

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Ergonomie

Validierung des RAMSIS-Krafthaltungsmodells

Christin Fröhmel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb (i. R.)
2. Univ.-Prof. Dr. phil. Klaus Bengler
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Ulbrich

Die Dissertation wurde am 14.09.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 09.03.2010 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand durch Initiative von Dr. Ernst Assmann (BMW Group), Dr. Ralf Kaiser (BMW Group) und Univ.-Prof. i. R. Dr. rer. nat. Heiner Bubb. Vielen Dank an dieser Stelle, dass Sie mir die Arbeit ermöglicht haben und während der gesamten Dauer mit Rat und Tat zur Seite standen.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Peer-Oliver Wagner und seinem BMW Ergonomieteam für die äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre danken. Es waren schöne drei Jahre bei euch, vor allem die Erfahrungen als Versuchsperson.

Bei den Mitarbeitern des Lehrstuhls für Ergonomie bedanke ich mich für die nette Zusammenarbeit sowie für die gemeinsame Betreuung der Diplomarbeiten.

Auch danke ich den Mitarbeitern von Human Solutions, die mich bei den Belangen rund um RAMSIS stets hilfreich unterstützten.

Außerdem bedanke ich mich bei der Prüfungskommission für das entgegengebrachte Interesse.

Ein großer Dank geht auch an alle Diplomanden und Werkstudenten. Ohne euch wäre die Arbeit nicht zu bewältigen gewesen.

Zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, die von Anfang an immer an mich geglaubt und mich stets unterstützt hat. Besonderer Dank geht hier an meinen Lebensgefährten, der immer für tiefgehende Diskussionen bereit war und mir auch des Öfteren eine etwas andere Blickweise näher brachte.

München, 22. März 2010

**„Zähl, was zählbar ist,
miss, was messbar ist,
und was nicht messbar ist,
mach messbar.“**

Galileo Galilei, *1564 - †1642

Zusammenfassung

Für die Auslegung menschbezogener Fahrzeugaspekte werden heutzutage digitale dreidimensionale Menschmodelle eingesetzt, wie z. B. das Menschmodell RAMSIS (Rechnergestütztes Anthropometrisches Mathematisches System zur Insassensimulation). Es ermöglicht die Simulation menschlicher Haltungen im Computer unter Einbeziehung verschiedenster räumlicher Bedingungen, wobei menschliche Pendanten geschaffen werden, die sich, wie auch die Menschen, z. B. in Körpergröße, Geschlecht, Korpulenz, usw. unterscheiden. Dadurch werden die spezifischen menschlichen Unterschiede bei der Entwicklung von Fahrzeugen berücksichtigt. Die Menschmodelle haben zusätzlich den Vorteil, dass sie über eine Schnittstelle im CAD-Programm bei der dreidimensionalen Konstruktion der Fahrzeugumgebung im Computer und in jeder Phase des Produktentstehungsprozesses zur Anwendung kommen können. Folglich werden menschliche Belange, wie z. B. die Sitzposition verschieden großer Menschen, schon frühzeitig berücksichtigt, wodurch die Voraussetzung geschaffen wird das Fahrzeug bestmöglich an die menschlichen Gegebenheiten anzupassen.

Wie alle technischen Entwicklungen unterliegen auch die Menschmodelle stetigen Erweiterungs- und Verbesserungsprozessen. Bevor diese aber in der Entwicklung von Fahrzeugen eingesetzt werden können, muss gewährleistet sein, dass die simulierten Haltungen den realen menschlichen Haltungen entsprechen. Nur dann ist später eine gute Fahrzeugbedienung durch den Menschen garantiert. Eine dieser Weiterentwicklungen ist die Simulation menschlicher Haltung basierend auf der Minimierung von Gelenkkräften durch das RAMSIS-Krafthaltungsmodell (KHM). Dieses Modell beinhaltet einen gänzlich neuen Ansatz der Haltungssimulation, welcher vor dem Einsatz des Modells im Entwicklungsprozess überprüft werden muss. Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Validierung des Krafthaltungsmodells aus RAMSIS.

Ziel der Arbeit ist es durch einen Vergleich zwischen Realität und Simulation die Qualität, d. h. die Realitätsnähe des RAMSIS-KHM zu beurteilen sowie die Einsatzfähigkeit dieses Modells zu gewährleisten. Zu diesem Zweck werden reale menschliche Körperhaltungen mit den Haltungen aus der Simulation verglichen. Weiterhin werden auch die Kräfte, welche ein Mensch aufgrund seines

Körpergewichts im statischen Zustand an die Umgebung abgibt, in den Vergleich mit einbezogen. Kräfte werden überall dort ausgetauscht, wo der Mensch eine Verbindung mit der Umgebung eingeht, so genannte Schnittstellen aufweist.

Die Schnittstellen in einem Fahrzeug zu identifizieren sowie geeignete Methoden der Kraftmessung an diesen zu erarbeiten und zu bewerten stellte den ersten Schritt der Arbeit dar. Anschließend fand die Auslegung, Auswahl und Beschaffung der benötigten Messtechnik statt. Ein statischer Versuchsstand wurde derart umgebaut und mit der erforderlichen Messtechnik ausgestattet, dass die Versuche zur Ermittlung menschlicher Haltungen und den dazu gehörenden Schnittstellenkräften durchgeführt werden konnten. An den Versuchen nahmen 44 Versuchspersonen, aufgeteilt in drei Gruppen (5. Perzentil weiblich, 50. und 95. Perzentil männlich, jeweils bezogen auf die Körpergröße) teil. Es wurden unterschiedlichste Haltungen mit den dazugehörigen Schnittstellenkräften in drei verschiedenen Fahrzeugen für den Fahrerarbeitsplatz aufgenommen. Auf Basis der gewonnenen Daten erfolgte der Vergleich zwischen Realität und Simulation, bezogen auf die Körperhaltungen und den auftretenden Kräften. Mit Hilfe verschiedener Kriterien konnte abschließend die Qualität des RAMSIS-KHM beurteilt, die Einsatzfähigkeit mit Hilfe von Richtlinien für die Anwendung sichergestellt sowie weiteres Entwicklungspotential aufgezeigt werden.

Symbol-, Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis

Symbole

♀	Frau
♂	Mann
△	entspricht
∅	Durchschnitt
%	Prozent
°	Grad

Begriffsverzeichnis

Akzeleration	Phänomen des Körpergrößenwachstumes einer Bevölkerung von Generation zu Generation
CP50 Skala	Category Partitioning Scale = Skala zum Bewerten von Diskomfort
H-30 Maß	Senkrechter Abstand zwischen Fersenpunkt und SRP im Fahrzeug
H-Punkt	Hüftpunkt
Manikin	Menschliches Ebenbild im Software Programm RAMSIS
MockUp	anderes Wort für Versuchsstand
PCMAN	Software zur Anpassung menschlicher Anthropometrien und Haltungen. Die Modellstruktur entspricht dabei dem RAMSIS Manikin.
Perzentil	Das X. Perzentil eines Messwerts gibt an, wie viel Prozent der Personen des vermessenen Versuchspersonenkollektivs diesen Messwert unterschreiten. 100-X% überschreiten diesen Wert.
RAMSIS	Rechnergestütztes Anthropometrisches Mathematisches System zur Insassensimulation
x-Richtung	verläuft bezogen auf den Fahrer nach hinten
y-Richtung	verläuft bezogen auf den Fahrer nach rechts
z-Richtung	verläuft bezogen auf den Fahrer nach oben

Abkürzungsverzeichnis

A / D – Wandler	Analog / Digital – Wandler
A_r	Kenngroße zur Ermittlung der relativen Abweichung, bezogen auf die Gelenkwinkel zwischen Realität und Simulation
AM	Arithmetischer Mittelwert
bit	binary digit = Maßeinheit für Datenmengen
BMW	Bayerische Motoren Werke
DAQ	data acquisition = Datenerfassung
DMS	Dehnungsmessstreifen
\vec{F}	Kraftvektor
KHM	Krafthaltungsmodell von RAMSIS
KOP	Kraftkoppelpunkt (Verbindungspunkt des RAMSIS Manikins mit der Umgebung zur Kraftübertragung)
LED	Light Emitting Diode = Leuchtdiode
LfE	Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München
LVF	Lenkradverstellfeld
P	Perzentil
SAE	Society of Automotive Engineers
SD	standard deviation = Standardabweichung
SRP	Seating Reference Point = Sitzreferenzpunkt
SUV	Sports Utility Vehicle
SVF	Sitzverstellfeld
VEMO	Variables Ein- und Ausstiegsmodell
VP / VPs	Versuchsperson / Versuchspersonen
WM	wahrscheinlichkeitsbasiertes Haltungsmodell von RAMSIS

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	II
ZUSAMMENFASSUNG	IV
SYMBOL-, BEGRIFFS- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VI
INHALTSVERZEICHNIS	VIII
1 EINFÜHRUNG UND MOTIVATION	1
2 DAS 3D-MENSCHMODELL RAMSIS.....	3
2.1 Das Wahrscheinlichkeitsbasierte Haltungsmodell (WM)	5
2.2 Das RAMSIS-Krafthaltungsmodell (KHM).....	8
3 METHODIK DER VALIDIERUNG	16
3.1 Darstellung des Methodisches Vorgehens	16
3.2 Vorversuche zur Ermittlung der Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug.....	19
3.3 Methoden der Kraftmessung an den Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug.....	21
3.3.1 Der Mensch als Basis für die Kraftmesstechnik	21
3.3.2 Das Fahrzeug als Basis für die Kraftmesstechnik	25
3.3.3 Zusammenfassende Beurteilung	27
4 DIE VERSUCHE	31
4.1 Der Versuchsstand.....	31
4.1.1 Das variable Ein- und Ausstiegsmodell – VEMO.....	31
4.1.2 Spezifikation der Messtechnik	33
4.1.2.1 Ermittlung der Sensormessbereiche	34
4.1.2.2 Auswahl von Sensoren und Messdatenerfassung	39
4.1.3 Implementierung der Messtechnik	42
4.1.4 Messwernerfassung und –verarbeitung.....	50
4.2 Versuchspersonenkollektiv	52
4.3 Versuchsdurchführung	53

5	AUSWERTUNG UND ANALYSE DER ERGEBNISSE.....	56
5.1	Statistische Methoden	56
5.2	Auswertung der realen Haltungen.....	59
5.2.1	Gelenkwinkelanalyse	60
5.2.2	Sitzpositionen im Sitzverstellfeld	78
5.2.3	Lenkradposition im Lenkradverstellfeld	80
5.2.4	Augpunktlagen	82
5.2.5	Real gemessene Kräfte.....	84
5.2.6	Zusammenfassung.....	95
5.3	Simulationen mit dem RAMSIS-KHM.....	96
5.4	Vergleich von realen und simulierten Haltungen	102
5.4.1	Gelenkwinkelabweichung zwischen Realität und Simulation	103
5.4.2	Treffsicherheit der RAMSIS Simulationen hinsichtlich der Gelenkwinkelstrebereiche.....	108
5.4.3	Vergleich der H-Punkt-Lagen	113
5.4.4	Vergleich der Augpunktlagen	117
5.4.5	Vergleich der auftretenden Schnittstellenkräfte	122
5.4.5.1	Berechnung der Schnittstellenkräfte	122
5.4.5.2	Bewertung der Güte der simulierten Haltungen mit Hilfe der Schnittstellenkräfte	127
5.4.5.3	Vergleich von real gemessenen und aus den Haltungssimulationen resultierenden Kräften..	132
5.4.6	Zusammenfassung.....	137
6	DISKUSSION	139
7	LITERATURVERZEICHNIS	142
	ANHANG A – FRAGEBOGEN.....	146
	ANHANG B – REALE GELENKWINKEL	149
	ANHANG C – TREFFSICHERHEIT DER GELENKWINKELSTREUBEREICHE ..	153
	ANHANG D – FEHLER DES KRAFTBERECHNUNGSMODELL	155
	ANHANG F – TREFFSICHERHEIT DER KRAFTSTREUBEREICHE	160

1 Einführung und Motivation

Menschen sind Individuen mit individuelle Eigenschaften, Fähigkeiten und Vorlieben. Für die Entwicklung von Fahrzeugen stellt dies eine enorme Herausforderung dar, da der Anspruch auf eine optimale Fahrzeugnutzung aller Anwender besteht. Darüber hinaus hat der Mensch zusätzlich hohe Erwartungen an ein Fahrzeug, welche über die eigentliche Transportaufgabe hinausgehen. Allen diesen Anforderungen stellen sich die Ingenieure bei der Entwicklung von Kraftfahrzeugen. Um menschliche Eigenschaften dabei zu berücksichtigen, wird das Software Programm RAMSIS (Rechnergestütztes Anthropometrisches Mathematisches System zur Insassensimulation) eingesetzt. Als Auslegungstool für die Ergonomie ermöglicht es menschenbezogene Fahrzeugaspekte, wie z. B. genügend große Freiräume zur Gewährleistung der Beweglichkeit, bspw. bei Lenkmanövern, oder eine gute Erreichbarkeit der Bedienelemente, wie auch die Sicht nach außen, innen sowie die Spiegelsicht schon sehr früh im Produktentstehungsprozess zu berücksichtigen. Weiterer Vorteil ist die Einbindung von RAMSIS in die CAD-Umgebung. Somit wird der Mensch direkt in die Konstruktion der Fahrzeuggeometrie mit einbezogen, wodurch es möglich ist den zeit- und kostenintensiven Prototypenbau auf ein Minimum zu reduzieren.

Derzeit findet bei der Auslegung menschenbezogener Fahrzeugaspekte das wahrscheinlichkeitsbasierte Modell von RAMSIS Verwendung. Die Vorhersage menschlicher Haltungen basiert bei diesem Modell auf Gelenkwinkelwahrscheinlichkeitsfunktionen, d. h., dass bei der Haltungssimulation für jeden Gelenkwinkel eine möglichst wahrscheinliche Winkelstellung prognostiziert wird. Der Nachteil dabei ist, dass es lediglich für die Prognose bestimmter Haltungen, welche als Haltungsmodelle in RAMSIS existieren, angewendet werden kann. Durch die Entwicklung eines weiteren Haltungsmodells, mit einem gänzlichen neuen Ansatz der Haltungsberechnung, existiert dieser Nachteil nicht mehr. Es handelt sich um das RAMSIS-Krafthaltungsmodell (KHM), welches die Simulation menschlicher Körperhaltungen unter Berücksichtigung interner und externer Kräfte sowie biomechanischer Parameter (Maximalkräfte und Muskelkräfte) und geometrischer Randbedingungen ermöglicht. Somit kann dieses Haltungsmodell zur Vorhersage

beliebiger Haltungen eingesetzt werden, was gerade bei der Entwicklung neuartiger Fahrzeugkonzepte überaus wichtig ist.

Bevor das Modell in den Produktentstehungsprozess integriert werden kann, muss es überprüft, d. h. validiert werden, was die Aufgabe dieser Arbeit darstellt. Ziel ist es mit Vergleichen zwischen Realität und Simulation die Qualität der Vorhersage menschlicher Körperhaltungen mit diesem Modell zu ermitteln und eine Aussage über die Einsatzfähigkeit zu geben.

2 Das 3D-Menschmodell RAMSIS

RAMSIS ist ein dreidimensionales Menschmodell, mit dem sich schon früh im Entwicklungsprozess menschenbezogene Fahrzeugaspekte auslegen lassen. Die feste Einbindung in die CAD-Umgebung erleichtert es Fahrzeugentwicklern ergonomische Fragestellungen, wie bspw. die Sitzposition unterschiedlich großer Menschen, schon sehr früh in die Entwicklung mit einzubeziehen. Durch die virtuelle Umgebung ist es möglich den Menschen aus allen erdenklichen Blickwinkeln zu erfassen. Defizite wie z. B. unzureichend große Freiräume am Kopf oder Ellenbogen werden somit frühzeitig entdeckt. Umfassender Prototypenbau kann dadurch minimiert werden, wodurch sich Zeit und Kosten einsparen lassen.

„Das Menschmodell RAMSIS besteht aus einem äußeren Hautmodell, das ihm ein realistisches Aussehen verleiht, und einem inneren Skelettmodell. Das innere Modell erfüllt eine Gerüstfunktion und ist gleichzeitig Träger der Modellkinematik. ... Das äußere Modell bildet die Körperoberfläche. Es bestimmt damit die optische Erscheinung, aber auch die funktionell wichtigen Kontaktflächen des Menschmodells.“ (Human Solutions, 2005, S. 1.2). Beide Modelle sind gemeinsam in einzelne Körperelemente gegliedert, wobei viele davon direkt den Körperteilen des Menschen entsprechen, z. B. der Kopf oder die Oberschenkel. Andere Körperelemente fassen dagegen Teile des Körpers zusammen. Z. B. ist die Wirbelsäule nur in 6 statt 24 Elemente aufgeteilt, womit die Komplexität des Modells reduziert wird. „Die Beweglichkeit ist jedoch trotzdem vergleichbar.“ (Seitz, 2003, S. 26). Abbildung 2-1 zeigt außerdem die verschiedenen Darstellungsmodi des Menschmodells. Dabei wird das virtuelle Gegenstück eines Menschen als Manikin bezeichnet.

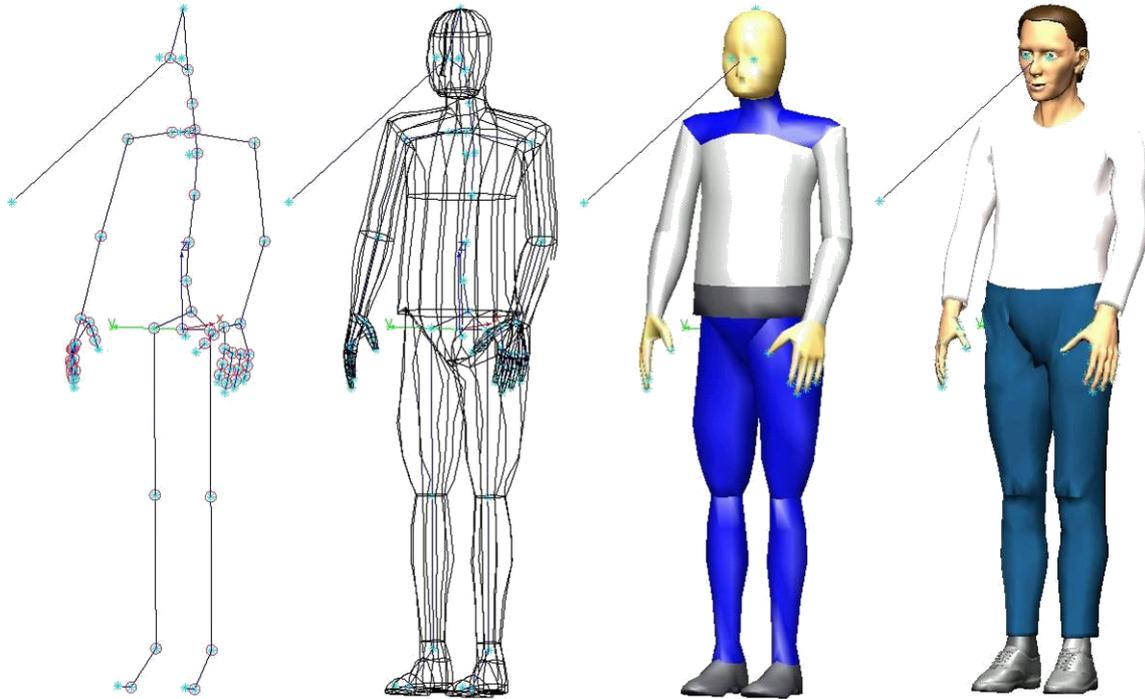


Abbildung 2-1 *Verschiedene Darstellungsmodi des RAMSIS-Manikins:
Skelettmodell, Hautmodell, Flächenmodell, Präsentationsmodus
(von links nach rechts)*

Für eine kundennahe und somit realitätsnahe Simulation wird die Bedingung aufgestellt, den Menschen in seiner Vielfalt abbilden zu können. In RAMSIS sind deshalb anthropometrische Datenbanken unterschiedlicher Nationen hinterlegt, welche es erlauben die Nutzerpopulation entsprechend der geplanten Vermarktung eines Fahrzeuges auszuwählen. Ergänzt wird dies durch die Möglichkeit unterschiedliche Perzentilmaße für die Simulation heranziehen zu können, der Unterscheidung zwischen Menschen mit langen Beinen (Sitzriese) oder kurzen Beinen (Sitzzwerg) bei gleicher Körperhöhe und die Berücksichtigung der Korpulenz. All diese Einflussfaktoren berücksichtigt RAMSIS mit 90 statistisch abgesicherten Körperbautypen für jede Datenbank, bezogen auf Erwachsene. Aber auch Daten für Kinder unterschiedlichen Alters werden dem Nutzer bereitgestellt. Weiterhin bietet RAMSIS ein Akzelerationsmodell, welches erlaubt die Körpermaßdaten in das Zieljahr, z. B. das Auslieferungsjahr der Fahrzeuge, zu extrapolieren. Da ältere Menschen im Mittel kleiner sind als jüngere, kann zusätzlich auf unterschiedliche

Altersgruppen eingegangen werden. Abgerundet wird die simulierbare Vielfalt durch die Bereitstellung verschiedener Hand- und Fußmodelle.

Für die konstruktive, ergonomisch gerechte Auslegung von Fahrzeugen bietet RAMSIS eine Reihe unterschiedlicher Funktionen. So können abhängig von den jeweils eingesetzten Nutzertypen z. B. Verstellfelder für den Sitz und das Lenkrad definiert werden, Greif- und Freiräume sowie Bedienkräfte analysiert werden. Weiterhin ist die Möglichkeit von Sichtanalysen, z. B. auf Instrumente, wie auch Analysen des Gurtverlaufs gegeben. Für die Beurteilung der Haltung ist ein Gesundheits- und Komfortmodell implementiert, dessen Kalibrierung aber zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch aussteht. So kann „noch nicht gesagt werden, welche Diskomfortwerte bzw. Gesundheitsbewertungen noch als tolerabel gelten dürfen und welche nicht“ (Human Solutions, 2005, S. 12.10).

Für ergonomische Analysen ist eine realistische Haltung und Position des Manikins entscheidend. Deshalb „wird bei RAMSIS das geometrisch-kinematische Modell des Menschen durch ein Modell für die Haltungswahrscheinlichkeit ergänzt.“ (Human Solutions, 2005, S. 1.3). Es prognostiziert jeweils die wahrscheinlichste Haltung, unter Berücksichtigung äußerer Gegebenheiten. Die Vorgehensweise dazu wird im folgenden Kapitel erläutert.

2.1 Das Wahrscheinlichkeitsbasierte Haltungsmodell (WM)

Bei der Simulation einer menschlichen Haltung muss gewährleistet sein, dass diese der Haltung entspricht, „die bei einem Menschen mit gleichen anthropometrischen Daten in einer entsprechenden Umweltsimulation zu erwarten wäre.“ (Human Solutions, 2005, S. 1.3). Dies ist die Voraussetzung dafür, dass ergonomische Bewertungen auf Grundlage von Menschmodellen durchgeführt werden können. Oft muss bei den Menschmodellen der Anwender selbst in einem zeitintensiven iterativen Prozess die Haltung des Modells anpassen. Durch den Einfluss der Subjektivität entstehen nicht reproduzierbare Ergebnisse, was ein großer Nachteil ist. „Um diese Schwierigkeiten zu beseitigen, wird bei RAMSIS das geometrisch-kinematische Modell des Menschen durch ein Modell für die Haltungswahrscheinlichkeit ergänzt. Es gestattet für unterschiedliche äußere Gegebenheiten die Berechnung der jeweils wahrscheinlichsten Haltung des Modells und beseitigt so

jede Willkür bei der Positionseinstellung.“ (Human Solutions, 2005, S. 1.3). Der Anwender muss nun lediglich die an das Menschmodell zu stellende Aufgabe beschreiben, und das Haltungsmodell garantiert eine der Realität entsprechende Haltung. Da auf Basis von Gelenkwinkelwahrscheinlichkeiten gearbeitet wird, muss für jeden Anwendungsfall eine statistische Erhebung der jeweils auftretenden Gelenkwinkel durchgeführt werden, um ein dementsprechendes Haltungsmodell ableiten zu können. In Abbildung 2-2 werden die bisher nach diesem Verfahren entwickelten und in RAMSIS zur Verfügung stehenden Haltungsmodelle dargestellt.

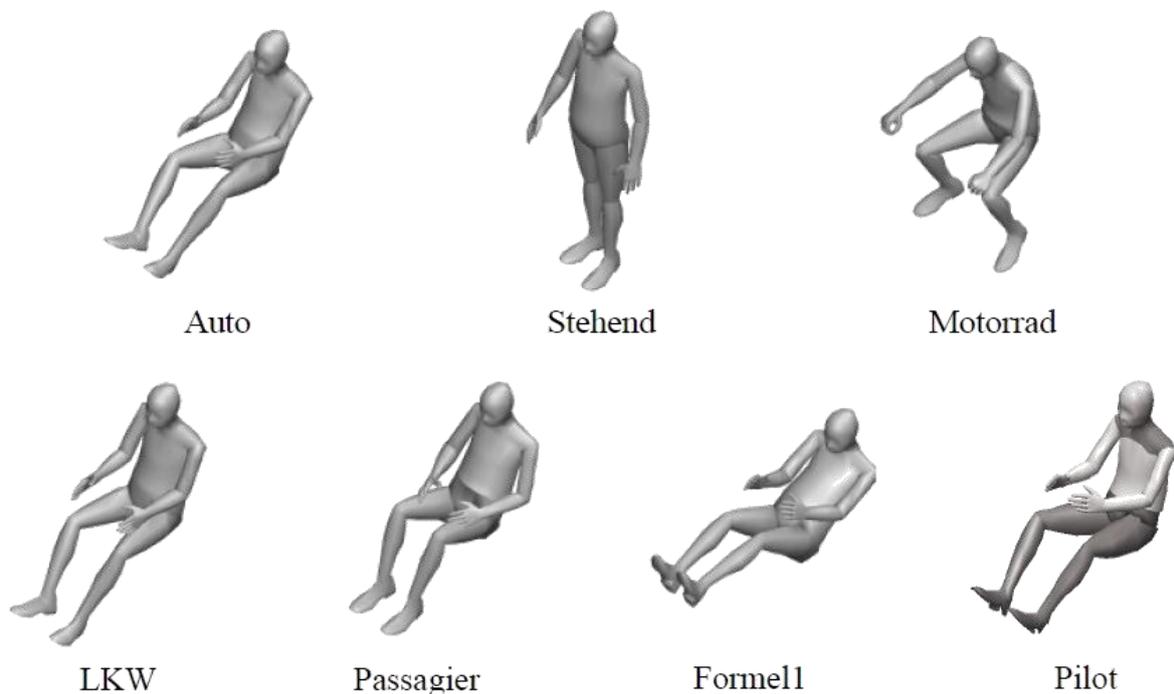


Abbildung 2-2 Die bisher in RAMSIS zur Verfügung stehenden Haltungsmodelle, dargestellt in ihrer neutralen Haltung (Human Solutions, 2005)

Der jeweils wahrscheinlichste Winkel eines Gelenkes bei einer bestimmten Aufgabe wird dabei als Optimalwinkel bezeichnet. Falls keine Bedingungen an das Menschmodell gestellt werden, nimmt dieses jeweils die optimalen Winkel ein. Die daraus resultierende Haltung entspricht der neutralen Haltung des jeweiligen Modells (Abbildung 2-2). Dabei beinhaltet jedes Modell „für jeden Gelenkfreiheitsgrad eine auf einem Optimalwinkel und den Bewegungsgrenzen basierende Wahrscheinlich-

keitsverteilung“ (Human Solutions, 2005, S. 5.25). Abbildung 2-3 zeigt am Beispiel des Ellenbogens für die Haltungsmodelle Auto und Passagier, wie sich der wahrscheinlichste Gelenkwinkel mit der Aufgabe ändert.

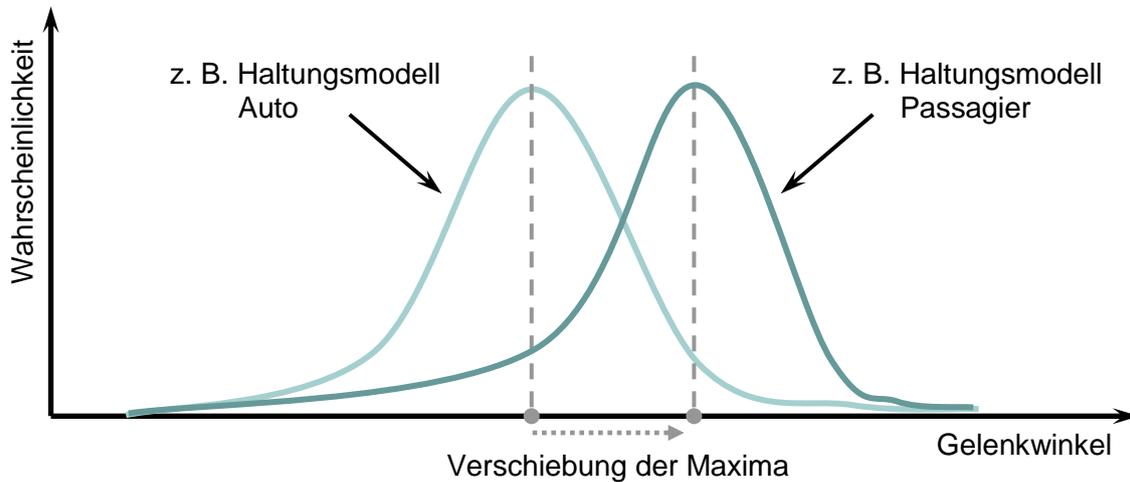


Abbildung 2-3 Beispiel, wie sich die Gelenkwinkel mit der Aufgabe ändern (nach Speyer, 2002)

Je besser das zu simulierende Szenario dem Haltungsmodell entspricht, desto genauer wird die Haltungsprognose, da die jeweiligen Haltungsmodelle aufgrund der jeweils auf den untersuchten Anwendungsfall ermittelten wahrscheinlichsten Gelenkwinkelstellung nur auf diesen entsprechenden Fall angewendet werden dürfen. Szenarien, die diesen Haltungsmodellen nur zum Teil oder gar nicht entsprechen, sind nur schwer simulierbar und daher mit Kompromisslösungen bzw. einer ungenauen Haltungsrechnung verbunden. Diese Ungenauigkeiten können durch die Erstellung weiterer Haltungsmodelle umgangen werden. Die dafür notwendigen zeit- und kostenintensiven Versuche machen die Erstellung neuer Haltungsmodelle jedoch wenig praktikabel. Ein neues universell einsetzbares Haltungsmodell mit einem gänzlich neuen Ansatz der Haltungsrechnung auf Basis von Massen, Kräften, Momenten und Gleichgewichtsbedingungen, wie sie im RAMSIS-Krafthaltungsmodell verwirklicht und implementiert sind, schafft hier Abhilfe. Bevor das RAMSIS-Krafthaltungsmodell bei der Fahrzeugentwicklung eingesetzt werden kann, muss es zunächst auf seine Einsatztauglichkeit hin validiert werden. Im nächsten Kapitel wird dazu zuerst die grundlegende Funktionsweise des Modells erläutert.

2.2 Das RAMSIS-Krafthaltungsmodell (KHM)

Wie im vorhergehenden Kapitel dargelegt, hat das wahrscheinlichkeitbasierte Haltungsmodell einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich. Zur Beseitigung dieser Beschränkung ist ein universell einsetzbares Haltungsmodell, das RAMSIS-Krafthaltungsmodell (KHM), erforderlich. Dieses Modell muss Parameter berücksichtigen, welche menschliche Eigenschaften widerspiegeln. Da Haltungen durch Wechselwirkungen von inneren menschlichen Kräften, z. B. Muskelkräfte für die Aufrechterhaltung einer bestimmten Haltung, und äußeren auf den Menschen einwirkenden Kräften, z. B. das Eigengewicht eines zu haltenden Gegenstandes, bestimmt sind, müssen diese Einflussgrößen bei der Haltungsoptimierung berücksichtigt werden. Der Ansatz des KHM zur Haltungsoptimierung liegt deshalb in der Berücksichtigung von biomechanischen Eigenschaften des Menschen sowie intern und extern am Menschen wirkenden Kräften. Als Optimierungskriterium dient die relative Gelenkbelastung in den einzelnen Gelenken, welche dabei minimiert wird.

Für die mathematische Modellierung des Optimierungsansatzes für das KHM müssen aktiv wirkende Kräfte (bewusst vom Menschen aufgebrachte Kräfte), passiv wirkende Kräfte (unbewusst vom Menschen aufgebrachte Kräfte zur Kompensation der Gravitation), Restriktionen (sie „definieren den Kontakt und die Aufgaben des Menschmodells bezüglich seiner Umgebung“ (Marach, 1999, S.38)), Massenkräfte von Körperteilen, Gleichgewichtsbedingungen und die Trägheit (nur bei Bewegungssimulationen) berücksichtigt werden. Diese Einflussfaktoren „werden derart miteinander verbunden, dass sie einerseits ein Maß für die Ausführbarkeit einer Aufgabe geben und andererseits die Höhe der jeweiligen Gelenkbelastung darstellen.“ (Marach, 1999, S.39).

Da mit einem universellen Haltungsmodell unterschiedlichste Haltungen simuliert werden können, scheint eine globale Betrachtungsweise der Haltungsoptimierung unzweckmäßig. Vielmehr liegt das Augenmerk auf einer lokalen Belastungsanalyse der einzelnen Gelenke. Dazu wird die in jedem Gelenk auftretende Belastung, hervorgerufen durch äußere Kräfte, in der jeweiligen momentanen Körperhaltung berechnet. Die Beurteilung hinsichtlich der Ausführbarkeit und der Fähigkeit eine Körperhaltung einzunehmen erfolgt danach mit dem Vergleich der momentanen

Gelenkbelastung mit dem maximal möglichen Kompensationsmoment in einem Gelenk. Die maximalen Kompensationsmomente der einzelnen Gelenke stellen dabei die Summe aus Biege- und Beugemomenten (diese entstehen durch Drehbewegungen von Körperteilen in den Gelenken) sowie Torsionsmomenten (diese entstehen bei Rotationsbewegungen von Körperteilen um ihre Längsachse) dar (Schwarz, 1997). Das Ergebnis ist ein mehrdimensionaler, gelenkspezifischer und haltungsabhängiger Körper, der aufgrund seines Erscheinungsbildes als Momentenkartoffel bezeichnet wird (Schäfer, 2000; Rothaug, 2000). Dieser gibt die maximal mögliche Gelenkbelastung bei einer bestimmten Haltung an. Abbildung 2-4 zeigt diesen Körper als Beispiel für das Schultergelenk bei einer definierten Armhaltung.

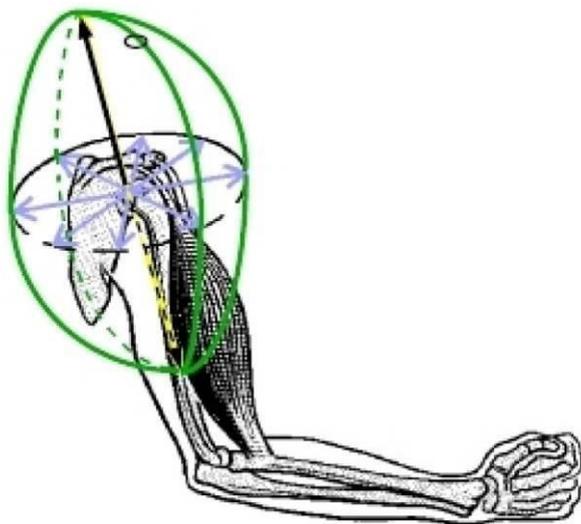


Abbildung 2-4 Momentenkartoffel (grün) am Beispiel der Schulter bei einer definierten Armhaltung (Seitz et. al., 2005)

Zur weiteren Veranschaulichung gibt Abbildung 2-5 einen Überblick einzelner Momentenkartoffeln für eine stehende Haltung. Erkennbar ist hier, dass sich Form und Größe der einzelnen Körper in jedem Gelenk unterscheiden. Wird die Haltung verändert, formen sich auch die Momentenkartoffeln entsprechend der möglichen Maximalbelastung in den einzelnen Gelenken um.

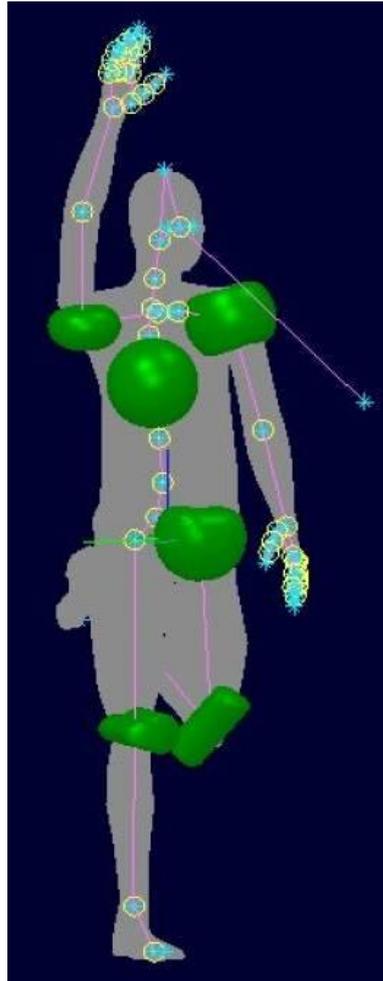


Abbildung 2-5 Veranschaulichung einzelner Momentenkartoffeln für eine stehende Haltung (Human Solutions, 2004)

Ob eine Haltung einnehmbar ist oder nicht, wird bestimmt durch die Höhe des in einem Gelenk auftretenden Momentenvektors, wobei die Optimierungsfunktion der Haltungsberechnung versucht einen möglichst kleinen Vektor zu generieren. Liegt der Vektor innerhalb der Momentenkartoffel entsteht eine dauerhaft stabile Haltung. Wird dagegen die Oberfläche durchdrungen, ist keine stabile Haltung einnehmbar, da die äußeren Kräfte überwiegen. Wird vom Vektor die Oberfläche der Momentenkartoffel berührt, ist die Haltung, aufgrund nachlassender Körperkraft, lediglich für einen kurzen Moment stabilisierbar (Seitz et. al., 2005). Abbildung 2-6 zeigt schematisch anhand einer Ellipsoidfläche, ob eine Haltung stabilisierbar ist oder nicht.

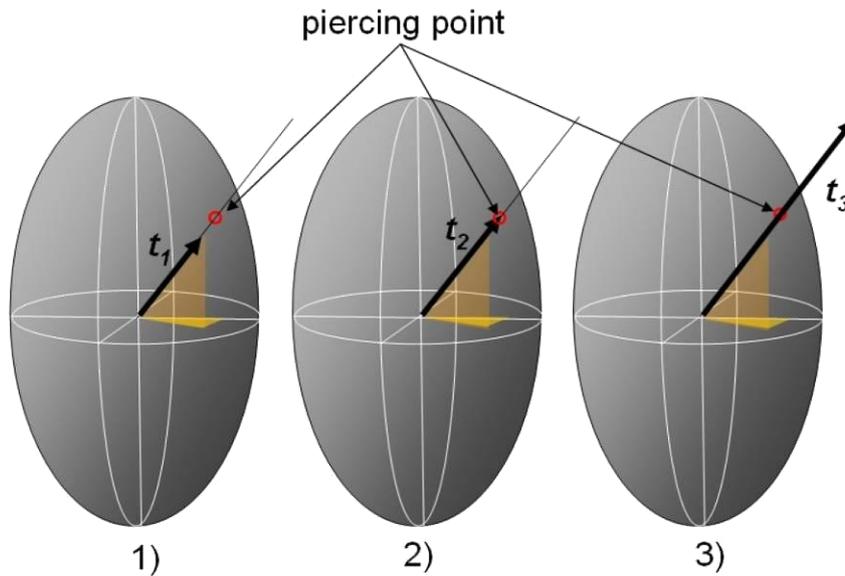


Abbildung 2-6 Schematische Darstellung einer Momentenkartoffel als Ellipsoid
 links: Haltung dauerhaft stabilisierbar, Momentenvektor innerhalb
 mitte: Haltung unter Kraftanstrengung kurz stabilisierbar, Momentenvektor berührt die Oberfläche des Ellipsoid
 rechts: Haltung nicht stabilisierbar, Momentenvektor durchdringt die Oberfläche (Seitz et. al., 2005)

Durch die lokale Betrachtungsweise werden alle Gelenke einzeln betrachtet und die jeweilige aktuelle relative Gelenkbelastung errechnet (Marach, 1999):

$$\text{Relative Gelenkbelastung} = \frac{\text{Wirkendes Gelenkmoment}}{\text{Maximal ausführbares Gelenkmoment}}$$

Dabei besteht das wirkende Gelenkmoment aus einem Gelenkrückstellmoment, verursacht durch die Anatomie und den Haltungswinkel eines Gelenkes, und einem Zusatzmoment, hervorgerufen durch das Eigengewicht des Körperteils sowie bestehenden und einzuhaltenden Restriktionen. Das maximal ausführbare Gelenkmoment wird beschrieben durch das von der Muskulatur maximal aufzubringende Gelenkmoment. Für die relative Gelenkbelastung ergibt sich somit (Marach, 1999):

$$\text{Relative Gelenkbelastung} = \frac{M_{\text{Gelenkrückstellmoment}} + M_{\text{Zusatz}}}{M_{\text{Maximalmoment}}}$$

Bei der Optimierung der Haltung durch das KHM wird nun versucht die relative Gelenkbelastung der Gelenke unter Einhaltung der definierten Restriktionen zu minimieren. Die Summe über alle Gelenkbelastungen soll dabei einen minimalen Wert erreichen (Human Solutions, 2004):

$$\min\phi = \sum \left(\frac{\|M_{Rückstell}\|}{M_{Maximal}} \right)^2 + \left(\frac{\|M_{Last}\|}{M_{Maximal}} \right)^2$$

Dabei gilt, je niedriger die Belastung in den Gelenken ist, umso komfortabler wird die Haltung. Wirken keine Kräfte auf den menschlichen Körper, wie es nur in der Schwerelosigkeit der Fall ist, wird eine entspannte, im statischen Gleichgewicht stehende Haltung nur unter dem Einfluss von inneren menschlichen Kräften eingenommen, die so genannte 0g-Haltung (Abbildung 2-7).

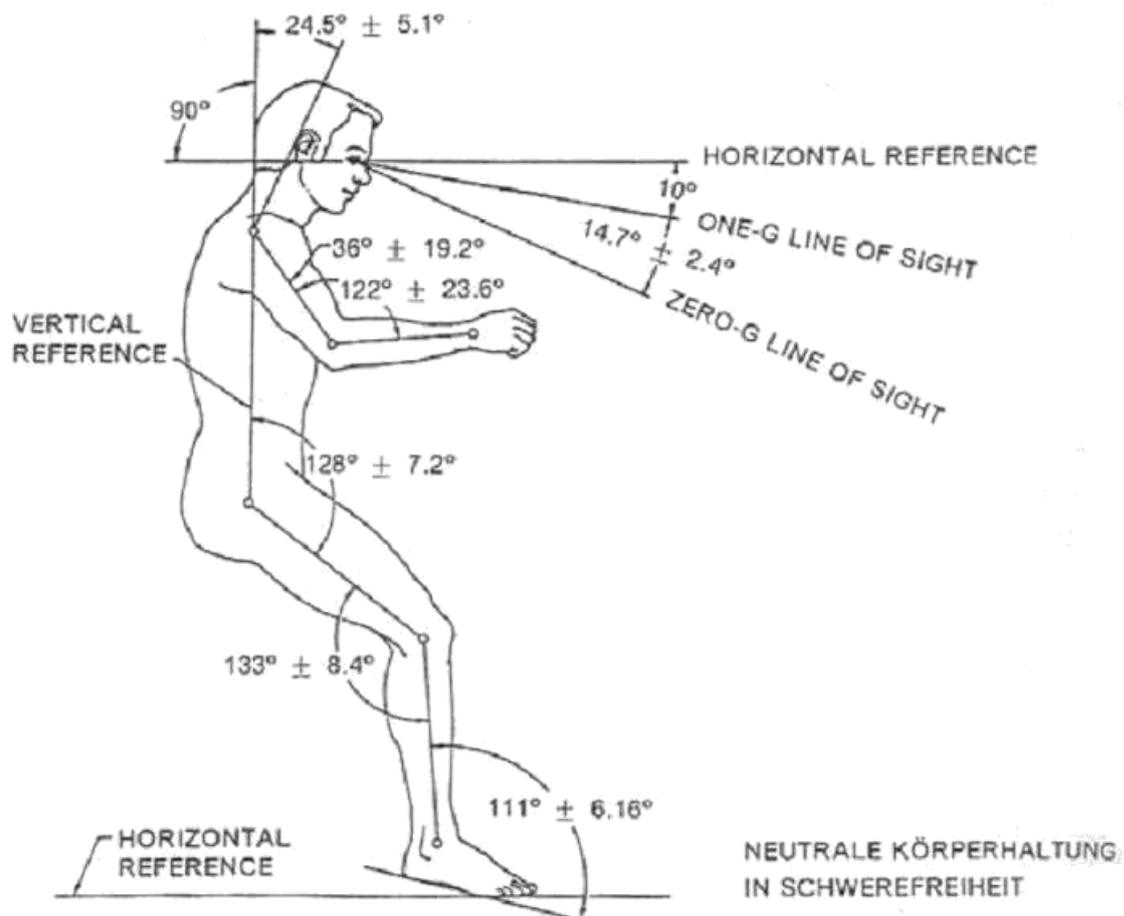


Abbildung 2-7 Menschliche Haltung in der Schwerelosigkeit – 0g-Haltung (Hallmann, 1988)

Ein aus dieser Haltung resultierendes „Modell würde zum einen Haltungsprognosen unter gravitativem Einfluss als auch Haltungsprognosen für den 0-g-Fall sowie Komfortanalysen wesentlich verbessern“ (Seitz, 1999). Genau diese Aspekte berücksichtigt das KHM, so dass hier die neutrale Haltung der 0g-Haltung entspricht (Abbildung 2-8).

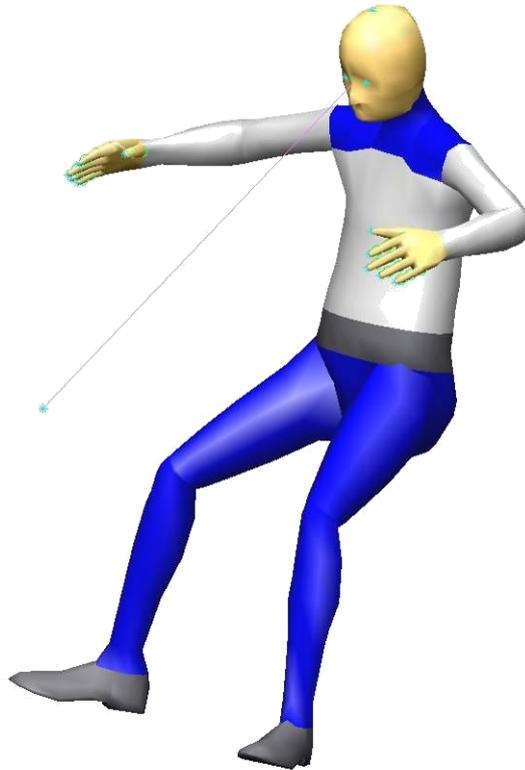


Abbildung 2-8 Neutrale Haltung aus dem KHM – 0g-Haltung

Bei der Einnahme einer Haltung als Reaktion auf die Einhaltung gewisser Restriktionen entstehen Kräfte und Momente, welche zur Einhaltung des Gleichgewichts kompensiert werden müssen. In der Realität erfolgt dies über Kontaktflächen wie z. B. Gesäß- und Rückenfläche bei sitzenden Tätigkeiten. Gemäß der Mechanik starrer Körper kann hier ein statisches Gleichgewicht berechnet werden, indem die Summe aller Kräfte und Momente gleich Null ist. Im RAMSIS-KHM werden zur mechanischen Koppelung punktförmige Koppellemente, Kraftableitungspunkt oder Kraftkoppelpunkt (KOP) genannt, zur Verfügung gestellt, über die Kräfte an die Umgebung abgeleitet werden (Abbildung 2-9). Dazu können beliebige RAMSIS Körperpunkte definiert werden. Die in den KOP herrschenden Kräfte werden durch das Modell entsprechend berechnet.

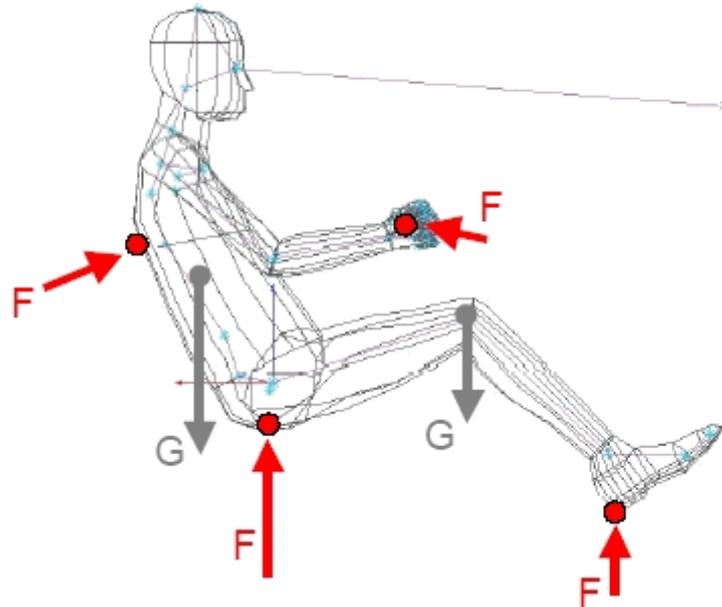


Abbildung 2-9 Veranschaulichung der Gleichgewichtsbedingung sowie der Kraftkoppelpunkte (rot) (Human Solutions, 2004)

Abbildung 2-10 gibt zusammenfassend einen Überblick über die Einflussgrößen der kraftbasierten Haltungsberechnung.

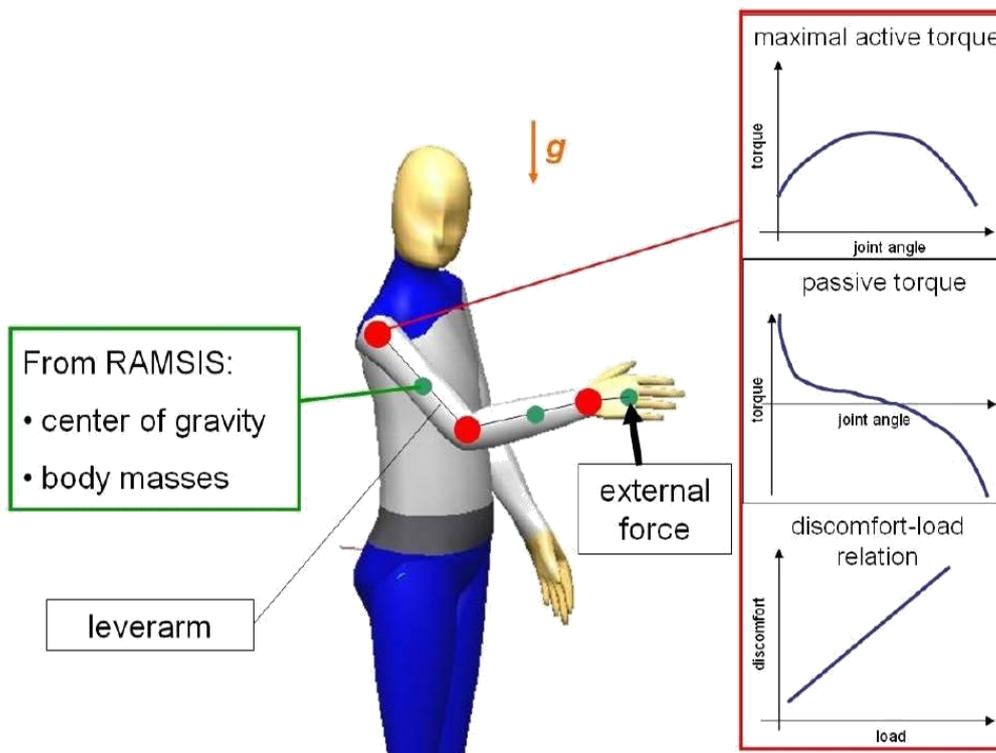


Abbildung 2-10 Eingangsgrößen für die kraftbasierte Haltungsberechnung (Seitz et. al., 2005)

Ziel bei der Entwicklung des RAMSIS-KHM war es, ein Modell auszuarbeiten, welches zur Vorhersage beliebiger Haltungen geeignet ist und das wahrscheinlichkeitbasierte Haltungsmodell wegen seines eingeschränkten Gültigkeitsbereiches und den damit verbundenen Nachteilen ablösen kann. Unter Berücksichtigung von aktiven und passiven Momenten, welche aus den auftretenden Kräften resultieren, wird eine Haltung berechnet, die eine minimale Gelenkbelastung aufweist, wodurch gleichzeitig eine komfortoptimierte Haltung prognostiziert wird. Dieser Ansatz der Haltungsoptimierung ist auf alle Simulationsszenarien anwendbar und ermöglicht somit die Berechnung beliebiger Haltungen. Für alle Anwendungsfälle gibt es nun lediglich ein Modell, was zur Vereinfachung bei der Anwendung führt und zu einer Reduzierung der Anwendungsfehler beiträgt. Insbesondere entfällt die zeitaufwendige Erstellung neuer Haltungsmodelle beim Auftreten neuartiger Problemstellungen, wie sie z. B. bei der Entwicklung eines neuen Fahrzeugkonzeptes auftreten können. Weiterhin werden die Schnittstellenkräfte an den vom Benutzer definierten Kraftkoppelpunkten automatisch berechnet, wodurch sich die Möglichkeit zu Optimierungen im Bereich Komfort ergibt, z. B. die Optimierung von Anlageflächen.

Aufgrund der durchweg positiven Eigenschaften des RAMSIS-Krafthaltungsmodells ist der Aufwand für dessen Validierung mehr als gerechtfertigt. Die Überprüfung des Modells am Beispiel des Fahrerarbeitsplatzes besteht im Rahmen dieser Arbeit aus der Beurteilung der Qualität, bzw. der Realitätsnähe, sowie der Sicherstellung der Einsatzfähigkeit. Das bei der Validierung verwendete methodische Vorgehen wird in Kapitel 3.1 vorgestellt.

3 Methodik der Validierung

3.1 Darstellung des Methodisches Vorgehens

Die eigentliche Validierung des RAMSIS-KHM besteht aus dem Vergleich zwischen Realität und Simulation. Hierzu werden menschliche Haltungen und die dabei auftretenden Schnittstellenkräften mit den Daten aus den Haltungssimulationen verglichen. Bevor dies durchgeführt werden kann, müssen zunächst einige Eingangsgrößen festgelegt und erarbeitet, andere auch mit Hilfe von Versuchen aufgenommen werden. Die Sicherstellung der Einsatzfähigkeit des RAMSIS-KHM ist das Ziel der Validierung. In Abbildung 3-1 ist das methodische Vorgehen der Validierung veranschaulicht.

Eingangsgrößen

Für die Validierung sind verschiedene Eingangsgrößen unerlässlich. Die größte Rolle ist dabei den Versuchspersonen (VPs) zuzuschreiben. Sie bilden mit ihren individuellen Körpermaßen und Vorlieben die Vergleichsbasis zur Simulation. Durch die Individualität jedes einzelnen Menschen, welche auch bei der Einnahme einer Körperhaltung eine Rolle spielt, müssen in den Versuchen möglichst viele unterschiedliche Personen berücksichtigt werden. Der damit verbundene hohe Zeitaufwand ist hierbei limitierender Faktor, weshalb das Versuchspersonenkollektiv auf die üblichen Auslegungspersentile beschränkt wird. Diese sind 5. Perzentil weiblich, 50. Perzentil männlich und 95. Perzentil männlich, jeweils bezogen auf die Körperhöhe (vgl. Kapitel 4.2). Die Körpermaße aller Versuchspersonen werden mit dem Software Programm PCMAN angepasst (Seitz, 2002a), so dass ein digitaler Zwilling jeder Versuchsperson (VP) entsteht, welche die Basis für die Simulation und die digitale Haltungserfassung der Realdaten darstellt.

