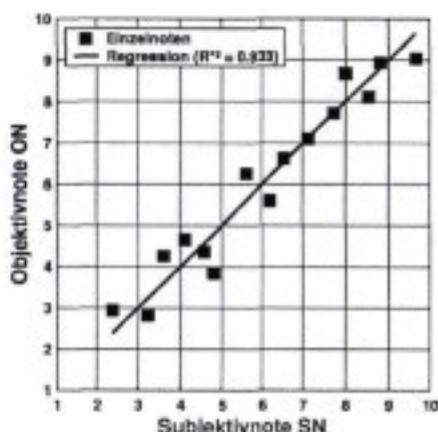


Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 : SF_z 1-17 Hz / m/s^2
 x_2 : L_x 10-11 Hz / m/s^2

Einzelkorrelationen r:

	SN	x_1	x_2
SN	1	-0.95	-0.53
x_1	-0.95	1	0.38
x_2	-0.53	0.38	1



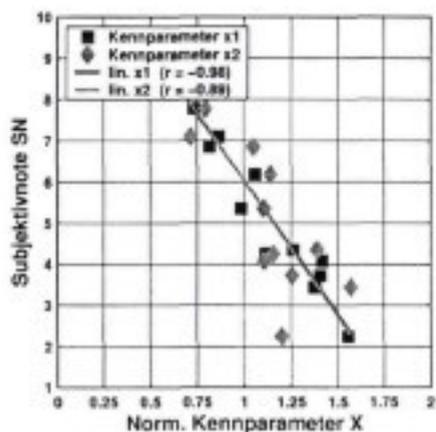
Objektivierung: $R^2 = 0.933$

ON = 10

$$= \frac{1.2065 \cdot x_1 - 0.096258}{0.22802} - \frac{0.18122 \cdot x_2}{0.025291}$$

Geltungsbereich:
 x_1 : $1 < x_1 / 0.228 < 5.7205$
 x_2 : $1 < x_2 / 0.0253 < 9.1405$

Abbildung 8.20 : Regressionsmodell 7, Fahrversuch Pkw, Frauen

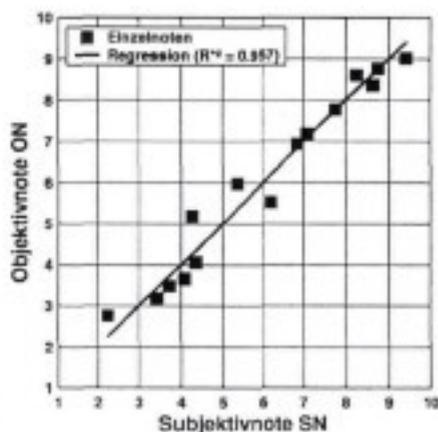


Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 : SF_z 1-17 Hz / m/s^2
 x_2 : L_x 5-9 Hz / m/s^2

Einzelkorrelationen r:

	SN	x_1	x_2
SN	1	-0.98	-0.89
x_1	-0.98	1	0.86
x_2	-0.89	0.86	1



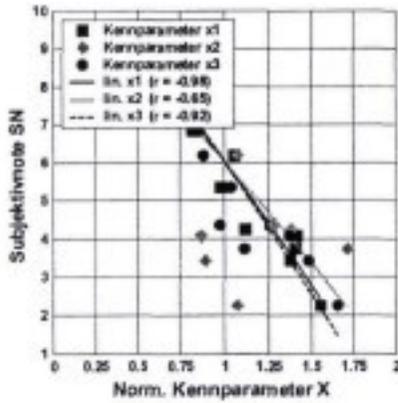
Objektivierung: $R^2 = 0.957$

ON = 10

$$= \frac{1.0873 \cdot x_1 - 0.037896}{0.2222} - \frac{0.066323 \cdot x_2}{0.022052}$$

Geltungsbereich:
 x_1 : $1 < x_1 / 0.2222 < 5.9042$
 x_2 : $1 < x_2 / 0.0221 < 23.1822$

Abbildung 8.21 : Regressionsmodell 5, Fahrversuch Pkw, Männer

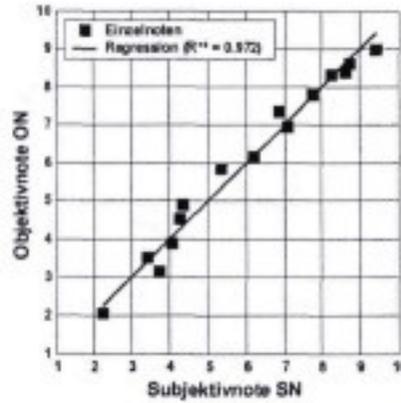


Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 - SF_z 1-17 Hz / m/s^2
 x_2 - SF_z 10-11 Hz / m/s^2
 x_3 - Nicken 2-4 Hz / rad/s^2

Einzelkorrelationen r:

	SN	x_1	x_2	x_3
SN	1	-0.98	-0.65	-0.92
x_1	-0.98	1	0.63	0.91
x_2	-0.65	0.63	1	0.34
x_3	-0.92	0.91	0.34	1



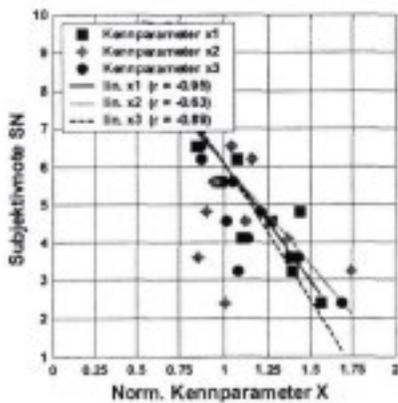
Objektivierung: $R^2 = 0.972$

ON = 10

$$= \frac{0.53331 \cdot x_1 + 0.0089538}{0.2222} - \frac{0.071965 \cdot x_2}{0.0049992} - \frac{0.3816 \cdot x_3}{0.080648}$$

Geltungsbereich:
 x_1 : $1 < x_1 / 0.2222 < 5.9042$
 x_2 : $1 < x_2 / 0.005 < 28.4162$
 x_3 : $1 < x_3 / 0.0806 < 10.4134$

Abbildung 8.22 : Regressionsmodell 7, Fahrversuch Pkw, Männer

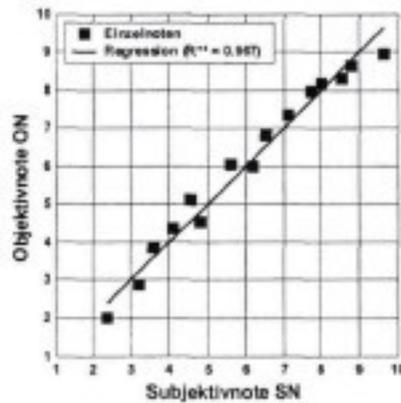


Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 - SF_z 1-17 Hz / m/s^2
 x_2 - SF_z 10-11 Hz / m/s^2
 x_3 - Nicken 2-4 Hz / rad/s^2

Einzelkorrelationen r:

	SN	x_1	x_2	x_3
SN	1	-0.95	-0.63	-0.89
x_1	-0.95	1	0.54	0.88
x_2	-0.63	0.54	1	0.26
x_3	-0.89	0.88	0.26	1



Objektivierung: $R^2 = 0.967$

ON = 10

$$= \frac{0.45937 \cdot x_1 + 0.021851}{0.22802} - \frac{0.10978 \cdot x_2}{0.0065374} - \frac{0.37484 \cdot x_3}{0.076113}$$

Geltungsbereich:
 x_1 : $1 < x_1 / 0.228 < 5.7205$
 x_2 : $1 < x_2 / 0.0065 < 25.1692$
 x_3 : $1 < x_3 / 0.0761 < 11.9267$

Abbildung 8.23 : Regressionsmodell 8, Fahrversuch Pkw, Frauen

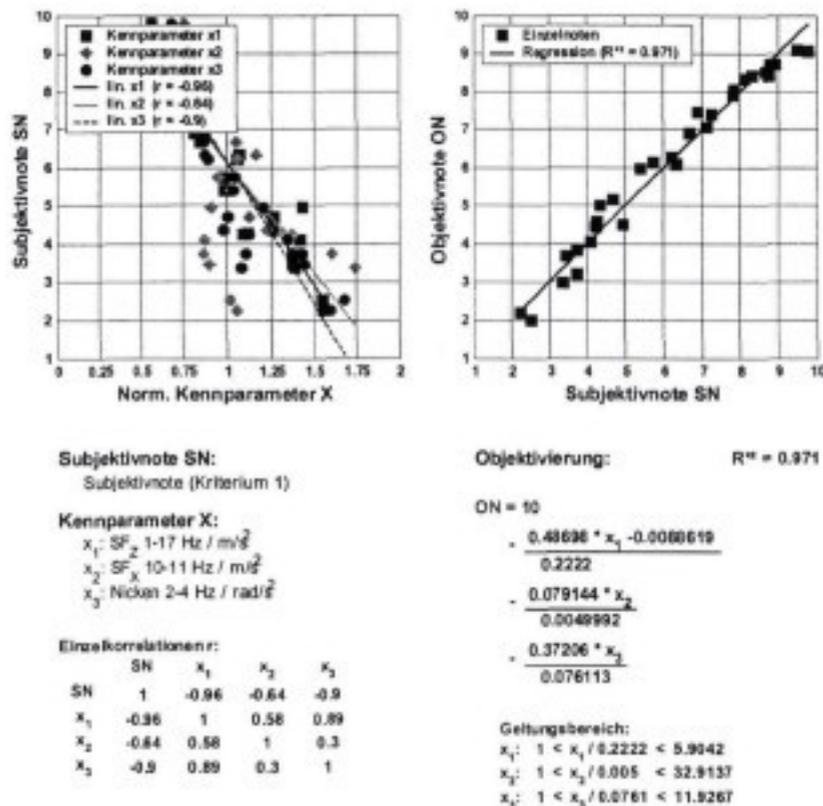


Abbildung 8.24 : Regressionsmodell 7/8, Fahrversuch Pkw, Frauen und Männer zusammen

8.3 Prüfstandsversuche Pkw

8.3.1 Korrelationsanalyse, Einzelrichtungsanregung, Fragebogen 1

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen bei Einzelrichtungsanregung gemäß Kapitel 5.3 PKW-Prüfstandsversuche untersucht.

In den folgenden Abbildungen sind die Korrelationen der Subjektivnoten zu den Beschleunigungseffektivwerten der verschiedenen Messstellen und Richtungen dargestellt. Dabei sind jeweils die Subjektivnoten für die Einzelrichtungsanregung mit den entsprechenden Beschleunigungseffektivwerten über alle fünf Anregungen und drei Sitze korreliert. Beim Vergleich der Korrelationen von Männern und Frauen ist festzustellen, dass diese mit einer gewissen Toleranz identisch sind. Dies war aufgrund der Subjektivnoten aus Abbildung 7.38 zu erwarten. Es zeigt sich auch hier, dass die Bewertung der Schwingungen durch diese beiden Perzentilgruppen im Wesentlichen nach den gleichen Kriterien erfolgt.

Wie auch schon bei den Fahrversuchen gibt es bei allen Anregungsrichtungen eine Reihe von Frequenzbereichen, die nahezu die gleichen hohen Korrelationskoeffizienten aufweisen. Dabei sind dies im allgemeinen Teilbereiche eines größeren Bereiches, die untereinander hoch korrelieren. Bei der Sitzfläche in x-Richtung sind dies z.B. die Frequenzbereiche 0,1-10 Hz, 1-9 Hz, 2-10, 3-10 Hz, 4-10 Hz. Zur Ermittlung des relevanten Teilbereiches wird analog zur Fahrversuchsauswertung die partielle Korrelation angewandt. Der jeweils für die Richtung größte Frequenzbereich mit der

höchsten Korrelation wird als Vorgabebereich gesetzt, aus dem der Einfluss aller anderen Teilbereiche auspartialisiert wird. Für die x-Richtung an der Sitzfläche ist dies, jeweils für Männer und Frauen gleich, der Bereich von 0,1-10 Hz, für die y-Richtung 0,1-13 und für die z-Richtung 0,1-30 Hz.

Der Teilfrequenzbereich innerhalb des Vorgabebereiches mit dem größten Einfluss erzeugt dabei den betragsmäßig geringsten negativen partiellen Korrelationskoeffizient (siehe Abbildung 8.27). Damit ergeben sich bei Einzelanregung für die Subjektivbewertung relevante Frequenzbereiche an der Sitzfläche:

x-Richtung : 2-10 Hz mit $r^2 = 0,948$

y-Richtung : 2-9 Hz mit $r^2 = 0,947$

z-Richtung : 1-19 Hz mit $r^2 = 0,946$

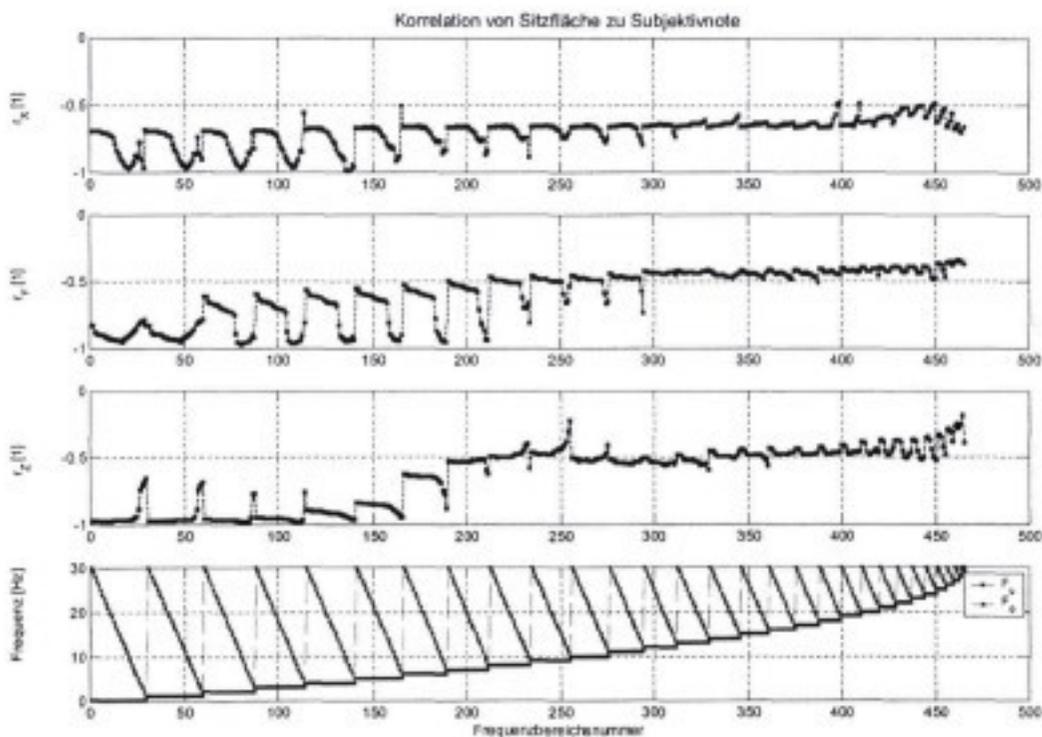


Abbildung 8.25 : Korrelationen der Sitzflächenbeschleunigungen zur Subjektivnote, Einzelrichtungen, Männer

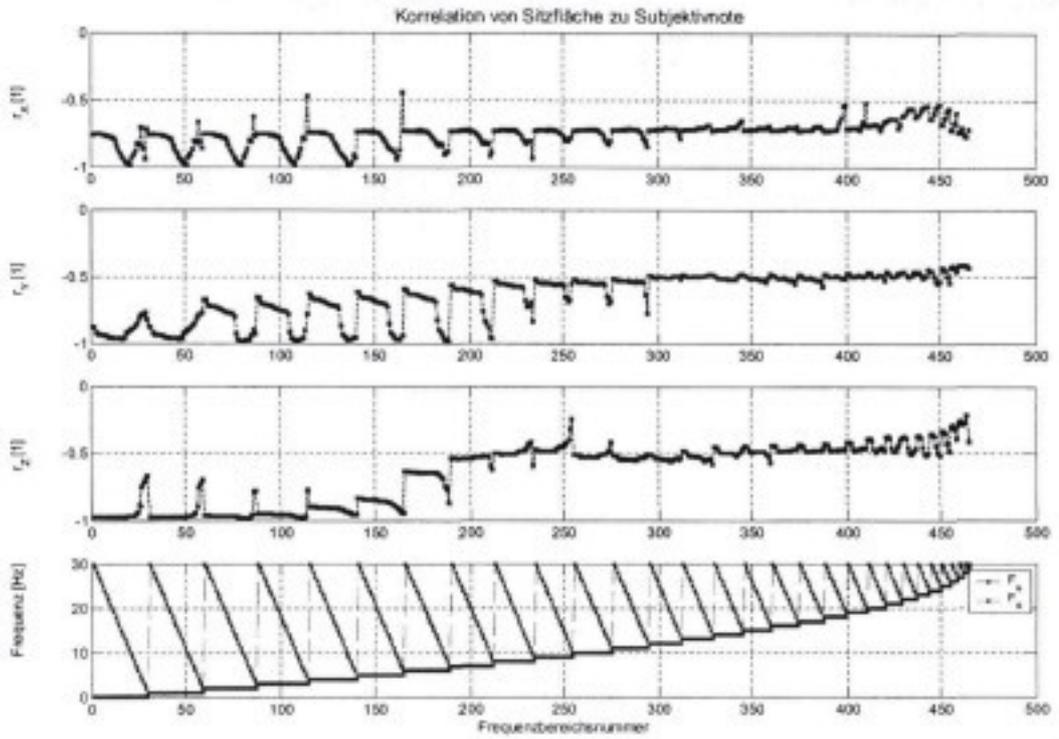


Abbildung 8.26 : Korrelationen der Sitzflächenbeschleunigungen zur Subjektivnote, Einzelrichtungen, Frauen

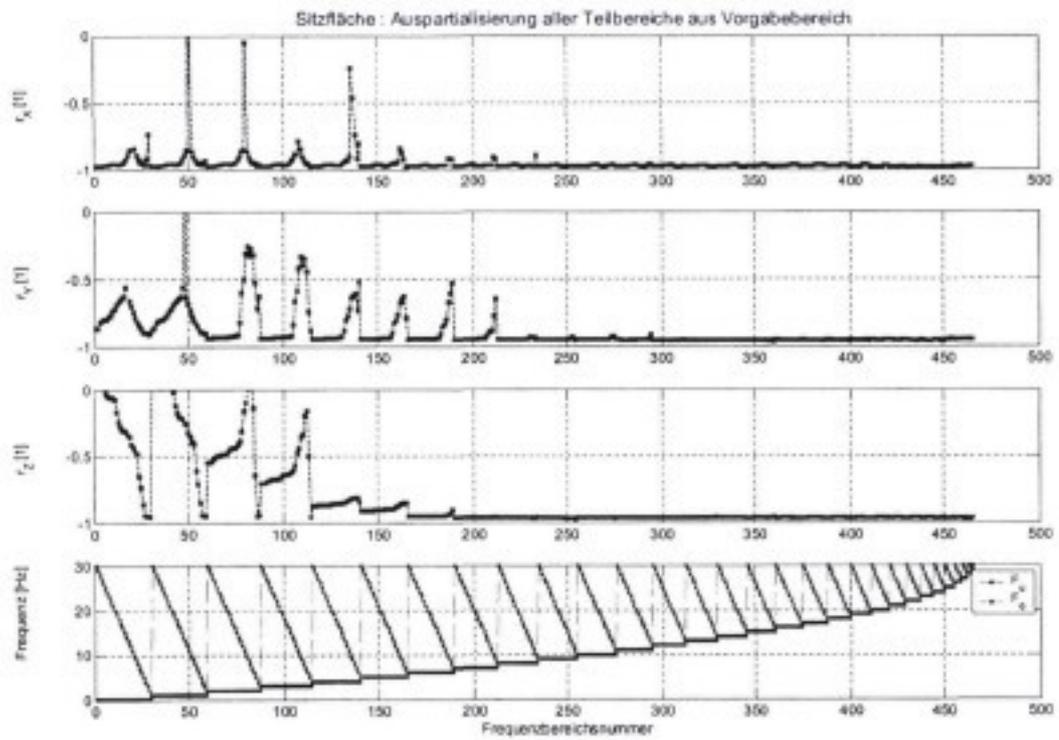


Abbildung 8.27 : Auspartialisierung aller Teilbereiche aus Vorgabebereich, Sitzfläche, Männer

In Abbildung 8.28 und Abbildung 8.29 sind nun die Korrelationen der Beschleunigungseffektivwerte der Lehnenfläche zur Subjektivnote bei Einzelrichtungsanregung dargestellt. Auch hier ist die Übereinstimmung von Männern und Frauen erkennbar. Bei der Lehnenfläche in x-Richtung sind die Frequenzbereiche mit den höchsten Korrelationen die Bereiche 0,1-10 Hz, 1-10 Hz, 2-10 Hz usw.. Zur Ermittlung des relevanten Teilbereiches wird wiederum die partielle Korrelation angewandt. Der jeweils für die Richtung größte Frequenzbereich mit der höchsten Korrelation wird als Vorgabebereich gesetzt, aus dem der Einfluss aller anderen Teilbereiche auspartialisiert wird. Für die x-Richtung an der Lehnenfläche ist dies, jeweils für Männer und Frauen gleich, der Bereich von 0,1-10 Hz, für die y-Richtung 0,1-12 Hz und für die z-Richtung 0,1-8 Hz.

Der Teilfrequenzbereich innerhalb des Vorgabebereiches mit dem größten Einfluss erzeugt dabei den betragsmäßig geringsten negativen partiellen Korrelationskoeffizient (siehe Abbildung 8.28). Damit ergeben sich bei Einzelanregung als für die Subjektivbewertung relevante Frequenzbereiche an der Lehnenfläche:

x-Richtung : 2-10 Hz mit $r^2 = 0,962$

y-Richtung : 2-9 Hz mit $r^2 = 0,93$

z-Richtung : 3-6 Hz mit $r^2 = 0,96$

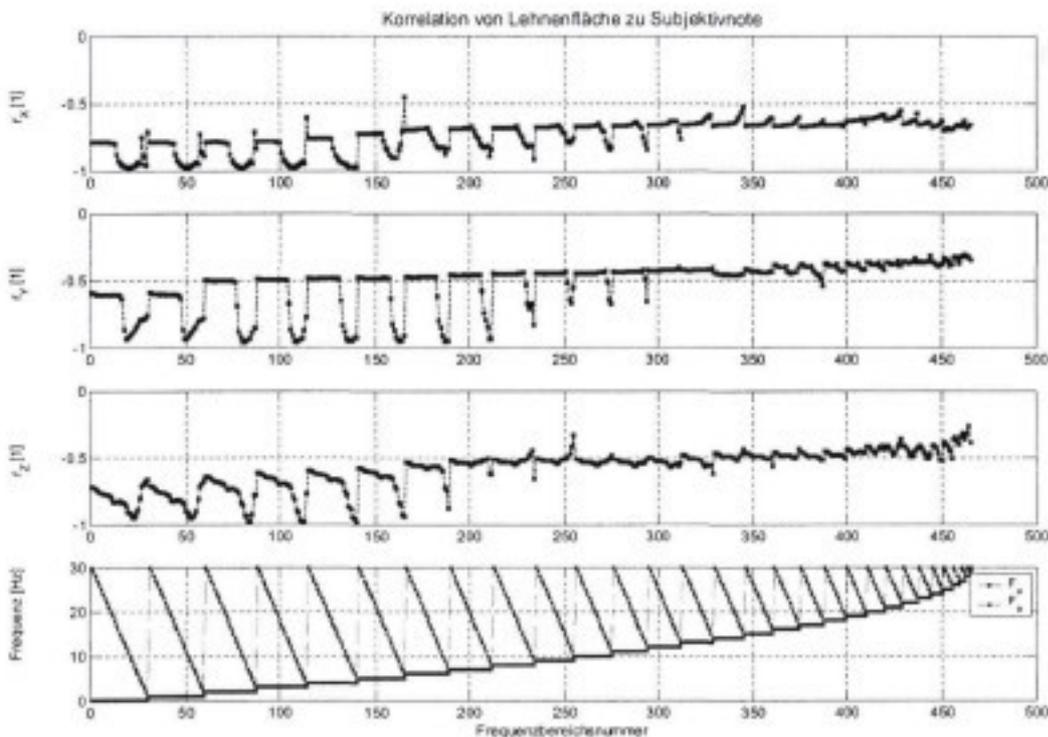


Abbildung 8.28 : Korrelationen der Lehnenflächenbeschleunigungen zur Subjektivnote, Einzelrichtungen, Männer

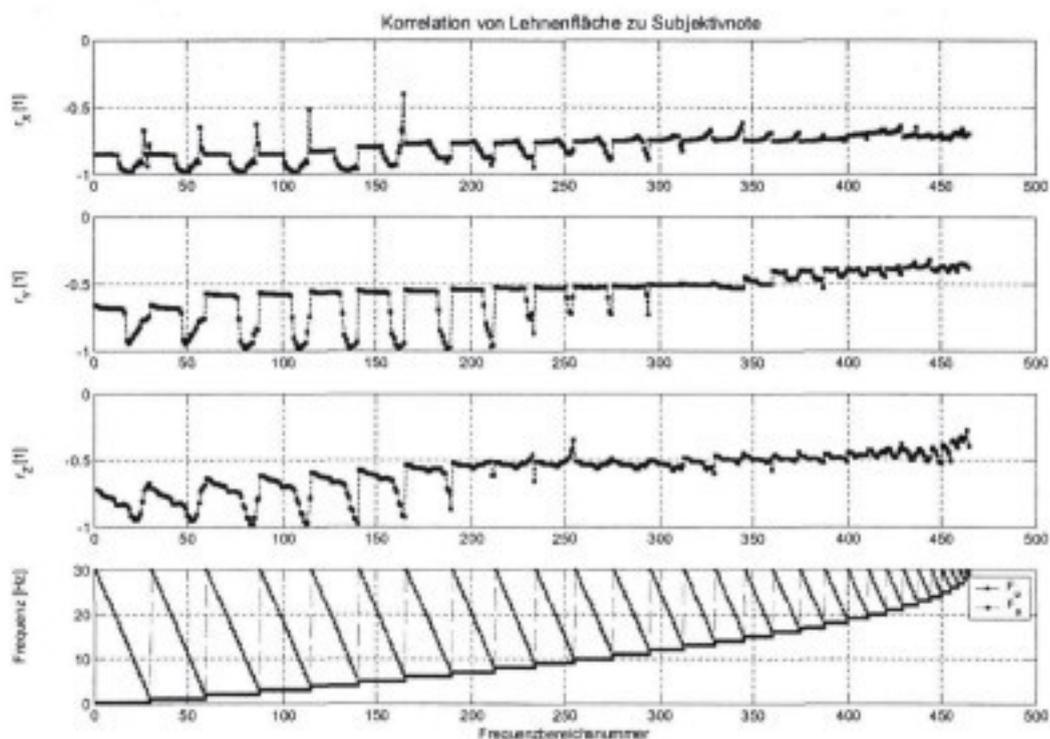


Abbildung 8.29 : Korrelationen der Lehnenflächenbeschleunigungen zur Subjektivnote, Einzelrichtungen, Frauen

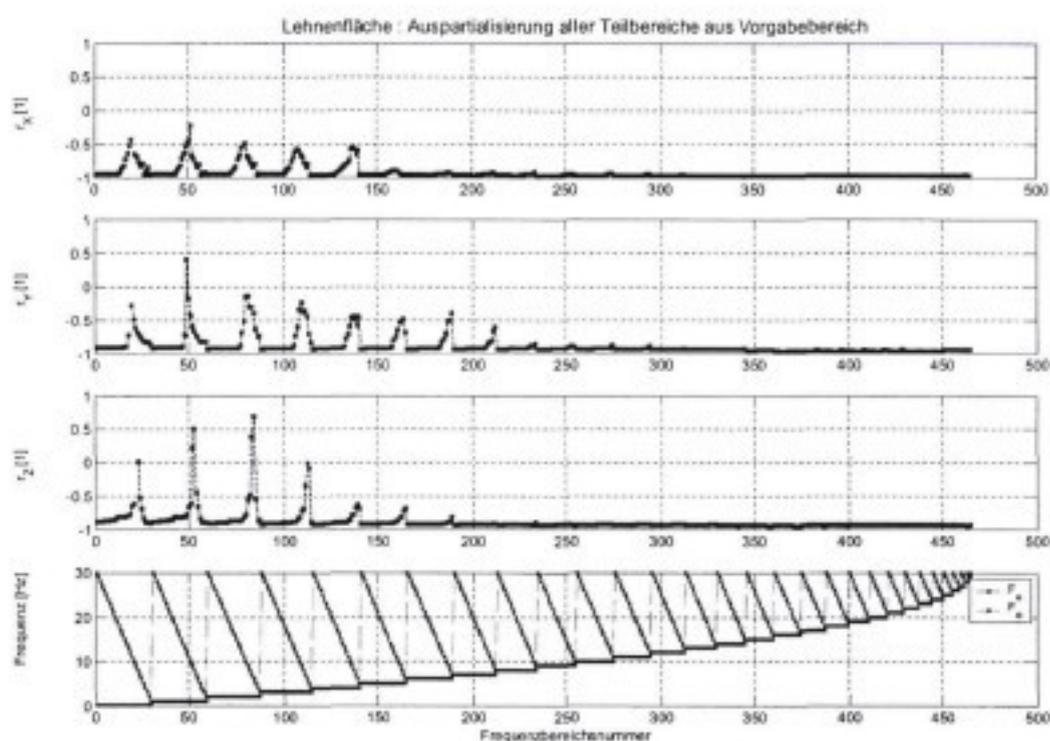


Abbildung 8.30 : Auspartialisierung aller Teilbereiche aus Vorgabebereich, Lehnenfläche, Männer

In Abbildung 8.31 und Abbildung 8.32 sind nun für die Messstellen Sitzfläche und Lehnenfläche die Subjektivnoten über die oben ermittelten Frequenzbereiche dargestellt.

Hier ist zu erkennen, dass die hohen Korrelationen in erster Linie durch die fünf verschiedenen Sitzschienenanregungen hervorgerufen werden und weniger durch den Einfluss des Sitzes. Dies ist sicher auch damit zu erklären, dass die Effektivwerte für die drei Sitze sehr nahe beieinander liegen. Aber auch wenn man sich innerhalb einer Sitzschienenanregung die Lage der Subjektivnoten für die drei Sitze in Relation zu den Effektivwerten anschaut, ist dort keine einheitliche Gesetzmäßigkeit zu erkennen. Eine Korrelationsanalyse nur über die drei Sitze jeweils für eine Sitzschienenanregung hat ergeben, dass es keinen Kennparameter gibt, der gleichzeitig auf allen Strecken eine signifikante Korrelation mit den Subjektivnoten ausweist. Wenn man sich vor diesem Hintergrund die Subjektivnoten anschaut, muss man bezweifeln, dass die drei Sitze von den Versuchspersonen dynamisch unterschieden werden konnten bzw. die Differenz zwischen den Bewertungen der Sitze, die ohnehin nur zwischen dem E-Klasse-Sitz und dem Corsa und Focus-Sitz mit gleicher Bewertung besteht, durch nicht erfasste Parameter hervorgerufen wurde. Dies kann zum Beispiel auch die Sitzform oder Sitzdruckverteilung sein, da man diese grundsätzlich spürt und es nicht immer ganz einfach ist, diese völlig auszublenden.

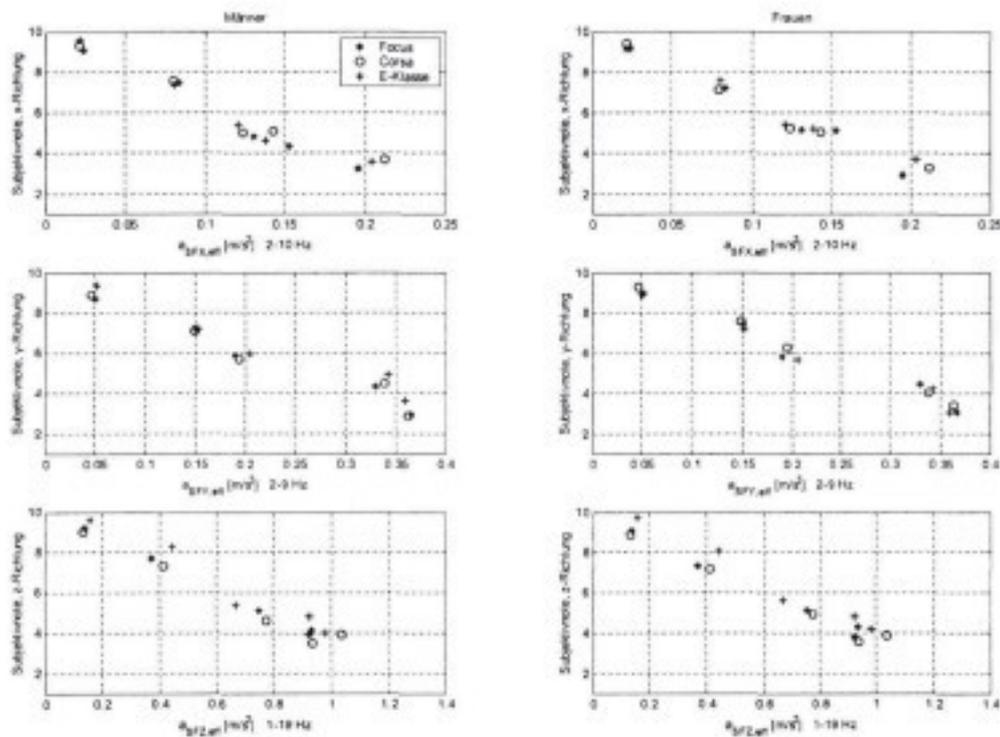


Abbildung 8.31 : Darstellung der Subjektivnoten über den Beschleunigungseffektivwerten der Sitzfläche

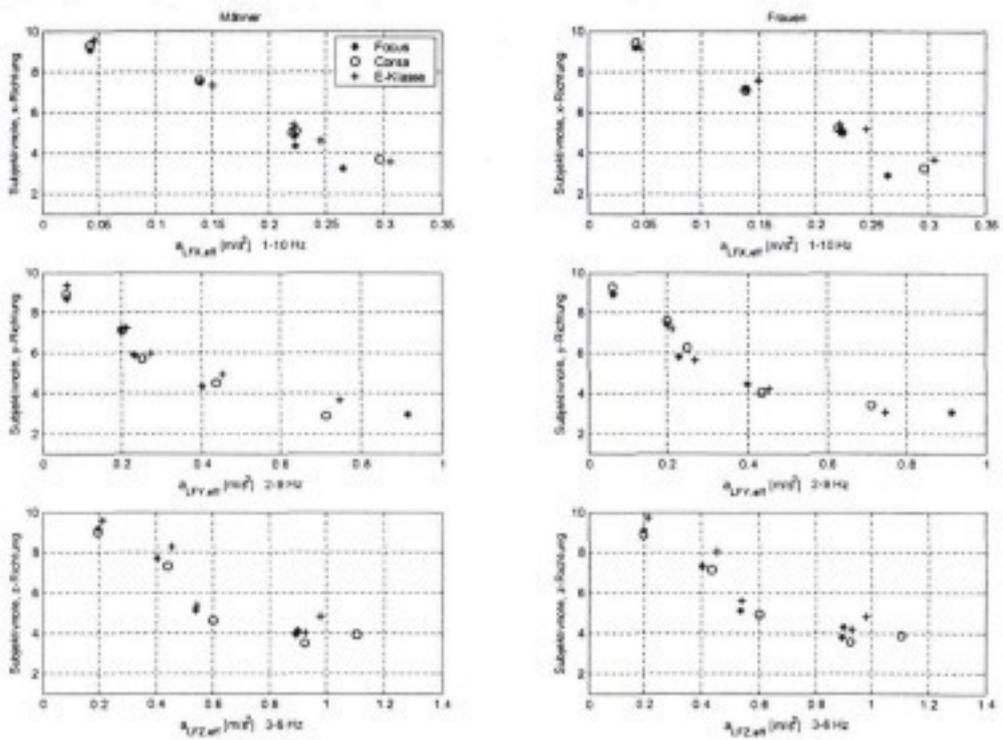


Abbildung 8.32 : Darstellung der Subjektivnoten über den Beschleunigungseffektivwerten der Lehnenfläche

8.4 Fahrversuche Nfz

8.4.1 Korrelation der Kennparameter untereinander

In Abbildung 8.33 bis Abbildung 8.35 sind die Korrelationen der Richtungen untereinander dargestellt. In den oberen drei Diagrammen sind jeweils für die drei Fahrzeuge die Korrelationskoeffizienten zwischen x- und z-Richtung (r_{xz}), y- und z-Richtung (r_{yz}) sowie x- und y-Richtung (r_{xy}) dargestellt. Auf der Abszisse sind jeweils die 465 Frequenzbereiche aufgetragen, auf der Ordinate der Korrelationskoeffizient. Im untersten Diagramm sind für die einzelnen Frequenzbereiche jeweils die entsprechenden Grenzen dargestellt. Die blauen Punkte markieren die untere Frequenzgrenze, die roten Punkte die obere Frequenzgrenze.

Die Korrelationskoeffizienten sind im Durchschnitt erkennbar niedriger als bei den Pkw-Versuchen. Dies kann zum einen an der Beschaffenheit der Straßen liegen oder am Schwingungsübertragungsverhalten der Fahrzeuge. Um diese Frage beantworten zu können, wären Daten über die Oberflächenbeschaffenheit der Straßen notwendig, sowie Übertragungspfadanalysen der Fahrzeuge. Da beides nicht vorliegt, können die dargestellten Korrelationen nur zum Verständnis der Zusammenhänge in Hinblick auf die Regressionsanalyse dienen.

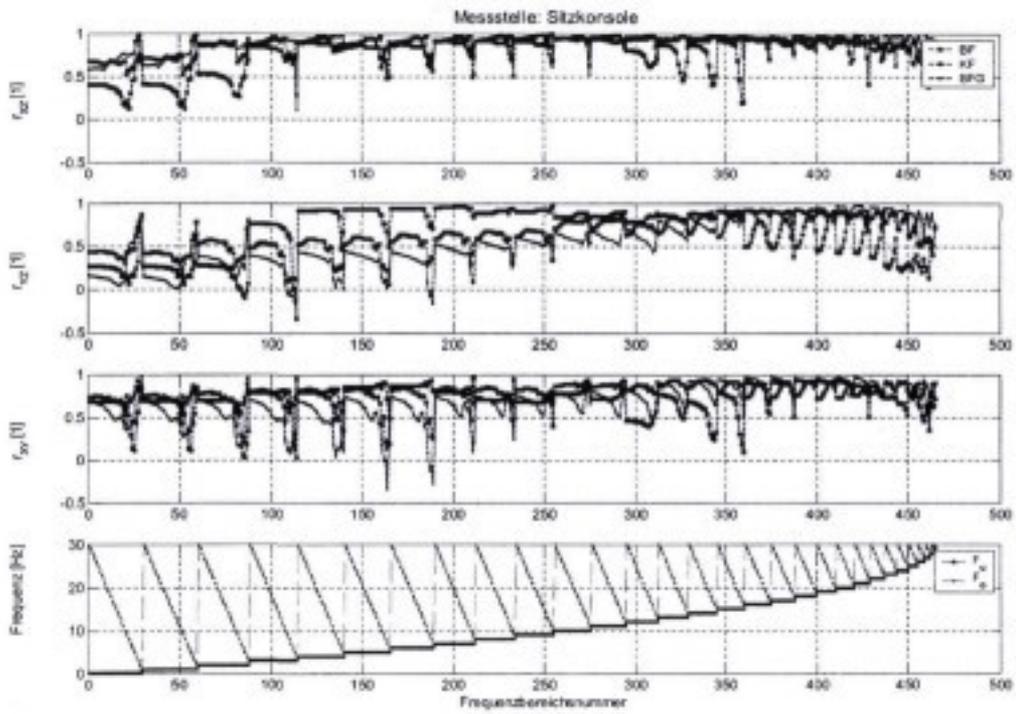


Abbildung 8.33 : Korrelation der Richtungen zueinander, Messstelle Sitzkonsole, Nfz

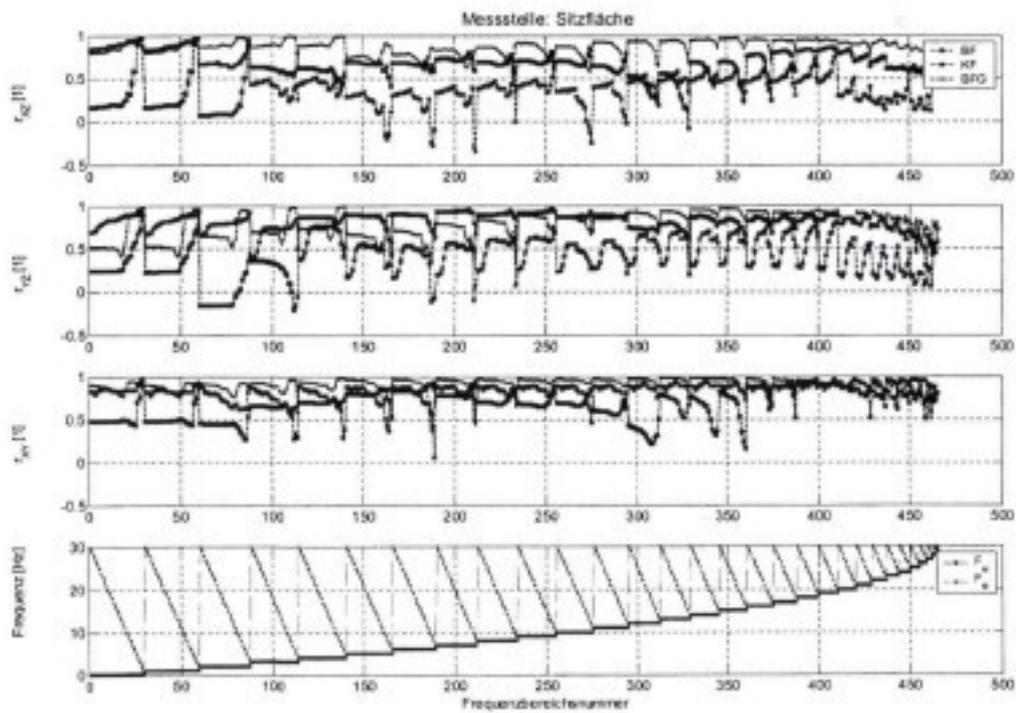


Abbildung 8.34 : Korrelation der Richtungen zueinander, Messstelle Sitzfläche, Nfz

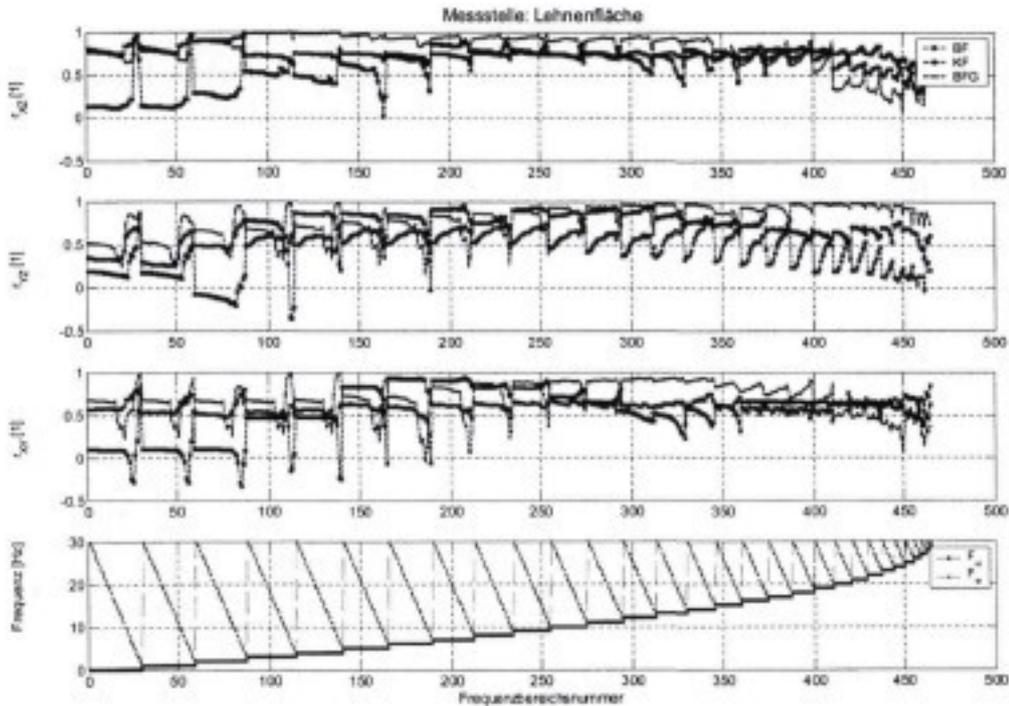


Abbildung 8.35 : Korrelation der Richtungen zueinander, Messstelle Lehnenfläche, Nfz

In Abbildung 8.36 bis Abbildung 8.38 sind nun für die x-, y- und z-Richtung die Korrelationen der Beschleunigungseffektive für jeweils zwei Messstellen untereinander dargestellt. Die Korrelationen sind auch hier jeweils für die einzelnen Frequenzbereiche über die fünf Strecken gebildet. Die Signifikanzgrenze auf dem 5%-Niveau liegt bei 0,878.

