

Lehrstuhl für Ergonomie

**Entwicklung und Validierung
einer Methode zur
quantitativen Untersuchung
der Ein- und Ausstiegsbewegung
in einen Pkw**

Stefan Rigel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. phil. habil. Birgit Spanner-Ulmer,
Technische Universität Chemnitz

Die Dissertation wurde am 27.01.2005 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 12.12.2005 angenommen.

Zusammenfassung

Die Simulation von menschlichen Bewegungen ist eine der von Ergonomen am meisten gewünschten Funktionen von Menschmodell-CAD-Systemen. Eine derartige Funktion ist die Basis vieler ergonomischer Analysen, jedoch sind exakte Daten über menschliche Bewegungen bislang nicht oder kaum zu erhalten.

In der automobilen Produktentwicklung ist die Simulation der Ein- und Ausstiegsbewegung und dabei die Bewertung des Komforts von besonderem Interesse, da beim Einstieg ein potentieller Kunde mit dem Produkt zum ersten Mal direkt in Kontakt kommt.

Bei BMW wurde deshalb im Rahmen der Weiterentwicklung des Ergonomie-simulationswerkzeugs „RAMSIS“ ein Projekt zur Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung gestartet, das zum Ziel die Simulation dieses Bewegungsablaufs hat.

In der Vorbereitungsphase des Projekts wurden in einer Vorstudie die Einstiegsbewegungen von 225 Versuchspersonen videoteknisch festgehalten und qualitativ ausgewertet. Die Analyse der Bewegungsstrategien zeigte, dass die Versuchspersonen nach verschiedenen Einstiegsstrategien in ein Fahrzeug einstiegen. Da die überwiegende Mehrheit nach der „Schlüpf“-Strategie einsteigt, stand diese Strategie im Mittelpunkt der quantitativen Bewegungsanalyse.

Als Voraussetzung dafür musste zunächst eine Methode entwickelt werden, mit der sich Ein- und Ausstiegsbewegungen quantitativ analysieren lassen. Auf der Entwicklung der Analysemethode und deren Validierung lag auch der Schwerpunkt der Arbeit. Das Ergebnis umfasst die vier Bausteine „variabler Versuchsaufbau“, „Bewegungsaufzeichnung“, „Bewegungsmodellierung“ und „Bewegungsanalyse“.

Die Versuchsergebnisse weisen nach, dass mit Hilfe der entwickelten Methode Ein- und Ausstiegsbewegungen quantitativ analysiert werden können. Die resultierende durchschnittliche Abweichung der modellierten von der realen Bewegung liegt bei etwa 10mm und damit deutlich unter der von alternativen Messverfahren.

Der Aufwand der Datenbearbeitung konnte im Laufe des Projekts auf einen für eine Reihenuntersuchung akzeptablen Wert reduziert werden. Für die Datenbearbeitung einer Versuchsperson mit 40 Bewegungssequenzen muss nun mit etwa zwei Arbeitstagen gerechnet werden.

Insgesamt zeigte die Untersuchung, dass der aufgestellte Simulationsansatz über die *führenden Körperteile* äußerst vielversprechend ist. Das einfache Beispiel des Hebens des Fußes über den Schweller demonstrierte, dass Einstiegsbewegungen mittels Interpolation „simuliert“ werden können.

Zur Simulation beliebiger Kombinationen von Versuchspersonen und Einstiegsgeometrien ist jedoch eine systematische Untersuchung mit einer deutlich größeren Anzahl von Versuchspersonen notwendig. Eine entsprechende Versuchsreihe ist bereits in Vorbereitung und werden im Rahmen von weiteren Doktorarbeiten veröffentlicht werden.

Abstract

The simulation of human motions is one of the most desired functions of ergonomics in human model CAD-systems. Such a function is the basis of many ergonomic analysis, however exact data of human motions are hardly available up to now.

In the automotive product development the in- and egress are simulated with focus on assessing client comfort. This is of particular interest as this action poses the first true physical contact of a potential customer with the product.

Therefore BMW launched a project within the scope of the further development of the ergonomic simulation tool "RAMSIS" to examine the in- and egress motion with the aim to develop a simulation of this motion.

In the launch phase of the project the ingress motion of 225 test subjects was recorded on video and qualitatively evaluated. The analysis of the recorded video data showed that the subjects used different strategies to enter the car. As the predominant majority used the "slip in" strategy to enter the vehicle this strategy was the focus of the further quantitative motion analysis.

As a prerequisite for this a method that allows the quantitative analysis of the in- and egress motion had to be developed. This thesis focuses on the development and the validation of this method and describes the resulting method containing the four modules: "variable mock-up", "motion capture", "motion modelling" and "motion analysis".

The test results show that the developed method allows a quantitative motion analysis with an average deviation of the modelled compared to the real motion of about 10mm, which is significantly below alternative measuring methods.

The expenditure of the processing could be reduced in the course of the project to a value acceptable for a continuous investigation. The data processing of one subject with 40 motion sequences now requires approximately two working days.

Altogether the investigation showed that the developed simulation method focusing on the "leading body elements" is a promising way. The simple example of lifting the foot into the car showed that ingress motions can be "simulated" through interpolation.

However, to simulate arbitrary combinations of test subjects and entrance geometries a systematic investigation of a clearly larger number of test subject is necessary. Appropriate test series are in preparation and will be the framework of an already ongoing doctoral thesis.

Danksagung

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der BMW AG in München. Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Kollegen, Projektpartner und Freunde beigetragen. Bei allen möchte ich mich herzlich bedanken.

Herausheben möchte ich vor allem den jetzigen Leiter der Abteilung „Ergonomie“ bei BMW, Herrn Dr. Ernst Assmann, der die Arbeit erst ermöglichte und stets für meine Anliegen ein offenes Ohr hatte.