Die für die Validierung benötigten realen Daten von Körperhaltungen und den dabei auftretenden Schnittstellenkräften werden durch Versuche mit dem oben beschriebenen Versuchspersonenkollektiv gewonnen. Dazu dient ein statischer Versuchsstand, Mock-Up, der für die erforderlichen Versuche umgebaut und erweitert wird (vgl. Kapitel 4.1) (Estermann, 1999; Hufnagel, 1996). Bevor dies

geschehen kann, müssen Kenntnisse über auftretende Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug (vgl. Kapitel 3.2) sowie über mögliche Methoden der Kraftmessung an diesen Stellen erworben werden (vgl. Kapitel 3.3). Anschließend wird die benötigte Messtechnik für die Aufnahme der Kräfte ausgelegt, spezifiziert und beschafft (vgl. Kapitel 4.1.2). Die während der Versuche gewonnenen Daten von Haltungen und Kräften stehen dann als Vergleichsbasis für die Simulation zur Verfügung, wobei die aufgenommenen zweidimensionalen Bilder einer Haltung noch mit PCMAN dreidimensional erfasst werden müssen (Seitz, 2002a).

Ziel der Simulation ist eine möglichst minimale Haltungsabweichung zur Realität. Daher werden die digitalen Zwillinge der VPs für die Simulation herangezogen, um Abweichungen aufgrund unterschiedlicher Körpermaße zu vermeiden. Die Restriktionen und Koppelpunkte, welche für die Simulation einer Fahrerhaltung mit dem KHM in Frage kommen, müssen in einem iterativen Prozess erarbeitet werden (Blumrich, 2008; Martin, 2008; Reitmeier, 2008). Vergleichsbasis sind hier die realen, mit PCMAN angepassten Haltungsdaten.

Validierung

Der Vergleich zwischen den aus den Versuchen gewonnenen Daten und den Simulationsdaten bildet die eigentliche Validierung. Verglichen werden die jeweiligen Haltungen miteinander (vgl. Kapitel 5.4), wobei verschiedene Kriterien zur Anwendung kommen: die relative Gelenkwinkelabweichung zwischen Realität und Simulation, Vergleiche zu H-Punkt und Augpunktlagen sowie ein Vergleich der auftretenden Schnittstellenkräfte.

Zielerreichung

Mit Hilfe der Validierung des RAMSIS-KHM soll die Einsatzfähigkeit des Modells sichergestellt werden. Dies setzt voraus, dass lediglich eine geringe Haltungsabweichung zwischen Realität und Simulation existiert. Abweichungen werden immer vorkommen, da ein Simulationsmodell lediglich eine Durchschnittshaltung prognostizieren kann und nicht auf die individuellen Vorlieben Rücksicht nimmt.

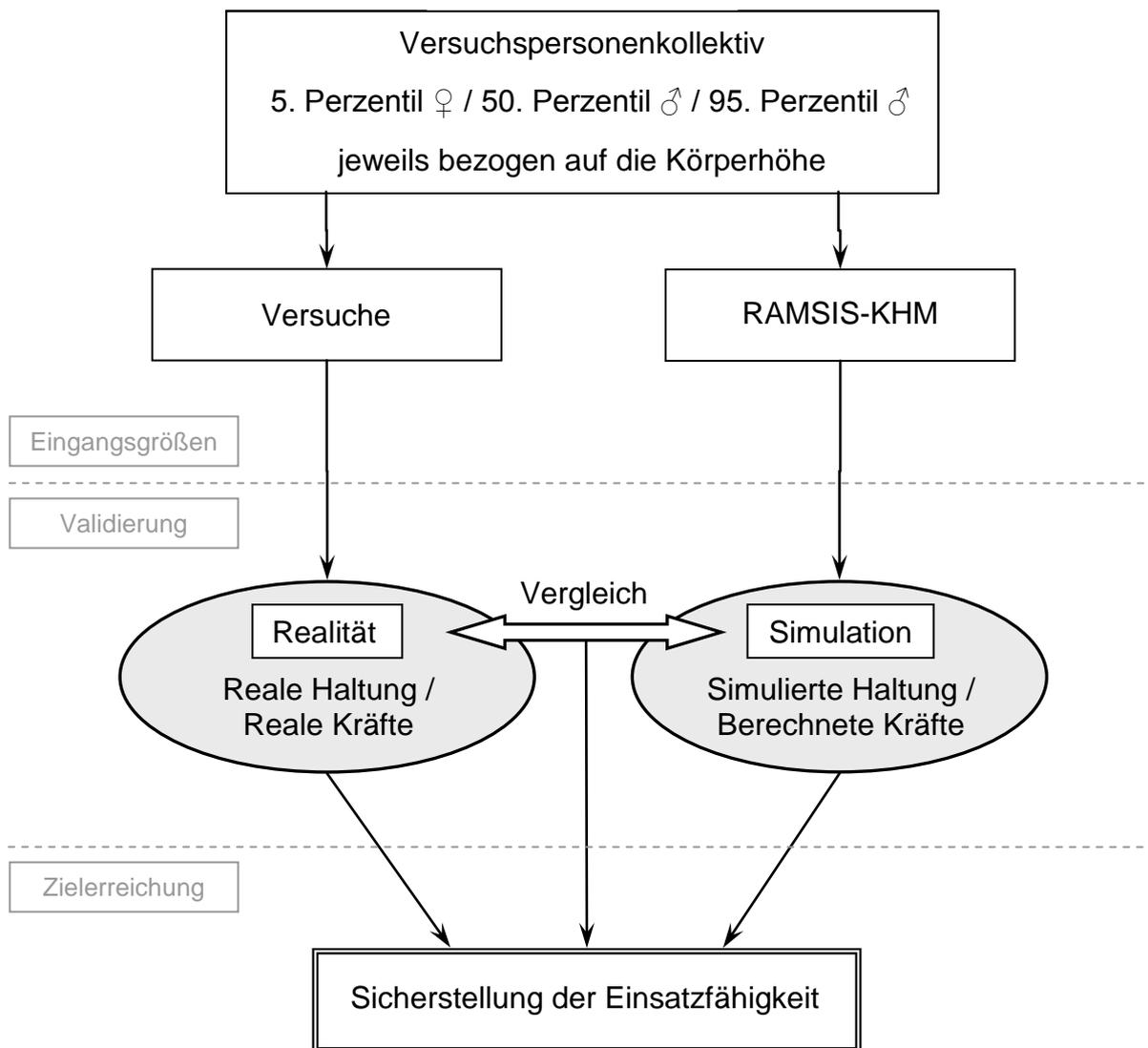


Abbildung 3-1 Darstellung des methodischen Vorgehens bei der Validierung des RAMSIS-Krafthaltungsmodells

3.2 Vorversuche zur Ermittlung der Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug

Die Vorversuche zur Ermittlung der Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug sind notwendig, um die spätere Kraftmesstechnik in den Versuchsstand an den richtigen Kontaktstellen implementieren zu können. In Realuntersuchungen wurden dazu Versuchspersonen in ihren Fahrgewohnheiten beobachtet. Die aufgetretenen Schnittstellen konnten darauf hin analysiert und anhand ihrer zeitlich auftretenden Häufigkeit sowie ihrer Lage und Größe bewertet werden (Buchholz, 2007).

Es sind abweichende Kontaktstellen zu erwarten, gerade zwischen Fahrzeugen, die sich stark in ihrer Innenraumgeometrie unterscheiden. In einem Sportwagen mit wenig Platz würden demnach mehr Kontaktstellen existieren, da z. B. die Beine eher an das Fahrzeug angelehnt werden, als in einer Limousine die viel Platz bietet. Auch weisen die verschiedenen Fahrzeuge unterschiedliche Charakteristika auf, welche unter Umständen die Sitzposition leicht verändern und sich somit auf die möglichen Kontaktstellen auswirken können. Demzufolge ist es sinnvoll in die Voruntersuchungen viele unterschiedliche Fahrzeuge mit einzubeziehen. Dadurch würde ein enormer Zeitaufwand entstehen, wodurch sich dieses Vorgehen als ungeeignet herausstellt. Deshalb wird an dieser Stelle ein Fahrzeug aus der Roadster Klasse untersucht, welches ein sehr geringes Platzangebot bietet.

An den Versuchen nahmen insgesamt 11 Personen teil, drei Frauen des 5. Perzentil Körperhöhe und jeweils vier Männer des 50. und des 95. Perzentil Körperhöhe. Die Dauer der Versuchsfahrt betrug 60 Minuten, wobei die Versuchsstrecke annähernd gleichmäßig in Stadt-, Land- und Autobahnstraßen aufgeteilt war. Eine durchgehende Videoaufnahme der Versuchsfahrten mit vier Kameras aus unterschiedlichen Perspektiven gewährleistete die spätere Analyse der Kontaktstellen der Probanden mit dem Fahrzeug.

Folgende Kontaktstellen zwischen Mensch und Fahrzeug wurden bei den Versuchen beobachtet:

Fußraum:

- Linker Fuß auf der Fußstütze und dem Kupplungspedal
- Rechter Fuß auf dem Brems- und Fahrpedal
- Linker und rechter Fuß auf dem Boden

Beinraum:

- Linkes Knie an der Fahrertür vorne
- Rechtes Knie an der Mittelkonsole vorne

Armbereich:

- Linker Ellenbogen bzw. Unterarm auf der Armauflage Tür
- Linker Ellenbogen bzw. Unterarm aufliegend auf der Brüstung der Fahrertür
- Rechter Ellenbogen bzw. Unterarm auf der Armauflage Mittelkonsole
- Rechte Hand auf dem Schalthebel
- Linke und rechte Hand am Lenkrad

Sitzbereich:

- Gesäß und Rücken auf dem Sitz
- Kopf an der Kopfstütze

Die Kontaktstellen im Fußbereich ergeben sich aus der jeweiligen Fahranforderung und werden dementsprechend genutzt. Fußstütze und Kupplungspedal weisen dabei ähnliche Belegzeiten auf. Das Fahrpedal bleibt lediglich für die kurzen Bremsmanöver unbenutzt. Beim linken Fuß wurde zusätzlich zum Ablegen auf die Fußstütze ein Aufstellen des gesamten Fußes auf den Boden beobachtet.

Im Beinbereich wurde nur bei den Männern ein Anlegen der Knie registriert, rechts an die Mittelkonsole und links an die Fahrertür.

Wie nicht anders zu erwarten war, benutzen alle Versuchspersonen das Lenkrad mit beiden Händen entsprechend der Fahraufgabe. Mit Ausnahme von kurzen Lenkmanövern, verwendet die linke Hand die rechte Seite des Lenkrades nicht und umgekehrt. Es konnte kein Zusammenhang zwischen Anthropometrie und der Kontaktstellen am Lenkrad gefunden werden. Nahezu der gesamte Umfang des Lenkrades wurde genutzt, wobei sich die längsten Kontaktdauern auf Höhe der

Lenkradspeichen links und rechts befanden (3 und 9Uhr). Die rechte Hand weist gemäß der Fahraufgabe zusätzlich eine Kontaktfläche zum Schalthebel auf.

Weiterhin wurden die Ellenbogen und Unterarme auf die dafür vorgesehenen Armauflagen, links an der Fahrtür und rechts auf die Mittelkonsole, abgelegt. Dies konnte nur bei den Männern beobachtet werden. Die Frauen erreichen diese aufgrund ihrer anthropometrischen Maße nicht.

Durch die Voruntersuchung wurde eine große Zahl von Kontaktstellen im Fahrzeug identifiziert und analysiert. Dabei hängen Lage und Größe der jeweiligen Bereiche von der Anthropometrie der im Fahrzeug sitzenden Person sowie von der Fahrzeuggeometrie selbst ab. Die Messung der beim Kontakt auftretenden Kräfte ist somit eine große Herausforderung. Welche Möglichkeiten und Methoden dafür in Frage kommen sowie die Vor- und Nachteile der verschiedenen Vorgehensweisen werden im folgenden Kapitel ausführlich erläutert.

3.3 Methoden der Kraftmessung an den Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug

Bei der Messung von Kontaktkräften zwischen Mensch und Fahrzeug muss zunächst unterschieden werden, ob der Mensch oder die Umgebung (das Fahrzeug) als Basis für die Implementierung von Kraftmesstechnik dienen soll. Verschiedene Methoden der Kraftmessung sowie charakteristische Vor- und Nachteilen existieren für beide Fälle. Die einzelnen Aspekte dazu werden im Folgenden einander gegenüber gestellt, analysiert und bewertet sowie die am besten geeignete Methode abgeleitet.

3.3.1 Der Mensch als Basis für die Kraftmesstechnik

Wird der Mensch mit geeigneten Sensoren zur Messung der Kontaktkräfte ausgestattet, so kann ein sofortiger und direkter Vergleich unterschiedlicher Fahrzeuge stattfinden. Der zeitaufwendige Auf- und Umbau der Messtechnik für jedes einzelne Fahrzeug entfällt, was sich positiv auf die gesamte Versuchszeit auswirkt. Beachtet werden muss dabei, dass die Messtechnik den Fahrer in seiner

Fahraufgabe nicht behindern darf sowie keine erzwungenen Haltungen verursacht. Folgende Möglichkeiten existieren zum Messen von Kontaktkräften:

Gamaschen mit Folienkissen

Gamaschen, ähnlich der ärztlichen Stützbandagen, sind leicht am Körper anzubringen und können aus den unterschiedlichsten Materialien bestehen. Um den Fahrer nicht zu behindern, sollten sie sich der Körperoberfläche anpassen. Die Verwendung von Folien bietet sich an, da sie biegsam und schweißbar sind. Für eine Messung der Kräfte als Flächenbelastung, wie sie an Armen und Beinen auftritt, sollten die Gamaschen aus mehreren Kammern bestehen, die in Form einer Matrix angeordnet werden. Dadurch ergeben sich mehrere Folienkissen auf einer Gamasche, die mit Flüssigkeit oder Gas befüllt werden können. Sensoren, die Kräfte aufgrund von Drücken messen, können innerhalb oder außerhalb der Folienkissen liegen. Letztgenannte sind durch Leitungen mit den einzelnen Folienkissen verbunden.

Gamaschen mit Lichtsensoren

Neben den Gamaschen mit Folienkissen besteht die Möglichkeit, Gamaschen mit Lichtsensoren auszustatten. Das Messprinzip basiert auf der Messung von Lichtintensitäten, die sich durch Verformungen verändern. Dabei sind die Sensoren in Polymerschaum aus Silikon oder Urethan eingebettet (Abbildung 3-2). Wird das Material aufgrund von Krafteinwirkung verformt, nehmen die Sensoren veränderte Lichtintensitäten wahr. Das bedeutet, dass bei Sensoren nahe der Lichtquelle die Intensität zunimmt, bei weiter entfernten Sensoren dagegen abnimmt (Abbildung 3-3). Durch eine dem Versuch angepasste Anordnung von Lichtquellen und Sensoren können Informationen über den Ort der Krafteinleitung, die Höhe der Kraft und über die Druckrichtung gegeben werden. Da verschieden harte Schaummaterialien existieren, können die Sensoren für unterschiedliche Anwendungsgebiete eingesetzt werden. Zur Messung der Kraftübertragung an den Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug besteht die Möglichkeit der Integration dieser Sensoren in eine aus Schaum bestehende Gamasche.

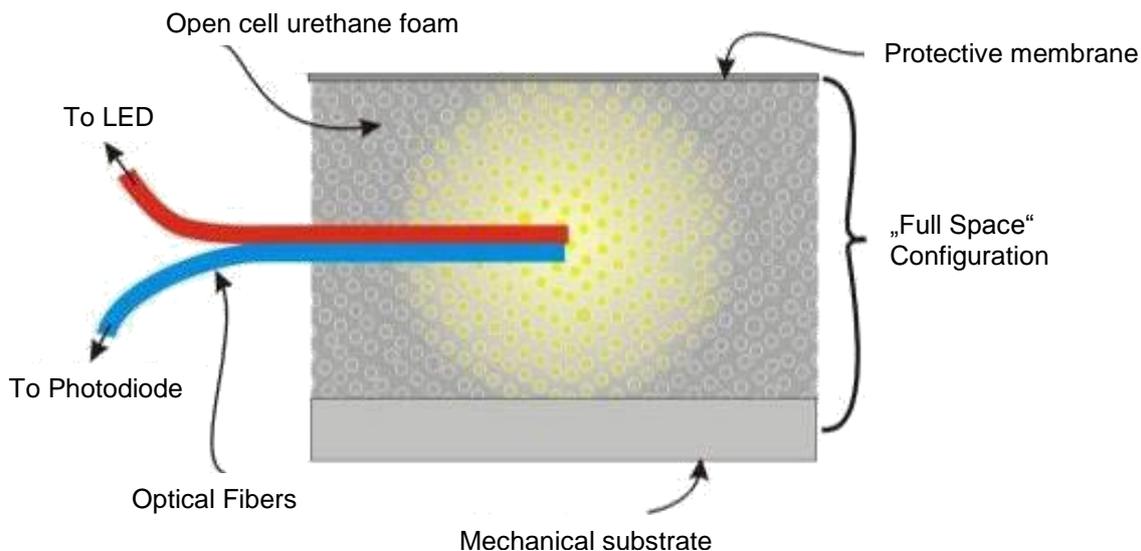


Abbildung 3-2 Messprinzip der Sensoren der Firma KINOTEX (Reimer, 1999)

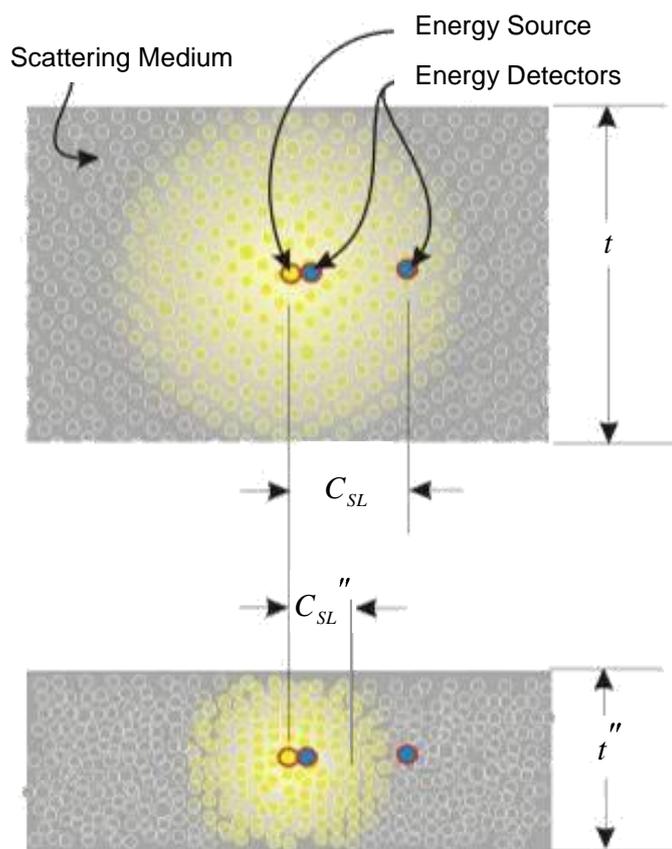


Abbildung 3-3 Änderung der Lichtintensität bei Verformung (Reimer, 1999)

Einsatz von Folienmesstechnik

Eine weitere Möglichkeit den Menschen mit Messtechnik auszustatten ist die Verwendung von Folienmesstechnik direkt auf der Körperoberfläche. Dazu existierten Messhandschuhe (Abbildung 3-4) sowie Fußdrucksensormatten.

Der Messhandschuh besteht aus einer beliebigen Anzahl an Foliensensoren, ähnlich dem Messprinzip der Foliensensormatten (vgl. Kapitel 3.3.2). Die Sensoren haben eine Größe von ca. 7 x 7mm und können je nach Bedarf frei auf dem Handschuh platziert werden.



Abbildung 3-4 Messhandschuh der Firma VISTA MEDICAL Europe, (www.pressuremapping.com vom 04.03.2009)

Die Fußdrucksensormatte ist ähnlich einer Schuheinlegesohle aufgebaut und kann auch als solche zur Messung der Druckverteilung im Schuh verwendet werden. Laut Hersteller sind die Druckmatten immer an der zu messenden Stelle anzubringen. Für die Validierung des RAMSIS-KHM sollten aus diesem Grund die Messmatten auf die Unterseite des Schuhs platziert werden. Damit ist gewährleistet, dass der gesamte Fußraum mit einer Messmatte pro Fuß aufgenommen werden kann.

Einsatz eines Anzuges mit Miniaturkraftsensoren

Die Kraftübertragung zwischen Mensch und Fahrzeug kann auch mit Miniaturkraftsensoren gemessen werden. Dazu ist ein Ganzkörperanzug erforderlich, der mit möglichst vielen dieser Sensoren versehen ist, die mittels Klettverschlüssen einfach am Anzug zu befestigen sind. Für die Beachtung der unterschiedlich großen

Versuchspersonen müssen verschieden große Anzüge zur Verfügung stehen, aber lediglich ein Satz Sensoren.

3.3.2 Das Fahrzeug als Basis für die Kraftmesstechnik

Für die Vermeidung der unmittelbaren Beeinflussung der Versuchspersonen durch Geräte oder Sensoren, die direkt am Körper angebracht sind, bietet es sich an, das Fahrzeug als Basis für die Implementierung der Kraftmesstechnik zu verwenden. Ein weiterer Vorteil besteht in der Messung von unverfälschten Körperteilgewichten, die einen Teilaspekt bei der Validierung des RAMSIS-KHM darstellen.

Einsatz von Folienmesstechnik

Die Folienmesstechnik bietet die Möglichkeit Flächen in unterschiedlichen Größen hinsichtlich ihrer Druckverteilung zu analysieren. Bei Messmatten der Firma TEKSCAN ist zusätzlich die Möglichkeit gegeben Kräfte ausgeben zu lassen, was für die Validierung einen großen Vorteil darstellt. Daher wird das Messprinzip anhand der TEKSCAN Messmatten kurz erläutert.

Es handelt sich um sehr dünne Folien mit einer Dicke von ca. 100µm, welche eine unterschiedliche Anzahl an Sensorzellen, bis zu mehreren tausend, aufweisen können. Die Form und Größe sowie Druckbereiche sind vom Anwendungsgebiet abhängig. Eine Folienmessmatte besteht aus zwei sehr dünnen und flexiblen, mit Leiterbahnen versehenen Polyesterfolien. Auf die Innenseite der einen Folie werden Spalten, auf die andere Reihen gedruckt. Dadurch entsteht eine Matrix, an dessen Kreuzungspunkt jeweils eine Sensorzelle sitzt (Abbildung 3-5). Je nach Anwendungsfall kann der Reihen- und Spaltenabstand variiert werden. Der minimale Abstand beträgt ca. 0,64mm, das bedeutet eine sehr hohe Sensorzellendichte von bis zu 248 Sensorzellen pro cm². Auch Sonderformen mit einer unterschiedlichen Anordnung von Zeilen und Spalten sind möglich.

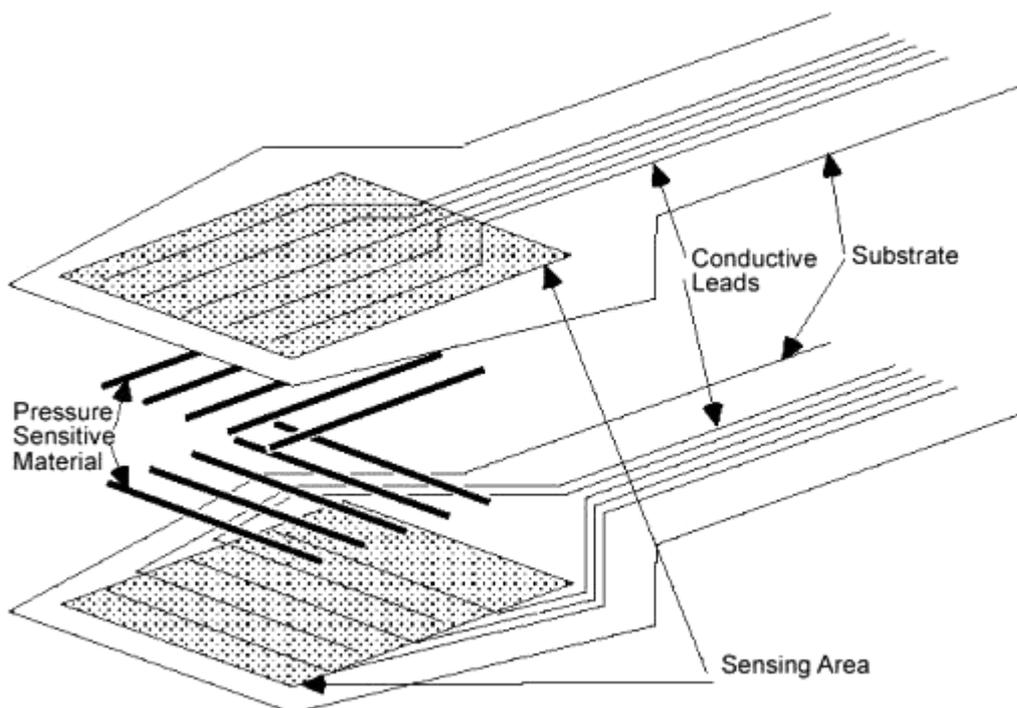


Abbildung 3-5 *Aufbau der drucksensitiven Folien der Firma TEKSCAN*
 (www.cmv.de vom 04.03.2009)

An jedem Kreuzungspunkt der Matrix wird ein lastabhängiger Widerstand an einen prozessgesteuerten Multiplexer gesendet. Die gemessenen Widerstände werden mit Hilfe eines A/D-Wandlers aufgenommen und in der zugehörigen Software verarbeitet. Durch eine spezielle Elektronik wird eine gegenseitige Beeinflussung der Zellen verhindert. Die einzelnen Sensoren der Folien zeichnen die statischen oder dynamischen Kraft- und Druckänderungen als zeitlichen Verlauf auf.

Für die Validierung des RAMSIS-KHM können die Folien durch ihre Variationsbreite in Größe und Form an den zu messenden Kontaktstellen zwischen Mensch und Fahrzeug angebracht werden. Durch die hohe Sensordichte wird eine hohe Auflösung der Flächenbelastung erreicht und durch die dünne Bauform unterliegen die Versuchspersonen einer geringen Beeinflussung. Die Genauigkeit der absoluten Werte ist stark von der Güte der Kalibrierung abhängig. Diese sollte mit einem Gegenstand durchgeführt werden, der dem zu messenden Objekt in Größe, Gewicht und Steifheit entspricht.

Einsatz von Kraftsensoren

Mit Kraftsensoren können auf den Sensor einwirkende Kräfte, Zug- und/oder Druckkräfte, gemessen werden. Es gibt verschiedene Bauarten dieser Sensoren, wobei meistens Dehnungsmessstreifen (DMS) zum Einsatz kommen. Der im Sensor befindliche Federkörper verformt sich aufgrund der Krafteinleitung elastisch. Dadurch ergibt sich eine geringe Spannungsänderung, die mit Hilfe eines Messverstärkers nutzbar gemacht wird. Die Höhe der Spannung gibt dabei an, wie viel Kraft auf den Sensor einwirkt. Für die Validierung des RAMSIS-KHM können diese Sensoren mit Hilfe einer geeigneten Konstruktion ins Fahrzeug implementiert werden.

3.3.3 Zusammenfassende Beurteilung

Kräfte an den Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug sind mit verschiedenen Methoden messbar. Damit die Entscheidung, welche Methode zum Einsatz kommt, erleichtert wird, müssen diese anhand geeigneter Kriterien bewertet werden. Wichtig dabei sind Faktoren wie die Versuchspersonenbeeinflussung, bestimmte Sensoreigenschaften sowie Kriterien für die Qualität der Messergebnisse.

Beeinflussung der Versuchsperson

Die Beobachtung realer Haltungen ist nur möglich, wenn die Versuchspersonen in ihren Gewohnheiten nicht beeinflusst werden. Dienen sie als Basis für die Kraftmess-technik wird immer ein bestimmter Grad der Beeinflussung vorhanden sein, da eine ungewohnte Situation entsteht. Daher müssen Gewicht und Abmaße der Sensoren so gering wie möglich sein. Auch Leitungen sind so gut wie möglich zu vermeiden, da hier die Versuchspersonen immer vorsichtig agieren und somit realistische Haltungen nicht zu erwarten sind.

Dient das Fahrzeug als Basis für die Kraftmessung sind die Sensoren in geeigneter Weise so einzubauen, dass die Fahrzeugmaße nicht verändert werden. Ansonsten entstehen Haltungen, die wiederum nicht der Realität entsprechen.

Sensoreigenschaften

Wichtige Aspekte der Sensoreigenschaften sind deren Kosten, Robustheit, Kalibrierung/Messgenauigkeit und die Verfügbarkeit.

Damit sich die Kosten der gesamten Messtechnik im Rahmen der Budgetvorgaben bewegen, müssen Spezialanfertigungen vermieden werden.

Für den Versuch sind Sensoren zu bevorzugen, die widerstandsfähig sind, damit eine lange Lebensdauer gewährleistet ist.

Zur Reduzierung der Messfehler ist bei der Auswahl der Sensoren unbedingt auf deren Genauigkeit zu achten. Diese hängt bei manchen Methoden stark von der Kalibrierung ab. Deswegen ist auch die Art und Durchführung der Kalibrierung bei der Wahl der geeigneten Methode zu berücksichtigen.

Die Verfügbarkeit von Sensoren ist im Rahmen dieser Arbeit ein zusätzliches Auswahlkriterium. Durch die Verwendung von Fertig- bzw. Serienteile entfällt die Entwicklungsarbeit, was sich positiv auf den zeitlichen Faktor auswirkt.

Qualität der Messergebnisse

Bei der Messung der Kontaktkräfte ist es wichtig, Flächen auch als Flächenbelastung aufzunehmen und zusätzliche Sekundärkräfte zu vermeiden.

Die Flächenbelastung ist zur späteren Bestimmung der für die Simulation mit dem RAMSIS-KHM notwendigen Koppelpunkte wichtig, um aus diesen z. B. Schwerpunktlagen ermitteln zu können.

Sekundärkräfte können z. B. Scherkräfte sein, die nicht räumlich aufgelöst werden können, wodurch ein ungenauer Messwert entsteht. Auch aktiv wirkende Kräfte, wie sie bei dem Messhandschuh und den Fußdrucksensormatten auftreten können, verfälschen die Messwerte. Eine aktiv wirkende Kraft wird von der Versuchsperson direkt durch Muskelkraft eingeleitet. Je fester ein Proband z. B. das Lenkrad hält, desto größer ist diese Kraft. Dadurch können Körperteilgewichte und zusätzlich wirkende Muskelkräfte nicht mehr auseinander gehalten werden.

Bewertung der Messmethoden

In Tabelle 3-1 sind die unterschiedlichen Methoden zur Kraftmessung zwischen Mensch und Fahrzeug hinsichtlich der aufgeführten Kriterien bewertet. Bei der näheren Betrachtung der verschiedenen Möglichkeiten ergibt sich eine zu starke Beeinflussung der Versuchspersonen, wenn die Messtechnik direkt auf der Körperoberfläche der Probanden angebracht wird. Die hohen Kosten, die unzureichende Robustheit, wie auch die schlechte Verfügbarkeit und die eingeschränkte Verwertbarkeit der Ergebnisse tragen dazu bei, sich gegen diese Methoden zu entscheiden.

Für die Versuche wird demzufolge ein variabler, statischer Versuchsstand (vgl. Kapitel 4.1.1) verwendet. Veränderungen von Fahrzeuginnenmaßen durch den Einbau von Messtechnik, wie es bei realen Versuchsfahrzeugen vorkommen könnte, treten nicht auf, da dieser auf verschiedene Fahrzeuggeometrien eingestellt werden kann und so die Maßänderungen kompensiert.

Für eine möglichst genaue Messung der Kontaktkräfte sind verschiedene Kraftsensoren mit unterschiedlichen Messbereichen notwendig (vgl. Kapitel 4.1.2). Die Kontaktkräfte zwischen Sitz und Versuchsperson können zusätzlich mit Folienmessmatten aufgenommen werden. Das nachfolgende Kapitel erläutert ausführlich den Aufbau des Versuchsstandes sowie die zum Einsatz kommende Messtechnik.

Tabelle 3-1

Bewertungsmatrix der unterschiedlichen Kraftmessmethoden

	Beeinflussung der VP		Sensoreigenschaften				Messung	
	Gewicht	Abmaße/ Beweglichkeit	Kosten	Robustheit	Kalibrierung/ Messgenauigkeit	Verfügbarkeit	von Flächenbelastung	von Sekundärkräften
Basis Mensch								
Gamaschen mit Folienkissen Füllmedium Gas	+	--	--	--	-	---	+	-
Gamaschen mit Folienkissen Füllmedium Flüssigkeit	---	--	--	--	-	---	+	-
Gamaschen mit Lichtsensoren	+	--	--	++	---	---	+	-
Folienmesstechnik (Messhandschuh/Fußdrucksensormatte)	++	-	+	--	--	++	++	---
Anzug mit Miniaturkraftsensoren	--	--	++	-	++	++	---	++

Basis Fahrzeug

Folienmesstechnik (Folienensormatten)	++	++	+++	-	---	++	++	++
Kraftsensoren	++	++	++	++	++	++	---	++

- +++ sehr gut
- ++ gut
- + befriedigend
- unbefriedigend
- schlecht
- sehr schlecht

4 Die Versuche

4.1 Der Versuchsstand

Wie sich im vorhergehenden Kapitel herausgestellt hat, ist die Ausstattung eines Versuchsstandes mit Kraftmesstechnik für die Validierung des RAMSIS-KHM gut geeignet. Dazu wird das variable Ein- und Ausstiegsmodell (vgl. Kapitel 4.1.1) verwendet, welches vor den Versuchen mit den entsprechenden Sensoren ausgerüstet wird (vgl. Kapitel 4.1.3).

Aus Kostengründen liegt das Hauptaugenmerk beim statischen Versuch im MockUp (Versuchsstand) auf den hoch frequentierten Kontaktstellen, im Folgenden als Hauptkontaktstellen bezeichnet. Diese sind der Sitz, das Lenkrad und der Fußraum mit Boden, Pedalerie und Fußstütze.

Für die Reduzierung des Messfehlers ist es wichtig, die Messbereiche der Sensoren so gut wie möglich an die zu messenden Kräfte anzupassen. Dabei ist bekannt, dass die Messwerte umso genauer sind, je besser der Messbereich des jeweiligen Sensors ausgenutzt wird. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass die Messbereiche nicht zu gering ausgelegt werden, um einer Beschädigung der Sensoren im Versuchseinsatz vorzubeugen.

4.1.1 Das variable Ein- und Ausstiegsmodell – VEMO

Das variable Ein- und Ausstiegsmodell, kurz VEMO, wurde im Rahmen der Dissertation von Rigel (Rigel, 2005; Suchomel, 2001) für die Simulation von Ein- und Ausstiegsbewegungen entwickelt (Abbildung 4-1). Es stellt einen Fahrerarbeitsplatz sowie die Geometrieteile dar, welche die Bewegung beim Ein- und Ausstiegsvorgang maßgeblich beeinflussen. Eine Besonderheit dieses Modells ist das umfangreiche Verstellsystem, wodurch eine große Anzahl an Fahrzeugen, vom Roadster bis zum SUV, dargestellt werden kann. Durch Lageänderungen fast aller Bauteile in allen drei Raumrichtungen wird die Geometrie des gewünschten Fahrzeuges nachgebildet.

Ausgehend von einer konstanten Lage der Instrumententafel und des Lenkrades, wird die Fahrzeuggeometrie durch einen in x-Richtung (Fahrzeuglängsachse)

verstellbaren Sitz sowie einen in x- und z-Richtung (Fahrzeughochachse) verstellbaren Fußraumboden mit Fahrpedal, Kupplungs- und Bremspedal und einer Fußstütze vor eingestellt. Das Lenkrad wie auch der Sitz sind gemäß ihrer jeweiligen Verstellfelder zusätzlich anpassbar, wie es auch in einem realen Fahrzeug der Fall ist. Für die möglichst reale Einstellung der Sitzposition durch die Versuchsperson sind zusätzlich eine Dachverkleidung für die Kopffreiheit und eine Frontklappe für die Beurteilung der Sicht nach vorne dargestellt. Diese können für die Simulation realer Fahrzeuggeometrien ebenfalls verstellt werden. Weitere Geometrieteile wie Tür und Mittelkonsole werden in dieser Arbeit vernachlässigt.

Bei der Auslegung und Entwicklung des VEMO wurde darauf geachtet, dass eine möglichst schnelle Verstellung der Geometrie ohne Umrüstung von Bauteilen gewährleistet ist. Dadurch ist sichergestellt, dass die Wartezeiten für die Versuchspersonen bei einem Termin gering ausfallen. Zusätzlich wirkt sich der direkte Vergleich verschiedener Fahrzeuggeometrien bei der Analyse von Komfortbewertungen positiv aus, da z. B. der Einfluss der Tagesform entfällt. Ein weiterer großer Vorteil bei der Verwendung des VEMO liegt in der Ersparnis des zeitintensiven Umbaus der Sensoren, die für die Schnittstellenkraftmessung fest in den Versuchsstand implementiert werden. Zusätzlich bietet das VEMO eine gute Zugänglichkeit und Platz nach allen Seiten, was sich positiv auf die Haltungsdokumentation mittels Kameras auswirkt.

Aus den genannten Gründen eignet sich das VEMO als Versuchsstand für die Validierung des RAMSIS-KHM. Vor der Versuchsdurchführung sind dazu die benötigten Kraftsensoren auszuwählen und auszulegen.

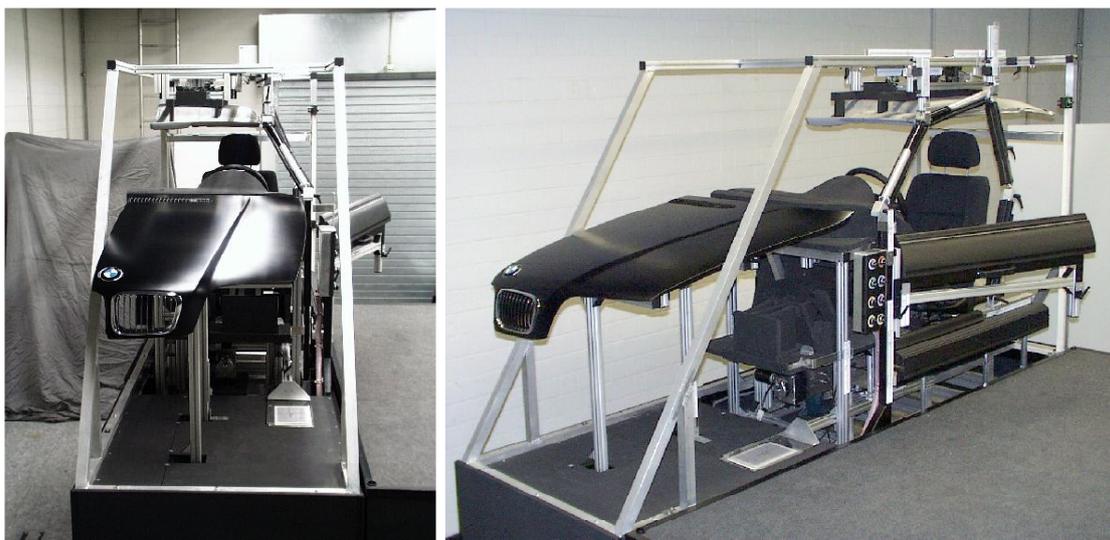


Abbildung 4-1 Gesamtansicht des VEMO im Originalzustand (Rigel, 2005)

4.1.2 Spezifikation der Messtechnik

Die Messtechnik als übergeordneter Begriff umfasst Hardwarekomponenten wie die eigentlichen Kraftsensoren, die dazu benötigten Messverstärker und die Messdatenerfassung sowie Softwarekomponenten zur Verarbeitung, Visualisierung und Speicherung der Messdaten (Lerch, 2007). In Abbildung 4-2 ist die gesamte Messkette mit den einzelnen Bausteinen von der Krafteinleitung bis zur Speicherung der Messdaten schematisch dargestellt.

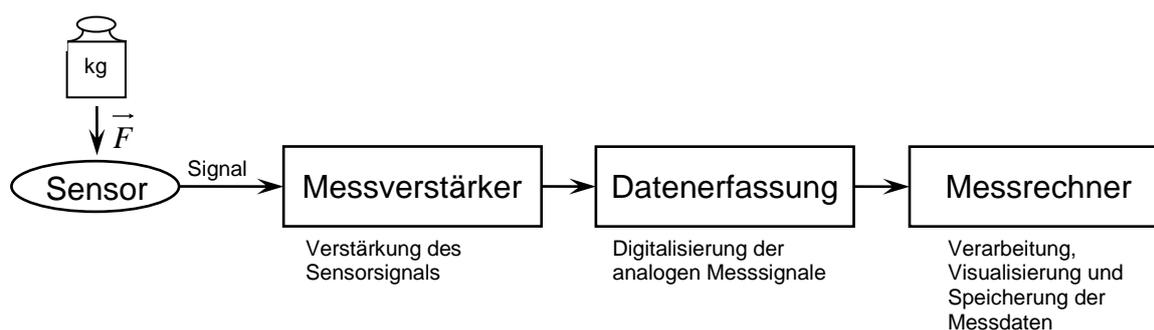


Abbildung 4-2 Messkette von der Krafteinleitung bis zur Speicherung

Für die Hauptkontaktstellen Fußraum, Sitz und Lenkrad gilt es die geeigneten Sensoren auszulegen und auszuwählen. Dabei fällt der Ermittlung der Sensormessbereiche besondere Bedeutung zu. Diese müssen einerseits so genau

wie möglich auf die zu messenden Kräfte abgestimmt werden, um den Messfehler gering zu halten. Andererseits sollten die Messbereiche mit einem Puffer ausgelegt werden, um einer Beschädigung im Versuchseinsatz vorzubeugen.

4.1.2.1 Ermittlung der Sensormessbereiche

Das Hauptaugenmerk liegt bei statischen Versuchen auf der Messung von Körperteilgewichten. Hierbei werden weder von außen auf den Menschen einwirkende Kräfte noch Bewegungen, bei denen dynamische Lastspitzen auftreten, berücksichtigt. Aus diesem Grund erfolgt die Auslegung der Messbereiche mit Hilfe des Handbuchs der Ergonomie (HdE, 1989) mittels der darin enthaltenen Daten von Körperteilgewichten. Damit die Sensoren zusätzlich mit einem Puffer ausgelegt werden können, spielen auch die maximal aufbringbaren Kräfte eine Rolle. Weiterhin finden BMW interne Pedal-Kraft-Weg-Diagramme zur Auslegung der Pedalkraftsensoren (Gallmeier, 2002) sowie Erfahrungswerte von Lieferanten und Mitarbeitern Berücksichtigung (Fröhmel, 2008b).

Ermittlung der maximalen Körperteilgewichte

Im Handbuch der Ergonomie (HdE, 1989) stehen Daten von Körperteilgewichten bei unterschiedlichen Haltungen zur Verfügung. Für die Ermittlung der maximalen Gewichte werden jeweils die am besten auf die Fahraufgabe übertragbaren Szenarios herangezogen. Dabei errechnen sich die maximalen Körperteilgewichte durch Prozentangaben am maximalen Gesamtgewicht. Dieses beträgt 114,4kg (99. Gewichtsperzentil; HdE, 1989). Da erwiesenermaßen die Bevölkerung immer korpulenter wird (Bjornelv et. al., 2007) und die Daten aus dem Handbuch der Ergonomie schon etliche Jahre zurückliegen, wird das maximale Gewicht mit 120kg angenommen. Die Festlegung der maximalen Körperteilgewichte erfolgt bei einem Szenario jeweils mit der angegebenen Prozentzahl für das 95. Perzentil. Damit sind die durch das Gewicht des Körpers auftretenden Höchstlasten berücksichtigt. Nachfolgend findet sich eine Aufstellung der für die Sensoren relevanten Teilgewichte.

Körperteilgewichte der Beine auf Pedalerie und Fußstütze

Datenblatt: B - 3.3.31 (HdE, 1989)

Anteil beider Beine: 11,6%

Gewicht: 13,92kg

Das Körperteilgewicht eines Beines an den Pedalen und der Fußstütze beträgt damit 68,28N.

Körperteilgewichte der Beine auf den Boden

Datenblatt: B - 3.3.28 (HdE, 1989)

Anteil beider Beine: 16,1%

Gewicht: 19,32kg

Da der Boden für die getrennte Kraftmessung der Beine zweigeteilt ausgeführt wird (vgl. Kapitel 4.1.3), beträgt die Gesamtlast auf eine Bodenplatte 94,76N.

Körperteilgewicht des gesamten Rumpfes

Datenblatt: B - 3.3.24 (HdE, 1989)

Anteil des Rumpfes: 77,7% (hintere Sitzhaltung)

Gewicht: 93,24kg

Durch das Körperteilgewicht des Rumpfes wird eine maximale Gesamtlast von 914,68N auf den Sitz übertragen.

Für die getrennte Betrachtung von Sitzfläche und Sitzlehne werden Folienmessmatten eingesetzt, welche entsprechend der zu messenden Masse zu kalibrieren sind. Die auf diese Flächen übertragenen Kräfte sind abhängig vom Torsowinkel, welcher sich erst nach Auswertung der Versuche ergibt und zwischen 24° und 26° liegt (vgl. Kapitel 5.2). Nachdem ein Kalibrierfile bei dieser Messmethode auch nach Versuchsdurchführung auf die Messdaten angewendet werden kann, erfolgt die Kalibrierung im Nachhinein mit Hilfe von Gewichtsklassen, bezogen auf das Versuchspersonenkollektiv.

Datenblatt: B - 3.3.19 (HdE, 1989)

Anteil des Rumpfes
auf die Sitzlehne: ca. 19%

Mit Hilfe des Handbuchs der Ergonomie (HdE, 1989) wird das Gewicht auf die Sitzfläche unter zu Hilfenahme des Gewichts des gesamten Rumpfes und des Gewichtes auf die Sitzlehne berechnet. Ein eigenes Datenblatt, welches lediglich das anteilige Gewicht auf die Sitzfläche angibt, existiert nicht.

Körperteilgewichte der Arme

Datenblatt: B - 3.3.9 (HdE, 1989)

Anteil eines Armes: 4,4%

Gewicht: 5,28kg

Daraus ergibt sich eine maximale Gesamtlast der Arme auf das Lenkrad von 103,6N.

Ermittlung der maximal aufbringbaren Kräfte

Nachdem während der Versuche auch Abstützkräfte der Versuchspersonen zu erwarten sind, ist es notwendig, maximal aufbringbare Kräfte in die Auslegung der Sensormessbereiche mit einzubeziehen. Diese Daten werden ebenfalls dem HdE (HdE, 1989) für das 99. Perzentil Mann entnommen.

Kräfte an Fußstellteilen

Datenblatt: B - 4.5.1 (HdE, 1989)

Maximalkraft: 1195N

Kräfte auf Bodenplatten

Datenblatt: B - 4.5.1 (HdE, 1989)

Maximalkraft: 726N

Der Boden wird für die getrennte Kraftmessung der Beine zweiteilig ausgeführt. Die maximale Kraftübertragung auf eine Bodenplatte liegt damit bei dem oben angegebenen Wert.

Kräfte auf das Lenkrad

Datenblatt:	B - 4.3.3 (HdE, 1989)
maximale Druckkraft:	2308N
maximale Zugkraft:	1440N
maximale Kraft bei Rechtsdrehung:	364N
maximale Kraft bei Linksdrehung:	379N

Leider kann das Datenblatt zur Maximalkraftermittlung auf das Lenkrad nur bedingt herangezogen werden, da die Kräfte nicht unter Bedingungen ermittelt wurden, die einer realen Fahrerhaltung entsprechen. Es gibt aber einen wichtigen Anhaltspunkt wie hoch die Kräfte sein könnten.

Zudem existieren derzeit keine Datenblätter, die eine Maximalkraft auf den Sitz beschreiben.

Zusammenfassung der Sensormessbereiche

Die Wahl der jeweiligen Sensormessbereiche hängt von den Faktoren Körperteilgewichte und maximal aufbringbare Kräfte sowie von der Verfügbarkeit und dem Preis ab. Nachdem das Augenmerk auf statischen Versuchen liegt, sollten die Messbereiche auf die jeweiligen Körperteilgewichte abgestimmt sein, damit der Messfehler der Sensoren möglichst gering ist. Dem gegenüber stehen aber hohe Lasten, hervorgerufen z. B. durch das Ein- und Aussteigen oder unvorhergesehene Bewegungen der Versuchspersonen. Werden die Messbereiche aufgrund dessen sehr hoch ausgelegt, ist der Messfehler bei den statischen Versuchen groß, da der Messbereich nicht ausgenutzt wird.

Aufgrund des beschriebenen Zielkonfliktes werden die Messbereiche anhand der Körperteilgewichte mit einem zusätzlichen Puffer ausgelegt. Ferner kommen Sicherheitseinrichtungen zum Einsatz, die einer Beschädigung der Sensoren im

Versuchseinsatz entgegenwirken (vgl. Kapitel 4.1.3). Zusätzlich müssen die Sensorausführungen beachtet werden, da nicht alle Sensoren in allen Messbereichen verfügbar und realisierbar sind. Bei der Auslegung der Pedalkraftaufnehmer werden Kraft-Weg-Diagramme und Erfahrungswerte berücksichtigt.

Nachfolgend sind die als notwendig erachteten Sensormessbereiche für die jeweiligen Sensoren zusammengefasst.

Messbereiche der Pedale und Fußstütze

Fußstütze:	0 ... 800N
Kupplungspedal:	0 ... 800N
Bremspedal:	0 ... 1500N
Fahrpedal:	0 ... 250N

Messbereich der Bodensensoren

Für die getrennte Betrachtung der Beinkräfte werden die Bodenplatten zweiteilig ausgeführt. Jede Bodenplatte ist auf drei Sensoren gelagert. Die Kraftübertragung auf einen Sensor ist daher annähernd mit $\frac{1}{3}$ der Gesamtkraft anzunehmen. Aufgrund der Verfügbarkeit wird der folgende Messbereich gewählt:

Je Bodensensor:	0 ... 200N
-----------------	------------

Messbereich der Sitzsensoren

Der Sitz wird auf vier Sensoren gelagert, welche neben dem Gewicht des Rumpfes auch das Gewicht des kompletten Sitzes tragen. Nachdem der Sitz annähernd gleichmäßig auf den Sensoren gelagert wird, fällt auf jeden Sensor $\frac{1}{4}$ des Gesamtgewichtes.

Je Sitzsensor:	0 ... 500N
----------------	------------

Messbereich des Lenkradsensors

Die Aufgabe der Implementierung von Sensoren zur Messung der Kräfte am Lenkrad stellte sich während des gesamten Aufbaus als das schwierigste Problem dar. Mit Hilfe eines 3-achsialen Kraftaufnehmers können die Armkräfte in allen drei Raumrichtungen erfasst werden. Der Messbereich beträgt dabei je Raumkoordinate maximal 500N.

Je Raumkoordinate: 0 ... 500N

4.1.2.2 Auswahl von Sensoren und Messdatenerfassung

Die Auswahl der Sensoren und Messdatenerfassung umfasst einige Randbedingungen, die unbedingt zu beachten sind. Ausschlaggebend für die Entscheidung, welche Sensoren eingesetzt werden, sind neben Robustheit, hoher Genauigkeit und kleiner Einbaumaße auch die Verfügbarkeit der Messbereiche und der Preis. Bei der Messdatenerfassung sind Einfachheit in der Handhabung, die Anzahl der Messkanäle, die Möglichkeit später dynamische Messungen durchzuführen, welche eine hohe Abtastfrequenz benötigen, und der Preis entscheidend. Folgende Messtechnik wurde für die Versuche beschafft:

Sensoren

Pedal-Kraftaufnehmer der Serie F304 der Firma ALTHEN GmbH Mess- und Sensortechnik (Abbildung 4-3) für die Messung der Fußkräfte auf die jeweiligen Pedale und die Fußstütze.



Abbildung 4-3 Pedalkraftaufnehmer der Serie F304

Präzisionskraftaufnehmer der Serie F308 der Firma ALTHEN GmbH Mess- und Sensortechnik (Abbildung 4-4) für die Messung der Fußkräfte auf den Boden und der gesamten Kraftübertragung des Sitzes mit Versuchsperson.



Abbildung 4-4 Präzisionskraftaufnehmer der Serie F308

Zwei Folienmessmatten der Serie CONFORMat der Firma Tekscan für die getrennte Betrachtung der Kraftübertragung auf Sitzfläche und Sitzlehne (Abbildung 4-5).



Abbildung 4-5 Messmatten der Serie CONFORMat

3-achsialer Kraftaufnehmer der Serie F233 der Firma ALTHEN GmbH Mess- und Sensortechnik (Abbildung 4-6) zur Messung der Armkräfte auf das Lenkrad.



Abbildung 4-6 3-achsialer Kraftaufnehmer der Serie F233

Messverstärker

Die Messverstärker zu den jeweiligen Kraftsensoren wurden in Zusammenarbeit mit der Firma ALTHEN GmbH Mess- und Sensortechnik auf die Sensoren und den jeweiligen Einsatzzweck abgestimmt. Durch die Vorgabe, zukünftig auch dynamische Fahrversuche mit dieser Messtechnik durchführen zu können, kommt z. B. für die Pedalkraftsensoren ein spezieller Vier-Kanal-Messverstärker zum Einsatz. Dieser kann sowohl an eine 230V Stromversorgung als auch an die 12V Spannungsversorgung im Fahrzeug angeschlossen werden.

Messdatenerfassung

Zur weiteren Verarbeitung der analogen Sensorsignale müssen diese mit Hilfe einer Messdatenerfassung in digitale Messwerte umgewandelt werden. Die Anforderungen nach einfacher und mobiler Handhabung, der Möglichkeit alle Sensoren differentiell zu messen zur Reduzierung des Messfehlers sowie die Möglichkeit der späteren Aufrüstung und Nutzung für andere Zwecke schränken die Auswahl ein. Zum Einsatz kommt das CompactDAQ-Chassis cDAQ-9172 der Firma National Instruments mit zwei CompactDAQ-Modulen vom Typ NI 9205, welche jeweils 16 Kanäle für die Messung und Aufzeichnung von Spannungen zur Verfügung stellen (Abbildung 4-7).

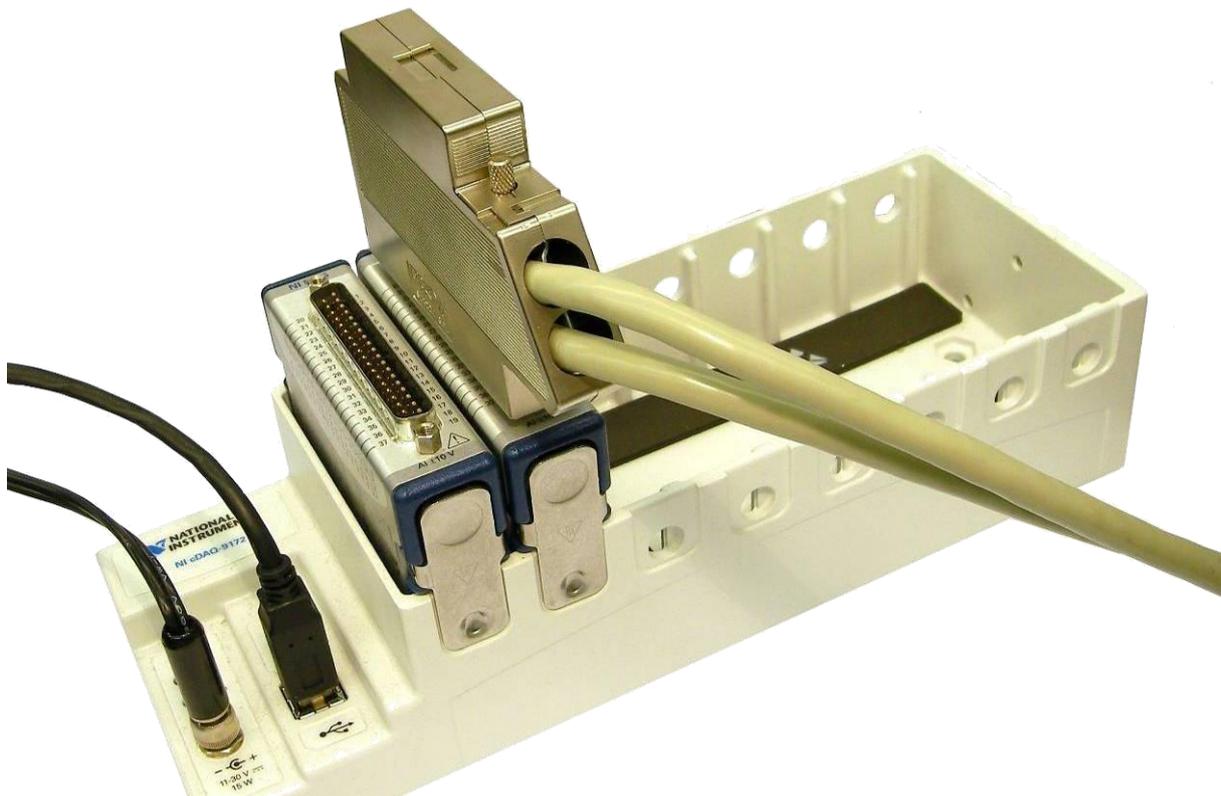


Abbildung 4-7 Messdatenerfassung, NI Compact DAQ

4.1.3 Implementierung der Messtechnik

Für die Messung der Schnittstellenkräfte müssen die ausgewählten Sensoren fest in den Versuchsstand implementiert werden (Fröhmel, 2008a/b). Zwei Aspekte gilt es dabei unbedingt zu beachten. Zum einen soll die Geometrie so wenig wie möglich beeinflusst oder verändert werden, damit die realistische Fahrzeugdarstellung durch den Versuchsstand erhalten bleibt. Zum anderen ist es äußerst wichtig die Sensoren mit Hilfe von Sicherheitseinrichtungen vor Überlastung zu schützen. Wie die nachfolgenden Kapitel zeigen, können beide Aspekte verwirklicht werden. Abbildung 4-8 zeigt den gesamten Versuchsstand mit integrierter Messtechnik sowie Sicherheitseinrichtungen. Für die detaillierte Beschreibung des gesamten Versuchsstandes wird auf die Diplomarbeiten von Martin und Roas (Martin, 2008; Roas, 2007) verwiesen.