Bei der Korrelation der Sitzkonsole mit der Sitzfläche fällt die grundsätzlich unterschiedliche Charakteristik der Fahrersitzpositionen (BF, KF) und der Fahrgastsitzposition auf. Dies ergibt sich aus der unterschiedlichen Verbindung von Sitzkonsole und der Sitzfläche. Bei den Fahrersitzen befindet sich ein Schwingsystem und die Sitzpolsterung dazwischen, beim Fahrgastsitz ein steifes Aluminiumgerüst und die Sitzpolsterung. Daher ist das Übertragungsverhalten beim Fahrgastsitz weitgehend unabhängig von der Anregung. Beim Schwingsitz hängt das Übertragungsverhalten von der Nichtlinearität des Feder-Dämpfer-Systems ab, sowie vom Verhalten des Fahrers. Da die Sitzfläche zusätzlich über die Beine mit dem Fußboden (=Sitzkonsole) in Verbindung steht, kann der Fahrer das Schwingverhalten auch durch die Muskelspannung aktiv beeinflussen.

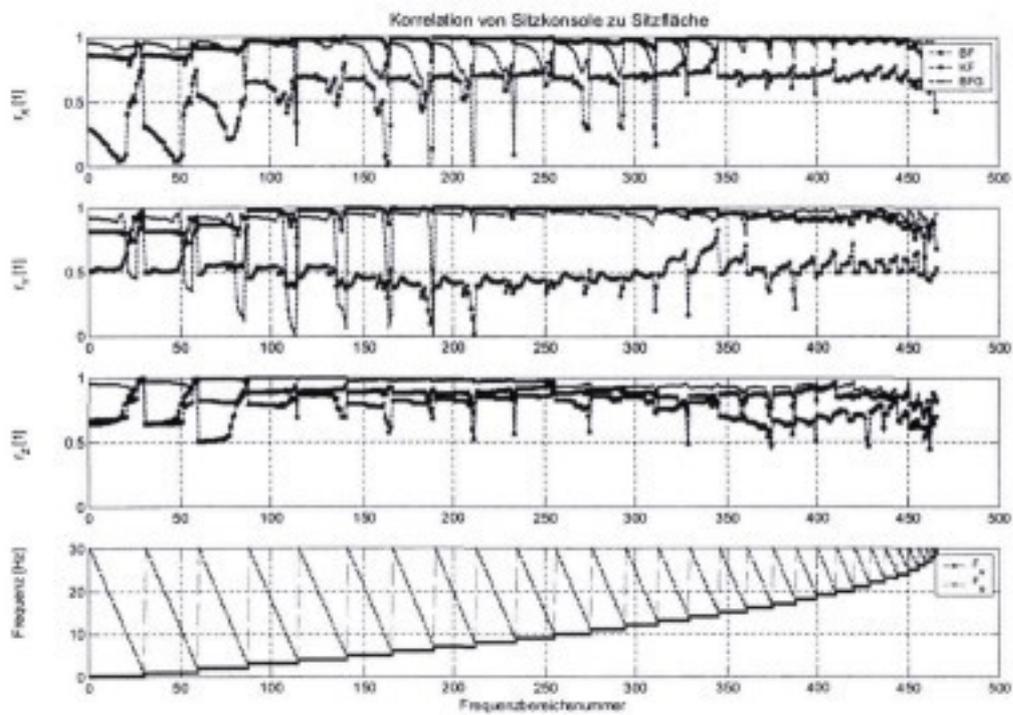


Abbildung 8.36 : Korrelation der Messstellen zueinander, Sitzkonsole/Sitzfläche, Nfz

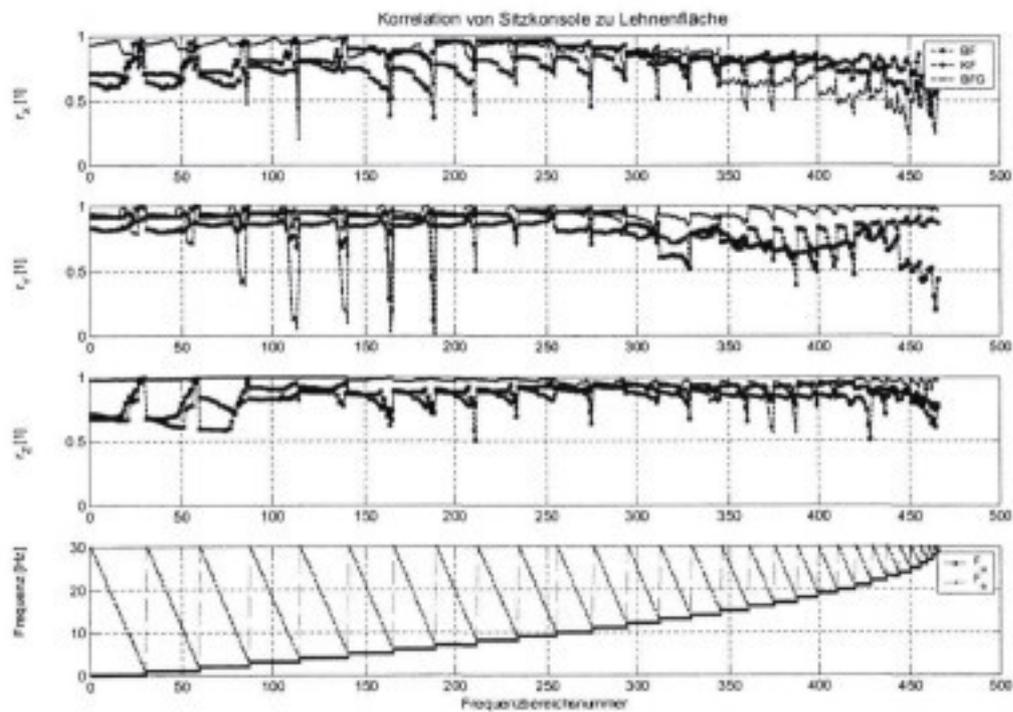


Abbildung 8.37 : Korrelation der Messstellen zueinander, Sitzkonsole/Lehnenfläche, Nfz

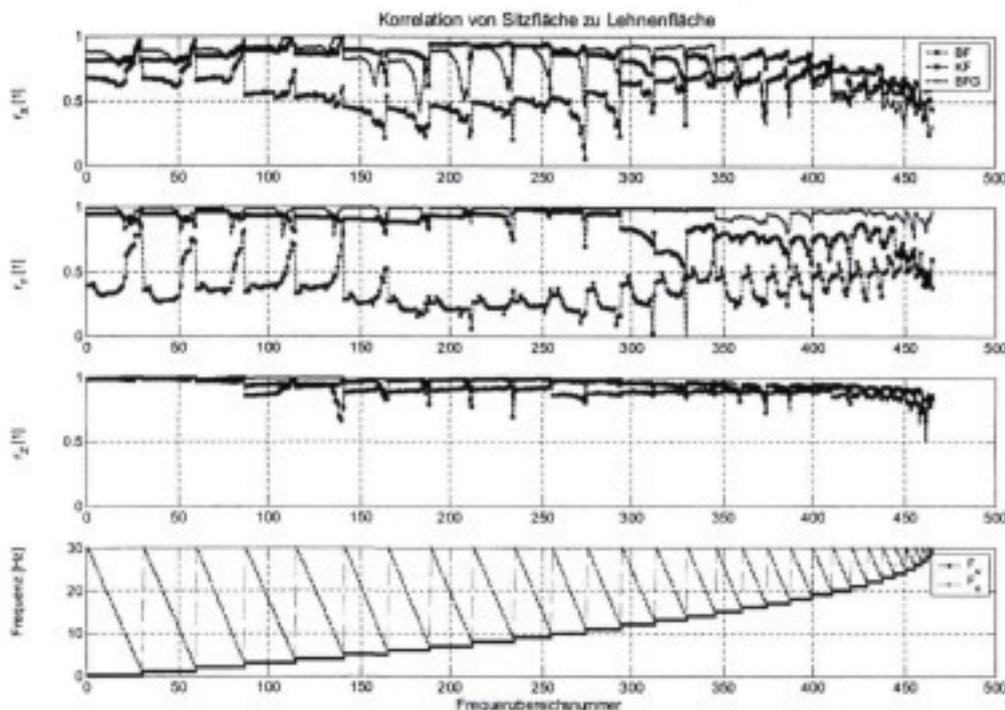


Abbildung 8.38 : Korrelation der Messstellen zueinander, Sitzfläche/Lehnenfläche, Nfz

8.4.2 Korrelation der Kennparameter zu den Subjektivnoten aus Fragebogen 1

Im Folgenden werden die Korrelationen der Kennparameter mit den Subjektivnoten für das globale Schwingungsdiskomfortempfinden aus Fragebogen 1 untersucht.

In Abbildung 8.39 bis Abbildung 8.41 sind für die Messstellen Sitzschiene, Sitzfläche und lehne jeweils für alle drei Fahrzeuge und translatorischen Richtungen die Korrelationen der Beschleunigungseffektivwerte zu den Subjektivnoten dargestellt. Die Korrelation erfolgt für jeden Frequenzbereich über die fünf Strecken. Statistisch signifikant auf dem 5%-Niveau sind dabei Korrelationsmaße betragsmäßig größer als 0,87.

Signifikante Korrelationsmaße ergeben sich bei allen Messstellen und Richtungen nur bei Frequenzbereichen, die den unteren Frequenzbereich mit beinhalten. Frequenzbereiche mit einer unteren Frequenzgrenze von größer als 3 Hz erzielen keine signifikanten Korrelationen.

Für die Nickbeschleunigung ergeben sich nur für den Kipper signifikante Korrelationen, für die Wankbeschleunigungen bei keiner der drei Sitzpositionen. Die höchsten Werte liegen hier jedoch bei Frequenzbereichen mit einer oberen Grenzfrequenz von etwa 4 Hz.

Die Korrelationskoeffizienten der Beschleunigungseffektivwerte an der Lehnenfläche weisen weitestgehend den gleichen Verlauf über der Frequenzbereichsnummer auf, wie die der Sitzfläche. Dies ergibt sich aus der hohen Korrelation der Sitzflächenbeschleunigungen mit den Lehnenflächenbeschleunigungen (siehe Abbildung 8.38).

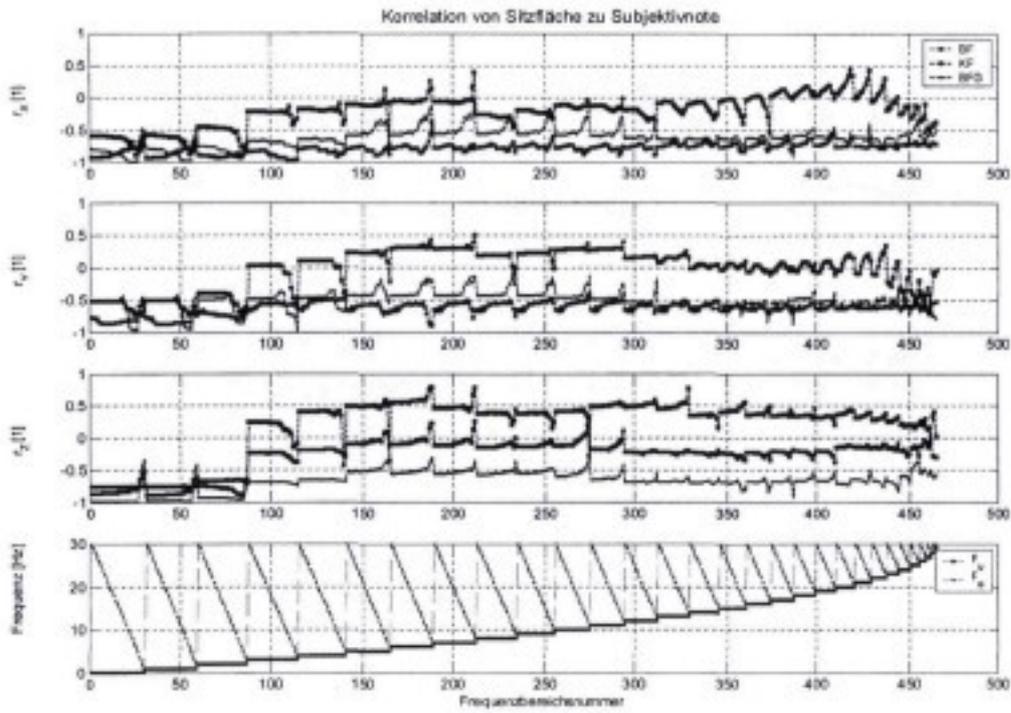


Abbildung 8.39 : Korrelation der Subjektivnoten mit den Beschleunigungseffektivwerten an der Sitzfläche, getrennt nach Sitzpositionen, Fahrversuch, Nfz

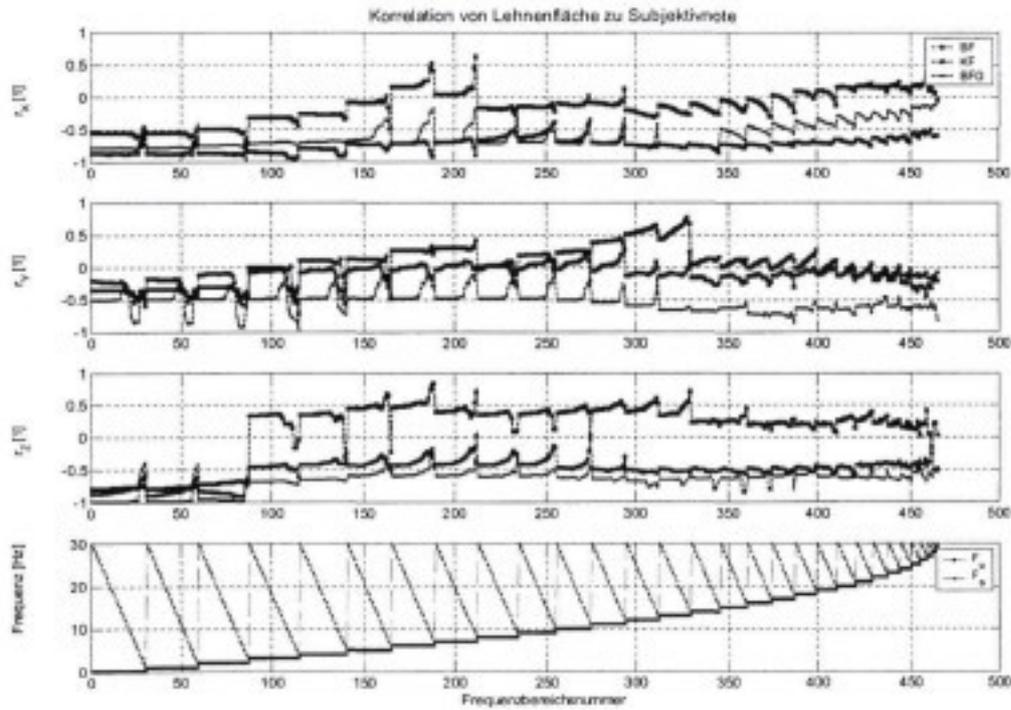


Abbildung 8.40 : Korrelation der Subjektivnoten mit den Beschleunigungseffektivwerten an der Lehnenfläche, getrennt nach Sitzpositionen, Fahrversuch, Nfz

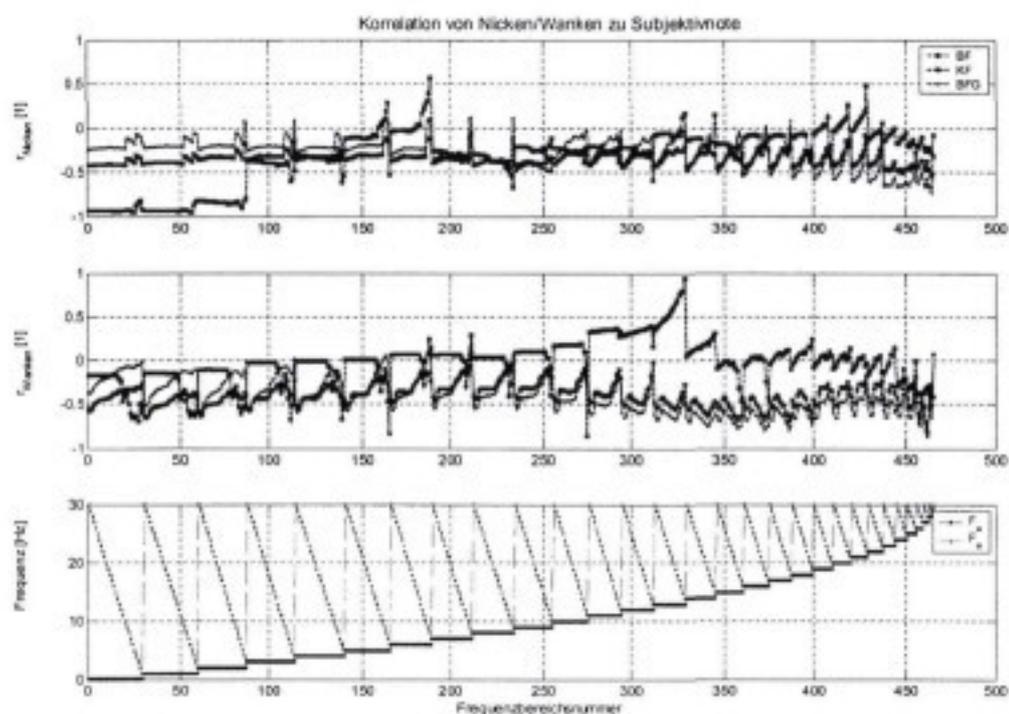


Abbildung 8.41 : Korrelation der Subjektivnoten mit den Beschleunigungseffektivwerten der Nick- und Wankbeschleunigung, getrennt nach Sitzpositionen, Fahrversuch, Nfz

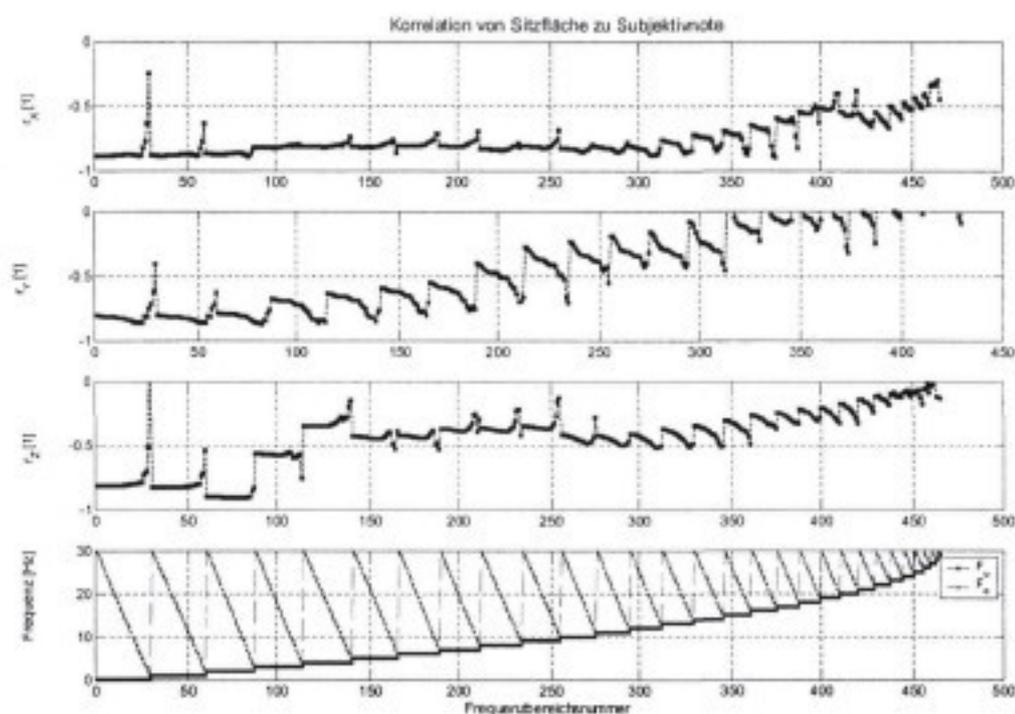


Abbildung 8.42 : Korrelation der Subjektivnoten mit den Beschleunigungseffektivwerten der Sitzfläche, über alle 15 Ereignisse (5 Strecken x Sitzpositionen), Fahrversuch, Nfz

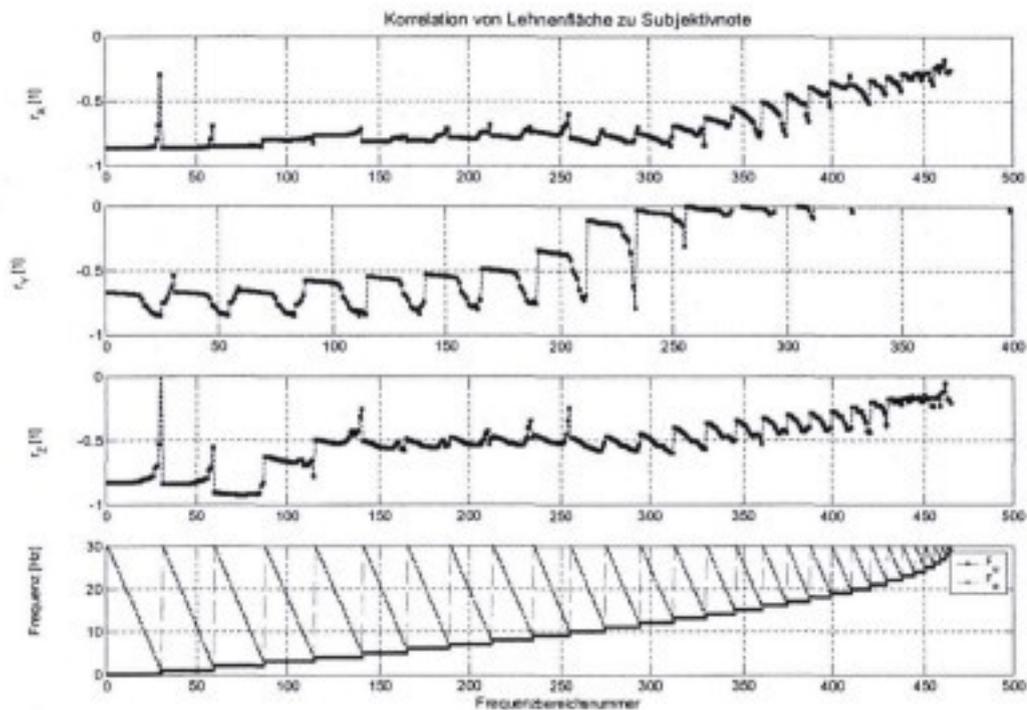


Abbildung 8.43 : Korrelation der Subjektivnoten mit den Beschleunigungseffektivwerten der Lehnenfläche, über alle 15 Ereignisse (5 Strecken x Sitzpositionen), Fahrversuch, Nfz

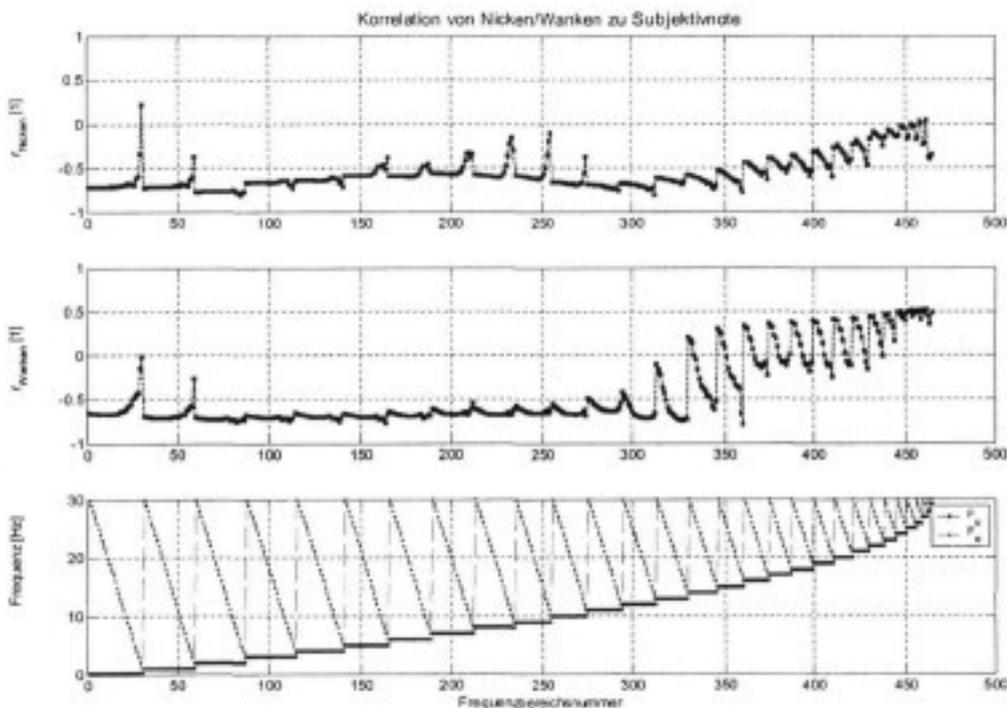


Abbildung 8.44 : Korrelation der Subjektivnoten mit den Beschleunigungseffektivwerten der Nick- und Wankbeschleunigung, über alle 15 Ereignisse (5 Strecken x Sitzpositionen), Fahrversuch, Nfz

In Abbildung 8.45 bis Abbildung 8.47 sind die partiellen, um den Einfluss von der Sitzfläche in z-Richtung (SF_z) bereinigten Korrelationskoeffizienten der Beschleunigungseffektivwerte zu den Subjektivnoten dargestellt. Diese Bereinigung erfolgte jeweils innerhalb eines Frequenzbereiches. In den einzelnen Diagrammen sind jeweils die einfachen Korrelationsmaße nach Pearson dargestellt sowie im Vergleich dazu die partiellen Korrelationskoeffizienten. Weiterhin sind die Signifikanzgrenzen für die Korrelationskoeffizienten auf dem 1%- und 5%-Niveau eingezeichnet. Im Vergleich zu den Pkw-Versuchen hat die Auspartialisierung der Beschleunigungen der Sitzfläche in z-Richtung nicht so einen großen Einfluss auf das Korrelationsmaß. Dies sieht man bereits an den geringeren Korrelationskoeffizienten der Richtungen untereinander. Besonders die oberen Frequenzbereiche werden kaum durch die z-Richtung beeinflusst.

Starken Einfluss hat die Beschleunigung in z-Richtung an der Sitzfläche jedoch auf die Korrelationsmaße der ersten 90 Frequenzbereiche der z-Richtung an der Lehnenfläche sowie die Nickbeschleunigung. Hier ergeben sich nur noch wenige Frequenzbereiche, die vor allem den mittleren Frequenzbereich abdecken, mit signifikanten Korrelationsmaßen.

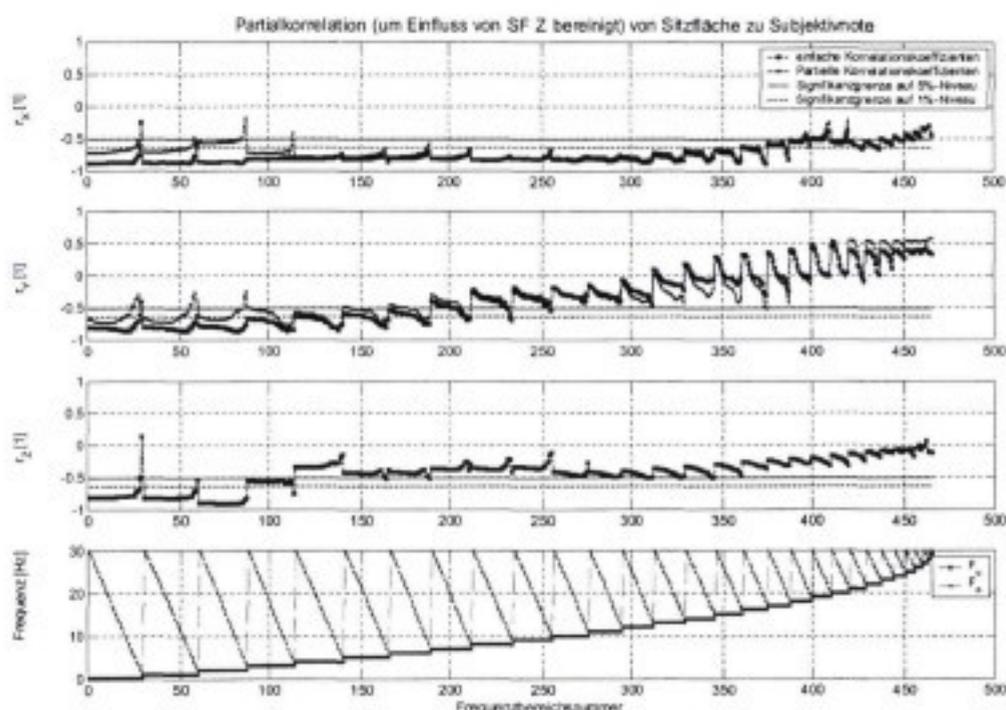


Abbildung 8.45 : Partiale Korrelation (um Einfluss von SF_z bereinigt) von Sitzfläche zu Subjektivnote

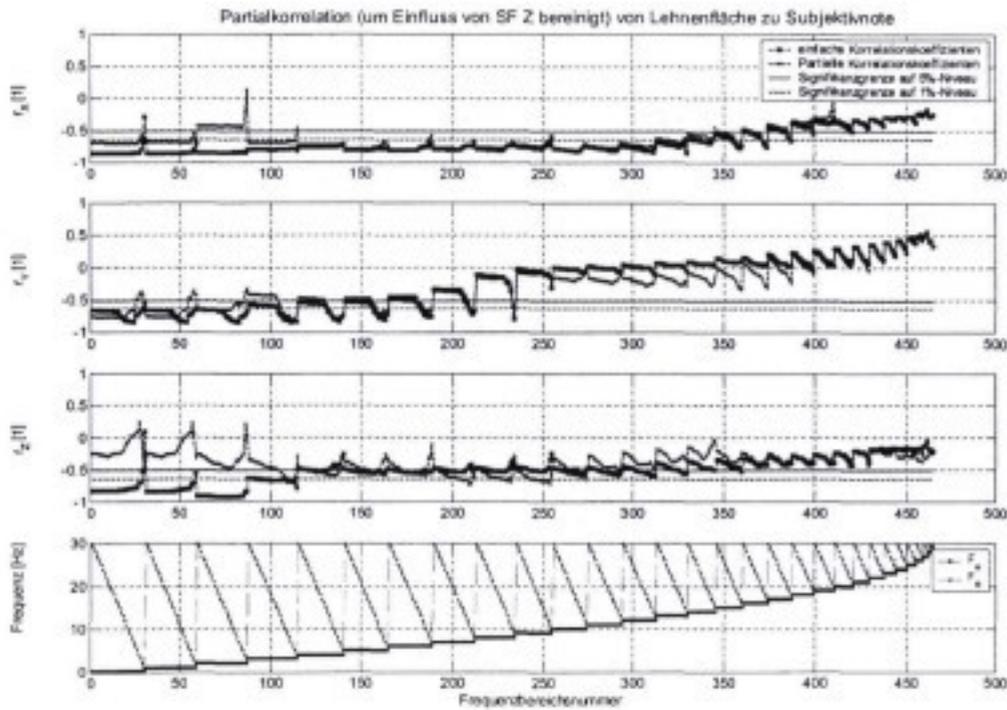


Abbildung 8.46 : Partialkorrelation (um Einfluss von SF_Z bereinigt) von Lehnenfläche zu Subjektivnote

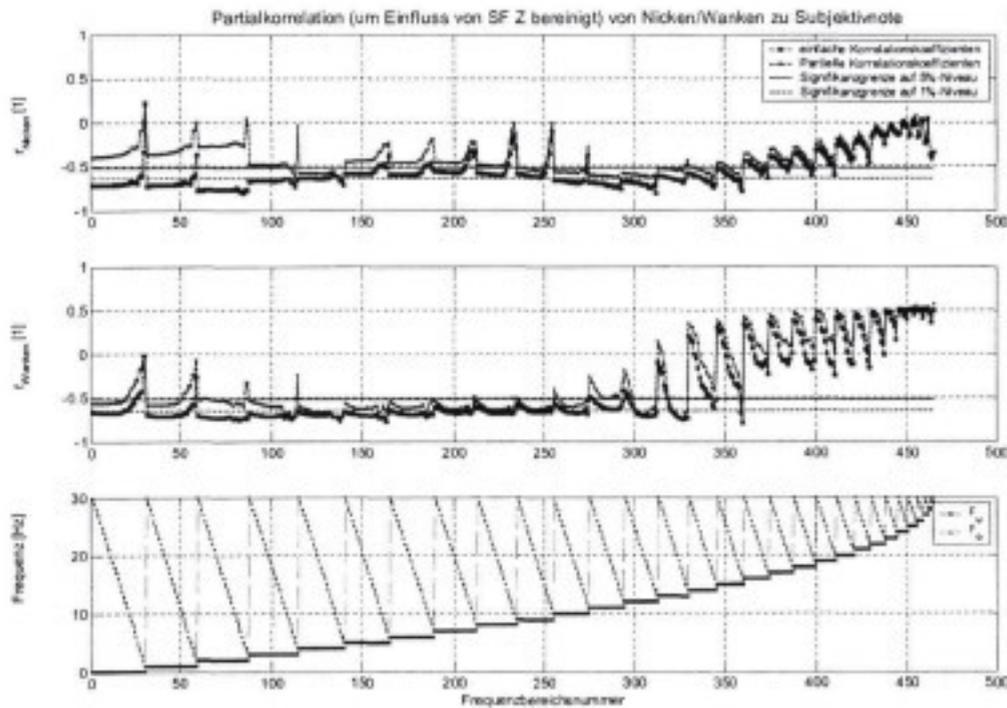


Abbildung 8.47 : Partialkorrelation (um Einfluss von SF_Z bereinigt) der Nick- und Wankbeschleunigung zur Subjektivnote

8.4.3 Regressionsanalyse Nfz-Fahrversuche, Fragebogen 1

Wie in Abbildung 8.46 ersichtlich, sind die Korrelationskoeffizienten der Beschleunigungseffektivwerte der Sitzfläche in z-Richtung mit der unteren Grenzfrequenz von 2 Hz (Frequenzbereichsnummer von 61-90) unabhängig von der oberen Grenzfrequenz in etwa gleich hoch. Um den im Frequenzbereich von 2-30 Hz tatsächlich relevanten Bereich für die Korrelation zu identifizieren, sind in Abbildung 8.48 die partiellen Korrelationskoeffizienten des Beschleunigungseffektivwertes im Bereich von 2-30 Hz zur Subjektivnote, jeweils bereinigt um den Einfluss des auf der Abszisse aufgetragenen Teilfrequenzbereiches der gleichen Messstelle, dargestellt. Damit kann der Teilfrequenzbereich ermittelt werden, der innerhalb des Frequenzbereiches von 2-30 Hz den größten Einfluss auf dessen Korrelation zur Subjektivnote hat. Der Teilfrequenzbereich mit dem größten Einfluss erzeugt dabei den betragsmäßig geringsten negativen partiellen Korrelationskoeffizient. Dies ist der Frequenzbereich 82, der den Bereich von 2-8 Hz abdeckt.

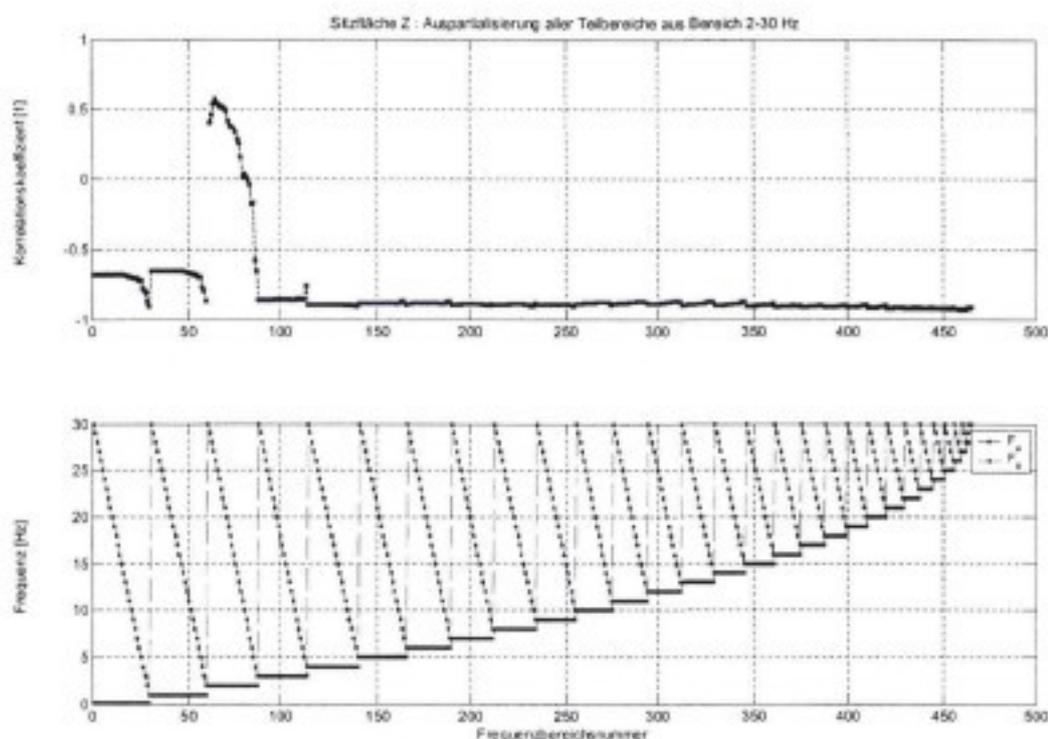


Abbildung 8.48 : Partialkorrelation von SF_z 2-30 Hz zur Subjektivnote um jeden einzelnen Teilfrequenzbereich von SF_z bereinigt

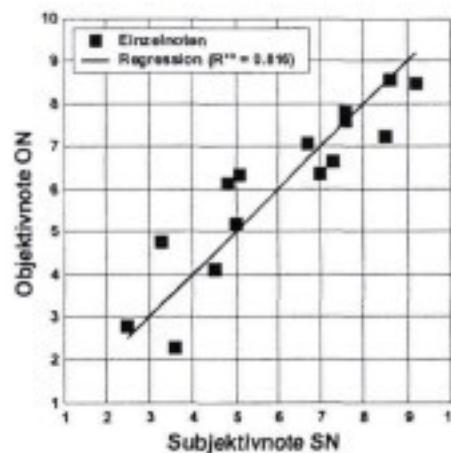
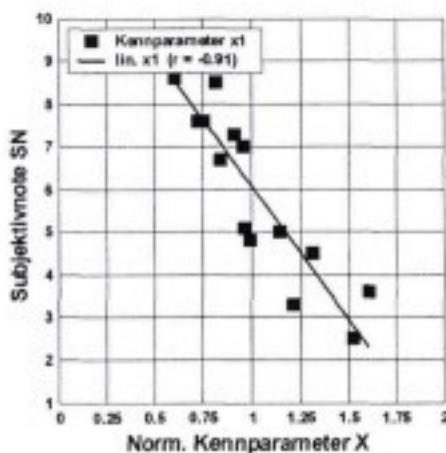
Ausgehend von diesem Parameter werden alle möglichen Parametervariationen in Bezug auf die Eignung für ein Regressionsmodell überprüft. Das einfachste Modell Nr.1 mit dem Parameter Beschleunigungseffektivwert der Sitzfläche in z-Richtung von 2-8 Hz (SF_z 2-8 Hz) liefert ein bereinigtes Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,816$. Die Hinzunahme eines weiteren Frequenzbereiches in z-Richtung an der Sitzfläche in Bezug auf ein gültiges Regressionsmodell ist nicht möglich. Der Erklärungsgehalt der z-Richtung allein ist hier folglich nicht in dem Maße vorhanden, wie bei den Pkw-Versuchen. Mit einem weiteren Parameter, der x-Richtung an der Sitzfläche, liefert der Frequenzbereich von 16-17 Hz das beste Ergebnis (Modell 2). Ein minimal höheres (bereinigtes) Bestimmtheitsmaß liefert der Parameter SF_y 8-10 Hz. Eine Kombination von SF_x und SF_y liefert keine gültigen Regressionsmodelle. Das Modell mit dem höchsten (bereinigten)

Bestimmtheitsmaß (Modell 4) beinhaltet Parameter der Sitzfläche in z-Richtung, der Sitzfläche in x-Richtung und der Lehnenfläche in y-Richtung.