Besonderer Dank gilt auch meinem Doktorvater, dem Leiter des Lehrstuhls für Ergonomie an der TU München, Herrn Prof. Dr. Heiner Bubb, der immer offen für neue Ideen war und mir in vielen Diskussionsrunden wertvolle Anregungen gegeben hat.

Frau Prof. Dr. Birgit Spanner-Ulmer danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des Co-Referats. Herrn Prof. Dr. Bernd Heißing möchte ich meinen Dank für den Prüfungsvorsitz aussprechen.

Mein besonderer Dank gilt ebenfalls

Herrn Prof. Klaus Volker Gevert, ehemals Leiter der Abteilung „Ergonomie“ bei BMW, nicht zuletzt für die Unterstützung bei der Finanzierung des Projekts,

den Kollegen aus dem Modellbau im Design bei BMW, insbesondere Herrn Oliver Wagner, der mir bei der Konzeption und beim Aufbau des Modells mit Rat und Tat zur Seite stand,

den Mitarbeitern der Firmen Vicon und ProPhysics, allen voran Herrn Mathias Bankay, für die große Unterstützung bei der Installation des Bewegungsmesssystems,

den Mitarbeitern der Firma Human Solution, in erster Linie Herrn Dr. Hartmut Speyer für seine sehr hilfreichen Anregungen bei allen Fragen rund um RAMSIS, meinen damaligen Studenten, den Herren Nico Suchomel, Mient de Jong, Franz Sellmeir, Oliver Winter und Karsten Arnold für ihr Engagement bei ihren Diplomarbeiten,

sowie Frau Claudia Zipperling, auf deren wertvolle Vorarbeit ich aufbauen konnte.

Für die intensive Durchsicht meiner Arbeit danke ich ganz herzlich Herrn Dr. Ralf Kaiser – insbesondere für Deine trefflichen Anmerkungen –, sowie Frau Tanja Götz und Herrn Dr. Kurt Wunsch.

Zuletzt möchte ich meiner Freundin Andrea für die moralische Unterstützung, meinem Bruder Andreas für die Nachhilfe in Anthropometrie und Physiologie, sowie meinen Eltern danken, die mir diesen spannenden Lebensweg ermöglicht haben.

München, Januar 2006

Meiner Mutter

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	III
Abstract	V
Danksagung.....	VII
Inhaltsverzeichnis	XIII
Abbildungsverzeichnis	XVII
Tabellenverzeichnis	XX
Abkürzungsverzeichnis	XXI
Begriffe und Definitionen.....	XXIII
1 Einleitung	1
2 Ausgangssituation, Aufgabenstellung und Lösungsansatz.....	4
2.1 Ausgangssituation.....	4
2.2 Aufgabenstellung	6
Lösungsansatz	8
2.2.1 Vorstudie zur Einstiegsstrategie	8
2.2.2 Strategie für die Implementierung der Simulation	9
2.2.3 Die vier Bausteine der quantitativen Analyse der Einstiegsbewegung ..	12
2.2.3.1 Die variable Einstiegsgeometrie	13
2.2.3.2 Bewegungsaufzeichnung	14
2.2.3.3 Bewegungsmodellierung	14
2.2.3.4 Bewegungsanalyse	15
2.2.4 Alternative Vorgehensweise	16

3 Realisierung	19
3.1 Vorstudie zum Einstiegsverhalten	19
3.1.1 Versuchsbeschreibung	20
3.1.2 Ergebnis	20
3.1.2.1 Beschreibung der Haupt- und Unterstrategien	21
3.1.2.2 Statistische Auswertung	26
3.1.2.3 Sonstige Ergebnisse	31
3.1.2.4 <i>Führende Körperteile</i> bei der „Schlüpf“-Strategie	32
3.2 Das „Variable Ein- und Ausstiegsmodell“	35
3.2.1 Dargestellte Bauteile	35
3.2.2 Aufbau des Modells	37
3.2.2.1 Das „Innere System“	37
3.2.2.2 Die Einstiegsöffnung	38
3.2.2.3 Sekundäre Geometrien	40
3.2.3 Versuchsmethodik	40
3.3 Bewegungsaufzeichnung	41
3.3.1 Bewegungsmesssystem	41
3.3.1.1 Funktionsweise	42
3.3.1.2 Hardware	43
3.3.1.3 Software	44
3.3.2 Versuchsspezifische Aufstellung der Kameras	45
3.3.3 Versuchsspezifische Kalibrierung der Kameras	47
3.3.4 Versuchsspezifische Bewegungsaufzeichnung	50
3.4 Bewegungsmodellierung	52
3.4.1 Modellierung des VEMO	52
3.4.2 Menschmodelle „Golem“ und „RAMSIS“	53
3.4.2.1 „Golem“-Menschmodell	54
3.4.2.2 „RAMSIS“-Menschmodell	55
3.4.3 Untersuchungsspezifische Menschmodelle	56
3.4.3.1 Allgemeine Anforderungen an die Bewegungsmodellierung	56
3.4.3.2 Angepasstes „Golem“-Modell	57
3.4.3.3 Transformationsmodell „Gosis“	59
3.4.4 Arbeitsablauf bei der Modellierung	62