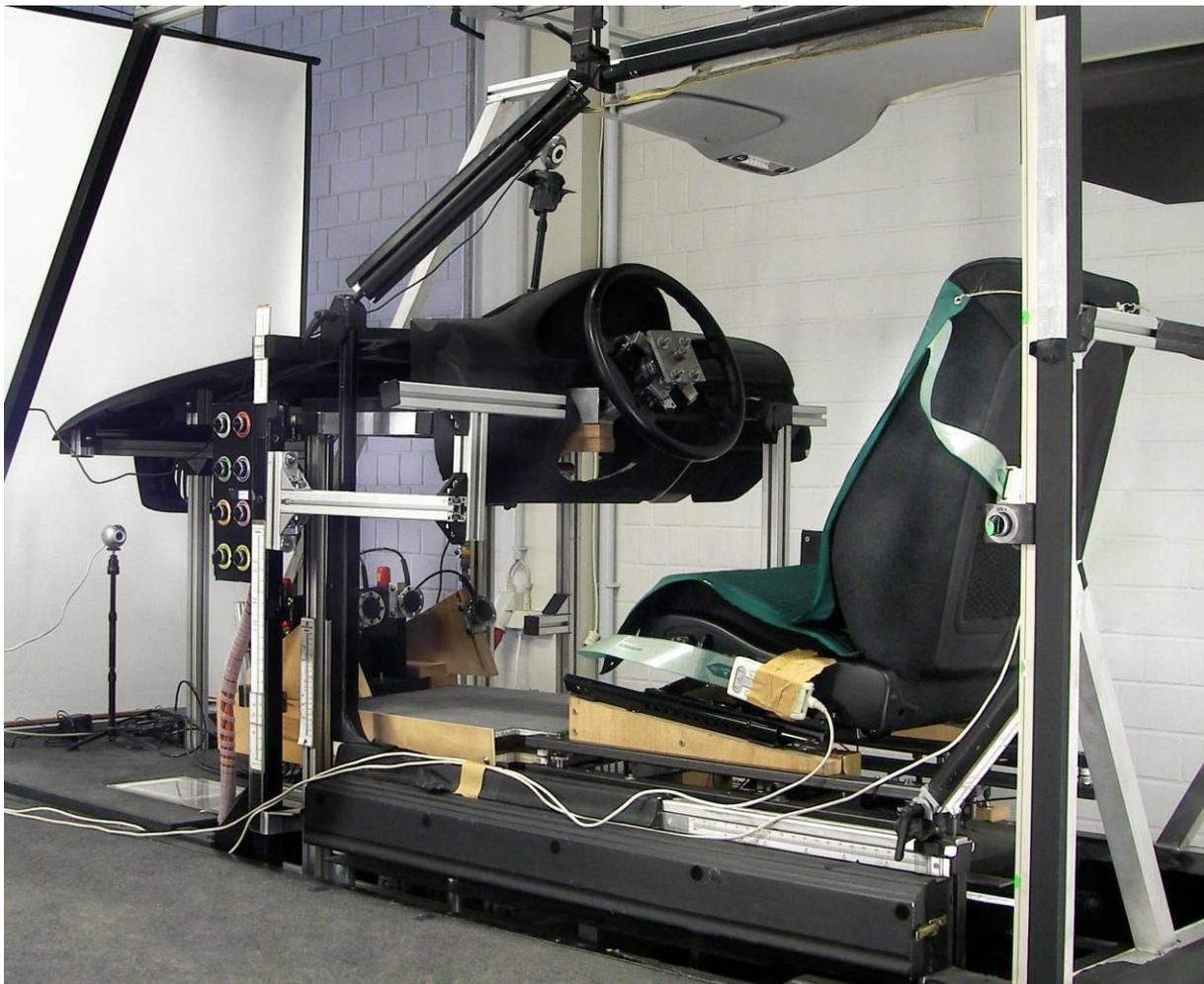


Abbildung 4-8 VEMO Gesamtdarstellung mit integrierter Messtechnik und Sicherheitseinrichtungen

Messung der Fußkräfte

Pedale und Fußstütze (Abbildung 4-9):

Die Pedalkraftsensoren sind anstelle der eigentlichen Pedale und der Fußstütze so positioniert, dass sie die Originalgeometrie der jeweiligen einzustellenden Fahrzeuge nicht verändern. Für die unterschiedlichen Fußgrößen der Versuchspersonen sind die Sensoren für Fußstütze und Fahrpedal zusätzlich durch Langlöcher verschiebbar gestaltet, da die mögliche Kontaktfläche dieser Elemente im Fahrzeug erheblich größer ist als die der Sensoren. Durch einfaches Ent- und Verriegeln von je zwei Flügelmuttern kann die Sensorhöhe angepasst werden. Bei Brems- und Kupplungspedal wird auf die Höhenanpassung verzichtet, da die Kontaktfläche der Sensoren ähnlich der Fläche von realen Pedalen ist und die Sensoren so eingebaut

werden, dass sie der realen, durchgedrückten Pedallage entsprechen. Eine Originalpedalerie, die zusätzlich einen realistischen Pedalweg erlaubt, kann aus Platzgründen nicht implementiert werden.

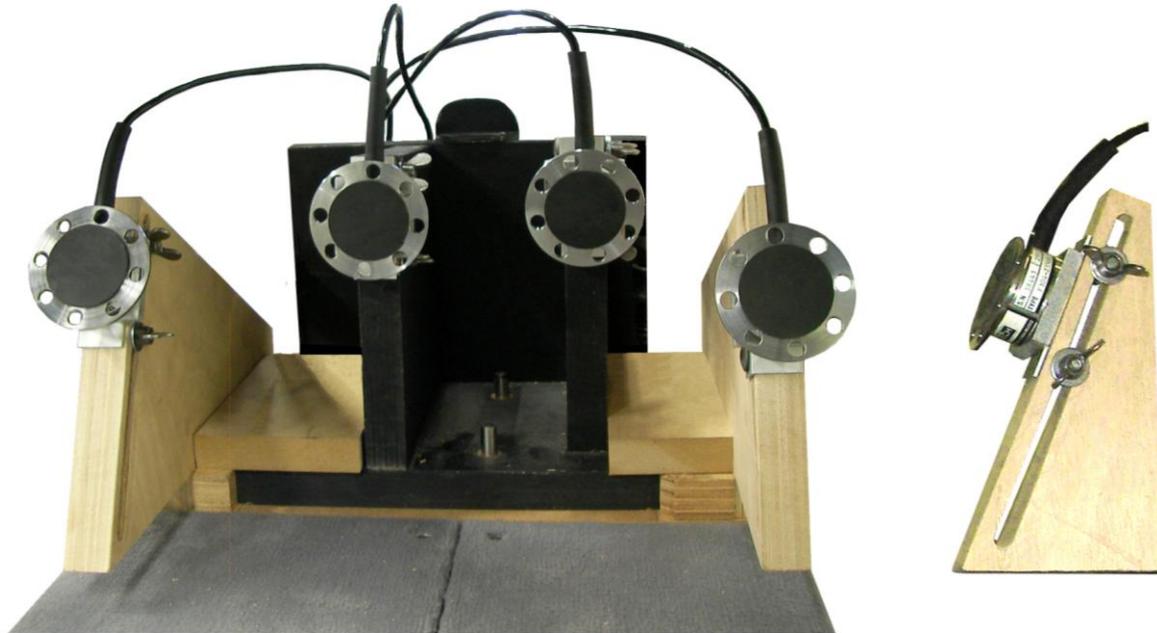


Abbildung 4-9 Pedalkraftsensoren und Darstellung des Verstellmechanismus

Fahrzeugboden (Abbildung 4-10):

Der Fahrzeugboden ist zweiteilig ausgeführt, so dass die Kräfte von linkem und rechtem Bein getrennt aufgenommen und ausgewertet werden können. Je Bodenplatte sind drei Sensoren in einer Dreiecksanordnung verbaut, wobei sich vorne bei den Pedalen zwei Sensoren und hinten ein Sensor befindet. Die Sensoren sind hängend an den Bodenplatten montiert und liegen auf einer Grundplatte auf ohne verschraubt zu werden. Dies ermöglicht ein einfaches Anheben oder Absenken der Bodenplatten mit Hilfe zweier umklappbarer Stützkeile, um die Sensoren bei Bedarf vor Überlastung schützen zu können. Gerade beim Ein- und Ausstiegsvorgang ist diese Sicherheitseinrichtung zwingend erforderlich, da die Sensoren nicht auf die dynamische Belastung dieser Bewegung ausgelegt sind. Für die Schaffung einer realitätsnahen Versuchsumgebung und zur Rutschhemmung werden die Bodenplatten mit Teppich beklebt.

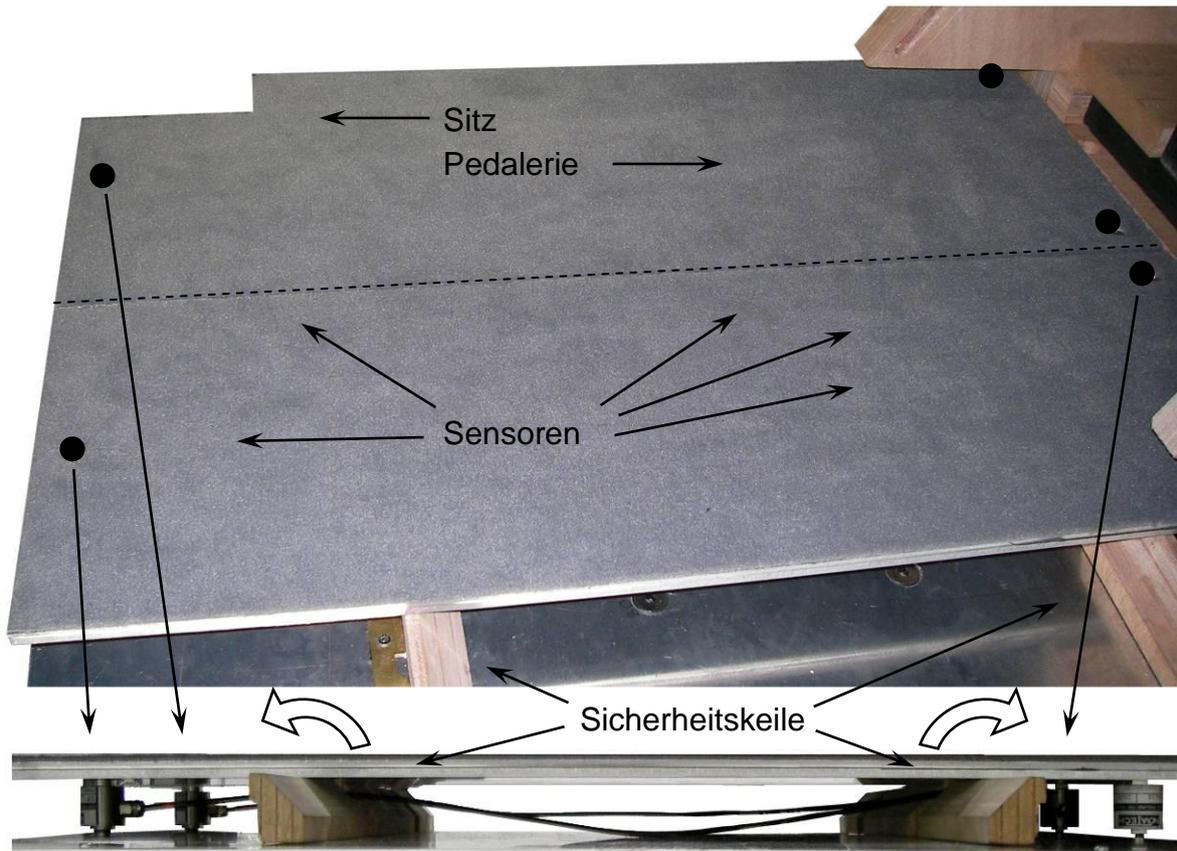


Abbildung 4-10 Darstellung der Bodenplatten mit Sensoren im unbelasteten Zustand

Messung der Sitzkräfte

Bei der Messung der Kontaktkräfte auf den Sitz sind zwei große Kontaktflächen zu berücksichtigen, Sitzfläche und Sitzlehne. Dazu werden drucksensitive Foliensensormatten verwendet, welche die Druck- und Kraftverteilung auf die Kontaktflächen auflösen. Mit der eingesetzten Software dieser Messmatten können Flächenschwerpunktlagen, Maximalkräfte und Summenkräfte aus den aufgenommenen Druckverteilungen gewonnen werden. Für die Validierung des RAMSIS-KHM ist die Ermittlung dieser Werte notwendig, um eine reale Haltungsberechnung zu ermöglichen, insbesondere zur Bestimmung der für die Simulation benötigten Kraftkoppelpunkte. Die Genauigkeit der absoluten Werte der Folienmatten hängt stark von der Kalibrierung ab, weshalb zusätzlich vier Kraftaufnehmer zur Messung der auf den Sitz übertragenen Gesamtkraft installiert werden. Diese sind an den Endpunkten der Vierkantrohre unterhalb der Sitzschienen hängend montiert (Abbildung 4-11), analog zu den Bodenplatten. Zur Vermeidung einer einseitigen

Belastung der Sensoren wird vor der Sensormontage die Schwerpunktlage des Sitzes untersucht und entsprechend berücksichtigt. Bei den ersten Ein- und Ausstiegsversuchen hat sich gezeigt, dass einzelne Sensoren, vor allem der linke vordere Sensor, nahe der Überlastung ist. Daher ist an dieser Stelle eine weitere Sicherheitseinrichtung unbedingt erforderlich. Hierzu werden die Vierkantrohre, zwischen denen sich die Sensoren befinden, mit Rändelmuttern versehen (Abbildung 4-11). Diese ermöglichen durch einfaches Drehen ein schnelles Absenken oder Anheben der Sensoren. Somit wird einer Überlastung der Kraftaufnehmer beim Ein- und Ausstiegsvorgang entgegengewirkt.



Abbildung 4-11 Sitzsensoren mit vergrößerter Darstellung der Sicherheitseinrichtung (Sensor unbelastet)

Messung der Armkräfte

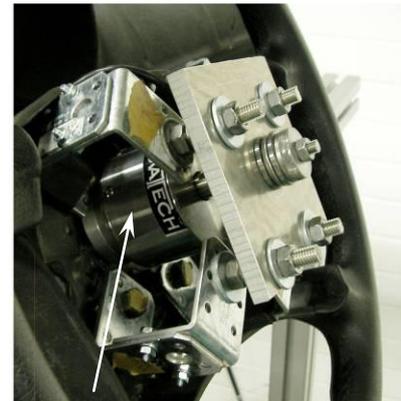
Die Implementierung von Sensoren zur Messung der Kraftübertragung auf das Lenkrad stellte während der Arbeit das schwierigste Problem dar. Da der Versuchsstand soweit wie möglich einem realen Fahrzeug entsprechen soll, sind die Erhaltung der Lenkradverstellung im Rahmen des Lenkradverstellfeldes sowie die Drehbarkeit des Lenkrades sicherzustellen. Zusätzlich müssen Messungen von Abstützkräften sowie resultierenden Kräften aus Verdrehungen des Oberkörpers, z. B. beim Rückwärtsfahren, gewährleistet sein. Die im Rahmen dieser Arbeit erarbeitete Lösung zur Kraftmessung am Lenkrad ist der Einbau eines 3-achsialen Kraftaufnehmers in den Pralltopf des Lenkrads (Abbildung 4-12). Mit dieser Lösung kann die Kraftübertragung nicht getrennt für beide Arme aufgenommen werden. Hierzu wäre ein Lenkradaufbau zu entwickeln, in welchem Kraftsensoren im Lenkradkranz integriert sind. Eine solche Lösung wurde aufgrund zu hoher Kosten und des erheblichen Zeitaufwandes verworfen.

Bei der Montage des Sensors müssen auftretende Biegemomente durch die Krafteinleitung am Lenkrad berücksichtigt werden. Diese Momente sind umso höher, je weiter der Sensorstift, welcher der Kraftmessung dient, von den Krafteinleitungspunkten entfernt ist. Da die maximal zulässigen Biegemomente nicht bekannt sind, ist es ratsam, diese so gering wie möglich zu halten. Das bedeutet für den speziellen Anwendungsfall, dass der Sensorstift in der Lenkradkranzebene liegen muss. Zur Sicherstellung der Drehbarkeit des Lenkrades wird der Sensor mit Hilfe von Axialkugellagern gelagert (Martin, 2008).

Auch hier haben erste Versuche gezeigt, dass eine Belastung des Lenkrades, wie sie beim Ein- und Aussteigen auftritt, unbedingt zu vermeiden ist, da der Sensor diese Belastung aufgrund der Messbereichsauslegung nicht aushält. Dies bedeutet, dass die Versuchspersonen beim Ein- und Aussteigen das Lenkrad nicht berühren dürfen, da die hierbei auftretenden hohen Momente, resultierend aus dem Körpergewicht und evtl. dynamischen Komponenten, den Sensor beschädigen können. Deshalb sind zusätzliche Halterungen links und rechts des Lenkrades montiert, die ein Abstützen der Versuchsperson ermöglichen und somit das Ein- und Aussteigen erleichtern (Abbildung 4-12).



Halterungen erleichtern
das Ein- und Aussteigen



Kraftaufnehmer

Abbildung 4-12 Lenkradapplikation mit vergrößerter Darstellung rechts und Halterungen für die Ein- und Ausstiegsbewegung

Neben den Kräften nimmt der 3-achsiale Kraftaufnehmer auch in geringem Maß auftretende Momente auf. Somit bestehen die resultierenden Messwerte aus einer Überlagerung von Kräften und Momenten. Letzt genannte müssen mit Hilfe von zu erstellenden Kalibrierkurven aus den Messwerten herausgerechnet werden, um die realen Kraftdaten auf das Lenkrad zu erhalten. Dafür wird das Lenkrad mechanisch in den drei Fahrzeugkoordinatenrichtungen mit unterschiedlichen Kräften und Winkeln definiert belastet, so dass die Höhe der real auftretenden Kraft mit dem Winkel gekoppelt ist. Die aufgenommenen Messwerte sind dabei höher als die realen Kräfte, da der Anteil der Momente mit eingeht. Über die Trigonometrie werden die Momente mit Hilfe eines erstellten Programms herausgerechnet und die tatsächlich anliegende Belastung bestimmt.

Dokumentation der Sitzhaltung

Der Versuchsstand weist eine gute Zugänglichkeit und geringe Sichtverdeckung auf. Beide Aspekte sind für die Dokumentation der Sitzhaltung notwendig. Diese erfolgt mittels zweidimensionaler Bildaufnahmen, welche später bei der Aufbereitung der Daten mit Hilfe der am Lehrstuhl für Ergonomie der TU München entwickelten

Software PCMAN in ein dreidimensionales digitales Abbild umgewandelt werden (Geuß, 1994; Seitz, 2002a; Seitz, 2002b). Dabei sind mindestens zwei unterschiedliche Perspektiven jedes Körperteils notwendig, wobei beachtet werden muss, dass diese möglichst orthogonal zueinander angeordnet sind. Da sich bei diesem Versuchsstand geringfügige Verdeckungen durch die Instrumententafel und dem Lenkrad ergeben, sind für die spätere Digitalisierung der Haltungen drei Kameraperspektiven notwendig (Abbildung 4-13).

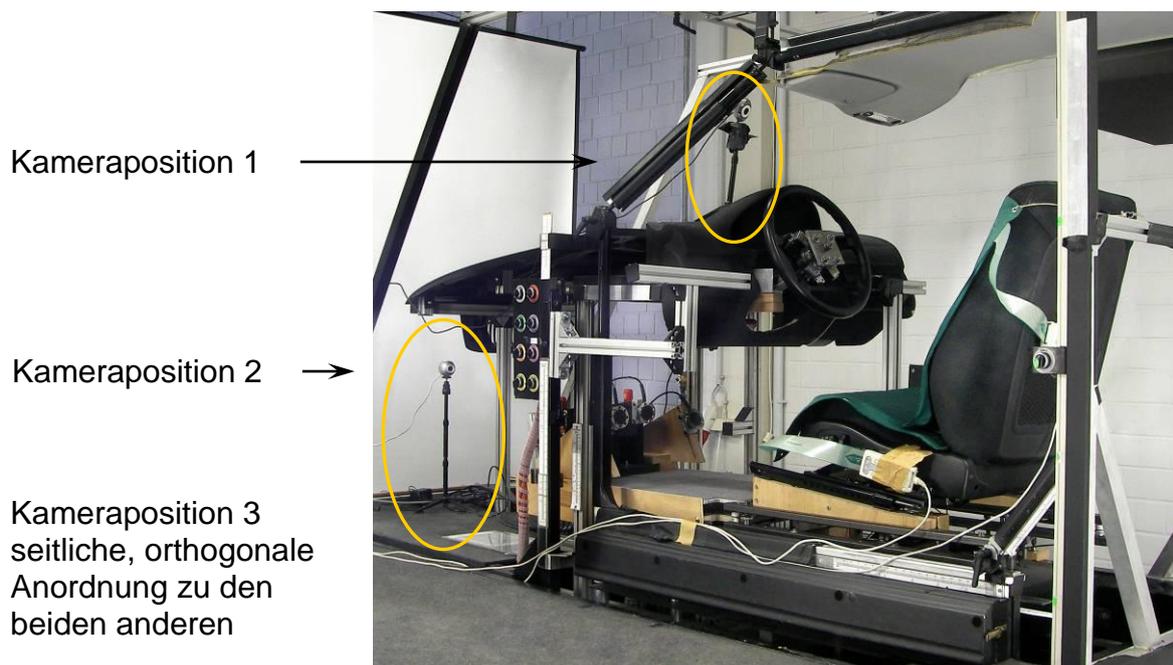


Abbildung 4-13 Kamerapositionen für die dreidimensionale Digitalisierung der Haltungen

Mit Kameraposition 1 wird die Versuchsperson von vorne oben aufgenommen, wobei der gesamte Oberkörper erfasst wird. Kameraposition 2 nimmt dagegen den gesamten Fußraum von vorne unten auf. Die dritte Kameraposition ist orthogonal zu den beiden anderen so angeordnet, dass sie die Versuchsperson von der Seite aufzeichnet. Bei der Positionierung der Kameras ist zusätzlich auf die Sichtbarkeit eines Kalibrierkörpers zu achten, damit dreidimensionale Haltungen aus zweidimensionalen Bildern gewonnen werden können. Dieser ist fest am VEMO integriert, wobei bestimmte, gut sichtbare Punkte des Versuchsstandes ausgewählt und vermessen werden. Für die Aufzeichnung der Haltungen kommen

handelsübliche Webcams zum Einsatz, deren Vorteile in der hohen Verfügbarkeit, der Handlichkeit und der geringen Baugröße bestehen.

4.1.4 Messwerterfassung und –verarbeitung

Die Messwerterfassung besteht aus dem CompactDAQ-Chassis mit den zwei Messmodulen der Firma National Instruments für die digitale Erfassung der analogen Sensorwerte. Zur Verarbeitung, Visualisierung und Speicherung der Messwerte ist aber zusätzlich ein Software Programm notwendig, welches auf die verwendete Hardware abgestimmt und eigenständig programmiert werden muss. Zum Einsatz kommt die grafische Programmiersprache LabView, welche ebenfalls von der Firma National Instruments stammt. Bei deren Anwendung ist eine uneingeschränkte Kompatibilität zwischen Hardware und Software gewährleistet. Nachfolgend sind die Anforderungen aufgelistet, welche an das eigens mit LabView programmierte Messdatenerfassungsprogramm (Roas, 2007) gestellt werden:

- Intuitive Bedienung des Programms
- Kontinuierliche, visuelle Darstellung der Sensorwerte
- Vollständige Erfassung und Speicherung aller Sensorwerte durch Betätigung lediglich eines Buttons – „One Click“-Lösung
- Implementierung einer optischen und akustischen Überlastwarnung für jeden Sensor
- Implementierung einer Tara-Funktion
- Automatische Erstellung eines Messprotokolls mit VP-Nummer, Mess-Nummer, Datum und Uhrzeit im Excel-Format (*.xls)

Das Messdatenerfassungsprogramm besteht aus einem Blockschaltbild, der eigentlichen Programmierung, und einem Frontpanel für die Visualisierung der Messwerte sowie für die Bedienung der Messsoftware. Zusätzlich bietet das Frontpanel mit den Reitern „weitere Werte“ und „Einstellungen“ Funktionen, wie z. B. die Eingabe von Grenzwerten für die Überlastwarnung. Diese wird durch eine Lampe dargestellt und ist für jeden Sensor einzeln verwirklicht. Kommt der Messwert in einen kritischen Bereich, so ändert sich die Farbe von grün auf rot und bei weiterer

Belastung ertönt ein zusätzliches akustisches Warnsignal. Abbildung 4-14 zeigt anhand des Ausschnitts der Pedalkraftsensoren die Verwirklichung des Messdatenerfassungsprogramms. Zu sehen sind die vier Pedalkraftsensoren mit ihren jeweiligen Messbereichen, dargestellt als Balkenanzeige, die sich je nach Belastung ändert. Zusätzlich werden die Messwerte in Newton und Kilogramm angezeigt. Weiterhin ist die grüne Lampe zur Überlastwarnung für jeden Sensor sichtbar.

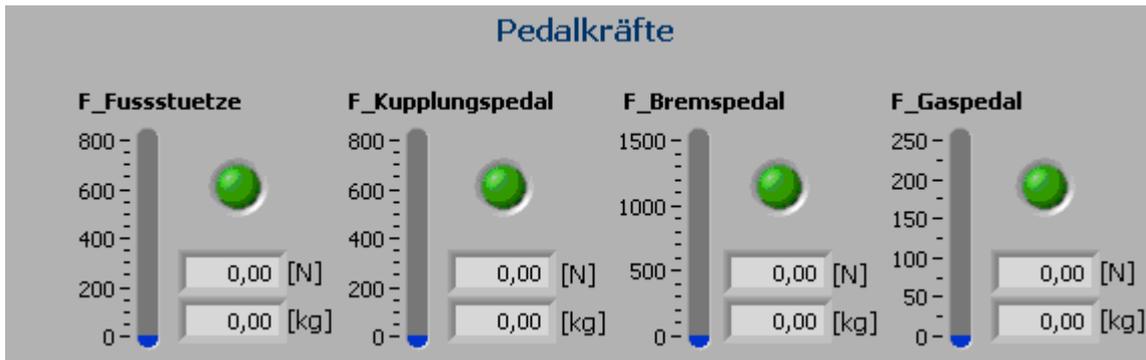


Abbildung 4-14 Auszug des Frontpanel des Messdatenerfassungsprogramm

Die Messdauer beträgt 0,2s, wobei die Speicherung der Messwerte automatisch auf Knopfdruck erfolgt. Dabei werden 1000 Werte bei einer Abtastrate von 5kHz gemittelt ausgegeben, um Spitzenwerte, so genannte Peaks, hervorgerufen durch „dynamische“ Effekte wie Herzschlag, Atmung oder andere Muskelkontraktionen, zu glätten.

Die „One Click“-Lösung ist nur teilweise realisiert. Das Software Programm der Folienmessmatten wie auch die drei Kameras zur Dokumentation der Sitzhaltung konnten nicht in das LabView Programm integriert werden und sind somit zusätzlich auszulösen. Mit Hilfe des Programms Active WebCam erfolgt die automatische Speicherung der Fotos für die Dokumentation der Sitzhaltungen durch einen Klick. Auch die Aufnahme der Folienmessmatten wird mit einem zusätzlichen Klick gestartet und endet automatisch nach der Aufnahme der vorher eingestellten Anzahl von Frames. Das gesamte Messintervall beläuft sich daher auf maximal zwei Sekunden.

4.2 Versuchspersonenkollektiv

Das Versuchspersonenkollektiv besteht aus 44 Versuchspersonen, eingeteilt in drei Versuchsgruppen:

- 5. Perzentil Körperhöhe weiblich
- 50. Perzentil Körperhöhe männlich
- 95. Perzentil Körperhöhe männlich.

Jede dieser Gruppe umfasst zwischen 12 und 16 VPs. In Form eines Fragebogens (Anhang A – Fragebogen) werden Angaben zur Person, Fahrgewohnheiten, Befinden und Trainiertheit abgefragt. Detaillierte Auswertungen dazu befinden sich in der Diplomarbeit von Reindl (Reindl, 2009). Für einen Überblick sind in Tabelle 4-1 die wichtigsten Daten der Versuchspersonen zusammenfassend dargestellt.

Die Versuchspersonen wurden bezüglich ihrer Körperhöhe statistisch untersucht. Mit Hilfe von Abbildung 5-1 kam beim Vergleich des 5. und 50. Perzentils sowie zwischen 50. und 95. Perzentils ein U-Test zur Anwendung, zwischen dem 5. und 95. Perzentils ein t-Test. Ergebnis dieser statistischen Untersuchung ist ein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchspersonengruppen mit einem jeweiligen α -Fehler=0,000 bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% (Bortz, 2005; vgl. Kapitel 5.1). Aufgrund der entsprechenden Auswahl der Versuchspersonen hinsichtlich ihrer Körpergröße bekräftigt das Ergebnis den Erwartungswert.

Tabelle 4-1 Zusammenfassende Darstellung der wichtigsten Versuchspersonendaten

	5. Perzentil Körperhöhe ♀	50. Perzentil Körperhöhe ♂	95. Perzentil Körperhöhe ♂
Versuchspersonenanzahl	16	16	12
Körperhöhe \bar{x} [m]	1,56	1,78	1,89
Gewicht \bar{x} [kg]	56	80	85
Altersspanne [Jahre]	18-56	30-56	20-48
Alter \bar{x} [Jahre]	33	42	35
Rechtshänder [%]	87,5	93,75	75
Linkshänder [%]	6,25	6,25	16,67
Beidhändig [%]	6,25	0	8,33
Führerscheinbesitz \bar{x} [Jahre]	15	24	18
BMW Fahrertraining absolviert? [%]	62,5	87,5	75
wöchentliche Fahrzeit \bar{x} [Std.]	8,6	10,8	12,8
Sportliche Betätigung: Anzahl der VPs [%]	87,5	87,5	100
Sportliche Betätigung: Stunden pro Woche \bar{x}	4	3,4	3,8

4.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche umfassten die Beobachtung menschlicher Haltungen von den genannten 44 VPs. Jede Versuchsperson durchlief das gleiche Szenario: acht verschiedene Haltungen in jeweils drei unterschiedlichen Fahrzeugen. Diese sind ein BMW Z4 (Modelljahr 2002), BMW 3er (Modelljahr 2004), BMW 7er (Modelljahr 2001). Die hier verwendeten Fahrzeuggeometrien konnten nach dem Einbau der erforderlichen Sensoren für die Kraftmessung am VEMO gut eingestellt werden. Höhere Sitzpositionen, wie sie z. B. in einem SUV auftreten, waren nach der Montage nicht mehr darstellbar, da die Verstellwege des VEMO begrenzt sind.

Die Versuche beinhalteten zwei Wiederholungsversuche, weshalb pro VP drei Versuchstage notwendig waren. Die acht verschiedenen Haltungen setzen sich aus drei vorgegebenen Lehnenwinkeln, eine durch die VP selbst individuell eingestellte Fahrerhaltung, einer Kupplungs- und einer Bremshaltung, der Simulation einer Rückwärtsfahrt sowie dem Ziehen der Handbremse zusammen. Für die Vergleichbarkeit zwischen den VPs sowie der späteren Simulation mit dem RAMSIS-KHM werden die VPs so angeleitet, dass die Füße auf den jeweiligen zu einer Haltung gehörenden Pedalen liegen, bzw. diese treten und die Hände am Lenkrad auf der drei bzw. neun Uhr Position verweilen. Außerdem sollten die VPs entspannt und ruhig im Versuchsstand sitzen, damit die dabei wirkenden Kräfte fehlerfrei aufgenommen werden konnten. Bei jeder eingenommenen Haltung wird, neben den Fotos für die Haltungsdokumentation und der Messung der Kräfte, auch der Gesamtdiskomfort mit Hilfe der von Hartung modifizierte CP50 Skala (Hartung, 2006) abgefragt. Dadurch ist es möglich die Diskomfortwerte aus der Simulation mit der Realität zu vergleichen (Reindl, 2009).

Die drei Versuchstermine setzten sich wie folgt zusammen:

1. Tag:

Aufnahme aller acht Haltungen in den drei Fahrzeugen + jeweils eine Wiederholung der individuell eingestellten Fahrerhaltung sowie der Rückwärtsfahrt und dem Ziehen der Handbremse in allen drei Fahrzeugen.

2. Tag:

Wiederholung von Tag 1.

3. Tag:

Aufnahme der individuell eingestellten Fahrerhaltung sowie der Rückwärtsfahrt und dem Ziehen der Handbremse in allen drei Fahrzeugen + ein Wiederholungsdurchgang.

Es existieren demnach für annähernd jede Person (drei Personen sind nicht zu den Terminen zwei und drei erschienen) folgende Anzahl an Haltungen:

1. – 3. Haltung – drei vorgegebene Lehneneinstellungen:

$$3 \text{ Winkeleinstellungen} \times 3 \text{ Fahrzeuge} \times 2 \text{ Termine} = 18 \text{ Haltungen}$$

4. Haltung – individuell eingestellte Fahrerhaltung:

$$3 \text{ Fahrzeuge} \times 2 \text{ Wiederholungen} \times 3 \text{ Termine} = 18 \text{ Haltungen}$$

5. Haltung – Kupplungshaltung:

$$3 \text{ Fahrzeuge} \times 2 \text{ Termine} = 6 \text{ Haltungen}$$

6. Haltung – Bremshaltung :

$$3 \text{ Fahrzeuge} \times 2 \text{ Termine} = 6 \text{ Haltungen}$$

7. Haltung – Rückwärtsfahrt:

$$3 \text{ Fahrzeuge} \times 2 \text{ Wiederholungen} \times 3 \text{ Termine} = 18 \text{ Haltungen}$$

8. Haltung – Ziehen der Handbremse:

$$3 \text{ Fahrzeuge} \times 2 \text{ Wiederholungen} \times 3 \text{ Termine} = 18 \text{ Haltungen}$$

Es ergeben sich somit für jede VP 84 Haltungen, die für die Validierung des RAMSIS-KHM zur Verfügung stehen. Die komplette Ausnutzung dieser enormen Datenmenge von insgesamt ca. 3500 Haltungen, ist im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht zu bewältigen. Deshalb wird die Auswertung auf drei Haltungen eingegrenzt, die individuell eingestellte Fahrerhaltung sowie die Kupplungs- und Bremshaltung.

In die Validierung nicht mit einbezogen werden demnach die Haltungen mit den vorgegebenen Lehneneinstellungen, da für die Validierung des RAMSIS-KHM die individuell eingestellte Fahrerhaltung wichtiger ist, anstatt erzwungene Haltungen. Bei der Rückwärtsfahrt gab es Qualitätsdefizite bei den Haltungsanpassungen mit PCMAN durch Verdeckungen der Hüfte während der Versuche. Durch den begrenzten zeitlichen Rahmen der Arbeit wird das Ziehen der Handbremse zurückgestellt.

Die Auswertung der für die Validierung des RAMSIS-KHM ausgewählten Haltungen ist dem nachfolgenden Kapitel zu entnehmen.

5 Auswertung und Analyse der Ergebnisse

Wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt, können aus Zeitgründen nicht alle Haltungen für die Auswertung berücksichtigt werden. Die Validierung des RAMSIS-KHM findet daher unter Betrachtung der individuell eingestellten Fahrerhaltung sowie der Kupplungs- und Bremshaltung statt.

Die Auswertung beinhaltet für die individuell eingestellte Fahrerhaltung alle während der Versuche beobachteten Haltungen. Somit stehen als Vergleichsbasis ca. 740 Fahrerhaltungen zur Verfügung (drei Versuchspersonen sind nicht zu Termin zwei und drei erschienen, eine geringfügige Anzahl an Haltungen konnte wegen fehlender Bilder nicht digitalisiert werden). Aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes der Haltungsanpassung mit PCMAN, gehen in die Auswertung für die Kupplungs- und Bremshaltungen im Vergleich zur Fahrerhaltung jeweils 81 Haltungen ein. Diese setzen sich zusammen aus einer zufälligen Auswahl von neun Versuchspersonen für jede Perzentilgruppe mit jeweils einer Haltung pro Fahrzeug.

Alle für die Auswertung relevanten Haltungen werden mit PCMAN angepasst, so dass die jeweilige Haltung als Vergleich für die Simulation in RAMSIS dient. Gelenkwinkel, Sitzpositionen im Sitzverstellfeld, Augpunktlagen sowie die Schnittstellenkräfte werden zwischen Realität und RAMSIS-KHM sowie zwischen Realität und RAMSIS-WM verglichen. Abschließend wird herausgestellt, wo das RAMSIS-KHM gute bzw. schlechte Ergebnisse liefert.

5.1 Statistische Methoden

In der Statistik werden die deskriptive Statistik und die Inferenzstatistik unterschieden. Erst genannte wird dazu verwendet, um vorhandene bzw. empirisch erhobene Messdaten mit statistischen Methoden in Form von Grafiken, Tabellen oder einzelnen Kennwerten zu beschreiben. Kennwerte sind dabei unter anderem Maße der zentralen Tendenz (z. B. Medianwert oder arithmetischer Mittelwert) und Dispersionsmaße (z. B. Perzentile oder Standardabweichung). Bei der Inferenzstatistik dagegen wird die Überprüfung von Hypothesen ermöglicht. Diese müssen vor einer statistischen Auswertung entsprechend aufgestellt und formuliert werden.

Dabei wird die zu überprüfende Hypothese, auch Alternativhypothese H_1 genannt, und eine Nullhypothese H_0 aufgestellt. Die Überprüfung der Hypothese H_1 wird indirekt so ausgeführt, dass geprüft wird, ob eine Stichprobe die Nullhypothese stützt oder nicht.

Die Nullhypothese geht davon aus, dass zwischen zwei Stichproben kein Unterschied vorhanden ist, bei der Alternativhypothese dagegen wird von einem Unterschied ausgegangen. Mathematisch sieht die Formulierung der beiden Hypothesen folgendermaßen aus:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

wobei μ_1 den Mittelwert der ersten Stichprobe und μ_2 den Mittelwert der zweiten Stichprobe darstellen.

Bei der Entscheidung welche Hypothese angenommen wird, können zwei unterschiedliche Fehler gemacht werden. Wird die Nullhypothese irrtümlich verworfen, obwohl sie richtig ist und somit die Alternativhypothese angenommen, begeht man den α -Fehler oder Fehler 1. Art. Wird dagegen die Alternativhypothese zu Gunsten der Nullhypothese abgelehnt, obwohl sie richtig ist, wird der β -Fehler oder Fehler 2. Art begangen. Ob die Nullhypothese zu Gunsten der Alternativhypothese abgelehnt werden kann oder nicht, entscheidet die Höhe des α -Fehlers, auch Irrtumswahrscheinlichkeit genannt. Diese gibt einen Grenzwert an und wird als Signifikanzniveau bezeichnet. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Signifikanzniveau auf 5% festgelegt. Ist der P-Wert kleiner oder gleich 5%, so wird die Alternativhypothese angenommen und es existiert ein signifikantes Ergebnis. Ist der Wert kleiner als 1% ist ein hochsignifikantes Ergebnis vorhanden, bei Unterschreitung von 0,1% wird von einem höchstsignifikanten Ergebnis gesprochen. Ist der errechnete P-Wert jedoch größer als 5%, darf nicht ohne weiteres die Alternativhypothese zu Gunsten der Nullhypothese verworfen werden. Erst bei einem α -Fehler größer als 20% ist die Nullhypothese anzunehmen (Bortz, 2005), dabei existiert dann das Risiko eines β -Fehlers. Liegt der P-Wert zwischen 5% und 20% können weder die Nullhypothese noch die Alternativhypothese angenommen oder abgelehnt werden. Somit sind in diesen Fällen keine statistischen Aussagen möglich.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst geprüft, ob die jeweils zu untersuchenden Stichproben abhängig oder unabhängig sind. Anschließend wird getestet, ob es sich bei den Stichproben jeweils um eine Normalverteilung handelt oder nicht. Dies geschieht mit Hilfe des Anderson-Darling-Tests, welcher ein Kolmogorov-Smirnov-Test mit genauerer Betrachtung der Randbereiche (Duller, 2008; www.itl.nist.gov/div898/handbook/) ist. Existiert dabei eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung, wird bei abhängigen Stichproben der Wilcoxon Test und bei unabhängigen Stichproben der U-Test von Mann-Whithney angewendet (Bortz, 2005). Ist dagegen die Normalverteilung beider Stichproben bestätigt, wird bei abhängigen Stichproben der t-Test verwendet, bei unabhängigen Stichproben kommt bei Varianzhomogenität (wird geprüft mit F-Test) ebenfalls der t-Test, ansonsten der Welch-Test zur Anwendung (Sachs, 1993; Bortz, 2005). In Abbildung 5-1 ist das Flussdiagramm für die Entscheidung, welcher Test angewendet wird grafisch dargestellt.

Bei den verwendeten Verfahren werden zweiseitige Tests den einseitigen vorgezogen, da nicht auf entsprechendes Vorwissen aus anderen Versuchen zurückgegriffen werden kann.

Die grafische Aufbereitung der erhobenen Daten der realen Gelenkwinkel erfolgt mit Hilfe von Histogrammen. Dabei wird vorab festgelegt, in wie viele Klassen k die jeweiligen Daten eingeteilt werden, wobei „entsprechend dem Umfang n der Stichprobe etwa 7 bis 20 Klassen mit gleicher Klassenbreite“ gebildet werden (Sachs, 1993, S. 31). Die Ermittlung der Klassenanzahl erfolgt mit folgender Formel:

$$k \approx 1 + 3,3 \lg n \text{ (Sachs, 1993).}$$

Bei der Darstellung der Histogramme werden jeweils die absoluten Häufigkeiten angezeigt. Aus diesen Grafiken ist neben dem statistischen Test auf Normalverteilung ebenfalls erkennbar, ob die Stichprobe einer Normalverteilung entspricht oder nicht.

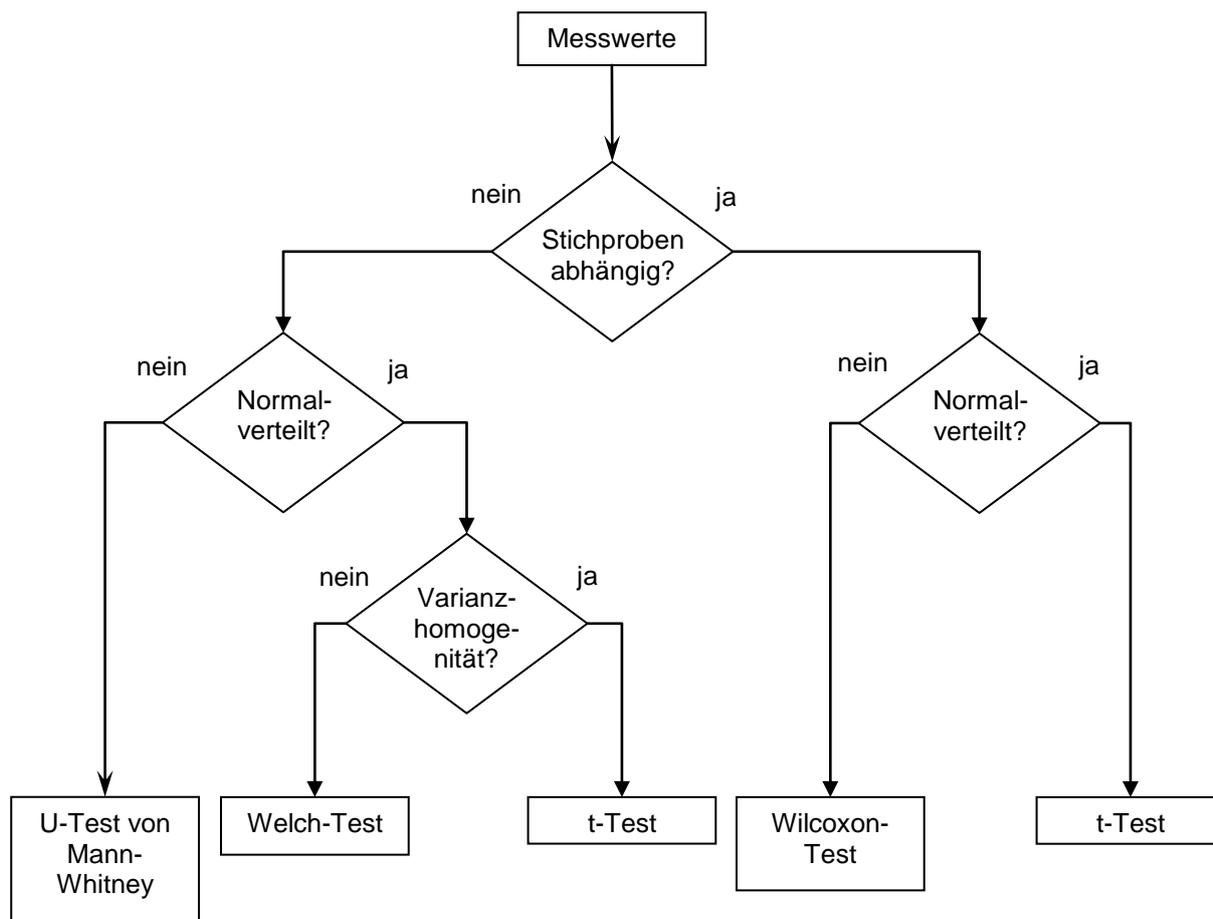


Abbildung 5-1 Flussdiagramm über die Entscheidung zur Auswahl der statistischen Tests

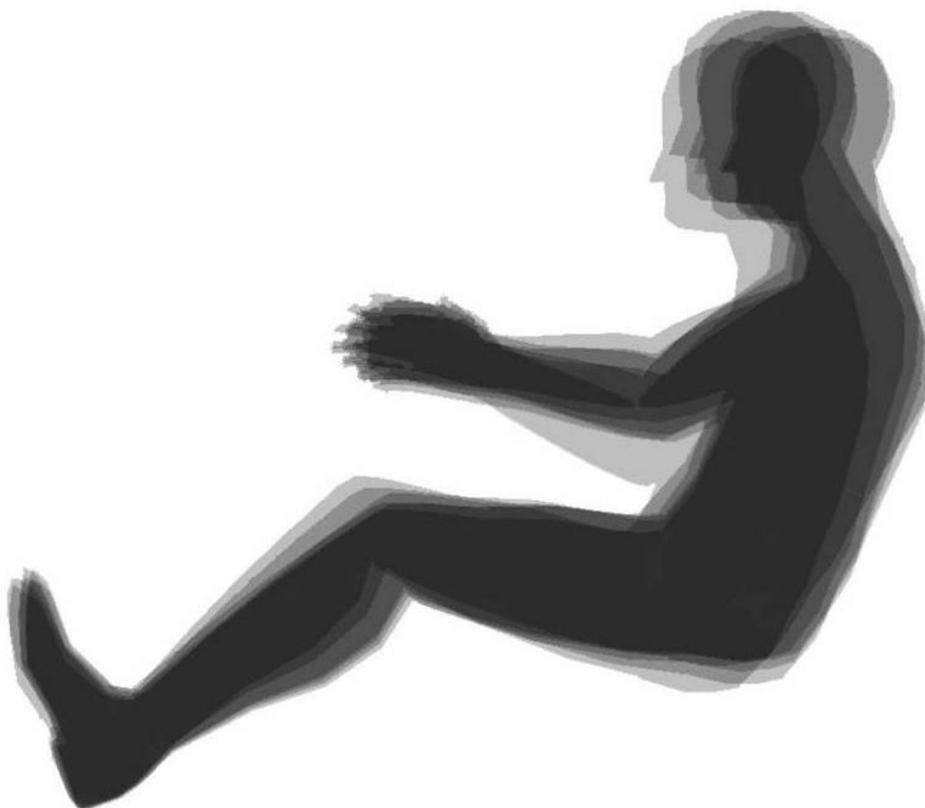
5.2 Auswertung der realen Haltungen

Die realen Haltungen werden nachfolgend hinsichtlich der Kriterien Gelenkwinkelstreuung, Lage der H-Punkte im Sitzverstellfeld (SVF), Position des Lenkrades im Lenkradverstellfeld (LFV), Lage der Augpunkte sowie der auftretenden Schnittstellenkräfte analysiert.

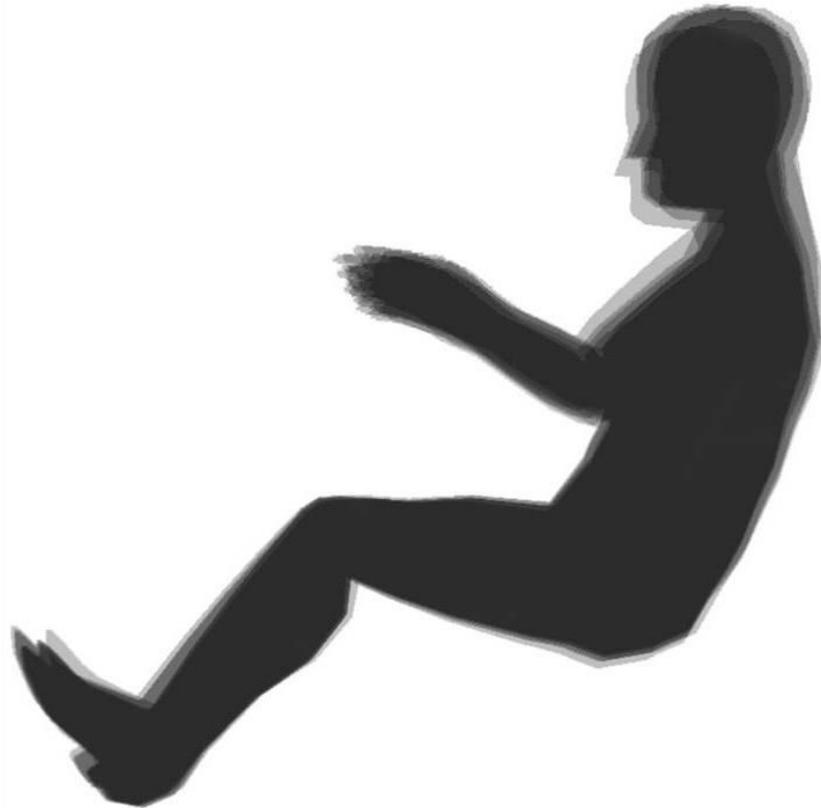
5.2.1 Gelenkwinkelanalyse

Bei Untersuchungen mehrerer Haltungen einer Person sowie innerhalb einer Versuchsgruppe, ergeben sich Gelenkwinkelstrebereiche einerseits aus der Eigenstreuung jeder Versuchsperson (intraindividuell) und andererseits aus den Streuungen innerhalb einer Gruppe (interindividuell).

Individuelle Vorlieben z. B., aber auch Tagesform und empfundener Komfort bzw. Diskomfort spielen bei der Eigenstreuung eine Rolle. Dabei ergeben sich unterschiedlich starke Streuungen zwischen den Personen. Beispielhaft dazu ist in Abbildung 5-2 eine große Eigenstreuung eines Mannes des 50. Perzentils im 3er BMW und in Abbildung 5-3 eine geringe Eigenstreuung einer Frau des 5. Perzentils ebenfalls im 3er BMW dargestellt. Gut erkennbar sind die großen Unterschiede bei den Streubreiten.



*Abbildung 5-2 Beispiel einer großen Eigenstreuung;
Mann, 50. Perzentil, 3er BMW*



*Abbildung 5-3 Beispiel einer geringen Eigenstreuung;
Frau, 5. Perzentil, 3er BMW*

Da die Analyse der Streuung jedes einzelnen Gelenkwinkels, mit bis zu drei Freiheitsgraden, zu aufwendig ist, werden sieben Winkel für die Untersuchung festgelegt, welche eine Haltung sehr gut charakterisieren:

- Torsowinkel
- Ellenbogenwinkel links/rechts
- Hüftwinkel links/rechts
- Kniewinkel links/rechts.

Die ausgewählten Winkel stimmen mit den RAMSIS Gelenkwinkeln bei Beinen und Armen mit dem y-Freiheitsgrad und bei der Hüfte mit dem z-Freiheitsgrad überein. In Abbildung 5-4 sind die zur Analyse verwendeten Winkel mit ihren jeweils maximal möglichen Bewegungsbereichen dargestellt.