Nr.	Parameter			R ²	R ²
1	SF _z 2-8 Hz			0,829	0,816
2	SF _z 2-8 Hz	SF _x 16-17 Hz		0,926	0,914
3	SF _z 2-8 Hz	SF _y 8-10 Hz		0,928	0,916
4	SF _z 2-8 Hz	SF _x 16-17 Hz	LF _y 0,1-1	0,965	0,956

Tabelle 8.3 : Regressionsmodelle, alle Sitzpositionen, Fahrversuch Nfz

In den folgenden Abbildungen sind analog zu der Darstellung der Pkw-Ergebnisse die Regressionsmodelle nach Tabelle 8.3 dargestellt.



Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 : SF_z 2-8 Hz / m/s²

Einzelkorrelation r:

	SN	x_1
SN	1	-0.91
x_1	-0.91	1

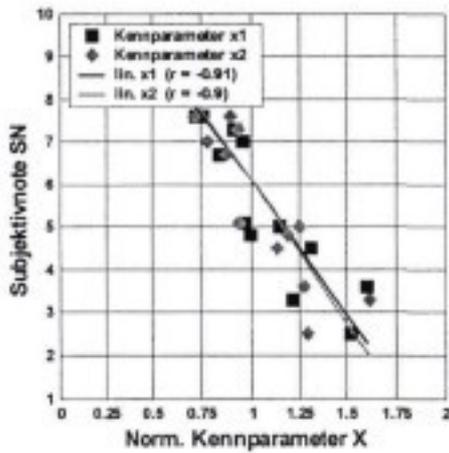
Objektivierung: $R^2 = 0.816$

ON = 10

$$= \frac{1.0878 \cdot x_1 + 0.053642}{0.1464}$$

Geltungsbereich:
 $x_1: 1 < x_1 / 0.1464 < 6.7561$

Abbildung 8.49 : Regressionsmodell 1, Fahrversuch Nfz

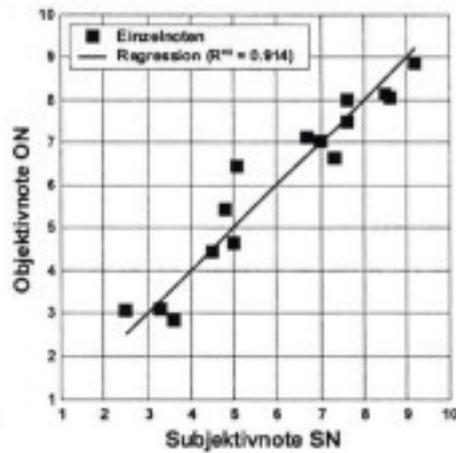


Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 : SF_z 2-8 Hz / m/s^2
 x_2 : SF_x 16-17 Hz / m/s^2

Einzelkorrelationen r:

	SN	x_1	x_2
SN	1	-0.91	-0.9
x_1	-0.91	1	0.77
x_2	-0.9	0.77	1

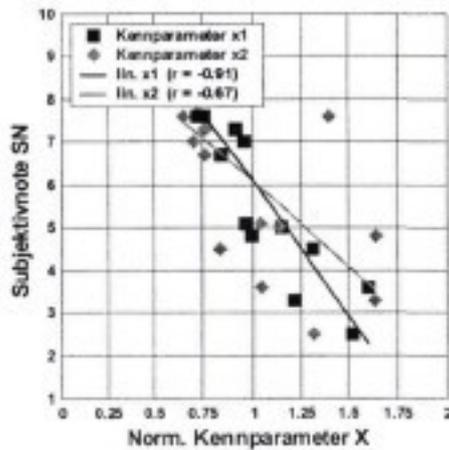


Objektivierung: $R^2 = 0.914$

$$ON = 10 - \frac{0.64348 \cdot x_1 - 0.03635}{0.1464} - \frac{0.69326 \cdot x_2}{0.011695}$$

Geltungsbereich:
 x_1 : $1 < x_1 / 0.1464 < 6.7561$
 x_2 : $1 < x_2 / 0.0117 < 6.1782$

Abbildung 8.50 : Regressionsmodell 2, Fahrversuch Nfz

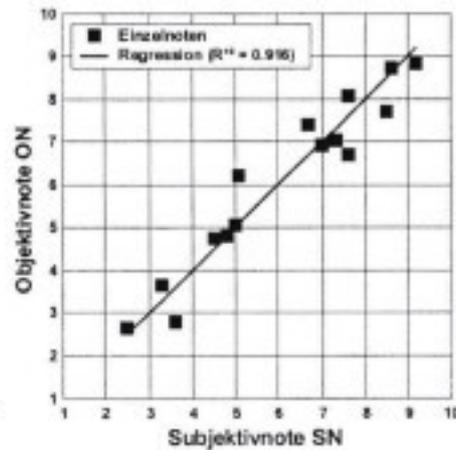


Subjektivnote SN:
Subjektivnote (Kriterium 1)

Kennparameter X:
 x_1 : SF_z 2-8 Hz / m/s^2
 x_2 : SF_y 8-10 Hz / m/s^2

Einzelkorrelationen r:

	SN	x_1	x_2
SN	1	-0.91	-0.67
x_1	-0.91	1	0.42
x_2	-0.67	0.42	1



Objektivierung: $R^2 = 0.916$

$$ON = 10 - \frac{0.91532 \cdot x_1 + 0.012911}{0.1464} - \frac{0.1054 \cdot x_2}{0.0095012}$$

Geltungsbereich:
 x_1 : $1 < x_1 / 0.1464 < 6.7561$
 x_2 : $1 < x_2 / 0.0095 < 20.5692$

Abbildung 8.51 : Regressionsmodell 3, Fahrversuch Nfz

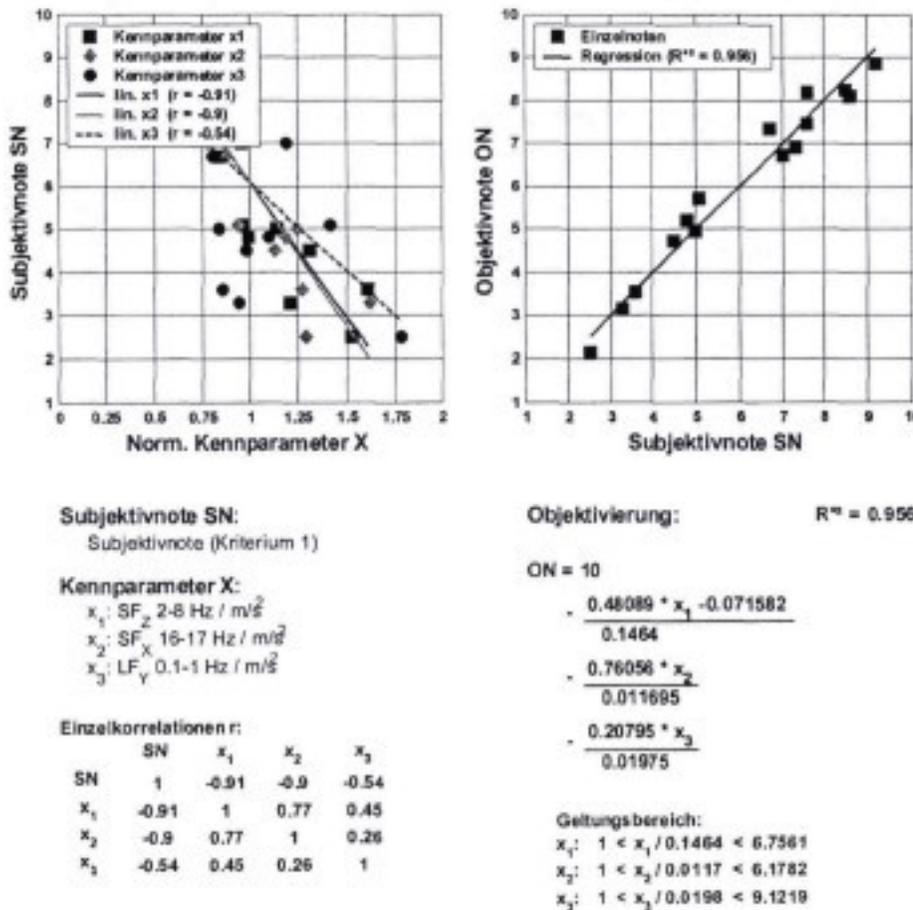


Abbildung 8.52 : Regressionsmodell 4, Fahrversuch Nfz

8.5 Prüfstandsversuche Nfz

8.5.1 Korrelationsanalyse, Einzelrichtungsanregung, Fragebogen 1

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Prüfstandsversuchen bei Einzelrichtungsanregung gemäß Kapitel 5.4 Nfz-Prüfstandsversuche untersucht.

In den folgenden Abbildungen sind die Korrelationen der Subjektivnoten zu den Beschleunigungseffektivwerten der verschiedenen Messstellen und Richtungen dargestellt. Dabei sind jeweils die Subjektivnoten für die Einzelrichtungsanregung mit den entsprechenden Beschleunigungseffektivwerten über alle fünf Anregungen korreliert.

Aufgrund der über den gesamten Frequenzbereich sehr gleichmäßigen und niedrigen Beschleunigungsamplituden der Busanregungen (3 von 5 Anregungen) in x- und y-Richtung ergeben sich hohe Korrelationen für sehr viele Frequenzbereiche, deren tatsächliche Relevanz für das Subjektivurteil zum Teil aufgrund der Spektren und aus der Literatur bekannter Zusammenhänge mit dem Subjektivurteil auszuschließen ist. Dies gilt insbesondere für Frequenzbereiche, die ausschließlich die hohen Frequenzen beinhalten und aufgrund ihres Korrelationskoeffizienten als alleinige Erklärung für das Subjektivurteil hinreichend wären. Hier muss dann beachtet werden, wie diese Effektivwerte mit anderen zusammenhängen. Auch die relativ geringe Anzahl von fünf Stützstellen für die Korrelation machen diese sehr sensibel für oben genannte Probleme, so dass hier eine rein mathematische Betrachtung zu Fehlschlüssen führen kann. Daher wurden die

Spektren bei der Wahl der Frequenzbereiche mit herangezogen und die Subjektivnoten über den Effektivwerten grafisch dargestellt (siehe Abbildung 8.57).

Für den Fahrgastsitz ergibt sich bei reiner x-Anregung für die fünf Signale die höchste Korrelation für den Beschleunigungseffektivwert an der Sitzfläche im Bereich von 0,1-9 Hz, bei y-Anregung im Bereich von 3-4 Hz und in z-Richtung im Bereich von 2-30 Hz. Da es auch hier weitere Frequenzbereiche mit ähnlich hoher Korrelation gibt, werden wiederum die Teilbereiche aus dem größten, oben aufgeführten Frequenzbereich herauspartialisiert. Danach ergeben sich folgende, für das Subjekturteil relevante Frequenzbereiche für die Sitzfläche des Fahrgastsitzes:

x-Richtung : 1-5 Hz mit $r = - 0,98$

y-Richtung : 3-4 Hz mit $r = - 0,99$

z-Richtung : 2-5 Hz mit $r = - 0,94$

Für die Lehnenfläche ergeben sich nach gleichem Verfahren die relevanten Frequenzbereiche zu:

x-Richtung : 1- 5 Hz mit $r = - 0,98$

y-Richtung : 0,1-10 Hz mit $r = - 0,93$

z-Richtung : 2-23 Hz mit $r = - 0,95$

Der relativ große bzw. weit in hohe Frequenzen reichende Bereich für die z-Anregung im Vergleich zur Sitzfläche ergibt sich aus einer Schwingungsanregung der Lehne in x-Richtung, die jedoch aufgrund der geneigten Achse auch in z-Richtung mess- und spürbar ist.

Für den Fahrersitz ergeben sich an der Sitzfläche die relevanten Frequenzbereiche zu:

x-Richtung : 1-21 Hz mit $r = - 0,96$

y-Richtung : 3-4 Hz mit $r = - 0,95$

z-Richtung : 3-4 Hz mit $r = - 0,90$

Der Frequenzbereich für die z-Richtung liegt im erwarteten Bereich, der Bereich für die x-Richtung ist mit der hohen oberen Frequenzgrenze etwas ungewöhnlich. Dies kann eine Auswirkung der ungünstigen Anregungscharakteristik gerade in x- und y-Richtung sein.

Für die Lehnenfläche ergeben sich die relevanten Frequenzbereiche zu:

x-Richtung : 1- 19 Hz mit $r = - 0,97$

y-Richtung : 1-16Hz mit $r = - 0,94$

z-Richtung : 3-4 Hz mit $r = - 0,89$

Bei der y-Richtung wurde der Frequenzbereich auf Basis der Spektren auf diesen Wert festgelegt, da die höhere Korrelation bei Verwendung des gesamten Frequenzbereichs nur auf einer minimalen Differenz basiert, diese jedoch bei der Streuung der Subjektivnoten und einer erhöhten Messungenauigkeit im oberen Frequenzbereich nicht als signifikant für das Schwingempfinden angesehen werden kann.

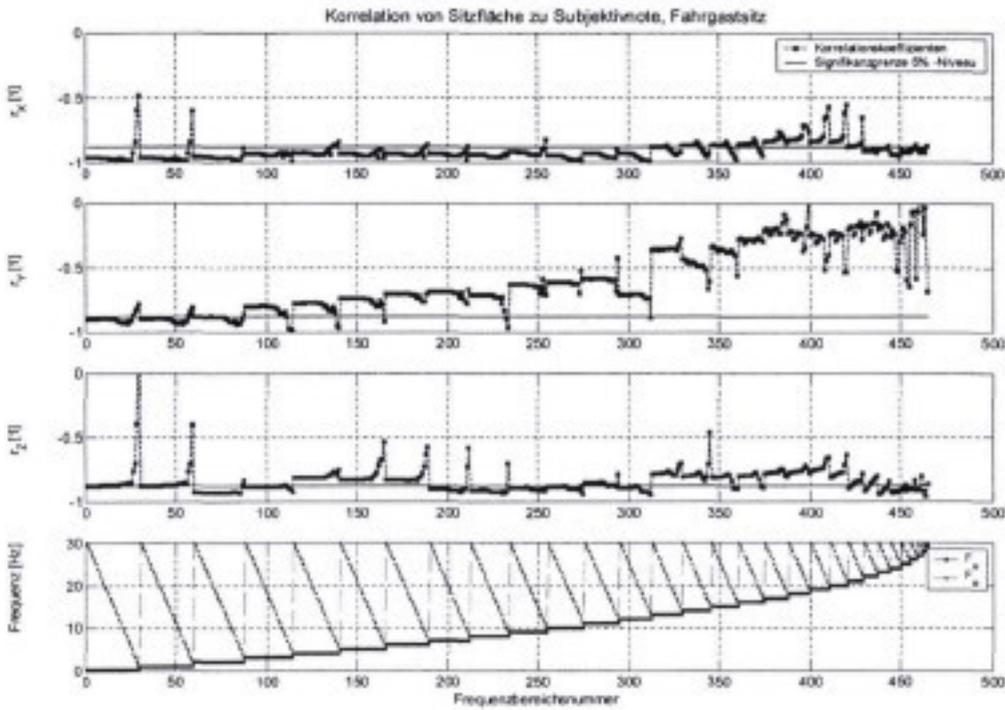


Abbildung 8.53 : Korrelationen der Sitzflächenbeschleunigungen zur Subjektivnote, Fahrgastsitz, Einzelrichtungen

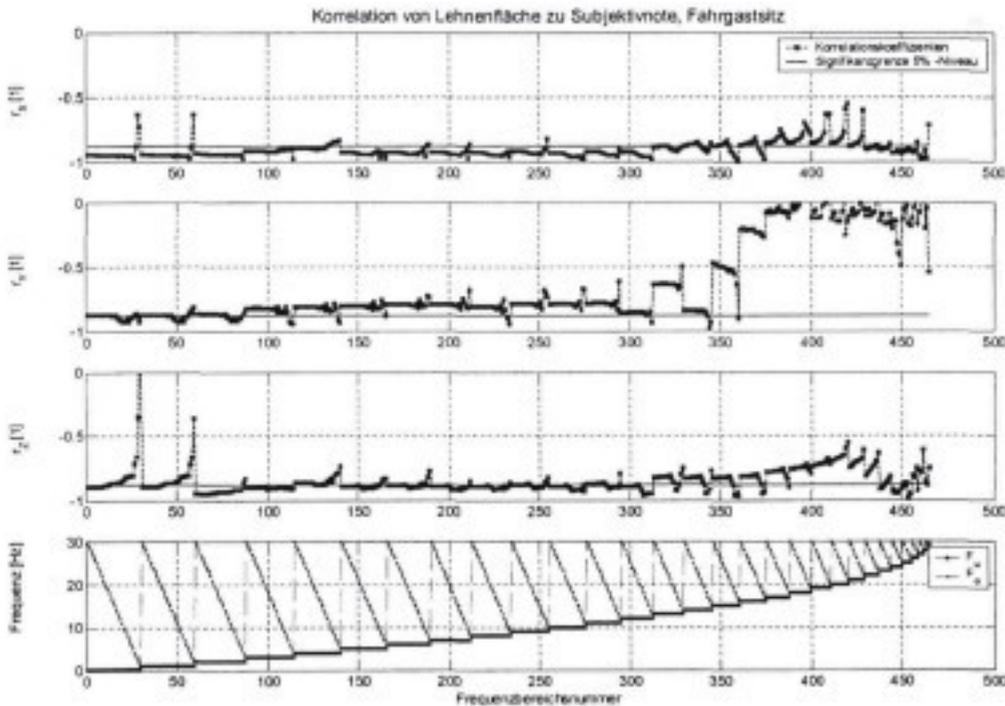


Abbildung 8.54 : Korrelationen der Lehnenflächenbeschleunigungen zur Subjektivnote, Fahrgastsitz, Einzelrichtungen

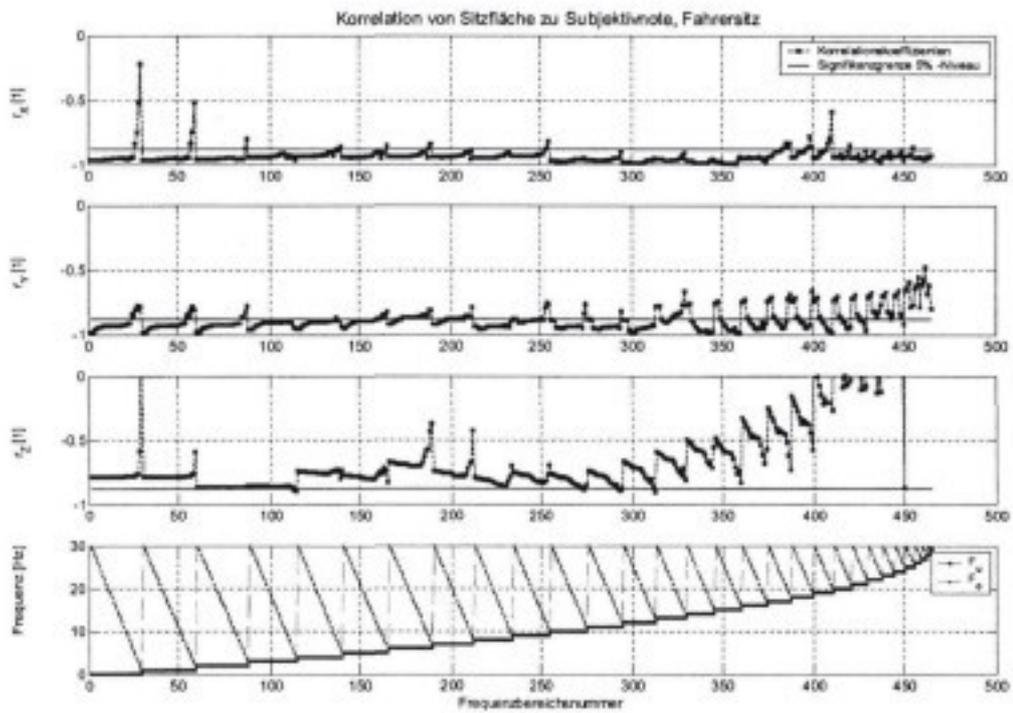


Abbildung 8.55 : Korrelationen der Sitzflächenbeschleunigungen zur Subjektivnote, Fahrersitz, Einzelrichtungen

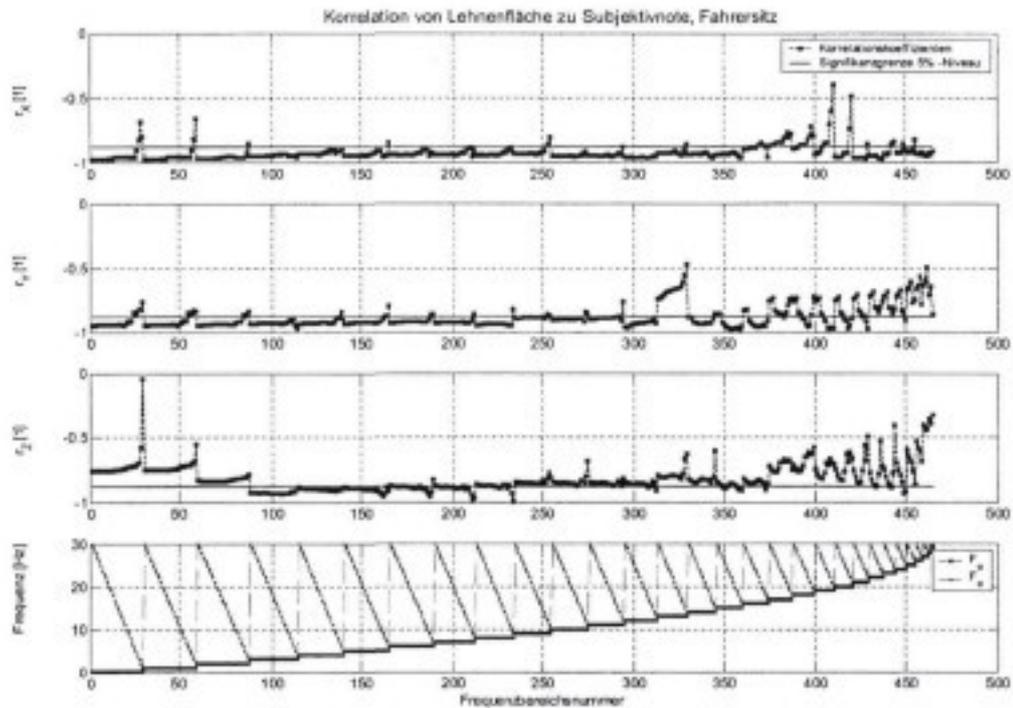


Abbildung 8.56 : Korrelationen der Lehnenflächenbeschleunigungen zur Subjektivnote, Fahrersitz, Einzelrichtungen

In Abbildung 8.57 und Abbildung 8.58 sind für die beiden Sitze die Subjektivnoten über den Beschleunigungseffektivwerten der oben ermittelten Frequenzbereiche für die Messstellen Sitzfläche und Sitzlehne aufgetragen.

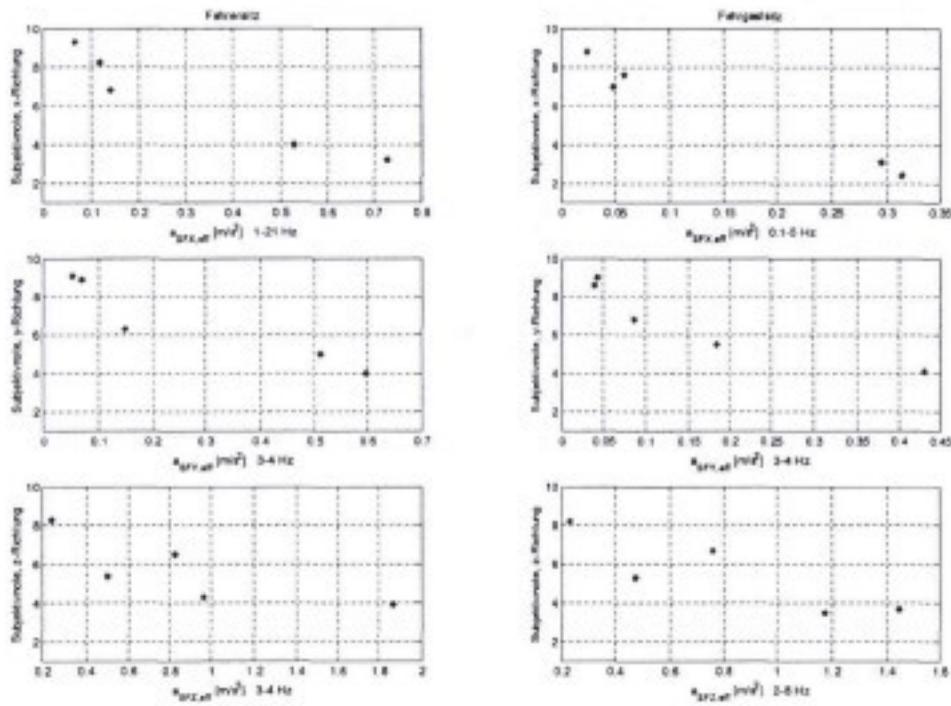


Abbildung 8.57 : Darstellung der Subjektivnoten über ausgewählte Beschleunigungseffektivwerte an der Sitzfläche

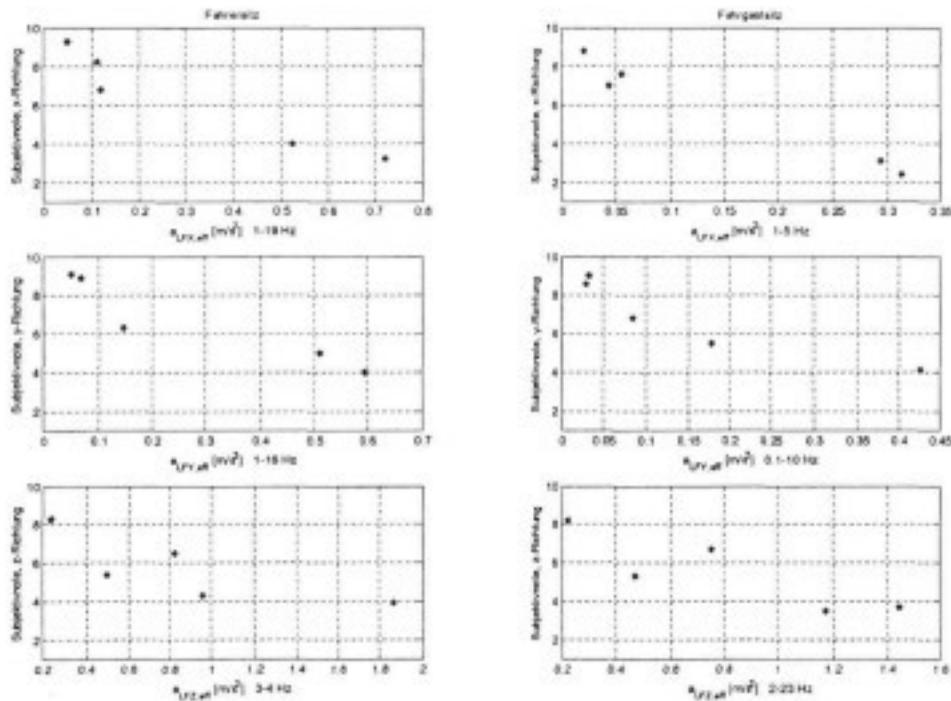


Abbildung 8.58 : Darstellung der Subjektivnoten über ausgewählte Beschleunigungseffektivwerte an der Lehnenfläche

9 Zusammenfassung

Das menschliche Schwingungskomfortempfinden im Fahrzeug ist für das Wohlbefinden und damit für die Zufriedenheit des Kunden mit dem Produkt „Auto“ von zentraler Bedeutung. Für eine zielgerichtete Entwicklung in dieser Hinsicht, ist die Kenntnis des menschlichen Schwingempfindens Voraussetzung. Um diesen Entwicklungsprozess effektiver zu gestalten und den Komfort mittels objektiven Kriterien messen zu können, wird vom Arbeitskreis „Schwingungsdummy“ die Entwicklung eines „Komfortdummys“ angestrebt. Um Informationen über die notwendigen Messgrößen dieses Dummys zu gewinnen sowie entsprechende Objektivierungsmodelle zu entwickeln, wurde vom Institut für Fahrzeugtechnik (IfF) der TU Braunschweig das Schwingkomfortempfinden im Pkw und Nutzfahrzeug (Bus, Kipper) untersucht. Als Basis für das Modell des Schwingungskomforts sollten reale Fahrzeuganregungen dienen. Dazu wurden Fahrversuche mit mehreren Fahrzeugen durchgeführt, mit dem Ziel, repräsentative Anregungen zu ermitteln und subjektive Beurteilungen im Realfahrzeug durchzuführen. Um einen möglichst großen Gültigkeitsbereich für das Modell zu erhalten wurde sowohl bei den Fahrzeugen als auch bei den Fahrbahnoberflächen auf eine große Varianz geachtet. Bei den Pkw-Versuchen wurde jeweils ein Fahrzeug aus der Kleinwagenklasse, unteren Mittelklasse und oberen Mittelklasse verwendet, bei den Nutzfahrzeugen ein Reisebus sowie ein Kipper. Die Fahrversuche wurden jeweils auf einem Testgelände durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass viele verschiedene Straßentypen auf engem Raum vorhanden sind. Dies ist für die Qualität der Subjektivbewertung und damit des Modells von großer Wichtigkeit. Durch eine gute Abstufung der Anregungsstärke und einem auf kurze Pausen zwischen den Bewertungsereignissen optimierten Versuchsablauf konnten optimale Voraussetzungen für hohe Korrelationen geschaffen werden. Für die Subjektivbewertung der Schwingungsereignisse wurden bei den Fahrversuchen mehrere Fragebögen verwendet, mit denen zum einen ein Gesamturteil für das Schwingempfinden abgefragt wurde und zum anderen nach Art und Ort der besonders störend empfundenen Schwingungen. Mit den Gesamtnoten für das Diskomfortempfinden wurden hohe Korrelationen mit objektiven, schwingungsbeschreibenden Kennparametern in Form von Beschleunigungseffektivwerten in verschiedenen Frequenzbereichen erzielt. Mit diesen Kennparametern wurden Regressionsmodelle ermittelt, die die Subjektivbeurteilungen mit hoher Genauigkeit abbilden. Bei der Anwendung dieser Modelle ist jedoch darauf zu achten, dass sie nur in den Grenzen ihrer Bildung zugrunde liegenden Anregungen gültig sind. Das gilt zum einen für die Werte der in das Modell eingehenden Parameter als auch für die spektrale Zusammensetzung der Anregungen.

Die Fragestellungen nach spezifischeren Schwingungsempfindungen führten zu wenig einheitlichen Ergebnissen mit großen Streuungen, so dass hieraus keine zusätzlichen Erkenntnisse gewonnen werden konnten. Dies lässt den Schluss zu, dass die an den Versuchen teilgenommenen Probanden aus der Gruppe der „normalen“ Fahrer den Diskomfort bzw. eine Diskomfortänderung im Wesentlichen als Gesamtzustand empfunden haben und dies aber weitestgehend gleich. Eine Spezifizierung der Ursachen fiel jedoch augenscheinlich sehr schwer und ist mit großer Unsicherheit verbunden.

Nach Abschluss der Fahrversuche wurden die Versuche auf einen mehraxialen servohydraulischen Sitzprüfstand des IfF übertragen. Zu Beginn des Projektes existierte ein triaxialer Prüfstand, der die Fahrzeugbewegungen in x-, y- und z-Richtung nachbilden konnte. Im Laufe des Projektes wurde ein zweiter Prüfstand entwickelt und gebaut, der zusätzlich zu den drei translatorischen Richtungen einen rotatorischen Freiheitsgrad aufweist. Dieser kann entweder für die Nick- oder Wank-Anregung verwendet werden. Aus den Fahrversuchen wurden einige Sitzschienenbeschleunigungen ausgewählt und auf den Prüfstand übertragen, um dort weitere Versuche durchzuführen. Dazu wurden bei den Pkw-Versuchen auf der Prüfstandsplattform jeweils zwei der drei Sitze mit Lenkrad und Pedalattrappe gemäß der original Packagemaße gleichzeitig aufgebaut. Dies ermöglichte im Gegensatz zu den Fahrversuchen bei gleicher

Sitzschienenanregung den direkten Vergleich der Sitze. Dazu wurde zum einen nach einer Note für das Gesamtempfinden gefragt und zum anderen nach Noten für einzelne Körperteile. Wie auch bei den Fahrversuchen ergaben sich hier hohe Korrelationen bei den Noten für das Gesamtempfinden, während sich bei der Körperteilbewertung keine differenzierten Aussagen ergeben haben. Die Mehrheit der Versuchspersonen, darunter auch zwei Vertreter der Nutzfahrzeughersteller, konnte keine großen Unterschiede bezüglich des Diskomfortempfindens in den verschiedenen Körperbereichen feststellen.

Beim direkten Vergleich der Sitze hat sich herausgestellt, dass die verschiedenen Straßen- bzw. Fahrzeuganregungen gut und systematisch unterschieden werden konnten, nicht jedoch die Sitze in Bezug auf ihr dynamisches Verhalten. Focus- und Corsa-Sitz weisen in der für das Subjektivempfinden dominanten z-Richtung ein fast identisches Übertragungsverhalten auf und werden auch in etwa gleich bewertet. Der E-Klasse-Sitz wird im Schnitt leicht besser bewertet als die beiden anderen Sitze, jedoch scheint dies bei genauerer Analyse nicht allein durch das dynamische Verhalten erklärbar zu sein.

10 Literatur

- [1] Basler, H., Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistischen Methodenlehre, Heidelberg, Wien : Physica-Verlag 1986

- [2] Chatterjee, S., Price, B., Praxis der Regressionsanalyse, München, Wien : R. Oldenbourg Verlag, 1995

- [3] FAT-Arbeitskreis Schwingungsdummy: Lastenheft: Entwicklung eines Dummys zur Beurteilung des Schwingungskomforts von Fahrzeugsitzen, Stand 15.7.1999

- [4] Griffin, M.J., Handbook of Human Vibrations, Academic Press 1990, London

- [5] M. Heckl, Taschenbuch der Technischen Akustik, 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 1995

- [6] R. Kaiser, Elementare Tests zur Beurteilung von Messdaten
G. Gottschalk, Bibliographisches Institut Mannheim /Wien/Zürich 1972

- [7] Mitschke, M., Dynamik der Kraftfahrzeuge, Band B. Schwingungen Berlin: Springer-Verlag., 1984

- [8] Urban, D., Regressionstheorie und Regressionstechnik, Stuttgart: B.G. Teubner, 1982

11.4 Sitzschienenbeschleunigungen Pkw-Versuche

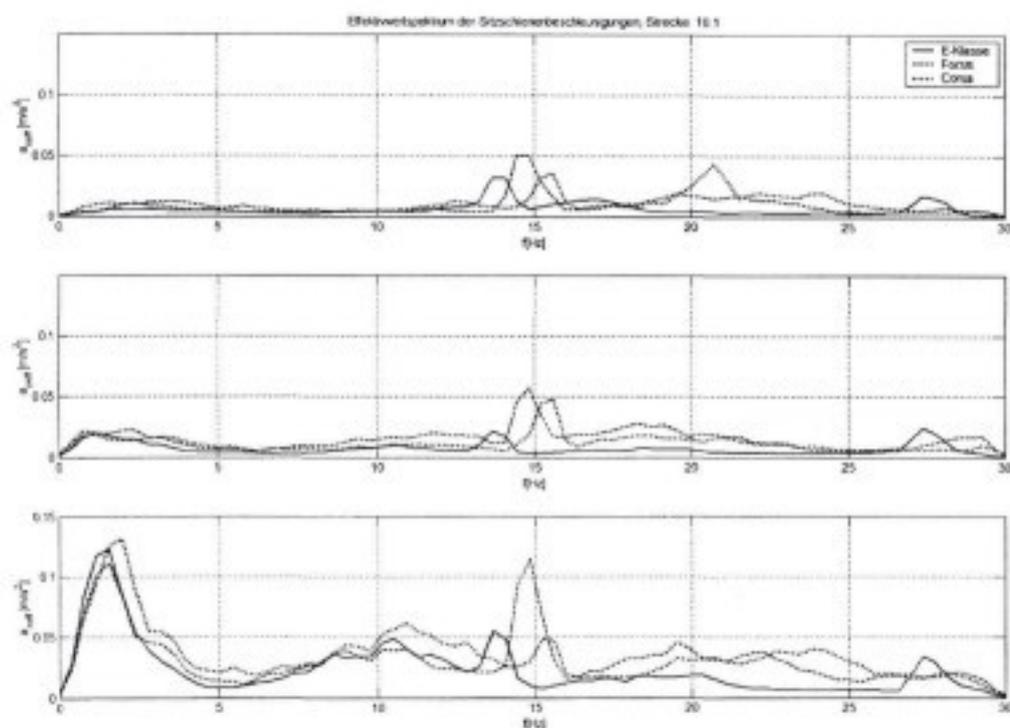


Abbildung 11.10 : Effektivwertspektrern der Sitzschienenbeschleunigungen Pkw, Strecke 10.1

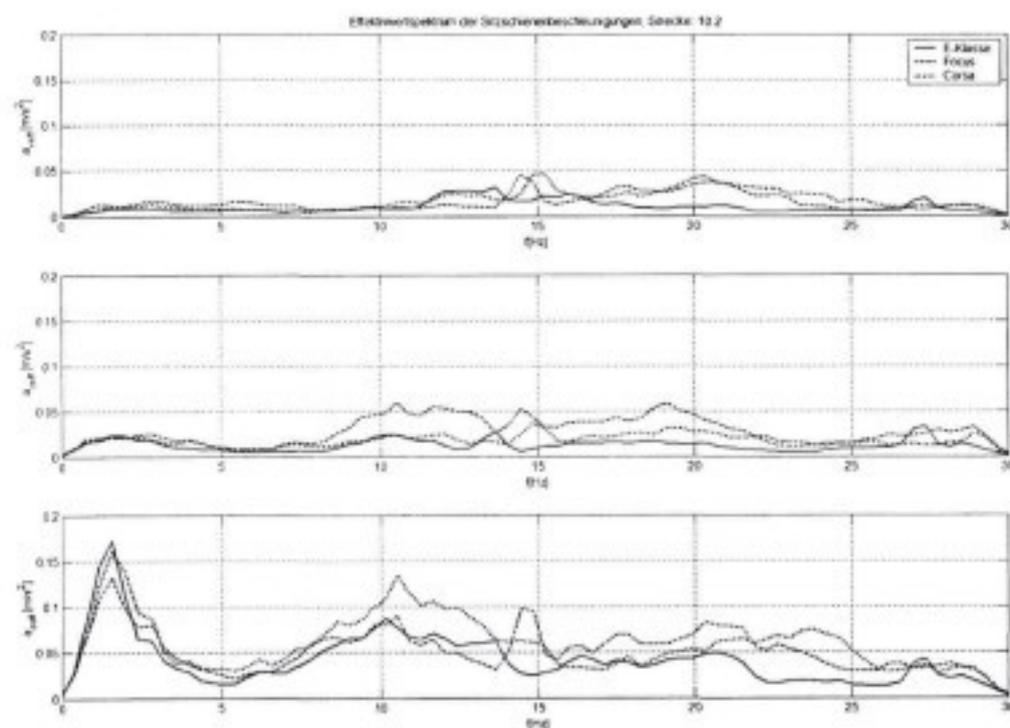


Abbildung 11.11 : Effektivwertspektrern der Sitzschienenbeschleunigungen Pkw, Strecke 10.2

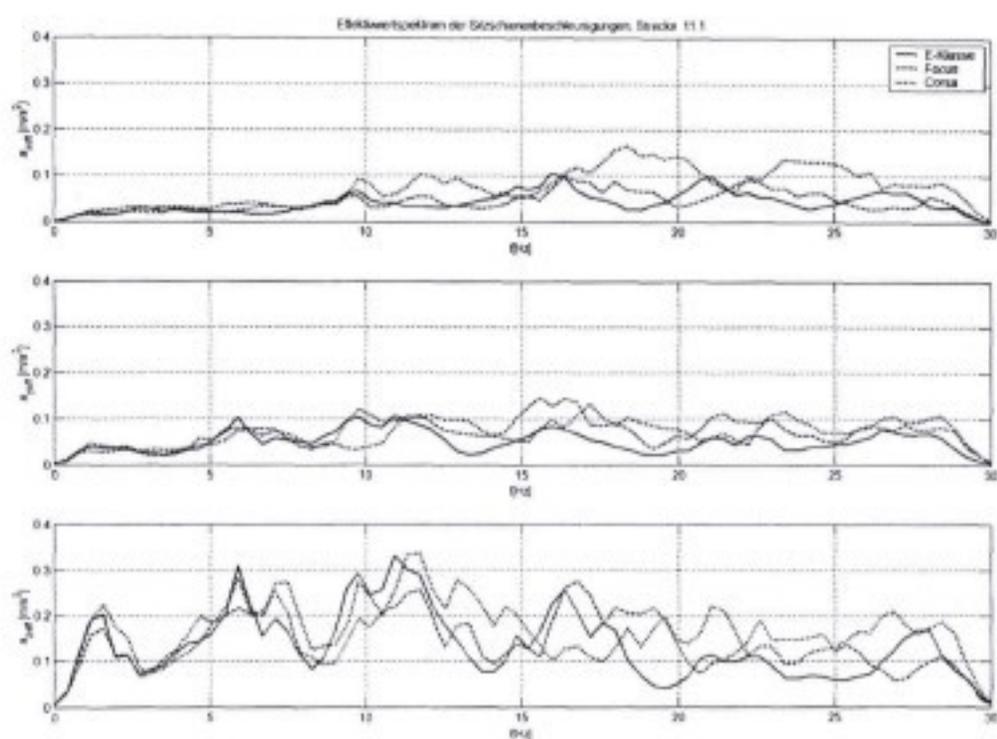


Abbildung 11.12 : Effektivwertspektren der Sitzschienenbeschleunigungen Pkw, Strecke 11.1