3.5	Datenfluss.....	62
3.5.1	Datenaufzeichnung.....	63
3.5.2	Datenvorbereitung.....	63
3.5.3	Datenwandlung.....	66
3.5.4	Datenanalyse.....	69
3.6	Versuchsplanung.....	69
3.6.1	Auswahl der Geometrievariablen.....	70
3.6.2	Auswahl der Versuchspersonen.....	71
3.6.3	Versuchsablauf.....	72
3.6.4	Versuchsauswertung.....	73
4	Validierung der Methode.....	75
4.1	Voruntersuchung zur subjektiven Beurteilung des VEMO (Vorversuch 1).....	75
4.1.1	Vorgehensweise.....	75
4.1.2	Diskomfortfragebogen zur Beurteilung der Einstiegsverhältnisse.....	76
4.1.3	Ergebnisse.....	78
4.1.4	Sonstige Ergebnisse.....	79
4.2	Fehlerabschätzung in der Prozesskette von der Bewegungsaufzeichnung bis zur Bewegungsmodellierung (Vorversuch 2).....	81
4.2.1	Abschätzung des Fehlers bei der Bewegungsaufzeichnung.....	81
4.2.2	Abschätzung des Fehlers bei der Modellierung der Versuchsperson....	82
4.2.2.1	Vorgehensweise.....	83
4.2.2.2	Ergebnis.....	84
4.2.3	Abschätzung des Fehlers bei der Modellierung der Einstiegsgeometrie.....	85
4.2.3.1	Vorgehensweise.....	86
4.2.3.2	Ergebnis.....	87
4.3	Exemplarische Untersuchung zur Validierung der Untersuchungsmethode (Hauptversuch).....	88
4.3.1	Versuchsziel.....	88
4.3.2	Versuchsplanung.....	88
4.3.3	Versuchsablauf.....	89
4.3.4	Versuchsauswertung.....	90
4.3.5	Ergebnisse.....	93
4.3.5.1	Versuchsdauer.....	93

4.3.5.2	Datenverarbeitungsdauer.....	94
4.3.5.3	Fehler durch die lineare Approximierung.....	95
4.3.5.4	Intraindividuelle Streuung.....	96
4.3.5.5	Geometriebedingte Bewegungsänderungen	97
4.3.5.6	Interindividuelle Streuung.....	103
4.3.5.7	Dauer der Bewegungsphasen.....	105
4.3.6	Interpolation als Simulationsansatz.....	106
4.3.6.1	Vorgehensweise	107
4.3.6.2	Ergebnis.....	108
4.3.6.3	Resümee	113
4.3.6.4	Offene Punkte	115
4.4	Vision eines Simulationsmodells	116
4.4.1	Ablauf der Bewegungsberechnung	116
4.4.2	Berechnungsregeln für die Trajektorien	117
5	Ausblick.....	119
6	Anhang	121
	Checkliste „Datenvorbereitung“	121
	Checkliste „Versuchsablauf“	122
	Diskomfortfragebogen.....	124
	Abweichungen durch lineare Approximierung der Trajektorien	125
	Werte der „Charakteristischen Punkte“ von VP 1 und VP 2.....	126
7	Literaturverzeichnis.....	128

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Anwendungsbeispiele von digitalen Menschmodellen: Gurtverlauf (links) und die Sicht auf das Kombiinstrument (rechts).....	2
Abb. 2: Menschsimulationssysteme	4
Abb. 3: Steigerung des Preis-Leistungsverhältnisses durch neue Technologien	5
Abb. 4: Vorgehensweise der Arbeit	8
Abb. 5: Die vier Bausteine der Methode zur quantitativen Analyse der Einstiegsbewegung	12
Abb. 6: Bewegungsphasen der „Schlüpf“-Strategie	21
Abb. 7: Bewegungsphasen der „Fädel“-Strategie	22
Abb. 8: Bewegungsphasen der „Plumps“-Strategie	23
Abb. 9: Bewegungsphasen der „Hürden“-Strategie	24
Abb. 10: Anteil der Hauptstrategien bei Frauen und Männern	26
Abb. 11: Anteil der „Schlüpf“-Strategie in Abhängigkeit von der Körperhöhenklasse ..	28
Abb. 12: Häufigkeiten der Unterstrategien bei der „Schlüpf“-Strategie	28
Abb. 13: Mercedes S-Klasse und Lotus Elise.....	31
Abb. 14: Zustände der führenden Körperteile während eines Einstiegsvorgangs	34
Abb. 15: Gesamtansicht VEMO	35
Abb. 16: Schematische Darstellung des VEMO	37
Abb. 17: Einstiegsöffnung mit bestimmenden Maßen	38
Abb. 18: Profile des Schwellers und Profil der Säulenverkleidungen.....	39
Abb. 19: Einstiegs- und Hilfsgeometrien am VEMO	39
Abb. 20: Funktionsweise der optischen Bewegungsaufzeichnung	42
Abb. 21: Kameras zur Bewegungsaufzeichnung	43
Abb. 22: „Vicon“ Softwarewerkzeuge	45
Abb. 23: Sichtschutzelemente.....	46
Abb. 24: Aufstellung der Kameras.....	47
Abb. 25: Kalibrierungskörper (L-Rahmen links und Stab rechts)	48
Abb. 26: Kalibrierungsweg	49
Abb. 27: Vierstufige Bewegungsaufzeichnung	51
Abb. 28: Modellierung des VEMO	52
Abb. 29: Darstellungsformen von „RAMSIS“ (Skelett, Struktur und Hülle, Präsentationsdarstellung)	55