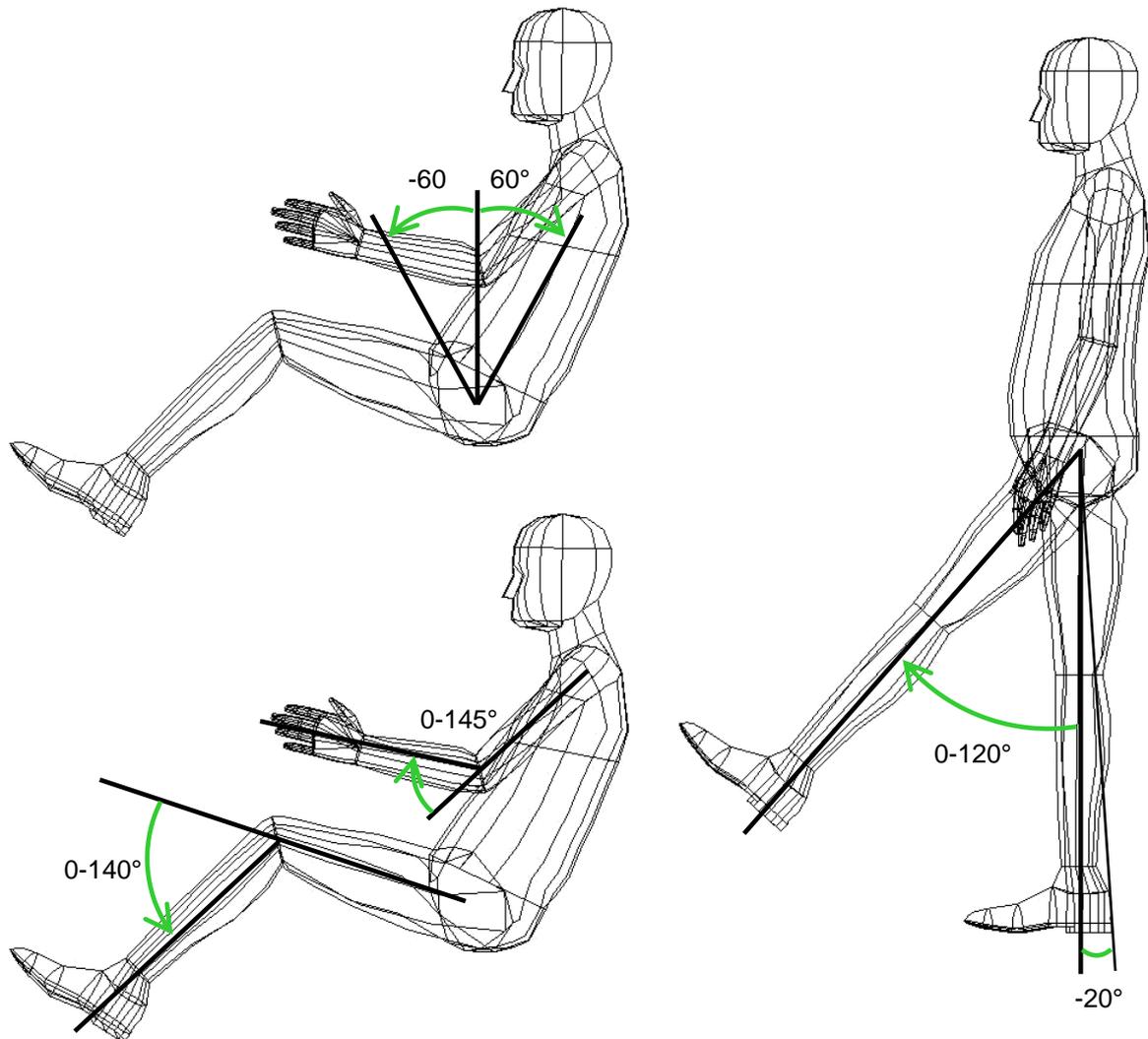


Abbildung 5-4 oben links: Torsowinkel
 unten links: Ellenbogen und Kniewinkel (y-Freiheitsgrad)
 rechts: Hüftwinkel (z-Freiheitsgrad)

Alle pro Versuchspersonengruppe und Fahrzeug gemittelten Werte der untersuchten Gelenkwinkel sind mit der Standardabweichung den Tabellen in Anhang B – Reale Gelenkwinkel – zu entnehmen. Vor der Interpretation der jeweiligen Gelenkwinkel werden die Daten auf signifikante Abhängigkeiten mit Hilfe statistischer Methoden, welche mit Hilfe des Flussdiagramms aus Abbildung 5-1 ausgewählt werden, überprüft. Die Stichprobenumfänge der jeweiligen Versuchspersonengruppe in den verschiedenen Fahrzeugen sind für die drei untersuchten Haltungen Tabelle 5-1 zu entnehmen.

Tabelle 5-1 *Stichprobenumfänge der realen Gelenkwinkel*

		Fahrerhaltung	Bremshaltung	Kupplungshaltung
BMW Z4	5. Perzentil	96	9	9
	50. Perzentil	81	9	9
	95. Perzentil	72	9	9
BMW 3er	5. Perzentil	95	9	9
	50. Perzentil	81	9	9
	95. Perzentil	70	9	9
BMW 7er	5. Perzentil	96	9	9
	50. Perzentil	81	9	9
	95. Perzentil	71	9	9

Torsowinkel

Die Daten für den Torsowinkel zeigen, dass die Versuchspersonen der Gruppe des 50. Perzentils männlich bei allen drei Haltungen flacher sitzen als die übrigen VPs. Signifikante Unterschiede ergeben sich jedoch nur für die Fahrerhaltung. Insbesondere zwischen dem 5. und 50. Perzentil und zwischen dem 50. und 95. Perzentil (Tabelle 5-2). Zwischen den Fahrzeugen ergibt sich lediglich beim 50. Perzentil zwischen dem BMW 3er und dem BMW Z4 ein signifikanter Unterschied. Keinerlei Signifikanzen können zwischen dem 5. und 95. Perzentil wie auch für die Kupplungs- und Bremshaltung nachgewiesen werden.

Tabelle 5-2 *Darstellung signifikanter Unterschiede beim Torsowinkel für die Fahrerhaltung*

Paarvergleiche: Fahrerhaltung / Torsowinkel						
	BMW Z4		BMW 3er	BMW 7er		50. Perzentil
	5P-50P	50P-95P	50P-95P	5P-50P	50P-95P	3er-Z4
Test	U-Test	t-Test	U-Test	U-Test	t-Test	t-Test
α -Fehler	0,0034	0,0002	0,0071	0,0464	0,006	0,037

Die gemittelten Winkel für den Torso (Anhang B – Reale Gelenkwinkel) liegen, unabhängig von Fahrzeug und Haltung, in einem sehr engen Bereich, zwischen 23° und 26°. Das bedeutet, dass bei den betrachteten Fahrzeugcharakteren lediglich geringe Differenzen auftreten, welche bis auf den Vergleich zwischen dem BMW 3er und dem BMW Z4 beim 50. Perzentil für die Fahrerhaltung keine signifikanten Unterschiede aufweisen (Tabelle 5-2).

Tendenziell weist die Lage des Torsos bei Betätigung der Kupplung oder Bremse kleinere Werte auf, was bedeutet, dass die Haltung aufrechter wird. Signifikante Unterschiede konnten für diese Haltungen jedoch nicht nachgewiesen werden.

Anhand der erhobenen Daten werden Histogramme erstellt, welche die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Winkelgröße anzeigen. In Abbildung 5-5 bis Abbildung 5-7 sind dazu beispielhaft die Häufigkeitsverteilung des Torsowinkels über die drei Versuchsgruppen in einem BMW 3er für die individuell eingestellte Fahrerhaltung dargestellt. Gut erkennbar ist die größere Streuung der kleinen Frauen. Auch die vorhandene Normalverteilung des 50. Perzentils (Abbildung 5-6) ist deutlich zu erkennen (α -Fehler=0,797).

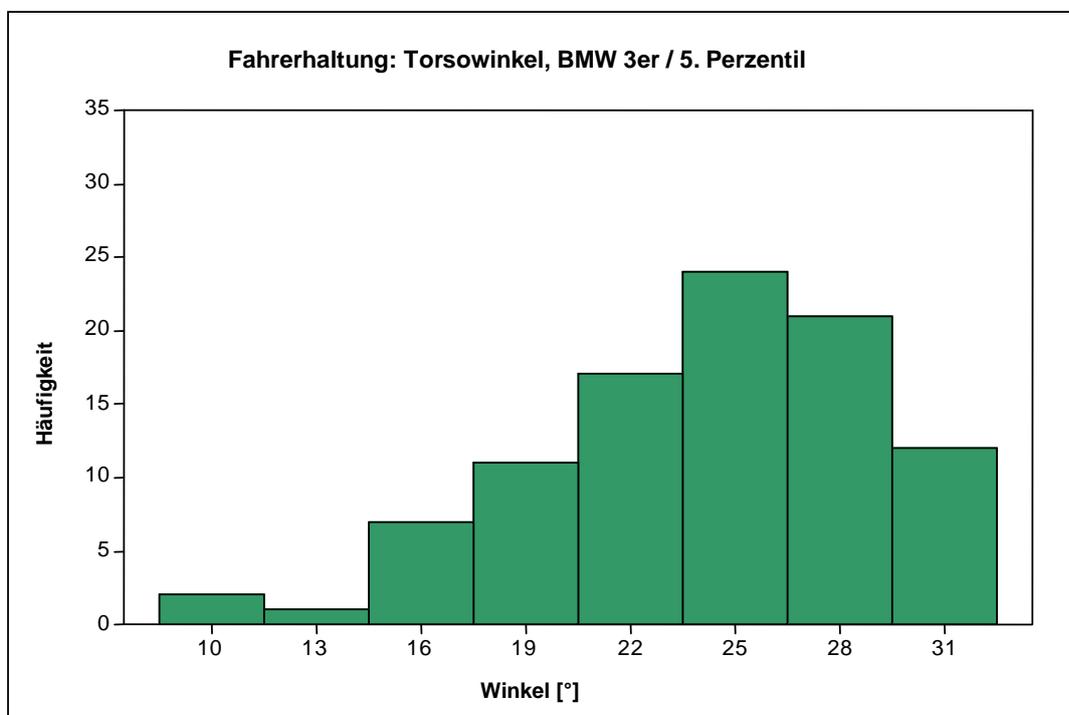


Abbildung 5-5 Absolute Häufigkeiten des Torsowinkels des 5. Perzentils im BMW 3er

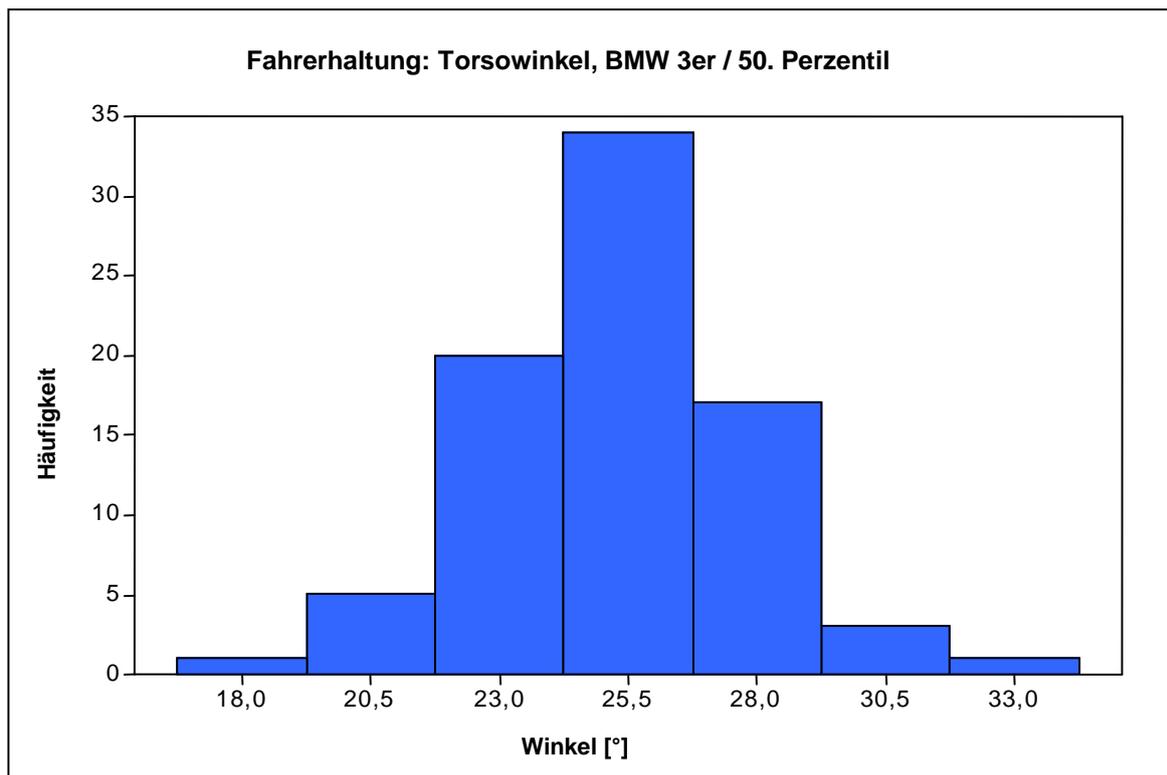


Abbildung 5-6 Absolute Häufigkeiten des Torsowinkels des 50. Perzentils im BMW 3er

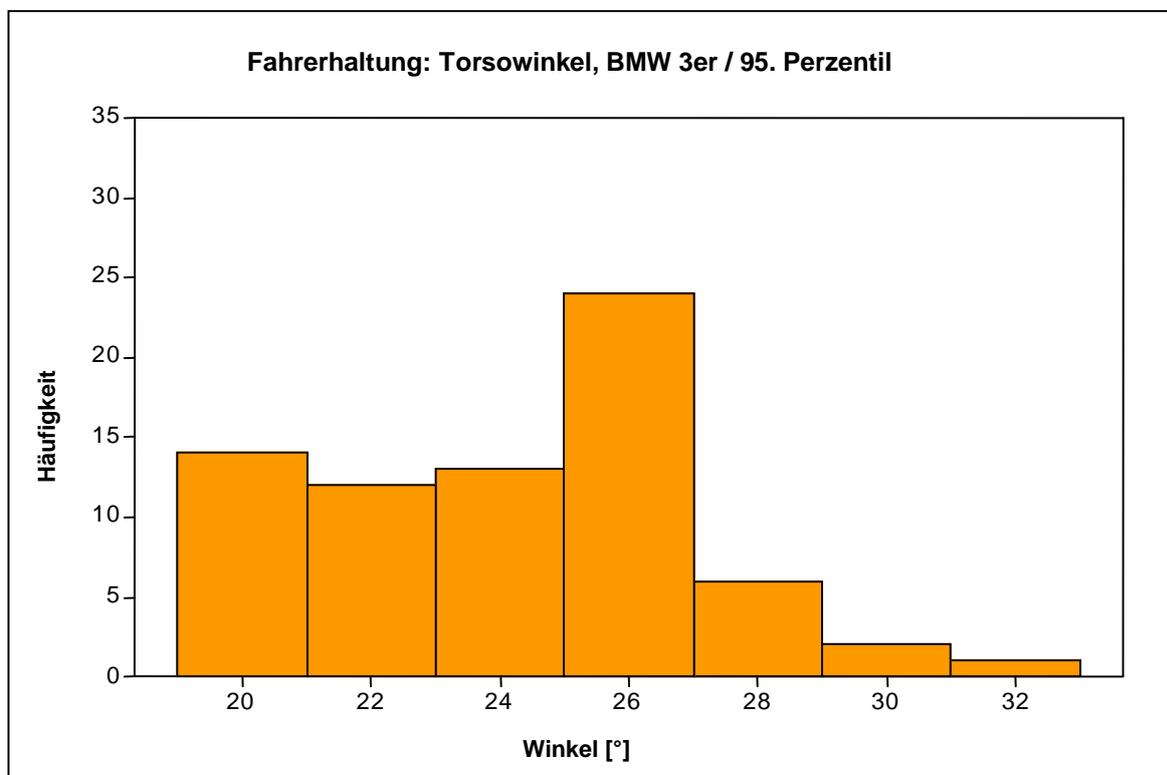


Abbildung 5-7 Absolute Häufigkeiten des Torsowinkels des 95. Perzentils im BMW 3er

Ellenbogenwinkel

Bei den Ellenbogenwinkeln tritt die größte Streuung auf, mit Werten für die Standardabweichung von ca. 12-16° bei der Fahrerhaltung (vgl. Anhang B – Reale Gelenkwinkel). Die Werte der anderen Haltungen liegen etwas darunter.

Bei den kleinen Frauen ergeben sich im Gegensatz zu den Männern höhere Werte für den Ellenbogenwinkel, d.h. die Arme sind bei dieser Versuchsgruppe stärker angewinkelt. Dies ist beispielhaft in Abbildung 5-8 bis Abbildung 5-10 für den linken Ellenbogen im BMW 3er dargestellt. Der Grund für die größeren Winkel liegt in der Körpergröße. Die kleinen Personen sitzen im Sitzverstellfeld sehr weit vorne, um die Pedale gut erreichen zu können (vgl. Kapitel 5.2.2). Dabei entsteht zwischen Lenkrad und Versuchsperson ein geringeres Platzangebot als bei den VPs des 50. und 95. Perzentils. Die höheren Winkelwerte für die Ellenbogen treten trotz Verstellmöglichkeit des Lenkrades auf. Dieses weist im Gegensatz zum SVF eine viel kleinere Verstellmöglichkeit auf. Bis auf zwei Versuchspersonen des 5. Perzentils wird das Lenkrad immer ganz nach vorne oben eingestellt (vgl. Kapitel 5.2.3).

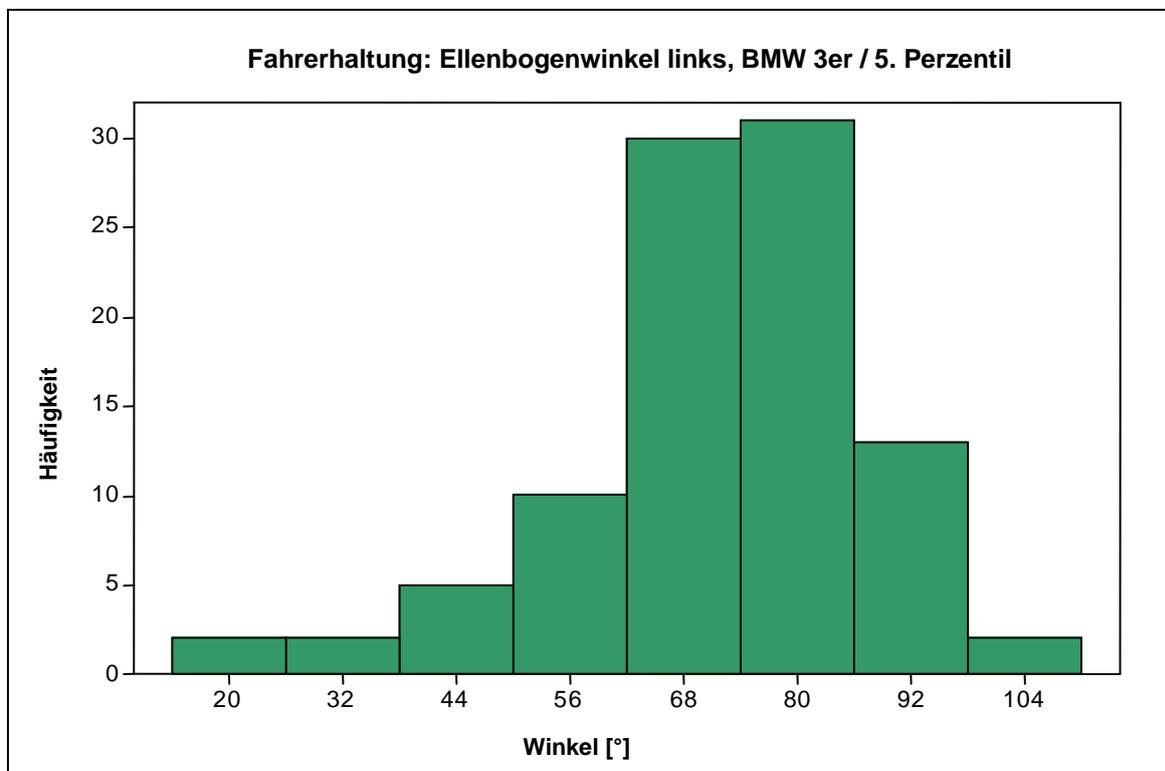


Abbildung 5-8 Absolute Häufigkeiten des linken Ellenbogenwinkels des 5. Perzentils im BMW 3er

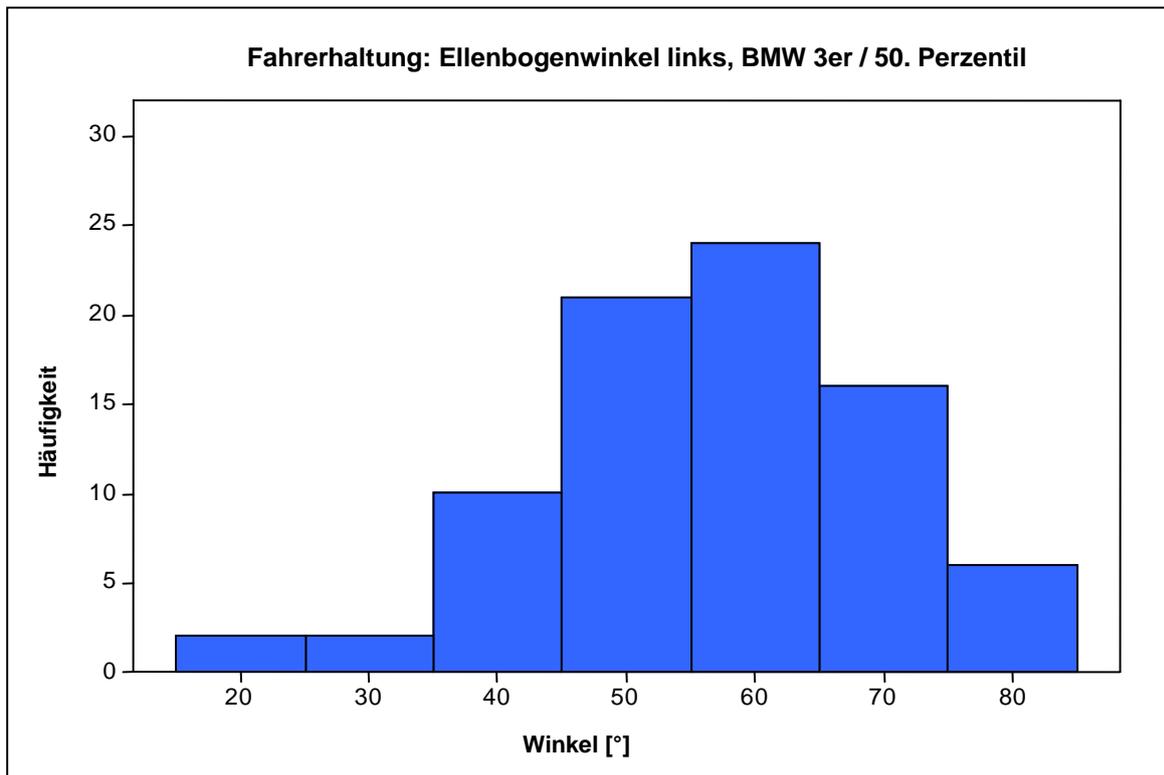


Abbildung 5-9 Absolute Häufigkeiten des linken Ellenbogenwinkels des 50. Perzentils im BMW 3er

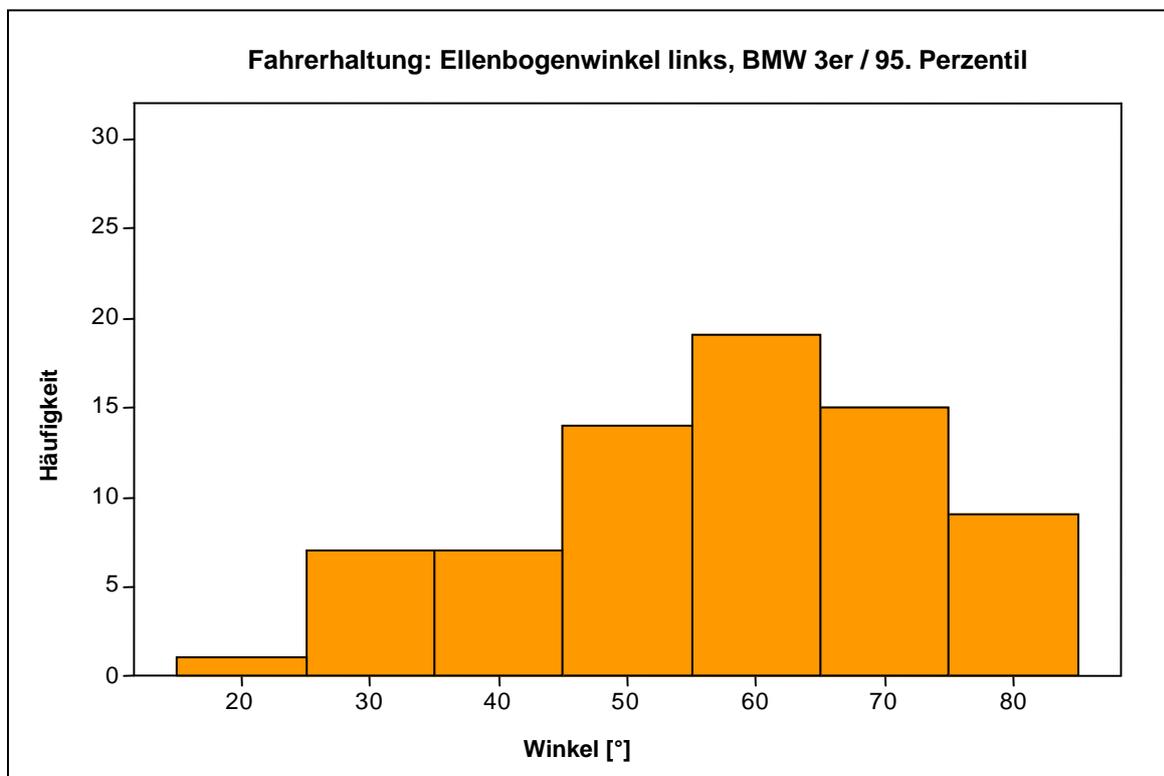


Abbildung 5-10 Absolute Häufigkeiten des linken Ellenbogenwinkels des 95. Perzentils im BMW 3er

Für die Fahrerhaltung ergeben sich mittels statistischer Analyse höchstsignifikante Unterschiede für beide Ellenbogenwinkel beim Vergleich der Versuchspersonengruppen in den verschiedenen Fahrzeugen (Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4). Der Vergleich der Fahrzeuge ergibt lediglich beim 50. Perzentil zwischen dem BMW Z4 und BMW 7er für die rechte Seite signifikante Unterschiede. Die linke Seite weist für die kleinen Frauen zwischen BMW Z4 und BMW 7er, für die mittleren Männer zwischen BMW Z4 und BMW 7er Signifikanzen auf.

Bei der Kupplungshaltung ergeben sich signifikante Unterschiede zwischen dem 5. und 50. Perzentil wie auch zwischen dem 5. und 95. Perzentil in allen drei Fahrzeugen für beide Ellenbogenwinkel. Das gleiche gilt für die Bremshaltung mit Ausnahme des BMW 3er, bei dem keine Signifikanzen existieren. Alle signifikanten Unterschiede sind Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 zu entnehmen.

Zwischen linken und rechten Ellenbogenwinkel konnten keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Daher ist trotz Lenkradversatz in den untersuchten Fahrzeugen (Fröhmel, 2005) von annähernd symmetrischen Winkeln auszugehen.

Tabelle 5-3

Darstellung signifikanter Unterschiede beim rechten Ellenbogenwinkel; oben: Fahrerhaltung, mittig: Kupplungshaltung, unten: Bremshaltung

Paarvergleiche: Fahrerhaltung / Ellenbogenwinkel rechts							
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er		50. Perzentil
	5P-50P	50P-95P	50P-95P	50P-95P	5P-50P	50P-95P	7er-Z4
Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
α -Fehler	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,034

Paarvergleiche: Kupplungshaltung / Ellenbogenwinkel rechts						
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er	
	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P
Test	t-Test	t-Test	U-Test	U-Test	Welch-Test	t-Test
α -Fehler	0,018	0,003	0,034	0,005	0,008	0,011

Paarvergleiche: Bremshaltung / Ellenbogenwinkel rechts				
	BMW Z4		BMW 7er	
	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P
Test	t-Test	t-Test	U-Test	t-Test
α -Fehler	0,012	0,011	0,0171	0,011

Tabelle 5-4

Darstellung signifikanter Unterschiede beim linken Ellenbogenwinkel; oben: Fahrerhaltung, mittig: Kupplungshaltung, unten: Bremshaltung

Paarvergleiche: Fahrerhaltung / Ellenbogenwinkel links								
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er		5. Perzentil	50. Perzentil
	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P	7er-Z4	3er-Z4
Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
α -Fehler	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,0313

Paarvergleiche: Kupplungshaltung / Ellenbogenwinkel links						
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er	
	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P
Test	U-Test	U-Test	t-Test	U-Test	U-Test	U-Test
α -Fehler	0,0134	0,0422	0,009	0,002	0,0217	0,0118

Paarvergleiche: Bremshaltung / Ellenbogenwinkel links						
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er	
	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P
Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
α -Fehler	0,0104	0,0134	0,007	0,0031	0,0091	0,0243

Hüftwinkel

Für den Hüftwinkel sind beispielhaft die absoluten Häufigkeiten für die individuell eingestellte Fahrerhaltung Abbildung 5-11 bis Abbildung 5-13 zu entnehmen. Deutlich zu erkennen ist ein Ansteigen des Winkels mit steigender Körpergröße, wobei dieser Effekt seitenunabhängig ist. Die Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen in jedem der untersuchten Fahrzeuge sowie für die linke und rechte Seite sind dabei für die Fahrerhaltung durchwegs höchstsignifikant (α -Fehler=0,000). Für das 5. und 95. Perzentil existieren zwischen allen Fahrzeugen, für das 50. Perzentil lediglich zwischen BMW Z4 und BMW 7er signifikante Unterschiede (Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6). Signifikanzen für die Kupplungs- und Bremshaltung sind in Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6 dargestellt.

Anhand der gewonnenen Daten ist zu erkennen, dass die Hüftwinkel kleiner werden wenn das H30-Maß zunimmt (Reihenfolge: BMW Z4, BMW 3er, BMW 7er). Signifikant sind die Unterschiede dabei lediglich für die Fahrerhaltung, vor allem beim 5. und 95. Perzentils (Tabelle 5-5 und Tabelle 5-6). Für die Bremshaltung, wie auch für die Kupplungshaltung ist der Trend zwar erkennbar, kann jedoch nicht statistisch nachgewiesen werden. Wie zu erwarten wird beim Kuppeln oder Bremsen der Winkel des entsprechend beteiligten Beines kleiner im Vergleich zur Fahrerhaltung, da das Bein ausgestreckt und etwas nach unten gedrückt wird. Lediglich bei der Kupplungshaltung für das 5. Perzentil konnte im Vergleich zur Fahrerhaltung bei der linken Hüfte keine Signifikanz festgestellt werden. Ein Vergleich der Mittelwerte des Kupplungs- und Bremsbeines ergibt einen maximalen Unterschied von 2° wegen des seitlichen Versatzes der Pedalerie (vgl. Anhang B – Reale Gelenkwinkel).

Der Vergleich zwischen linken und rechten Hüftwinkel zeigt bei der Fahrerhaltung signifikante Unterschiede lediglich für das 5. Perzentil im BMW 7er (α -Fehler=0,034). Der Effekt des seitlichen Versatzes der Pedalerie (Fröhmel, 2005) wirkt sich demnach nicht sehr stark auf den Hüftwinkel aus.

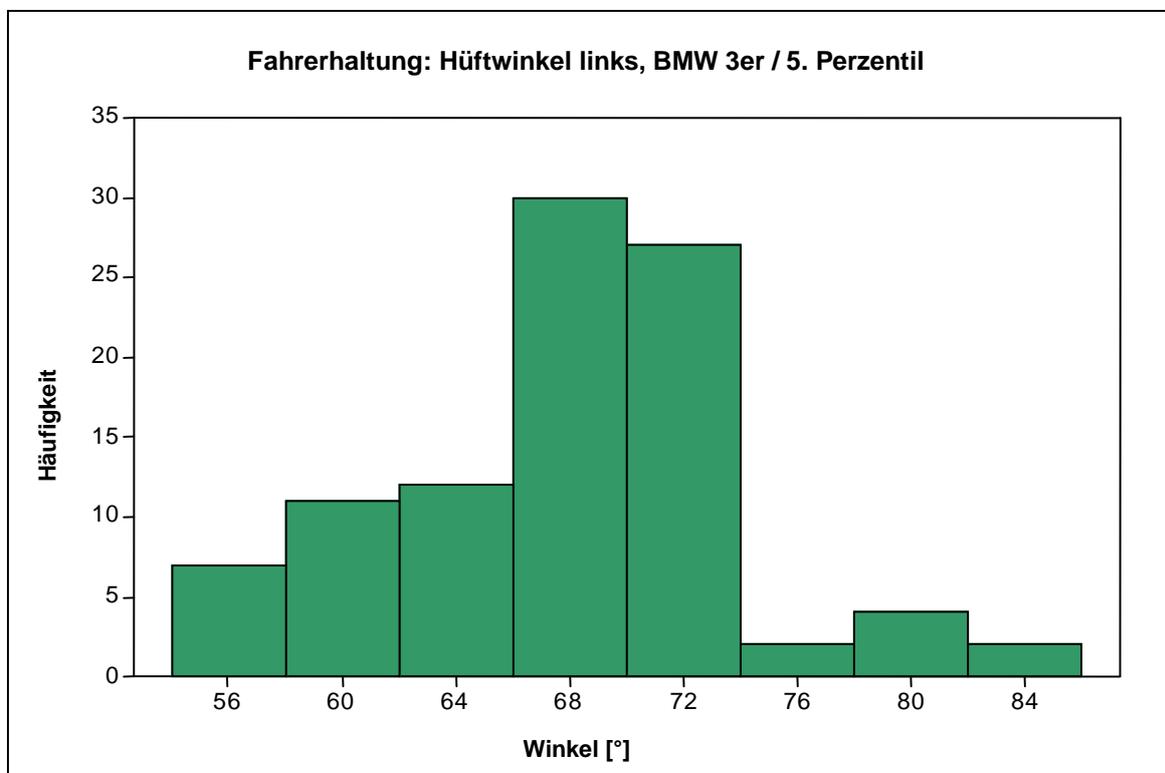


Abbildung 5-11 Absolute Häufigkeiten des linken Hüftwinkels des 5. Perzentils im BMW 3er

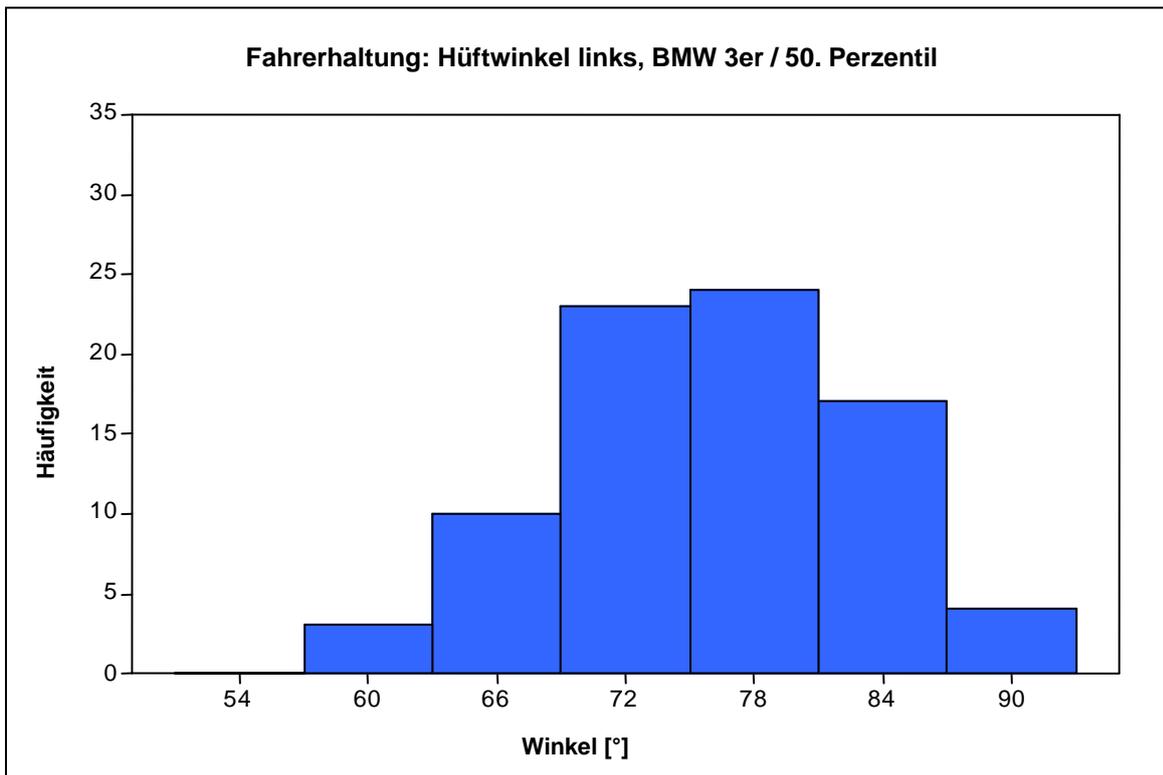


Abbildung 5-12 Absolute Häufigkeiten des linken Hüftwinkels des 50. Perzentils im BMW 3er

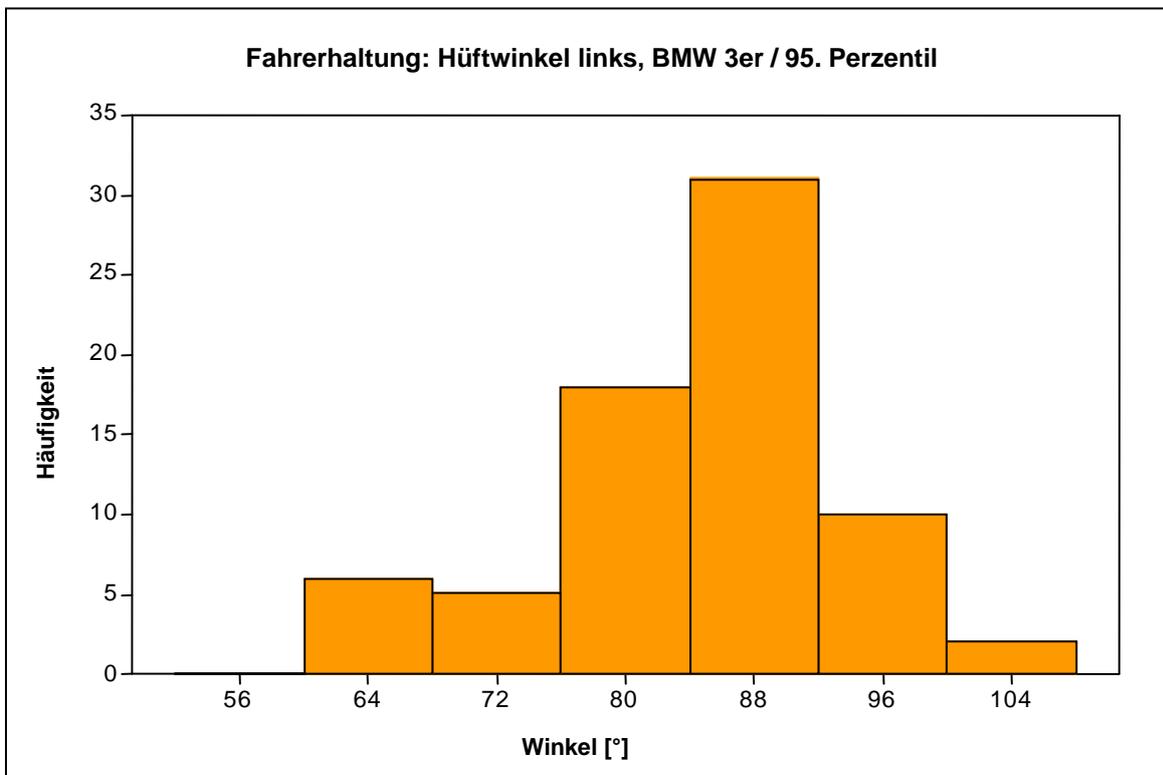


Abbildung 5-13 Absolute Häufigkeiten des linken Hüftwinkels des 95. Perzentils im BMW 3er

Tabelle 5-5 *Darstellung signifikanter Unterschiede beim rechten Hüftwinkel; oben: Fahrerhaltung, mittig: Kupplungshaltung, unten: Bremshaltung*

Paarvergleiche: Fahrerhaltung / Hüftwinkel rechts							
	5. Perzentil			50. Perzentil	95. Perzentil		
	7er-Z4	7er-3er	3er-Z4	7er-Z4	7er-Z4	7er-3er	3er-Z4
Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
α -Fehler	0,0000	0,0179	0,0000	0,0127	0,0000	0,0128	0,0018

Paarvergleiche: Kupplungshaltung / Hüftwinkel rechts							
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er		95. Perzentil
	5P-95P	50P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P	7er-Z4
Test	t-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
α -Fehler	0,002	0,0001	0,003	0,0081	0,0241	0,0027	0,0272

Paarvergleiche: Bremshaltung / Hüftwinkel rechts					
	BMW Z4		BMW 3er	BMW 7er	
	5P-95P	50P-95P	5P-95P	5P-50P	5P-95P
Test	U-Test	U-Test	t-Test	U-Test	U-Test
α -Fehler	0,0132	0,0103	0,024	0,002	0,0304

Tabelle 5-6 *Darstellung signifikanter Unterschiede beim linken Hüftwinkel; oben: Fahrerhaltung, mittig: Kupplungshaltung, unten: Bremshaltung*

Paarvergleiche: Fahrerhaltung / Hüftwinkel links							
	5. Perzentil			50. Perzentil	95. Perzentil		
	7er-Z4	7er-3er	3er-Z4	7er-Z4	7er-Z4	7er-3er	3er-Z4
Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
α -Fehler	0,0000	0,0074	0,0000	0,0146	0,0000	0,0097	0,0083

Paarvergleiche: Kupplungshaltung / Hüftwinkel links					
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er
	5P-95P	50P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-95P
Test	t-Test	Welch-Test	U-Test	t-Test	t-Test
α -Fehler	0,021	0,017	0,0301	0,02	0,003

Paarvergleiche: Bremshaltung / Hüftwinkel links							
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er		
	5P-95P	50P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P	50P-95P
Test	U-Test	U-Test	t-Test	Welch-Test	U-Test	t-Test	U-Test
α -Fehler	0,0062	0,0081	0,022	0,013	0,0304	0,001	0,0468

Kniewinkel

Für die Fahrerhaltung liegen die Signifikanzen des Vergleichs der Versuchspersonengruppen in allen Fahrzeugen bei einem α -Fehler kleiner als 0,001 beim rechten wie linken Kniewinkel. Lediglich für den linken Kniewinkel im BMW Z4 zwischen dem 5. und 50. Perzentils kann kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

Die Kniewinkel ändern sich bei der Fahrerhaltung zwischen den Fahrzeugen kaum, wie die wenigen signifikanten Unterschiede zeigen. Diese existieren beim rechten Knie für das 50. Perzentil zwischen BMW Z4 und BMW 7er (α -Fehler=0,042) sowie zwischen BMW Z4 und BMW 3er (α -Fehler=0,015). Der linke Kniewinkel weist Signifikanzen beim 5. Perzentil zwischen BMW 3er und BMW 7er (α -Fehler=0,021) sowie beim 50. Perzentil zwischen BMW Z4 und BMW 7er (α -Fehler=0,018) auf.

Der Grund der geringen Winkeldifferenzen zwischen den Fahrzeugen liegt vermutlich in der Einstellung des Sitzes. Diese erfolgt bei jeder Versuchsperson über die gute Erreichbarkeit des durchgetretenen Kupplungspedals. Dabei kommen Erfahrungswerte aus der Realität zum Tragen, wobei sich die VPs den Sitz so einstellen, dass sie das Kupplungspedal gut durchtreten können, egal in welchem Fahrzeug sie sitzen.

Die Kniewinkel werden mit steigender Körpergröße unabhängig von der Haltung größer (vgl. Anhang B – Reale Gelenkwinkel), was bedeutet, dass die Beine bei größeren Personen stärker angewinkelt werden. Dieser Aspekt ist beispielhaft in Abbildung 5-14 bis Abbildung 5-16 dargestellt. Durch höchstsignifikante Unterschiede wird dies für die Fahrerhaltung beim Vergleich der Versuchspersonengruppen in jedem Fahrzeug für den linken und rechten Kniewinkel bestätigt (α -Fehler $<0,001$). Bei der Kupplungs- und Bremshaltung ist die Tendenz vorhanden, kann aber nicht für alle Vergleiche zwischen den Versuchspersonen mit statistischer Signifikanz abgesichert werden (Tabelle 5-7 und Tabelle 5-8).

Wie auch bei den Hüftwinkeln wird der Kniewinkel des beteiligten Beines beim Treten von Kupplung oder Bremse kleiner (vgl. Anhang B – Reale Gelenkwinkel), was sich auch aus den jeweiligen höchstsignifikanten Unterschieden gegenüber der Fahrerhaltung ergibt (α -Fehler=0,000).

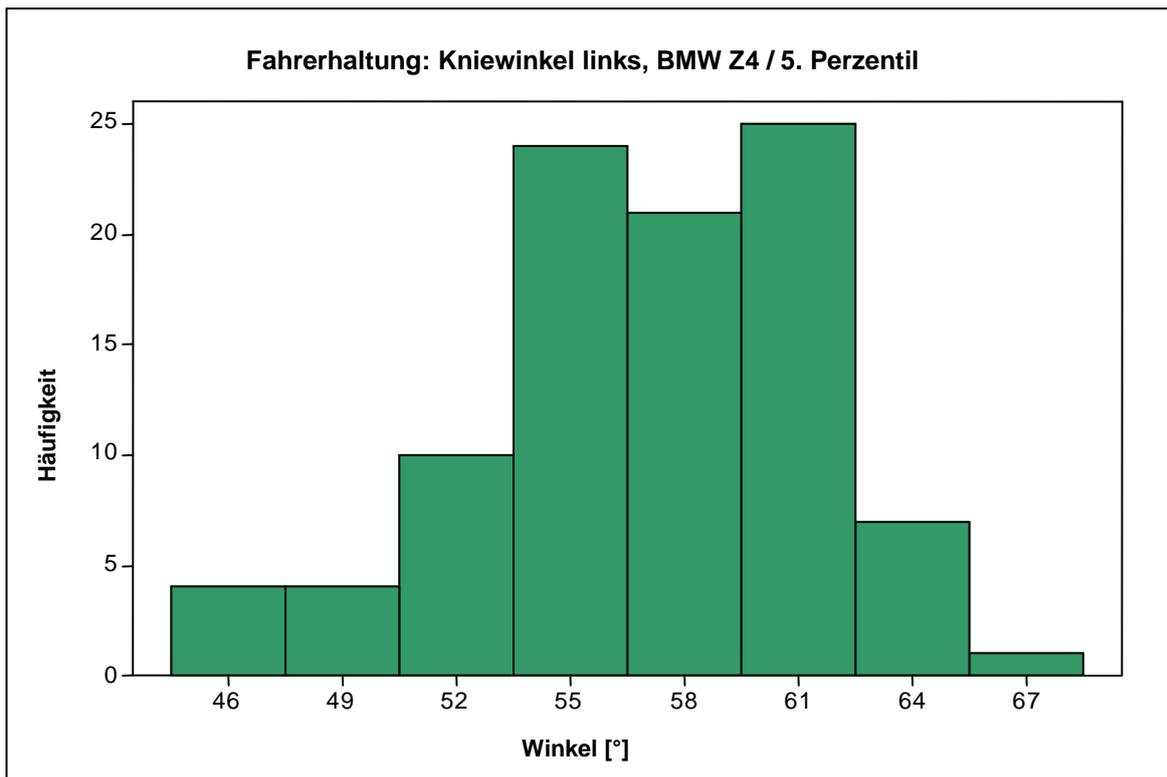


Abbildung 5-14 Absolute Häufigkeiten des linken Kniewinkels des 5. Perzentils im BMW Z4

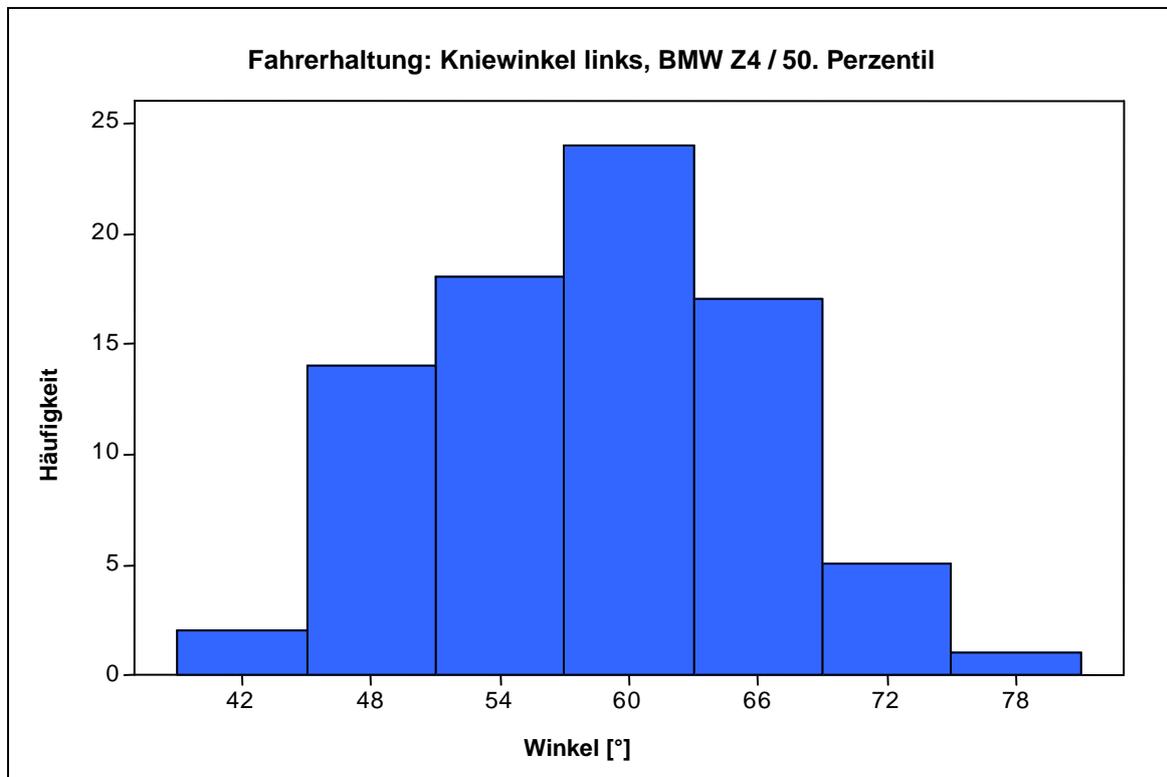


Abbildung 5-15 Absolute Häufigkeiten des linken Kniewinkels des 50. Perzentils im BMW Z4

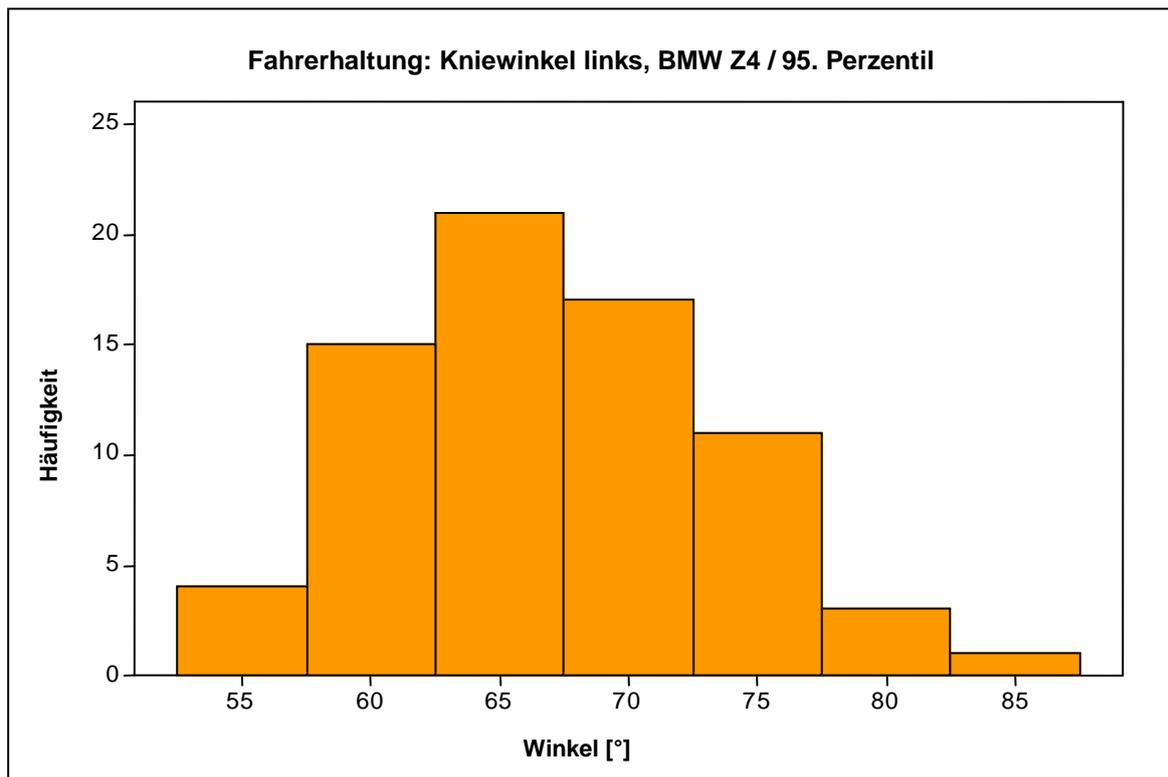


Abbildung 5-16 Absolute Häufigkeiten des linken Kniewinkels des 95. Perzentils im BMW Z4

Tabelle 5-7 Darstellung signifikanter Unterschiede beim rechten Kniewinkel; oben: Kupplungshaltung, unten: Bremshaltung

Paarvergleiche: Kupplungshaltung / Kniewinkel rechts							
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er		
	5P-95P	50P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-50P	5P-95P	50P-95P
Test	t-Test	t-Test	t-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	t-Test
α -Fehler	0,002	0,019	0,006	0,0008	0,009	0,001	0,046

Paarvergleiche: Bremshaltung / Kniewinkel rechts						
	BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er	
	5P-95P	50P-95P	5P-95P	50P-95P	5P-95P	50P-95P
Test	t-Test	Welch-Test	Welch-Test	t-Test	t-Test	Welch-Test
α -Fehler	0,000	0,012	0,000	0,000	0,000	0,001

Tabelle 5-8 *Darstellung signifikanter Unterschiede beim linken Kniewinkel; oben: Kupplungshaltung, unten: Bremshaltung*

Paarvergleiche: Kupplungshaltung / Kniewinkel links						
BMW Z4		BMW 3er		BMW 7er		
	5P-95P	50P-95P	5P-50P	5P-95P	5P-95P	50P-95P
Test	t-Test	t-Test	U-Test	U-Test	t-Test	t-Test
α -Fehler	0,042	0,024	0,0272	0,0008	0,000	0,028

Paarvergleiche: Bremshaltung / Kniewinkel links					
	BMW Z4	BMW 3er	BMW 7er		5. Perzentil
	50P-95P	5P-95P	5P-95P	50P-95P	7er-3er
Test	U-Test	t-Test	U-Test	t-Test	U-Test
α -Fehler	0,015	0,005	0,0295	0,028	0,0417

5.2.2 Sitzpositionen im Sitzverstellfeld

In Abbildung 5-17 bis Abbildung 5-19 sind die Sitzpositionen der Versuchspersonen in den verschiedenen Fahrzeugen, anhand ihrer H-Punkte (Hüftpunkte) dargestellt. Deutlich erkennbar sind die großen Streuungen, die bei den Männern des 50. Perzentils Körperhöhe am größten ausfallen. Die Sitzposition der sehr großen Männer liegt vorwiegend auf der untersten Linie des Sitzverstellfeldes (SVF), wobei sich die Streuung auf die hintere Hälfte des Verstellfeldes erstreckt. Wie zu erwarten sitzen die kleinen Frauen, aufgrund der im Vergleich kurzen Beine, sehr weit vorne im SVF. Die Streuung liegt vorwiegend auf dem ersten Drittel der obersten Linie sowie auf der vordersten Linie des SVF. Je nach Stammlänge sind aber auch Sitzpositionen auf der untersten Linie des Verstellfeldes möglich.

Durch die Darstellung der gemittelten Position der jeweiligen Versuchsgruppen (große Raute) ist eine leichte Verschiebung nach vorn wahrnehmbar, je größer das Platzangebot im Fahrzeug wird. Deutlich erkennbar ist dies bei der Gruppe des 95. Perzentils. Beim BMW Z4 ist deshalb insgesamt die Position etwas weiter hinten als beim BMW 3er oder 7er.