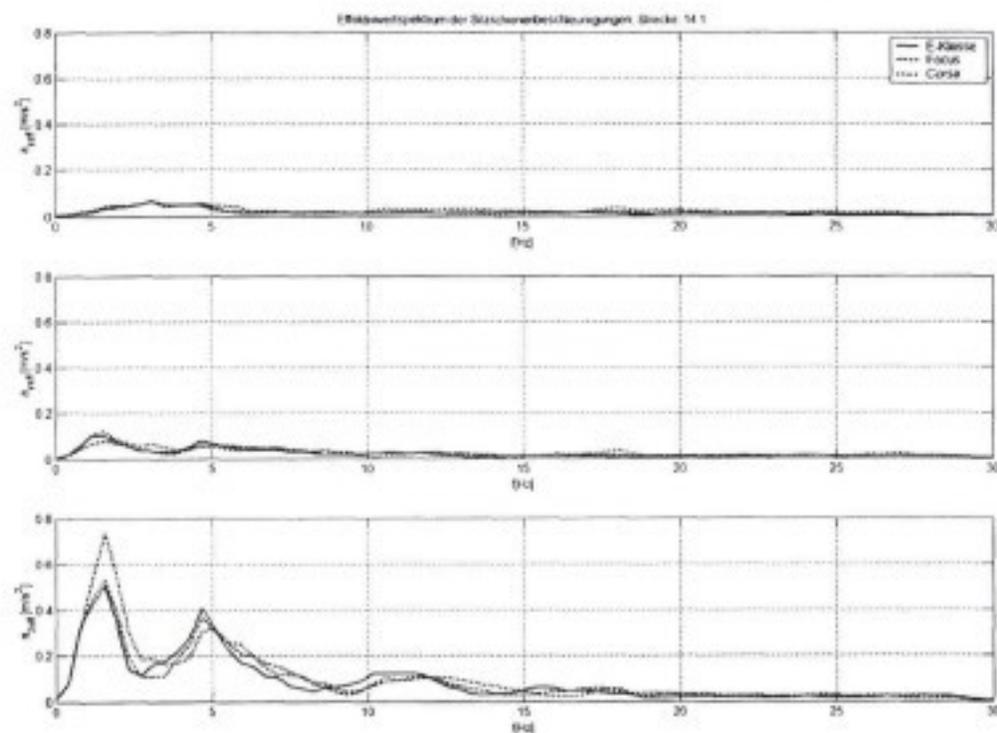


Abbildung 11.13 : Effektivwertspektren der Sitzschienenbeschleunigungen Pkw, Strecke 14.1

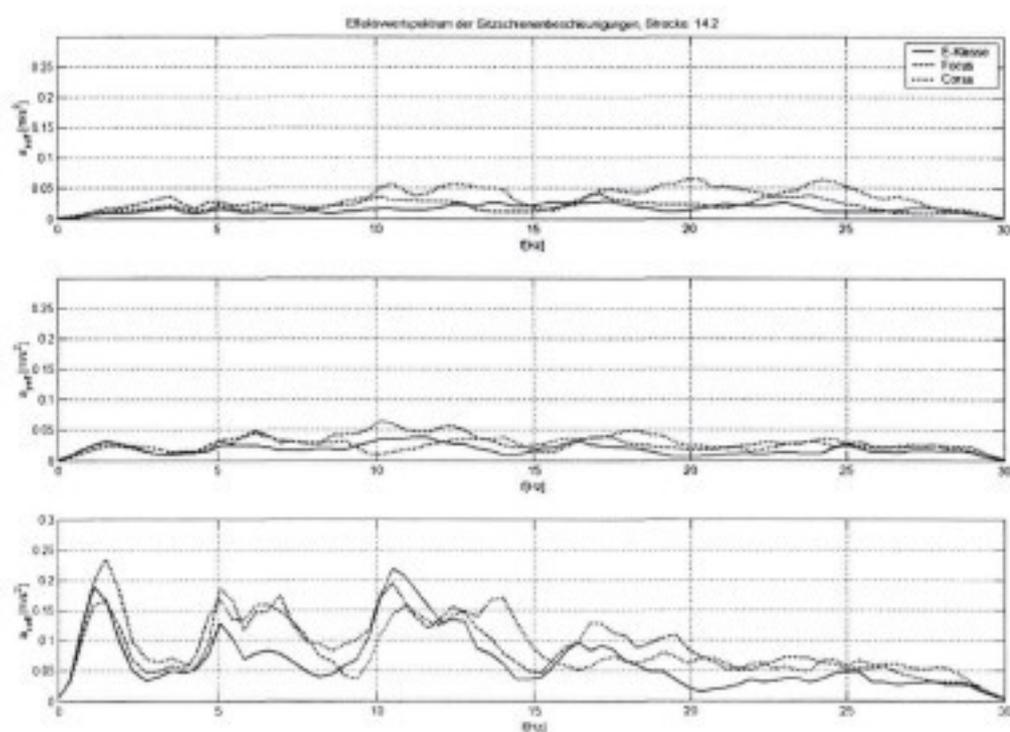


Abbildung 11.14 : Effektivwertspektren der Sitzschienenbeschleunigungen Pkw, Strecke 14.2

11.5 Sitzkonsolenbeschleunigungen Nutzfahrzeuge

Beschleunigungseffektivwertspektren in x-, y-, z-Richtung an der Sitzkonsole (Befestigung des Sitzsitzes an der Fahrzeugkarosserie)

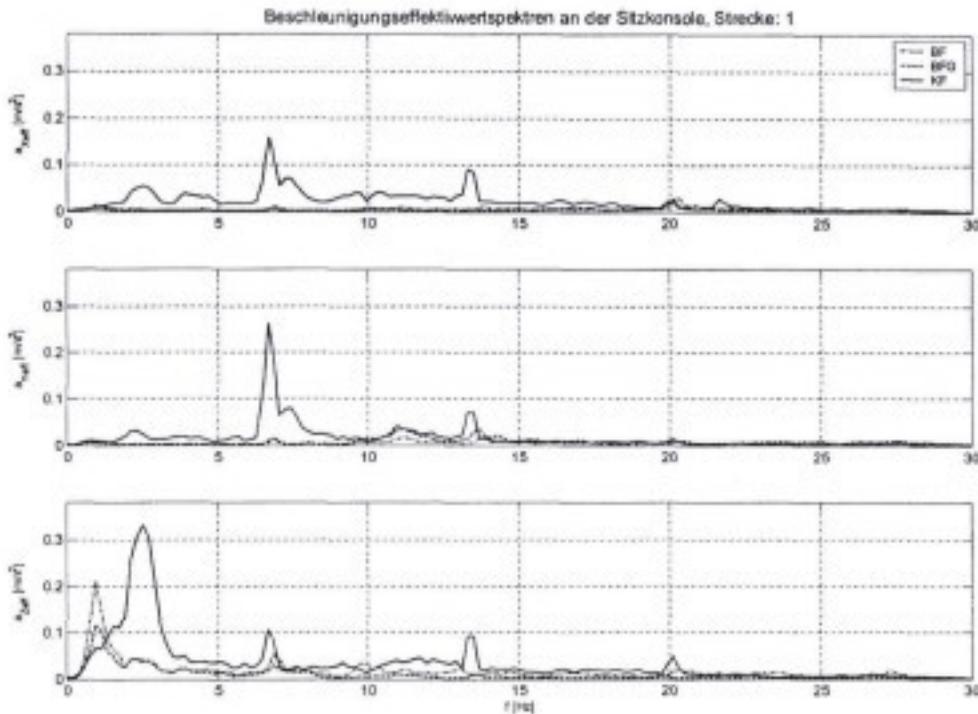


Abbildung 11.15 : Effektivwertspektren der Sitzkonsolenbeschleunigungen Nfz, Strecke 1

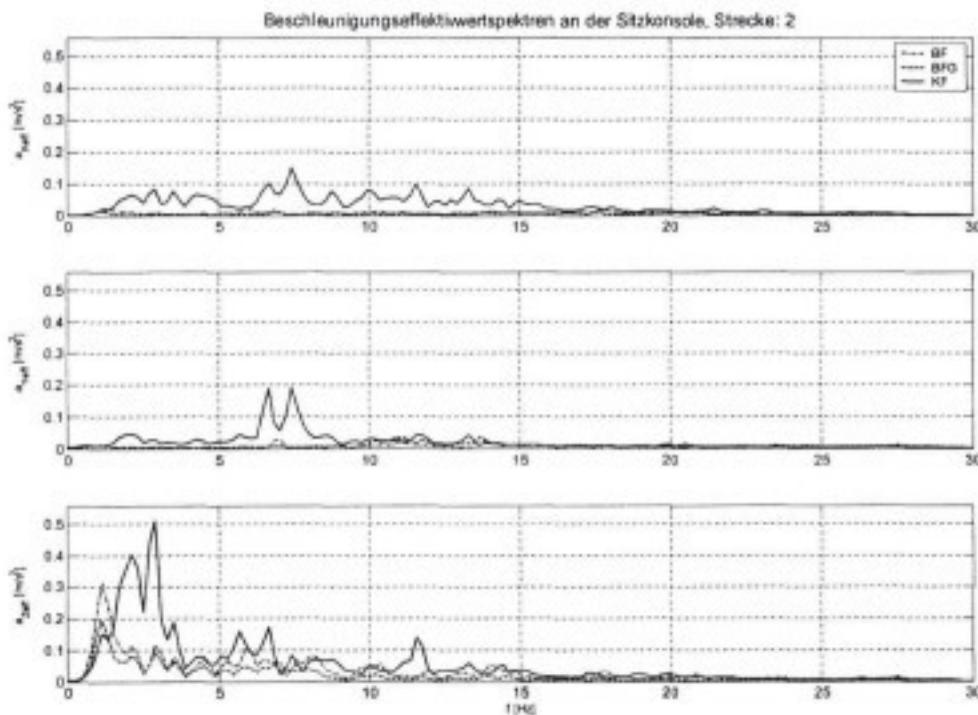


Abbildung 11.16 : Effektivwertspektren der Sitzkonsolenbeschleunigungen Nfz, Strecke 2

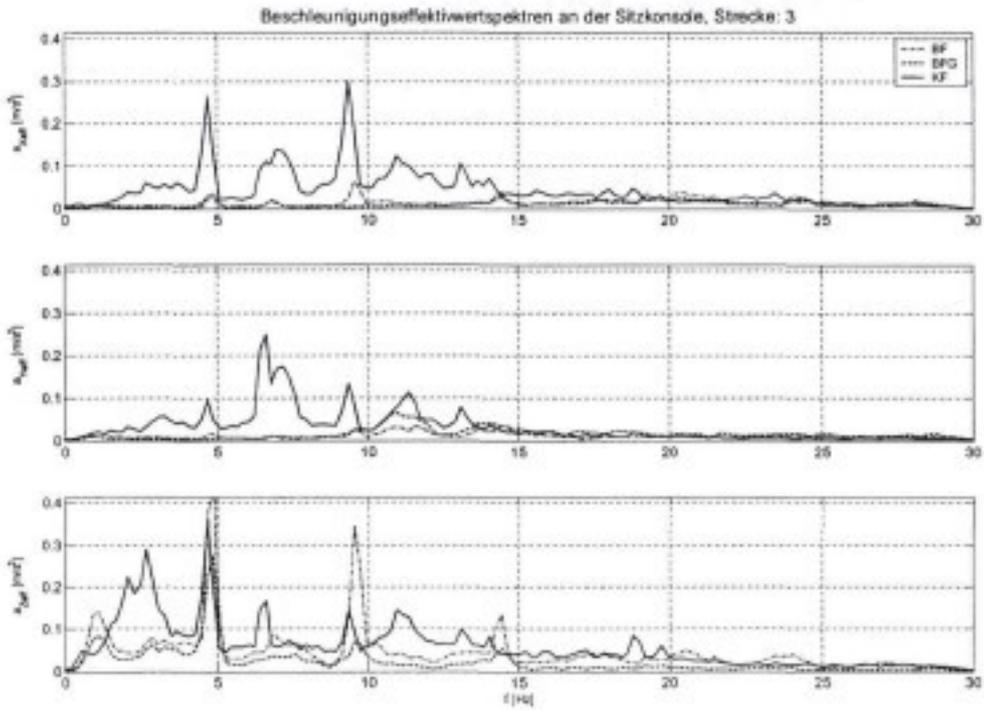


Abbildung 11.17 : Effektivwertspektren der Sitzkonsolenbeschleunigungen Nfz, Strecke 3

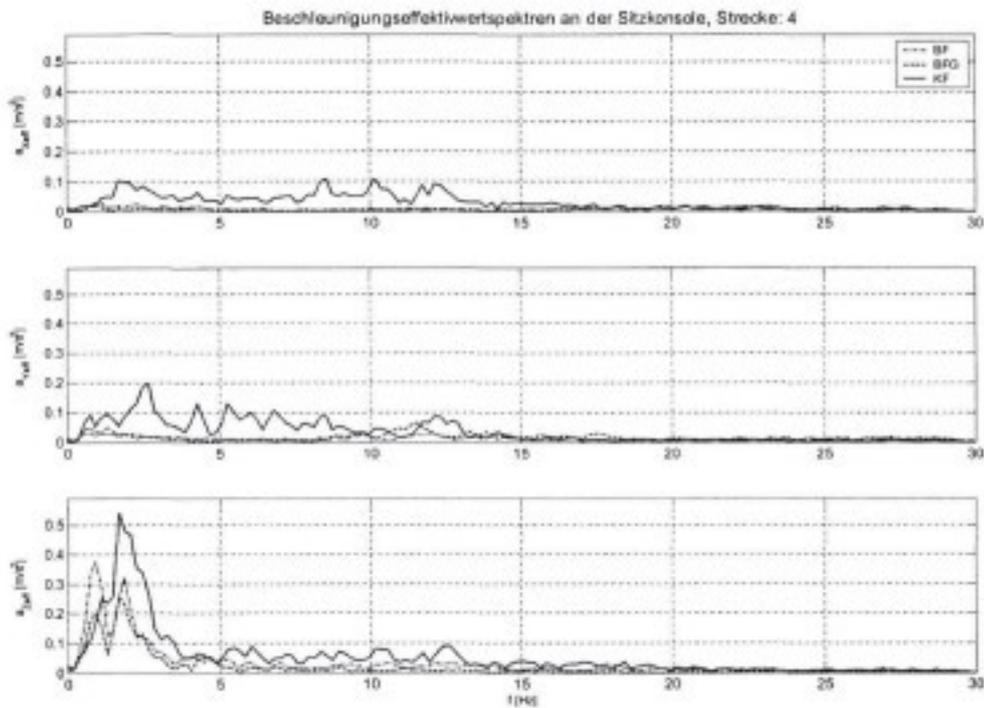


Abbildung 11.18 : Effektivwertspektren der Sitzkonsolenbeschleunigungen Nfz, Strecke 4

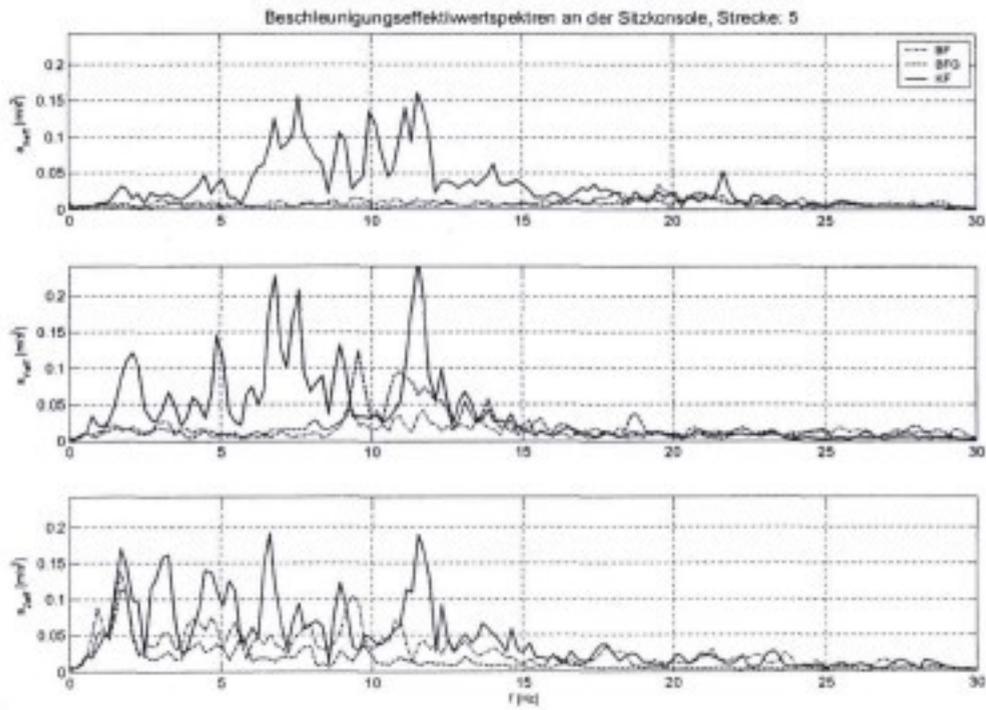


Abbildung 11.19 : Effektivwertspektren der Sitzkonsolenbeschleunigungen Nfz, Strecke 5

11.6 Sitzübertragungsfunktionen Pkw

In den folgenden Abbildungen sind die Verhältnisse der Beschleunigungsamplituden auf der Sitzfläche zur Sitzschiene dargestellt. Die Messungen wurden auf dem Prüfstand mit einer männlichen Person des 50. Perzentils bei kombinierter Anregung in x-, y-, z- und Wankrichtung durchgeführt. Es sind jeweils drei Messungen für jeden Sitz eingetragen. Um den Einfluss der Anregung auf das Übertragungsverhalten deutlich zu machen, sind die Verhältnisse für alle 5 Prüfstandsanregungen dargestellt.

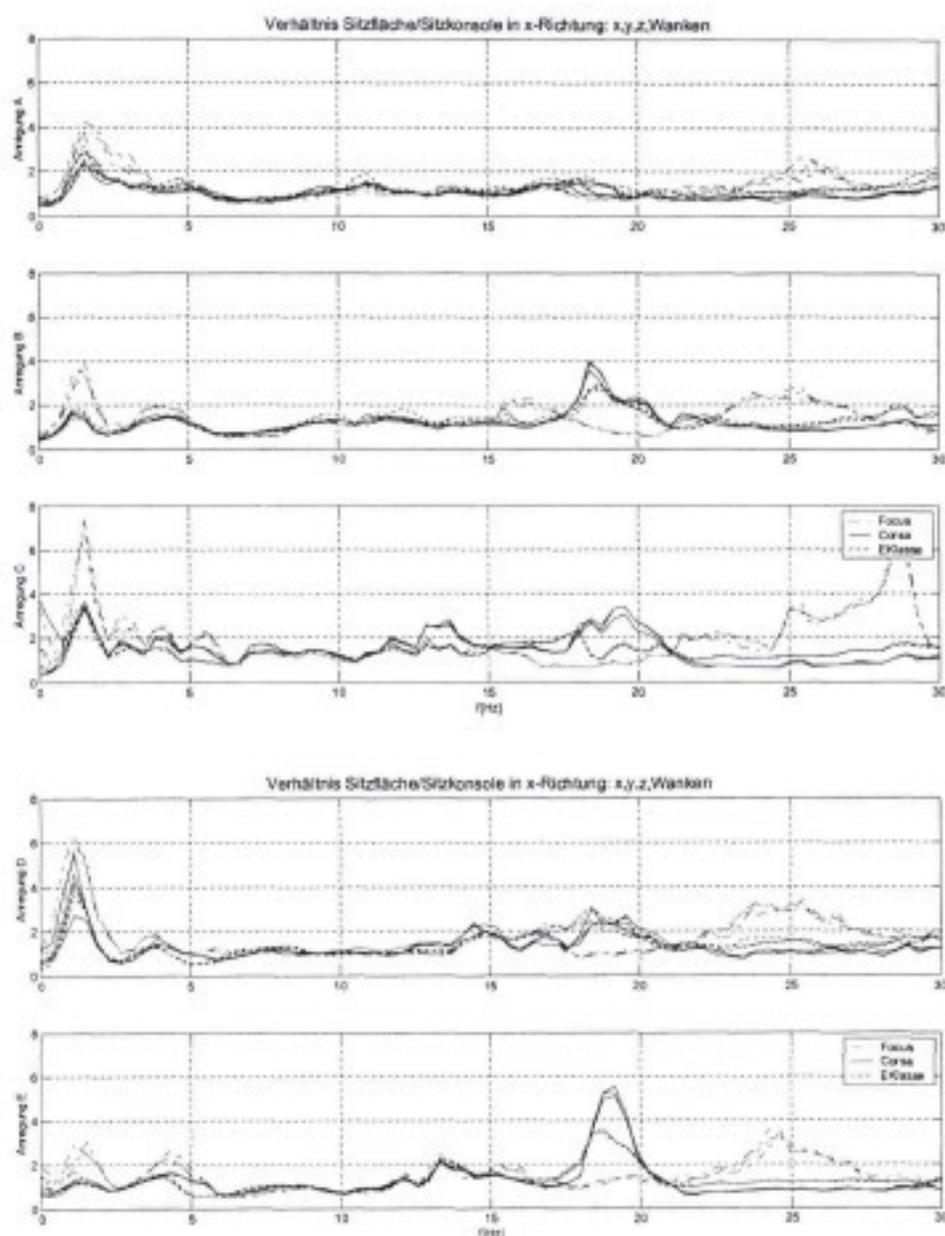


Abbildung 11.20 : Sitzübertragungsfunktionen in x-Richtung, Pkw

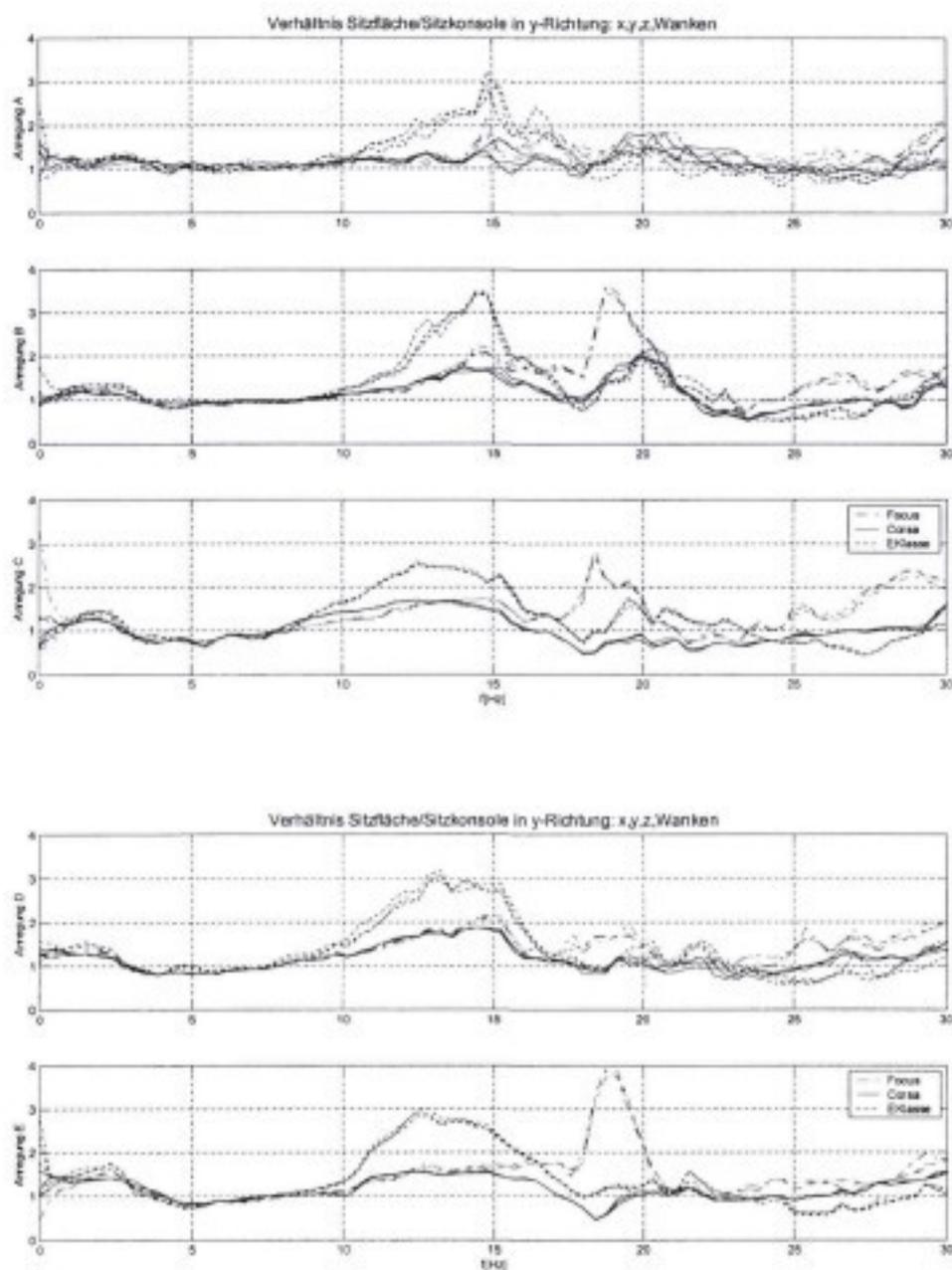


Abbildung 11.21 : Sitzübertragungsfunktionen in y-Richtung, Pkw

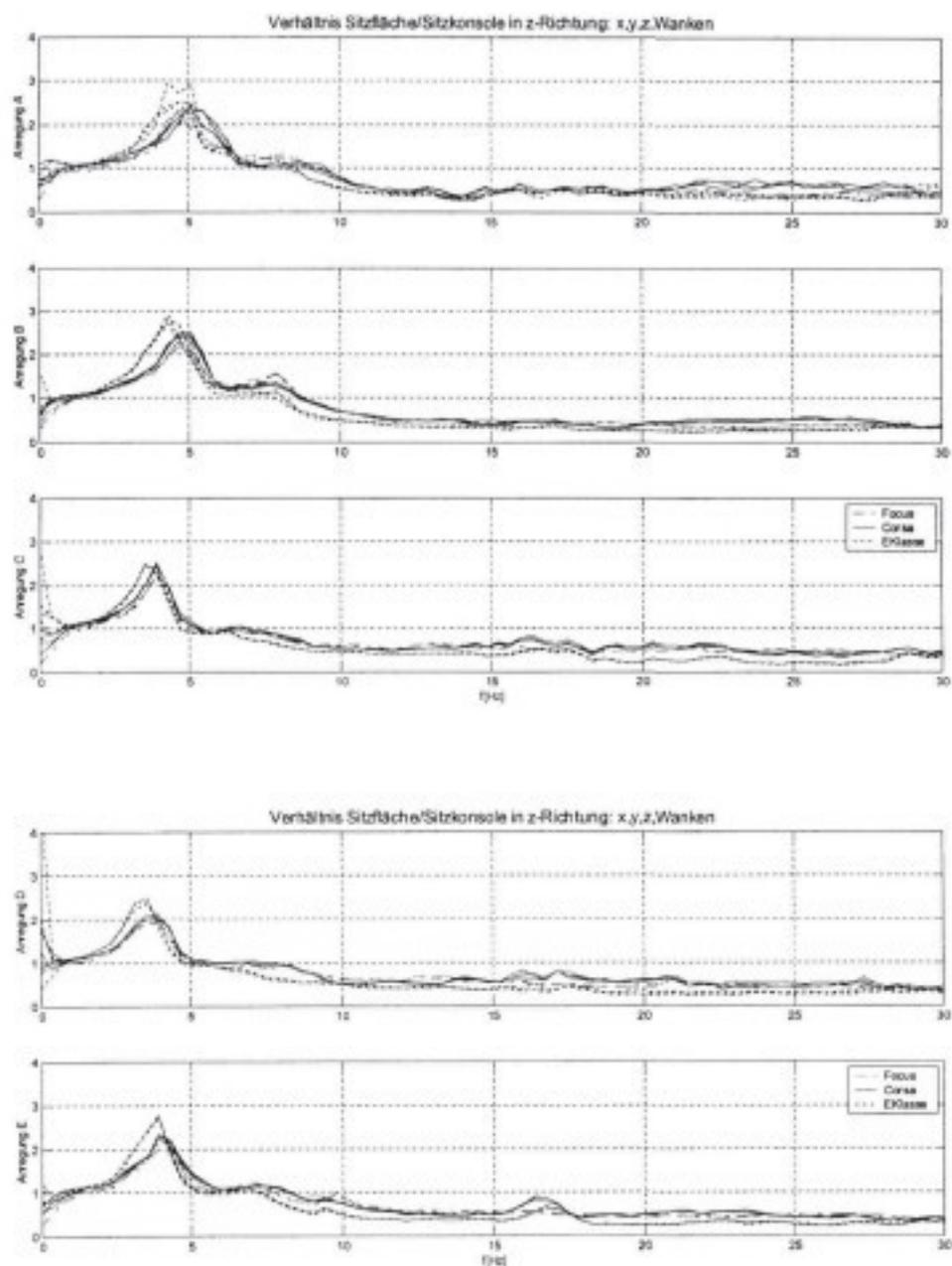


Abbildung 11.22 : Sitzübertragungsfunktionen in z-Richtung, Pkw

11.7 Sitzübertragungsfunktionen Nfz

In den folgenden Abbildungen sind die Verhältnisse der Beschleunigungsamplituden auf der Sitzfläche zur Sitzkonsole dargestellt. Die Messungen wurden auf dem Prüfstand mit einer männlichen Person des 50. Perzentils bei jeweils einaxialer Anregung durchgeführt. Es sind jeweils drei Messungen für jeden Sitz eingetragen. Um den Einfluss der Anregung auf das Übertragungsverhalten deutlich zu machen, sind die Verhältnisse für alle 5 Prüfstandsanregungen dargestellt. Beim Fahrersitz ist bei der z-Richtung gut zu erkennen, dass bei Anregung A die Schwingungstärke nicht ausreicht, um die Reibung im Feder-Dämpfersystem zu überwinden. Dies geschieht erst bei Anregung B.

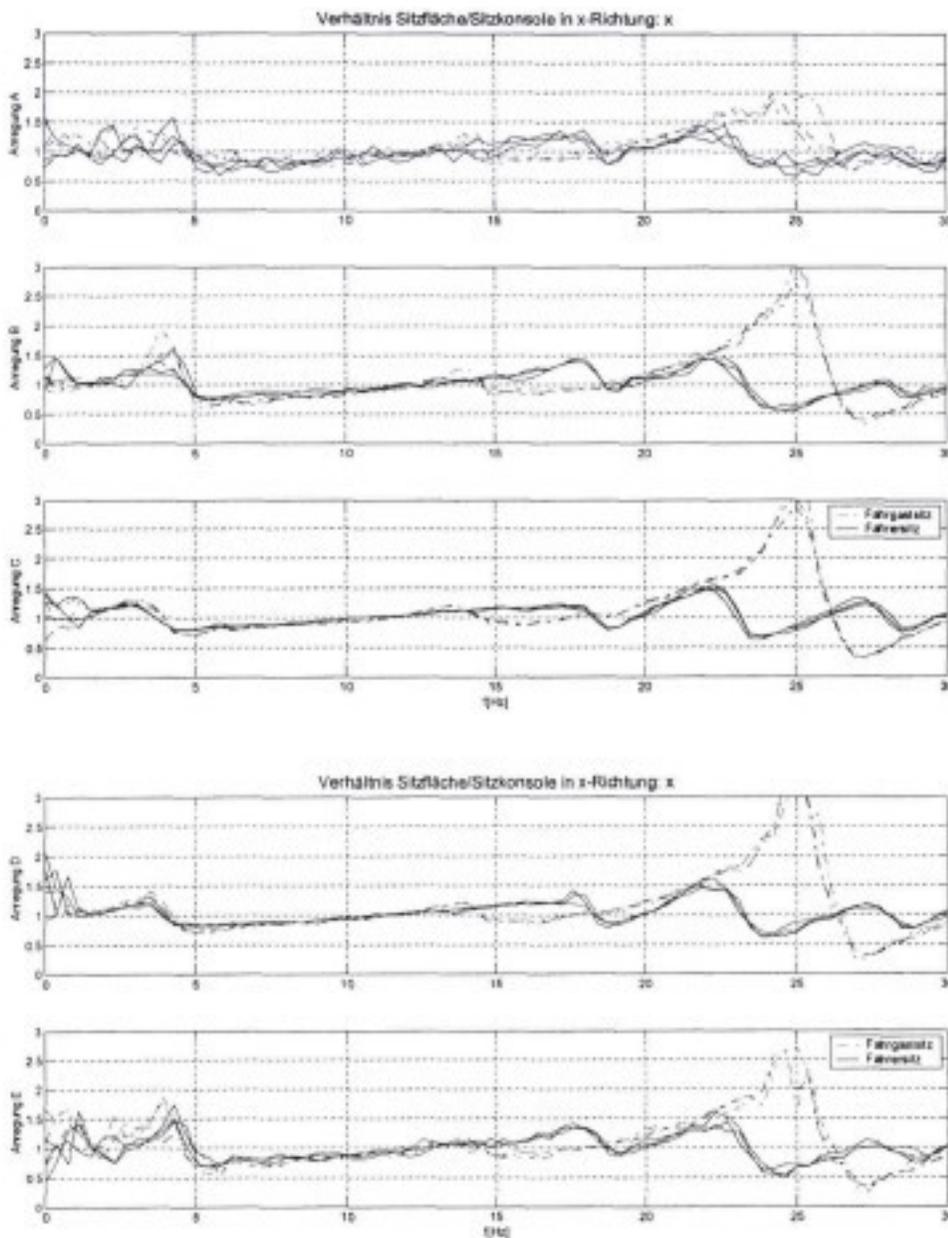


Abbildung 11.23 : Sitzübertragungsfunktionen in x-Richtung, Nfz

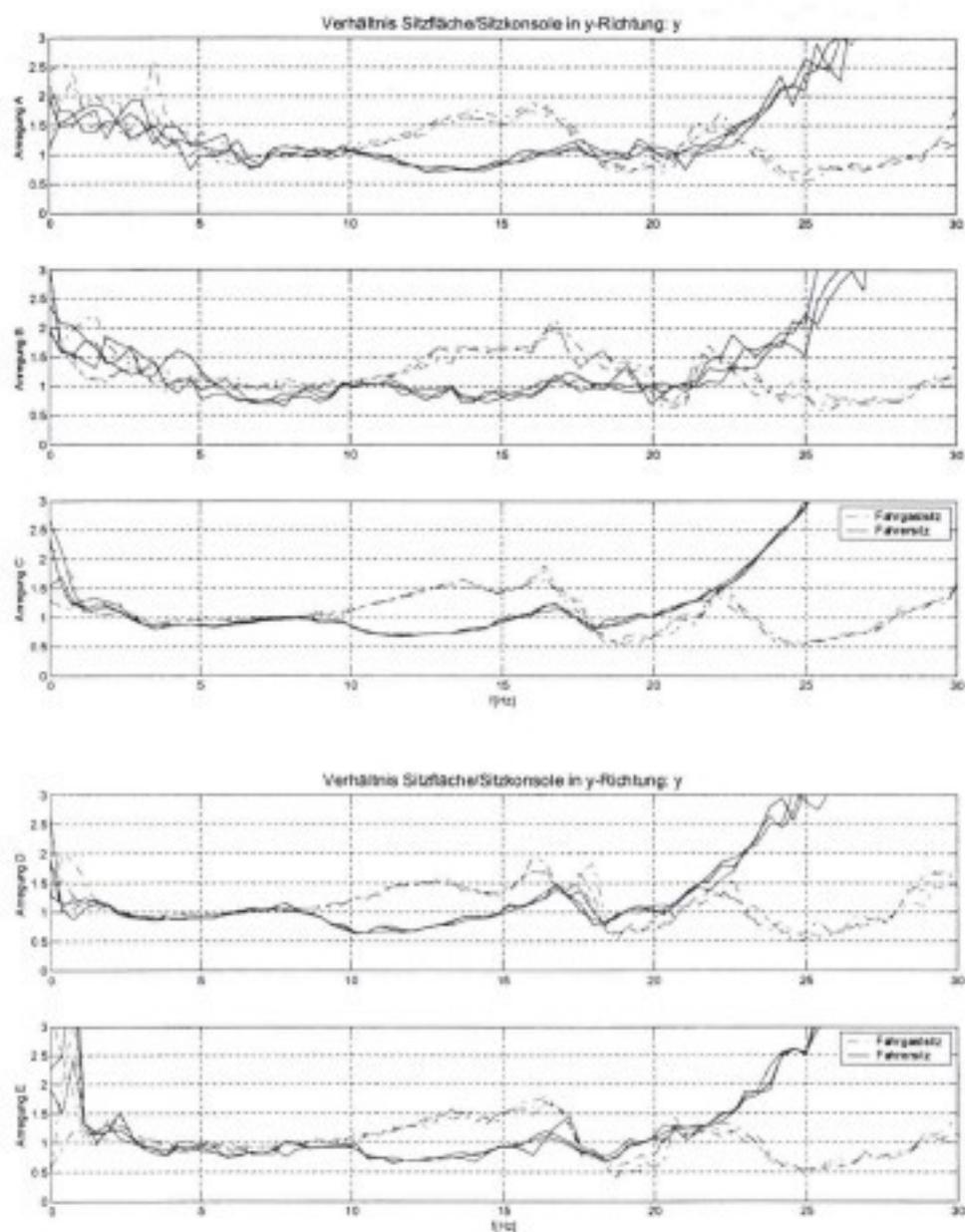


Abbildung 11.24 : Sitzübertragungsfunktionen in y-Richtung, Nfz

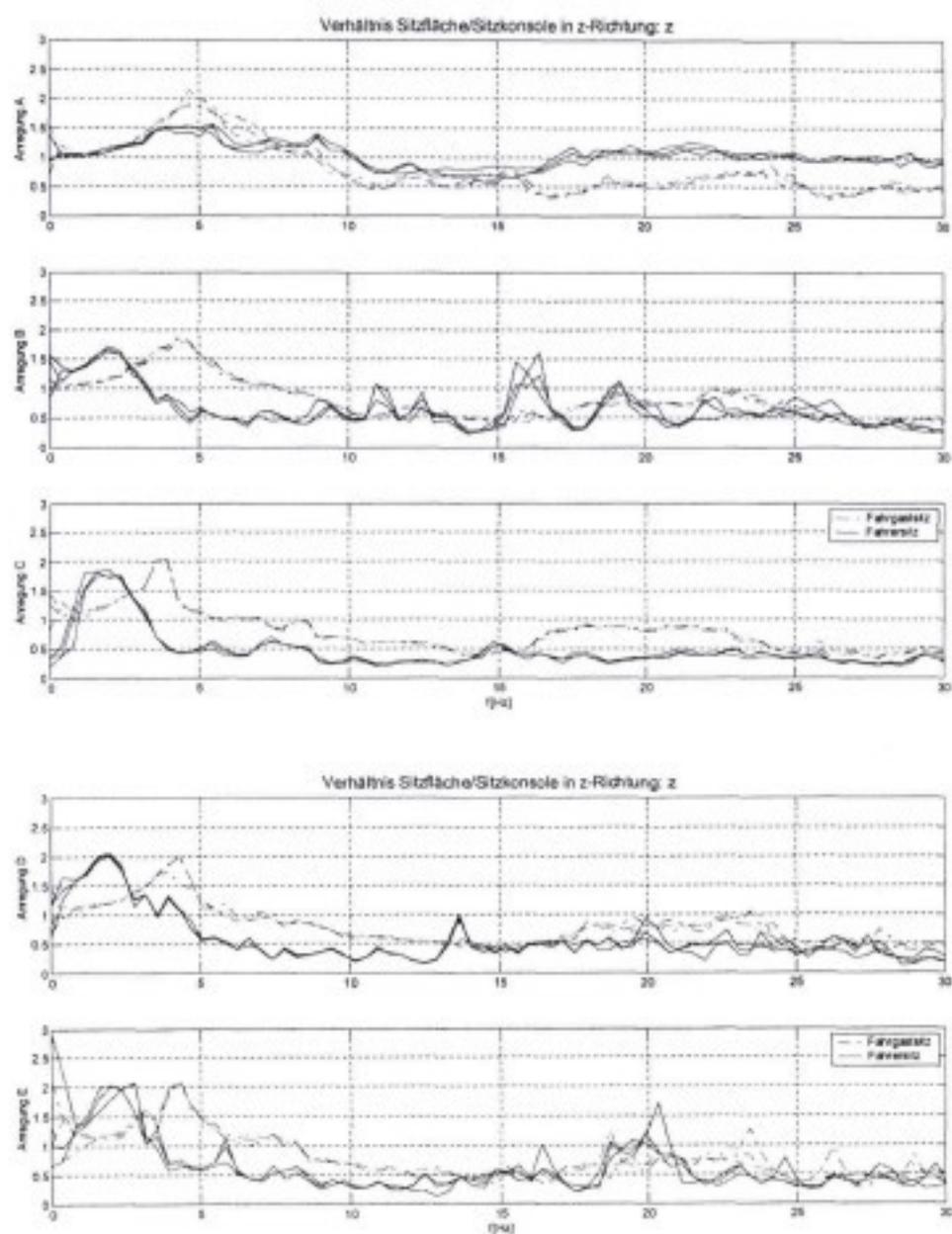


Abbildung 11.25 : Sitzübertragungsfunktionen in z-Richtung, Nfz

Zusammenhang zwischen statischem und dynamischem Sitzempfinden

Author: Thorsten Bitter, Institut für Fahrzeugtechnik der TU-Braunschweig
Jürgen Hartung, Lehrstuhl für Ergonomie der TU-München

1 Einleitung

Im Rahmen des Projektes war es geplant ein gemeinsames Regressionsmodell für den Diskomfort resultierend aus dem statischen Sitzkomfort und dem Schwingungskomfort herzuleiten.

Die im Laufe des Projektes gefunden Erkenntnisse und notwendigen Wandlungen in der Vorgehensweise in diesen beiden Teilprojekten machten es unmöglich ein gemeinsames Regressionsmodell aufzustellen (vgl. Abbildung 1.1). Da allerdings ein reges Interesse besteht die Beziehungen zwischen dem statischen und dem dynamischen Sitzempfindens näher zu untersuchen, wurde eine zusätzliche Versuchsreihe durchgeführt, die im Folgenden näher beschrieben wird.