Abb. 30: Wirbelsäule und Schulterbereich des „RAMSIS“-Menschmodells	55
Abb. 31: Hand- und Fußmodelle in „RAMSIS“	56
Abb. 32: Falsche Zuordnung eines Trajektorienstücks bei sich kreuzenden Markerbahnen.....	58
Abb. 33: Versuchsperson mit 45 Markern	59
Abb. 34: Längenänderung des linken und rechten Unter- und Oberschenkels bei einer Einstiegsbewegung.....	60
Abb. 35: Versuchsperson in T-Haltung modelliert mit „Golem“ und „Gosis“	61
Abb. 36: Arbeitsablauf bei der Modellierung.....	62
Abb. 37: Erste Bewegungsphase	64
Abb. 38: Zweite Bewegungsphase	64
Abb. 39: Dritte Bewegungsphase	65
Abb. 40: Vierte Bewegungsphase	65
Abb. 41: Normierter und parametrisierter Verlauf der Trajektorie des rechten Sprunggelenks.....	67
Abb. 42: Mittelung von Komponentenkurven	68
Abb. 43: Versuchskonfigurationen des VEMO	71
Abb. 44: Fünfstufige Antwortskala.....	77
Abb. 45: Bewertung der Einstiegsverhältnisse an einem realen Fahrzeug und am VEMO	77
Abb. 46: Diskomfortbewertung der realen Fahrzeuge	80
Abb. 47: Fehler bei der Aufzeichnung der Marker im Bereich Fußraum (links), Sitz (Mitte) und Standebene (rechts).....	82
Abb. 48: Abweichungen ausgewählter modellierter Gelenkpunkte	84
Abb. 49: VEMO mit realen und berechneten Markern	86
Abb. 50: Aufgezeichnete linear angenäherte Bewegungsbahnen des rechten Sprunggelenks (xy-Ansicht)	90
Abb. 51: Aufgezeichnete Bewegungsbahnen des rechten Sprunggelenks (xz-Ansicht).....	91
Abb. 52: Bewegungsbahnen der führenden Körperteile des Unterkörpers mit den Analysepunkten	93
Abb. 53: Auswirkung der Veränderung der Schwellerhöhe auf den höchsten Punkt der Bewegungsbahnen des rechten und linken Sprunggelenks	99
Abb. 54: Auswirkung der Veränderung der Lage der A-Säule auf den Anfangspunkt der Bewegungsbahnen des rechten und linken Sprunggelenks in x-Richtung.....	100

Abb. 55: Auswirkung der Veränderung der Lage der A-Säule auf den Zwischenpunkt 4 der Bewegungsbahnen des rechten und linken Sprunggelenks	101
Abb. 56: Auswirkung der Veränderung der Lage der B-Säule auf den vordersten Punkt der Bewegungsbahnen des rechten und linken Hüftgelenks	101
Abb. 57: Auswirkung der Geometrievariation (jeweils $\pm 80\text{mm}$) auf die Abstände von führenden Körperteilen von VP 1	102
Abb. 58: Bewegungsbahnen von VP 1 und VP 2 (xy-Ansicht).....	103
Abb. 59: Qualitativer Verlauf der Bewegungsanpassung bei Veränderung der Geometrie.....	107
Abb. 60: Aufgezeichnete und berechnete Bewegungsbahnen des rechten Sprunggelenks (xy-Ansicht)	108
Abb. 61: Aufgezeichnete und berechnete Bewegungsbahn des rechten Sprunggelenks (yz-Ansicht)	109
Abb. 62: Vergleich der animierten Haltung aus aufgezeichneten und berechneten Bewegungsbahnen (1. Bewegungsphase).....	111
Abb. 63: Vergleich der animierten Haltung aus aufgezeichneten und berechneten Bewegungsbahnen (2. Bewegungsphase).....	112
Abb. 64: „Bewegungsraum“ nach [Giese 2000].....	113
Abb. 65: Berechnung von Bewegungsbahnen durch Skalierung	114
Abb. 66: Konzept des Simulationsablaufs	117
Abb. 67: „Steer-by-wire“-Konzepte von Mercedes (links) und BMW (rechts).....	120

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Vor- und Nachteile des alternativen „Diskomfortmodell“-Ansatzes	18
Tab. 2:	Unterstrategien bei der „Schlüpf“-Strategie	25
Tab. 3:	Korrelationen zwischen der Hauptstrategie und der Körperhöhe bzw. des Gewichts der Versuchspersonen	27
Tab. 4:	Korrelationen zwischen den Unterstrategien und der Körperhöhe bzw. des Gewichts der Versuchspersonen bei der „Schlüpf“-Strategie	29
Tab. 5:	Korrelationen zwischen der Unterstrategie und der Körperhöhe bzw. des Gewichts der Versuchspersonen bei der „Fädel“-Strategie	30
Tab. 6:	Anforderungen an die Anpassung der Segmente	57
Tab. 7:	Abstände von führenden Körperteilen zu Einstiegsgeometrien	74
Tab. 8:	Übereinstimmung der Bewertungen bei Limousine, Sportwagen und SUV ..	78
Tab. 9:	Fehlerquellen der Methode	81
Tab. 10:	Abweichungen der modellierten VEMO-Geometrien	87
Tab. 11:	Ausgewählte unabhängige Variablen der Versuchsperson	89
Tab. 12:	Ausgewählte unabhängige Variablen der Einstiegsgeometrie	89
Tab. 13:	Analysepunkte der führenden Körperteile im Hauptversuch	92
Tab. 14:	Durchschnittlicher Fehler durch lineare Approximierung in Millimeter	95
Tab. 15:	Standardabweichung der charakteristischen Punkte in Millimeter	96
Tab. 16:	Absolutwerte der charakteristischen Punkte des rechten Sprunggelenks von VP 1 und VP 2	104
Tab. 17:	Absolutwerte der charakteristischen Punkte des rechten Hüftgelenks von VP 1 und VP 2	104
Tab. 18:	Absolutwerte der charakteristischen Punkte des linken Hüftgelenks von VP 1 und VP 2	104
Tab. 19:	Absolutwerte der charakteristischen Punkte des linken Sprunggelenks von VP 1 und VP 2	105
Tab. 20:	Standardabweichung der Dauer der Bewegungsphasen von VP 1	105
Tab. 21:	Mittlere Dauer der Bewegungsphasen von VP 1 und VP 2 in Prozent der Gesamtdauer	106
Tab. 22:	Abweichungen der berechneten von den aufgezeichneten Bewegungsbahnen	110