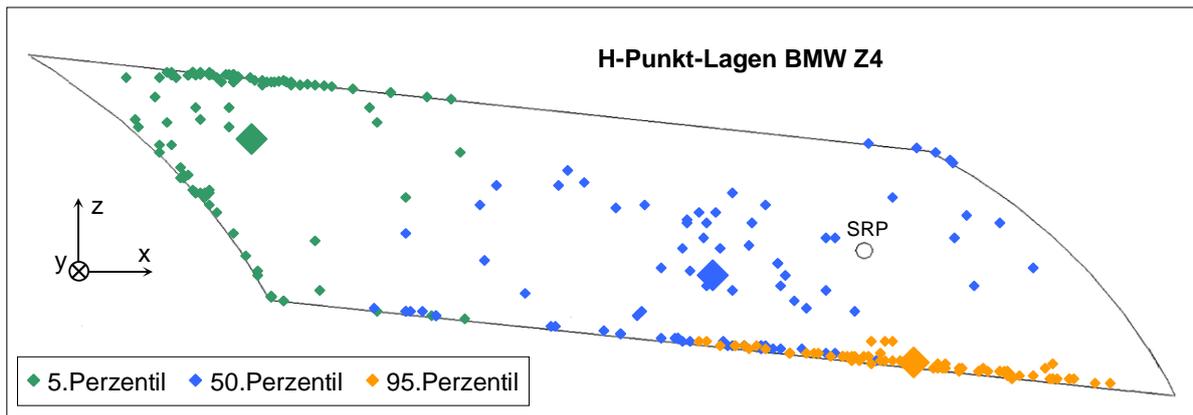


Abbildung 5-17 Reale H-Punkt Positionen im BMW Z4

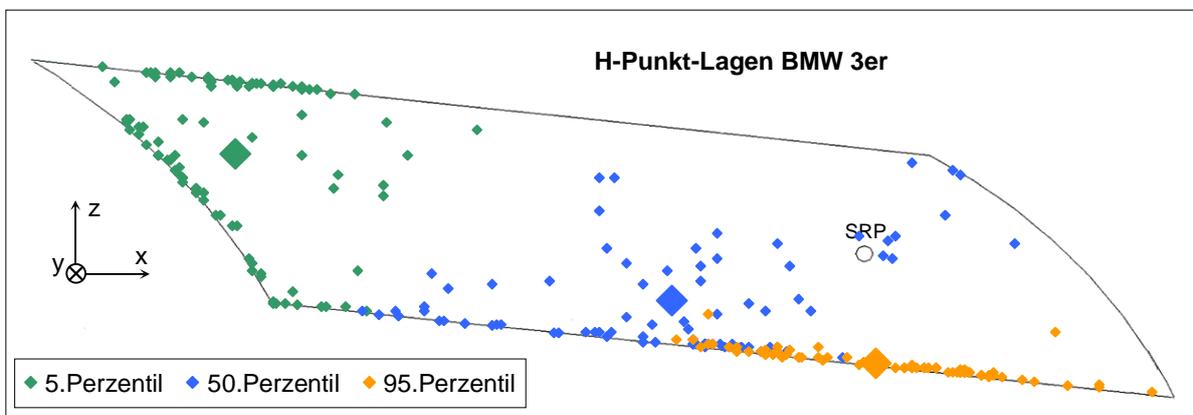


Abbildung 5-18 Reale H-Punkt Positionen im BMW 3er

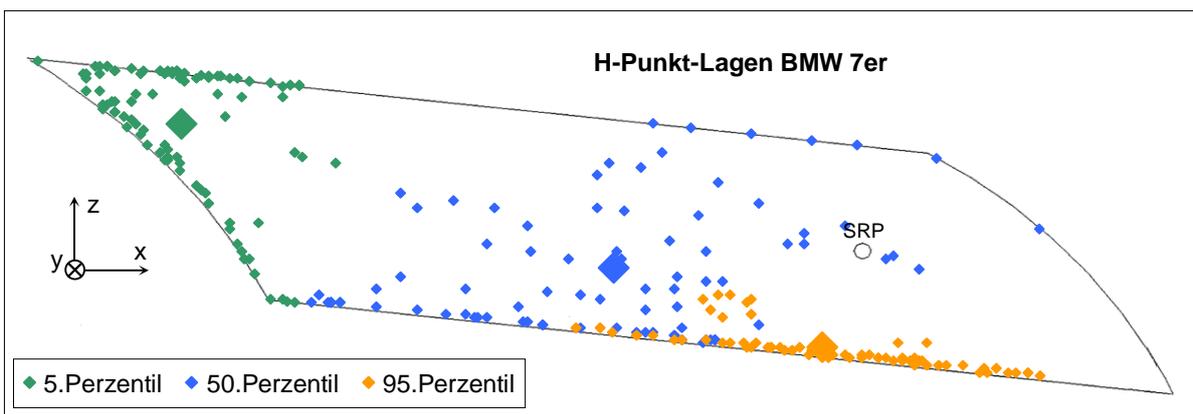


Abbildung 5-19 Reale H-Punkt Positionen im BMW 7er

5.2.3 Lenkradposition im Lenkradverstellfeld

Die nachfolgenden Lenkradpositionen (Abbildung 5-20 bis Abbildung 5-22) geben Aufschluss, wie das Lenkrad bei den verschiedenen Versuchsgruppen in den untersuchten Fahrzeugen eingestellt wird. Erkennbar ist die sehr geringe Streuung der kleinen Frauen des 5. Perzentils Körperhöhe. Bis auf zwei VPs stellen sie sich das Lenkrad ganz nach oben (in z-Richtung) und ganz nach vorn (eingefahren, entgegen der x-Richtung) ein. Bei den sehr großen Männern, 95. Perzentil, wird die Lenkradposition so gewählt, dass sie vorwiegend die hintere obere Hälfte des Lenkradverstellfeldes ausnutzen. Dabei wird die Position ganz oben und ganz hinten, bzw. ganz ausgefahren zu 43% gewählt. Die Gruppe des 50. Perzentils positioniert das Lenkrad teilweise ganz vorne oben wie die sehr kleinen Frauen (BMW Z4: 41%, BMW 3er: 54%, BMW 7er: 52%), aber auch ganz hinten oben wie die sehr großen Männer (BMW Z4: 31%, BMW 3er: 28%, BMW 7er: 27%). Mit diesen zwei Positionen werden schon über 70% aller Lenkradpositionen dieser Gruppe erreicht. Die übrigen verteilen sich auf der oberen Hälfte des LVF. Bis auf sehr wenige Ausnahmen wird das Lenkrad in allen drei Fahrzeugen von allen Versuchspersonen lediglich in der oberen Hälfte des möglichen Verstellbereiches positioniert.

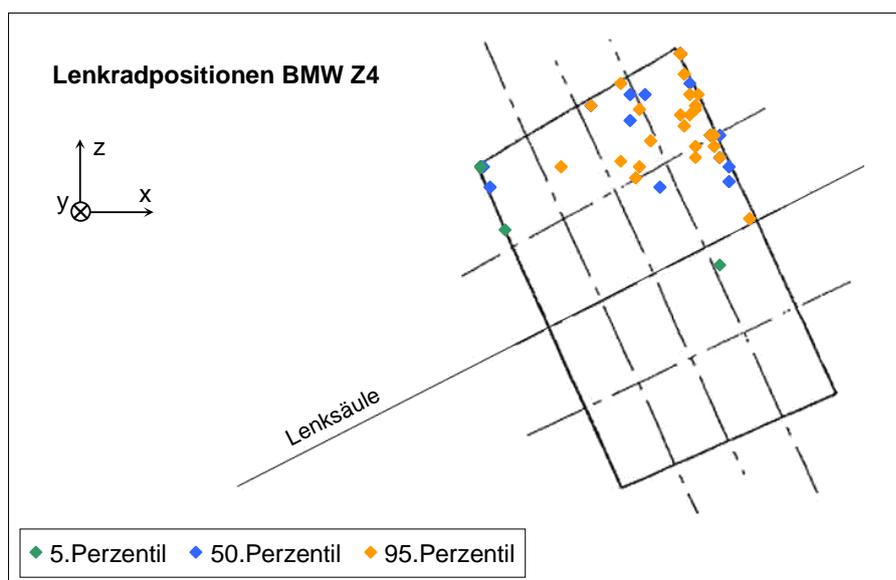


Abbildung 5-20 Lenkradpositionen im BMW Z4

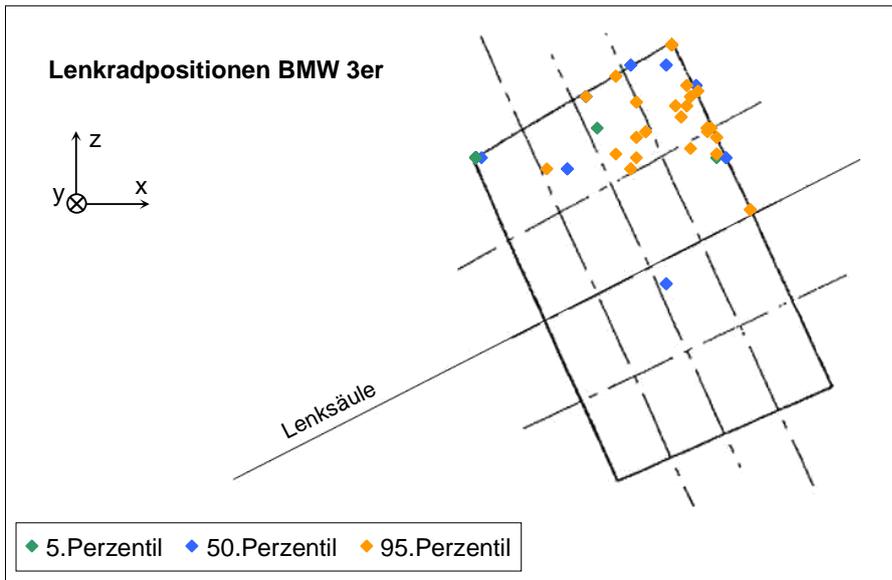


Abbildung 5-21 Lenkradpositionen im BMW 3er

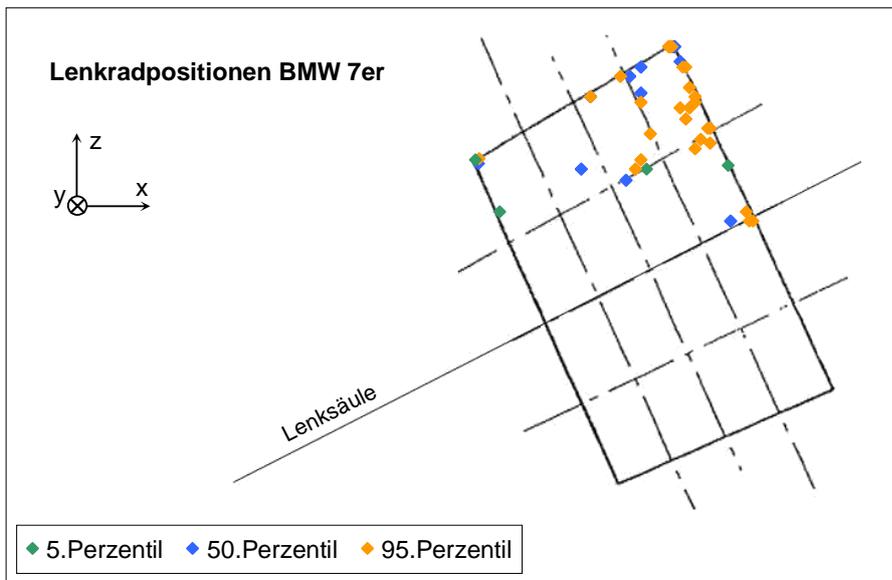


Abbildung 5-22 Lenkradpositionen im BMW 7er

5.2.4 Augpunktlagen

In Abbildung 5-23 bis Abbildung 5-25 sind die realen Augpunktlagen (Mittenaugen) aller VPs bei der individuell eingestellten Fahrerhaltung dargestellt sowie die jeweils gemittelten Lagen der drei Versuchsgruppen. Außerdem befindet sich in den Abbildungen zum Vergleich die SAE Augenellipse. Gut erkennbar sind die einzelnen Positionsbereiche der verschiedenen Versuchsgruppen. Die Augpunkte der sehr kleinen Frauen liegen aufgrund der Körpergröße ganz vorne und am tiefsten, die der sehr großen Männer befinden sich dagegen im Vergleich ganz hinten und am höchsten, die der mittleren Männer liegen dazwischen. Je nach Stammlänge, Position des Sitzes und individueller Einstellung der Lehnenneigung findet eine Überschneidung der Augpunktbereiche statt. Feststellbar ist damit eine fahrzeugunabhängige Positionsverschiebung nach hinten oben mit steigender Körpergröße. Generell liegen die Augpunkte der VPs im BMW Z4 etwas weiter hinten, analog zu den H-Punkt-Lagen im SVF. Für die SAE Augenellipse und die Augpunktlagen der VPs in den jeweiligen Fahrzeugen gibt es nur zum Teil Übereinstimmungen. Am besten schneidet hier der BMW Z4 ab. Generell ist die Augenellipse in ihrer Ausdehnung zu gering und liegt zudem zu weit unten sowie zu weit hinten.

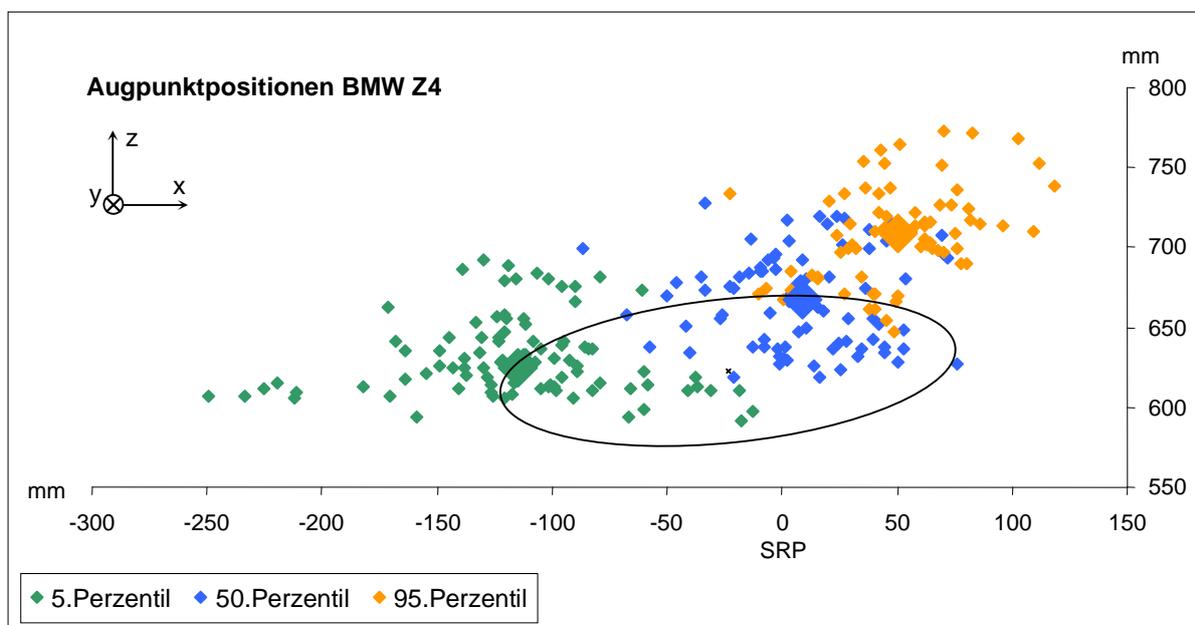


Abbildung 5-23 Augpunktpositionen im BMW Z4 mit SAE Augenellipse, gemessen vom SRP

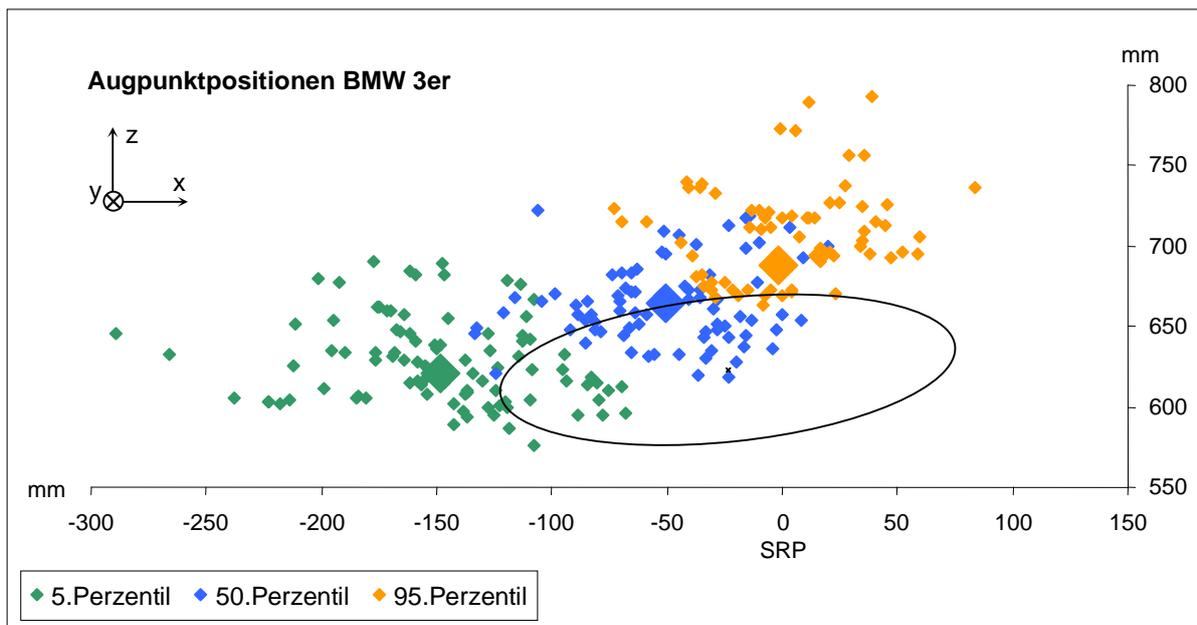


Abbildung 5-24 Augpunktpositionen im BMW 3er mit SAE Augenellipse, gemessen vom SRP

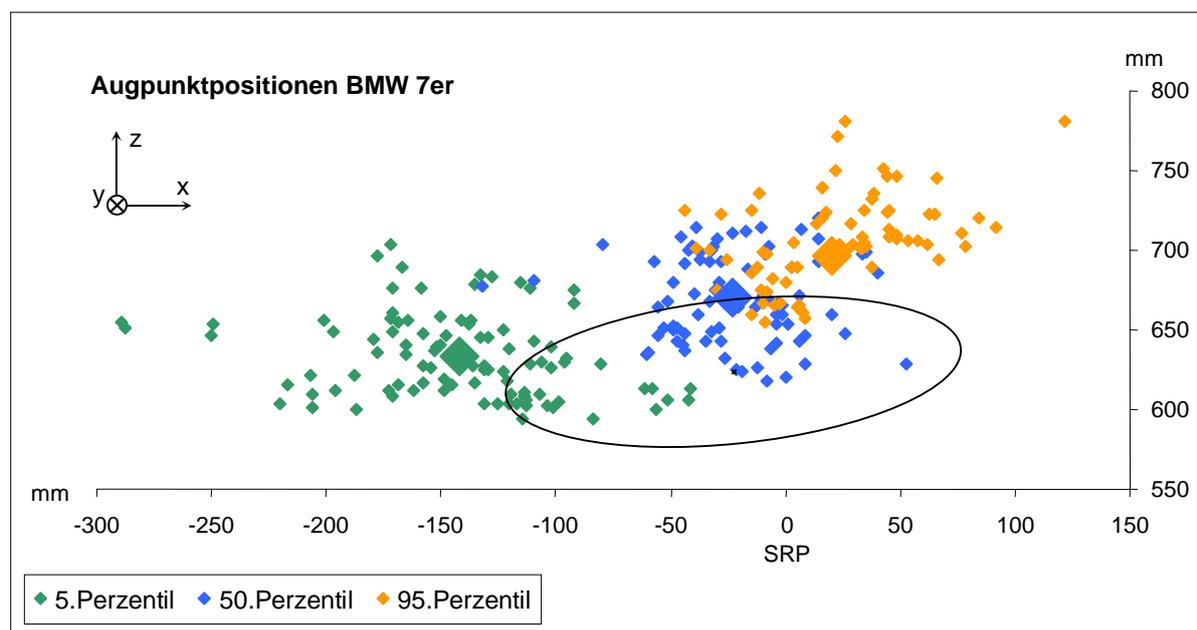


Abbildung 5-25 Augpunktpositionen im BMW 7er mit SAE Augenellipse, gemessen vom SRP

5.2.5 Real gemessene Kräfte

Bei jeder Haltung treten Kräfte auf, die der Mensch an die Umgebung überträgt. Einerseits entstehen diese Kräfte aufgrund der Gewichtskraft, bzw. der Körperteilgewichte, andererseits durch extern angreifende Kräfte, wie z. B. beim Heben eines Gegenstandes. Diese zusätzliche Kraft wird vom Menschen durch eine Änderung der Körperhaltung kompensiert (Markfort, 2005) und verteilt sich abhängig von der eingenommenen Haltung ebenfalls auf die verschiedenen Schnittstellen mit der Umgebung.

Aufgrund der im Versuchsstand implementierten Messtechnik kann die Verteilung der Gewichtskraft auf die verschiedenen Schnittstellen in vertikaler Richtung (z-Richtung) angegeben werden. Bis auf das Lenkrad kommen eindimensionale Zug-Druck-Sensoren zum Einsatz. Bei den Pedalkraftsensoren wurde mit Hilfe der Trigonometrie der z-Wert ermittelt.

Da jede VP ein anderes Körpergewicht hat, ist es sinnvoll alle Werte prozentual auf das Körpergewicht zu beziehen. Dadurch ist es möglich statistische Unterschiede unabhängig vom Gewicht der Personen zu ermitteln. Außerdem ist die Übertragung der Kraftverteilung auf andere Personen gewährleistet.

Für einen ersten Überblick sind die prozentualen mittleren Gewichtsverteilungen in vertikaler Richtung sowie deren Standardabweichungen unabhängig von den untersuchten Fahrzeugen und den Versuchsgruppen in Abbildung 5-26 bis Abbildung 5-28 dargestellt. Weiterhin können die Werte in allen drei Raumrichtungen für das Lenkrad Abbildung 5-29 entnommen werden. Die Stichprobenumfänge der real gemessenen Kräfte sind Tabelle 5-9 zu entnehmen.

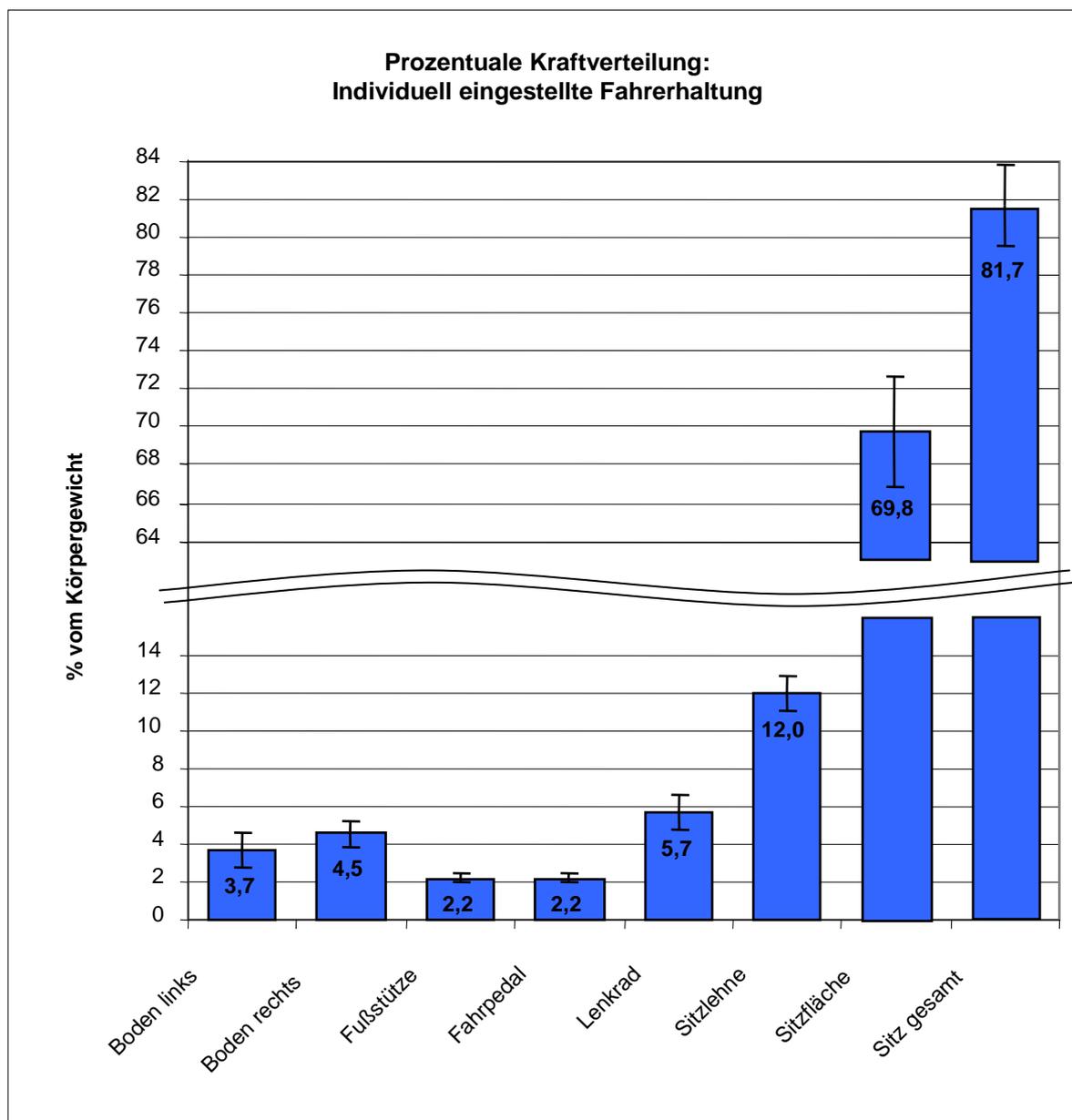


Abbildung 5-26 Kraftverteilung auf die Schnittstellen für die individuell eingestellte Fahrerhaltung [% vom Körpergewicht]

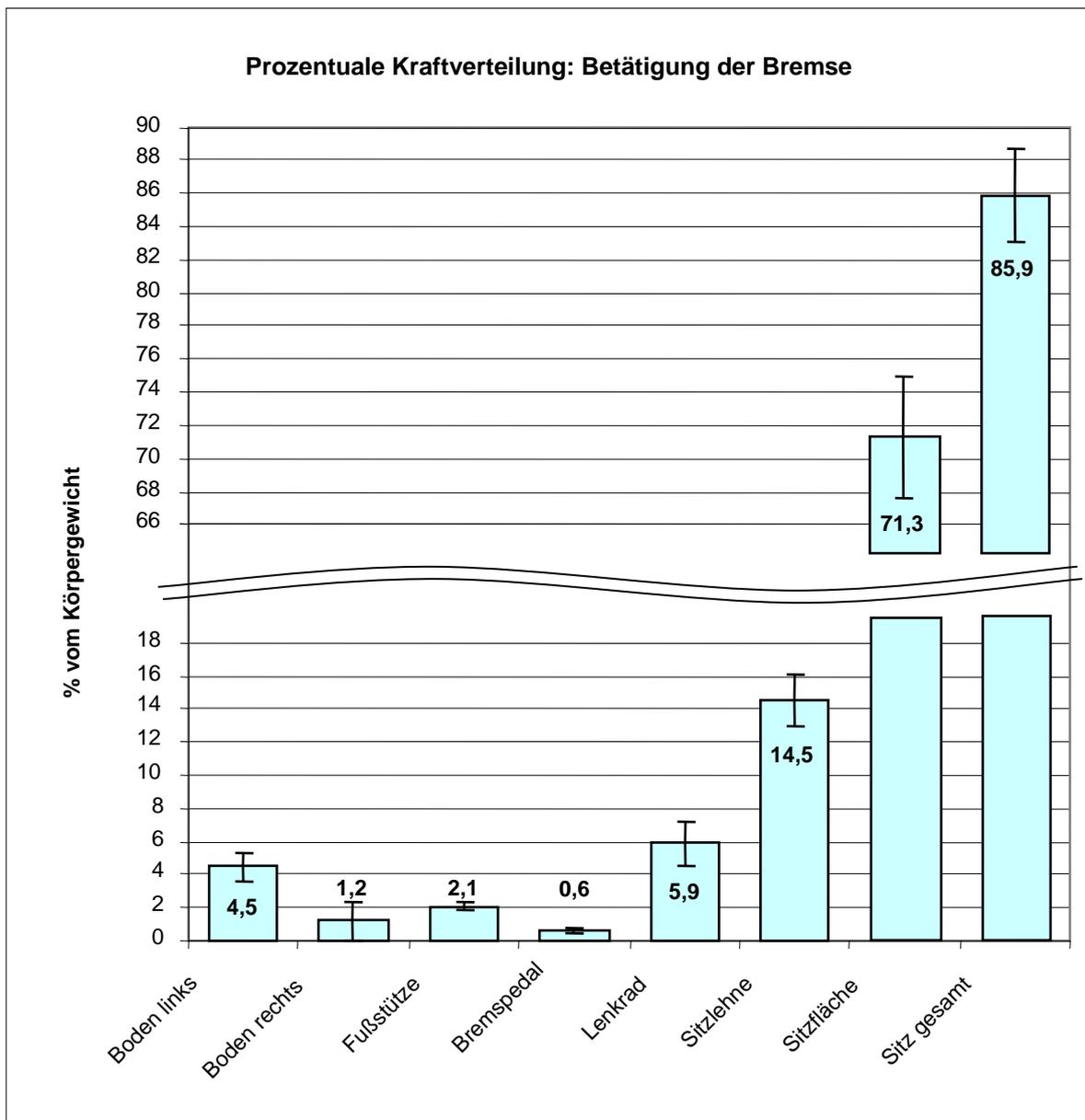


Abbildung 5-27 Kraftverteilung auf die Schnittstellen für die Betätigung der Bremse [% vom Körpergewicht]

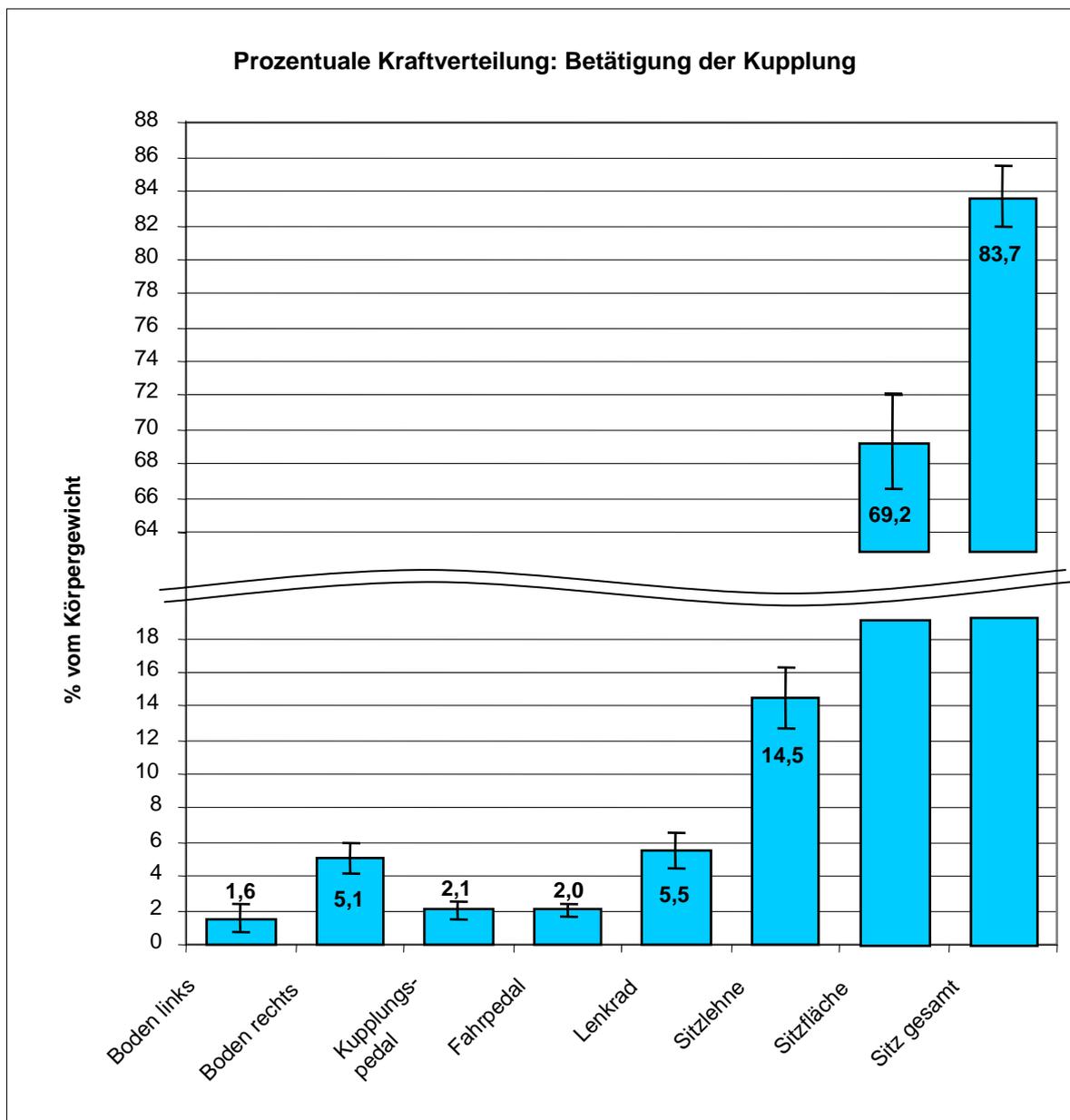


Abbildung 5-28 Kraftverteilung auf die Schnittstellen für die Betätigung der Kupplung [% vom Körpergewicht]

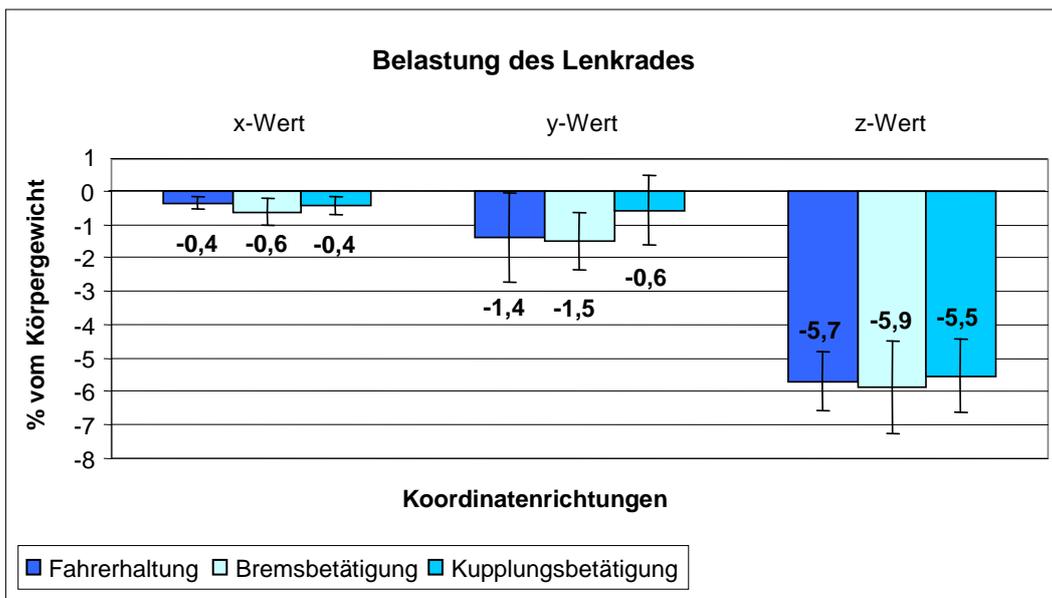


Abbildung 5-29 Belastung des Lenkrades in den drei Raumkoordinaten [% vom Körpergewicht]

Tabelle 5-9 Stichprobenumfänge der realen Kräfte

		Fahrerhaltung	Bremshaltung	Kupplungshaltung
BMW Z4	5.Perzentil	93	25	27
	50.Perzentil	76	24	27
	95.Perzentil	63	22	22
BMW 3er	5.Perzentil	89	24	25
	50.Perzentil	73	23	22
	95.Perzentil	63	22	22
BMW 7er	5.Perzentil	87	28	26
	50.Perzentil	78	25	26
	95.Perzentil	66	22	22

Fahrerhaltung

Für die individuell eingestellte Fahrerhaltung (Abbildung 5-26, Tabelle 5-10) zeigt sich eine über alle drei Fahrzeuge und alle Versuchspersonengruppen ähnliche Verteilung des Gewichtes der beiden Füße auf Fußstütze und Fahrpedal von ca. 2% vom Körpergewicht. Signifikante Unterschiede existieren für diesen Vergleich bei dem 50. Perzentil im BMW Z4 (α -Fehler=0,021) und BMW 3er (α -Fehler=0,014) sowie bei dem 5. Perzentil im BMW 7er (α -Fehler=0,005).

Die Belastung von beiden Beinen auf den Boden ist bei jeder Versuchspersonengruppe in jedem der untersuchten Fahrzeuge signifikant unterschiedlich (α -Fehler<0,02). Dies erklärt sich durch den seitlichen Versatz der gesamten Pedalerie nach links, bezogen auf den Sitz. Ursache ist der breite Mitteltunnel in den betrachteten Fahrzeugen. Das rechte Bein kommt dabei näher zur Körpermitte als das linke, wodurch sich eine höhere Abstützlast einstellt. Anhand Tabelle 5-10 ist für den Boden beim BMW 3er und BMW 7er eine Zunahme des Gewichtes mit der Körpergröße erkennbar. Für den linken Boden sind dabei, bis auf den Vergleich zwischen 5. und 50. Perzentil im BMW Z4 sowie zwischen 50. und 95. Perzentil im BMW 7er, höchstsignifikante Unterschiede zwischen allen Versuchspersonengruppen in allen Fahrzeugen nachweisbar (α -Fehler=0,000). Beim rechten Boden existieren ebenfalls signifikante Unterschiede (α -Fehler<0,03), bis auf den Vergleich zwischen 5. und 95. Perzentil sowie zwischen 50. und 95. Perzentil im BMW Z4.

Die größte Belastung, wie nicht anders zu erwarten, geht mit mehr als 80% in den Sitz ein. Auf die Sitzfläche werden dabei 67-76% und auf die Sitzlehne 10-13% des gesamten Körpergewichts übertragen. Die Sitzlehne wird von allen drei Versuchsgruppen im BMW Z4 stets höher belastet als in den anderen beiden Fahrzeugen. Dies wird auch durch die jeweiligen signifikanten Unterschiede beim Vergleich des BMW Z4 zu den anderen Fahrzeugen mit jeder Versuchspersonengruppe untermauert (α -Fehler<0,031). Lediglich beim 50. Perzentil zwischen dem BMW Z4 und BMW 7er kann keine statistische Aussage getroffen werden. Zusätzlich ergeben sich für die Sitzlehne zwischen den Versuchspersonengruppen bis auf den Vergleich des 50. und 95. Perzentils signifikante Unterschiede in jedem Fahrzeug (α -Fehler<0,013). Für die Sitzfläche sind ebenfalls signifikante Unterschiede nachweisbar. Zwischen den Versuchsgruppen in jedem Fahrzeug (α -Fehler<0,020), bis auf den Vergleich zwischen 50. und 95. Perzentil in jedem Fahrzeug, sowie

zwischen den Fahrzeugen bei jeder Perzentilgruppe (α -Fehler<0,048), bis auf den Vergleich zwischen BMW 3er und BMW 7er beim 50. und 95. Perzentil.

In Abbildung 5-29 und Tabelle 5-13 sind die Kraftwerte dargestellt, welche auf das Lenkrad übertragen werden. Bei der Fahrerhaltung wird das Lenkrad nach vorn (negativer x-Wert), nach links (negativer y-Wert) und nach unten (negativer z-Wert) belastet. Auf das Lenkrad wird in z-Richtung von den mittleren Männern die höchste Last übertragen, von den kleinen Frauen die geringste. Somit steigt die Last nicht mit der Körpergröße. Signifikante Unterschiede ergeben sich zwischen allen Versuchsgruppen in jedem der untersuchten Fahrzeuge (α -Fehler<0,022), bis auf den Vergleich zwischen 50. und 95. Perzentil im BMW 7er. Bei der Betrachtung der anderen Lenkradwerte fallen die im Vergleich hohen y-Werte der sehr großen Männer auf. Sie belasten das Lenkrad beim Abstützen am meisten nach links. Statistisch signifikante Unterschiede ergeben sich hier zwischen den Versuchsgruppen in allen Fahrzeugen (α -Fehler<0,026), bis auf den Vergleich zwischen 5. und 50. Perzentil im BMW 7er. Alle anderen Einzelwerte des Lenkrades (x- und y-Werte) liegen unter 1% (Tabelle 5-13), wobei sich in den Daten für die x-Richtung des Lenkrades lediglich wenige Signifikanzen nachweisen lassen (zwischen 5. und 50. Perzentil im BMW 3er sowie zwischen 5. und 50. Perzentil im BMW 7er, α -Fehler<0,030).

Tabelle 5-10 detaillierte Kraftverteilung auf die Schnittstellen für die individuell eingestellte Fahrerhaltung [% vom Körpergewicht]

Prozentuale Kraftverteilung: Individuell eingestellte Fahrerhaltung

		Boden links		Boden rechts		Fußstütze		Fahrpedal		Lenkrad		Sitzfläche		Sitzlehne		Sitzgesamt	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	3,7	0,7	5,2	1,1	2,7	0,7	2,7	0,8	4,8	2,3	68,7	3,6	12,2	2,5	80,8	2,2
	50.Perzentil	3,8	1,1	4,7	1,3	2,4	0,6	2,2	0,6	6,7	1,4	67,1	2,2	13,1	1,2	80,2	2,2
	95.Perzentil	4,5	0,7	5,0	0,8	2,2	0,3	2,2	0,3	5,8	2,0	67,6	3,1	12,6	1,7	80,2	2,1
BMW 3er	5.Perzentil	2,3	0,7	3,9	1,2	2,2	0,6	2,3	0,6	4,6	2,1	73,9	3,7	10,7	2,6	84,6	1,3
	50.Perzentil	3,8	1,0	4,5	1,2	2,2	0,7	2,0	0,6	6,7	1,6	68,6	2,2	12,1	1,4	80,8	2,4
	95.Perzentil	4,6	0,8	5,1	1,0	2,1	0,3	2,0	0,4	5,7	1,9	68,8	2,9	11,7	1,7	80,5	2,5
BMW 7er	5.Perzentil	2,1	0,5	3,2	1,2	1,9	0,7	2,1	0,7	4,4	2,0	75,8	4,0	10,5	2,2	86,3	2,2
	50.Perzentil	3,8	1,1	4,2	1,2	2,2	0,5	2,1	0,5	6,4	1,4	68,3	3,5	12,9	2,3	81,2	2,4
	95.Perzentil	4,2	0,7	4,8	0,9	2,1	0,5	2,1	0,5	5,9	2,3	69,0	2,6	12,0	1,6	81,0	1,9

Werte in % vom Körpergewicht AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Betätigung der Bremse

In Abbildung 5-27 und Tabelle 5-11 ist die prozentuale Verteilung der Gewichtskraft für die Betätigung der Bremse angegeben. Die VPs sollten das Bremspedal mit 100N treten. Aufgrund der annähernd senkrechten Anordnung des Bremspedals und der damit verbundenen zur z-Richtung nahezu orthogonalen Krafteinleitung wirkt auf diese Schnittstelle nur eine geringe vertikale Belastung. Auffallend ist außerdem die geringe Belastung auf den rechten Boden im Vergleich zum linken. Dabei sind signifikante Unterschiede bei jeder Versuchspersonengruppe in jedem Fahrzeug nachweisbar (α -Fehler<0,002). Dies erklärt sich dadurch, dass fast alle kleinen Frauen sowie einige Männer das rechte Bein komplett vom Boden lösen, um die Bremse zu treten. Analog gilt dies für das linke Bein beim Treten der Kupplung, wie in Abbildung 5-30 verdeutlicht ist. Ein Großteil der Männer lässt ihr rechtes Bein beim Bremsen jedoch auf dem Boden stehen. Aufgrund der Bein Streckung wird die Kraft aber auch in diesem Fall zum überwiegenden Teil in das Bremspedal und nicht in den Boden eingeleitet. Durch das Bremsen an sich findet darüber hinaus eine Ausgleichsbewegung des linken Beines statt, wodurch die linke Bodenfläche im Vergleich zur Fahrerhaltung mehr belastet wird. Signifikante Unterschiede (α -Fehler<0,017) existieren hier bis auf das 5. Perzentil im BMW Z4 (α -Fehler=0,213), 95. Perzentil im BMW 3er (α -Fehler=0,062) und beim 50. Perzentil im BMW 7er (α -Fehler=0,158).

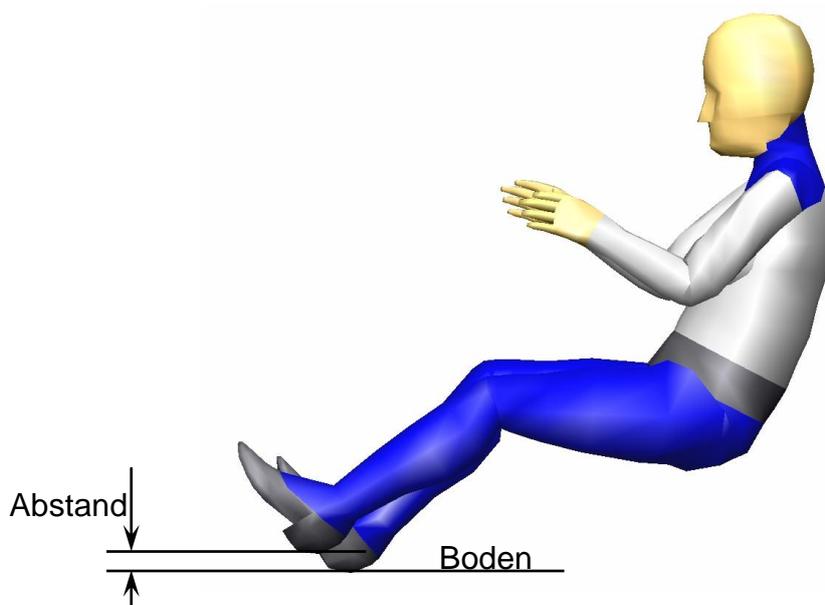


Abbildung 5-30 Veranschaulichung des Abhebens von Kupplungs- und Bremsbein

Generell ergibt sich beim Bremsen eine höhere Belastung in z-Richtung auf den Sitz als bei der Fahrerhaltung, mit hochsignifikanten Unterschieden (α -Fehler<0,006) bei allen Versuchsgruppen in jedem Fahrzeug. Dabei wird sowohl die Sitzlehne als auch die Sitzfläche mehr belastet als bei der Fahrerhaltung. Die Sitzlehne weist hochsignifikante Unterschiede mit α -Fehler<0,005 für jede Gruppe in jedem Fahrzeug auf, bei der Sitzfläche dagegen sind statistische Unterschiede nur für das 5. Perzentil im BMW Z4 (α -Fehler=0,000) und BMW 3er (α -Fehler=0,018) sowie für das 95. Perzentil im BMW 3er (α -Fehler=0,002) und BMW 7er (α -Fehler=0,007) nachweisbar.

Die Krafteinwirkung auf das Lenkrad bleibt bei dieser Haltung im Vergleich zur Fahrerhaltung in allen drei Raumrichtungen annähernd gleich (Abbildung 5-29, Tabelle 5-13). Für die drei Lenkradwerte können nur vereinzelt statistisch signifikante Unterschiede nachgewiesen werden. In y-Richtung für das 5. Perzentil im BMW 7er (α -Fehler=0,007) und für das 50. Perzentil im BMW 7er (α -Fehler=0,010) sowie in z-Richtung für das 5. Perzentil im BMW 3er (α -Fehler=0,039). Für die x-Richtung existieren keine Unterschiede. Daraus lässt sich schließen, dass beim Bremsen lediglich vereinzelt eine zusätzliche Abstützung über das Lenkrad im Vergleich zur Fahrerhaltung erfolgt.

Tabelle 5-11 detaillierte Kraftverteilung auf die Schnittstellen für die Betätigung der Bremse [% vom Körpergewicht]

Prozentuale Kraftverteilung: Betätigung der Bremse

		Boden links		Boden rechts		Fußstütze		Bremspedal		Lenkrad		Sitzfläche		Sitzlehne		Sitzgesamt	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	4,4	1,9	0,2	1,4	2,5	0,7	0,8	0,1	4,1	1,7	73,3	4,5	14,8	3,7	88,1	2,9
	50.Perzentil	4,3	1,2	2,8	2,6	2,2	0,7	0,5	0,1	7,2	2,2	65,6	5,1	17,4	3,9	83,1	3,5
	95.Perzentil	5,5	1,5	2,7	1,7	2,1	0,5	0,5	0,0	6,9	2,6	68,5	3,1	13,9	1,7	82,3	2,6
BMW 3er	5.Perzentil	3,5	1,7	0,0	1,2	2,2	0,9	0,8	0,1	3,8	1,6	75,7	4,0	14,0	4,1	89,7	2,6
	50.Perzentil	4,9	1,7	1,3	1,7	2,0	0,8	0,5	0,1	6,4	2,7	69,7	5,2	15,3	5,2	85,0	3,4
	95.Perzentil	5,3	1,4	1,9	1,7	2,1	1,0	0,5	0,0	6,3	2,5	71,4	2,4	12,6	1,2	84,0	2,3
BMW 7er	5.Perzentil	3,2	1,6	0,3	0,5	1,8	0,5	0,8	0,1	4,2	2,0	77,4	2,8	13,0	2,2	90,4	2,4
	50.Perzentil	4,1	1,6	0,9	1,3	2,0	0,5	0,5	0,1	7,0	2,3	69,3	5,2	16,2	4,2	85,5	2,8
	95.Perzentil	5,2	0,9	1,0	0,8	1,7	0,6	0,5	0,0	6,9	2,8	71,2	3,7	13,5	1,6	84,7	2,7

Werte in % vom Körpergewicht AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Betätigung der Kupplung

Für die Kupplungshaltung ist die prozentuale Kraftverteilung in Abbildung 5-28 und Tabelle 5-12 dargestellt. Die Kupplung sollte durch die VPs ebenfalls mit 100N betätigt werden.

Ähnlich wie für das Bremsen wird beim Kuppeln, vor allem bei den kleinen Frauen, durch teilweises Anheben des linken Fußes (vgl. Abbildung 5-30), die linke Bodenfläche nur geringfügig belastet. Das gleiche gilt für die mittleren Männer im BMW 7er. Die rechte Bodenfläche wird dabei durch eine Ausgleichsbewegung stärker belastet als die linke mit höchstsignifikanten Unterschieden bei allen drei Versuchspersonengruppen in jedem der untersuchten Fahrzeuge (α -Fehler=0,000). Im Vergleich zur Fahrerhaltung wird, aufgrund der zusätzlichen Abstützkraft, die rechte Bodenfläche bei dieser Haltung stärker belastet. Signifikante Unterschiede sind aber lediglich für den BMW Z4 bei allen Versuchsgruppen nachweisbar (α -Fehler<0,021).

Analog zur Bremshaltung wird der Sitz beim Kuppeln im Vergleich zur Fahrerhaltung stärker belastet, wobei der Unterschied aus einer höheren Lehnenbelastung resultiert. Für den gesamten Sitz existieren überall signifikante Unterschiede (α -Fehler<0,006) bis auf das 95. Perzentil im BMW Z4 (α -Fehler=0,385), das 5. Perzentil im BMW 3er (α -Fehler=0,202) und BMW 7er (α -Fehler=0,626). Bei der Sitzlehne sind für jede Versuchspersonengruppen in jedem Fahrzeug hochsignifikante Unterschiede nachweisbar (α -Fehler<0,002). Die Sitzfläche dagegen weist ähnlich Werte wie bei der Fahrerhaltung auf, lediglich das 5. Perzentil im BMW 7er weist einen signifikanten Unterschied mit α -Fehler=0,006 auf.

Das Lenkrad (Abbildung 5-29, Tabelle 5-13) weist gegenüber der Fahrer- und der Bremshaltung ähnliche x-Werte und z-Werte auf (es existieren keine signifikanten Unterschiede). Bei den y-Werten treten zum Teil statistisch signifikante Unterschiede auf. Gegenüber der Fahrerhaltung sind Unterschiede für das 5. Perzentil in allen Fahrzeugen sowie für das 95. Perzentil im BMW 3er und BMW 7er nachweisbar (α -Fehler<0,008). Im Vergleich zur Bremshaltung weist ebenfalls das 5. Perzentil in allen Fahrzeugen und das 50. Perzentil im BMW 7er signifikante Unterschiede auf (α -Fehler<0,021). Die Unterschiede ergeben sich beim Kuppeln im Vergleich zu den

anderen Haltungen, da vor allem von den kleinen Frauen das Lenkrad teilweise nach rechts belastet wird.

Tabelle 5-12 *detaillierte Kraftverteilung auf die Schnittstellen für die Betätigung der Kupplung [% vom Körpergewicht]*

Prozentuale Kraftverteilung: Betätigung der Kupplung

		Boden links		Boden rechts		Fahrpedal		Kupplung		Lenkrad		Sitzfläche		Sitzlehne		Sitzgesamt	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD
		BMW Z4	5.Perzentil	1,2	0,8	6,2	1,8	2,8	1,1	2,7	0,3	4,2	1,7	68,9	4,3	14,1	3,0
	50.Perzentil	2,1	1,3	5,4	2,1	1,8	0,8	2,0	0,3	6,2	2,0	64,8	4,9	17,8	4,8	82,6	2,8
	95.Perzentil	3,0	1,3	6,0	1,1	1,8	0,5	1,8	0,1	6,5	2,3	66,9	3,8	14,1	1,8	81,0	2,7
BMW 3er	5.Perzentil	0,7	0,8	4,3	1,9	2,8	1,1	2,3	0,3	4,0	2,0	72,8	3,9	13,2	3,5	86,0	3,0
	50.Perzentil	1,4	1,3	5,3	1,9	1,7	0,6	1,6	0,3	5,6	2,0	68,7	5,3	15,6	5,1	84,3	2,7
	95.Perzentil	2,4	1,3	5,4	1,2	1,7	0,7	1,9	0,1	6,4	2,8	69,7	2,9	12,6	1,7	82,3	3,1
BMW 7er	5.Perzentil	0,8	1,1	3,5	2,2	2,7	1,0	2,2	0,4	4,3	3,3	73,8	3,1	12,7	2,2	86,5	3,1
	50.Perzentil	1,0	1,1	4,5	1,7	1,8	0,4	1,9	0,3	5,9	2,1	68,2	4,9	16,8	5,0	85,0	3,2
	95.Perzentil	1,5	1,1	5,1	1,3	1,8	0,8	2,0	1,4	6,7	2,5	69,5	3,2	13,5	1,5	83,0	2,4

Werte in % vom Körpergewicht AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Tabelle 5-13 *detaillierte Darstellung der Belastung des Lenkrades in den drei Raumkoordinaten [% vom Körpergewicht]*

Belastung des Lenkrades in allen Raumkoordinaten

		Fahrerhaltung						Bremsbetätigung						Kupplungsbetätigung					
		x-Wert		y-Wert		z-Wert		x-Wert		y-Wert		z-Wert		x-Wert		y-Wert		z-Wert	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	-0,3	1,6	-0,7	0,8	-4,8	2,3	0,1	1,1	-0,8	1,3	-4,1	1,7	-0,1	1,5	0,2	0,6	-4,2	1,7
	50.Perzentil	-0,5	1,3	-0,3	0,5	-6,7	1,4	-0,7	1,9	-0,5	1,1	-7,2	2,2	-0,6	1,4	-0,4	1,1	-6,2	2,0
	95.Perzentil	-0,3	0,9	-3,1	1,2	-5,8	2,0	-0,8	1,2	-2,4	1,6	-6,9	2,6	-0,4	1,0	-2,1	1,5	-6,5	2,3
BMW 3er	5.Perzentil	-0,3	1,4	-0,8	0,9	-4,6	2,1	-0,4	1,3	-1,5	1,9	-3,8	1,6	0,0	1,4	0,5	1,1	-4,0	2,0
	50.Perzentil	-0,6	1,2	-0,3	0,7	-6,7	1,6	-1,2	1,5	-1,0	1,9	-6,4	2,7	-0,9	1,0	-0,4	1,8	-5,6	2,0
	95.Perzentil	-0,5	0,7	-3,0	1,3	-5,7	1,9	-1,0	1,2	-2,5	1,2	-6,3	2,5	-0,6	1,2	-1,6	1,4	-6,4	2,8
BMW 7er	5.Perzentil	0,0	1,1	-0,6	0,9	-4,4	2,0	-0,3	1,4	-1,4	1,9	-4,2	2,0	-0,5	1,9	0,2	1,3	-4,3	3,3
	50.Perzentil	-0,6	1,0	-0,4	0,9	-6,4	1,4	-0,9	1,2	-0,7	1,4	-7,0	2,3	-0,4	1,3	0,3	1,4	-5,9	2,1
	95.Perzentil	-0,3	0,9	-3,4	1,1	-5,9	2,3	-0,7	1,2	-2,8	1,7	-6,9	2,8	-0,4	1,2	-1,9	1,5	-6,7	2,5

Werte in % vom Körpergewicht AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

5.2.6 Zusammenfassung

Anhand der realen Daten konnte hinsichtlich der untersuchten Gelenkwinkel eine annähernd symmetrische Armhaltung trotz Lenkradversatz (Fröhmel, 2005) nachgewiesen werden. Die Haltung der Beine wird maßgeblich beeinflusst durch die Anordnung der Pedale im Fußraum, wodurch sich nicht zwangsläufig eine symmetrische Beinhaltung ergibt. Es wirkt sich hier der Pedaliererversatz (Fröhmel, 2005) auf die Hüft- und Kniewinkel aus.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass mit zunehmender Körpergröße die Beine, bezogen auf den Hüft- und Kniewinkel, stärker angewinkelt werden. Durch die sehr weit hinten und unten liegende Sitzposition im SVF von sehr großen Personen wird dies nicht kompensiert. Hier spielt die Erreichbarkeit des Lenkrades eine entscheidende Rolle. Dieses wird von den sehr großen Personen vorwiegend nach oben und ganz nach hinten eingestellt. Bei einer größeren Verstellmöglichkeit des Lenkrades nach hinten, zum Fahrer hin, wäre es möglich, dass sich die großen Personen im SVF noch weiter nach hinten positionieren, um so die Beine weiter ausstrecken zu können.