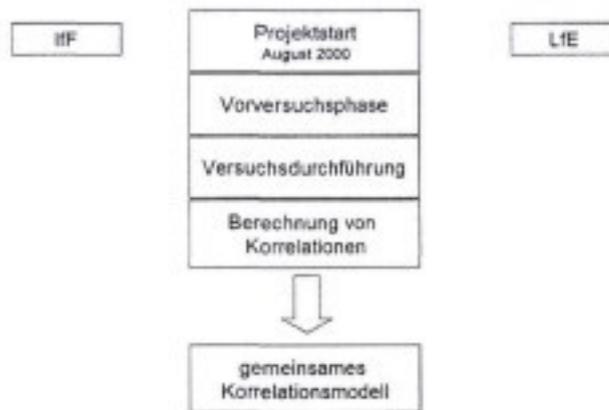


Abbildung 1.1 : geplante Vorgehensweise



Abbildung 1.2 : Vorgehensweise aufgrund neu gewonnener Erkenntnisse (mit X gekennzeichnete Schritte waren nicht erfolgreich und es musste eine Modifikation des Konzeptes durchgeführt werden).

2 Versuchskonzept

Es wird angenommen, dass das subjektive Sitzempfinden sich aus einem statischen und einem dynamischen Anteil zusammensetzen lässt. Der statische Anteil sollte bei keiner oder geringer Anregung dominant sein. Mit zunehmender Anregung sollte sich der Schwerpunkt des subjektiven Empfindens auf den dynamischen Anteil verlagern.

Bei einer Befragung von Versuchspersonen, ob das statische oder das dynamische Sitzempfinden überwiegt, ist zu erwarten, dass mit zunehmenden Schwingungen ebenfalls die Entscheidungen der Versuchspersonen, was dominant ist, zugunsten des dynamischen Sitzempfindens zunehmen. Bei keiner Schwingungsanregung ist zu erwarten, dass das statische Sitzempfinden dominant ist. Weiterhin ist zu erwarten, dass ab einer bestimmten Anregung 100% der Versuchspersonen das dynamische Sitzempfinden als dominant ansehen. Dazwischen ist ein Übergangsbereich zu erwarten. Eine ähnliche Versuchsmethodik wurde bereits in anderen Gebieten des subjektiven Empfindens angewendet. In Abbildung 2.1 ist der prinzipielle Verlauf, der als Ergebnis der Befragung erwartet wird.

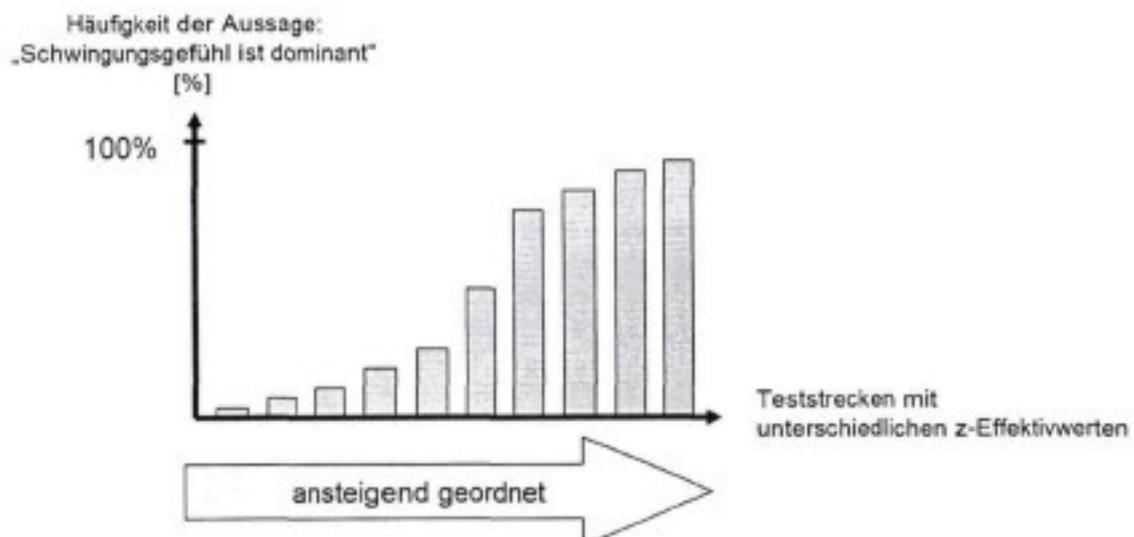


Abbildung 2.1 : Erwarteter prinzipielles Ergebnis der Befragung

Durch Einführung bestimmter Grenzhäufigkeiten lassen sich die Antworten dann in die Bereiche „statisches Sitzempfinden dominant“, „Übergangsbereich“ und „dynamisches Sitzempfinden dominant“ separieren.

3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden auf dem Sitzprüfstand des Instituts für Fahrzeugtechnik (IfF) durchgeführt. Für die Untersuchungen wurden der Focus-Sitz und der E-Klasse-Sitz verwendet und parallel auf dem Prüfstand montiert.

3.1 Versuchsvorbereitung

Als Schwingungsanregungen wurden die fünf mehraxialen Anregungen A-n, B-n, C-n, D-n, E-n aus dem Versuchsprogramm für die Schwingungsuntersuchungen ausgewählt. Für die Versuchspersonen wurden die Anregungen mit den Abkürzungen V1 bis V6 bezeichnet. Tabelle 3.1 zeigt die entsprechende Zuordnung.

Versuchsbezeichnung	Prüfstandsanregung
V1	A-n
V2	B-n
V3	C-n
V4	D-n
V5	E-n
V6	E-n mit verstärkter z-Richtung, s. unten

Tabelle 3.1 : Abkürzungen der Versuchsbezeichnungen

Bei den Versuchen zur Schwingungsbewertung wurde ermittelt, dass der auf der Sitzfläche gemessene Beschleunigungseffektivwert in z-Richtung im Bereich von 1-17 Hz am höchsten mit dem Subjektivurteil für das Schwingkomfortempfinden korreliert. Daher wurde in einem Vorversuch mit 6 Versuchspersonen auch dieser Parameter für die Ermittlung der Übergangsgrenze der Relevanz vom statischen zum dynamischen Sitzkomfort für das Gesamtempfinden verwendet. Dieser Ansatz hat für die Vorversuche gute Ergebnisse geliefert und wurde daher für die weiteren Versuche als Basis angesetzt. Das Ergebnis der Vorversuche ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

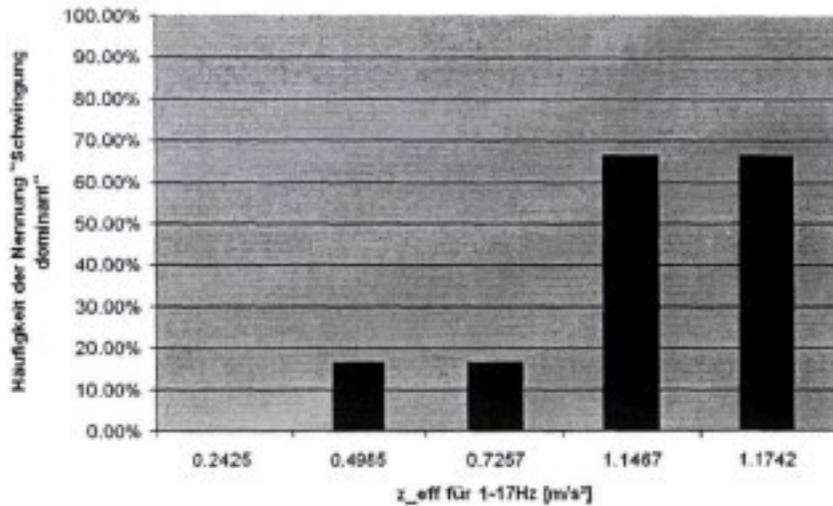


Abbildung 3.1 : Ergebnis der Befragung in den Vorversuchen

Um die relativ große Lücke der Anregungsstärke bezogen auf diesen Kennparameter zwischen Anregung V3 und V5 zu schließen (siehe Abbildung 3.2) wurde die Anregung V6 erzeugt. Diese Anregung basiert auf der Anregung V5 und wurde in z-Richtung über den gesamten Frequenzbereich konstant verstärkt, so dass sich auf der Sitzfläche in z-Richtung ein Beschleunigungseffektivwert von etwa 1 m/s^2 ergab.

In Abbildung 3.2 sind die Beschleunigungseffektivwerte der Sitzfläche in z-Richtung im Frequenzbereich von 1-17 Hz für beide Sitze und alle sechs Prüfstandsanregungen dargestellt.

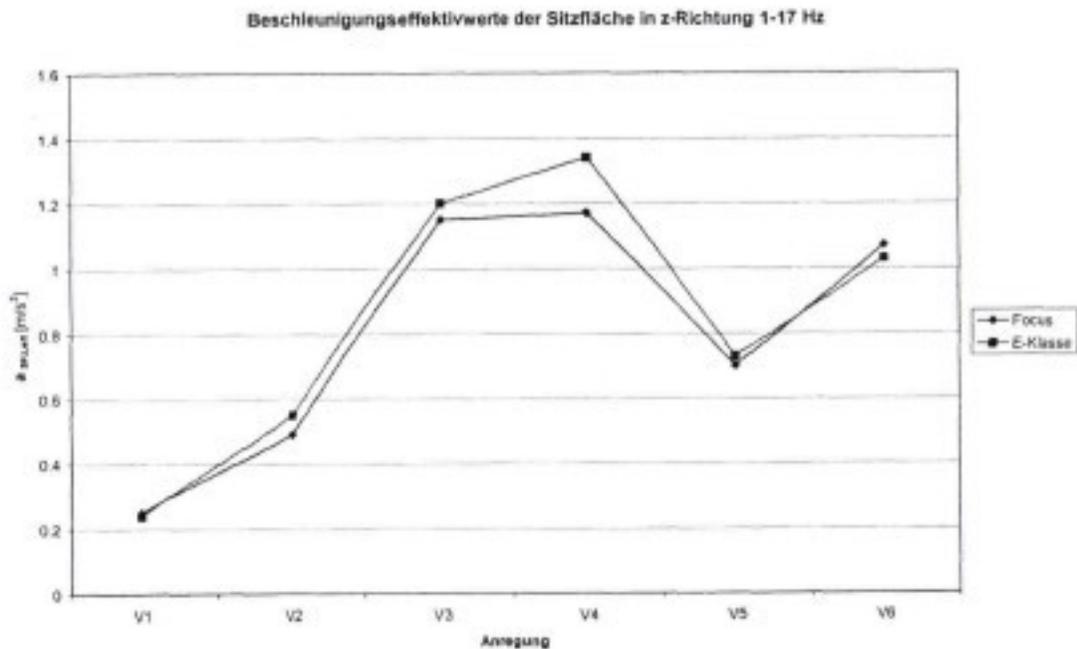


Abbildung 3.2 : Beschleunigungseffektivwerte Sitzfläche in z-Richtung 1-17 Hz

3.2 Versuchspersonenkollektiv

Da die Hauptversuche des Projektes zum Zeitpunkt dieser Versuche bereits abgeschlossen waren und die dort eingesetzten Versuchspersonen größtenteils nicht mehr zur Verfügung standen, wurden diese Versuche bis auf wenige Ausnahmen mit anderen Versuchspersonen durchgeführt. Es kamen insgesamt 40 männliche und 10 weibliche Versuchspersonen zum Einsatz, die meisten ohne Erfahrungen auf dem Gebiet der Sitzkomfortbewertung.

3.3 Versuchsablauf

Zu Beginn der Versuche wurden den Versuchspersonen eine Versuchsbeschreibung und der Fragebogen (Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4) ausgehändigt. Nach Durchlesen der Versuchsbeschreibung bestand die Möglichkeit Fragen zum Verständnis und zum Versuchsablauf zu stellen. Bei der Mehrzahl der Versuchspersonen bestand auf Nachfrage jedoch kein Bedarf nach zusätzlichen Erklärungen. Die Versuchspersonen wurden daraufhin gebeten, auf einem der beiden Sitze auf dem Prüfstand Platz zu nehmen und sich den Sitz in eine für sie bequeme Sitzposition einzustellen. Dabei wurde jedoch darauf geachtet, dass keine extremen Sitzpositionen eingenommen wurden und Lenkrad und Pedale bequem erreicht werden konnten.

Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch werden Sie auf zwei Sitzen verschiedenen Schwingungsanregungen ausgesetzt. Das Hauptaugenmerk bei dieser Untersuchung liegt auf dem sogenannten *Sitzgefühl* und dem *Schwingungsgefühl*. Diese Begriffe sind wie folgt definiert:

Sitzgefühl:

Das Sitzgefühl beschreibt, wie sich der Sitz bezüglich seiner Ausformung anfühlt. Es wirken dabei Kräfte auf Ihren Körper, die Sie als Druck an Ihrem Rücken und an Ihrem Gesäß spüren.

Schwingungsgefühl:

Das Schwingungsgefühl beschreibt, wie sich die von außen aufgebrachten Bewegungen auf Ihren Körper auswirken und welche Empfindungen dabei entstehen. Durch die von außen aufgebrachten Bewegungen entstehen bei Ihnen Bewegungen im und am Körper. Das dadurch entstehende Gefühl wird als Schwingungsgefühl bezeichnet.

In den folgenden Versuchen werden Ihnen sechs verschiedene Bewegungen vorgespielt. Sie sitzen dabei einmal auf dem rechten Sitz und einmal auf dem linken Sitz. Ihre Aufgabe ist es, bei jeder Anregung zu beurteilen, ob das *Sitzgefühl* oder das *Schwingungsgefühl* in Bezug auf Ihr aktuelles Gesamtempfinden überwiegt.

Wenn Ihnen irgendetwas besonders unangenehm auffällt, können Sie dies auf dem Fragebogen in der rechten Spalte eintragen.

Abbildung 3.3 : Versuchsbeschreibung für die Probanden

Datum _____				
Name _____				
Gewicht _____				
Körperhöhe _____				
Geschlecht _____				
Sitzgefühl überwiegt Schwingungsgefühl überwiegt				
linker Sitz	V1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
rechter Sitz	V1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V4	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V5	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____
	V6	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	besonders unangenehm _____

Abbildung 3.4 : Fragebogen

Auf dem Fragebogen wurden die beiden Sitze durch „linker Sitz“ und „rechter Sitz“ bezeichnet, was sich aus dem Aufbau der Sitze auf dem Prüfstand bei Sichtweise in Fahrtrichtung ergab. Dadurch war für die Versuchspersonen ohne weitere Markierung eine verwechslungssichere Zuordnung der Sitze möglich. Der linke Sitz war dabei der Focus-Sitz und der rechte Sitz der E-Klasse-Sitz.

Die Anregungen V1 bis V6 wurden nacheinander vorgespielt und den Probanden dazwischen jeweils Zeit gegeben, ihre Entscheidung zu treffen und eventuelle Kommentare auf dem Fragebogen einzutragen. Ein entsprechender Durchgang wurde im Anschluss auf dem zweiten Sitz durchgeführt.

4 Auswertung und Ergebnisse

Für die Auswertung der Ergebnisse wurden die Häufigkeiten der Antworten der Versuchspersonen für die einzelnen Anregungen ermittelt. Die Häufigkeiten wurden dann über den z-Effektivwert der Anregungen im Bereich 1-17 Hz aufgetragen. Es wurde zunächst das Gesamtkollektiv betrachtet. Danach folgte eine weitere Aufgliederung der Ergebnisse nach Geschlecht und verwendetem Sitz.

Die optische Betrachtung der Ergebnisdiagramme zeigt leider nur sehr wenig Ähnlichkeit mit dem erwarteten Verlauf, wie er in Abschnitt 2 dargestellt ist.

Um keine Fehlinterpretation aufgrund des subjektiven Eindrucks zuzulassen wurde eine statistische Betrachtung des Antwortverhaltens der Versuchspersonen mit SPSS

durchgeführt. Es wurde hierzu der McNemar-Test verwendet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

Vergleich der Antworten bei verschiedenen Anregungen mit dem McNemar-Test

Vergleiche: Antworten Anregung 1 – Antworten Anregung 2
 Antworten Anregung 1 – Antworten Anregung 3
 ...
 Antworten Anregung 5 – Antworten Anregung 6

Zusammenfassung des Vergleichs zum Antwortverhalten:

	gleich	verschieden*	keine Aussage*
Männer Focus	8	2	5
Männer E-Klasse	11	0	4
Frauen Focus	11	0	4
Frauen E-Klasse	10	1	4

* für Signifikanzniveau von 5%

Abbildung 4.1 : Durchführung und Ergebnisse des McNemar-Tests

Diese weiterführenden Analysen zeigten, dass das Antwortverhalten der Versuchspersonen sich trotz unterschiedlicher Anregungen statistisch quasi nicht voneinander unterscheidet.

5 Interpretation

Der erwartete Verlauf der Antworthäufigkeiten aufgetragen über den z-Effektivwert konnte nicht gefunden werden. In dem betrachteten Anregungsbereich ist es nicht möglich aus den Aussagen der Versuchspersonen einen Übergang zwischen statischen Sitzempfinden und Schwingungsempfinden abzuleiten.

Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sein, dass die Versuchspersonen das Schwingungsgefühl und das statische Sitzempfinden als zwei voneinander getrennte, unabhängige Empfindungsqualitäten wahrnehmen. Die Abgabe der Bewertung erfolgt zufällig aufgrund des aktuellen Fokus der Versuchsperson auf eine der beiden Größen.

Es wird empfohlen für eine Betrachtung des Diskomforts im Fahrzeug die Betrachtung des statischen und dynamischen Schwingungskomforts getrennt voneinander zu betrachten.

6 Zusammenfassung

Es wurde untersucht, ob sich für den Anregungsbereich ein Übergang zwischen statischen und dynamischen Sitzempfinden ableiten lässt. Die positiven Ergebnisse des Vorversuchs sprachen für die Weiterführung des Versuchskonzeptes im Hauptversuch. Als Ergebnis des Hauptversuches ergab sich, dass über den gewählten Anregungsbereich, welcher auch dem Anregungsbereich im Kfz entspricht, das Antwortverhalten der Versuchspersonen annähernd gleich bleibt. Als Schlussfolgerung aus diesen Ergebnissen wird empfohlen, das statische und das dynamische Sitzempfinden als voneinander getrennte Größen zu betrachten.

Software- Schwingungs- Dummy

1 Einleitung

Mit Hilfe von Mehrkörpersystemen (MKS) kann das mechanische Verhalten des Menschen modelliert werden. Einzelne Körper werden aufgrund ihrer Trägheitseigenschaften beschrieben und können durch Gelenke miteinander verbunden werden. Biologische Systeme sind ebenso simulierbar, wie technische Systeme, da beide durch die gleichen Bewegungsgleichungen beschrieben werden. Der komplexe Charakter des Bewegungsapparates zwingt, je nach Simulationszweck, zu Annahmen und Vereinfachungen bei der Modellbildung.

Biomechanische Menschmodelle haben eine breite Anwendung. In der Orthopädie werden Ganganalysen betrieben, in der Sportwissenschaft möchte man die Entstehung einer Bewegung besser verstehen, sowie Bewegungsabläufe im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit optimieren. In der Ergonomie stellen sich Fragen hinsichtlich der auf den Menschen einwirkenden Schwingungen und den damit zusammenhängenden Diskomfort-Empfindungen.

Die Zielsetzung dieser Arbeit beinhaltet die Erstellung eines Menschmodells zur Simulation von Schwingungen beim Fahren. Im Weiteren sollen Schwingungsmessungen durchgeführt werden, um das Modell verifizieren zu können. Die Modellierung stellt einen Teil des FAT-Projektes „statischer und dynamischer Sitzkomfort“ dar, welches zwei Ziele hat. Einerseits möchte man bereits in der Phase der Sitz- und Fahrzeugentwicklung mit einem Komfort-Modell Aussagen über den statischen und dynamischen Sitzkomfort liefern können, wobei dann auch unterschiedliche Fahrbahnanregungen oder Sitzparameter (z.B. Schäume mit unterschiedlichem elastisch-dämpfenden Verhalten) simuliert werden können. Andererseits versucht man ein objektives Bewertungskriterium für einen Autositz zur Verfügung zu stellen um von subjektiven Bewertungen unabhängig zu sein.

2 Vorgehensweise

Im Folgenden soll kurz die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit erläutert werden. Zuerst wurde ein Menschmodell als Mehrkörpersystem aufgebaut, dessen Struktur in Kapitel 3 „Das Simulationsmodell“ beschrieben wird. Die Messungen von Beschleunigungen an bestimmten Körperpunkten mittels Beschleunigungsaufnehmer während einer Schwingungsanregung auf einem harten Holzstuhl wird in Kapitel 4 „

Schwingungsmessungen am System Mensch" erläutert. Die Auswertung erfolgt anhand des Übertragungsverhaltens (Transferfunktion TF) bezüglich der Beschleunigungen von Sitzkissen zu den einzelnen Körperpunkten. In Kapitel 5 „Ergebnisse der Simulation“ werden die Ergebnisse der Simulation dargestellt, wobei das Anregungssignal aus der Messung stammt. Durch den Vergleich zwischen dem aus der Simulation (Berechnung des Bewegungsverhaltens) des MKS-Menschmodells ermittelten Übertragungsverhalten mit dem aus der Messung gewonnenen Übertragungsverhalten, wurde das Modell so angepasst, dass sich diese einander annähern und das Modell immer besser der Realität entspricht.

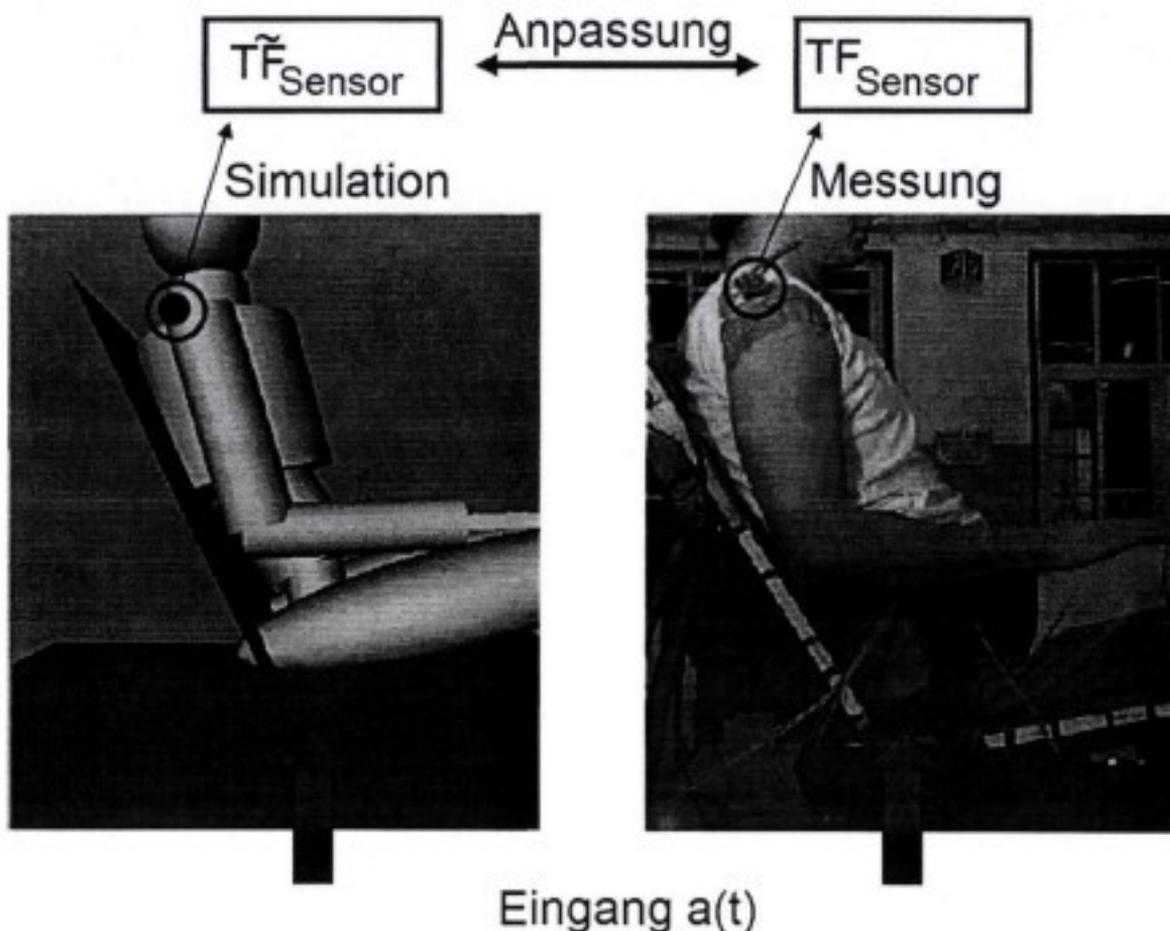


Abbildung 2-1: Prinzip der Anpassung des Modells an die Messung.

3 Das Simulationsmodell

3.1 MKS-Modellierung mit alaska

Um das Schwingungsverhalten eines Menschen im Sitzen abzubilden, wurde ein Mehrkörpersimulationsmodell erstellt. Mehrkörpersysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie aus starren Körpern bestehen, die mit einer Masse und Trägheitskoeffizienten behaftet und mit Gelenken untereinander verbunden sind. Die mechanischen Eigenschaften der Gelenke, Sehnen, Muskeln oder Weichteilgeweben werden mit Hilfe von Kraftelementen modelliert, die zwischen zwei Körpern wirken. Dafür werden hauptsächlich viskoelastische Kraftgesetze formuliert, die letztlich das Schwingungsverhalten mitbestimmen.

Zur Modellierung und Simulation wurde das Softwareprogramm „alaska“ verwendet, das am Institut für Mechatronik in Chemnitz entwickelt wurde. alaska beinhaltet ein Modellersystem, mit dem hierarchisch strukturierte MKS-Modelle erzeugt werden können. Die Bearbeitung der binären Datenbasis kann entweder durch eine textbasierte Modellbeschreibung oder das Modeller Studio, einer graphischen Benutzeroberfläche erfolgen. Dabei können mit der Modellbeschreibungssprache auch neue, benutzerdefinierte Elemente definiert werden. Es wurden allerdings keine Elemente mit neuen Eigenschaften erzeugt, sondern allgemeine, auch bei anderen MKS-Simulationsprogrammen übliche Elemente (z.B. technische Gelenke) verwendet. Das Modeller Studio kann auch als Postprozessor für die Ausgabe der Ergebnisse verwendet werden. Mit Hilfe von Analyseprogrammen können die Systemeigenschaften des Modells berechnet werden. Zur Durchführung dieser Systemanalyse wird ein mathematisches Modell des zu betrachtenden physikalischen Modells generiert. Dazu sucht alaska nach geeigneten Absolut- und Relativkoordinaten als Zustandsgrößen, so dass jeder Körper auf eindeutige Weise durch Absolut- und Relativkoordinaten vom Inertialsystem aus erreichbar ist. So können die in alaska implementierten Algorithmen verwendet werden. alaska hat sich in vielen Anwendungsgebieten bewährt, etwa in der Biomechanik, in der Fahrzeugdynamik oder in der Sportgeräte-Technik.

Für die Modellierung des Kontaktproblems zwischen Menschmodell und Sitzmodell bietet alaska die Möglichkeit eine physikalische Wechselwirkung zwischen einer Ebene und einem Kontaktpunkt zu definieren. Der bei der Schwingungsmessung (Kapitel 4) verwendete starre Holzsitz und der Boden wurden durch ebene Kontaktflächen repräsentiert, weiterhin wurden auf dem Menschmodell 16 Kontaktpunkte definiert, so dass auf jedem Körperteil beziehungsweise Körperteilpaar, das mit dem Sitz oder Boden Kontakt hat, mindestens zwei Kontaktpunkte liegen. Die Kontaktsensorik berechnet für jeden Iterationsschritt den Abstand zwischen Punkt und Ebene, verschwindet der Abstand beginnt die definierte Kontaktkraft zu wirken. Der Koeffizient für den elastischen Anteil ist im beschriebenen Modell nicht sofort nach dem Kontakt voll wirksam, um die Steifigkeit der Differentialgleichungen zu verringern.

Zur verwendeten Begrifflichkeit soll angemerkt werden, dass der Sitz als Ganzes aus Lehne und Sitzkissen besteht. Diese Bezeichnungen werden im vorliegenden Bericht verwendet, trotz der Tatsache, dass der bei der Schwingungsmessung verwendete Sitz und damit das Sitzkissen hart waren.

Damit der mathematische Modellierer anderen Programmen Variablen zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stellen kann, werden im Modell Ausgänge definiert. Diese werden zu jedem Zeitpunkt, an dem das mathematische Modell ausgewertet wird, neu berechnet und in einer Zustandsfolge in eine Datei geschrieben. Die Variablen der Ausgänge werden im Weiteren in MATLAB importiert, um dort die Spektralanalyse der kinematischen Größen durchzuführen und die Transferfunktionen, aus dem Quotienten der Beschleunigung am Sitzkissen und den Beschleunigungen an verschiedenen Körperstellen im Frequenzraum, zu bestimmen.

Die Eigenschaften der Körperelemente werden durch die Massen und Trägheitsmomente bestimmt. Zur Darstellung des Modells werden jedoch einfache geometrische Objekte wie Zylinder, Quader und Ellipsen verwendet, deren Abmessungen mit der Anthropometrie der Versuchsperson übereinstimmen. In den folgenden drei Abbildungen ist die graphische Repräsentation des Menschmodells dargestellt. Zu sehen sind die körperfesten Koordinatensysteme und die Sensorkoordinatensysteme, welche den Ort der während der Schwingungsmessung angebrachten Beschleunigungssensoren zeigen.

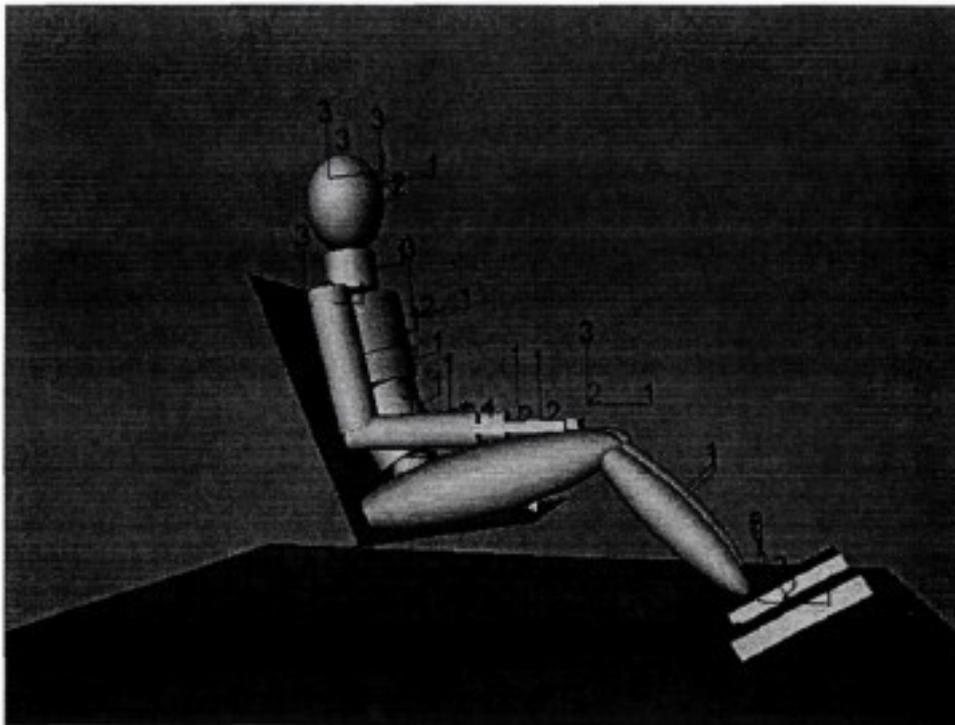


Abbildung 3-1: Seitenansicht des Softwaremodells. Repräsentation mit einfachen geometrischen Objekten. Zu sehen sind die körperfesten Koordinatensysteme und die Koordinatensysteme, welche die Orte der Beschleunigungssensoren während der Schwingungsmessung anzeigen

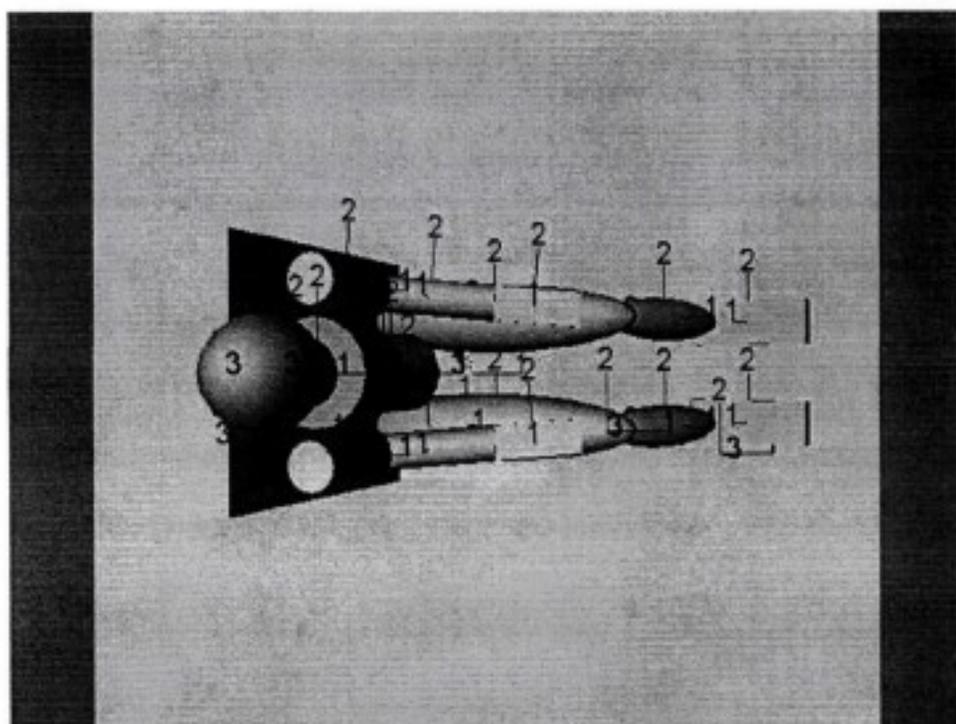


Abbildung 3-2: Aufsicht des Softwaremodells.

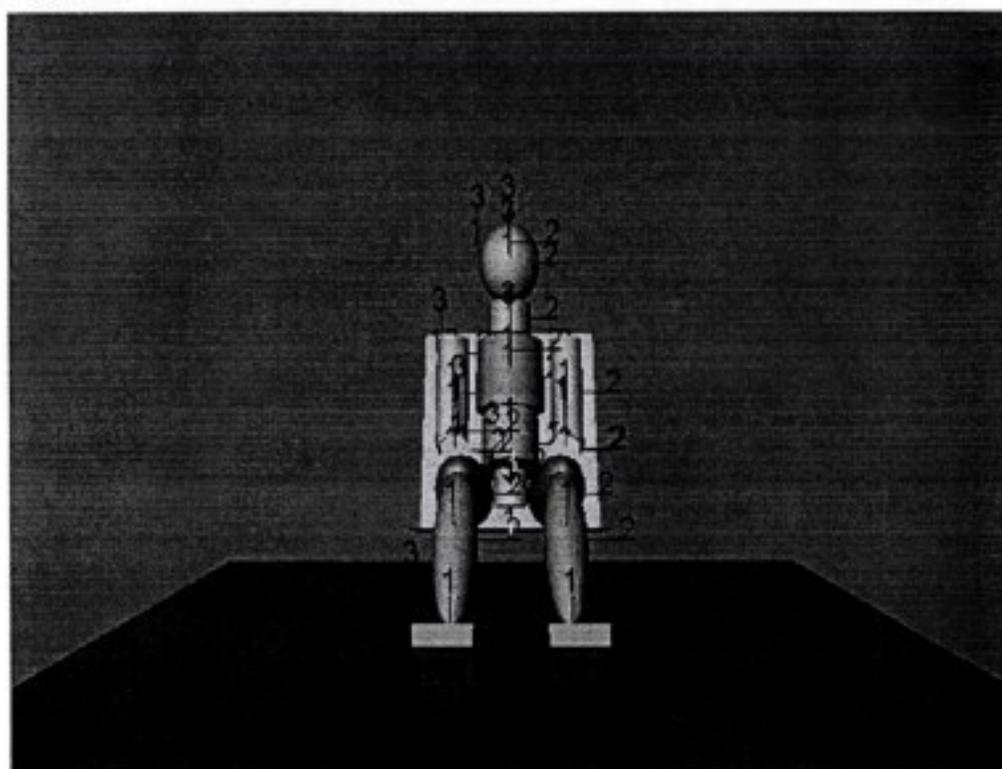


Abbildung 3-3: Frontalansicht des Softwaremodells

3.2 Struktur und Parameter des Menschmodells

Das Menschmodell besteht aus 18 Starrkörpern, durch die Zwangsbedingungen der verwendeten technischen Gelenke ergeben sich 60 Freiheitsgrade. Ellenbogen-, Knie- und obere Sprunggelenke werden durch Scharniergelenke repräsentiert, die Schultergelenke und das Hüftgelenk werden durch Kugelgelenke modelliert. In diesen genannten Gelenken wird ein einheitliches Momentengesetz implementiert, das eine rückstellende Kraft in jedem Gelenk und in jeder Bewegungsrichtung erzeugt, so dass einer Auslenkung aus der Ruhelage entgegengewirkt wird. Dies entspricht einem Feder-Dämpfer-Element in den Gelenken. Die Werte sind in Tabelle 3-1 angegeben.

Tabelle 3-1: Steifigkeits- und Dämpfungskonstanten der passiven Gelenkmomente

<i>Gelenke</i>	<i>Drehung um</i>	<i>Drehfeder</i> $\left[\frac{Nm}{rad} \right]$	<i>Dämpfung</i> $\left[\frac{Nm \cdot s}{rad} \right]$
alle Gelenke	alle Achsen	120	8

Der Oberkörper besteht aus 5 Körperteilen zwischen denen eine allgemeine Kraftmatrix wirkt, um die Bewegung in den 6 translatorischen und rotatorischen Richtungen zwischen den Rumpfelementen zu ermöglichen. Die Parameter wurden den Arbeiten von Fritz und Deng entnommen (Fritz, 2000; Deng, 1987). Diese Steifigkeitsmatrix für ein lineares Kraft-/ Momentengesetz, das zwischen den Oberkörperelementen Kopf, Hals, Brustkorb, Bauch und Becken wirkt, beschreibt ein Lager mit Nichtdiagonalelementen. Damit soll die physiologische Bewegungsfähigkeit der Wirbelsäule nachgeahmt werden, die auch durch die Bänder und die Form der Wirbelkörper mitbestimmt wird. Der Koeffizient c_{13} bedeutet zum Beispiel, dass bei einer Auslenkung eines Bewegungssegmentes in z-Richtung gegen das nächste Segment, eine Kraft in x-Richtung erzeugt wird, welche proportional zur Auslenkung ist (mit der Federkonstanten c_{13}). Die ersten drei Koeffizienten beschreiben die Translation, während die anderen drei die Rotation beschreiben. Die gesamte Matrix ist symmetrisch. Weiterhin wird ein Unterschied zwischen positiver und negativer Auslenkung angenommen (negativ: Stauchung der Bandscheiben oder Rückwärtsdrehung der Wirbelsäule). Die Steifigkeiten wurden von Panjabi et al. (1976) gemessen. Für negative Auslenkungen sind die Koeffizienten in Tabelle 3-2 angegeben.

Tabelle 3-2: Steifigkeitsmatrix zwischen Oberkörpererelementen (Matrix ist symmetrisch). Die Einheiten sind in N, m und rad

c11= 100000	c13= -2000	c15= -1560
c22= 110000	c24= 1640	c26= 620
c33=1240000	c35= -730	
c44= 197	c46= 2	
c55= 186		
c66= 145		

Die Dämpfung bezüglich der Translation beträgt überall 150 Ns/m, beziehungsweise für c55 (Drehung um die y-Achse) 150 Nms/rad. Da die Lendenwirbelsäule eine geringe axiale Beweglichkeit zeigt wurde der Koeffizient c66 für den unteren und oberen Lendenbereich auf 10 000Nm/rad gesetzt. Wegen der unterschiedlichen Querschnittsflächen wurde die Matrix für die 4 Verbindungen zwischen den Oberkörpererelementen mit folgenden Faktoren skaliert:

Tabelle 3-3: Skalierungsfaktoren für die Steifigkeitsmatrizen

untere Lende	2,4
obere Lende	1,9
Brustkorb	1,1
Hals	0,6

Am Brustkorb und am Becken ist jeweils eine Schwabbelmasse mit einem Massenverhältnis von 70% angekoppelt, welche das Weichteilgewebe nachbilden soll, das im Körper gegen das Skelett verschiebbar ist. Das erste Mal wurden Schwabbelmassen von Gruber im Bereich der Sportwissenschaft verwendet (Gruber, 1997). Die Kopplung im vorliegenden Modell erfolgt über ein lineares viskoelastisches Kraftgesetz für alle 6 Bewegungsrichtungen. Die Kraftparameter sind in Tabelle 3-4 angegeben:

Tabelle 3-4: Kraftparameter für die Ankopplung der Schwabbelmassen an Becken und Brust.

Kraftelemente	Kraftrichtung	rückstellende Kraft $\left[\frac{N}{m} \right]$	Dämpfung $\left[\frac{Ns}{m} \right]$
Ankopplung der Schwabbelmasse am <i>Brustkorb</i>	Translation in x-, y-, und z-Richtung	72760	860
Ankopplung der Schwabbelmasse am <i>Becken</i>	Translation in x-, y-, und z-Richtung	72760	860
	Momentenrichtung	rückstellendes Moment $\left[\frac{Nm}{rad} \right]$	Dämpfung $\left[\frac{Nm \cdot s}{rad} \right]$
Ankopplung der Schwabbelmasse am <i>Brustkorb</i>	Rotation um x-, y-, und z-Achse	140	2,89
Ankopplung der Schwabbelmasse am <i>Becken</i>	Rotation um x-, y-, und z-Achse	140	2,89

Die Kontaktkräfte zwischen Modell und äußeren Kontaktflächen, wie Sitzkissen, Lehne, Boden und Fußstütze beinhalten ein lineares viskoelastisches Kraftgesetz und wirken zwischen den ebenen Kontaktflächen und insgesamt 16 Kontaktpunkten, die auf dem Menschmodell definiert sind, senkrecht zu der jeweiligen Kontaktfläche. Auf dem Becken und dem Brustkorb liegen jeweils 4 Kontaktpunkte. Auf dem Becken liegen zwei im Bereich der Sitzbeinhöcker mit Kontakt zum Sitzkissen. In der Grundhaltung (Gleichgewichtslage) auf dem harten Holzsitz entfallen 80% der Gesamtgewichtskraft auf die beiden Sitzbeinhöcker. In Abbildung 3-4 sind auch die restlichen kontaktpaare zu sehen.