Abkürzungsverzeichnis

5p bzw. 95p	5. bzw. 95. Perzentil, z.B. der Körperhöhe, d.h. fünf bzw. 95 Prozent der Referenzbevölkerung sind in Bezug auf die Körperhöhe kleiner
Abb.	Abbildung
aufgez.	aufgezeichnet
ber.	berechnet
CAD	Computer Aided Design
DB	Datenbank
FP	Fahrpedal
FS	Fußstütze
Gel.	Gelenk
H5	Senkrechtes Maß zwischen dem R-Punkt (vorne) und der Standebene [VDA 239-01]
H30	Senkrechtes Maß zwischen dem R-Punkt und dem Fersenpunkt (vorne) [VDA 239-01]
H50	Senkrechtes Maß zwischen der oberen Einfassung der vorderen Türöffnung und der Standebene in der x-Ebene des R-Punkts [VDA 239-01]
H115	Senkrechtes Maß zwischen der Standebene und der Mitte der unteren Einfassung der vorderen Türöffnung [VDA 239-01]
H-Punkt	Der H-Punkt ist der Punkt ... durch den die Drehachse zwischen Bein und Rumpf eines durch ... die 3-dimensionale H-Punkt-Maschine dargestellten menschlichen Körpers verläuft [VDA 239-01]
K01, K02 ...	Versuchskonfigurationen des „Variablen Ein- und Ausstiegsmodells“
Kap.	Kapitel
I1	Waagerechtes Maß zwischen den vertikalen Begrenzungen des Türausschnitts vorne [BMW 2000]
I1v	Anteil von I1 vor dem R-Punkt (negative x-Richtung)
I1h	Anteil von I1 hinter dem R-Punkt (positive x-Richtung)
LED	Leuchtdiode
LGHU	linkes Hüftgelenk
LGSP	linkes Sprunggelenk
OS	Oberschenkel
RAMSIS	Rechnergestütztes Anthropometrisches Mathematisches System zur Insassen-Simulation

RGHU	rechtes Hüftgelenk
RGSP	rechtes Sprunggelenk
R-Punkt	Der R-Punkt ist der Sitzbezugspunkt und der vom Hersteller angegebene besondere Konstruktions-H-Punkt [VDA 239-01]
Tab.	Tabelle
US	Unterschenkel
VEMO	Variables Ein- und Ausstiegsmodell
VP	Versuchsperson
w14	Größtes waagerechtes Maß in y-Richtung ... zwischen Außenkante des Schwellers und dem R-Punkt [BMW 2000]
w16	Waagerechtes Maß in y-Richtung ... zwischen der Außenkante des Schwellers und der Außenkante des Seitenrahmens im Dachbereich [BMW 2000]
SUV	Sports Utility Vehicle

Begriffe und Definitionen

<i>Fahrzeug- koordinaten- system</i>	x-Achse: Fahrzeuglängsachse (entgegen der Fahrtrichtung) y-Achse: Fahrzeugquerachse z-Achse: Fahrzeughochachse (von unten nach oben)	
<i>aktiv, passiv, inaktiv führendes Körperteil</i>	Ein <i>passiv führendes Körperteil</i> ist dafür verantwortlich, dass ein bestimmter Mindestabstand zu einer Geometrie eingehalten wird. Ein <i>aktiv führendes Körperteil</i> berücksichtigt nicht nur Mindestabstände, es treibt zusätzlich das entsprechende Segment bzw. eine Segmentkette an. Wird ein Segment nicht bewegt, dann sind die führenden Körperteile <i>inaktiv</i> .	Kap. 3.1.2.4
<i>lineares Morphen</i>	Verfahren zur Mittelung von Bewegungen mittels linear approximierten Geradensegmenten	Kap. 3.5.3
<i>Linearisierungs- schema</i>	einheitliches Schema zur linearen Approximierung der Bewegungsbahnen der <i>führenden Körperteile</i>	Kap. 3.5.3
<i>charakteristische Punkte</i>	spezielle Punkte der Bewegungsbahnen der <i>führenden Körperteile</i> , wie Anfangs- und Endpunkte, sowie Punkte mit Extremalwerten	Kap. 3.5.4, Kap. 4.3.4
<i>geführte Punkte</i>	Sonderfall der <i>charakteristischen Punkte</i> dar, bei denen mindestens eine Komponente durch den Kontakt eines Körperteils mit der Einstiegsgeometrie direkt beeinflusst wird	Kap. 4.3.4

1 Einleitung

Automobilhersteller sind heute mit der Herausforderung konfrontiert, neue und hochleistungsfähige Produkte in immer kürzer werdenden Intervallen auf den Markt zu bringen [Schrader 2002]. Zur gleichen Zeit erfordert der Markt kürzere Produktlebenszyklen [Milberg 1994].

Die Prozessverbesserung muss als ständige Aufgabe begriffen werden, um langfristig erfolgreich zu sein. Ziel bei BMW ist es, Entwicklungszeiten um bis zu 50 Prozent und Kosten unter anderem durch Reduzierung des Hardwareaufwands um bis zu 30 Prozent zu senken. Gleichzeitig muss die steigende Komplexität der Produkte beherrscht und die Kommunalität zwischen den Fahrzeugvarianten gesteigert werden, um so faszinierende Produkte für den Kunden herzustellen [Reichl 2002].

Wesentlich dazu beitragen wird die **Formalisierung des Entwicklungsprozesses**. Dabei müssen sämtliche Methoden, Abläufe und Ziele des Produktentstehungsprozesses unter Einbeziehung aller Beteiligten und in allen Projektphasen beschrieben werden. Durch die Beschreibung werden Schwachstellen in den Abläufen offengelegt: Redundante oder umständliche Prozesse können bereinigt und gestrafft, neue Projekte auf Basis der Beschreibungen effizienter aufgesetzt werden.

Die Projektziele sind quantitativ festzulegen, damit sie möglichst eindeutig und einfach überprüft werden können. Schon die Diskussion der quantifizierbaren Ziele, die abteilungsübergreifend stattfinden muss, wird dazu beitragen, unsinnige und überzogene Projektziele, die die Projektkosten nur unnötig belasten, zu identifizieren und zu beseitigen. Zudem lassen sich durch einheitlich festgelegte Ziele verschiedene Projekte miteinander vergleichen.