Bei den sehr kleinen Frauen des 5. Perzentils sind die Arme im Gegensatz zu den anderen beiden Versuchspersonengruppen stärker angewinkelt, was sich durch einen größeren Ellenbogenwinkel zeigt. Dies resultiert aus der sehr weit vorne liegenden Sitzposition im SVF. Dadurch ergibt sich zwangsläufig ein geringer Platz zwischen Fahrer und Lenkrad. Auch die Verstellung des Lenkrades innerhalb des LVF kann dies nicht beheben, bis auf zwei VPs stellen sie sich das Lenkrad ganz nach vorne oben ein. Bei einer größeren Verstellmöglichkeit des Lenkrades nach vorne, vom Fahrer weg, wäre es denkbar, dass die kleineren Personen ihre Arme weiter ausstrecken würden.

Bis auf sehr wenige Ausnahmen wurde weiterhin beobachtet, dass unabhängig von den untersuchten Fahrzeugen lediglich die obere Hälfte des LVF für die Einstellung des Lenkrades genutzt wird.

Ebenso kann festgehalten werden, dass je größer ein Fahrzeug ist (Reihenfolge: BMW Z4, BMW 3er, BMW 7er), desto weiter vorne sitzen die Personen im SVF. Dies wirkt sich auch auf die Augpunktlagen aus. In den beiden Limousinen sind diese

weiter vorn als im Roadster. Im BMW 7er liegen die Augpunkte im Vergleich zum BMW 3er etwas weiter hinten. Dies liegt zum einen an der ähnlichen Geometrie der beiden Fahrzeuge sowie an der flacheren Torsohaltung im BMW 7er (signifikante Unterschied nicht nachweisbar).

Ferner konnte eine flachere Torsohaltung des 50. Perzentils gegenüber den anderen beiden Versuchspersonengruppen beobachtet werden. Aufgrund dieser Tatsache ähneln ihre Augpunktlagen teilweise denen des 95. Perzentils. Es gibt hier wesentlich mehr Überschneidungen als mit dem 5. Perzentil.

Bei der Analyse der gemessenen Schnittstellenkräfte ergeben sich bei der Betätigung der Kupplung und der Bremse aufgrund der auf das jeweilige Pedal eingeleiteten Kraft teilweise deutliche Abweichungen gegenüber der Fahrerhaltung an den verschiedenen Schnittstellen. Die Sitzlehnenbelastung wird beim Kuppeln und Bremsen größer, die Sitzfläche dagegen bleibt im Mittel annähernd gleich. Änderungen bei den Fußkräften auf den Boden resultieren aus dem Anheben des Fußes beim Kuppeln oder Bremsen. Dadurch ergibt sich eine geringere Kraftübertragung auf die korrespondierende Bodenfläche des Kupplungs- oder Bremsbeines. Durch eine Ausgleichsbewegung des jeweils anderen Beines erhöht sich dabei die Belastung auf dessen Bodenfläche. Pedale und Fußstütze werden in z-Richtung zwischen den Haltungen ähnlich belastet. Ausnahme bildet das Bremspedal, da dieses aufgrund der nahezu orthogonalen Krafteinleitung einen geringeren Wert aufweist. Die Werte des Lenkrades in allen Raumkoordinaten bleiben annähernd gleich, bis auf den y-Wert bei der Kupplungshaltung, welcher im Vergleich zu den beiden anderen Haltungen sinkt.

5.3 Simulationen mit dem RAMSIS-KHM

Bei der Anwendung von RAMSIS ist es wichtig, den Anwendereinfluss so gering wie möglich zu halten und damit die Reproduzierbarkeit simulierter Haltungen zu gewährleisten. Das derzeitige eingesetzte Wahrscheinlichkeitsmodell berücksichtigt dies aufgrund der Haltungsoptimierung hinsichtlich Optimalwinkel. Ein restlicher Anwendereinfluss bleibt aber durch die Wahl der Restriktionen bestehen. Dem wirken RAMSIS-Anwendungsstandards (RAS), wie sie bei BMW verwirklicht und validiert sind, entgegen. Diese helfen und leiten den Anwender entsprechend der zu

simulierenden Haltung an. Dadurch ist sichergestellt, dass auch bei wechselnden Anwendern reproduzierbare Haltungen simuliert werden können.

Für das RAMSIS-KHM waren im Rahmen dieser Arbeit entsprechende Standards für den Einsatz im Produktentstehungsprozess abzuleiten, damit auch bei diesem neuen Berechnungsmodell reproduzierbare Haltungen garantiert sind. Dabei wurden die bereits für das WM bestehenden RAS verwendet und an das KHM entsprechend angepasst. Bei der Erstellung dieser Standards musste auf eine realitätsnahe Simulation geachtet werden, d. h., dass die Abweichung zwischen realer Haltung und simulierter Haltung gering sein muss. Dieser Aspekt ist zentraler Bestandteil der vorliegenden Arbeit und wird ausführlich in Kapitel 5.4 dargestellt.

Während der Simulationen mit dem RAMSIS-Krafthaltungsmodell hat sich herausgestellt, dass schon eine intuitive Wahl der Restriktionen und Kraftkoppelpunkte (KOP) zu realistischen Haltungen führt. Dabei sollte das Haltungsmodell möglichst wenig eingeschränkt werden, damit keine erzwungenen Haltungen entstehen. Es gilt daher der Grundsatz: „So wenig Restriktionen und KOP wie möglich, aber so viele wie nötig“.

Einige grundlegende Besonderheiten gibt es im Umgang mit dem KHM zu beachten. Dies betrifft die Definition von Restriktionen und Kraftkoppelpunkten sowie die Beachtung der Vorpositionierung (Fröhmel, 2008c).

Restriktionen

Die an das KHM zu stellenden Restriktionen werden in der gleichen Art und Weise definiert wie das bei dem RAMSIS-WM der Fall ist. Für eine Fahrerhaltung heißt das im Wesentlichen Hände an das Lenkrad, Füße auf den Boden bzw. auf das Fahrpedal und die Fußstütze sowie H-Punkt in das Sitzverstellfeld.

Bei den Händen ist gegenüber dem WM eine weitere Restriktion notwendig. Aufgrund der Schwerkraft sind bei der simulierten Endhaltung die Arme nach innen bzw. nach unten gekippt, so dass die Hände nach außen gedreht werden. Somit wird keine reale Hand-Arm-Haltung generiert. Mit einer Richtungsrestriktion oder einer zweiten Zielbedingung je Hand kann dieses Problem gelöst werden (Abbildung 5-31).

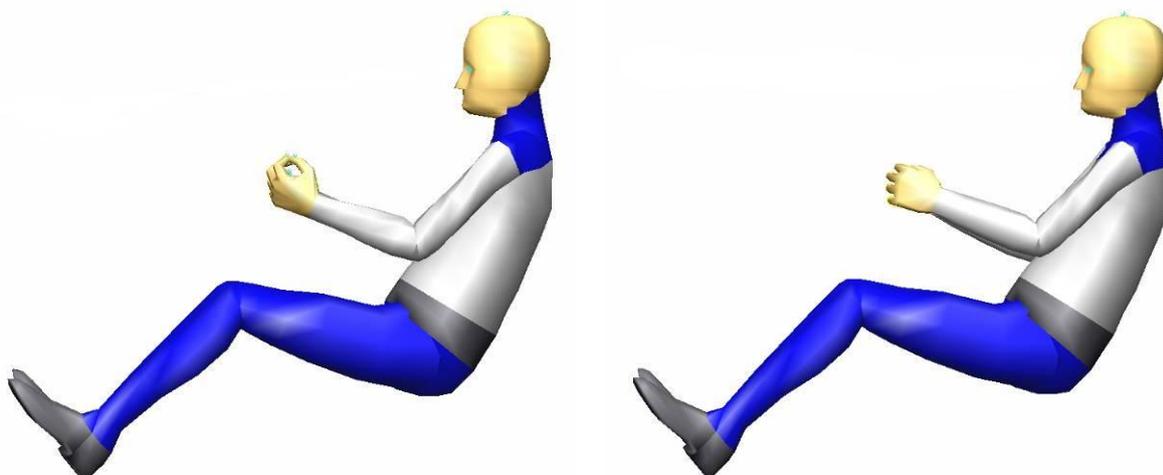


Abbildung 5-31 links: Hand-Arm-Haltung ohne Zusatzrestriktion
rechts: Hand-Arm-Haltung mit Zusatzrestriktion

Weiterhin ist zu beobachten, dass dem Torsowinkel bei der Haltungsoptimierung eine große Bedeutung beigemessen wird. Grundsätzlich hat die Endhaltung eine wesentlich flachere Torsoneigung als dies in der Realität beobachtet werden konnte (Abbildung 5-32). Um dies zu kompensieren wird eine Fläche als Zielbedingung für die Augen eingeführt. Diese basiert auf allen realen Augpunktlagen die während der Versuche beobachtet wurden (Reitmeier, 2008). Die mit zusätzlicher Augpunktfläche simulierte Haltung ist der Realhaltung in Abbildung 5-32 gegenübergestellt. Erkennbar ist weiterhin eine flachere Positionierung des Rückens. Ursache ist die Möglichkeit zur freien Positionierung der Augen innerhalb der vorgegebenen Fläche. Da dem Torso besondere Bedeutung bei der Haltungssimulation zukommt, versucht das Modell einen großen Torsowinkel zu realisieren und legt daher den Augpunkt in der Augpunktfläche sehr weit nach hinten.

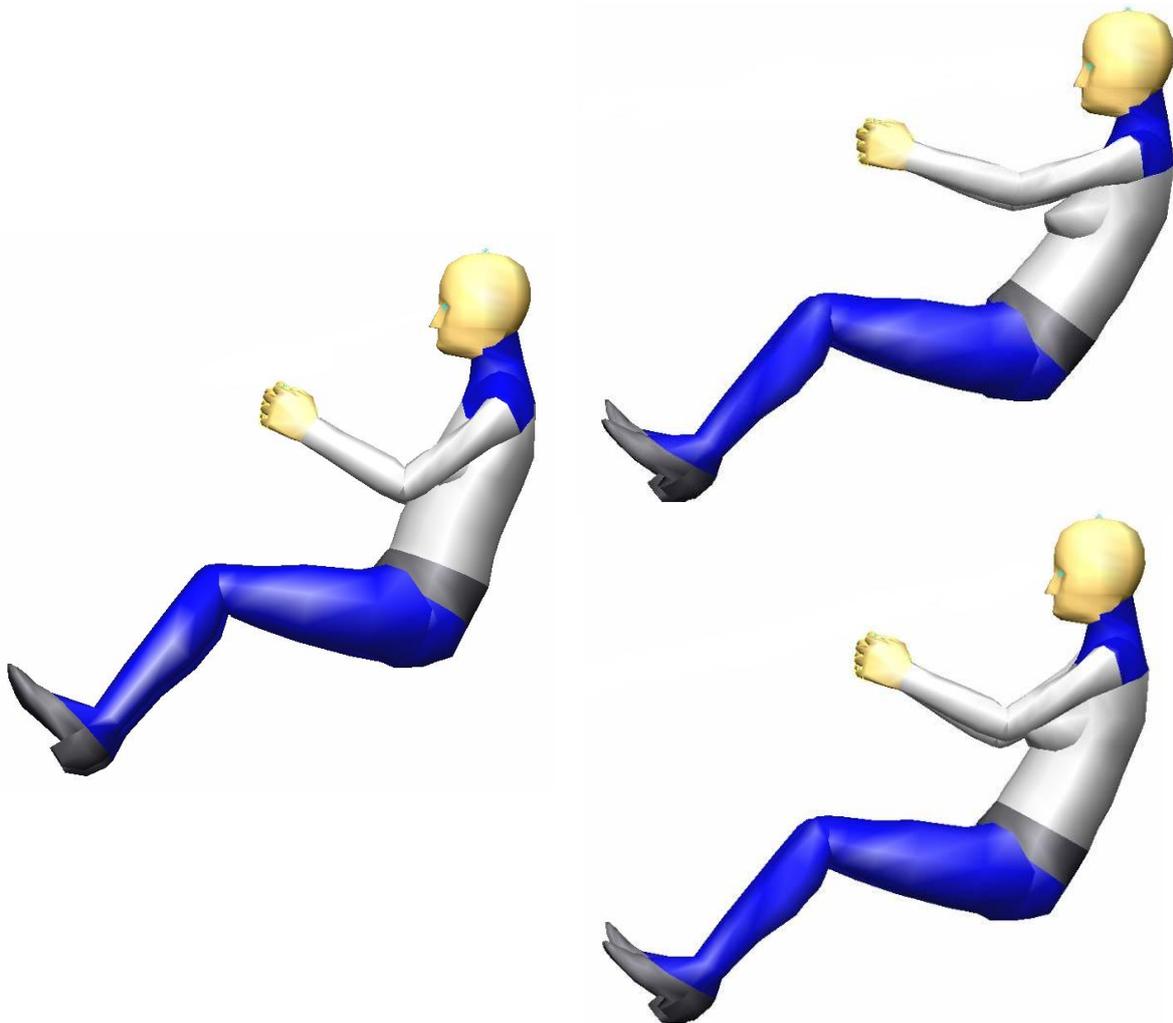


Abbildung 5-32 *links: Realhaltung der kleinen Frau
rechts oben: simulierte Haltung ohne Augpunktfläche
rechts unten: simulierte Haltung mit Augpunktfläche*

Kraftkoppelpunkte (KOP)

Wie in Kapitel 2.2 erläutert werden zur mechanischen Koppelung des RAMSIS Manikins an die Umgebung punktförmige Koppellemente, Kraftkoppelpunkte genannt, zur Verfügung gestellt. Über diese Punkte erfolgt die Kraftübertragung aufgrund der Gewichtskraft und ggf. vorhandener äußerer Kräfte an die Umgebung. KOP werden überall dort am Manikin gesetzt, wo eine Verbindung zwischen Mensch und Umgebung bei einer bestimmten Haltung vorhanden ist. Dabei können beliebige RAMSIS Körperpunkte als KOP definiert werden.

Aufgrund der Reduzierung von Flächenbelastungen zu Punktbelastungen, z. B. im Rücken und Gesäß, liegt die Vermutung nahe, mehrere KOP für die annähernde Simulation einer Fläche zu definieren. Es zeigte sich aber während der Haltungssimulationen, dass dies nur unwesentliche Änderungen der berechneten Haltung zur Folge hat. Jeweils zwei KOP am Rücken und am Gesäß sind daher ausreichend. Auch die lokale Variation der KOP bewirkt nur marginale Änderungen der Haltung. In Abbildung 5-33 und Abbildung 5-34 sind geeignete KOP für die Fahrerhaltung dargestellt.

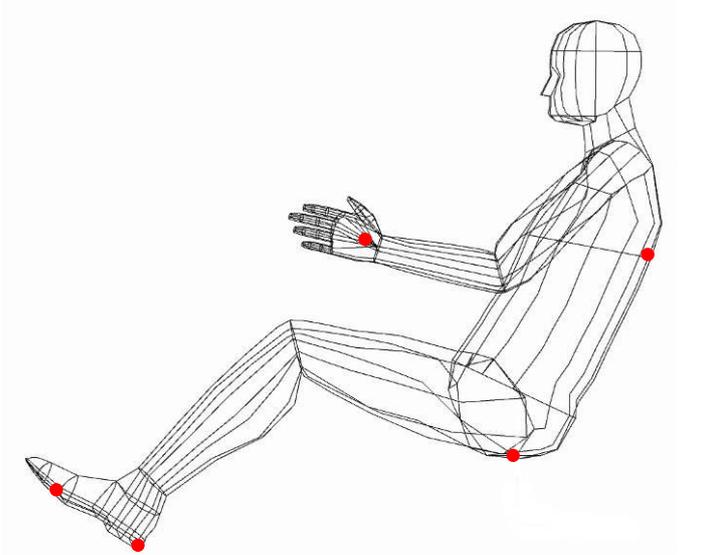


Abbildung 5-33 *Mögliche Kraftkoppelpunkte für die Fahrerhaltung in der Seitenansicht*

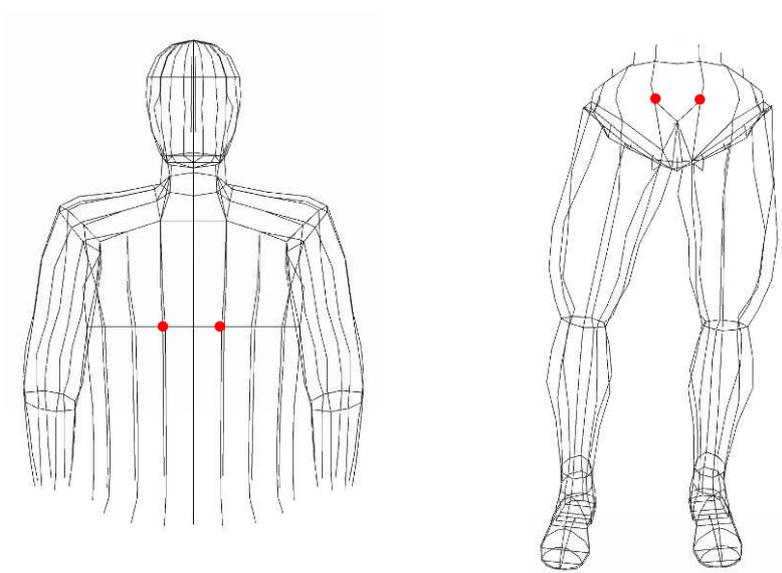
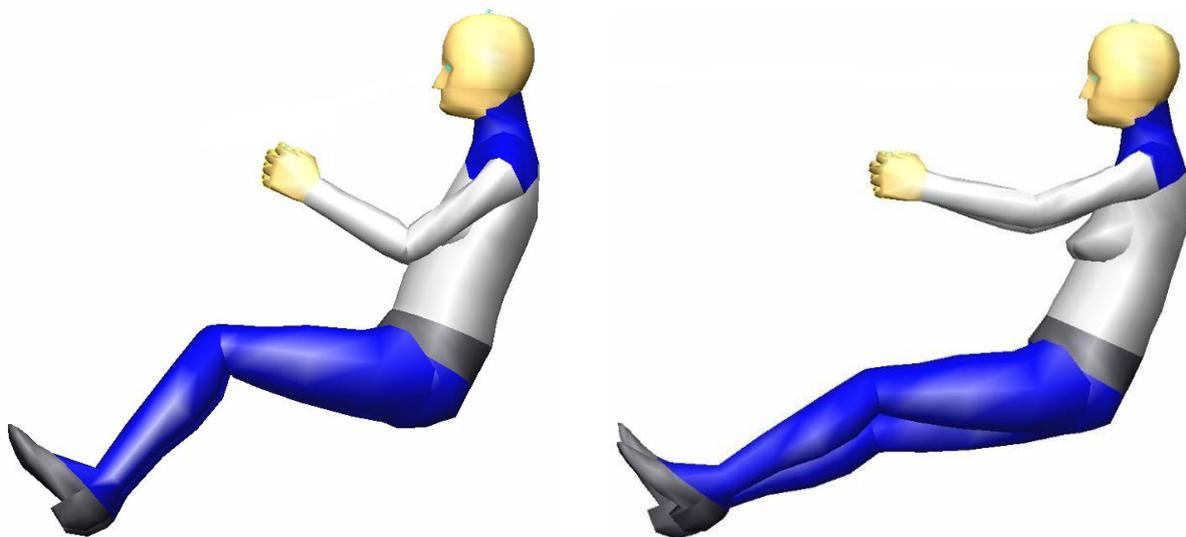


Abbildung 5-34 *Mögliche Kraftkoppelpunkte für die Fahrerhaltung im Rücken- und Gesäßbereich*

Vorpositionierung

Bei Simulationen mit RAMSIS ist es vorteilhaft von einer definierten Starthaltung zu beginnen, welche der Zielhaltung weitestgehend entsprechen sollte. Ansonsten ist es möglich, dass die Haltungssimulation nicht erfolgreich beendet werden kann. Im WM wird die Vorpositionierung automatisch durchgeführt, mit Hilfe der jeweiligen Neutralhaltung (Abbildung 2-2). Die Vorpositionierung im KHM steht derzeit noch nicht zur Verfügung, weshalb die neutrale Haltung des WM Auto als Starthaltung eingestellt wird. Durch die Verbindung von KHM und WM an dieser Stelle mit einer automatischen Vorpositionierung ohne Wechsel des Haltungsmodells wäre es möglich dieses Defizit zu beseitigen.

Bei Simulation der Fahrerhaltung aus der neutralen Haltung des WM ergibt sich die in Abbildung 5-35 rechts dargestellte Haltung. Erkennbar sind deutliche Unterschiede im Vergleich zur Realhaltung, vor allem im Bereich der Beine, da hier mit größerem Winkel die Gelenkbelastung reduziert wird.



*Abbildung 5-35 links: Realhaltung der kleinen Frau
rechts: simulierte Haltung auf Basis der Neutralhaltung
des WM Auto*

Mit dieser Haltung ist aber die Erreichbarkeit des Brems- und Kupplungspedals nicht mehr gewährleistet. Aus diesem Grund ist die Vorpositionierung mit einer Kupplungsbetätigung durch das KHM notwendig.

Ausgehend von der neutralen Haltung des WM Auto als Starthaltung wird eine Kupplungssituation simuliert. Dabei wird am linken Fuß zusätzlich zu den Zielrestriktionen eine mittlere Pedalkraft von 100N definiert. Anschließend wird die Position des H-Punktes fixiert. Bei der anschließenden Neuberechnung der Fahrerhaltung werden dann realistische Haltungen erzielt (vgl. Abbildung 5-32 rechts unten).

5.4 Vergleich von realen und simulierten Haltungen

Für die Vergleichbarkeit von Realität und Simulation werden geeignete Parameter und Restriktionen für die Simulation vorausgesetzt. Die Simulationsrechnungen mit dem WM basieren daher auf den BMW internen Restriktionsrichtlinien, welche speziell für die Fahrzeugauslegung entwickelt und validiert wurden. Für die Simulationen mit dem KHM sind geeignete Richtlinien und Parameter auf dieser Basis und anhand der in dieser Arbeit vorgestellten Versuche abgeleitet worden. Dabei sollen die Restriktionen möglichst einfach gewählt werden, das RAMSIS Manikin so wenig wie möglich einschränken sowie fahrzeug- und anthropometrie-unabhängig anwendbar sein.

Realität und Simulation werden miteinander verglichen, indem die jeweiligen Gelenkwinkel, die H-Punkt-Lagen, die Augpunktpositionen sowie die Schnittstellenkräfte einander gegenübergestellt werden. Aufgrund der unveränderten Restriktionen von KHM und WM zur Positionierung der Hände wird bei diesen auf einen Vergleich verzichtet. Für eine Aussage zur Güte der Simulation wird die Treffsicherheit beider RAMSIS Modelle anhand der realen Gelenkwinkelstrebereiche sowie der Kraftstrebereiche untersucht.

5.4.1 Gelenkwinkelabweichung zwischen Realität und Simulation

Für den direkten Vergleich zwischen simulierten Haltungen und in der Realität beobachteten Haltungen dient die relative Abweichung A_r , bezogen auf die Gelenkwinkel. Dieser Wert berechnet sich aus dem Quotienten der Summe der Beträge der Winkeldifferenzen zwischen Simulation und Realität (Dividend) und der Summe des physiologisch möglichen Bewegungsbereiches (Divisor).

$$A_r = \frac{\sum_{i=1}^n |\alpha_{i\text{Simulation}} - \alpha_{i\text{Real}}|}{\sum_{i=1}^n |\alpha_{i\text{max}} - \alpha_{i\text{min}}|} \cdot 100$$

n Anzahl der Freiheitsgrade

$\alpha_{i\text{Simulation}}$ prognostizierter Gelenkwinkel aus der Simulation

$\alpha_{i\text{Real}}$ real beobachteter Gelenkwinkel

$\alpha_{i\text{max}}$ maximaler physiologischer Gelenkwinkel

$\alpha_{i\text{min}}$ minimaler physiologischer Gelenkwinkel

Bei der Berechnung der relativen Abweichung werden in dieser Arbeit alle Gelenkwinkel und deren Freiheitsgrade mit Ausnahme der Hände berücksichtigt. Ob die Haltungsberechnung akzeptabel ist, wird durch einen Vergleich mit dem von Seidl (Seidl, 1994; Marach, 1999) aufgestellten Kriterium von $A_r \leq 12\%$ beurteilt. Je geringer die relative Abweichung ist, desto realitätsnäher ist die simulierte Haltung.

Nachfolgend sind die relativen Abweichungen für die individuell eingestellte Fahrerhaltung (Abbildung 5-36) sowie für Brems- (Abbildung 5-38) und Kupplungshaltung (Abbildung 5-39) dargestellt. Die dazu gehörenden Stichprobenumfänge sind in Tabelle 5-14 angegeben.

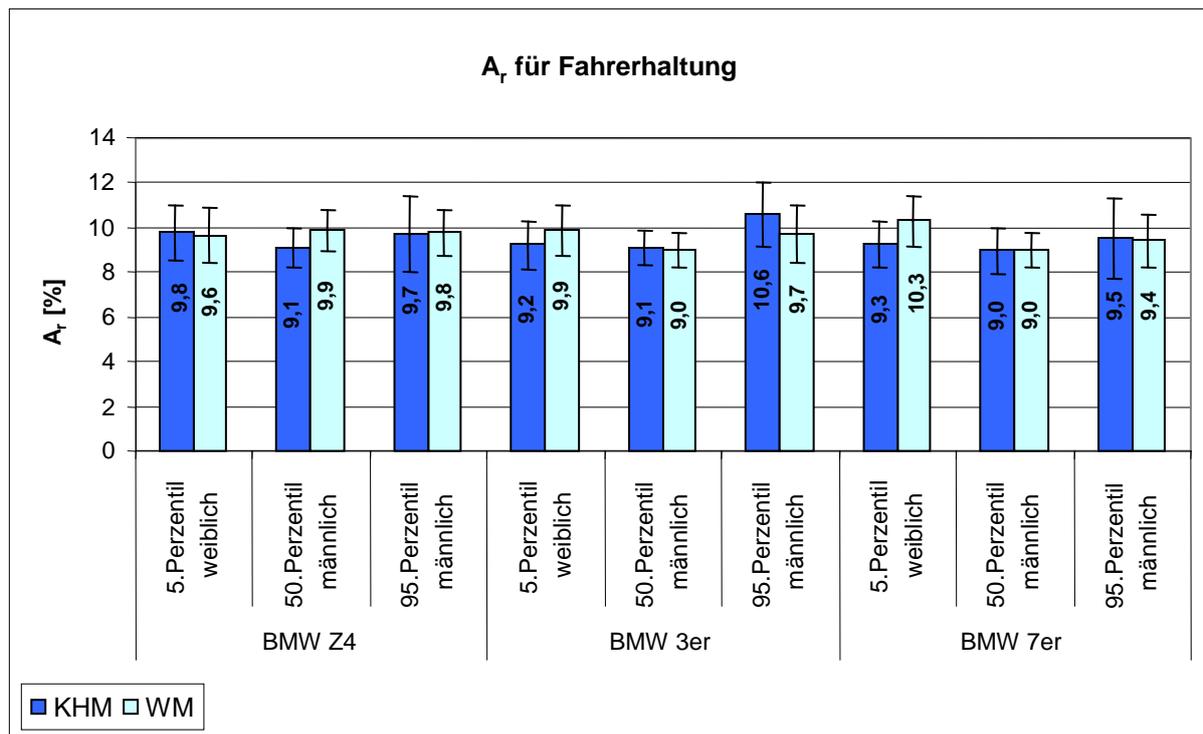


Abbildung 5-36 Prüfkriterium A_r für die Fahrerhaltung

Bei der individuell eingestellten Fahrerhaltung liegen die relativen Abweichungen beider Haltungsmodelle unter 11%, was bedeutet, dass die Haltungsprognosen von KHM und WM gleichermaßen akzeptabel sind. Dabei liegt die größte Abweichung mit 10,6% beim KHM (95. Perzentil, BMW 3er) und die geringste mit 9,0% beim WM (50. Perzentil, BMW 3er und BMW 7er) wie auch bei dem KHM (50. Perzentil, BMW 7er). Signifikante Unterschiede zwischen KHM und WM der relativen Abweichung existieren für das 50. Perzentil im BMW Z4, für das 5. Perzentil im BMW 3er und 7er sowie für das 95. Perzentil im BMW 3er (jeweils α -Fehler=0,000). Bis auf das 95. Perzentil im BMW 3er liefert das KHM geringere Werte und produziert damit realitätsnähere Haltungen als das WM. Alle anderen Vergleiche zwischen KHM und WM bezogen auf A_r (5. Perzentil BMW Z4, 50. Perzentil BMW 3er und 7er, 95. Perzentil BMW Z4 und BMW 7er) sind nicht signifikant unterschiedlich bzw. gleich bei einem α -Fehler > 0,387.

Eine Koppelpunktvariation mit Hilfe der aus den Folienmessmatten gewonnenen Daten hinsichtlich der Schwerpunktlagen wurde exemplarisch für das 50. Perzentil im BMW 3er durchgeführt. In allen Fällen stellte sich eine Verschlechterung des

Prüfkriteriums ein ($\varnothing +0,8\%$), siehe Abbildung 5-37. Die VPs, bei denen RAMSIS nach der Haltungsberechnung „maximale Anzahl an Iterationen“ anzeigte, sind in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt. Aufgrund der Verschlechterung wird auf weiterführende Untersuchungen von Koppelpunktvariationen an dieser Stelle verzichtet.

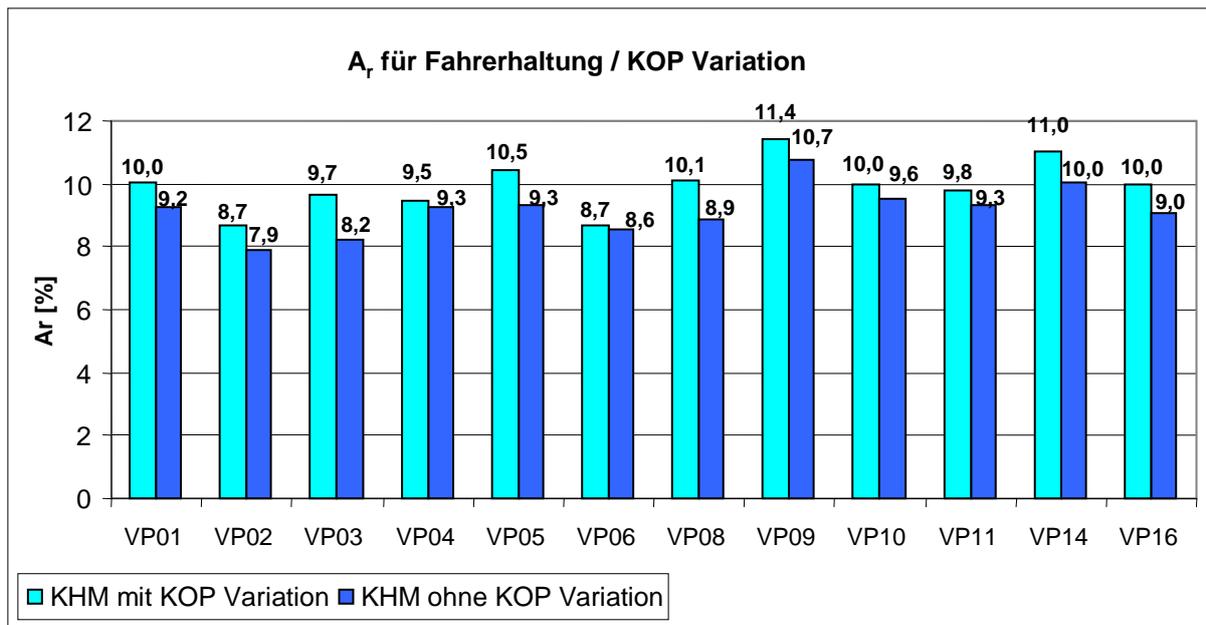


Abbildung 5-37 Prüfkriterium A_r für die KOP Variationen am Beispiel des 50. Perzentils

Die Werte für A_r bei der Bremshaltung (Abbildung 5-38) sind im Mittel ca. 1-2% höher als die der Fahrerhaltung. Dabei liegt die geringste relative Abweichung bei 10,3% beim KHM (5. Perzentil, BMW 3er), die größte bei 12,2% beim WM (50. Perzentil, BMW Z4). Letzt genannte Abweichung liegt über dem Wert für eine akzeptable Haltungsberechnung. Lediglich in zwei Fällen liefert das KHM geringfügig schlechtere Ergebnisse (jeweils +0,1% beim 5. Perzentil im BMW Z4 und beim 95. Perzentil BMW 3er). Der Vergleich zwischen KHM und WM bzgl. der relativen Gelenkwinkelabweichung liefert bei dieser Haltung lediglich für das 50. Perzentil im BMW Z4 einen signifikanten Unterschied (α -Fehler=0,001). Für das 5. Perzentil im BMW 3er und 7er kann keine statistische Aussage getroffen werden. Alle anderen Vergleiche können statistisch als gleich angesehen werden.

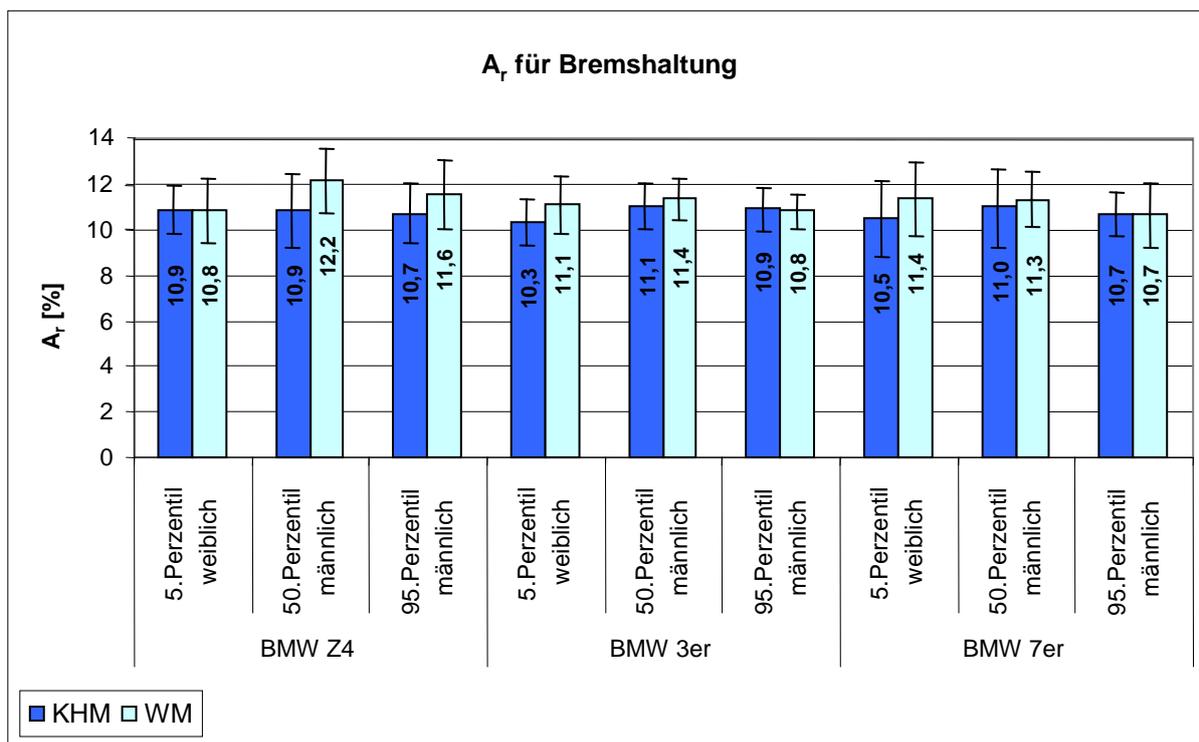


Abbildung 5-38 Prüfkriterium A_r für die Bremshaltung

Auch bei der Kupplungshaltung liefert die Haltungssimulation mit dem KHM, mit Ausnahme des 5. Perzentils im BMW Z4, geringere Werte für die relative Abweichung als das WM (Abbildung 5-39). Dabei liegt der kleinste Wert bei 9,9% beim KHM und der größte bei 11,4 beim WM. Der Vergleich der relativen Abweichung zwischen KHM und WM liefert hier lediglich für das 50. Perzentil im BMW 3er einen signifikanten Unterschied (α -Fehler=0,039). Für das 50. Perzentil im BMW Z4 sowie für das 5. Perzentil im BMW 7er kann keine statistische Aussage gemacht werden. Alle anderen Vergleiche können statistisch als gleich angesehen werden.

Die Werte für A_r liegen bei KHM und WM mit je einer Ausnahme bei der Kupplungshaltung niedriger als bei der Bremshaltung, aber generell höher als bei der Fahrerhaltung.

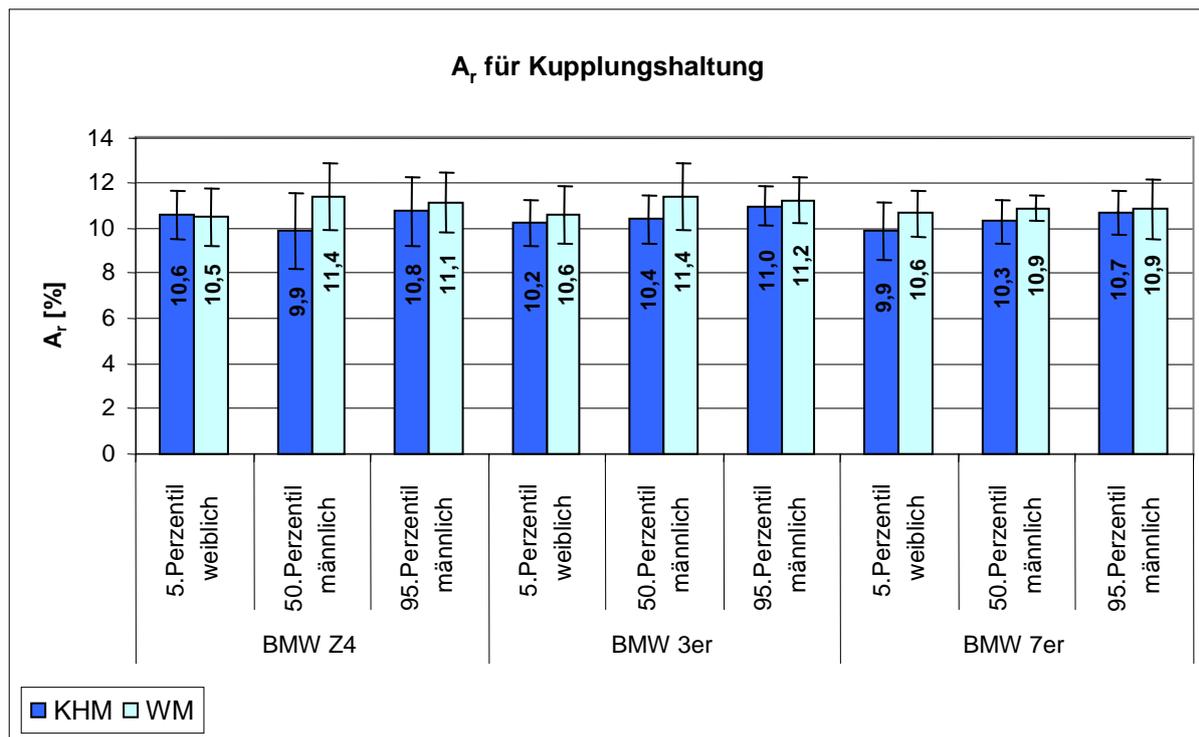


Abbildung 5-39 Prüfkriterium A_r für die Kupplungshaltung

Die vorwiegend höheren Werte der relativen Abweichung des WM bei den Brems- und Kupplungshaltungen sind vermutlich in den Wahrscheinlichkeitsfunktionen jedes Gelenkwinkels begründet. Für die Berechnung der Haltung wird dabei, wie bei der Fahrerhaltung, versucht an die wahrscheinlichste Gelenkwinkelstellung heranzukommen. Diese wahrscheinlichen Gelenkwinkel unterscheiden aber nicht zwischen diesen Aufgaben, so dass zur Simulation von Brems- und Kupplungshaltungen stets die gleichen Wahrscheinlichkeitsfunktionen wie bei der Vorhersage von Fahrerhaltungen verwendet werden.

Gerade die Werte der relativen Abweichung für die Brems- und Kupplungshaltung zeigen die bessere Verwendbarkeit des KHM für Haltungsprognosen, die nicht der normalen Fahrerhaltung entsprechen.

Tabelle 5-14 Stichprobenumfänge der Gelenkwinkelabweichung zwischen Realität und Simulation

		Fahrerhaltung		Bremshaltung		Kupplungshaltung	
		KHM	WM	KHM	WM	KHM	WM
BMW Z4	5.Perzentil	96	96	9	9	9	9
	50.Perzentil	81	81	9	9	9	9
	95.Perzentil	72	72	9	9	9	9
BMW 3er	5.Perzentil	95	95	9	9	9	9
	50.Perzentil	81	81	9	9	9	9
	95.Perzentil	70	70	9	9	9	9
BMW 7er	5.Perzentil	96	96	9	9	9	9
	50.Perzentil	81	81	9	9	9	9
	95.Perzentil	71	71	9	9	9	9

5.4.2 Treffsicherheit der RAMSIS Simulationen hinsichtlich der Gelenkwinkelstrebereiche

Für eine Aussage hinsichtlich der Güte der RAMSIS Simulationen kann neben dem Kriterium A_r auch die Treffsicherheit der Haltungsmodelle innerhalb der realen Gelenkwinkelstrebereiche der jeweiligen Versuchspersonengruppe untersucht werden. Dazu findet eine gesonderte Auswertung der in Kapitel 5.2.1 dargestellten Gelenkwinkel statt. Untersucht wird, in wie viel Prozent der Fälle die in der Simulation berechneten Gelenkwinkel innerhalb des Streubereichs der real ermittelten Gelenkwinkel liegen. Betrachtet werden dabei die Simulation des RAMSIS-KHM und des RAMSIS-WM. Abbildung 5-40 zeigt dazu das Ergebnis für die individuell eingestellte Fahrerhaltung unter Einbeziehung aller VPs, unabhängig von Anthropometrie und Fahrzeug.

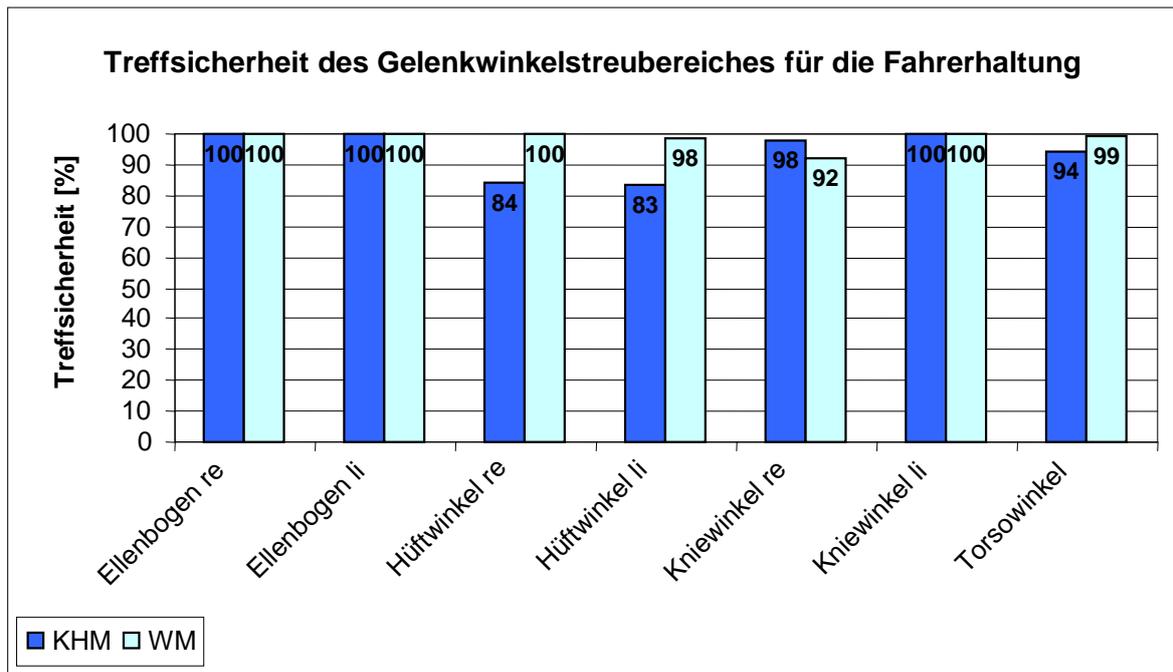


Abbildung 5-40 Prozentuale Trefferquote des Gelenkwinkelstrebereiches von RAMSIS-KHM und RAMSIS-WM für die individuell eingestellte Fahrerhaltung

Es zeigt sich, dass beide Berechnungsmodelle den Gelenkwinkelstrebereich der VPs sehr gut treffen, teilweise sogar zu 100%. Eine leichte Überlegenheit des WM ist erkennbar, insbesondere bei den Hüftwinkeln.

In Abbildung 5-41 ist die Trefferquote der beiden RAMSIS Modelle für die Betätigung der Kupplung dargestellt. Gegenüber der Fahrerhaltung ist ein starker Rückgang der prozentualen Trefferquote zu erkennen. Defizite beim RAMSIS-KHM im Vergleich zum RAMSIS-WM sind beim Hüftwinkeln rechts zu finden. Bei den übrigen Gelenkwinkeln ist das KHM, bis auf den rechten Kniewinkel und dem linken Hüftwinkel, besser oder gleich gut. Bei beiden Modellen sind Schwächen im linken Bein (Hüftwinkel links und Kniewinkel links), das zum Treten der Kupplung benötigt wird, zu erkennen, wobei die Modelle hier in etwa gleich liegen.

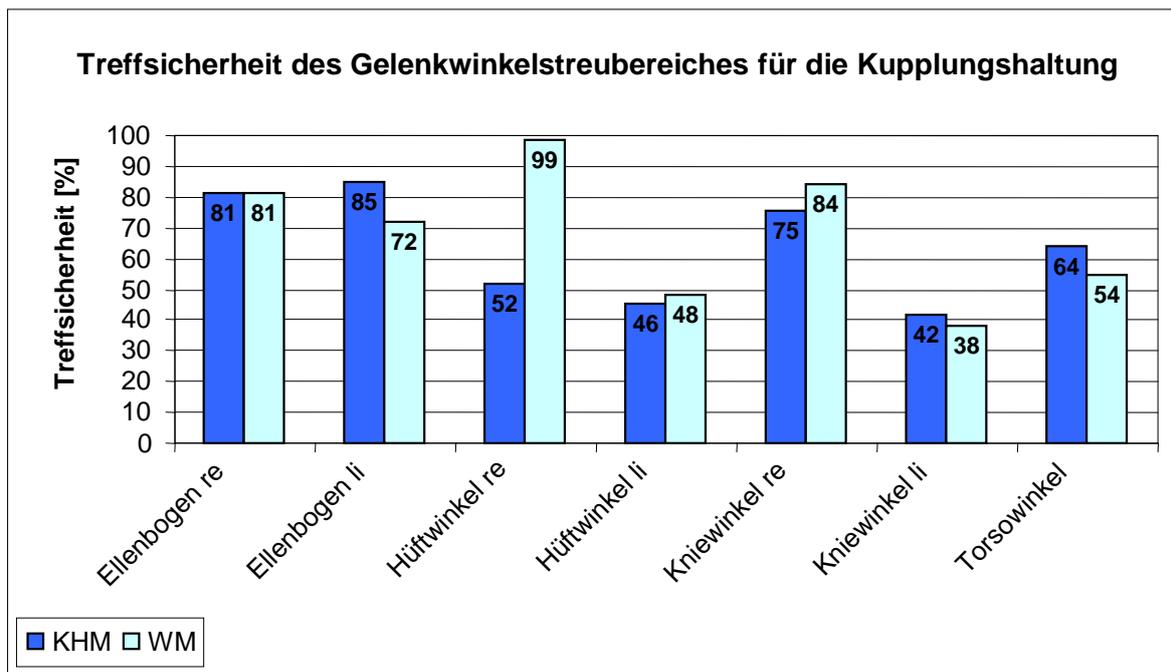


Abbildung 5-41 Prozentuale Treffericherheit des Gelenkwinkelstreubereiches von RAMSIS-KHM und RAMSIS-WM für die Betätigung der Kupplung

Die Treffericherheit für die dritte untersuchte Haltung, Betätigung der Bremse, ist in Abbildung 5-42 dargestellt. Gut erkennbar sind die schlechten Werte des KHM im rechten Bein, das zum Bremsen benötigt wird. Dagegen liegen die Werte für den Torsowinkel sowie für die Winkel der Ellenbogen im Vergleich zum WM höher oder auf gleichem Niveau. Die Trefferquote des KHM liegt beim linken Bein unter den Werten des WM, wobei die Simulationen der beiden Modelle den Streubereich des linken Kniewinkels gegenüber allen anderen Gelenkwinkeln bei dieser Haltung am häufigsten treffen.

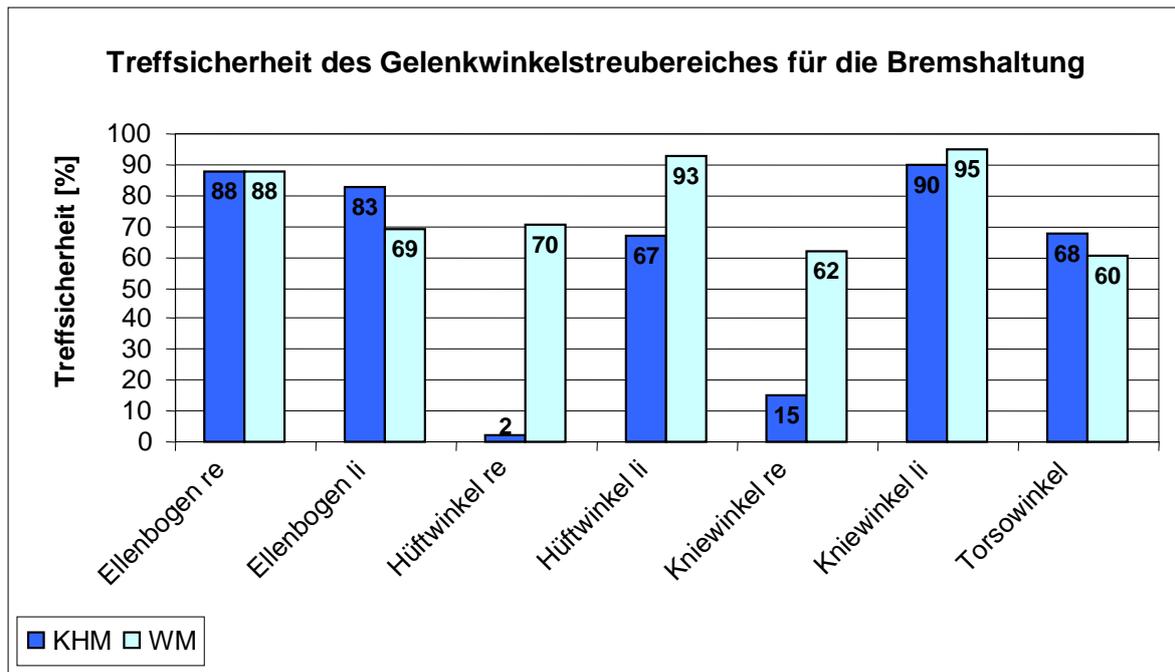


Abbildung 5-42 *Prozentuale Treffsicherheit des Gelenkwinkelstreubereiches von RAMSIS-KHM und RAMSIS-WM für die Betätigung der Bremse*

Für eine detailliertere Betrachtung sind in Anhang C – Treffsicherheit der Gelenkwinkelstreubereiche – die jeweiligen prozentualen Werte der drei untersuchten Haltungen getrennt nach Fahrzeugen und Anthropometrien in Tabellenform dargestellt.

Insgesamt ergeben sich für das KHM erkennbare Defizite im Bereich der Beine, vor allem an dem jeweils beim Treten des Pedals beteiligten Bein, wie es auch in den vorherigen Abbildungen gezeigt wurde. Die Ursache liegt in der häufig weiter hinten liegenden Sitzposition in der Simulation, erkennbar durch die Positionen der H-Punkte (vgl. Kapitel 5.4.3). Demzufolge ergeben sich erhöhte Winkelabweichungen gegenüber der Realität. Weiterhin wird durch das Optimierungskriterium der Simulation des Krafthaltungsmodells das jeweils zum Kuppeln oder Bremsen benötigte Bein, aufgrund der extern angreifenden Kraft möglichst weit ausgestreckt (Abbildung 5-43). Dadurch ergibt sich insgesamt eine geringere Belastung in den Gelenken, aber eine größere Gelenkwinkelabweichung zur Realität. Zusätzlich wird die Sitzfläche beim KHM nicht in die Haltungsberechnung mit einbezogen, wodurch sich unter Umständen eine Durchdringung des Oberschenkels mit dem Sitzkissen ergeben kann und somit zur Realität abweichende Gelenkwinkel

entstehen können. Auch das WM zeigt hier Defizite, wie in Abbildung 5-43 zu sehen ist. Aufgrund der Optimierung anhand hinterlegter Wahrscheinlichkeitsfunktionen werden die Beine nach dem Haltungsmodell Auto (Abbildung 2-2) optimiert, welches keine Betätigung mit dem linken Fuß vorsieht.