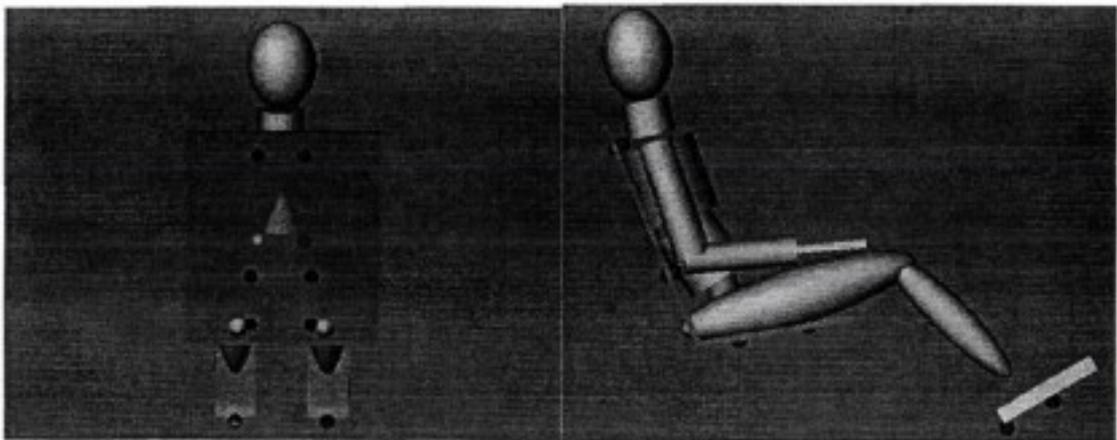


Abbildung 3-4: Kontaktpaare: 16 Kontaktpunkte, die auf dem Menschmodell definiert sind und die auf den Kontaktflächen liegenden Punkte mit kürzestem Abstand dazu.

Während der Messung des Schwingungsverhaltens einer Versuchsperson hatte diese eine Grundhaltung eingenommen, bei der die Hände auf den Oberschenkeln auflagen. Daher wurde eine weitere lineare Federkraft zwischen einem Punkt am Handgelenk, das Unterarm und Hand fest miteinander verbindet und einem Punkt auf dem Oberschenkel eingeführt. Die Ruhelänge beträgt 1cm.

Tabelle 3-5 zeigt die Steifigkeits- und Dämpfungskonstanten für die Kontaktkräfte und dem Kraftelement zwischen Hand und Oberschenkel

Tabelle 3-5: Steifigkeits- und Dämpfungskonstanten für die Kontaktkräfte und einem Kraffelement zwischen Hand und Oberschenkel

<i>Kraffelemente</i>	<i>Kraffrichtung</i>	<i>Feder</i> $\left[\frac{N}{m} \right]$	<i>Dämpfung</i> $\left[\frac{Ns}{m} \right]$
Mensch - Sitz	normal zur Sitzfläche	50000	150
Fuß – Boden	normal zur Bodenfläche	22000	100
Hand - Oberschenkel	entlang der Verbindung zwischen zwei Koordinatensystemen	2000	20

Während des Kontaktes wird von einer Haftung ausgegangen, währenddessen sich die Haut in tangentialer Richtung verschieben kann. Das Kraftgesetz der Hautverschiebung geht quadratisch mit der Auslenkung. In Tabelle 3-6 sind die im Modell entsprechend verwendeten Kontaktkraftparameter angegeben. Im Anhang befinden sich weiterhin die Parameterdateien des Modells.

Die Werte für die Anthropometrie wurden von Daten eines Modells von Keppler am Institut für Astronomie und Astrophysik entnommen, dessen Grundlage Veröffentlichungen der NASA und die DIN 33402 ist. Aus Regressionsgleichungen werden die Masse, Trägheitsmomente und die Koordinaten der Gelenkpunkte berechnet.

Tabelle 3-7 enthält die berechneten anthropometrischen Daten der Versuchsperson, wobei man berücksichtigen kann, dass das Modell symmetrisch zur medialen Ebene ist. Bei den Körperteilen, die doppelt vorkommen ist die linke Körperhälfte angegeben, bei allen anderen ist das gesamte Körperelement mit der Gesamtmasse angegeben.

Der Sitz ist als ganzes starr modelliert worden. Es besteht eine feste Verbindung zwischen Sitzkissen und Lehne, ebenso zwischen Sitz, Boden und Fußstütze. Der Holzsitz zeigte zwar eine leichte Beweglichkeit zwischen Lehne und Sitzkissen und auch ein Bewegungsspielraum des gesamten Sitzes um eine Achse parallel zur y-Achse, was auf das Spiel der Sitzlängsverstellungsschiene zurückzuführen ist, die Modellierung dieser Eigenschaften führte allerdings nicht zu einer Verbesserung des Modells.

Alle in diesem Kapitel angegebenen Parameter sind diejenigen, die nach dem Anpassungsprozess des Modells an die Messung gefunden wurden.

Tabelle 3-6: Steifigkeits- und Dämpfungskonstanten für das Kraffelement der Hautverschiebung., Die rückstellende Kraft geht quadratisch mit der Auslenkung x , die Dämpfung ist proportional zur Geschwindigkeit v .

<i>Kraffelemente</i>	<i>Kraffrichtung</i>	<i>rückstellende Kraff</i> $\left[\frac{N}{m^2} \right]$ $F_c = c \cdot x^2$	<i>Dämpfung</i> $\left[\frac{Ns}{m} \right]$ $F_d = d \cdot v$
Hautverschiebung bei Kontakt	tangential zur Sitzfläche	$c=5000$	$d=100$
Hautverschiebung bei Kontakt der FüÙe (Schuhe)	tangential zur Bodenfläche und Fußstütze	$C=30000$	$d=100$

Tabelle 3-7: Anthropometrische Daten für das Modell. Es sind die Elemente der linken Körperhälfte angegeben, da das Modell symmetrisch ist. Angegeben sind die Masse, die Hauptträgheitsmomente und die Koordinaten der Gelenkpunkte im Körperkoordinatensystem in vektorieller Form.

<i>Element</i>	<i>Masse [kg]</i>	<i>Trägheitsmomente [kg · m²]</i>	<i>Gelenkpositionen [m]</i>
Becken	2,86	xx 0,0025 yy 0,0215 zz 0,0197	LWS (0; 0; 0,0478) Bein (0; 0; 0,1150) Schwabelmasse (0; 0; 0)
Schwabelmasse Becken	6,67	xx 0,0059 yy 0,0502 zz 0,0459	Becken (0; 0; 0)
LWS	10,48	0,0238 0,0932 0,0719	Becken (0; 0; -0,0804) Brust (0; 0; 0,0804)
Brustkorb	4,67	0,0242 0,0552 0,0321	LWS (0; 0; -0,01231) Hals (0; 0; 0,01231) Oberarm (0; 0,1633; 0,0982) Schwabelmasse (0; 0; 0)
Schwabelmasse Brustkorb	10,91	0,0564 0,1288 0,0750	Brustkorb (0; 0; 0)
Hals	1,686	0,0027 0,0027 0,0032	Brust (0; 0; -0,040) Kopf (0; 0; 0,040)
Kopf	4,736	0,0217 0,0201 0,0278	Hals (0; 0; -0,1175)
Oberschenkel	7,560	0,1310 0,1360 0,0274	Becken (0; 0; 0,1782) Unterschenkel (0; 0; -0,256)
Unterschenkel	3,169	0,0458 0,0453 0,0040	Fuß (0; 0; -0,2374) Oberschenkel (0; 0; 0,1865)
Fuß	0,98	0,0042 0,0038 0,0010	Unterschenkel (0,480; 0; 0,0567)
Oberarm	1,246	0,0075 0,0072 0,0011	Hand (0; 0; -0,1608) Oberarm (0; 0; 0,0112)
Hand	0,479	0,0009 0,0008 0,0003	Unterarm (0; 0; 0,0573)

4 Schwingungsmessungen am System Mensch

Am Institut für Fahrzeugtechnik in Braunschweig wurden die Bewegungen an 7 ausgewählten Körperpunkten einer Versuchsperson, während sie Schwingungen ausgesetzt war, mittels Beschleunigungsaufnehmern aufgezeichnet. Diese Punkte lagen am Kopf (an der Stirn und an der Schläfe), Brustkorb, Becken, Knie, Sprunggelenk und an der Schulter. Um das passive Bewegungsverhalten der Person ohne den zusätzlichen Einfluss einer Sitzpolsterung zu messen, wurden die Versuche auf einem Holzstuhl durchgeführt, welcher auf dem in Braunschweig vorhandenen Prüfstand montiert wurde. Zur Herstellung des Holzstuhls wurden auf das Sitzgestell eines Autositzes zwei Holzplatten, für Sitzkissen- und Lehnenfläche, befestigt nachdem die Polsterung entfernt wurde. Auf den Prüfstand wurden, isoliert in z- und x-Richtung, sinusförmige Anregungssignale gegeben und die Reaktion der Versuchsperson auf die Anregungen gemessen. Die dabei gemessenen Beschleunigungen am Sitzkissen wurden für die spätere Anregung des MKS-Schwingungsmodells verwendet und die Übertragungsfunktionen zwischen dem Sitzkissen und den Körperpunkten wurden für den Vergleich mit der Simulation herangezogen.

4.1 Befestigung der Marker

Für die Messungen der Beschleunigungen an den Körperpunkten sowie der Sitzkissen- und Lehnenfläche wurden triaxiale ICP Beschleunigungsaufnehmer verwendet, deren Charakteristika in Tabelle 4.1 dargestellt sind. Die Spannungssignale liefen nach dem Eingang in den Messverstärker durch einen Tiefpassfilter mit 100Hz. Der maximale Spannungsmessbereich der Messsoftware wurde auf 10V gesetzt, bei einer Auflösung von 12 Bit ergibt das einen Quantisierungsfehler von 4.8mV. Für die Sensoren sind das 0.025 m/s^2 , was verglichen mit dem Fehler im Spannungsübertragungsfaktor nicht ins Gewicht fällt.

Tabelle 4-1: Kenngrößen der triaxialen Beschleunigungsaufnehmer

<i>Parameter</i>	<i>Kenngröße</i>
Masse	16g
Spannungsübertragungsfaktor	20mV/g +/-20%
Temperaturkoeffizient	0,15%/K
linearer Frequenzbereich	0,3 bis 14000Hz
Grenzfrequenz	0,2Hz

Bei der Befestigung von Sensoren oder Markern auf dem Körper besteht grundsätzlich das Problem, dass die Marker auf der Haut mit dem Weichteilgewebe mitschwingen und somit nicht die Bewegung der starren Gebilde, wie dem Knochengerüst gemessen werden kann. Gerade für die Modellierung mit Mehrkörpersystemen, die aus starren Körpern zusammengesetzt sind und bei denen die biomechanischen Parameter der Weichteilankopplung nur für Spezialfälle verifiziert ist (Gruber 1998), ist die Bewegungsinformation der Knochen von Interesse. Daher wurden die Beschleunigungssensoren möglichst nahe an knöchernen Strukturen angebracht.

Tabelle 4-2: Bezeichnung und Ort der Beschleunigungsaufnehmer auf der Versuchsperson

<i>Nummer</i>	<i>Bezeichnung des Aufnehmers</i>	<i>Ort des Aufnehmers (siehe Abb.4.1-4.3)</i>
1	Kopf frontal	Stirn (Os frontale)
2	Kopf lateral	Schläfe (Os temporale)
3	Schulter	Schulterecke (Acromion)
4	Brustkorb	Brustbein (Sternum)
5	Becken	Darmbeinkamm (Crista iliaca)
6	Knie	Knie
7	Sprunggelenk	Außenknöchel (Malleolus lateralis)

Zur Befestigung der Aufnehmer wurden kleinflächige Gipsverbände an den festgelegten Körperpunkten hergestellt, so dass sie der Körperkontur angepasst waren. Nach dem Austrocknen konnten die Beschleunigungsaufnehmer ausgerichtet und aufgeklebt werden. Am Kopf wurden die beiden Aufnehmer an der Einlage eines Bauhelms angeschraubt. Die Orte der 7 Beschleunigungssensoren sind in Tabelle 4.2 aufgezählt, Bilder der Aufnehmer sind in Abbildung 4.1 bis Abbildung 4.3 dargestellt. Alle Aufnehmer waren für die Ausgangsposition der Versuchsperson bezüglich einem Referenzsystem orientiert (Abbildung 4.5).

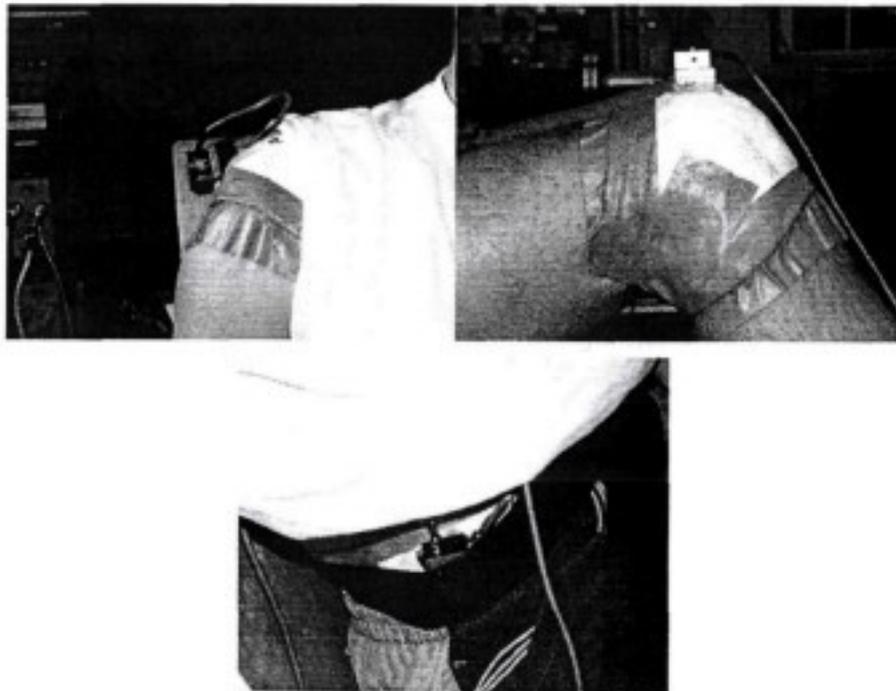


Abbildung 4.1: Beschleunigungsaufnehmer an Schulter, Knie und Becken.

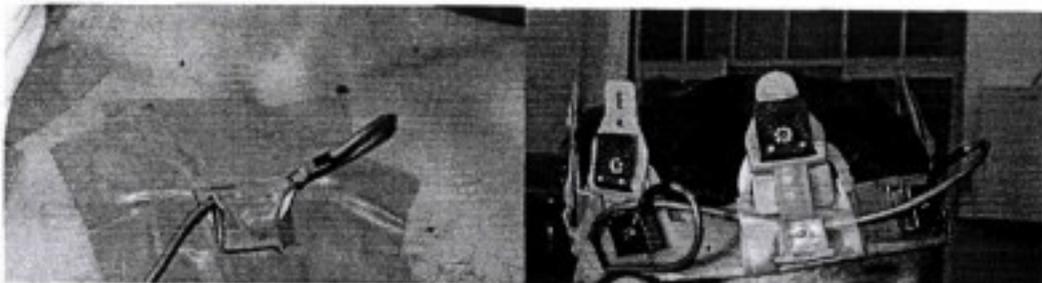


Abbildung 4.2: Beschleunigungsaufnehmer am Brustkorb und am Kopf.

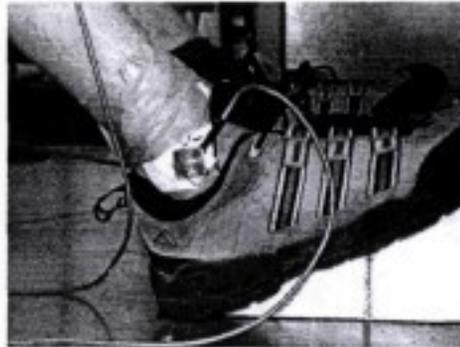


Abbildung 4.3: Beschleunigungsaufnehmer am Sprunggelenk.

4.2 Schwingungsmessung

Eine Übersicht des Versuchsaufbaus ist in Abbildung 4.4 zu sehen. Der Holzstuhl war fest mit der Prüfstandsplatte verschraubt und die gelenkige Verbindung zwischen Sitzgestell und Lehne wurde noch mit einem Schweißpunkt verstärkt. Die Versuchsperson nahm eine aufrechte Sitzposition ein, in der sie die Hände auf die Oberschenkel legte. Um die Bewegungen auch optisch verfolgen zu können, wurden Kameras um das Versuchsfeld herum aufgestellt. Abbildung 4.5 enthält eine Skizze der Geometrie des Versuchsaufbaus und der Orientierung des Referenzsystems.

Während der Messungen wurde ein Schrittsinussignal im Frequenzbereich zwischen 1,5 und 20 Hz isoliert in x- und in z-Richtung mit einer Schrittweite von 0,5Hz auf den Prüfstand gegeben, so dass die Amplitude der Beschleunigung $2,5\text{m/s}^2$ in z-Richtung betrug, in x-Richtung $1,25\text{m/s}^2$ (zusätzlich wurde in x-Richtung mit $2,5\text{m/s}^2$ zwischen 10 und 20Hz in 1Hz Schritten angeregt). Vor der Aufzeichnung der Beschleunigungssignale wurde gewartet, bis der Einschwingvorgang beendet war.

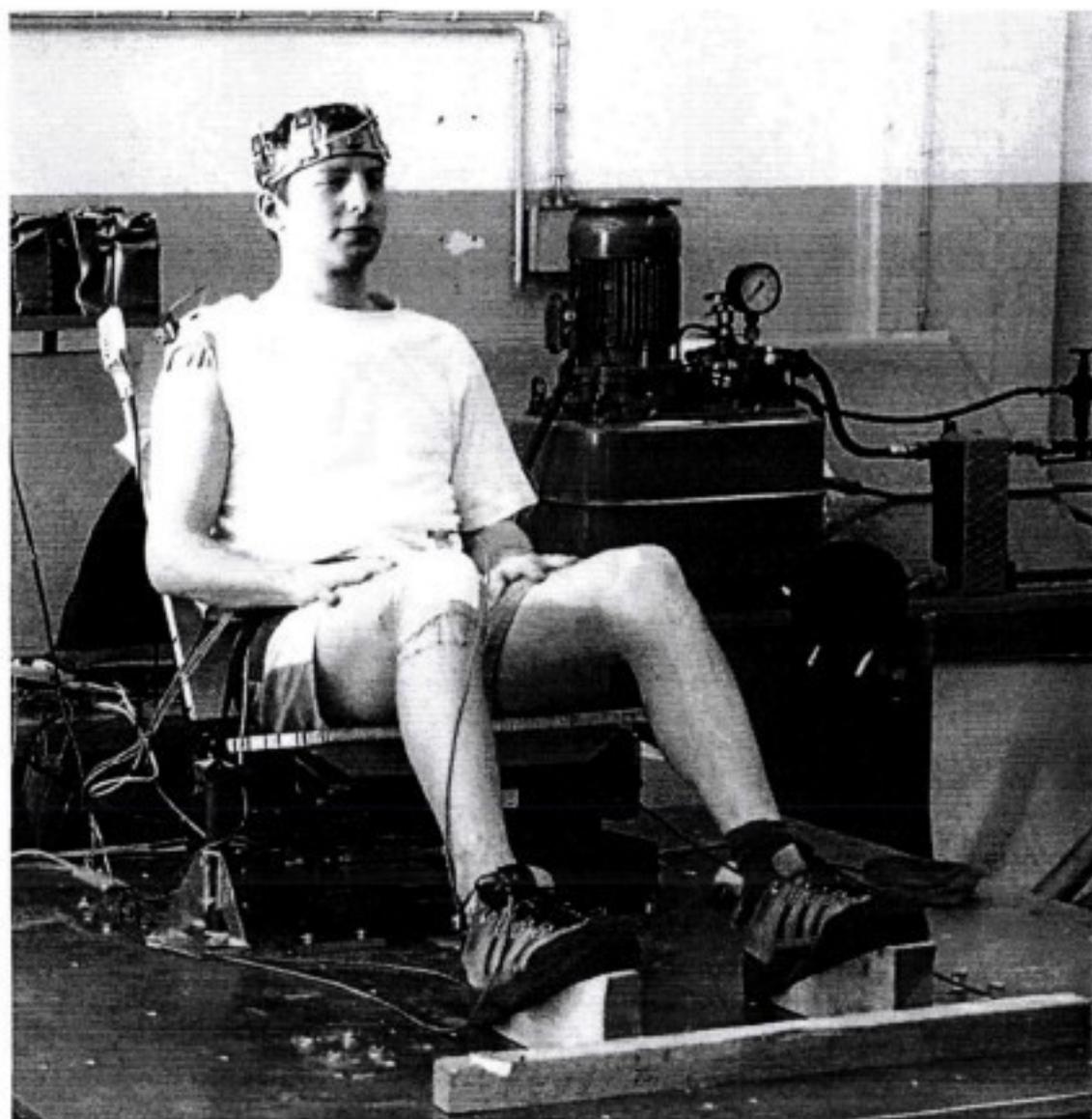


Abbildung 4.4: Übersicht des Versuchsaufbaus mit Prüfstand, Holzstuhl und Fußstützen.

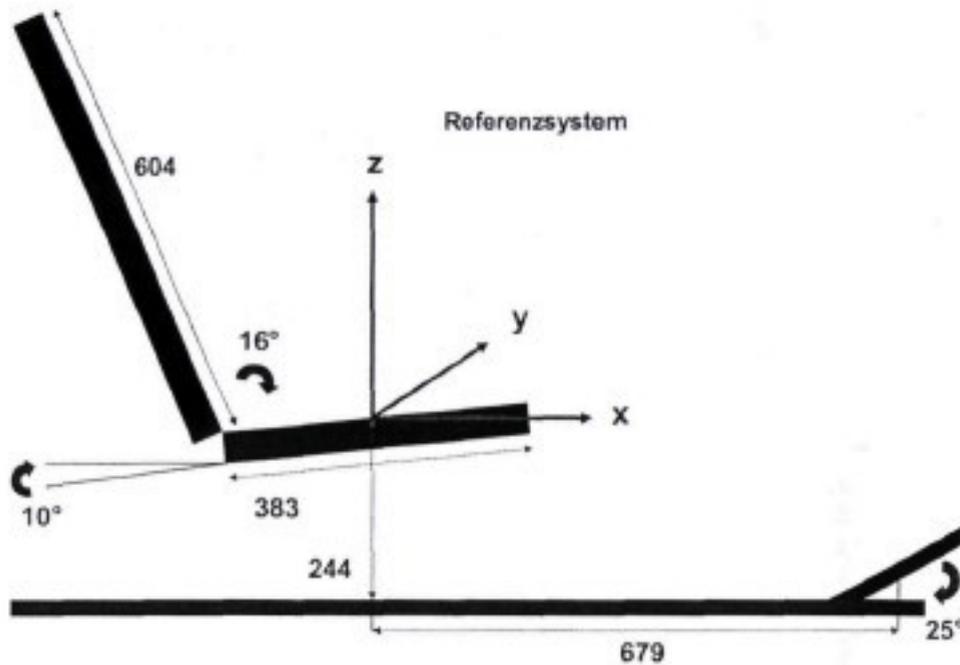


Abbildung 4.5: Skizze des Versuchsaufbaus mit Sitz und Fußstütze. Die Sensorachsen wurden in der Ausgangssitzhaltung am Referenzsystem ausgerichtet.

4.3 Ergebnisse

Die während den Schwingungsmessungen aufgenommenen Beschleunigungssignale wurden im Hinblick auf das schwingungstechnische Übertragungsverhaltens zwischen Sitzkissen (S_i) und den Messstellen am Körper (K_j) ausgewertet. Es wurde keine Frequenzbewertung durchgeführt. Zur Berechnung der Transferfunktion wird das Ausgangs- durch das Eingangssignal bei der Frequenz der Anregung dividiert:

$$t_m(\omega) = \frac{\ddot{x}_{K_j}(\omega)}{\ddot{x}_{S_i}(\omega)} \quad (4.1)$$

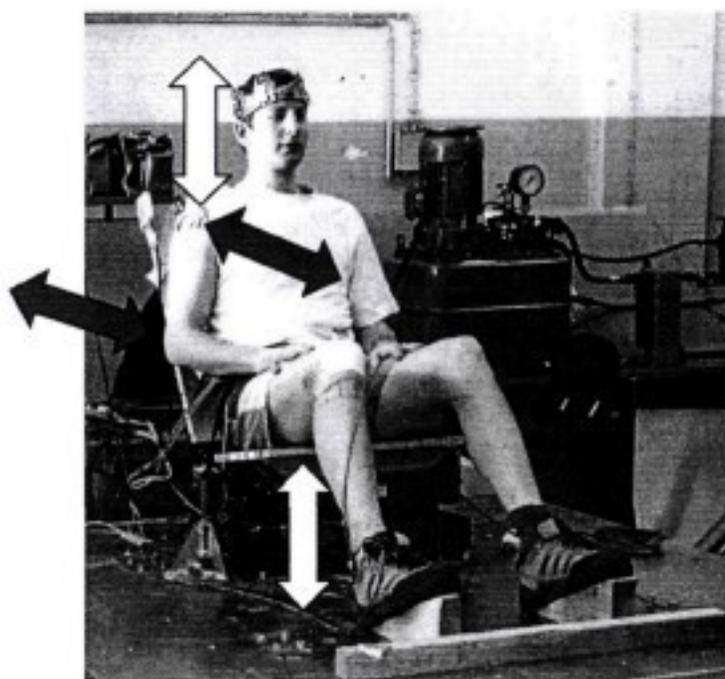


Abbildung 4.6: Darstellung der ausgewerteten Übertragungswege am Beispiel der Schulter: Schwingungseinleitung am Sitzkissen und Beschleunigung an der Schulter in z-Richtung, als auch getrennt davon in x-Richtung.

Der Übertragungsweg der Schwingungen wurde immer entlang der Anregungsachse verfolgt (Abbildung 4.6), d.h. wenn die Anregung in z-Richtung erfolgte, wurde der Quotient aus der z-Komponente des Ausgangssignals und der z-Komponente des Eingangssignals gebildet. Als Eingangssignal wurde immer die Beschleunigung am Sitzkissen verwendet, da das Bewertungsmodell von Bitter (Institut für Fahrzeugtechnik in Braunschweig) den Parameter SF X 16-18Hz enthält (SF steht für Beschleunigung am der Sitzkissen in x-Richtung), durch den die Korrelation zwischen Beschleunigungssignalen und subjektivem Komfortempfinden vergrößert wird. Im Weiteren wurde keine Betrachtung der Kopplung zwischen den unterschiedlichen Schwingungsrichtungen durchgeführt.

4.3.1 Kohärenz

Für die Auswertung wurde MATLAB verwendet. Aus den in MATLAB-Skripten gespeicherten Messergebnissen wurden zuerst die Kohärenzfunktionen berechnet. Für die Berechnung wurde die in der Signal Processing Toolbox enthaltene Funktion `cohere` verwendet. Berechnet wird sie aus dem Quotienten zwischen der quadrierten Kreuzspektraldichte und dem Produkt der einzelnen Leistungsdichtespektren.

$$C_y(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)} \quad (4.2)$$

Eine der Spektraldichten bezieht sich immer auf das Anregungssignal am Sitzkissen. Über die Kohärenzfunktion erhält man eine Aussage wie stark die beiden Signale miteinander korrelieren. Die Werte liegen zwischen 0, wenn die Signale nicht korrelieren und |1|, wenn ein linearer Zusammenhang besteht. In den folgenden Abbildungen sind diese dargestellt.

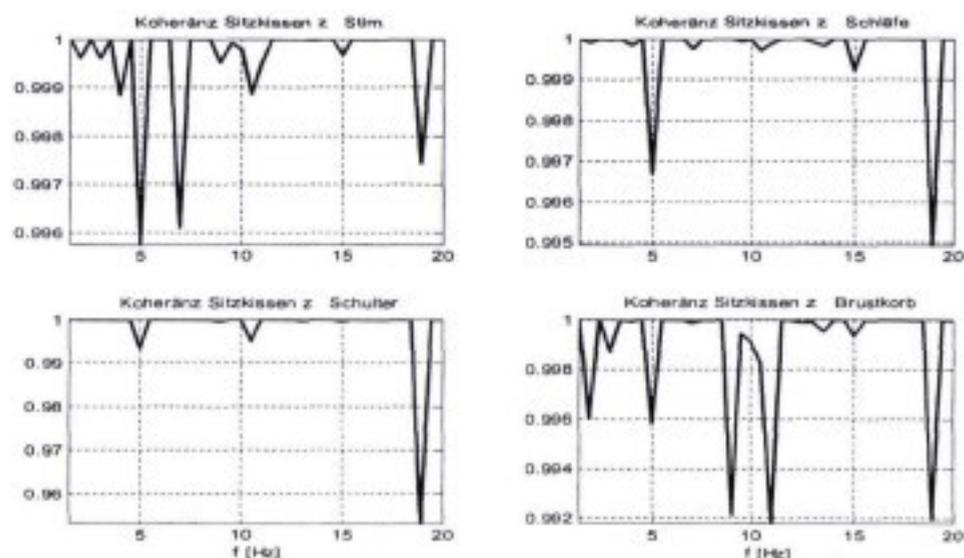


Abbildung 4-7: Kohärenzfunktionen – Anregung in z-Achse

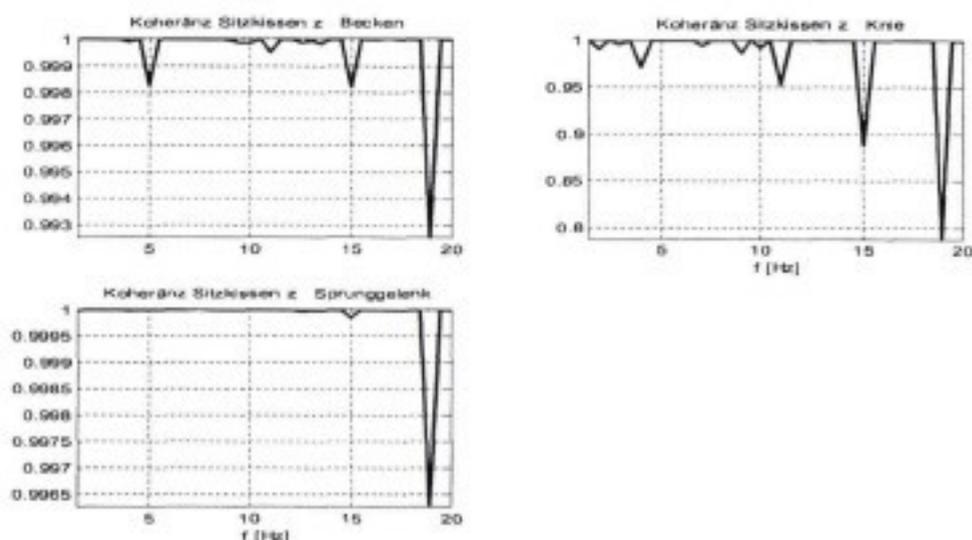


Abbildung 4-8: Kohärenzfunktionen – Anregung in z-Achse

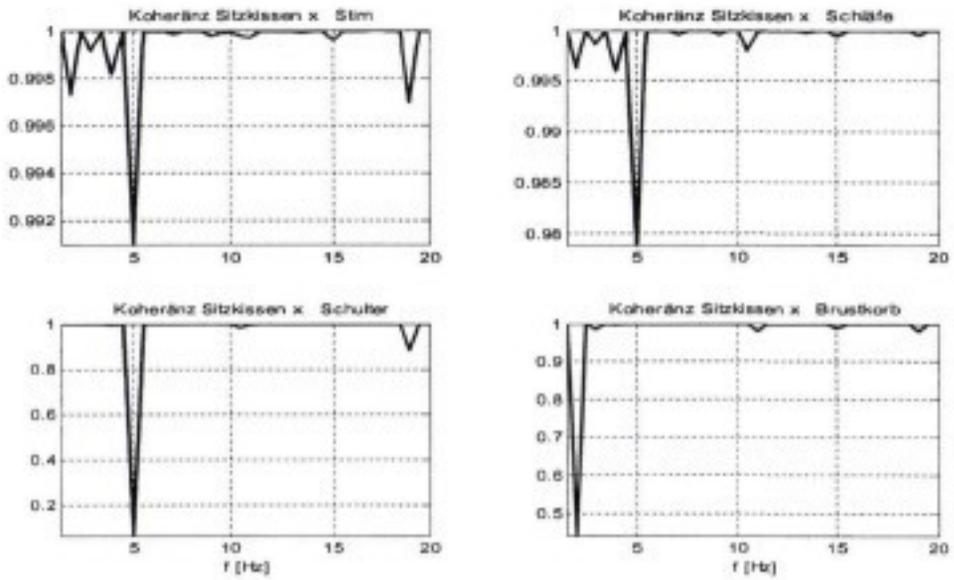


Abbildung 4-9: Kohärenzfunktionen – Anregung in x-Achse

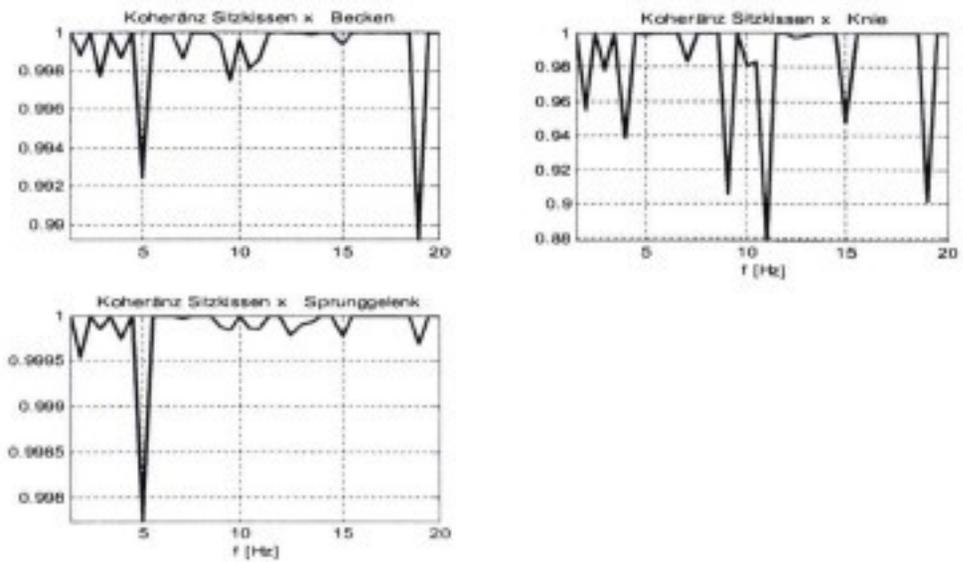


Abbildung 4-10: Kohärenzfunktionen – Anregung in x-Achse

4.3.2 Übertragungsverhalten entlang der z-Achse

In z-Richtung haben sich zwei Resonanzstellen an Kopf (Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12), Brustkorb (Abbildung 4-14) und Becken (Abbildung 4-15) gezeigt. Bei der Überhöhung zwischen 4 und 5 Hz, die im gesamten Oberkörper auftritt, schwingen knöcherne Strukturen in Phase mit dem Weichteilgewebe, was auf den Videoaufnahmen sichtbar ist. Auch in den Phasenverläufen zeigt sich die Resonanzstelle durch einen abfallenden Verlauf im Bereich von -90 Grad. Bei der anschließenden Absenkung der Übertragungsfunktionen im Frequenzbereich von 6-9Hz schwingen die Körperbereiche um Schulter und Brustkorb entgegengesetzt zum Becken und dem Bauchraum, wie die aufgezeichneten Filme belegen. Dabei bleibt der Kopf fast bewegungslos, die eingeleitete Schwingung wird von den sich gegeneinander bewegenden Körperbereichen kompensiert. Die Übertragungsfunktion am Kopf sinkt auf eine Amplitude von etwa 0,5. Die danach auftretende Überhöhung ist am Kopf am stärksten ausgeprägt (15 -17Hz), mit einem Wert von 2. Sehr breit verläuft sie am Becken im Bereich von 7 bis 15 Hz, wo bei 15Hz das Maximum von 1,4 erreicht wird. Am Brustkorb erreicht der Wert nur etwa 1,2.

Der Verlauf der Transferfunktion von Sitzkissen zum Kopf deckt sich mit den Messungen von Verver (Verver, 2002). Sie erhielt einen ersten Peak bei 5Hz, gefolgt von einer Antiresonanzstelle bei 7Hz und einem Anstieg ab 8Hz. Ein erster Peak bei 5Hz zeigt sich auch bei der Zusammenfassung von 46 Studien, die Griffin und Paddan (Griffin, 1998) zusammengetragen haben. Auch die Messungen von Kirchknopf (Kirchknopf, 2001), ergeben für den Kopf einen ähnlichen Verlauf und die Transferfunktion der Hüfte zeigt eine breite Überhöhung um 10Hz mit einer vorgehenden Überhöhung bei 5Hz. Trotzdem muss man das Ergebnis für die Hüfte mit Vorsicht betrachten, da die Überhöhung bei 5Hz deutlich geringer ausfällt, als bei den anderen Punkten am Oberkörper. Der Vergleich mit Messungen, die aus der Literatur bekannt sind, wurde gewählt, da mit der Versuchsperson nicht mehrere Wiederholungsversuche gemacht wurden und damit keine Aussage möglich war, wie plausibel die Messwerte sind. Aussagen zu intraindividuellen Unterschieden konnten daher nicht gemacht werden. Die vorgenommenen Messungen unterscheiden sich von den oben verglichenen dadurch, dass zusätzlich auch am Fuß und am Knie die Beschleunigung gemessen wurde und auch in der x-Richtung angeregt wurde. Da die Messungen für die ganzzahligen Frequenzen an einem anderen Tag wie die Messungen für die übrigen Frequenzen gemacht wurden und die Messwerte einander ergänzen, liegt hier ein weiteres Indiz für die Validität der Messungen vor.

Für Knie (Abbildung 4-16) und Sprunggelenk (Abbildung 4-17) ergab sich ein ansteigender Verlauf bis zu einer Resonanzstelle bei 15Hz. Aufgrund von zwei Ausreißern in der Überhöhung am Knie bei 11Hz und 13Hz treten die zwei lokalen Maxima auf, die so deutlich erscheinen, da durch die Glättung der Kurven ein breiteres Tal um diese Punkte entsteht. Zur Glättung wurde ein Moving Average Verfahren mit einer Fensterbreite von 3 Datenpunkten verwendet. Anhand des Phasenverlaufes kann man auf eine leichte Überhöhung bei etwa 5Hz schließen. In Abbildung 4-18 ist das Übertragungsverhalten vom Prüfstand auf den Sitz zu sehen. Es zeigt sich eine Amplitude von 1 bis zu einer Frequenz von 12 Hz, was für einen starren Sitz auch zu erwarten ist, danach fällt die Funktion leicht ab und steigt dann stark an. Dieser Anstieg lässt sich vermutlich auf das nicht starre Verhalten des Sitzgestells zurückführen.