Die Formalisierung der Entwicklungsaktivitäten bringt nicht nur innerhalb eines Unternehmens Vorteile. Sie erleichtert ebenso die Zusammenarbeit mit externen Partnern. Durch die verfügbare Beschreibung des Produkts und Prozesses lassen sich Informationen einfacher austauschen. Dies unterstützt die Unternehmen in ihrer Bestrebung, weiter Teile der Entwicklung auszulagern. So werden in Zukunft verstärkt nicht nur Bauteile und Baugruppen, sondern auch ganze Teilprozesse, wie z.B. die Erprobung fremdvergeben werden.

Die Einführung neuer „virtueller Methoden“ in den Produktentstehungsprozess erfordert ebenfalls ein Umdenken bei den Arbeitsabläufen. Der wesentliche Unterschied ist, dass aufgrund der fehlenden „greifbaren“ Hardware eine intuitive und interaktive Arbeitsweise bei der Simulation nur eingeschränkt möglich ist, da meistens die

Simulationen nur Antworten auf die Fragen liefern, die vorher explizit gestellt wurden. Deshalb müssen zu simulierende Untersuchungsaufgaben vorher möglichst detailliert festgelegt werden. Genauso akribisch muss die Dokumentation der Ergebnisse erfolgen, so dass die Untersuchung zu einem späteren Zeitpunkt nachvollziehbar ist. So gesehen erfüllen die für die erfolgreiche Simulation notwendigen Prozesse die Anforderungen, die sich aus der Formalisierung des Entwicklungsprozesses ergeben und fördern sie sogar.

Definierte Prozesse und quantifizierbare Projektziele sind selbstverständlich auch in der ergonomischen Produktgestaltung erforderlich, die mittlerweile ein fester Bestandteil des Entwicklungsprozesses der Automobilhersteller ist. Dies zu erreichen ist keine einfache Aufgabe, da die ergonomische Gestaltung in vielen Bereichen mit subjektiven Fragestellungen konfrontiert ist, so z.B. wenn es darum geht, das Raumgefühl in einem Fahrzeug zu beurteilen.

Ein großes Potential birgt diesbezüglich die **digitale Menschmodellierung**, da diese Untersuchungen zu einem früheren Zeitpunkt ermöglicht, in dem noch keine Hardware vorliegt. Zudem liefert sie objektive und bewertbare Ergebnisse.

Für einen großen Bereich der ergonomischen Produktabsicherung bieten Simulationen auf Basis von digitalen Menschmodellen bereits Lösungen an, um virtuell ergonomische Aspekte zu untersuchen, wie beispielsweise in Abb. 1 dargestellt den Gurtverlauf (links) und die Sicht auf das Kombiinstrument (rechts).



Abb. 1: Anwendungsbeispiele von digitalen Menschmodellen: Gurtverlauf (links) und die Sicht auf das Kombiinstrument (rechts)

Auf Hardware (z.B. Sitzkisten, Prototypen) kann allerdings aus zwei ganz wesentlichen Gründen noch nicht verzichtet werden:

- Der Informationsrückfluss aus Realuntersuchungen stellt einen wichtigen Input für die Weiterentwicklung der Simulationen dar. Simulationen tragen dafür bereits heute dazu bei, dass die Anzahl der Hardwareschleifen reduziert und reale Modelle mit einer höheren Qualität aufgebaut werden können.
- Der noch wichtigere Grund ist, dass noch nicht alle ergonomischen Fragestellungen virtuell abgedeckt werden können. Mit der Simulation lassen sich derzeit punktuell und isoliert einzelne Produkteigenschaften wie die Erreichbarkeit oder die Sichtbarkeit untersuchen. Ganzheitliche Untersuchungen, die die gleichzeitige Berücksichtigung von mehreren ergonomischen Fragestellungen ermöglichen, was bei der Beurteilung von physikalischen Modellen selbstverständlich ist, sind virtuell noch nicht möglich. Ein Beispiel hierzu wäre das Raumgefühl, bei dem u.a. Abstände, Formen und die Ausführung einen Einfluss auf die Bewertung haben. Bei komplexeren Fragestellungen, die entsprechend komplexere Simulationsmethoden bedürfen, wie z.B. der Simulation des Einstiegskomforts, weist die Untersuchungslandkarte sogar noch ganz weiße Flecken auf.

2 Ausgangssituation, Aufgabenstellung und Lösungsansatz

2.1 Ausgangssituation

Existierende Menschensimulationssysteme wie „Jack“, „Safework“ und „RAMSIS“ (Abb. 2) erlauben es, digitale Menschen verschiedener Größe und Form in der CAD-Umgebung zu erzeugen und sie mit virtuellen Prototypen des Produkts interagieren zu lassen. Diese Softwarewerkzeuge ermöglichen ergonomische Analysen wie Erreichbarkeit, Freigang, Sichtbarkeit und statischer Kraftaufwand [Park 2003].



Abb. 2: Menschensimulationssysteme

Das bei BMW eingesetzte Simulationswerkzeug „RAMSIS“ wurde im Auftrag der deutschen Automobilindustrie als CAD-Werkzeug zur ergonomischen Konzeption von Fahrzeuginnenräumen entwickelt. Es wird heute von mehr als 60% aller Automobil- und Nutzfahrzeughersteller weltweit eingesetzt.

Wie Berechnungen von Automobilherstellern zeigen, reduziert der Einsatz von „RAMSIS“ beispielsweise die Kosten für Analysen um bis zu 50%. Aussagen für internationale Zielmärkte mit spezifischen anthropometrischen Anforderungen können drei- bis fünfmal schneller als mit herkömmlichen Analysemethoden getroffen werden [Ramsis 2003].

Allerdings sind die bisher produktiv eingesetzten Menschmodelle statisch bzw. quasistatisch. Das bedeutet, dass mit Hilfe dieser Modelle in erster Linie Haltungen berechnet werden können. Darüber hinaus lassen sich einfache Bewegungen von einzelnen Körperteilen, z.B. das Treten eines Pedals, simulieren.