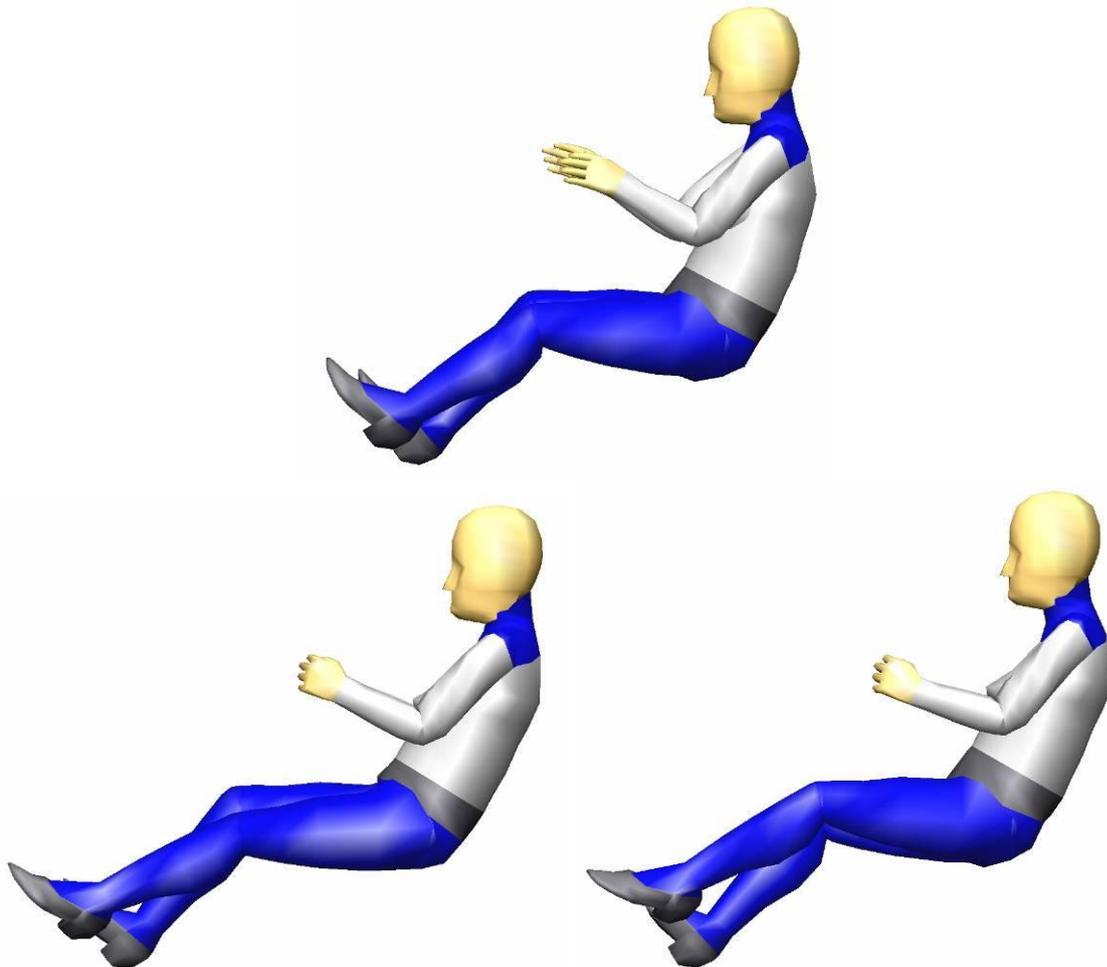


Abbildung 5-43 *oben: reale Kupplungshaltung einer kleinen Frau, BMW 3er*
unten li: Simulation mit dem KHM
unten re: Simulation mit dem WM

5.4.3 Vergleich der H-Punkt-Lagen

Die H-Punkt-Lagen der RAMSIS Simulationen mit dem WM und dem KHM im Vergleich zu den real beobachteten Sitzpositionen in den jeweiligen Fahrzeugen sind Abbildung 5-44 bis Abbildung 5-46 zu entnehmen. Dabei symbolisieren Dreiecke die resultierenden Positionen durch das WM, Kreise stehen für das KHM. Die größeren Symbole zeigen die mittlere H-Punkt-Lage der verschiedenen Versuchsgruppen. Für Vergleichszwecke sind die realen H-Punkt-Lagen (vgl. Kapitel 5.2.2) als Rauten dargestellt. Aufgrund der BMW internen Restriktionen für das WM liegen die H-Punkt Positionen für das 5. Perzentil auf der obersten Linie des SVF sowie für das 50. und 95. Perzentil auf der untersten Linie des SVF. Das KHM dagegen konnte die Haltung mittels freier Positionswahl im SVF optimieren. Die jeweiligen Stichprobenumfänge sind in Tabelle 5-16 dargestellt.

Die statistische Analyse zeigt für beide H-Punkt Koordinaten (x- und z-Richtung) signifikante Unterschiede für beide Modelle gegenüber der Realität. Der Vergleich von KHM und Realität für die x-Koordinate liefert für das 50. Perzentil im BMW 3er und das 95. Perzentil im BMW 7er keine signifikanten Unterschiede. Die Werte von Realität und KHM können hier mit einem α -Fehler $>0,247$ als gleich angesehen werden. Alle anderen Vergleiche von Realität und KHM liefern signifikante Unterschiede mit einem α -Fehler $<0,020$. Die Simulationen mit dem WM liefern lediglich für das 95. Perzentil im BMW 7er gegenüber der Realität gleiche Werte für die x-Koordinate mit einem α -Fehler $=0,399$. Für das 50. Perzentil in allen Fahrzeugen sowie für das 5. Perzentil im BMW 7er kann keine statistische Aussage getroffen werden. Alle übrigen Vergleiche weisen signifikante Unterschiede auf (α -Fehler $<0,017$). Für die z-Koordinate liefert der Vergleich zwischen Realität und KHM nur für das 5. Perzentil im BMW 3er keinen signifikanten Unterschied. Die Werte können mit einem α -Fehler $=0,214$ als gleich angesehen werden. Für das 5. Perzentil im BMW Z4 kann keine Aussage getroffen werden. Alle anderen Vergleiche liefern höchstsignifikante Unterschied mit einem α -Fehler $=0,000$. Die H-Punkte des WM gegenüber der Realität für die z-Koordinate weisen lediglich für das 5. Perzentil im BMW Z4 keinen signifikanten Unterschied auf und gelten mit einem α -Fehler $=0,340$ als gleich. Für das 95. Perzentil im BMW 3er kann keine Aussage gemacht werden. Alle anderen Vergleiche liefern mit einem

α -Fehler $< 0,040$ statistisch signifikante Unterschiede. Wenn die simulierten H-Punkte beider Modelle nachweislich mit den realen H-Punkten übereinstimmen, müsste der Vergleich von Realität und Simulation für beide Koordinaten gleichzeitig einen α -Fehler $> 0,2$ liefern. Dies ist jedoch nicht der Fall. Die simulierten H-Punkte beider Modelle stimmen somit nicht mit der Realität überein.

Für den BMW Z4 (Abbildung 5-44) ist erkennbar, dass die resultierenden H-Punkt-Lagen des KHM für das 50. und 95. Perzentil gegenüber der Realität viel zu hoch sind. Beim 5. Perzentil dagegen hat die Höhenlage lediglich geringfügige Abweichungen. Die Sitzposition ist hier wie auch beim 50. Perzentil zu weit hinten. Das 95. Perzentil dagegen sitzt in der Realität weiter hinten, als es die Simulation mit dem KHM errechnet. Bis auf eine Ausnahme (5. Perzentil, z-Wert) sind in diesem Fahrzeug die Abweichungen der H-Punkt Positionen des WM im Vergleich zur Realität geringer als die des KHM (vgl. Tabelle 5-15).

Im BMW 3er (Abbildung 5-45) sind die Abweichungen der H-Punkt-Lagen der simulierten Haltungen des KHM im Vergleich zu den realen Positionen für das 50. und 95. Perzentil am größten, für das 5. Perzentil am kleinsten. Auch hier sind, wie beim Roadster, die wesentlich höheren Sitzpositionen des KHM für die Männer erkennbar. Die Positionen des WM sind für das 50. und 95. Perzentil besser, für das 5. Perzentil schlechter als die des KHM (vgl. Tabelle 5-15).

Die realen H-Punkt-Lagen im BMW 7er (Abbildung 5-46) liegen grundsätzlich weiter vorn als die der Simulationen. Generell sind bei diesem Fahrzeug geringere Positionsabweichungen im Vergleich zur Realität für das WM gegenüber dem KHM zu vermerken (vgl. Tabelle 5-15).

Insgesamt ist zu verzeichnen, dass die Simulationen beider Modelle innerhalb des Streubereiches der realen H-Punkt-Lagen liegen. Eine Ausnahme besteht bei dem 95. Perzentil, simuliert mit dem KHM. Bis auf wenige Ausnahmen sitzen die Personen dieser Gruppe in der Realität auf der untersten Linie des SVF. Durch eine Haltungssimulation mit dem KHM bei freier Positionswahl des H-Punktes innerhalb des SVF sind die realen Positionen nicht erreichbar. Eine entsprechende Restriktionsanpassung kann an dieser Stelle Abhilfe schaffen: als Zielrestriktion für den H-Punkt statt der gesamten SVF-Fläche die unterste Linie des SVF verwenden. Ähnliches gilt für das 50. Perzentil. Insgesamt ist festzuhalten, dass die

H-Punkt-Lagen bis auf das 5. Perzentil im BMW Z4 und im BMW 3er vom WM besser wiedergegeben werden als vom KHM.

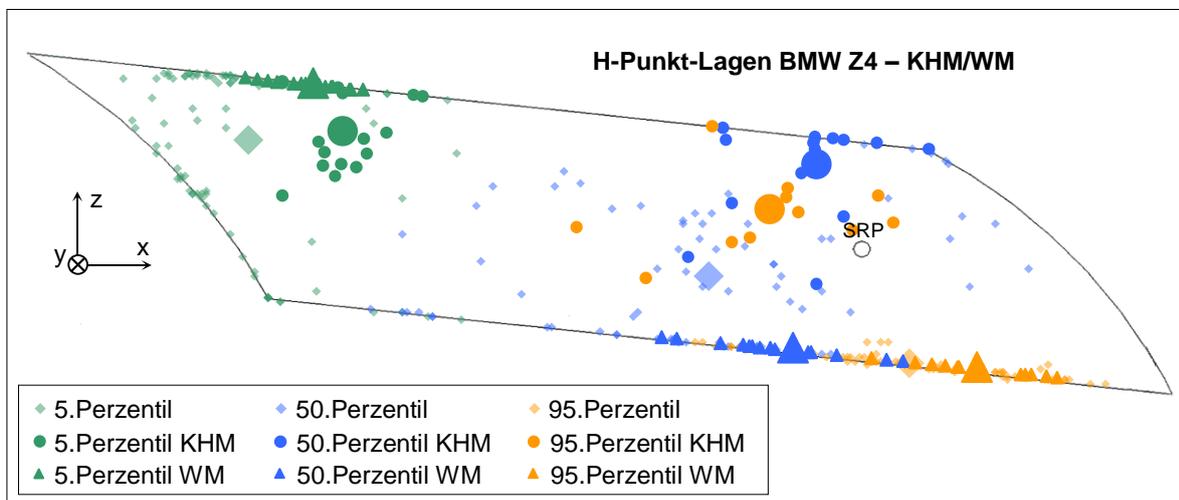


Abbildung 5-44 Simulierte H-Punkt Positionen im BMW Z4 im Vergleich zur Realität

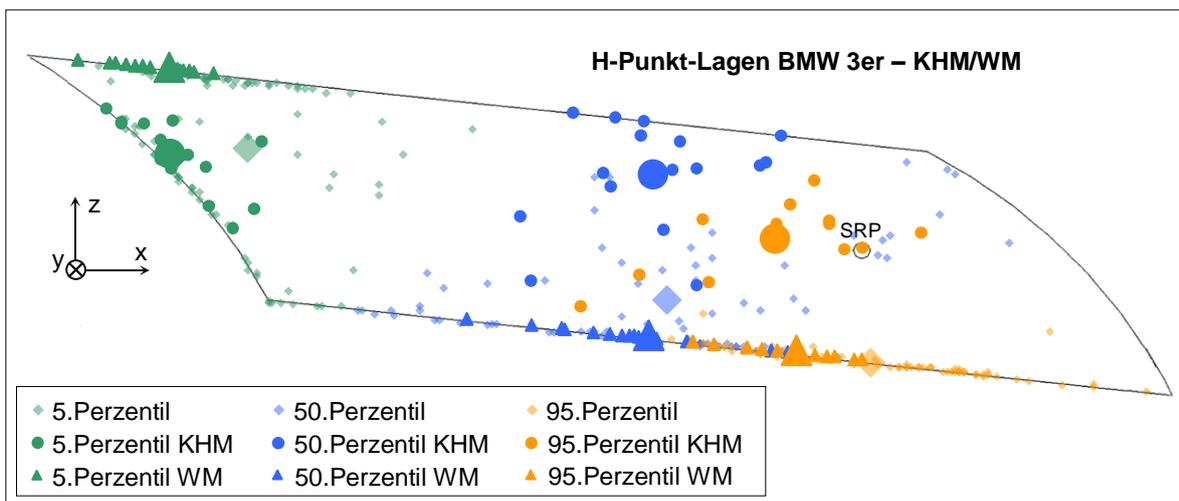


Abbildung 5-45 Simulierte H-Punkt Positionen im BMW 3er im Vergleich zur Realität

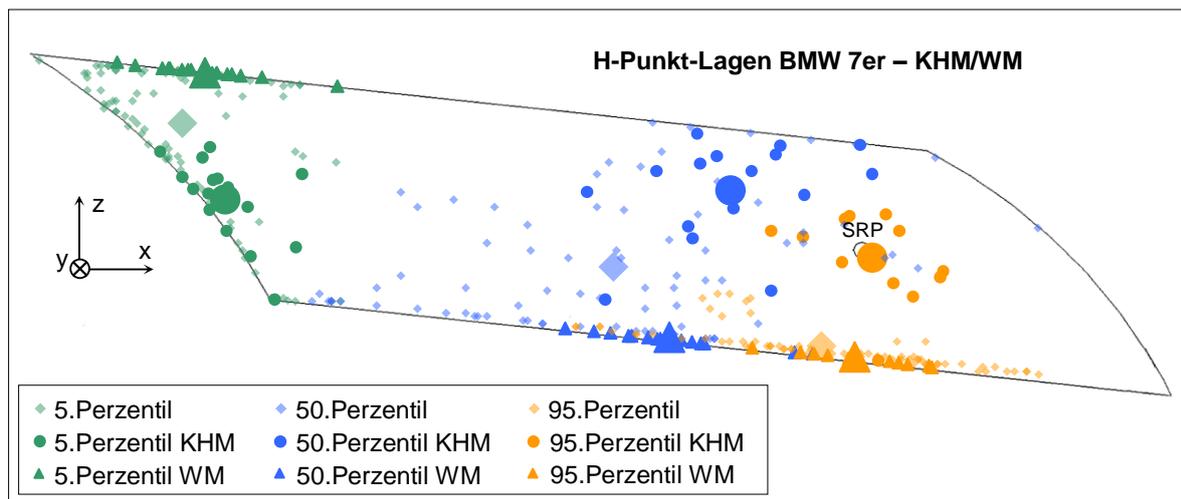


Abbildung 5-46 Simulierte H-Punkt Positionen im BMW 7er im Vergleich zur Realität

Tabelle 5-15 Abweichung der mittleren H-Punkt-Lagen der Versuchspersonengruppen zwischen Simulation und Realität

		KHM Positionsabweichung zur Realität		WM Positionsabweichung zur Realität	
		x-Wert	z-Wert	x-Wert	z-Wert
		BMW Z4	5. Perzentil	22,7	0,5
	50. Perzentil	26,0	28,3	20,0	21,4
	95. Perzentil	34,5	39,9	16,2	3,0
BMW 3er	5. Perzentil	21,8	2,2	18,5	21,8
	50. Perzentil	3,8	32,6	7,8	11,1
	95. Perzentil	24,1	31,5	21,5	1,2
BMW 7er	5. Perzentil	9,8	20,5	5,6	13,6
	50. Perzentil	27,8	20,6	13,2	19,8
	95. Perzentil	11,1	24,5	7,7	3,0

Werte in mm

Tabelle 5-16 Stichprobenumfänge der H-Punkte

		Real	KHM	WM
BMW Z4	5.Perzentil	96	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	72	12	12
BMW 3er	5.Perzentil	96	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	72	12	12
BMW 7er	5.Perzentil	96	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	72	12	12

5.4.4 Vergleich der Augpunktlagen

Die aus den simulierten Haltungen resultierenden Augpunktlagen des Mittenauges im Vergleich zur Realität sind in Abbildung 5-47 bis Abbildung 5-49 dargestellt. Dabei entsprechen die jeweiligen Symbole und Farben denen aus dem Vergleich der H-Punkt-Lagen. Die dazugehörenden Stichprobenumfänge sind Tabelle 5-18 zu entnehmen.

Für beide Augpunktkoordinaten (x- und z-Richtung) ergeben sich wie bei den H-Punkt-Vergleichen statistisch signifikante Unterschiede für beide Modelle gegenüber der Realität. Vergleiche der x-Koordinate von Realität und KHM liefern für alle Versuchspersonengruppen in jedem Fahrzeug höchstsignifikante Unterschiede (α -Fehler=0,000). Die Werte des WM für das 5. Perzentil im BMW Z4 sind dagegen im Vergleich zur Realität für diese Koordinate gleich (α -Fehler=0,272). Für das 5. Perzentil im BMW 7er kann keine Aussage gemacht werden. Alle anderen Vergleiche liefern zwischen Realität und WM signifikante Unterschiede (α -Fehler<0,034). Bei der z-Koordinate liefert das KHM für das 5. Perzentil im BMW Z4 (α -Fehler=0,464) und das 50. Perzentil im BMW 7er (α -Fehler=0,392) gleiche Werte gegenüber der Realität. Für das 95. Perzentil im BMW Z4 (α -Fehler=0,038) und das 5. Perzentil im BMW 7er (α -Fehler=0,001) existieren zwischen Realität und KHM signifikante Unterschiede. Bei allen anderen Vergleichen

kann keine Aussage getroffen werden. Die Vergleiche zwischen WM und Realität liefern für die z-Koordinate für jede Versuchspersonengruppe in jedem Fahrzeug signifikante Unterschiede (α -Fehler $<0,004$). Wie bei den H-Punkten stimmen die Augpunkte der simulierten Haltungen mit KHM und WM für keine Versuchsgruppe in keinem der Fahrzeuge mit der Realität überein, da nicht gleichzeitig für beide Koordinaten ein α -Fehler $>0,2$ nachgewiesen werden kann.

Für den visuellen Vergleich von Realität und Simulation dienen wiederum die gemittelten Positionen der Augpunkte. Grundsätzlich liegen die realen Augpunkte weiter vorn als die der Simulation mit beiden Modellen. Weiterhin ist erkennbar, dass die mit dem KHM berechnete Höhenposition der Augen (z-Richtung) gut mit der Realität übereinstimmt, mit Ausnahme des 5. Perzentils im BMW 7er. Bis auf diese eine Ausnahme sind die Abweichungen des WM hier stets höher. In Längsrichtung (x-Richtung) dagegen weist das WM geringere Abweichungen als das KHM auf, mit Ausnahme des 50. und 95. Perzentil im BMW Z4. Die absoluten Abweichungen der Augpunktlagen aus den simulierten Haltungen im Vergleich zur Realität sind Tabelle 5-17 zu entnehmen.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Augpunkte der simulierten Haltungen bei beiden Modellen den Streubereich der realen Positionen nur teilweise treffen. Im BMW Z4 beispielsweise stimmen die Augpunkte der mit dem WM simulierten Haltungen des 95. Perzentils nicht mit dem Streubereich der Realität überein. Das KHM bringt hier etwas bessere Ergebnisse der Augpunktlagen, die jedoch nur am Rand des realen Streubereiches liegen. Auch beim 50. Perzentil in diesem Fahrzeug, simuliert mit dem WM, liegen die Augpunkte lediglich zum Teil im realen Streubereich. Ähnliches gilt für das 95. Perzentil im BMW 3er und BMW 7er. Hier liegen beide Modelle vorwiegend außerhalb des Streubereiches, wobei das KHM wiederum geringfügig bessere Ergebnisse liefert. Alle anderen Perzentilgruppen liegen innerhalb der jeweiligen Streubereiche.

Mit einer Überarbeitung der Augpunktfläche, welche als Zielrestriktion für das Mittenaugen dient, können realitätsnähere Ergebnisse für das KHM erwartet werden. Diese Fläche sollte auf die jeweils zu untersuchende Anthropometrie sowie auf das zu untersuchende Fahrzeug abgestimmt werden. Dies bedeutet, dass zumindest das 5., 50. und 95. Perzentil Körperhöhe eine eigene Augpunktfläche haben sollte, die in Relation zum SRP positioniert werden kann und nach den realen Augpunkten

entwickelt werden muss. Zudem können für noch bessere Ergebnisse auch die Proportion von Sitzzwerge und Sitzriesen bei der Positionierung der Augpunktfläche in z-Richtung berücksichtigt werden. Zusätzlich kann die Positionierung in x- und z-Richtung fahrzeugabhängig erfolgen, da gezeigt wurde, dass die Augpunkte bei verschiedenen Fahrzeugen unterschiedliche Positionen besitzen (vgl. Kapitel 5.2.4).

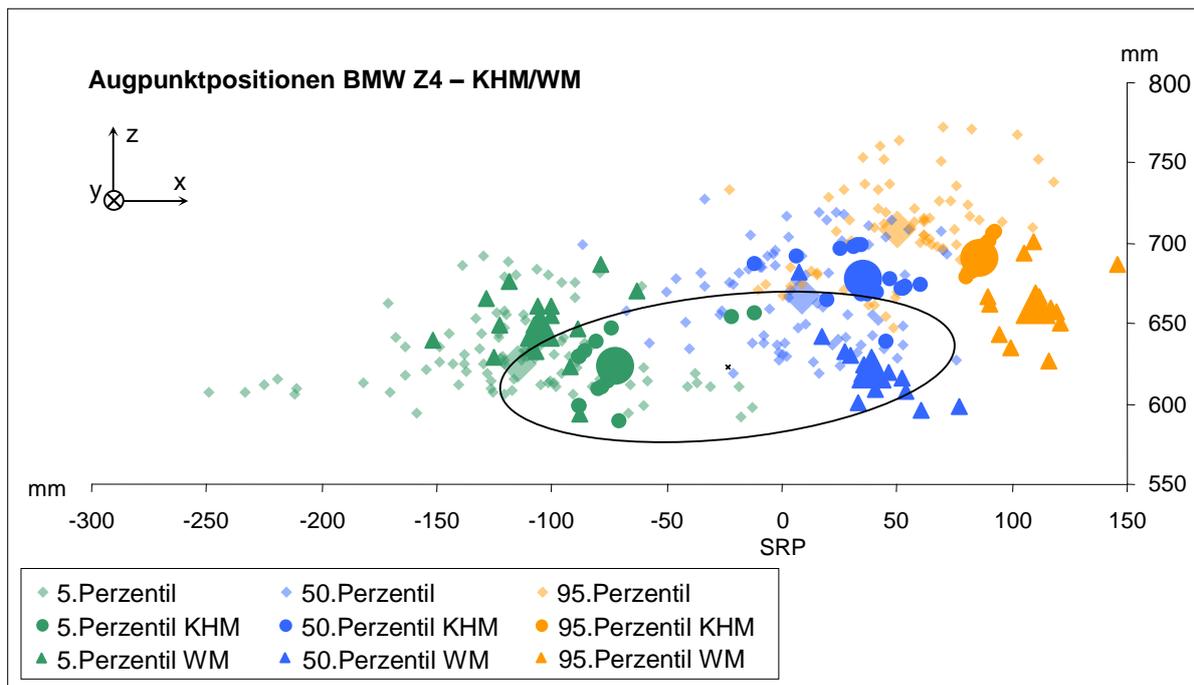


Abbildung 5-47 *Simulierte Augpunktpositionen im BMW Z4 im Vergleich zur Realität, mit SAE Augenellipse*

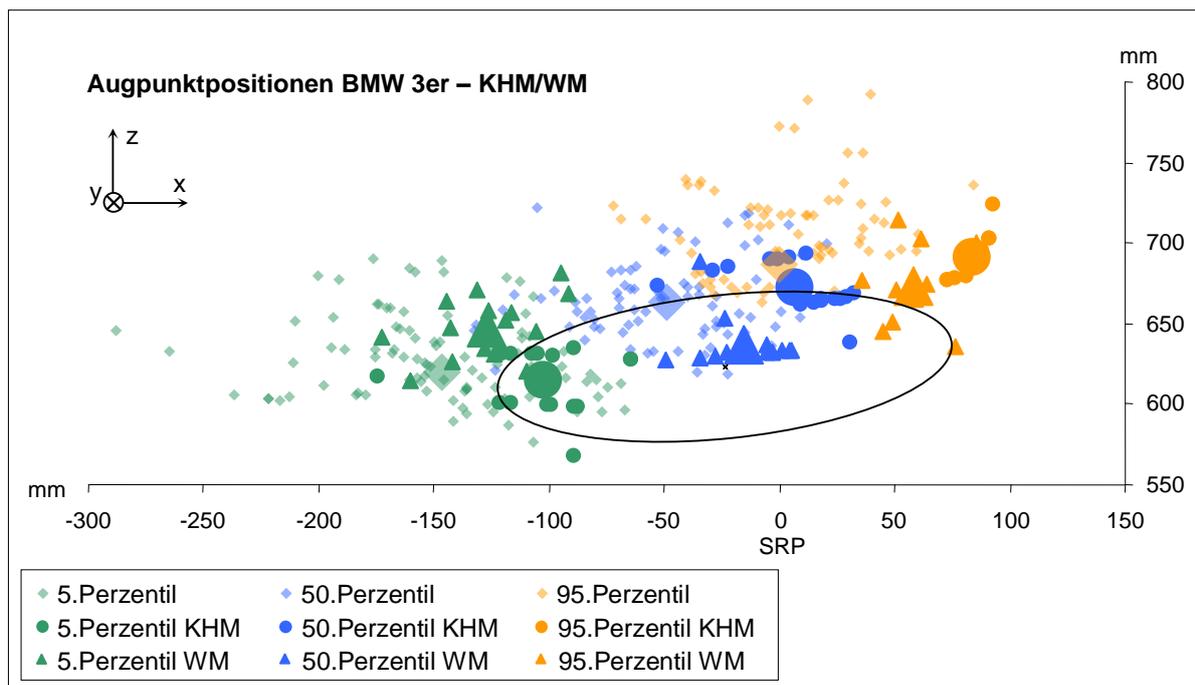


Abbildung 5-48 *Simulierte Augpunktpositionen im BMW 3er im Vergleich zur Realität, mit SAE Augenellipse*

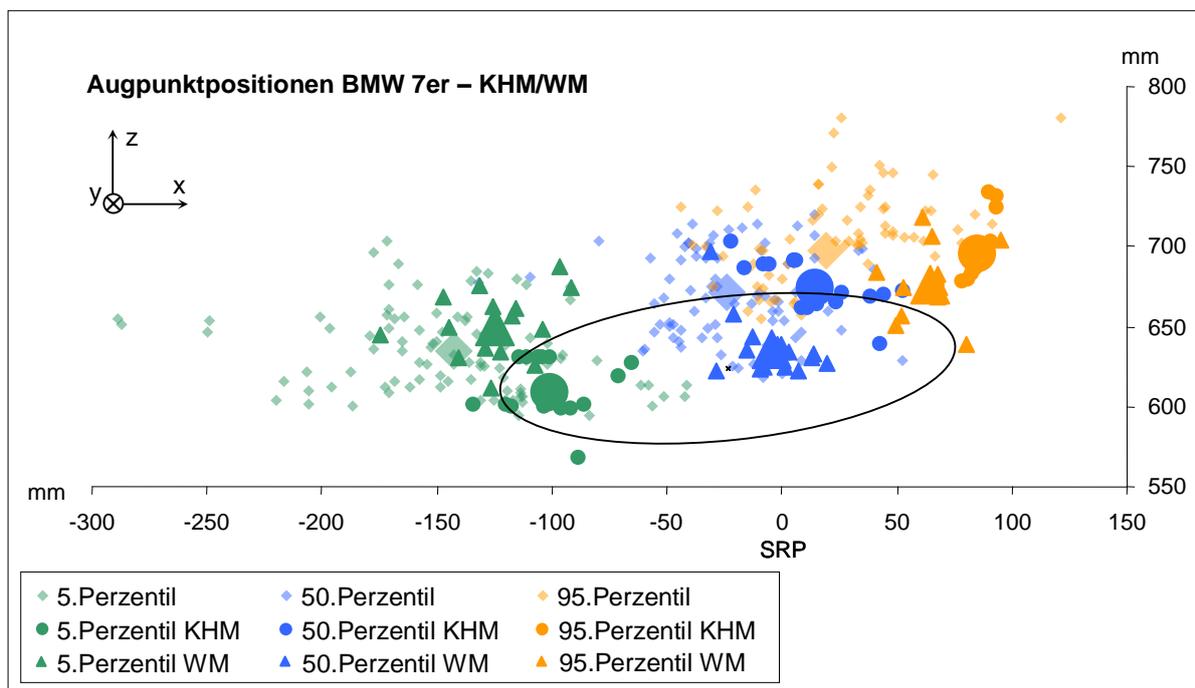


Abbildung 5-49 *Simulierte Augpunktpositionen im BMW 7er im Vergleich zur Realität, mit SAE Augenellipse*

Tabelle 5-17

Abweichung der mittleren Augpunktlagen der Versuchspersonengruppen zwischen Simulation und Realität

		KHM Positionsabweichung zur Realität		WM Positionsabweichung zur Realität	
		x-Wert	z-Wert	x-Wert	z-Wert
BMW Z4	5.Perzentil	42,7	1,7	9,6	23,6
	50.Perzentil	26,7	10,2	30,8	45,7
	95.Perzentil	36,5	16,5	60,1	45,7
BMW 3er	5.Perzentil	45,5	7,3	21,0	26,3
	50.Perzentil	58,0	8,8	35,4	26,7
	95.Perzentil	85,5	3,2	59,5	14,9
BMW 7er	5.Perzentil	41,8	22,5	17,3	18,6
	50.Perzentil	37,2	5,8	18,5	33,0
	95.Perzentil	64,7	0,3	44,0	19,0

Werte in mm

Tabelle 5-18

Stichprobenumfänge der Augpunkte

		Real	KHM	WM
BMW Z4	5.Perzentil	96	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	72	12	12
BMW 3er	5.Perzentil	95	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	70	12	12
BMW 7er	5.Perzentil	96	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	71	12	12

5.4.5 Vergleich der auftretenden Schnittstellenkräfte

Ob eine simulierte Haltung realistisch ist, kann auch mit Hilfe der auftretenden Schnittstellenkräfte untersucht werden. Dazu findet ein Vergleich der mittels Kraftmesstechnik gewonnenen Kräfte und den berechneten Kräften der simulierten Haltungen statt.

Zunächst wird der Fehler des Berechnungsmodells gegenüber der Realität aufgezeigt. Anschließend werden die berechneten Kräfte der simulierten Haltungen den Kräften der Realhaltung gegenüber gestellt. Dies geschieht einerseits gegenüber den berechneten Kräften der Realhaltung, um den Fehler des Berechnungsmodells nicht mit einzubeziehen, und andererseits gegenüber den real gemessenen Kräften im Versuch.

5.4.5.1 Berechnung der Schnittstellenkräfte

Die Berechnung der Schnittstellenkräfte sowie die Ausgabe dieser Werte mit der RAMSIS Software erwiesen sich im Verlauf der Arbeit als unzulänglich und schwierig. Eine Verbesserung der Berechnung und Ausgabe konnte kurzfristig nicht mehr in die Software implementiert werden, weshalb die Firma Human Solutions ein vereinfachtes Kraftberechnungsmodell auf Basis der Berechnung des KHM für die Analyse der Schnittstellenkräfte zur Verfügung gestellt hat. Dieses Modell ist in den zweidimensionalen Raum überführt und lediglich auf die Fahrerhaltung (Hände ans Lenkrad, H-Punkt ins Sitzverstellfeld, Fersen auf den Boden, linker/rechter Fuß auf Fußstütze/Fahrpedal, Blick nach vorn) anwendbar. Zusätzlich ist die Möglichkeit gegeben, Schnittstellenkräfte von Realhaltungen und Haltungen die mit dem Wahrscheinlichkeitsmodell prognostiziert werden zu berechnen. Die Auflagekräfte werden im linken und rechten Fuß, im Becken, im oberen Rücken und in der linken und rechten Hand, jeweils in z-Richtung (Abbildung 5-50) ausgegeben. Das Kraftberechnungsmodell ist so aufgebaut, dass die Kräfte der linken und rechten Extremitäten auf Grundlage der jeweiligen Körperschwerpunktlagen getrennt berechnet werden können.

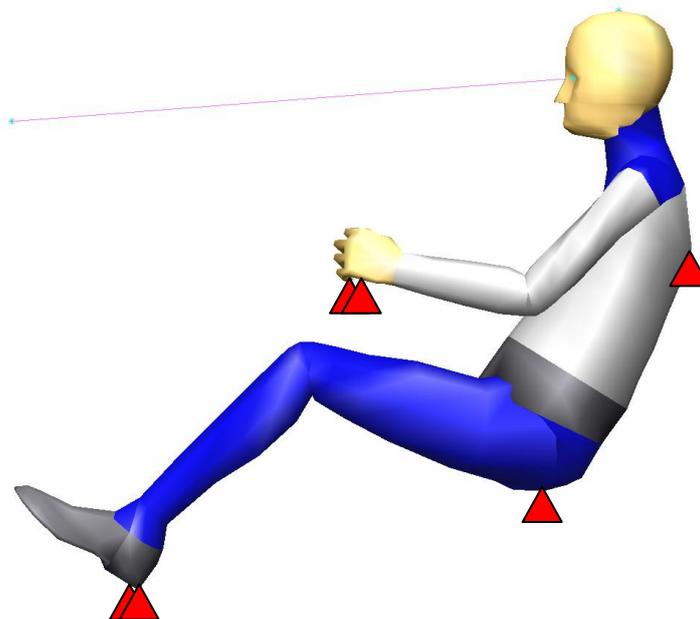


Abbildung 5-50 Auflagekräfte des vereinfachten Kraftberechnungsmodells

Durch die Vereinfachung des Modells ergeben sich Abweichungen zu den real gemessenen Kräften. Mit einem Vergleich zwischen den real gemessenen Kräften einer Fahrerhaltung und den berechneten Kräften der gleichen Haltung, angepasst mit PCMAN, wird diese Abweichung quantitativ erfasst*. Je Haltung und Schnittstelle ergeben sich so über alle Versuchspersonen Abweichungen, die in Prozent vom Körpergewicht angegeben werden, damit diese unabhängig vom Körpergewicht der einzelnen VPs verglichen werden können. In Abbildung 5-51 sind die jeweiligen mittleren Werte für die Abweichung bzw. der Fehler des Kraftberechnungsmodells gegenüber der Realität über die Schnittstellen in einem Boxplot-Diagramm aufgetragen. Fehler in negativer Richtung geben dabei an, dass die real gemessenen Kräfte größer sind als die aus der gleichen Haltung berechneten Kräfte. In Anhang D – Fehler des Kraftberechnungsmodell – ist der Fehler getrennt nach Versuchspersonengruppe und Fahrzeug dargestellt. Tabelle 5-19 zeigt zusätzlich die Mittelwerte mit ihrer jeweiligen Standardabweichung pro Schnittstelle.

* Es handelt sich hierbei um einen Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Kräften der gleichen Realhaltung.

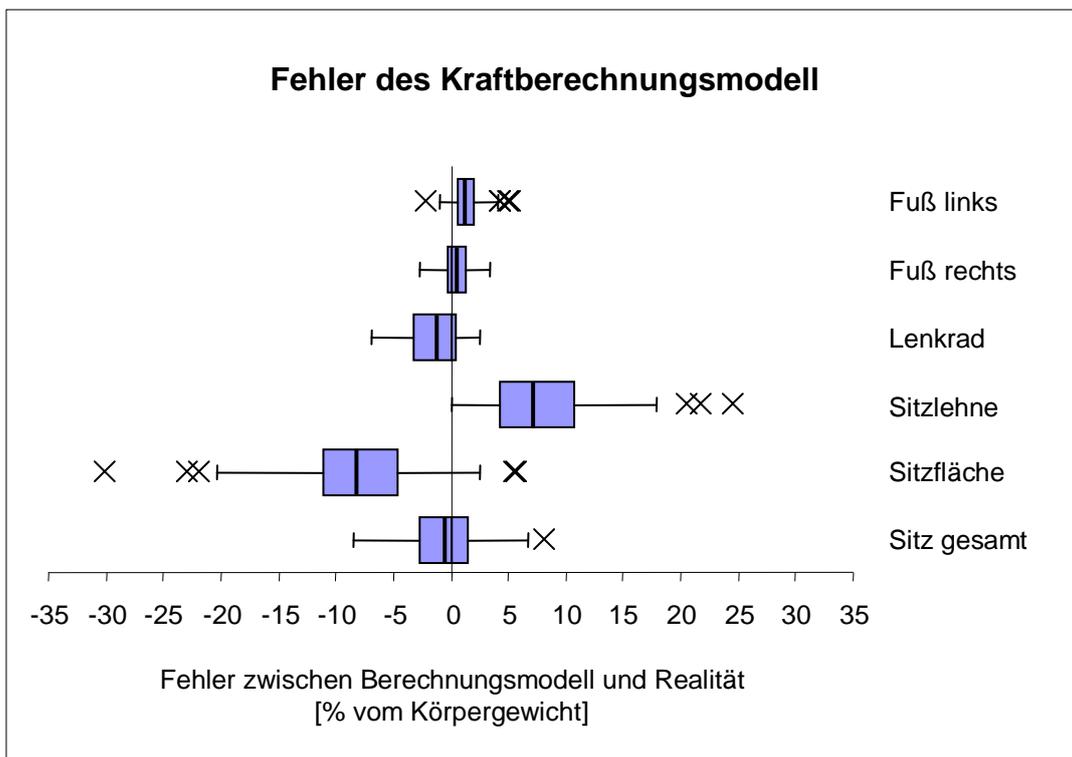


Abbildung 5-51 *gemittelter Gesamtfehler zwischen real gemessenen Kräften und berechneten Kräften der gleichen Haltung*

Tabelle 5-19

detaillierte Darstellung der jeweils gemittelten Fehler zwischen real gemessenen Kräften und berechneten Kräften der gleichen Haltung

Mittlerer Fehler zwischen Kraftberechnungsmodell und Realität

	Fuß links		Fuß rechts		Lenkrad		Sitzfläche		Sitzlehne		Sitz gesamt		
	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	AM	SD	
BMW Z4	5. Perzentil	0,6	1,1	-0,9	0,9	-0,8	2,2	-4,9	6,5	6,0	5,7	1,0	2,8
	50. Perzentil	1,3	0,8	0,3	0,8	-2,5	1,5	-7,9	3,0	8,8	3,1	1,0	1,8
	95. Perzentil	0,3	0,6	-0,1	0,8	-1,4	2,3	-5,4	4,8	6,6	3,9	1,2	2,9
BMW 3er	5. Perzentil	2,7	1,2	1,0	1,0	-0,6	2,1	10,2	5,8	7,1	5,3	-3,1	2,1
	50. Perzentil	1,6	0,9	0,9	0,9	-2,4	1,7	-8,0	2,9	8,0	2,9	0,0	2,2
	95. Perzentil	0,5	0,7	0,1	0,9	-1,2	2,3	-6,4	4,5	7,0	3,6	0,5	3,3
BMW 7er	5. Perzentil	3,4	0,9	2,0	1,0	-0,4	1,9	13,1	7,2	8,1	6,4	-5,0	2,8
	50. Perzentil	1,4	0,6	1,2	0,8	-2,3	1,5	10,3	3,7	10,1	3,3	-0,2	1,8
	95. Perzentil	1,0	0,5	0,4	0,9	-1,3	2,7	-7,2	5,1	7,2	4,3	0,0	3,1

Werte in % vom Körpergewicht AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Fußkräfte

Bei den Fußkräften fällt der durchschnittliche Fehler sowie dessen Streuung am geringsten aus, beim linken Fuß etwas größer als beim rechten Fuß.

Der durchschnittliche Fehler bei den kleinen Frauen (maximal 3,4% vom Körpergewicht) ist dabei vor allem bei den Fahrzeugen BMW 3er und BMW 7er größer als bei den Männern (maximal 1,6% vom Körpergewicht).

Mit einem mittleren Gesamtfehler von 1,5% vom Körpergewicht für den linken Fuß und 0,6% vom Körpergewicht für den rechten Fuß liefert das Kraftberechnungsmodell gute Werte.

Lenkrad

Der mittlere Gesamtfehler für das Lenkrad mit 1,4% vom Körpergewicht fällt ebenfalls sehr gering aus. Die Streuung ist aber mit ca. 2% größer als bei den Fußkräften. Den größten Fehler, zwischen 2,3-2,5% vom Körpergewicht, und die kleinste Streuung, zwischen 1,5-1,7% vom Körpergewicht, weisen dabei die mittleren Männer auf.

Sitz

Im Gegensatz zu den anderen Schnittstellen ergeben sich beim Sitz der größte Fehler sowie die größte Streuung bei der getrennten Betrachtung von Sitzfläche und Sitzlehne. Dabei gibt es eine ungefähr gleich große Verschiebung des Fehlers in entgegengesetzte Richtungen, so dass sich diese Werte bei der Gesamtbetrachtung des Sitzes aufheben.

Bei der Sitzlehne liegt der Fehler zwischen 6,0-10,1% vom Körpergewicht. Dabei sind die real gemessenen Kräfte kleiner als die berechneten. Den größten Fehler und die kleinste Streuung, zwischen 2,9-3,3% vom Körpergewicht, weisen dabei die Männer des 50. Perzentil Körperhöhe auf. Die kleinen Frauen besitzen die größte Streuung mit 5,3-6,4% vom Körpergewicht.

Die Sitzfläche weist mit bis zu 13,1% vom Körpergewicht den größten aller Fehler auf, wobei die real gemessenen Kräfte größer sind als die berechneten. Den

kleinsten Fehler bei dieser Schnittstelle mit 4,9% vom Körpergewicht besitzen die kleinen Frauen im BMW Z4. Sie weisen aber auch den größten Fehler mit 10,2% vom Körpergewicht im BMW 3er und 13,1% vom Körpergewicht im BMW 7er auf. Sie haben ebenfalls die größte Streuung, zwischen 5,8-7,2% vom Körpergewicht.

Der Fehler des Kraftberechnungsmodells ist bei der Betrachtung des gesamten Sitzes, mit Ausnahme der Frauen des 5. Perzentil Körperhöhe im BMW 3er und BMW 7er (3,1% und 5,0% vom Körpergewicht), gering (zwischen 0,0-1,2% vom Körpergewicht). Die Streuung liegt bei maximal 3,3% vom Körpergewicht. Der mittlere Gesamtfehler von 0,6% vom Körpergewicht zeigt eine gute Verwendbarkeit des Berechnungsmodells für diese Schnittstelle.

Zusammenfassung

Generell liefert das Kraftberechnungsmodell, bis auf die getrennte Betrachtung von Sitzlehne und Sitzfläche, gute Werte für die verschiedenen Schnittstellen. Der große Fehler bei Sitzlehne und Sitzfläche, bis maximal 13,1% vom Körpergewicht, ist nicht akzeptabel, weshalb das Modell hinsichtlich der Berechnung dieser Kräfte überarbeitet werden sollte. Dazu wäre eine Variation der Position der Krafteinleitungspunkte im oberen Rücken und im Becken erforderlich, die das Verhältnis der Kräfte, welches derzeit nicht korrekt wiedergegeben wird, so verändern, dass bei der Sitzlehne geringere Werte und in Folge dessen bei der Sitzfläche größere Werte berechnet werden.

5.4.5.2 Bewertung der Güte der simulierten Haltungen mit Hilfe der Schnittstellenkräfte

Für eine Aussage über die Güte der RAMSIS Simulationen wird untersucht, in wie viel Prozent der Fälle die Schnittstellenkräfte der simulierten Fahrerhaltung mit dem RAMSIS-KHM und dem RAMSIS-WM den Kraftstrebereich der realen Haltung treffen. Damit der im vorhergehenden Unterkapitel beschriebene Fehler des Kraftberechnungsmodells bei den Vergleichen unberücksichtigt bleibt, werden jeweils die berechneten Schnittstellenkräfte der Realhaltung und der simulierten Haltungen aus

dem KHM und dem WM einander gegenüber gestellt*. Die jeweiligen Stichprobenumfänge sind in Tabelle 5-20 dargestellt.

Aus Abbildung 5-52 lässt sich erkennen, in wie viel Prozent der Fälle sich die beiden Haltungsmodelle mit der prognostizierten Haltung innerhalb der berechneten Real-Kraftstrebereiche befinden. Es zeigt sich, dass die simulierten Haltungen beider Modelle in über 90% der Fälle den Kraftstrebereich der realen Haltungen treffen. Dabei ist das WM gegenüber dem KHM in Bezug auf die resultierenden Schnittstellenkräfte bis auf den linken Fuß besser, d. h. treffsicherer. Der Unterschied beider Modelle liegt zwischen 1-4%.

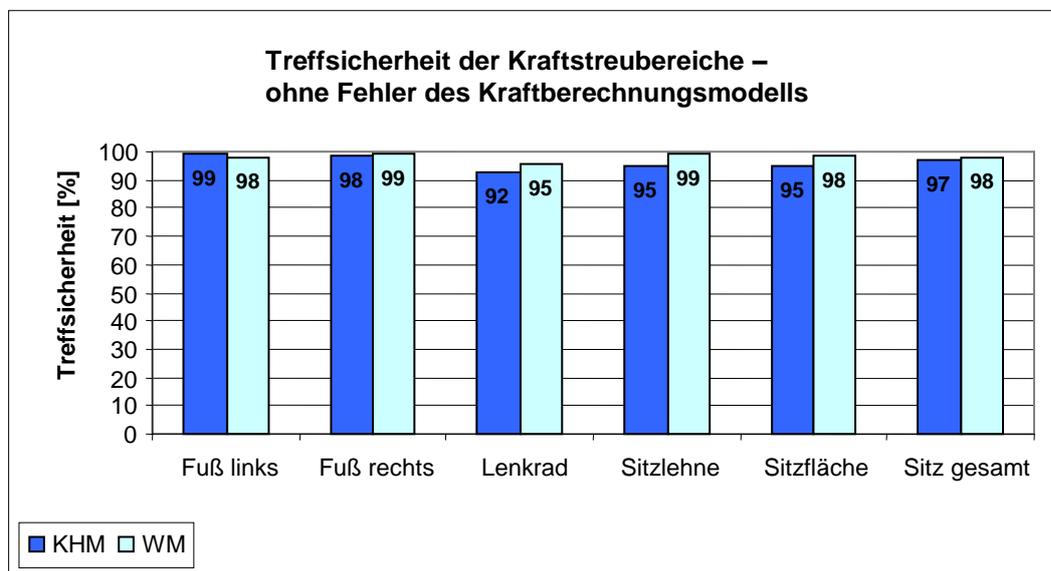


Abbildung 5-52 Treffsicherheit der Kraftstrebereiche von RAMSIS-KHM und RAMSIS-WM (ohne Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell)

Die in Anhang F – Treffsicherheit der Kraftstrebereiche – dargestellte Tabelle (ohne Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell) zeigt, wie sich die Treffsicherheit getrennt nach Fahrzeugen und Anthropometrie verhält. Beide Modelle zeigen bei den Schnittstellen Fuß links, Fuß rechts und Sitz gesamt eine gute

* Die Realhaltung wird mit Hilfe von PCMAN digitalisiert. Auf Basis dieser Anpassung werden die Schnittstellenkräfte mit dem vereinfachten Kraftberechnungsmodell berechnet. Diese werden danach mit den berechneten Kräften aus der Haltungssimulation verglichen.

Treffsicherheit von über 90%. Der Kraftstrebereich des Lenkrades wird von den simulierten Haltungen des WM mit über 88% öfter getroffen als die des KHM mit über 83%. Bei den Schnittstellen Sitzlehne und Sitzfläche werden die geringsten Werte für die Treffsicherheit verzeichnet, beim KHM mit über 75% und 67% und beim WM mit jeweils über 92%. Generell ist zu sagen, dass die simulierten Haltungen des WM den Kraftstrebereich öfter treffen als die des KHM.

Die statistische Auswertung der Vergleiche zwischen Realität und Simulation kann für die jeweiligen Schnittstellen Tabelle 5-21 bis Tabelle 5-26 entnommen werden. Dabei zeigt die gelbe Farbe an, dass es sich bei dem Vergleich um signifikante Unterschiede handelt, grün gibt an, dass die beiden Stichproben als gleich angesehen werden können und bei grauer Einfärbung ist keine statistische Aussage möglich. Die Tabellen unterstreichen die Aussage der prozentualen Treffsicherheit. Für die Schnittstellen Fuß links, Fuß rechts sowie Sitz gesamt können die Stichproben von Realität und Simulation mit KHM und WM für jede Versuchspersonengruppe in jedem Fahrzeug als gleich angesehen werden. Beim Lenkrad ergibt sich zwischen Realität und Simulation Gleichheit für beide RAMSIS-Modelle für das 50. Perzentil in jedem Fahrzeug sowie für das 95. Perzentil im BMW Z4 und BMW 7er. Für das 95. Perzentil im BMW 3er existiert für das WM ebenfalls Gleichheit. Signifikante Unterschiede sind lediglich bei Vergleichen mit dem WM vorhanden, beim 5. Perzentil im BMW 3er und BMW 7er. Bei den Schnittstellen Sitzfläche und Sitzlehne ergibt sich Gleichheit für beide Modelle gegenüber der Realität lediglich für das 5. Perzentil im BMW Z4 und BMW 7er sowie für das 50. Perzentil im BMW 3er und BMW 7er. Ansonsten überwiegen bei diesen Schnittstellen die signifikanten Unterschiede.

Ohne Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell prognostizieren beide Haltungsmodelle aus RAMSIS gute Haltungen, die hinsichtlich ihrer Schnittstellenkräfte eine gute Treffsicherheit aufweisen. Das bedeutet, dass beide Haltungsmodelle eine gute Simulationsfähigkeit besitzen. Anhand der statistischen Auswertung sind aber Defizite für die Schnittstellen Sitzlehne und Sitzfläche für beide RAMSIS-Modelle vorhanden.

Tabelle 5-20

Stichprobenumfänge der Kräfte (ohne Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell)

		Real	KHM	WM
BMW Z4	5.Perzentil	96	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	72	12	12
BMW 3er	5.Perzentil	95	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	70	12	12
BMW 7er	5.Perzentil	96	16	16
	50.Perzentil	81	16	16
	95.Perzentil	71	12	12

Tabelle 5-21

Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für den linken Fuß (ohne Fehler des Kraftberechnungsmodells)

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Fuß links								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,603	0,607	0,274	0,554	0,856	0,516	0,211	0,842	0,505
Real / WM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,924	0,431	0,793	0,728	0,525	0,953	0,937	0,457	0,954

Tabelle 5-22

Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für den rechten Fuß (ohne Fehler des Kraftberechnungsmodells)

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Fuß rechts								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,399	0,391	0,222	0,483	0,739	0,376	0,904	0,911	0,457
Real / WM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,394	0,976	0,570	0,943	0,801	0,525	0,705	0,624	0,637

Tabelle 5-23 *Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für das Lenkrad (ohne Fehler des Kraftberechnungsmodells)*

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Lenkrad								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,125	0,285	0,269	0,055	0,246	0,192	0,182	0,469	0,361
Real / WM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,054	0,246	0,813	0,029	0,468	0,699	0,045	0,279	0,964

Tabelle 5-24 *Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für die Sitzlehne (ohne Fehler des Kraftberechnungsmodells)*

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Sitzlehne								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,005	0,197	0,000	0,000	0,146	0,000	0,092	0,086	0,001
Real / WM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,271	0,000	0,000	0,003	0,308	0,000	0,260	0,842	0,003

Tabelle 5-25 *Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für die Sitzfläche (ohne Fehler des Kraftberechnungsmodells)*

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Sitzfläche								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	Welch-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,011	0,062	0,000	0,000	0,167	0,000	0,125	0,048	0,004
Real / WM	Test	U-Test	Welch-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,320	0,000	0,000	0,004	0,328	0,000	0,301	0,651	0,013

Tabelle 5-26 *Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für den gesamten Sitz (ohne Fehler des Kraftberechnungsmodells)*

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Sitz gesamt								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α -Fehler	0,675	0,817	0,455	0,532	0,762	0,829	0,305	0,701	0,712
Real / WM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α -Fehler	0,718	0,976	0,783	0,515	0,709	0,969	0,376	0,730	0,801

5.4.5.3 Vergleich von real gemessenen und aus den Haltungssimulationen resultierenden Kräften

Wie sich die Treffsicherheit verhält, wenn die berechneten Schnittstellenkräfte der simulierten Haltungen mit dem KHM und dem WM den real gemessenen Kräften gegenübergestellt werden* ist Abbildung 5-53 zu entnehmen. Der generelle Fehler des Kraftberechnungsmodell wird hierbei in die Analyse mit einbezogen. Die dazu gehörenden Stichprobenumfänge sind in Tabelle 5-27 dargestellt.

Die in der Realität auftretenden Kräfte (vgl. Kapitel 5.2.5) streuen bei den einzelnen Schnittstellen wesentlich mehr als die mit dem Kraftberechnungsmodell berechneten Kräfte der gleichen Haltungen. Dadurch ergeben sich größere Bereiche in denen die berechneten Kräfte der simulierten Haltungen liegen können. Es zeigt sich daher gegenüber Abbildung 5-52 eine 100% Übereinstimmung bei den Schnittstellen Fuß rechts und Lenkrad für beide Haltungsmodelle. Auch die Betrachtung des gesamten Sitzes liefert bei beiden RAMSIS-Modellen mit 98% eine gute Übereinstimmung.

Die getrennte Betrachtung des Sitzes mit Sitzlehne und Sitzfläche dagegen liefert keine gute Übereinstimmung der Schnittstellenkräfte, da hier der Fehler des Kraftberechnungsmodells verhältnismäßig groß ist (vgl. Kapitel 5.4.5.1). Der reale

* Die in der Realität mit Hilfe von Kraftmesstechnik gemessenen Schnittstellenkräfte der Fahrerhaltung werden den berechneten Kräften der mit dem KHM und dem WM simulierten Fahrerhaltung gegenübergestellt.

Streubereich des linken Fußes, trotz des geringen Fehlers des Kraftberechnungsmodells, wird vom KHM in 85%, vom WM in 83% der Fälle getroffen.

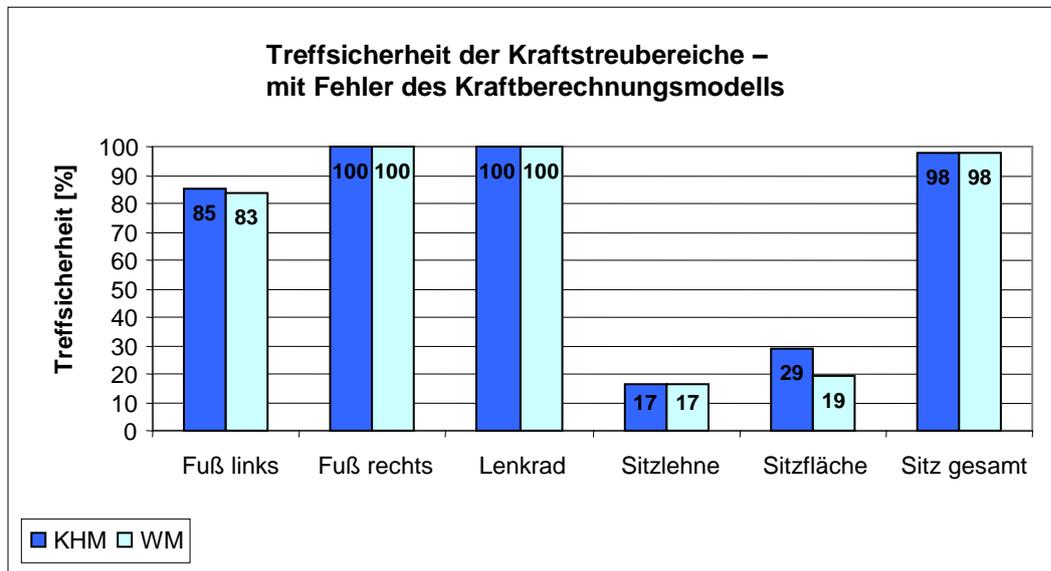


Abbildung 5-53 Treffsicherheit der Kraftstreubereiche von RAMSIS-KHM und RAMSIS-WM (mit Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell)

Mit der in Anhang F – Treffsicherheit der Kraftstreubereiche – dargestellten Tabelle (mit Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell) wird die Treffsicherheit getrennt nach Fahrzeugen und Anthropometrie aufgezeigt. Wie schon erwähnt, zeigt sich bei den Schnittstellen Sitzlehne und Sitzfläche keine gute Übereinstimmung des jeweiligen Kraftstreubereiches, wobei sich z. T. mit 0% überhaupt keine Übereinstimmung einstellt. Dieses Ergebnis wird zusätzlich durch höchstsignifikante Unterschiede zwischen Realität und den Simulationen mit beiden Haltungsmodellen bei allen drei Versuchspersonengruppen in allen drei Fahrzeugen bestätigt (Tabelle 5-31 und Tabelle 5-32). Der gesamte Sitz weist demgegenüber zwischen Realität und Simulation mit beiden Haltungsmodellen lediglich beim 5. Perzentil im BMW 3er und BMW 7er signifikante Unterschiede auf (Tabelle 5-33). Hier können Realität und Simulation mit beiden Modellen für das 50. und 95. Perzentil im BMW 3er und BMW 7er als gleich angesehen werden. Dies gilt in gleicher Weise zwischen Realität und KHM für das 50. und 95. Perzentil im BMW Z4.