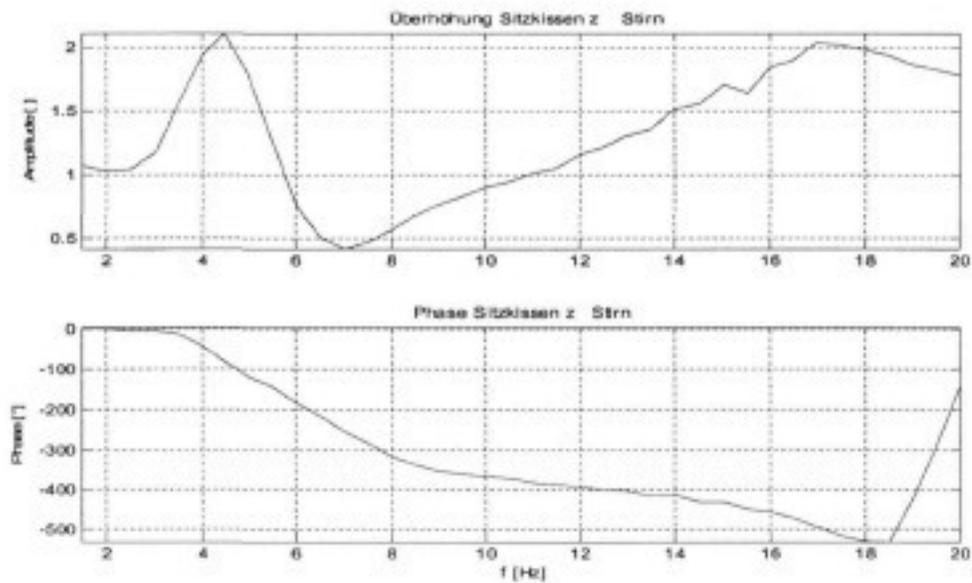


Abbildung 4-11: Übertragungsfunktion und Phase am Kopf frontal – Anregung in z-Achse

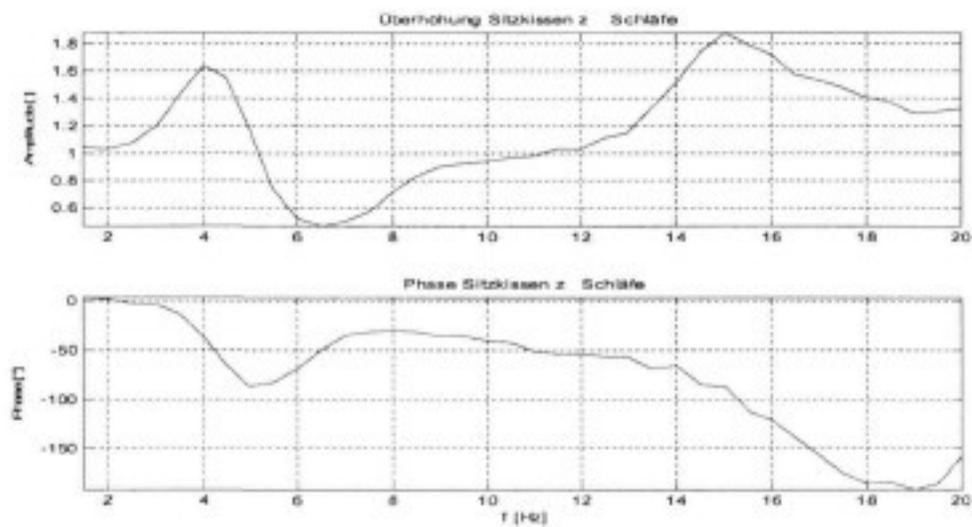


Abbildung 4-12: Übertragungsfunktion und Phase am Kopf lateral – Anregung in z-Achse

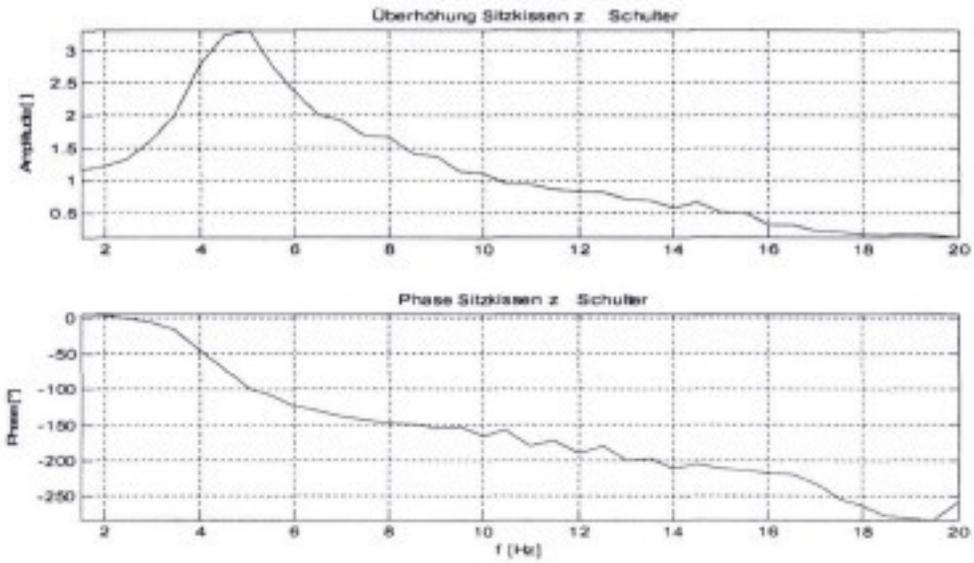


Abbildung 4-13: Übertragungsfunktion und Phase am Schulter – Anregung in z-Achse

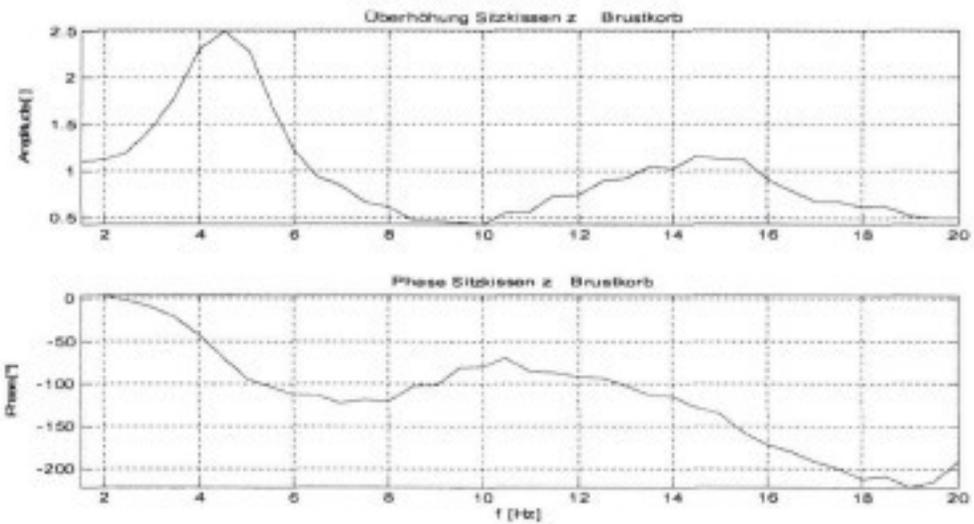


Abbildung 4-14: Übertragungsfunktion und Phase am Brustkorb – Anregung in z-Achse

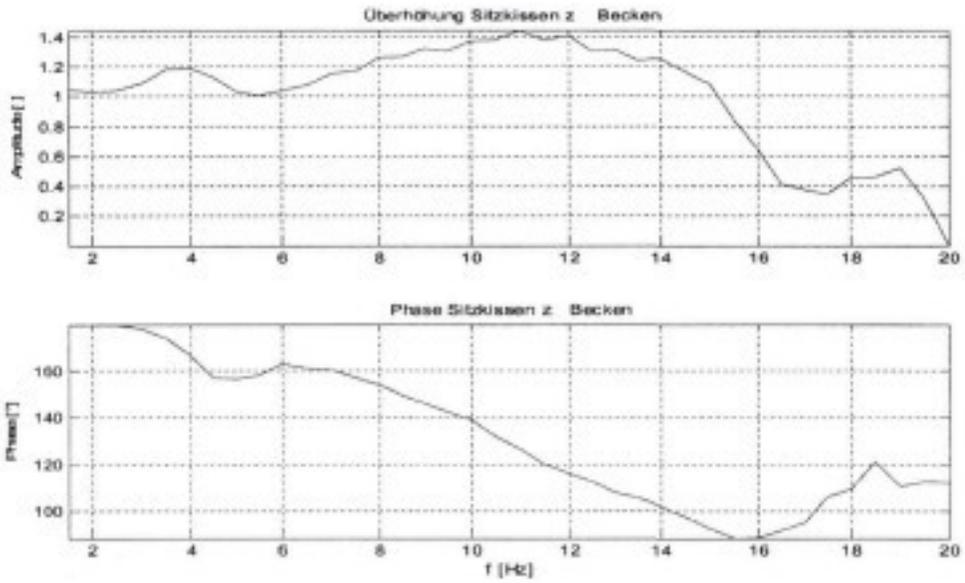


Abbildung 4-15: Übertragungsfunktion und Phase am Becken – Anregung in z-Achse

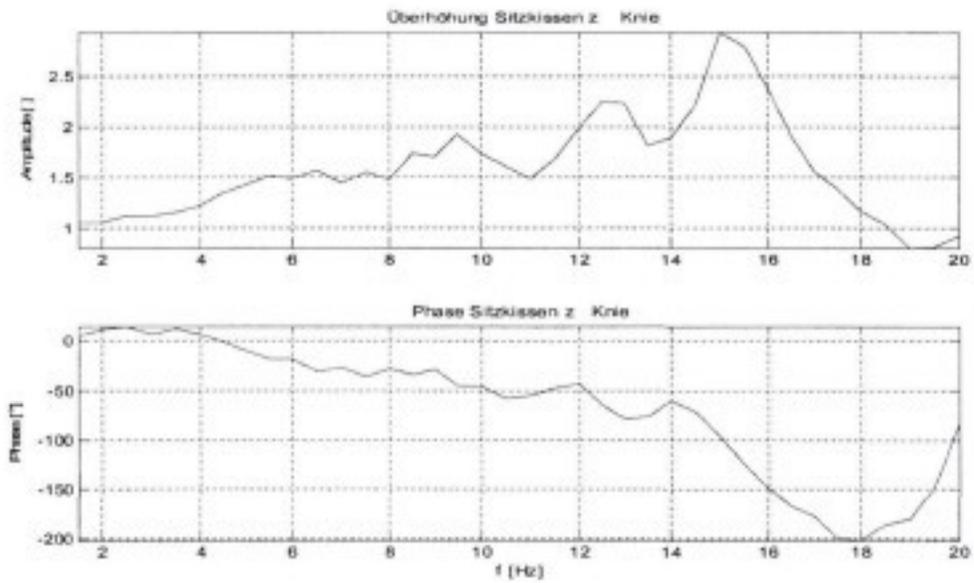


Abbildung 4-16: Übertragungsfunktion und Phase am Knie – Anregung in z-Achse

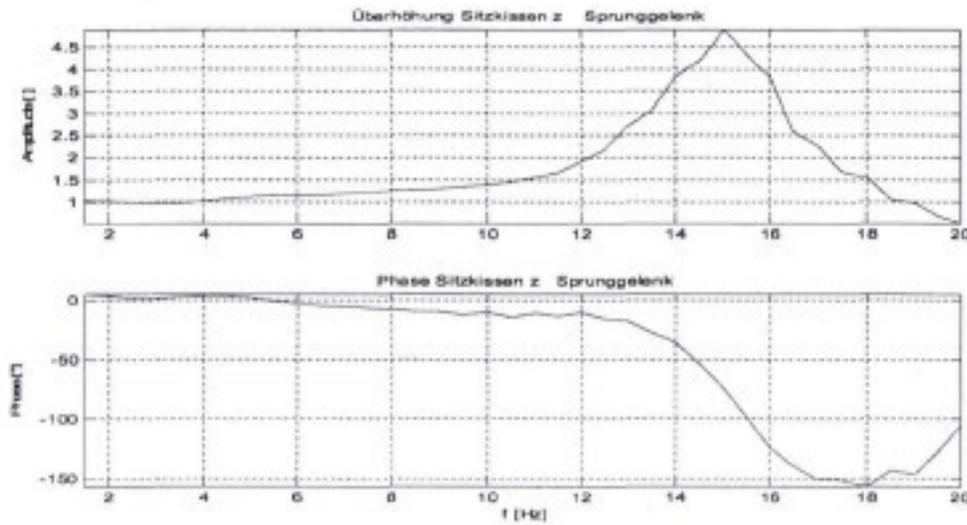


Abbildung 4-17: Übertragungsfunktion und Phase am Sprunggelenk – Anregung in z-Achse

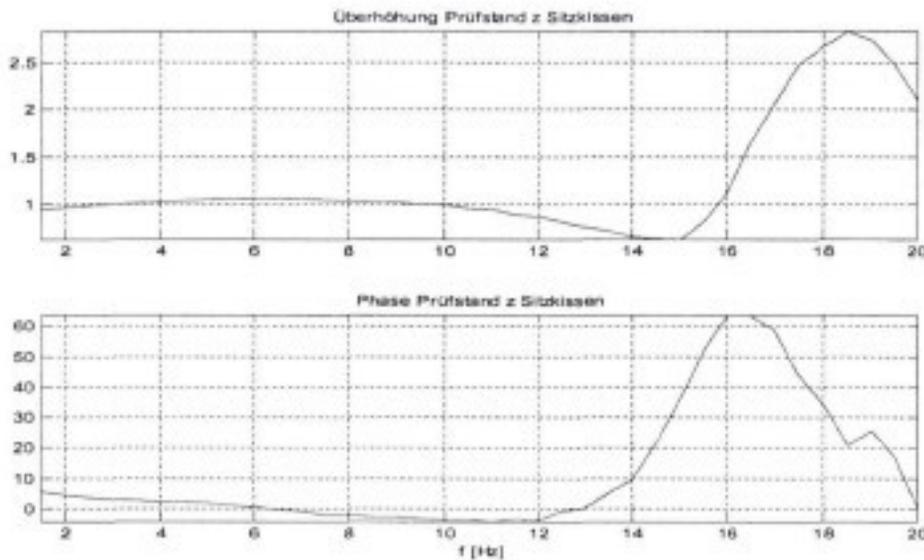


Abbildung 4-18: Übertragungsfunktion und Phase zwischen Prüfstand und Sitz – Anregung in z-Achse

4.3.3 Übertragungsverhalten entlang der x-Achse

Eine Überhöhung um 4Hz tritt mit Ausnahme des Sprunggelenks bei allen anderen Körperstellen auf. Diese Überhöhung tritt am Kopf (Abbildung 4.19 und Abbildung 4-20) schon bei 3 Hz auf und ist schärfer ausgeprägt als an den restliche Körperstellen. Eine weitere Überhöhung zeigt sich bei 18 Hz. Voraus geht ein langsamer Anstieg ab 10-12Hz. Das Verhalten an der Schulter (Abbildung 4-21) weicht auf Grund der Beweglichkeit des Schultergürtels gegenüber dem Rumpf, mit dem der Schultergürtel durch das Brustbein-Schlüsselbein-Gelenk (Articulatio sternoclavicularis) verbunden ist, davon ab (Schiebler, Schmidt, 1983). An der Resonanz bei 4 Hz sieht man auf den

Videoaufnahmen eine Kreiselbewegung der Schulter. Das Sprunggelenk zeigt eine sehr breite Resonanz und weicht im Verhalten von den anderen Körperstellen ab. Dieses Messergebnis muss in Zweifel gezogen werden, da bei der Anregung in z-Richtung das Sprunggelenk eine deutlich schmalere und steilere Überhöhung auftritt während die x- und z-Richtung durch die schräge Fußstütze miteinander gekoppelt sind. Die Überhöhung am Sprunggelenk in x-Richtung wird somit für den Vergleich mit der Simulation nicht berücksichtigt.

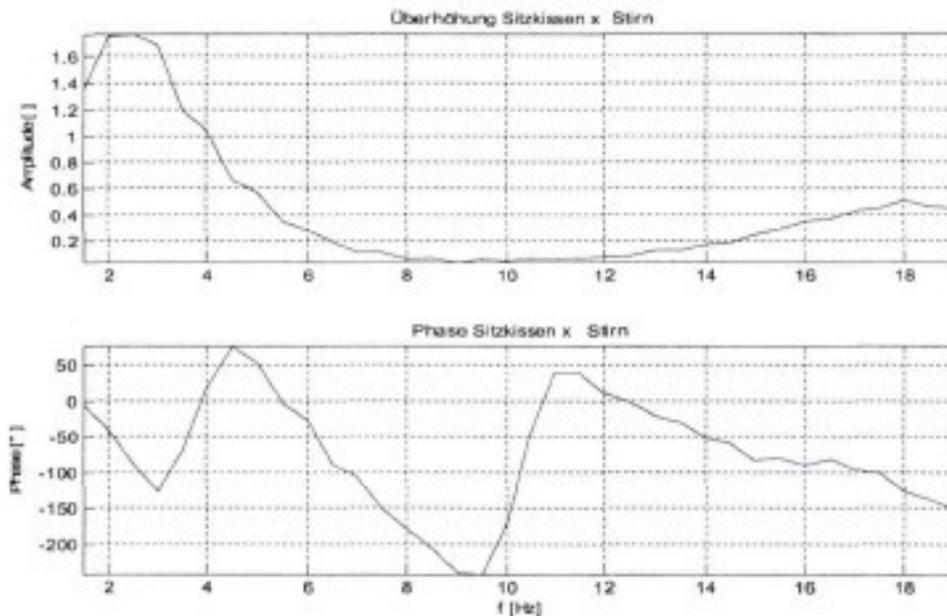


Abbildung 4-19 : Übertragungsfunktion und Phase am Kopf frontal – Anregung in x-Achse

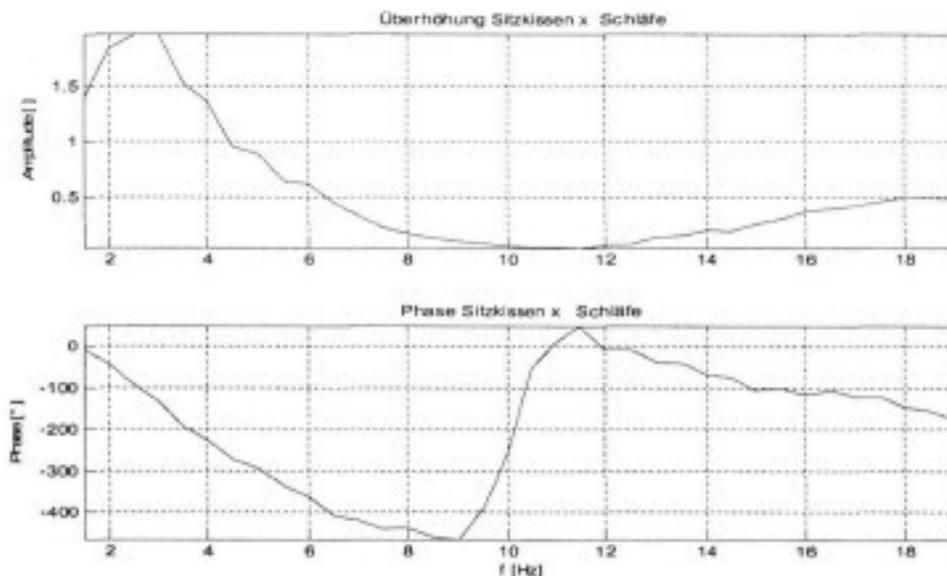


Abbildung 4-20: Übertragungsfunktion und Phase am Kopf lateral – Anregung in x-Achse

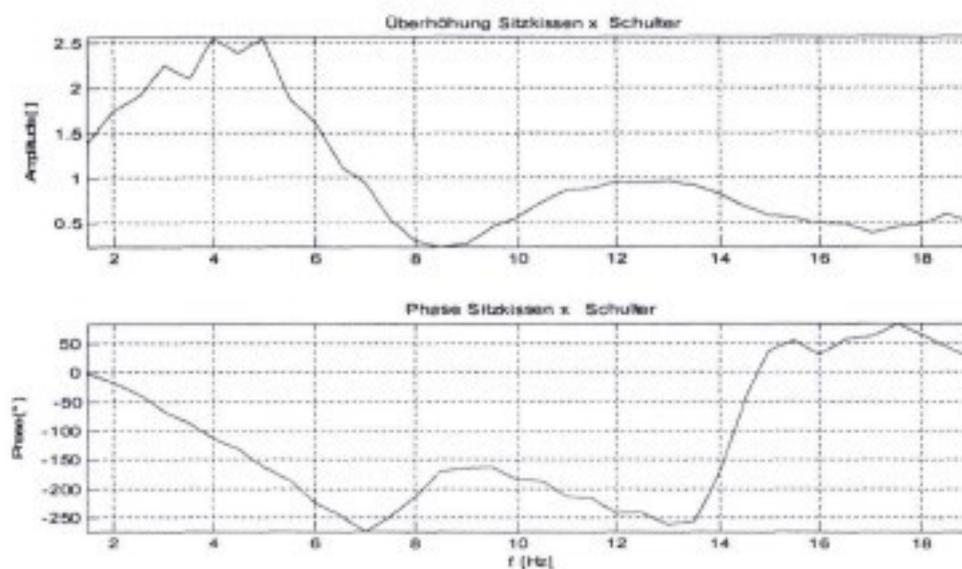


Abbildung 4-21: Übertragungsfunktion und Phase an der Schulter – Anregung in x-Achse

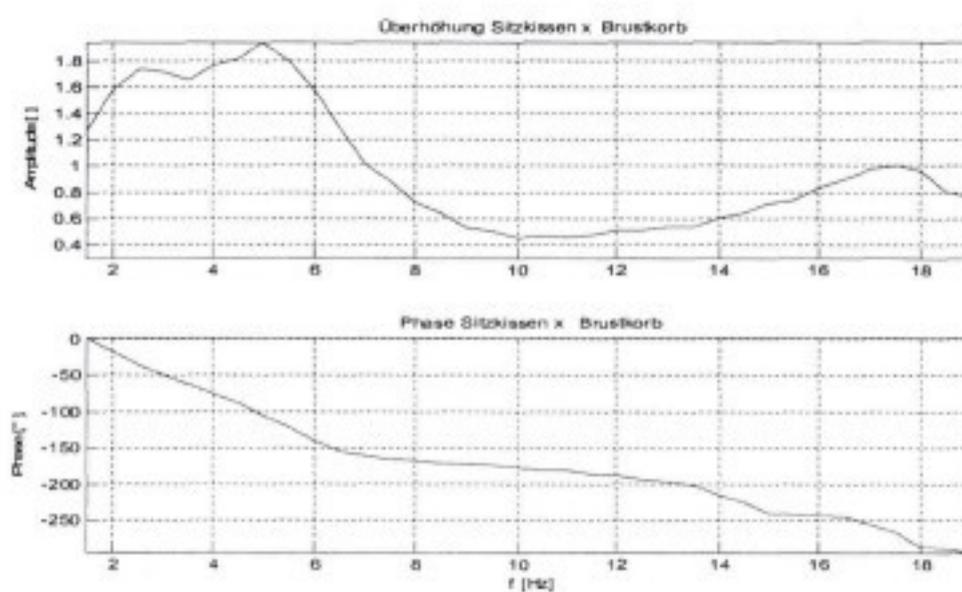


Abbildung 4-22: Übertragungsfunktion und Phase am Brustkorb – Anregung in x-Achse

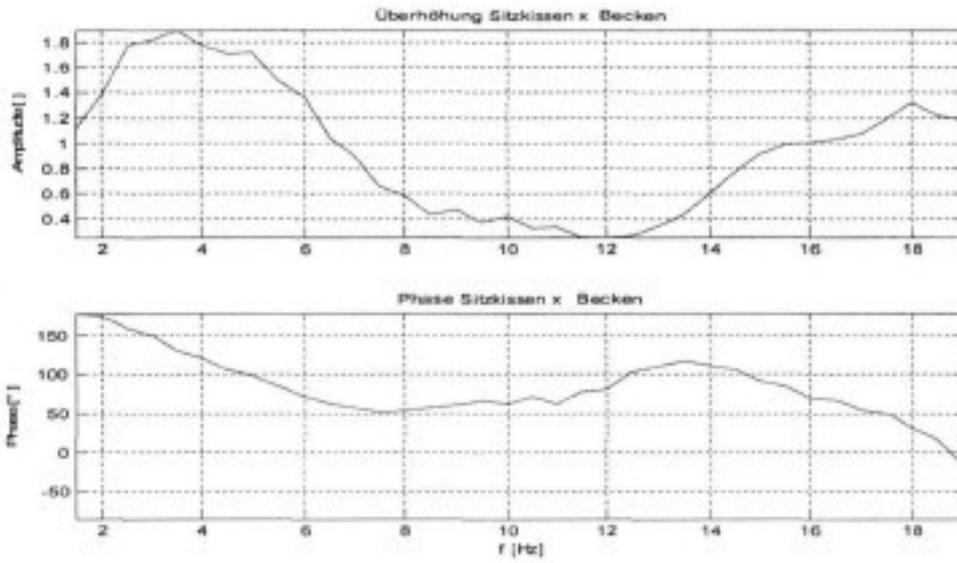


Abbildung 4-23: Übertragungsfunktion und Phase am Becken – Anregung in x-Achse

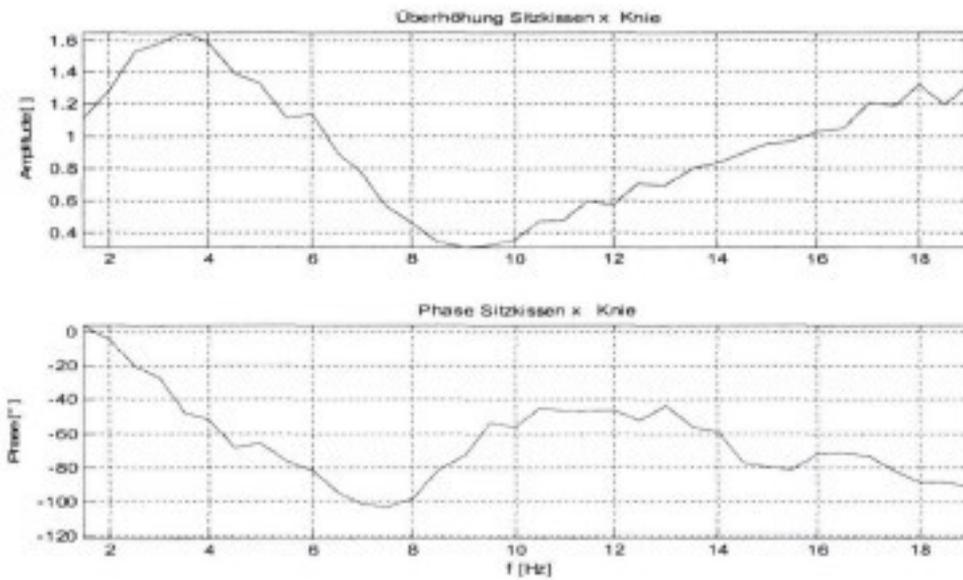


Abbildung 4-24: Übertragungsfunktion und Phase am Knie – Anregung in x-Achse

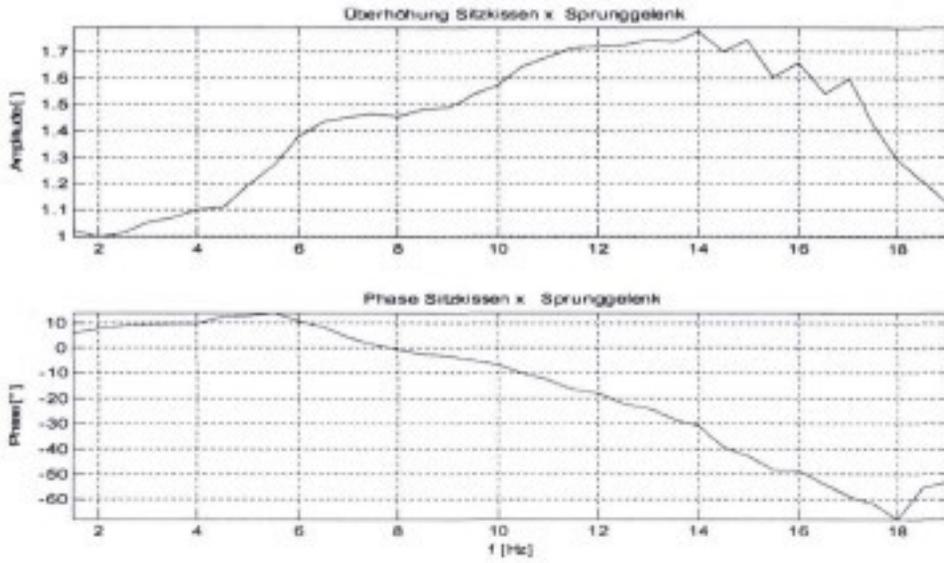


Abbildung 4-25: Übertragungsfunktion und Phase am Sprunggelenk – Anregung in x-Achse

5 Ergebnisse der Simulation

Das Ziel liegt darin, durch die geeignete Struktur des Modells und geeignete Parameterwahl die Simulationsergebnisse den Messergebnissen anzupassen. Dies erfolgte durch optischen Vergleich der ermittelten Übertragungsfunktionen. Es sollten zwei Resonanzen für die z-Anregung gefunden werden und eine für die x-Anregung.

Aus den Messungen waren die Beschleunigungen am Sitzkissen bekannt. Um das Modell anzuregen, wurden durch eine kinematische Steuerung möglichst konsistente Eingangssignale für den Weg, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung vorgegeben. Dazu musste das Beschleunigungssignal zweimal integriert werden. Entsprechend der Auswertung der Messergebnisse wurde mit den Simulationsergebnissen verfahren.

Zur Berechnung des Systemverhaltens des Modells wurde eine nichtlineare Systemanalyse durchgeführt. Eine Linearisierung wurde nicht durchgeführt, da sich das Modell aufgrund der großen Bewegungsamplituden bis maximal 15,8mm von dem Arbeitspunkt entfernen würde.

5.1 Anregung des Modells in z-Richtung

Ergebnisse im Vergleich mit der Messung sind in Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-7 dargestellt. Die gestrichelten Kurven geben die Simulation wieder und die durchgezogenen Kurven zeigen die Messergebnisse

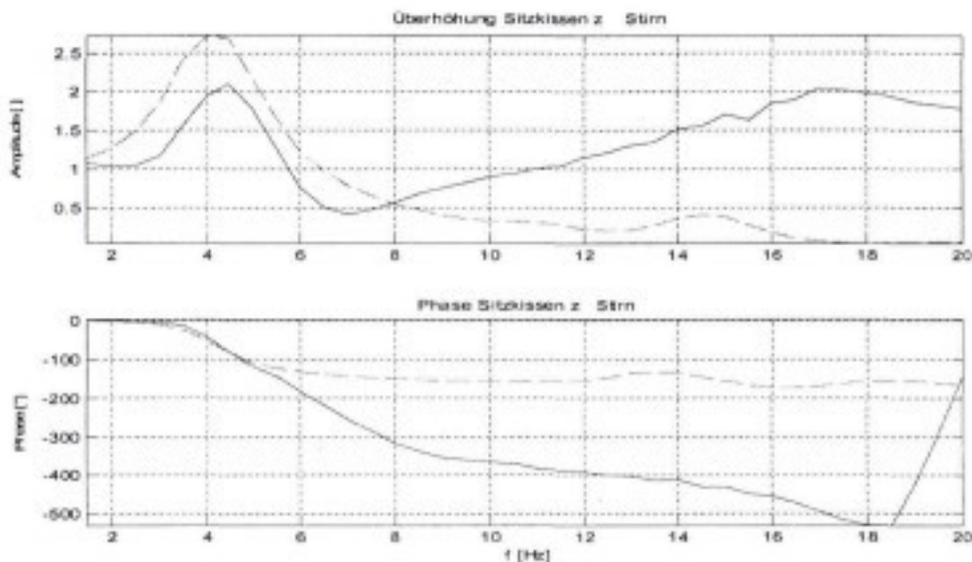


Abbildung 5-1: Simulationsergebnis für die Stirn im Vergleich mit der Messung

Softwaredummy - Ergebnisse der Simulation

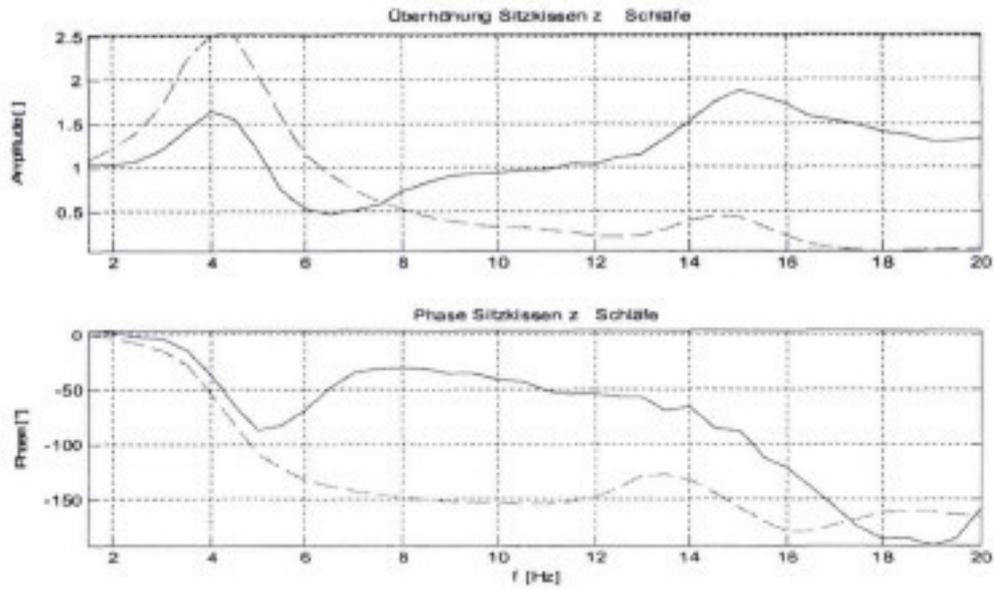


Abbildung 5-2: Simulationsergebnis für die Schläfe im Vergleich mit der Messung

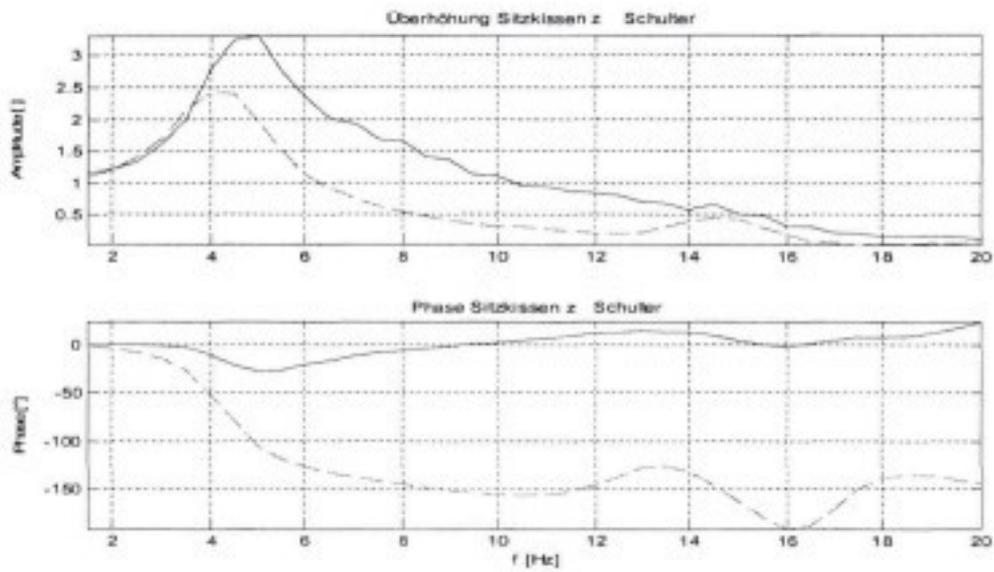


Abbildung 5-3: Simulationsergebnis für die Schulter im Vergleich mit der Messung

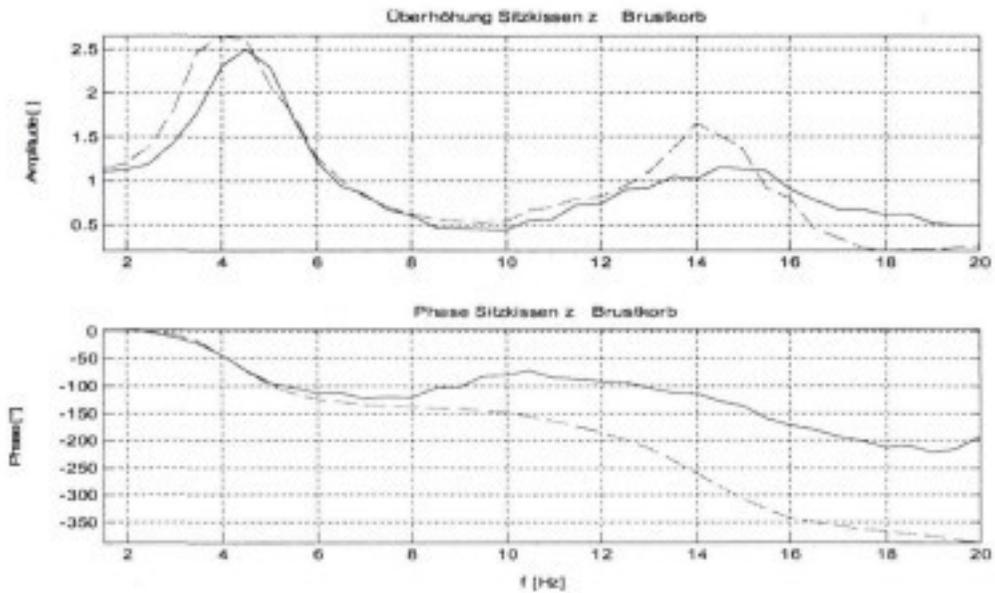


Abbildung 5-4: Simulationsergebnis für den Brustkorb im Vergleich mit der Messung

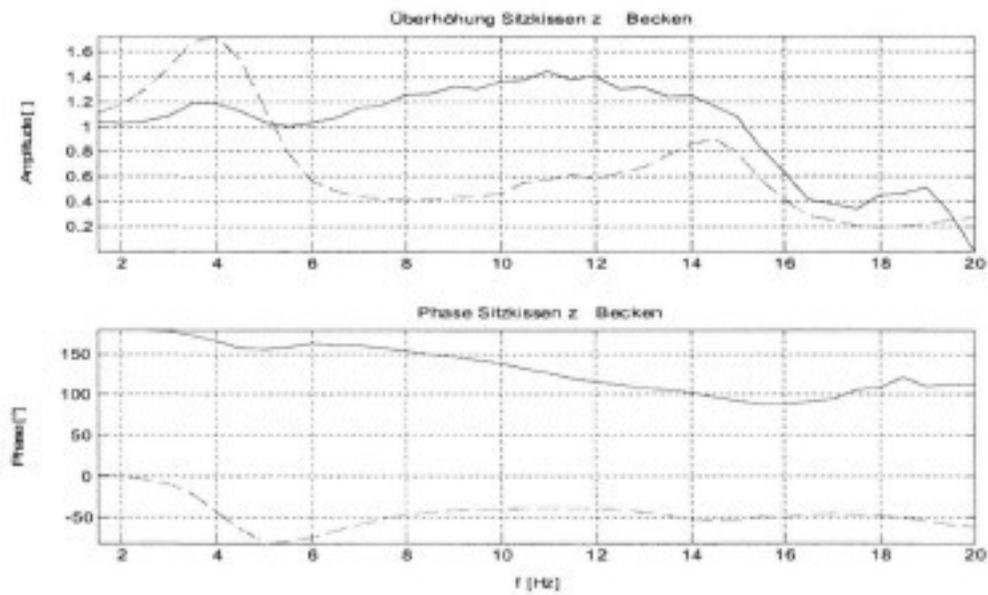


Abbildung 5-5: Simulationsergebnis für das Becken im Vergleich mit der Messung

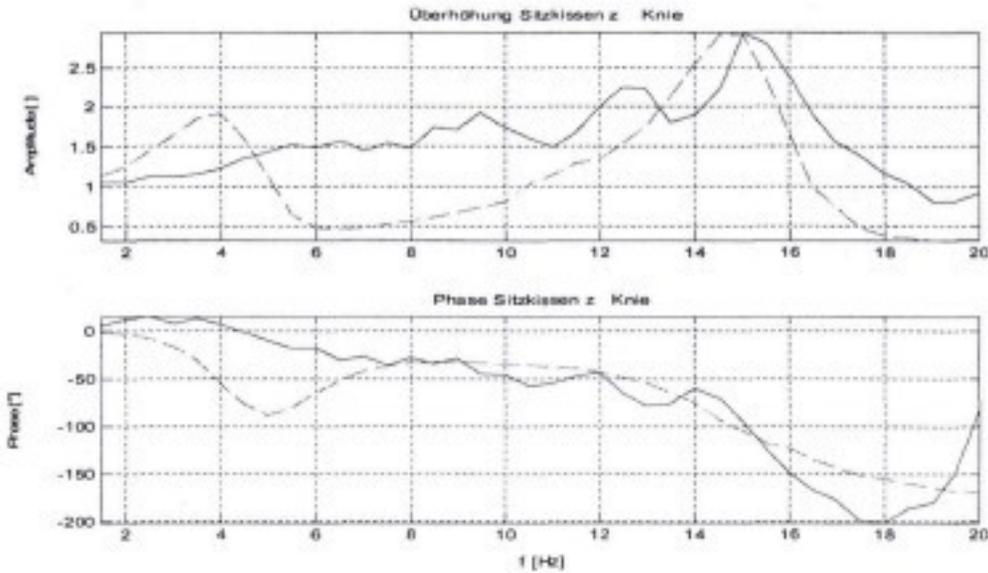


Abbildung 5-6: Simulationsergebnis für das Knie im Vergleich mit der Messung

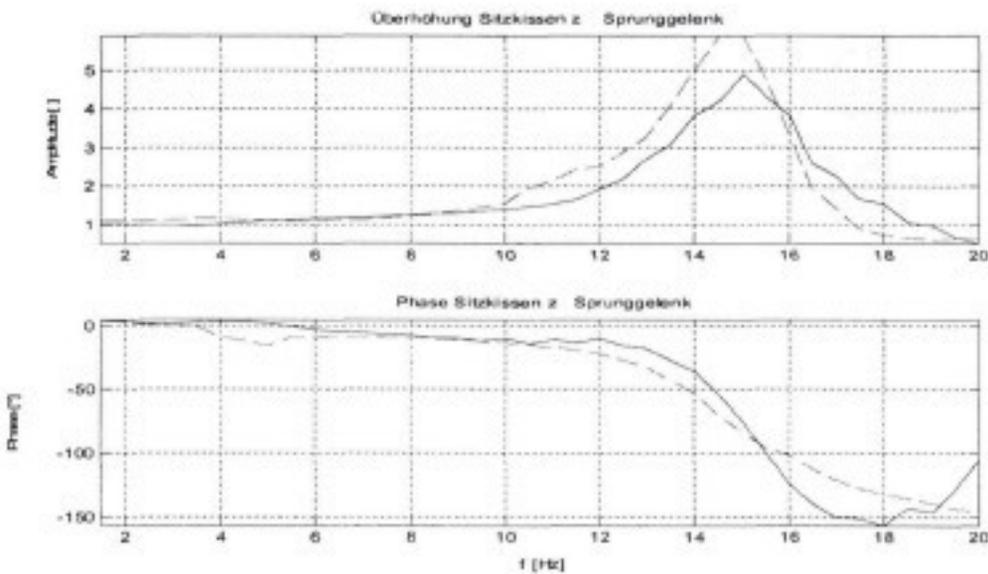


Abbildung 5-7: Simulationsergebnis für das Sprunggelenk im Vergleich mit der Messung

Das Modell zeigt zwei Resonanzen, die erste bei 4 Hz und die zweite bei 15 Hz. Bei den Messungen befinden sich ebenso zwei Überhöhungen an den Stellen am Oberkörper. Die erste Überhöhung bei 4 Hz ist auf eine Schwingungsform des gesamten Oberkörpers zurückzuführen. Am besten gibt das Modell das Übertragungsverhalten des Brustkorbes wieder, an dem eine Schwabbelmasse angebracht ist. Die Beschleunigungsaufnehmer haben während der Schwingungsmessung, trotz der Befestigung auf Gipsabdrücken, die Weichteilbewegung mit gemessen, Daher die gute Übereinstimmung am Brustkorb. Am Becken ist die Übereinstimmung nicht so gut, was auch am zweifelhaften Messwert liegt (siehe Kapitel 4.3.2). Die Ankopplung des Modells über die Schwabbelmasse am Becken

hat gezeigt, dass diese als eine Art Tiefpassfilter wirkt. Die Frequenzstellen der Überhöhungen des Oberkörpers sind dadurch verringert worden.

Während die 15Hz-Resonanz beim Knie und Sprunggelenk stark ausgeprägt vorkommt, ist sie bei den anderen Körperteilen weniger ausgeprägt, aber deutlich bei Schläfe und Becken zu erkennen.

5.2 Anregung des Modells in x-Richtung

Die Ergebnisse aus der x-Anregung im Vergleich mit der Messung sind in Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-13 dargestellt. Die gestrichelten Kurven geben die Simulation wieder und die durchgezogenen Kurven zeigen die Messergebnisse. Wie in Kapitel 4.3.3 erläutert, wird das Sprunggelenk nicht zum Vergleich herangezogen.