Das Betätigungsfeld der Ergonomie hat sich durch den Einsatz von statischen Menschmodellen vergrößert. Es ist aber klar, dass statische Modelle bezüglich ihrer Aussage-

kraft eingeschränkt sind. Erforderlich wäre ein leistungsfähigeres, dynamisches und integratives digitales Menschmodell [Chaffin 2002].

Chaffin vertritt die Auffassung, dass wie in einer klassischen Marktsituation die alte, statisch orientierte Technologie der Menschmodellierung bezüglich des Preis-Leistungsverhältnisses ein Plateau erreicht hat (Abb. 3). Eine weitere Steigerung kann zukünftig nur durch die neue Technologie der aufkommenden dynamischen Modelle erreicht werden [Chaffin 2002].

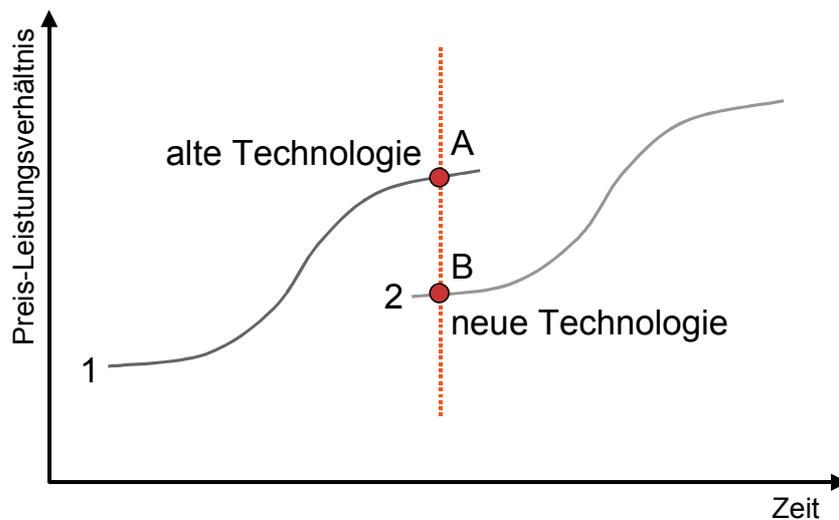


Abb. 3: Steigerung des Preis-Leistungsverhältnisses durch neue Technologien

Eine Umfrage unter Anwendern von Ergonomiesimulationen unterstrich, dass eine der am meisten gewünschten Funktionen von Mensch-CAD-Systemen die exakte Simulation von menschlichen Haltungen und Bewegungen auf Basis einer kurzen Beschreibung der Aufgabe ist [Park 2003]. Derartige Funktionen sind wichtig, da exakte menschliche Haltungen und Bewegungen die Basis vieler ergonomischer Analysen sind, die bislang nur schwer zu erhalten bzw. erzeugbar sind.

Die Schwierigkeit für die Umsetzung einer Simulation von menschlichen Haltungen und Bewegungen ist auf die hochflexible Struktur des menschlichen Körpers zurückzuführen. Die Planung einer Haltung oder Bewegung unterliegt einem Unbestimmtheitsproblem: So wird beispielsweise durch die Kenntnis der Körpermaße und der Aufgabe die Körperhaltung noch nicht komplett definiert, da oftmals die Aufgabe mit einer großen Anzahl an unterschiedlichen Lösungsstrategien erfüllt werden kann. Die Komplexität der Bewegungsplanung wird zusätzlich durch die Variationsbreite bei der zeitlichen Koordination der Bewegungsanteile einzelner Körperteile dramatisch erhöht [Park 2003].

Bisher sind im Automobilbau nur wenige spezielle aufgabenorientierte Bewegungen untersucht worden. Ein Beispiel ist der Ein- und Ausstieg, zu dem neben BMW auch Renault Untersuchungen durchführt [Monnier 2003, Müller 2003].

Der Ein- und Ausstieg ist meist einer der ersten Kontakte des Kunden mit dem Fahrzeug und lässt sich bereits im Ausstellungsraum beim Händler erleben. Die Leichtigkeit des Ein- und Ausstiegs ist von prägender Bedeutung für die weitere Kaufentscheidung [BMW 2000].

Eine ebensolche Kaufentscheidung von nahezu historischer Tragweite ist von Konrad Adenauer überliefert: der erste deutsche Bundeskanzler soll, nachdem er sich beim Probeeinstieg in einen BMW 501 den Hut vom Kopf gestoßen hat, sich für das Modell der Konkurrenz, einen Mercedes 300 als Dienstfahrzeug entschieden haben – den Wagen, der unter dem Namen „Adenauer-Mercedes“ in die Geschichte einging.

2.2 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Grundlagen für eine Ein- und Ausstiegssimulation eines Fahrers in einen Pkw zu erarbeiten.

Bei der Umsetzung einer Simulation der Ein- und Ausstiegsbewegung im speziellen und von komplexen Bewegungsvorgängen im allgemeinen sind verschiedene Herangehensweisen denkbar (vgl. Chaffin 2002). Deshalb gilt es als erstes, den in Bezug auf Entwicklungsaufwand, Projektrisiko und Simulationsgenauigkeit optimalen Weg festzulegen. Dieser Schritt ist besonders wichtig, da mit der Festlegung der Simulationsstrategie auch die Vorgehensweise in der Untersuchungs- und Analysephase und somit der Projektfortgang bestimmt ist.

Aufbauend auf den Ergebnissen dieses ersten Teils ist eine Methode zu entwickeln, mit der die Ein- und Ausstiegsbewegungen von Versuchspersonen quantitativ analysiert werden können. Für die quantitative Analyse kommen dabei z.B. Körperwinkel, Bewegungsbahnen von Körperpunkten und Abstände zu Einstiegsgeometrien in Frage. Kinetische Größen sollen nicht betrachtet werden.