Für die Schnittstellen des linken Fußes wird für das 5. Perzentil im BMW 7er mit 0% bei beiden Haltungsmodellen keine Übereinstimmung erzielt. Auch beim BMW 3er liegen diese Werte mit 75% für das KHM und 63% für das WM im Vergleich zu den anderen Versuchsgruppen verhältnismäßig niedrig. Signifikante Unterschiede existieren hier zwischen Realität und den Simulationen bei allen Versuchsgruppen und Fahrzeugen bis auf das 95. Perzentil im BMW Z4 (Tabelle 5-28). Für den rechten Fuß existieren diese beim 5. Perzentil in allen drei Fahrzeugen und für das 50. Perzentil im BMW 3er und BMW 7er (Tabelle 5-29). Gleichheit zwischen Realität und Simulation mit beiden Modellen ergibt sich für das 95. Perzentil im BMW Z4 und BMW 3er.

Signifikante Unterschiede beim Lenkrad treten für das 50. Perzentil in allen drei Fahrzeugen sowie für das 95. Perzentil im BMW Z4 bei beiden Haltungsmodellen im Vergleich zur Realhaltung auf (Tabelle 5-30). Gleichheit zwischen Realität und Simulation ist lediglich für das 5. Perzentil in allen drei Fahrzeugen vorhanden.

Wird das Kraftberechnungsmodell wie vorhanden für die Berechnung der Schnittstellenkräfte von simulierten Haltungen verwendet, so werden für die Kräfte an den Schnittstellen Sitzlehne und Sitzfläche mit großer Wahrscheinlichkeit keine realistischen Werte prognostiziert, da hier der Fehler des Kraftberechnungsmodells verhältnismäßig groß ist. Bei den anderen Schnittstellen ist eine zum Teil gute Vorhersage der Kräfte möglich.

Tabelle 5-27 Stichprobenumfänge der Kräfte (mit Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell)

		Real	KHM	WM
BMW Z4	5.Perzentil	93	16	16
	50.Perzentil	76	16	16
	95.Perzentil	63	12	12
BMW 3er	5.Perzentil	89	16	16
	50.Perzentil	73	16	16
	95.Perzentil	63	12	12
BMW 7er	5.Perzentil	87	16	16
	50.Perzentil	78	16	16
	95.Perzentil	66	12	12

Tabelle 5-28 *Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für den linken Fuß
(mit Fehler des Kraftberechnungsmodells)*

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Fuß links								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	Welch-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test
	α-Fehler	0,011	0,000	0,020	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000	0,000
Real / WM	Test	U-Test	Welch-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test
	α-Fehler	0,005	0,000	0,101	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000	0,000

Tabelle 5-29 *Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für den rechten Fuß
(mit Fehler des Kraftberechnungsmodells)*

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Fuß rechts								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test
	α-Fehler	0,021	0,067	0,879	0,000	0,001	0,223	0,000	0,000	0,168
Real / WM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test
	α-Fehler	0,022	0,122	0,756	0,001	0,002	0,302	0,000	0,000	0,177

Tabelle 5-30 *Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für das Lenkrad
(mit Fehler des Kraftberechnungsmodells)*

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Lenkrad								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,716	0,000	0,000	0,779	0,000	0,087	0,953	0,000	0,067
Real / WM	Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,666	0,000	0,000	0,752	0,000	0,101	0,967	0,000	0,080

Tabelle 5-31 Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für die Sitzlehne (mit Fehler des Kraftberechnungsmodells)

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Sitzlehne								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	Welch-Test	U-Test	U-Test	U-Test	Welch-Test
	α-Fehler	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Real / WM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	Welch-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabelle 5-32 Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für die Sitzfläche (mit Fehler des Kraftberechnungsmodells)

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Sitzfläche								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	t-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Real / WM	Test	U-Test	t-Test	U-Test	t-Test	Welch-Test	U-Test	t-Test	U-Test	U-Test
	α-Fehler	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabelle 5-33 Statistische Auswertung der Kräfte zwischen Realität und Simulation für den gesamten Sitz (mit Fehler des Kraftberechnungsmodells)

		Paarvergleiche Realität / Simulation: Sitz gesamt								
		BMW Z4			BMW 3er			BMW 7er		
		5P	50P	95P	5P	50P	95P	5P	50P	95P
Real / KHM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test
	α-Fehler	0,076	0,209	0,251	0,000	0,945	0,294	0,000	0,754	0,906
Real / WM	Test	U-Test	U-Test	U-Test	U-Test	Welch-Test	Welch-Test	Welch-Test	Welch-Test	Welch-Test
	α-Fehler	0,083	0,187	0,163	0,000	0,993	0,244	0,000	0,720	0,831

5.4.6 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich für den Vergleich zwischen realen und simulierten Haltungen festhalten, dass die Gelenkwinkelabweichung von KHM und WM gegenüber der Realhaltung für die drei untersuchten Haltungen im Mittel unter 12% liegt. Damit ist das Kriterium von Seidl (Seidl, 1994; Marach, 1999) für eine akzeptable Haltungsberechnung voll erfüllt. KHM und WM sind dabei für die Fahrerhaltung ungefähr gleich gut, für die Kupplungs- und Bremshaltung ist das KHM besser, da die verschiedenen Haltungsmodelle des WM diese Haltungen nicht abdecken.

Wird dagegen die Treffsicherheit der Gelenkwinkelstreubereiche einiger ausgewählter Gelenkwinkel betrachtet, so ist festzustellen, dass für die Fahrerhaltung das WM im Mittel die Gelenkwinkelstreubereiche öfter trifft. Das KHM weist für diese Haltungen Defizite bei den Hüftwinkeln auf. Für die Kupplungshaltung ergibt sich keine eindeutige Favorisierung für eines der beiden Haltungsmodelle. Beim KHM wie auch beim WM zeigt sich eine schlechte Übereinstimmung für die Gelenkwinkel des linken Beines. Auch hier sind Defizite des KHM bei den Hüftwinkeln erkennbar. Bei der Bremshaltung trifft das WM den realen Gelenkwinkelstreubereich im Mittel öfter als das KHM, vor allem bei den rechten Beinwinkeln. Die schlechten Ergebnisse des KHM liegen vermutlich in der größeren Abweichung der simulierten gegenüber der real beobachteten Sitzposition. Dadurch ergeben sich in der Simulation andere Beinwinkel als in der Realität. Beim WM ist dies nicht so ausgeprägt, da hier die absoluten Abweichungen der H-Punkte gegenüber der Realität im Mittel nicht so groß sind wie die des KHM. Defizite existieren dennoch, da die verschiedenen Haltungsmodelle des WM keine Beinbetätigung vorsehen.

Der Vergleich der H-Punkt-Lagen zeigt außerdem einen Vorteil des WM, der auf die strengere Zielrestriktion des H-Punktes für die einzelnen Versuchspersonengruppen zurückzuführen ist. Eine Anpassung dieser Restriktion für das KHM würde an dieser Stelle zu besseren Ergebnissen führen, das Haltungsmodell aber in seiner Haltungsoptimierung einschränken, da es dann lediglich eine Linie statt einer Fläche für die Positionierung des H-Punktes zur Verfügung hat.

Für die Augpunktlagen ergeben sich signifikante Unterschiede für beide Haltungsmodelle in allen drei untersuchten Fahrzeugen. Tendenziell ist hier im Mittel die horizontale Abweichung für das WM geringer und die vertikale Abweichung für

das KHM. Eine Optimierung der Zielrestriktion des Mittenauges für das KHM würde hier eine Verbesserung, d. h. eine geringere Abweichung der simulierten Augpunkte gegenüber den real beobachteten bringen. Je besser die dazu benötigte Augpunktfläche an die Anthropometrie und das zu untersuchende Fahrzeug angepasst ist, desto bessere Ergebnisse können erwartet werden. Dies würde das KHM wie schon bei den H-Punkt-Lagen ebenfalls einschränken.

Bei der Berechnung der Schnittstellenkräfte hat sich herausgestellt, dass für das vereinfachte Kraftberechnungsmodell ein großer Fehler bei den Schnittstellen Sitzfläche und Sitzlehne existiert, da das Kraftverhältnis dieser Schnittstellen falsch wiedergegeben wird. Die anderen Schnittstellen, Sitz gesamt, Füße und Lenkrad, weisen dazu einen verhältnismäßig geringen Fehler auf. Der Vergleich zwischen real gemessenen Kräften einer Haltung mit den berechneten Kräften der simulierten Haltung ergibt, bis auf die Schnittstellen Sitzfläche und Sitzlehne, eine gute Treffsicherheit, obwohl hier der Fehler des Kraftberechnungsmodells sowie die Haltungsabweichung zwischen Realität und Simulation in den Vergleich mit einbezogen sind. Wird dagegen der Fehler des Kraftberechnungsmodells nicht berücksichtigt (die Kräfte der Realhaltung werden ebenfalls berechnet), so dass die Güte der simulierten Haltung untersucht werden kann, ergibt sich bei allen Schnittstellen eine hohe Übereinstimmung. Dies bedeutet eine hohe Treffsicherheit für das KHM wie auch für das WM, trotz einiger signifikanter Unterschiede vor allem für die Schnittstellen Sitzlehne und Sitzfläche. Die simulierte Haltung wie auch die Realhaltung stimmen somit gut überein, was sich schon bei der Gelenkwinkelabweichung gezeigt hat.

Die RAMSIS Anwendungsstandards für das WM, welche bei BMW eingesetzt werden, sind über Jahre hinweg immer wieder überprüft und stetig verbessert worden. Diese Entwicklung ist auch für das RAMSIS-KHM zu erwarten. Eine Einschränkung des Modells in Form einer Augpunktfläche als Zielrestriktion für das Mittenaugen ist unvermeidbar, da ansonsten eine zu flache Torsohaltung prognostiziert wird. Auch die freie Positionierung des H-Punktes im Sitzverstellfeld sollte überdacht werden. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist derzeit eine universelle Einsatzfähigkeit nicht gegeben, da für die Simulation einer realitätsnahen Haltung unbedingt Kenntnisse dieser vorhanden sein müssen. Ansonsten kann nicht davon ausgegangen werden, dass eine Haltung prognostiziert wird, welche der Realität entspricht.

6 Diskussion

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Validierung des RAMSIS-KHM, ein Modell zur Vorhersage menschlicher Körperhaltungen basierend auf der Minimierung von Gelenkkraften. Wie alle technischen Neuerungen musste sich auch dieses Haltungsmodell einer Überprüfung unterziehen, bevor es in der Entwicklung von Fahrzeugen eingesetzt werden kann. Dazu wurden reale Fahrerhaltungen mit den simulierten Haltungen anhand von Gelenkwinkelabweichungen, H-Punkt-Lagen, Augpunktlagen und Schnittstellenkräften miteinander verglichen.

Wie die vorliegende Arbeit zeigt, prognostiziert das RAMSIS-KHM realistische und damit akzeptable Zielhaltungen, da die Gelenkwinkelabweichung zwischen Realität und Simulation unter 12% liegt. Für eine realitätsnahe Simulation mit dem RAMSIS-KHM müssen jedoch einige Aspekte berücksichtigt werden.

Die Möglichkeit der freien Positionierung des H-Punktes im Sitzverstellfeld, vor allem für das 50. und 95. Perzentil, sollte überdacht werden. Bessere Ergebnisse sind zu erwarten, wenn die Zielrestriktion bei diesen beiden Gruppen so definiert wird, dass der H-Punkt auf der untersten Linie des Sitzverstellfeldes positioniert wird.

Die Verwendung einer Augpunktfläche, welche als Ziel des Mittenauges dient, ist unvermeidbar, da ansonsten Haltungen prognostiziert werden, die einen zu flachen Torsowinkel gegenüber der Realität aufweisen. Für das KHM können realitätsnähere Ergebnisse erwartet werden, wenn die Augpunktfläche auf die jeweils zu untersuchende Anthropometrie sowie auf das zu untersuchende Fahrzeug abgestimmt wird. Dazu sollten mindestens das 5., 50. und 95. Perzentil Körperhöhe eine eigene Augpunktfläche besitzen, die nach den realen Augpunktpositionen entwickelt werden muss. Zusätzlich kann dabei auf die Proportion von Sitzriesen und Sitzzwergen eingegangen werden. Da gezeigt wurde, dass die Augpunkte in unterschiedlichen Fahrzeugen verschiedene Positionen haben, kann hier zusätzlich eine fahrzeugabhängige Fläche weitere Verbesserung der Haltungssimulation mit sich bringen.

Das vereinfachte Kraftberechnungsmodell, welches Kräfte an den Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug berechnet, sollte zwingend bei den Schnittstellen Sitzfläche und Sitzlehne überarbeitet werden, da das berechnete Verhältnis nicht mit der Realität übereinstimmt. Durch eine Positionsvariation der Krafteinleitungspunkte

im Rücken und Becken sollte das Verhältnis der beiden Schnittstellen so verändert werden, dass auf die Sitzlehne eine geringere Belastung und in Folge dessen auf die Sitzfläche eine größere Belastung kommt. Ansonsten entsprechen die berechneten Kräfte des Modells gut den real gemessenen Kräften.

Handlungsbedarf besteht zudem bei der Simulation der Beine. Die Untersuchung der Treffsicherheit hat gezeigt, dass Defizite des KHM bei den Knie- und Hüftwinkeln, vor allem bei Betätigung der Bremse und der Kupplung bestehen. Aufgrund der Optimierung der Gelenkbelastung werden die Beine bei diesen Haltungen sehr weit ausgestreckt. Dabei ergibt sich des Öfteren eine Durchdringung des Sitzkissens durch den Oberschenkel. Eine Verbindung des RAMSIS-KHM mit RAMSIS Sitzt, einem weiteren RAMSIS Modell, welches einen kompletten Sitz simuliert, könnte an dieser Stelle Abhilfe schaffen und somit die Abweichungen zwischen Simulation und Realität verringern.

Weiteres Verbesserungspotential des KHM bietet sich bei den Kraftkoppelpunkten. Flächenbelastungen, wie sie bei der Belastung des Sitzes auftreten, gehen in die Haltungsberechnung zum jetzigen Zeitpunkt lediglich als Punktbelastungen ein. Diese Reduzierung resultiert in einer erhöhten Bewegungsfreiheit des RAMSIS Manikins, wodurch sich zwangsläufig Veränderungen der Haltung ergeben. Die Einführung von Flächenlasten ist hier für eine realitätsnahe Simulation unentbehrlich.

Ferner wäre es denkbar die Haltungsberechnung des KHM weiter zu verbessern, indem der Optimierungsalgorithmus derart verändert wird, dass er nicht mehr nur die Summe der relativen Gelenkbelastungen minimiert, sondern zusätzlich jedes Gelenk einzeln betrachtet. Auftretende Ausreißer bei den Gelenkbelastungen können somit lokalisiert und aufgelöst werden.

Wie die vorliegende Arbeit zeigt, sind realitätsnahe Haltungen mit dem RAMSIS-KHM simulierbar. Dennoch müssen Kenntnisse dieser Haltungen vorhanden sein, damit die Abweichungen zwischen Simulation und Realität gering ausfallen. Für die Simulation weiterer Haltungen oder Fahrzeuge, die nicht in dieser Arbeit abgedeckt sind, ist die Überprüfung zwischen Realität und Simulation ebenfalls durchzuführen. Andernfalls kann keine ausreichende Realitätsnähe erwartet werden.

Die Defizite des RAMSIS-KHM, welche die vorliegende Arbeit aufgedeckt hat, können durch mehrere Ursachen bedingt sein. So führen nicht modellierte Weichteile sowie individuelle Kraftkartoffeln der Versuchspersonen mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer Abweichung zwischen Realität und Simulation. Des Weiteren könnten vereinfachte Annahmen des KHM für die Abweichungen verantwortlich sein.

Die Erwartungen an das KHM, die bessere Simulationsfähigkeit gegenüber dem WM sowie die universelle Einsatzfähigkeit, haben sich, was die Fahrerhaltungen betreffen, nicht erfüllt. Das KHM ist umständlicher in der Anwendung und liefert darüber hinaus keine wesentlich bessere Haltungsprognose. Das mag daran liegen, dass die Fahrerhaltung des WM sowie die dazu gehörenden Restriktionsrichtlinien vielfach optimiert und daher sehr gute und realitätsnahe Haltungen prognostizieren. Für den Fall der Fahrzeugauslegung ist das RAMSIS-KHM demnach kein Fortschritt gegenüber dem bisher etablierten WM. Bei Überarbeitung der Defizite wäre aber eine Verbesserung bei unbekanntem oder ungewöhnlichen Geometrien zu erwarten, was aber zukünftig überprüft werden sollte.

7 Literaturverzeichnis

- BJORNELV, S.; LYDERSEN, S.; MYKLETUN, A.; HOLMEN, T. L.: Changes in BMI-distribution from 1966-69 to 1995-97 in adolescents: The Young-HUNT Study, Norway; BMC Public Health, 2007
- BLUMRICH, S.: Systematischer Vergleich des RAMSIS-Wahrscheinlichkeits- sowie Krafthaltungsmodells mit Realversuchen; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2008
- BORTZ, J.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler; Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2005
- BUCHHOLZ, M.: Experimentelle Untersuchung von bevorzugten Sitzpositionen sowie der Kontaktstellen zwischen Mensch und Fahrzeug am Fahrer-arbeitsplatz im Pkw; Diplomarbeit an der Fakultät Maschinenbau der Fachhochschule München, 2007
- DULLER, C.: Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS und R; Physica-Verlag, Heidelberg, 2008
- ESTERMANN, S.: Komfortprognose für ein CAD-Menschmodell auf der Basis realer Fahrversuche; Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 1999
- FRÖHMEL, C.: Systematische Untersuchung der Auswirkungen verschiedener Lenkrad- und Pedalpositionen auf den Fahrer; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2005
- FRÖHMEL, C.; ASSMANN, E.; BUBB, H.: Validation of the RAMSIS force based posture model by contact force measurement; Proceedings of the SAE Conference on Digital Human Modeling, Pittsburgh, Pennsylvania, 2008a
- FRÖHMEL, C.: Kraftmessung an den Schnittstellen Mensch-Fahrzeug – Auslegung und Realisierung der Messtechnik, Lehrstuhlzeitung des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München, Ausgabe 009, 2008b
- FRÖHMEL, C.: Das RAMSIS-Krafthaltungsmodell, Eine neue Methodik der Haltungsberechnung; Präsentation auf der RAMSIS User Conference, Kaiserslautern, 2008c
- GALLMEIER, M.: Analyse von Einflussfaktoren auf die Bedienungseigenschaften von Fahrpedalmodulen; Diplomarbeit im Fachbereich Maschinenbau der Fachhochschule Regensburg, 2002
- GEUß, H.: Entwicklung eines anthropometrischen Messverfahrens für das CAD-Menschmodell RAMSIS; Dissertation am Institut für Ergonomie der Technischen Universität München, 1994

- HALLMANN, W.; LEY, W.: Der Mensch im Weltraum, In Handbuch der Raumfahrttechnik; Carl Hanser Verlag München/Wien, 1988
- HARTUNG, J.: Objektivierung des statischen Sitzkomforts auf Fahrzeugsitzen durch die Kontaktkräfte zwischen Mensch und Sitz; Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2006
- HdE: Handbuch der Ergonomie mit ergonomischen Konstruktionsrichtlinien und Methoden; Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Koblenz, 1989
- HUFNAGEL, S.; KERSCHER A.: Experimentelle Bestimmung des Sitzkomforts unter Berücksichtigung der Parameter Zeit, Körperhaltung und Sitzeinstellung sowie den Kräften an den Schnittstellen zwischen Mensch und Fahrzeug; Diplomarbeit im Fachbereich Fahrzeugtechnik der Fachhochschule München, 1996
- HUMAN SOLUTIONS GMBH: RAMSIS Handbuch Automotive; Version 3.8, 2005
- HUMAN SOLUTIONS GMBH: Manual: RAMSIS Kraft-Haltungsmodell, Allgemeine Haltungssimulation auf Basis biomechanischer Parameter; RAMSIS Version 3.8.13, 2004
- KOLLING, J.: Validierung und Weiterentwicklung eines CAD-Menschmodells für die Fahrzeuggestaltung; Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 1997
- LERCH, R.: Elektrische Messtechnik; Springer Verlag, 2007
- MARACH, A.: CAD-fähiges Prognosemodell für statische Körperhaltungen des Menschen; Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 1999
- MARKFORT, I.-A.: Untersuchung der Haltungsvariabilität in Abhängigkeit einer zunehmenden Belastungsintensität; Experimentelle Semesterarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2005
- MARTIN B.: Untersuchung von Fahrerhaltungen und Kontaktkräften im Kraftfahrzeug zur Validierung des RAMSIS-Krafthaltungsmodells; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2008
- REIMER, E.M.; BALDWIN, L.H.: Cavity sensor technology for low cost automotive safety & control devices; Air Bag Technology9, Cobo Convention Center, Detroit, 1999
- RIGEL, S.: Entwicklung und Validierung einer Methode zur quantitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einen PkW; Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2005

- REINDL, A.: Statistische Analyse menschlicher Fahrerhaltungen in Realität und Simulation; Diplomarbeit an der Fakultät Wirtschaftsingenieurwesen der Fachhochschule München, 2009
- REITMEIER, C.: Simulation von Fahrerhaltungen mit dem RAMSIS Krafthaltungsmodell auf Basis von Untersuchungen zur Haltungsstreuung; Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2008
- ROAS, A.: Konzeption, Aufbau und Test einer Methodik zur Messung von Kontaktkräften zwischen Mensch und Fahrzeug; Diplomarbeit an der Fakultät Fahrzeugtechnik der Fachhochschule München, 2007
- ROTHAUG, H.: Combined Force-Posture Model for Predicting Human Postures and Motion by Using the Ramsis Human Model; 2000-01-2170, Proceedings of the SAE Conference on Digital Human Modeling, Dearborn, 2000
- SACHS, L.: Statistische Methoden Planung und Auswertung; Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 1993
- SCHÄFER, P.; RUDOLPH, H.; SCHWARZ, W.: Digital Man Models and Physical Strength – A New Approach in Strength Simulation; 2000-01-2168, Proceedings of the SAE Conference on Digital Human Modeling, Dearborn, 2000
- SCHWARZ, W.: 3D-Video-Belastungsanalyse. Ein neuer Ansatz zur Kraft- und Haltungsanalyse; VDI Fortschrittsberichte, Reihe 17, Nr. 166, VDI Verlag, 1997
- SEIDL, A.: Das Menschmodell RAMSIS, Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen; Dissertation am Institut für Ergonomie der Technischen Universität München, 1994
- SEITZ, T., PFEIFFER, E., BUBB, H.: 3-D-Menschmodellierung in Schwerelosigkeit; Tagungsband zur DGLR-Jahrestagung, Berlin, 1999
- SEITZ, T.; RECLUTA, D.; ZIMMERMANN, D.; WIRSCHING, H.-J.: FOCOPP – An approach for a human posture prediction model using internal/external forces and discomfort; 2005-01-2694, SAE International, 2005
- SEITZ, T.: PCMAN Basics description and manual; Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2002a
- SEITZ, T.: PCMAN – ein Messsystem nicht nur zur Analyse von Fahrerarbeitsplätzen in Gabelstaplern; REFA-Nachrichten, Heft 6, 2002b
- SEITZ, T.: Videobasierte Messung menschlicher Bewegungen konform zum Menschmodell RAMSIS; Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 2003
- SPEYER, H.: RAMSIS Current Development and Future Trends; Präsentation auf der RAMSIS User Conference, 2002

SUCHOMEL, N.: Konzeption einer variablen Versuchseinrichtung zur Durchführung von Einstiegsversuchen; Diplomarbeit an der Fachhochschule München, 2001

www.pressuremapping.com (04.03.2009)

www.cmv.de (04.03.2009)

www.itl.nist.gov/div898/handbook/ (25.07.2009)

Anhang A – Fragebogen

Fragebogen vor Versuchsbeginn

Angaben zur Person:

Alter: Größe:

Geschlecht: ♀ ♂ Gewicht:

Sind Sie: Rechtshänder Linkshänder Beides

Angaben zu Fahrgewohnheiten:

Seit wann besitzen Sie Ihren Führerschein?

Welche Fahrerlaubnisklassen besitzen Sie?

Fahren Sie regelmäßig Auto? ja nein Wie viele Stunden pro Woche?

Wie viele Kilometer fahren Sie pro Jahr?

< 5.000km bis 10.000km bis 20.000km > 20.000km

Haben Sie ein BMW-Fahrertraining absolviert? ja Welche?
 nein

Wie würden Sie sich einschätzen?

Ich bin sehr erfahren	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	sehr unerfahren
Mein Fahrstil ist eher ruhig/ausgeglichen	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	eher sportlich/dynamisch
Ich beherrsche mein Fahrzeug in jeder Situation	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	In manchen Situationen habe ich Schwierigkeiten
Autofahren macht mir Spaß	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	Ist ein notwendiges Übel

Fragebogen nach dem Versuch

Angaben zum Diskomfort:

Die Bewertung des allgemeinen Diskomforts war für mich
sehr leicht sehr schwer

Bei der Bewertung des allgemeinen Diskomforts war ich mir
sehr sicher sehr unsicher

Die Bewertungsskala für den Diskomfort war in der Anzahl der Abstufungen
viel zu niedrig viel zu hoch

Angaben zu den Versuchen:

Die Versuchsdauer war für mich
viel zu kurz viel zu lang

Die Pausen waren für mich
viel zu kurz viel zu lang

Die Versuche waren für mich
überhaupt nicht anstrengend sehr anstrengend

Im Moment fühle ich mich

sicher	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	unsicher
wach	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	müde
entspannt	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	angespannt
friedlich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	aggressiv
fröhlich	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	traurig

**Vielen Dank für
Ihre Versuchsteilnahme!**

Anhang B – Reale Gelenkwinkel

Torsowinkel

		Fahrerhaltung		Kupplungs- haltung		Brems- haltung	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	24,1	4,6	23,3	9,0	23,7	5,2
	50.Perzentil	26,1	2,8	24,2	2,8	24,8	2,8
	95.Perzentil	24,5	2,9	23,0	2,4	23,1	2,6
BMW 3er	5.Perzentil	23,8	4,8	23,3	4,9	23,9	4,6
	50.Perzentil	25,2	2,5	24,0	2,7	24,8	2,9
	95.Perzentil	23,9	4,1	23,0	2,3	22,9	2,5
BMW 7er	5.Perzentil	24,5	5,0	24,0	6,7	24,6	6,0
	50.Perzentil	26,1	3,1	25,2	3,0	25,4	3,1
	95.Perzentil	24,6	3,2	23,2	3,8	23,5	3,6

Werte in ° AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Ellenbogen links

		Fahrerhaltung		Kupplungs- haltung		Brems- haltung	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	69,8	15,0	75,6	12,8	75,3	14,0
	50.Perzentil	52,5	12,7	58,3	10,9	57,2	12,8
	95.Perzentil	54,7	14,1	58,1	13,0	56,7	11,3
BMW 3er	5.Perzentil	71,5	16,0	75,8	10,1	73,7	9,1
	50.Perzentil	56,9	12,8	58,7	14,0	56,2	13,1
	95.Perzentil	56,6	15,1	55,7	12,7	56,7	10,4
BMW 7er	5.Perzentil	73,3	15,6	77,7	12,0	76,1	10,9
	50.Perzentil	56,9	12,7	61,5	10,5	60,0	11,5
	95.Perzentil	59,8	13,1	60,2	13,1	58,7	13,8

Werte in ° AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Ellenbogen rechts

		Fahrerhaltung		Kupplungs- haltung		Brems- haltung	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	69,4	15,5	75,0	12,1	72,2	12,6
	50.Perzentil	52,4	12,8	60,2	11,7	55,3	13,0
	95.Perzentil	53,3	15,4	56,2	10,9	56,3	10,8
BMW 3er	5.Perzentil	71,6	16,0	76,1	8,5	72,4	10,2
	50.Perzentil	56,0	12,9	59,0	12,9	58,4	14,1
	95.Perzentil	52,8	14,5	56,9	14,0	57,4	12,6
BMW 7er	5.Perzentil	72,3	16,3	77,0	14,0	74,1	13,5
	50.Perzentil	57,2	12,4	59,9	7,8	59,2	9,0
	95.Perzentil	56,4	16,0	58,3	13,6	56,1	13,0

Werte in ° AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Hüftwinkel links

		Fahrerhaltung		Kupplungs- haltung		Brems- haltung	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	72,0	6,6	69,1	8,5	73,2	8,1
	50.Perzentil	76,8	7,4	71,2	3,8	76,5	5,0
	95.Perzentil	88,4	8,0	78,6	7,1	85,4	7,5
BMW 3er	5.Perzentil	67,5	6,1	64,7	6,3	68,3	6,2
	50.Perzentil	75,6	7,1	70,8	5,1	75,3	5,4
	95.Perzentil	83,9	8,8	73,9	8,7	79,7	10,2
BMW 7er	5.Perzentil	65,3	6,1	63,7	7,2	65,9	7,1
	50.Perzentil	74,5	7,4	69,1	6,9	73,6	6,8
	95.Perzentil	81,8	7,5	73,7	5,0	78,8	6,0

Werte in ° AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Hüftwinkel rechts

		Fahrerhaltung		Kupplungs- haltung		Brems- haltung	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	73,3	6,5	74,0	7,9	70,3	7,5
	50.Perzentil	78,4	7,6	78,3	4,0	71,2	5,1
	95.Perzentil	88,7	7,9	86,1	5,8	80,6	7,6
BMW 3er	5.Perzentil	68,5	6,0	69,1	6,2	65,8	5,9
	50.Perzentil	77,1	7,1	77,2	4,5	69,8	4,2
	95.Perzentil	84,1	8,6	80,8	9,3	74,8	9,2
BMW 7er	5.Perzentil	66,6	6,1	66,9	7,7	63,6	6,6
	50.Perzentil	75,9	7,5	75,3	6,4	68,2	6,4
	95.Perzentil	82,0	7,4	79,7	5,1	74,4	5,4

Werte in ° AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Kniewinkel links

		Fahrerhaltung		Kupplungs- haltung		Brems- haltung	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	57,1	4,4	43,2	5,5	58,4	4,3
	50.Perzentil	58,6	7,4	43,4	4,0	56,5	7,1
	95.Perzentil	66,9	6,0	48,8	5,1	62,6	4,6
BMW 3er	5.Perzentil	56,4	4,3	40,7	4,0	56,0	3,6
	50.Perzentil	60,3	7,6	45,3	4,8	58,1	4,6
	95.Perzentil	67,0	5,5	49,4	4,1	62,6	5,0
BMW 7er	5.Perzentil	57,6	3,6	41,4	5,0	58,0	1,9
	50.Perzentil	61,0	7,1	46,3	5,0	57,8	4,4
	95.Perzentil	66,6	6,5	51,6	4,2	63,6	5,6

Werte in ° AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Kniewinkel rechts

		Fahrerhaltung		Kupplungs- haltung		Brems- haltung	
		AM	SD	AM	SD	AM	SD
BMW Z4	5.Perzentil	57,5	4,2	58,9	5,1	41,7	4,6
	50.Perzentil	61,9	8,1	61,4	5,0	42,5	7,6
	95.Perzentil	67,8	7,4	67,6	5,1	51,2	4,4
BMW 3er	5.Perzentil	56,7	3,9	56,6	3,6	38,8	4,8
	50.Perzentil	63,6	7,2	63,0	4,8	41,8	4,1
	95.Perzentil	68,0	5,2	67,8	4,5	50,6	2,6
BMW 7er	5.Perzentil	58,0	2,9	57,7	1,9	39,0	4,4
	50.Perzentil	64,3	7,1	63,2	4,8	42,8	5,4
	95.Perzentil	68,0	6,6	69,0	6,5	52,3	2,9

Werte in ° AM: Arithmetischer Mittelwert SD: standard deviation

Anhang C – Treffsicherheit der Gelenkwinkelstreubereiche

Prozentuale Treffsicherheit der Gelenkwinkelstreubereiche: Individuell eingestellte Fahrerhaltung

	KHM										WM					
	Ellenbogen		Hüftgelenk		Kniegelenk		Torso- winkel	Ellenbogen		Hüftgelenk		Kniegelenk		Torso- winkel		
	rechts	links	rechts	links	rechts	links		rechts	links	rechts	links	rechts	links			
BMW Z4	5. Perzentil	100	100	100	100	88	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	50. Perzentil	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	95. Perzentil	100	100	83	33	92	100	100	100	100	100	100	100	100	92	
BMW 3er	5. Perzentil	100	100	56	69	100	100	100	100	100	100	100	88	100	100	
	50. Perzentil	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	95. Perzentil	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
BMW 7er	5. Perzentil	100	100	94	100	100	100	100	100	100	100	88	50	100	100	
	50. Perzentil	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
	95. Perzentil	100	100	8	25	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	

Werte in %

Prozentuale Treffsicherheit der Gelenkwinkelstreubereiche: Betätigung der Kupplung

	KHM										WM					
	Ellenbogen		Hüftgelenk		Kniegelenk		Torso- winkel	Ellenbogen		Hüftgelenk		Kniegelenk		Torso- winkel		
	rechts	links	rechts	links	rechts	links		rechts	links	rechts	links	rechts	links			
BMW Z4	5. Perzentil	67	56	100	78	100	0	100	11	100	67	78	89	100		
	50. Perzentil	100	100	22	33	100	78	100	78	100	0	100	0	0		
	95. Perzentil	100	100	11	100	44	0	0	56	100	100	100	0	0		
BMW 3er	5. Perzentil	33	67	89	0	100	0	78	89	100	78	44	89	100		
	50. Perzentil	78	89	0	0	33	100	67	100	89	0	100	0	44		
	95. Perzentil	89	89	100	100	67	67	0	100	100	100	100	67	0		
BMW 7er	5. Perzentil	89	67	100	78	100	0	100	100	11	100	44	33	78		
	50. Perzentil	78	100	33	22	78	44	89	100	100	44	100	0	67		
	95. Perzentil	100	100	11	0	56	89	44	100	100	0	100	22	78		

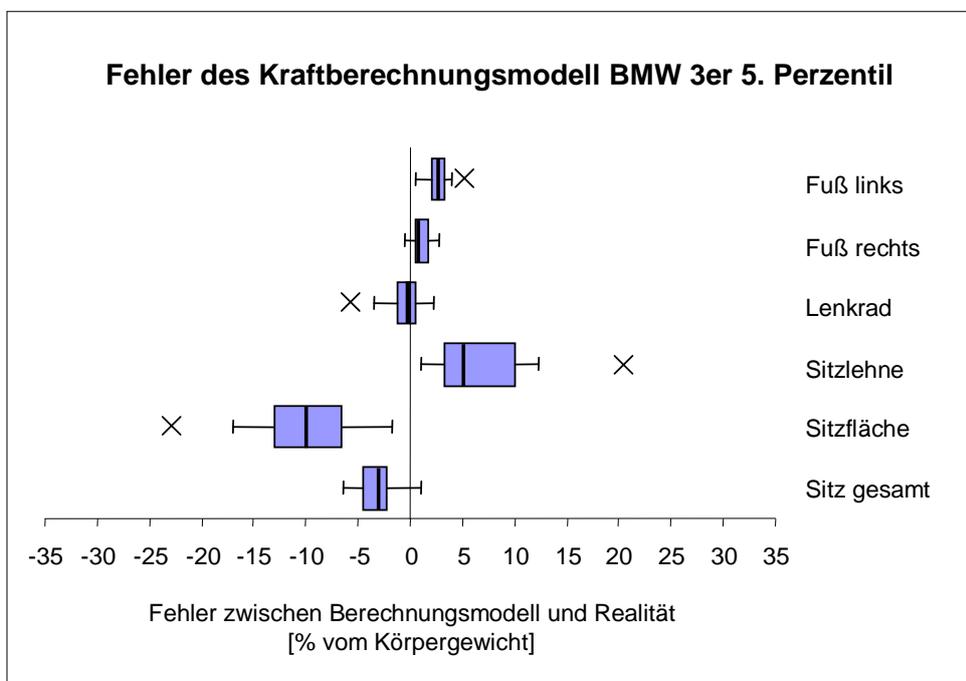
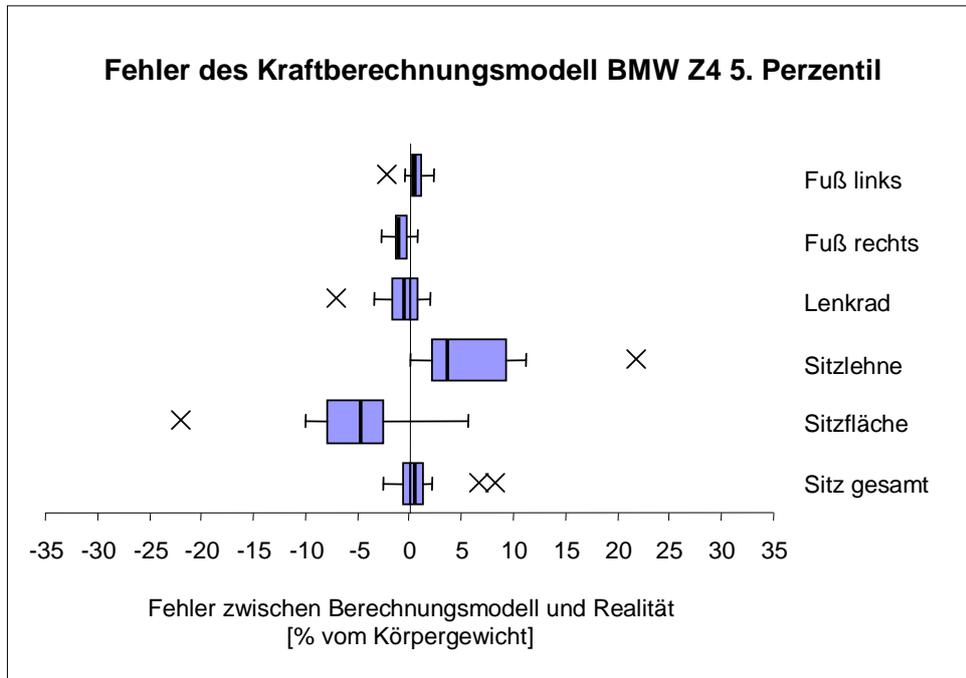
Werte in %

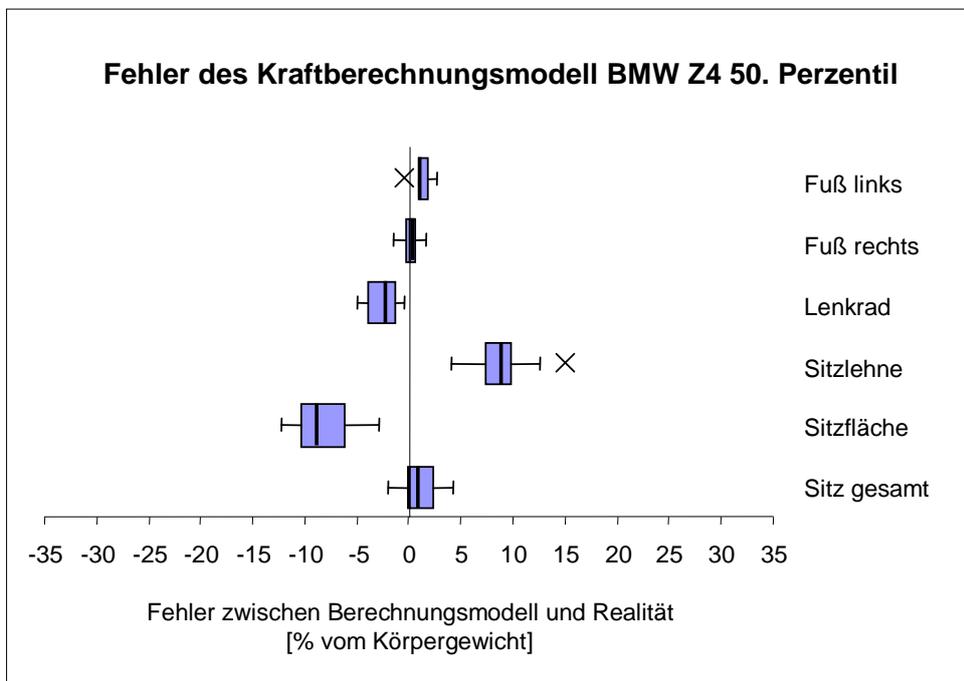
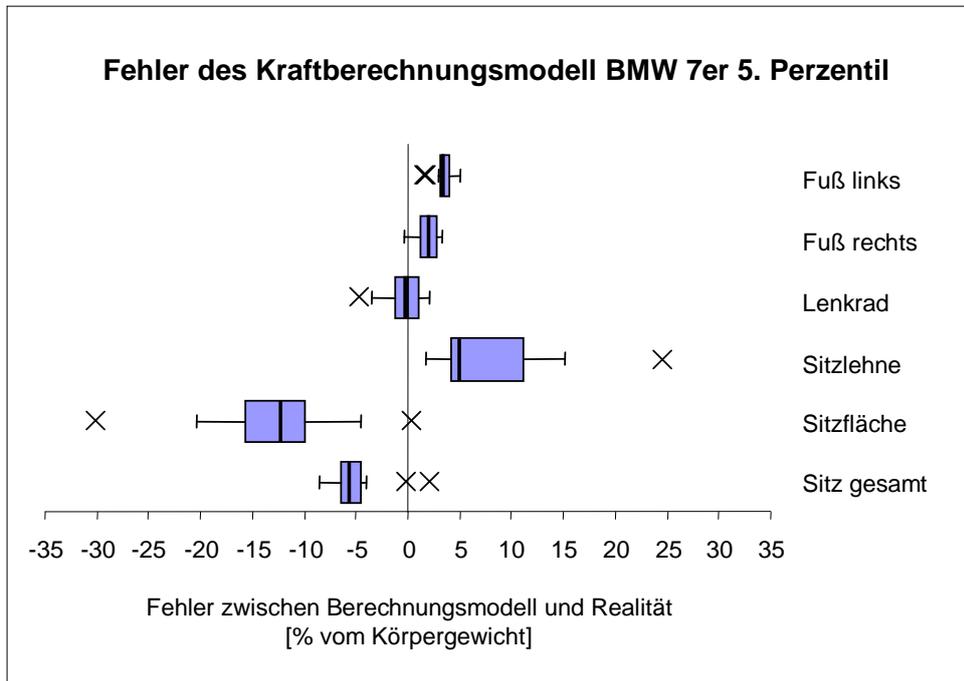
Prozentuale Treffsicherheit der Gelenkwinkelstreubereiche: Betätigung der Bremse

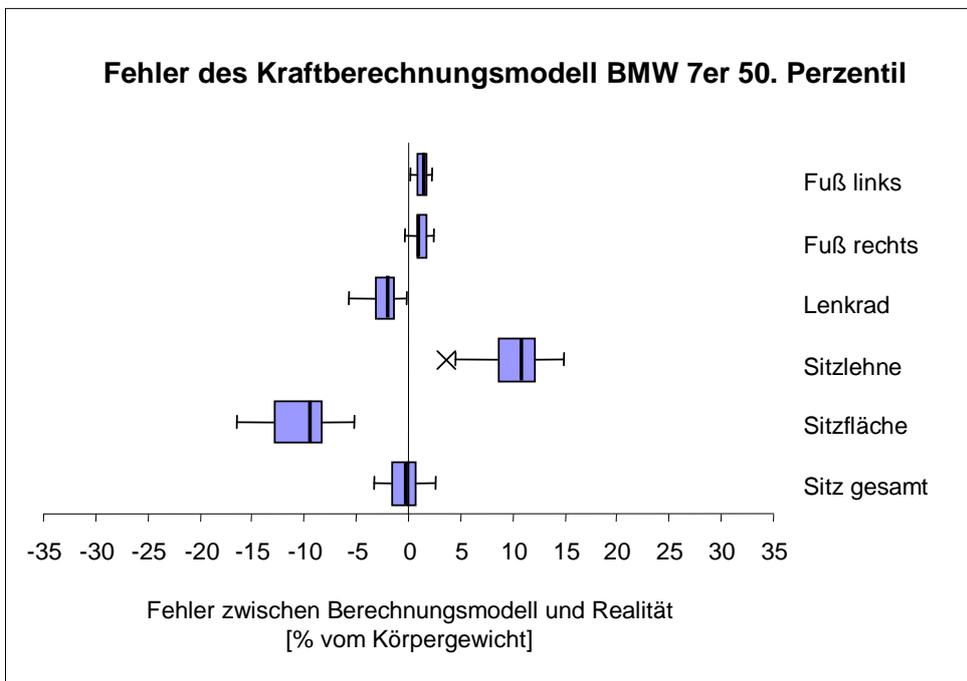
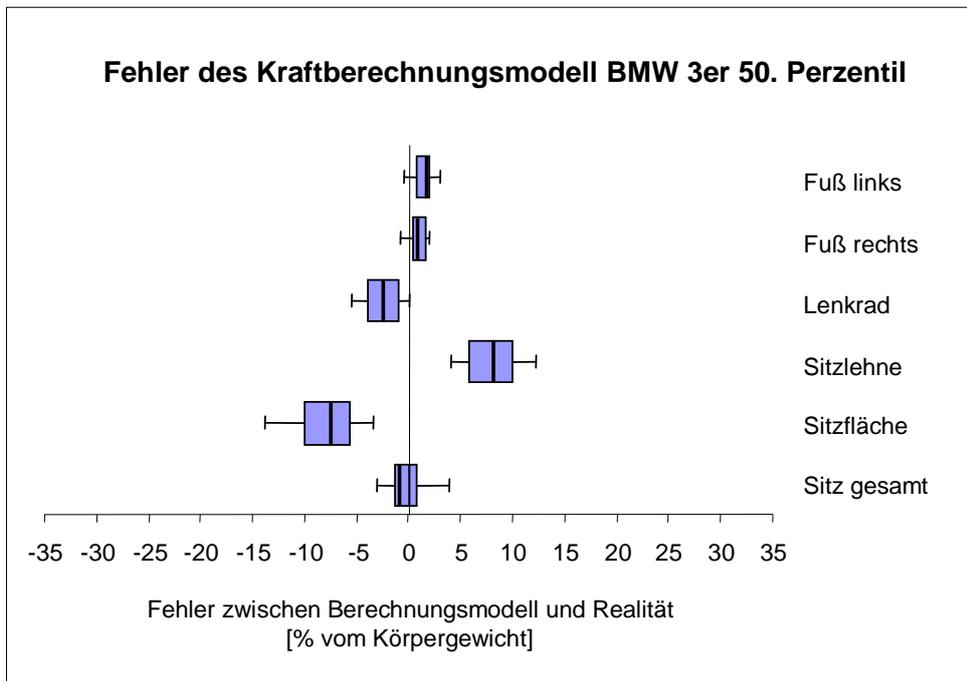
	KHM										WM									
	Ellenbogen		Hüftgelenk		Kniegelenk		Torso- winkel	Ellenbogen		Hüftgelenk		Kniegelenk		Torso- winkel						
	rechts	links	rechts	links	rechts	links		rechts	links	rechts	links	rechts	links							
BMW Z4	67	44	0	100	0	100	100	44	11	89	100	89	89	100						
	100	100	0	44	78	100	100	89	78	44	100	100	100	11						
	89	89	11	56	33	22	0	56	78	100	100	100	100	0						
BMW 3er	100	67	0	100	0	100	67	100	44	78	89	33	100	100						
	78	89	0	11	0	100	100	100	100	0	67	33	100	78						
	89	89	11	100	11	89	0	100	100	100	100	44	100	11						
BMW 7er	89	67	0	100	0	100	100	100	11	56	78	44	67	100						
	78	100	0	56	0	100	100	100	100	67	100	33	100	67						
	100	100	0	33	11	100	44	100	100	100	78	78	100	78						

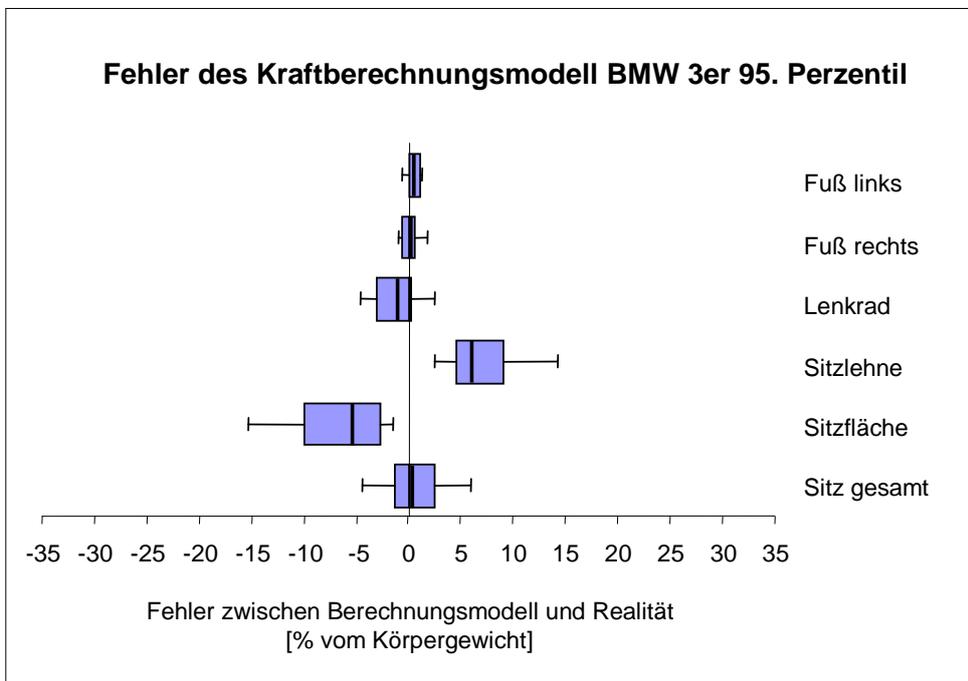
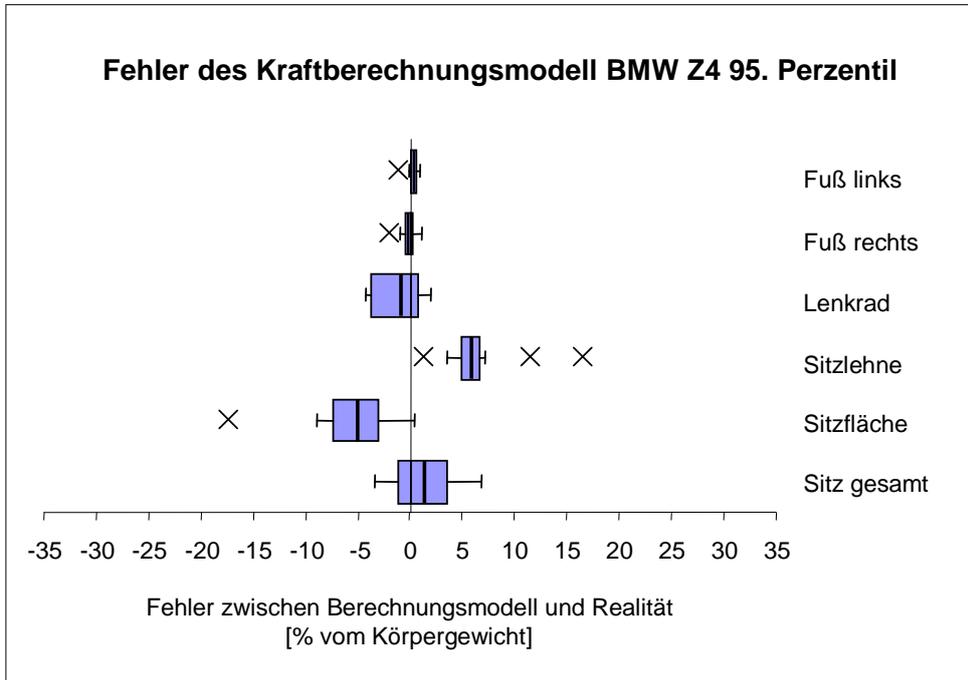
Werte in %

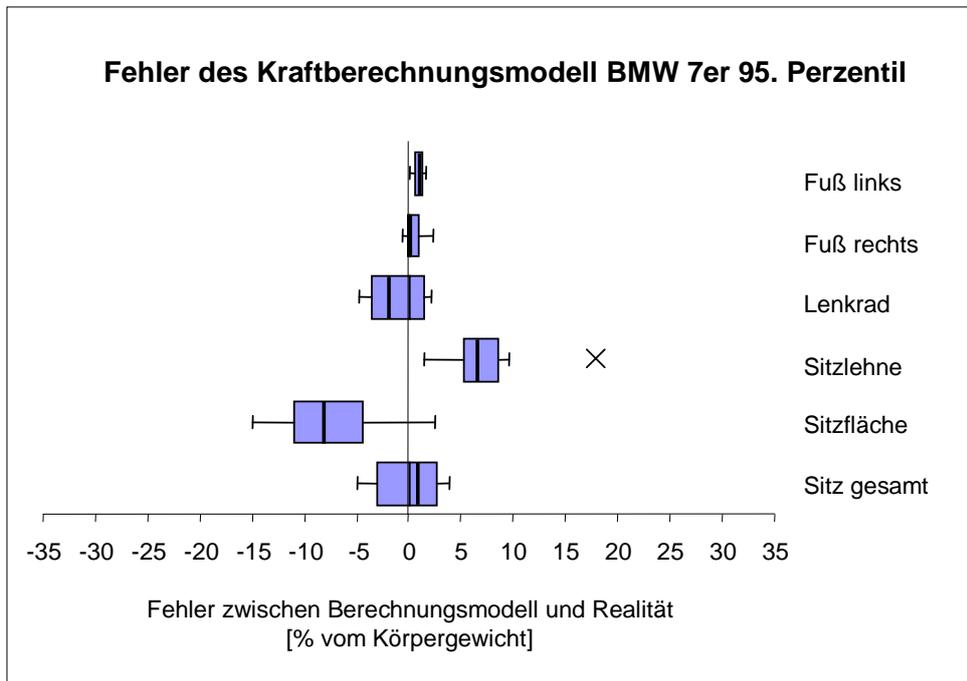
Anhang D – Fehler des Kraftberechnungsmodell











Anhang F – Treffsicherheit der Kraftstreibereiche

Prozentuale Treffsicherheit der Kraftbereiche ohne Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell

	KHM						WM					
	Fuß links	Fuß rechts	Lenk-rad	Sitz-lehne	Sitz-fläche	Sitz-gesamt	Fuß links	Fuß rechts	Lenk-rad	Sitz-lehne	Sitz-fläche	Sitz-gesamt
BMW Z4	5. Perzentil	100	94	94	100	100	100	94	94	100	100	94
	50. Perzentil	100	100	94	94	100	100	100	88	100	100	100
	95. Perzentil	92	92	83	75	67	92	100	100	92	92	100
BMW 3er	5. Perzentil	100	100	94	100	100	100	100	94	100	100	94
	50. Perzentil	100	100	88	100	100	100	100	100	100	100	100
	95. Perzentil	100	100	83	75	75	92	100	92	100	92	100
BMW 7er	5. Perzentil	100	100	94	100	100	100	100	94	100	100	94
	50. Perzentil	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	95. Perzentil	100	100	100	100	100	92	100	100	100	100	100

Werte in %

Prozentuale Treffsicherheit der Kraftbereiche mit Berücksichtigung des Fehlers aus dem Kraftberechnungsmodell

	KHM						WM					
	Fuß links	Fuß rechts	Lenk-rad	Sitz-lehne	Sitz-fläche	Sitz-gesamt	Fuß links	Fuß rechts	Lenk-rad	Sitz-lehne	Sitz-fläche	Sitz-gesamt
BMW Z4	5. Perzentil	100	100	100	69	81	100	100	100	88	94	100
	50. Perzentil	100	100	100	38	81	100	100	100	0	6	100
	95. Perzentil	100	100	100	0	0	100	100	100	0	8	100
BMW 3er	5. Perzentil	75	100	100	6	6	63	100	100	13	0	100
	50. Perzentil	100	100	100	6	6	100	100	100	13	19	100
	95. Perzentil	100	100	100	0	17	100	100	100	8	8	100
BMW 7er	5. Perzentil	0	100	100	0	0	0	100	100	13	0	81
	50. Perzentil	100	100	100	19	50	100	100	100	6	25	100
	95. Perzentil	100	100	100	0	0	100	100	100	0	0	100

Werte in %