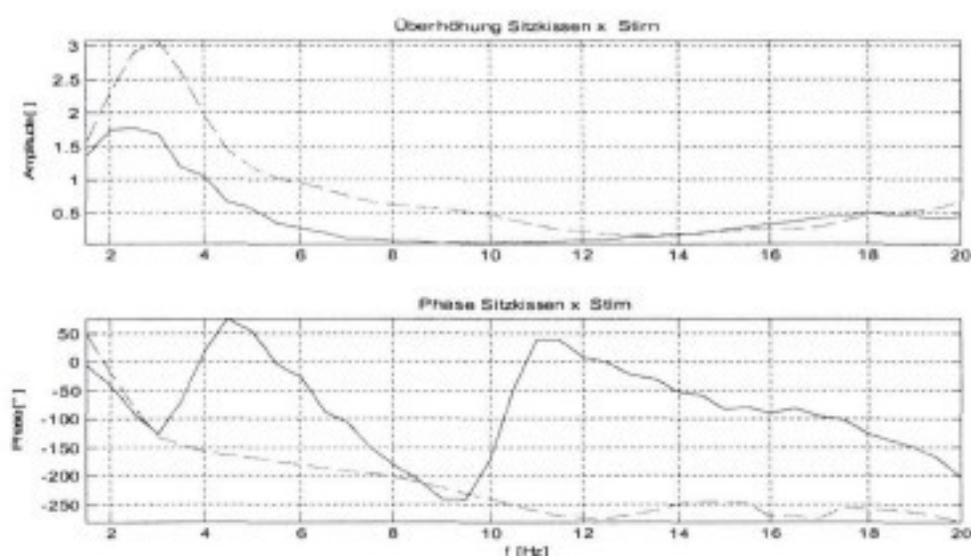


Abbildung 5-8: Simulationsergebnis für die Stirn im Vergleich mit der Messung

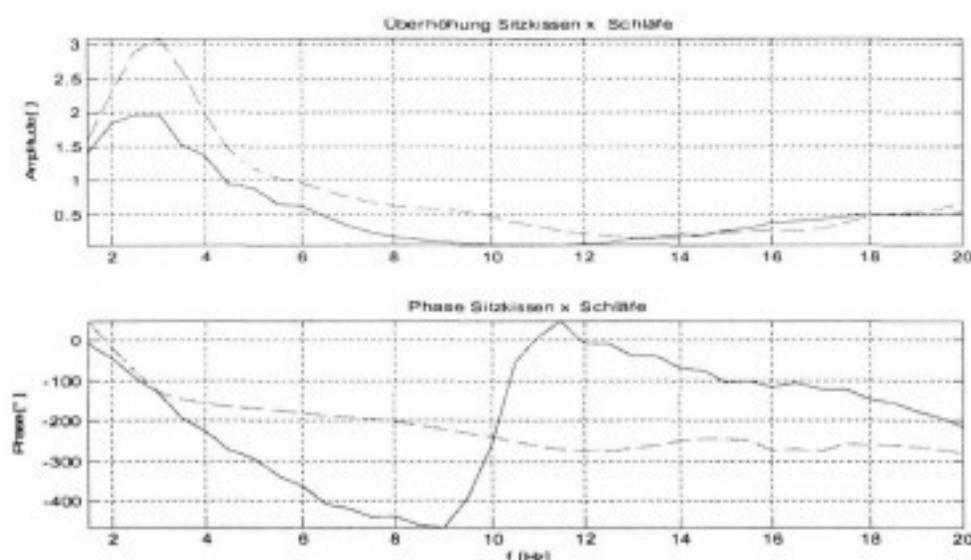


Abbildung 5-9: Simulationsergebnis für die Schläfe im Vergleich mit der Messung

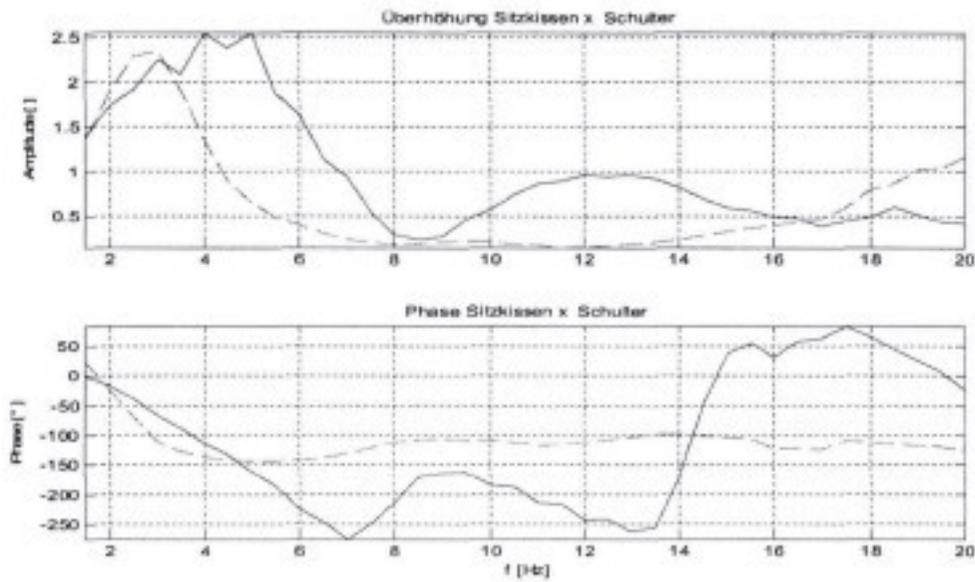


Abbildung 5-10: Simulationsergebnis für die Schulter im Vergleich mit der Messung

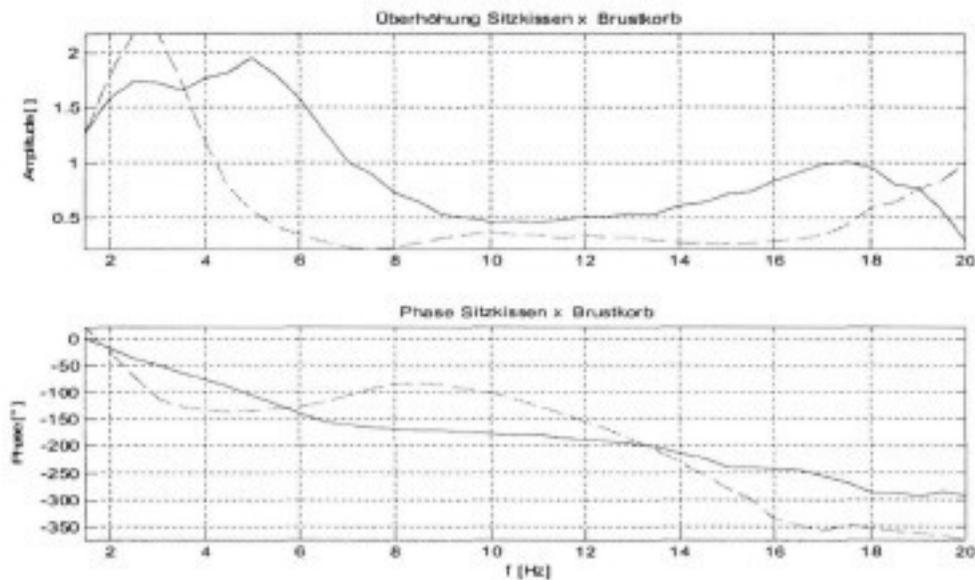


Abbildung 5-11: Simulationsergebnis für dem Brustkorb im Vergleich mit der Messung

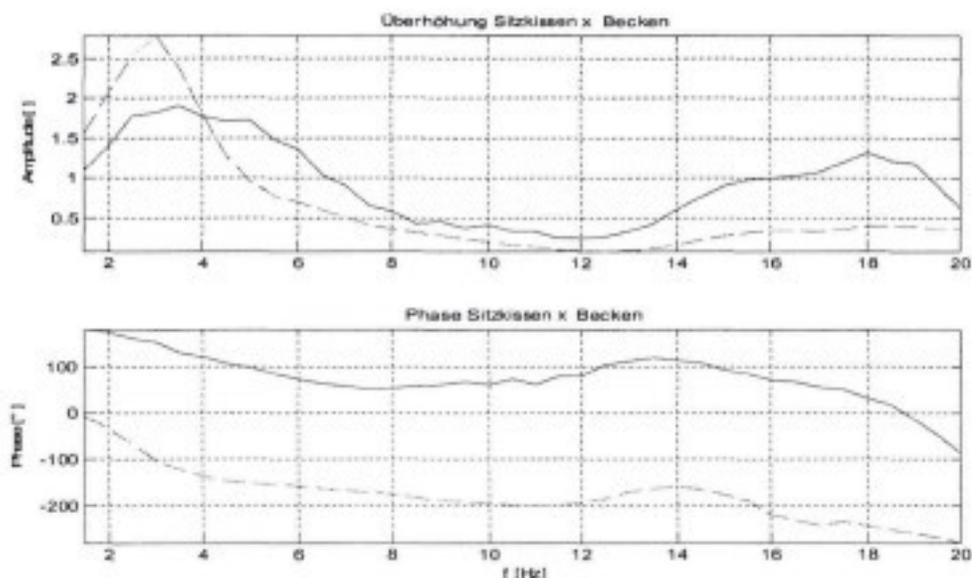


Abbildung 5-12: Simulationsergebnis für das Becken im Vergleich mit der Messung

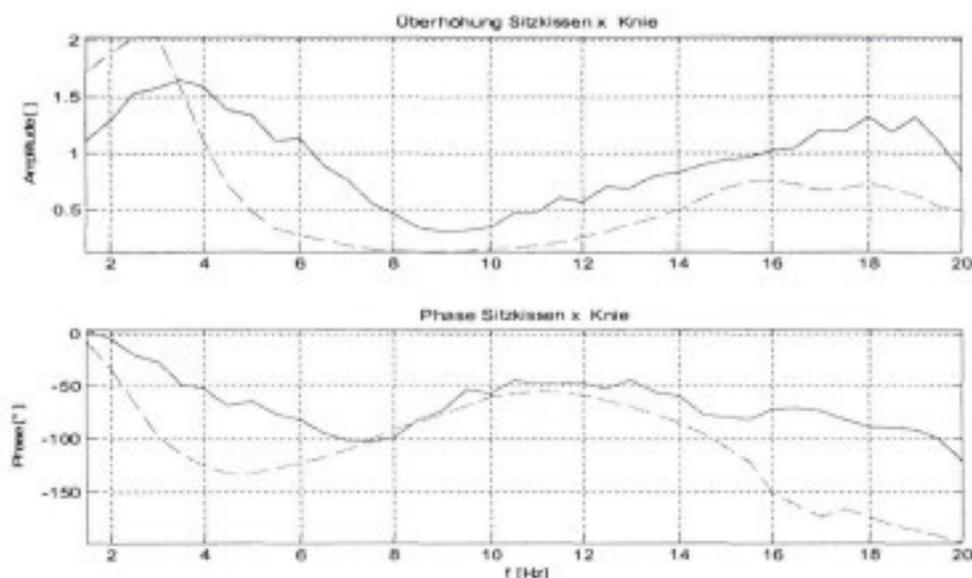


Abbildung 5-13: Simulationsergebnis für das Knie im Vergleich mit der Messung

Wie die Messung zeigt die Simulation eine Überhöhung bei 3 Hz. Damit stimmt das Modell in x-Richtung für diese Überhöhung mit der Realität überein. Am besten stimmen die Kurven am Kopf überein. Im Vergleich liegen die Simulationskurven an der Resonanzstelle über den Messkurven. Der Kurvenverlauf der Simulation bei höheren Frequenzen ab 14 Hz ist auch schon mit der Messung vergleichbar, am besten decken sich die Kurven ebenfalls am Kopf. Auf Grund des besonderen Bewegungsverhaltens der Schulter (siehe Kapitel 4.3.3), weichen die Kurven bei 12Hz stark voneinander ab. Auch das Becken zeigt einen größeren Schwingungsbauch als bei der Simulation.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde auf Basis eines Mehrkörpersystems ein Menschmodell entwickelt, das zur Simulation von Schwingungen beim Fahren herangezogen werden soll. Um das Modell unabhängig vom Sitz zu verifizieren, wurden Schwingungsmessungen auf einem Holzstuhl mit einer Versuchsperson durchgeführt. Die Schwingungen wurden in Form eines Schrittsinus im Frequenzbereich von 1,5 bis 20 Hz in x- und in z-Richtung eingeleitet und die Beschleunigungen an verschiedenen Körperstellen gemessen. Daraus wurden die zugehörigen Übertragungsfunktionen berechnet.

Die Ergebnisse der Simulation wurden mit den Messungen verglichen. Das Modell besitzt für die Anregung in z-Richtung ebenso wie die Messergebnisse zwei charakteristische Resonanzstellen für das Übertragungsverhalten, eine liegt für beide Ergebnisse bei 4 Hz, die andere liegt bei 15 Hz. Die erste lässt sich auf eine Gesamtschwingung des Oberkörpers zurückführen.

In x-Richtung zeigt das Modell eine Resonanz bei 3 Hz in Übereinstimmung mit der Messung. Auch das Verhalten ab 14 Hz zeigt das bei der Messung charakteristische Ansteigen der Kurven.

Die an den Hauptresonanzstellen höher liegenden Simulationsergebnisse können auf eine zu geringe Dämpfung des Gesamtmodells zurückgeführt werden. Dies kann bei einer Verbesserung des Modells berücksichtigt werden.

Bei Berücksichtigung nur weniger Resonanzkurven von ausgewählten Körperpunkten, könnten das Modellverhalten noch besser an die Messkurven angepasst werden. In der vorliegenden Arbeit sind bis auf das Sprunggelenk in x-Richtung alle Übertragungsfunktionen der gemessenen Körperpunkte berücksichtigt worden, auch wenn wie beim Becken das Ergebnis mit Vorsicht zu betrachten ist.

Das Menschmodell zeigt Übereinstimmungen mit der Übertragungsfunktion, d.h. einer mathematisch definierten Funktion, einer Versuchsperson. Dies gestattet keine Aussage, wie genau das Modell physiologische Eigenschaften des Menschen wiedergibt. Dazu müssten einzelne Körperbereiche genauer untersucht werden, um validierte Teilmodelle zu erhalten.

Die gefundenen Parameter des Modells können für Menschmodelle zur Simulation der Schwingungsbelastung im Fahrzeug verwendet werden oder zum Bau eines Hardwaredummys für die Sitzbewertung.

Literaturverzeichnis

- [1] **Clarence W. de Silva**: Vibration – Fundamentals and Practice. CRC Press, 2000
- [2] **M. M. Verver, J. van Hoof**: Vibration Analysis with MADYMO Human Models, SAE-DHMC (Digital Human Modelling Conference), VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik, VDI-Berichte 1675, VDI-Verlag, 2002
- [3] **G. S. Paddan, M. J. Griffin**: A Review of the Transmission of Translational Seat Vibration to the Head, Journal of Sound and Vibration 215(4), 863-882, 1988
- [4] **K. Gruber, H. Ruder, J. Denoth, K. Schneider**: A comparative study of impact dynamics: wobbling mass model versus rigid body models, J. Biomechanics (31), 439-444, 1997
- [5] **P. Kirchknopf, F. Castellan, A. D. Coste, C. Rekert, C. Schulze**: Optimaler Schwingungskomfort durch gezielte Analyse des Mensch-Sitzsystems, 4. Internat. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, expert verlag, 2001
- [6] **T. H. Schiebler, W. Schmidt (Hrsg)**: Lehrbuch der gesamten Anatomie des Menschen, Springer-Verlag, 1983
- [7] **M. Fritz**: Simulating the response of a standing operator to vibration stress by means of a biomechanical model, J. Biomechanics (33), 795-802, 2000
- [8] **Y.-C. Deng, W. Goldsmith**: Response of a human head/neck/upper-torso replica to dynamic loading II. Analytical/Numerical model, J. Biomechanics (20), 487-497, 1987
- [9] **IFM**: alaska 4.1 - Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme – Referenzhandbuch, Benutzerhandbuch
- [10] **W. Diebschlag, F. Heidinger, H. Depuis, E. Hartung, H. Meiller**: Ergonomie des Sitzens. Arbeitsmedizinische und technische Aspekte der Sitzgestaltung, Verlag Moderne Industrie, 1992
- [11] **Dubbel**: Taschenbuch für den Maschinenbau, Herausgeber: W. Beitz und K.-H. Küttner, Springer, 15. Auflage, 1983
- [12] **Eisenmenger et al**: Experimentalphysik 1 - Mechanik, Universität Stuttgart – Physikalisches Institut, 1993
- [13] **K.D. Kammeyer, K. Kroschel**: Digitale Signalverarbeitung - Filterung und Spektralanalyse, Teubner, 1996
- [14] **H. Vogel**: Gerthsen Physik, Springer, 20. Auflage, 1999
- [15] **Meyberg Vachenaue**: Höhere Mathematik, Springer, 1993
- [15] **Bronstein, Semendjajew**: Taschenbuch der Mathematik, Teubner, Thun, 25. Auflage 1991
- [16] **McConnell**: Vibration Testing – Theory and Practice, Wiley, 1995

Anhang

Parameterdateien

```

READONLYFILE;
/*****
//      PARAMETERFILE
//*****
//
// 7.6.02, Florian Fritzsche
TContainer par;
  par {

REAL(3) N3;
N3={0,0,0};
REAL(3)(3) E33;
E33 = {{1,0,0}, {0,1,0}, {0,0,1}};

//***** Sitz- und Lehnenfläche pelviscenter *****/

REAL p_ROT_BE_LF, p_LF_R1, p_LF_R2, p_LF_R3, p_SF_R1, p_SF_R2, p_SF_R3, p_KS_R1, p_KS_R2
, p_ROT_BE_Sitz, p_sitzmasse, Dichte_Sitzkissen, Dichte_Lehne;

REAL(3) p3_POS_LF, p3_POS_X_SF;

p_LF_R1=0.604/2;
p_LF_R2=0.496/2;
p_LF_R3=0.015/2;
p_SF_R1=0.383/2;
p_SF_R2=0.496/2;
p_SF_R3=0.015/2;
//p_KS_R1=0.15;
//p_KS_R2=0.2;
p_ROT_BE_Sitz=-0.17;
p_sitzmasse=30.2; // [kg]
Dichte_Sitzkissen=4.9e3;
Dichte_Lehne=1335.2;
p3_POS_X_SF={0.00, 0.0, 0.0};
p_ROT_BE_LF=1.33;
p3_POS_LF={(p3_POS_X_SF[1]-(p_SF_R1))-cos(p_ROT_BE_LF)*(p_SF_R1), 0,
sin(p_ROT_BE_LF)*(p_LF_R1)};

//***** Boden, Fußstütze
*****/

REAL p_BE_K1, p_Boden_R1, p_Boden_R2, p_FS_R1, p_FS_R2, p_ROT_BE_FS, p_Schuhschle;

REAL(3) p3_FS_BFR_Fussstuetze_r, p3_FS_BFR_Fussstuetze_l, p3_Boden_bzglstutzverb,
p3_Basis_bzglIFR;
p_FS_R1= 0.2863/2;
p_FS_R2= 0.05/2;
p_Schuhschle=0.03;
p_ROT_BE_FS= -0.432;
p_BE_K1= 0.693;
p_Boden_R1= 1.0;
p_Boden_R2= 0.5;
p3_Boden_bzglstutzverb={0, 0, -0.244}; // entsprechend bzgl IFR
p3_Basis_bzglIFR={-0.0874207004473567, 0, -
(0.17*p_CP_pelvis_r_akin[1]*sin(p_ROT_BE_Sitz))};
//{(p_CP_pelvis_r_akin[1]*cos(p_ROT_BE_Sitz), 0, -
(0.17*p_CP_pelvis_r_akin[1]*sin(p_ROT_BE_Sitz))};
p3_FS_BFR_Fussstuetze_r={ p_SF_R1*cos(p_ROT_BE_Sitz)-
p3_POS_X_SF[1]+0.41+p_FS_R1*cos(p_ROT_BE_FS)-p_Schuhschle*sin(-p_ROT_BE_FS),
Anthropometriedaten.p_PELVIS_THIGH_Y_R, p3_Boden_bzglstutzverb[3]+p_FS_R1*sin(-
p_ROT_BE_FS)+p_Schuhschle*cos(-p_ROT_BE_FS)};
p3_FS_BFR_Fussstuetze_l={ p_SF_R1*cos(p_ROT_BE_Sitz)-
p3_POS_X_SF[1]+0.41+p_FS_R1*cos(p_ROT_BE_FS)-p_Schuhschle*sin(-p_ROT_BE_FS),

```

```

Anthropometriedaten.p_PELVIS_THIGH_Y_L, p3_Boden_bzgsitzverb[3]+p_FS_R1*sin(-
p_ROT_BE_FS)+p_Schuhsohle*cos(-p_ROT_BE_FS));

//***** Kontaktkraftparameter *****

REAL p_CF_C, p_CF_K, p_CF_D, p_CF_C_foot, p_CF_K_foot, p_CF_D_foot, p_friction_SF,
FS_forearm_C, FS_forearm_K,
  FS_forearm_L0;

p_CF_C=50000;
p_CF_K=150;//1500;
p_CF_D=0.01;
p_CF_C_foot=22000;//3.0e+5;
p_CF_K_foot=100;//10000
p_CF_D_foot=0.01;
p_friction_SF=0.0;
FS_forearm_C=2000;
FS_forearm_K=20;
FS_forearm_L0=0.01;

//***** Position der Koordinatensysteme für die Hautverschiebung (CF Pos1 - CP auf CG1
in CG1) *****

REAL[3] p_CP_pelvis_r_skin, p_CP_pelvis_l_skin, p_CP_pelvis_sl_skin, p_CP_pelvis_s_skin,
  p_CP_thorax_r_skin, p_CP_thorax_l_skin, p_CP_foot_FS_r_skin, p_CP_foot_FS_l_skin;

p_CP_pelvis_r_skin = {-0.106385, -0.05, 0};
p_CP_pelvis_l_skin = {-0.106385, 0.055, 0};
p_CP_pelvis_s_skin = {0.241884, -0.080423, 0};
p_CP_pelvis_sl_skin = {0.241884, 0.080423, 0};
p_CP_thorax_r_skin = {0.005264, -0.061570, 0};
p_CP_thorax_l_skin = {0.005264, 0.06157, 0};
p_CP_foot_FS_r_skin = {-0.03233, -0.006979, 0};
p_CP_foot_FS_l_skin = {-0.03233, 0.006979, 0};
//p_CP_thigh_r_skin = {0.0365594, -0.955, 0};
//p_CP_thigh_l_skin={0.0365594, 0.955, 0};
//p_CP_lubus_r_skin = {0.0687864, -0.0802215, 0};
//p_CP_lubus_l_skin = {0.0687864, 0.0802215, 0};

// *** forearm ***

REAL[3] CP_forearm_r, CP_forearm_l;

CP_forearm_r = V3pV3(forearm_r.Body.hand.Pos,{-Anthropometriedaten.p_FOARM_R2, 0, 0});
CP_forearm_l = V3pV3(forearm_l.Body.hand.Pos,{-Anthropometriedaten.p_FOARM_R2, 0, 0});

// *** thigh ***
REAL[3] CP_thigh_forearm_r, CP_thigh_forearm_l;
CP_thigh_forearm_l = {0.0541615, 0.0250745, -0.0639341};
CP_thigh_forearm_r = {0.0541615, -0.0250745, -0.0639341};

// *** thorax ***
REAL rel_thorax, rel_thorax_wob, geom_wob;
rel_thorax_wob=0.7;
rel_thorax=1.0-rel_thorax_wob;
geom_wob=0.8;

// *** pelvis ***
REAL rel_pelvis, rel_pelvis_wob;
rel_pelvis_wob=0.7;
rel_pelvis=1.0-rel_pelvis_wob;

}

```

```

TContainer Force_Parameter;
Force_Parameter {
    REAL fm_11;
    REAL fm_11_neg;
    REAL fm_22;
    REAL fm_33;
    REAL fm_33_neg;
    REAL fm_44;
    REAL fm_55;
    REAL fm_55_neg;
    REAL fm_66;
    REAL fm_66_lumbus;
    REAL fm_13;
    REAL fm_15;
    REAL fm_24;
    REAL fm_26;
    REAL fm_35;
    REAL fm_46;
    REAL scale_fm;
    REAL scale_dm;
    REAL c_pelvis_lumbus;
    REAL c_lumbus_thorax;
    REAL c_thorax_neck;
    REAL c_neck_head;
// Kraftmatrix (thoracic spine):
    fm_11=1.0e5;
    fm_22=1.1e5;
    fm_33=1.24e6;
    fm_44=197;
    fm_55=186;
    fm_66=145;
    fm_13=-2.0e4;
    fm_15=-1.56e3;
    fm_24=1.64e3;
    fm_26=620;
    fm_35=-730;
    fm_46=2;
// lumbar spine axiale Rotation unterbunden:
    fm_66_lumbus=1.0e4;
// Parameter für negative Auslenkungen:
    fm_11_neg=3.57e4;
    fm_33_neg=3.4434e6;
    fm_55_neg=227;
// Skalierung der Kraftmatrix:
    scale_fm=1.0;
    scale_dm=0.5;//1.0;
    c_pelvis_lumbus=2.4;
    c_lumbus_thorax=1.9;
    c_thorax_neck=1.1;
    c_neck_head=0.6;

// Netto-Gelenkmomente (für alle Gelenke) unterteilt in elastische und viskose
Anteile:
    REAL c_joints;
    REAL d_joints;
    c_joints=120;
    d_joints=8;

// Konstanten für die Hautverschiebung (Kontaktkraft tangential)
    REAL const_skin_C, const_skin_C_foot, const_skin_K, const_skin_K_foot;
    const_skin_C=5000;//100000
    const_skin_K=100;//10
    const_skin_C_foot=30000;
    const_skin_K_foot=100;

// Konstanten für die Wobbling Mass Ankopplung - thorax (Brustkorb):
    REAL f0_thorax_wob, c_wob, d_wob, a_wob, b_wob, A_thorax_wob, preload_z, preload_x,
preload_be;
    f0_thorax_wob=13;
    c_wob=.thorax_wob.Body.Mass*4*PI*PI*f0_thorax_wob*f0_thorax_wob;//1994.24;//194.75;
    d_wob=140;//40;

```

```

a_wob=.thorax_wob.Body.Inertia[2][2]*4*PI*PI*f0_thorax_wob*f0_thorax_wob;//23.52;//2.3;
  b_wob=2.89;
  preload_z=0.5*0.98*77.9; // Faktor 0,5 damit NM nicht ausreist
  preload_x=0.5*0.02*77.9;
  preload_be=2.0;

/*
  c_wob=1.6e10;
  d_wob=1.4e4;
  a_wob=6.3e3;
  b_wob=31.6;
  A_thorax_wob=0.1;
*/

// Konstanten für die Wobbling Mass Ankopplung - pelvis:
REAL f0_pelvis_wob, f_d_pelvis_wob, c_wob_pelvis, d_wob_pelvis, a_wob_pelvis,
b_wob_pelvis,
  preload_z_pelvis, preload_x_pelvis, preload_be_pelvis;
  f0_pelvis_wob=11;
  f_d_pelvis_wob=10;
  c_wob_pelvis=72760;//60*4*PI*PI*f0_pelvis_wob*f0_pelvis_wob; //pelvis_wob_masse=6,7;
  //pelvis_wob.Body.Mass;
  d_wob_pelvis=860;//2*60*2*PI*sqrt(f0_pelvis_wob*f0_pelvis_wob-
f_d_pelvis_wob*f_d_pelvis_wob); //74.5; //1245;0; //pelvis_wob.Body.Mass
  a_wob_pelvis=140; //505;//86000;
  //pelvis_wob.Body.Inertia[2][2]*4*PI*PI*f0_pelvis_wob*f0_pelvis_wob;
  b_wob_pelvis=2.89; //0,56;//165;
  //2*.pelvis_wob.Body.Inertia[2][2]*2*PI*sqrt(f0_pelvis_wob*f0_pelvis_wob-
f_d_pelvis_wob*f_d_pelvis_wob);
  preload_z_pelvis=0.5*0.98*420; // Faktor 0,5 damit NM nicht ausreist
  preload_x_pelvis=0.5*0.02*420;
  preload_be_pelvis=2.0;

// Konstanten für das Rückstellmoment des Sitzes
REAL c_sitzplanar, d_sitzplanar;
c_sitzplanar=560;//masse=14kg, w0=18Hz
d_sitzplanar=50;
}

```

```

TContainer Anfangsbedingungen;
Anfangsbedingungen {
    REAL be_ndisp_thorax_neck;
    REAL be_ndisp_neck_head;
    REAL be_ndisp_IFR_pelvis;
    REAL be_ndisp_pelvis_lumbus;
    REAL be_ndisp_lumbus_thorax;
    REAL al_shoulder_r;
    REAL be_shoulder_r;
    REAL ga_shoulder_r;
    REAL al_shoulder_l;
    REAL be_shoulder_l;
    REAL ga_shoulder_l;
    REAL al_hip_r;
    REAL be_hip_r;
    REAL ga_hip_r;
    REAL al_hip_l;
    REAL be_hip_l;
    REAL ga_hip_l; /* NDisp Hüfte/Schulter*/
    REAL nd_al_shoulder_r;
    REAL nd_be_shoulder_r;
    REAL nd_ga_shoulder_r;
    REAL nd_al_shoulder_l;
    REAL nd_be_shoulder_l;
    REAL nd_ga_shoulder_l;
    REAL nd_al_hip_r;
    REAL nd_be_hip_r;
    REAL nd_ga_hip_r;
    REAL nd_al_hip_l;
    REAL nd_be_hip_l;
    REAL nd_ga_hip_l; /* Anfangsbed. (JointRevolute)*/
    REAL rev_knee_r;
    REAL rev_ankle_r;
    REAL rev_knee_l;
    REAL rev_ankle_l;
    REAL rev_elbow_r;
    REAL rev_wrist_r;
    REAL rev_elbow_l;
    REAL rev_wrist_l; /* NDisp (JointRevolute)*/
    REAL nd_rev_knee_r;
    REAL nd_rev_ankle_r;
    REAL nd_rev_knee_l;
    REAL nd_rev_ankle_l;
    REAL nd_rev_elbow_r;
    REAL nd_rev_wrist_r;
    REAL nd_rev_elbow_l;
    REAL nd_rev_wrist_l;

// Anfangsbedingungen: Winkel in rad

// *** RevoluteJoints ***
    REAL p_BE_K, p_rev_ankle, REV_ELBOW; // Kniewinkel
    p_BE_K=1.1;
    REV_ELBOW = 1.38;
    p_rev_ankle =PI_2-0.26;

// *** SphericalJoints ***
    REAL p_BE_HIP, GA_SHOULDER;

    p_BE_HIP = -0.28-be_ndisp_IFR_pelvis;
    GA_SHOULDER = 0.09;

// *** UpperBody 6DOF ***
    REAL p_IC_Oberkoerper_x, p_IC_Oberkoerper_z;

    p_IC_Oberkoerper_x = -0.1;//0; //-0.08;
    p_IC_Oberkoerper_z = 0.12;//0.2;

    be_ndisp_neck_head=0.08;
    be_ndisp_thorax_neck=0.11;
    be_ndisp_lumbus_thorax=0.35; // T12-L1 repres angle: 12 , ROF: 6-20
    be_ndisp_pelvis_lumbus=-0.36; // L5-S1 repres angle: 17 , ROF: 10-24

```

```
be_ndisp_IFR_pelvis=-0.18;

al_shoulder_r=0;
be_shoulder_r=0;
ga_shoulder_r=GA_SHOULDER;
al_shoulder_l=0;
be_shoulder_l=0;
ga_shoulder_l=-GA_SHOULDER;
al_hip_r=0;
be_hip_r=p_BE_HIP;
ga_hip_r=0;
al_hip_l=0;
be_hip_l=p_BE_HIP;
ga_hip_l=0;
rev_knee_r=p_BE_K;
rev_knee_l=p_BE_K;
rev_ankle_r=p_rev_ankle;
rev_ankle_l=p_rev_ankle;
rev_elbow_r=REV_ELBOW;
rev_elbow_l=REV_ELBOW;
rev_wrist_r=0;
rev_wrist_l=0; /*Nullage (NDisp)*/
nd_al_shoulder_r=0;
nd_be_shoulder_r=0;
nd_ga_shoulder_r=GA_SHOULDER;
nd_al_shoulder_l=0;
nd_be_shoulder_l=0;
nd_ga_shoulder_l=-GA_SHOULDER;
nd_al_hip_r=0;
nd_be_hip_r=p_BE_HIP;
nd_ga_hip_r=0;
nd_al_hip_l=0;
nd_be_hip_l=p_BE_HIP;
nd_ga_hip_l=0;
nd_rev_knee_r=p_BE_K;
nd_rev_knee_l=p_BE_K;
nd_rev_ankle_r=p_rev_ankle;
nd_rev_ankle_l=p_rev_ankle;
nd_rev_elbow_r=REV_ELBOW;
nd_rev_elbow_l=REV_ELBOW;
nd_rev_wrist_r=0;
nd_rev_wrist_l=0;
}
```

Projektbegleitender FAT-Ausschuss 'Schwingungsdummy'

Adam Opel AG
Dipl.-Ing. Ulrich Braun
65423 Rüsselsheim

Keiper GmbH & Co.
Klaus Dalheimer
67601 Kaiserslautern

Johnson Controls GmbH Automotive Group
Dr. Jan Thunnissen
51399 Burscheid

DaimlerChrysler AG
Norbert Polifke
70546 Stuttgart

B M W AG
Dr. rer.nat. Ernst Assmann
80788 München

B M W AG
Dr. Peter Kirchknopf
80788 München

MAN Nutzfahrzeuge AG
Thomas Ille
80995 München

MAN Nutzfahrzeuge AG
Friedrich Schaffer
80995 München

Volkswagen AG
Peter Münkner
38463 Wolfsburg

Volkswagen AG
Dipl.-Phys. Peter Hillebrand
38463 Wolfsburg

Adam Opel AG
Dipl.-Phys. Armin Wick
65423 Rüsselsheim

Daimler Chrysler AG
Rupert Niethammer
71059 Sindelfingen

DaimlerChrysler AG
Dr.-Ing. Werner Reichelt
70546 Stuttgart

Robert Bosch GmbH
Dr.-Ing. Winfried König
70442 Stuttgart

Ford Werke AG
Dr. med. Dipl.-Ing. Werner Koch
52072 Aachen

Ford Werke AG
Dr. Gunther Paul
50725 Köln

AUDI AG
Mehmet Cakmak
85045 Ingolstadt

AUDI AG
Dr. Eckhard Plank
85045 Ingolstadt

EVO Bus GmbH
Rainer Fischer
89077 Ulm

EVO Bus GmbH
Raimond Mögle
89077 Ulm

IVECO Magirus AG
Mario Spitz
89070 Ulm

F A T
Dr. Friedrich Preißer
60325 Frankfurt

Isringhausen GmbH & Co KG
Dr. Volker Simon
32657 Lemgo

Isringhausen GmbH & Co KG
Simon Sartor
32657 Lemgo

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 1997)

130	Zur Verletzungsmechanik und Belastbarkeit der unteren Extremität, insbesondere des Fußes, 1996	26,-
131	Analyse Kfz-relevanter Immissionen in innerstädtischen Verkehrs- und Grünflächen, 1997-	26,-
132	Batteriemanagementsysteme für Elektrostraßenfahrzeuge, 1997	31,-
133	Ozon und Großwetterlagen - Analyse der Abhängigkeit der bodennahen Ozonbelastung von meteorologischen Parametern im Großraum München, 1997	31,-
134	Meßverfahren für Kräfte und Momente an strich- und punktgeschweißten Überlappverbindungen, 1997	49,-
135	Mathematische Nachbildung des Menschen - RAMSIS 3D-Soft-Dummy, 1997	13,-
136	Anwendung brennbarer Kältemittel in Autoklimaanlagen, 1997	31,-
137	Entwicklung von Finite Element Seitencrash-Dummies: Ein Beitrag zur effizienten Insassensimulation, 1997	16,-
138	Ermittlung ertragbarer Beanspruchungen an Aluminium-Punktschweißverbindungen auf Basis der Schnittkräfte, 1997	(vergriffen)
139	Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw, 1997	(vergriffen)
140	Finite-Element-Berechnung mit 3D-CAD-Systemen - eine vergleichende Untersuchung, 1997	13,-
141	Experimentelle Ermittlung des Wirkungsgrades von elektrischen Antrieben, 1998	(vergriffen)
142	Untersuchungen zur Übertragbarkeit von Kennwerten einer punktgeschweißten Einelementprobe auf Mehrelementprüfkörper und Bauteile, 1998	41,-
143	Analyse des Fahrverhaltens von Rollenprüfstandsfahrern, 1998	18,-
144	Retarderbremsverhalten bei Gefällefahrten mit unterschiedlichem Gefälle, 1998	44,-
145	Test und Beurteilung existierender Bordladegeräte für Elektrostraßenfahrzeuge, 1999	21,-
146	Konzept für die numerische Auslegung durchsetzgefügter Blechbauteile, 1999	(vergriffen)
147	Biomechanische Bewertung der Euro-NCAP-Einstufungskriterien - Untersuchungen an Freiwilligen und Dummies, 1999	29,-
148	Stanznieten von Aluminium mit Stahl mittels Halbhohlniet, 1999	44,-
149	Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zum Recycling von Kunststoffkraftstoffbehältern, 1999	23,-
150	Charakterisierung von USSID und Euro-SID-1 zur Ermittlung von Daten für FEM Crash Simulationen, 2000	18,-
151	Blickfixationen und Blickbewegungen des Fahrzeugführers sowie Hauptsichtbereiche an der Windschutzscheibe, 2000	64,-
152	Informations- und Assistenzsysteme im Auto benutzergerecht gestalten (Referate des Symposiums vom 1.7.99), 2000	13,-
153	Experimentelle und rechnerische Bestimmung des Versagensverhaltens von punktgeschweißten Blechverbindungen, 2000	98,-
154	Verkehrsplannerische Eckwerte einer nachhaltigen regionalen Verkehrsstrategie, 2000	39,-
155	Heizleistung in Pkw mit verbrauchsoptimierten Motoren, 2000	(vergriffen)
156	Lärm und kardiovaskuläres Risiko, 2000	18,-
157	Pkw-Reifen/Fahrbahngeräusche bei unterschiedlichen Fahrbedingungen, 2000	44,-
158	Einflußgrößen auf Reifen/Fahrbahn-Geräusche von Lkw bei unterschiedlichen Fahrbedingungen, 2000-	49,-
159	Kölnener Verfahren zur vergleichenden Erfassung der kognitiven Beanspruchung im Straßenverkehr, 2000	64,-
160	Eichung und Anwendungserprobung von K-VEBIS, 2000	59,-
161	Ergänzende Auswertungen zur subjektiven und objektiven Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw, 2000	46,-
162	Analyse des Unfallgeschehens 'Kleiner Nutzfahrzeuge', 2001	46,-
163	Die Bedeutung biogener Kohlenwasserstoffe für die Ozonbildung, 2001	39,-
164	Schwingfestigkeitsberechnung an Dreiblech-Punktschweißungen, 2001	28,-
165	Energiesparmaßnahmen am Elektroauto, 2001	49,-
166	Betriebsfestigkeit von umgeformten Karosseriestählen, 2001	64,-
167	Einfluss wasserabweisender Beschichtungen auf Windschutzscheiben im Hinblick auf Sicht und Fahrzeugsicherheit, 2001	45,-
168	Auslegung von Blechen mit Sicken (Sickenatlas), 2001	50,-
169	Bewertung und Vereinheitlichung von gefügten Dünnschleifen für Schwingversuche im Zeitfestigkeitsbereich, 2001	40,-
170	Bestimmung des max. Kraftschlusses an mit ABV ausgerüsteten Fahrzeugen und Fahrzeugzügen, 2001 -	35,-
171	Beurteilung des Einsatzes von teilstrukturierten Stahlblechen im Kfz-Karosseriebau zur Gewichtsreduzierung, 2002	45,-
172	Erweiterte Knotenfunktionalität im parametrischen Entwurfswerkzeug SFE CONCEPT, 2002	(vergriffen)
173	Anwendungspotenziale und Prozessgrenzen für die umformtechnische Herstellung von steifigkeitsoptimierten Bauteilen aus Doppellagenblechen (Bonded Blanks), 2002	45,-
174	Verhaltensmodellierung von Steuergeräten für die EMV-Simulation im automotive Bereich, 2002	45,-
175	Dehnungsgeregelte Versuche mit Proben aus den Magnesiumdruckgusslegierungen AZ91 HP und AM50 HP, 2003	15,-
176	Betriebsfestigkeit von Bauteilen aus Magnesium unter Berücksichtigung von erhöhter Temperatur und Korrosion, 2003	45,-
177	Fahrzeugklimatisierung und Verkehrssicherheit, 2003	45,-
178	Optimierte Verzahnungsgeometrien leistungsübertragender Zahnräder für die umformtechnische Herstellung, 2003	45,-
179	Ingenieurmäßige Berechnungsverfahren zur Lebensdauerabschätzung von geschweißten Dünnschleifenverbindungen - Teil I: Punktschweißverbindungen - Teil II: Laserstrahlschweißen, 2003	(vergriffen)
180	Aufbau eines Konzeptes zur Auslegung gefügter Stahlbauteile, 2003	30,-
181	Effizienzsteigerung durch professionelles/partnerschaftliches Verhalten im Straßenverkehr, 2004	47,-

182	Einflußgrößen auf den Elastizitätsmodul von Stählen für den Fahrzeugbau, 2004	25,-
183	VDA-Forschungstag 13. Juli 2004 - Innovationsmotor Automobilindustrie - Redebeiträge	kostenfrei
184	Kompetenzerwerb für Fahrer-Informationssysteme - Einfluß des Lernprozesses auf die Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen, 2004	45,-
185	Systemvergleich Kostenstruktur der Bodenverkehrsmittel, 2004	45,-
186	Experimentelle Bestimmung und rechnerische Vorhersage des Tragverhaltens punktgeschweißter Bauteile aus Stahlblechverbindungen unter Crashbelastung mit Hilfe von Ingenieurkonzepten, 2004	29,-
187	Zell- und molekularbiologische Untersuchungen zur DNS-schädigenden Wirkung des Rußkerns in einem Multi-Dose-Modell zur Erfassung von Dosis-Schwellenwert, 2005	34,-
188	Verwertung von Kunststoffbauteilen aus Altautos - Analyse der Umwelteffekte nach dem LCA-Prinzip und ökonomische Analyse	45,-
189	Darstellung des Schwingungsverhaltens von Fahrzeug-Insassen - Symbiose aus Experiment und Simulation	45,-

VDA | Verband der
Automobilindustrie

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

Westendstraße 61
D-60325 Frankfurt am Main
www.vda.de