Die Methode muss zum einen die bei BMW übliche Nutzerpopulation, die vom 5. Perzentil Körperhöhe Frau bis zum 95. Perzentil Körperhöhe Mann reicht, zum anderen alle Einstiegsgeometrien der aktuellen BMW-Produktpalette, also vom Sportwagen bis zum SUV, berücksichtigen.

Die Qualität der zu entwickelnden Methode ist anhand einer Versuchsreihe zu validieren. Darüber hinaus soll die Strategie zur Simulation der Einstiegsbewegung experimentell untersucht und ggf. angepasst werden.

Da die Methode grundsätzlich unabhängig von der Art der Bewegung ist und die Ein- und Ausstiegsbewegung in Bezug auf die Bewegungscharakteristik als gleichwertig angesehen werden können, beschränken sich alle weiteren Betrachtungen in dieser Arbeit auf den Einstieg. Die Vorgehensweise bei der Umsetzung einer Ausstiegssimulation kann analog von der Entwicklung der Einstiegssimulation abgeleitet werden. Entsprechend soll später eine Simulation für den Beifahrer und einen Fondpassagier folgen.

Als Prämisse ist gesetzt, dass die Ein- und Ausstiegssimulation in der Ergonomie-simulationssoftware „RAMSIS“ umzusetzen ist, da dieses das in der deutschen Automobilentwicklung anerkannte virtuelle Werkzeug für die ergonomische Gestaltung und Absicherung ist.

Die Simulation der Ein- und Ausstiegsbewegung hat pionierhaften Charakter. Eine erfolgreiche Umsetzung, würde es erlauben, die Vorgehensweise auf die Entwicklung beliebiger Bewegungssimulationen zu übertragen, womit die Tür für die Simulation beliebiger komplexer Bewegungen weit geöffnet würde.

Lösungsansatz

In Abb. 4 ist die Vorgehensweise in dieser Arbeit zusammengefasst:

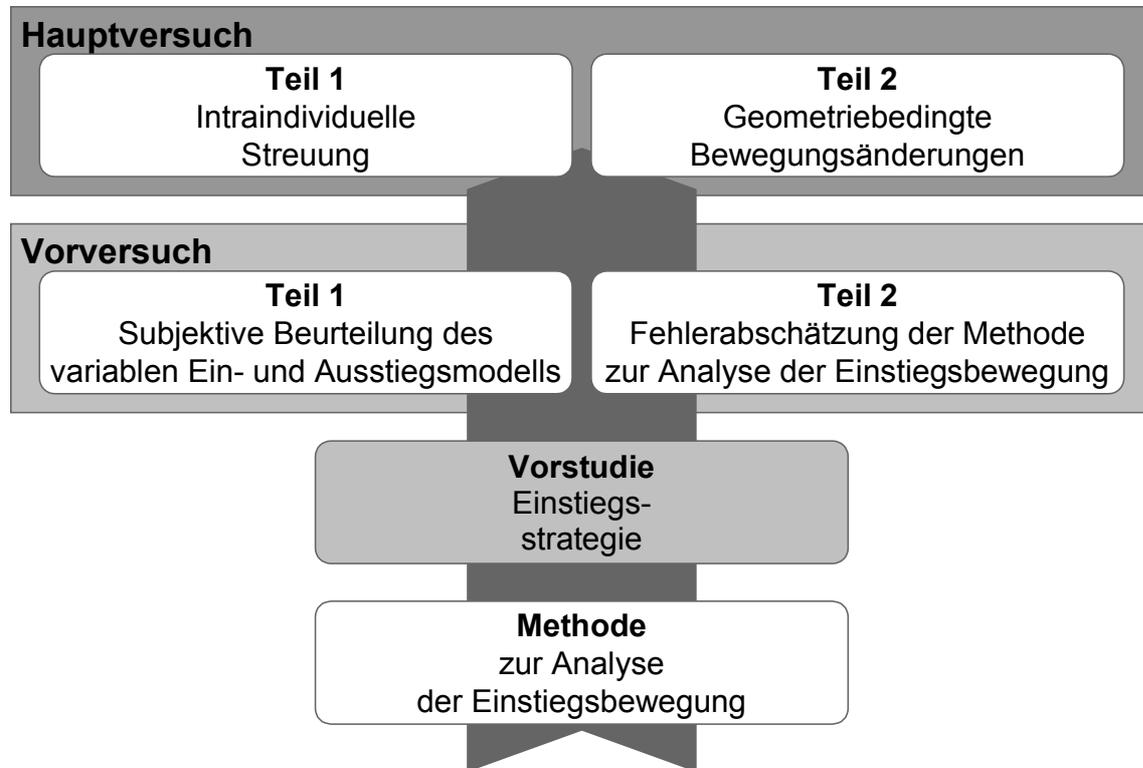


Abb. 4: Vorgehensweise der Arbeit

2.2.1 Vorstudie zur Einstiegsstrategie

Für eine Bewegungsaufgabe wie dem Einstiegsvorgang in einen Pkw gibt es eine große Anzahl an Bewegungslösungen [Höllrich 1992, Layer 1992]. Zur Erstellung einer Übersicht und Klassifizierung soll in einer Vorstudie die Einstiegsbewegung von Versuchspersonen auf Video aufgezeichnet werden. Aus der qualitativen Analyse der Bewegungen sind Strategieklassen festzulegen, denen die individuellen Bewegungen zugeordnet werden können.

In Bezug auf die Strategien sollen die Auftretenshäufigkeit und die für die Auswahl ausschlaggebenden Faktoren eruiert werden. Auf Basis dieser Untersuchung wird das Versuchspersonenkollektiv für die quantitative Analyse festgelegt.

2.2.2 Strategie für die Implementierung der Simulation

Zur Vorhersage von menschlichen Bewegungen sind in den letzten Jahren mehrere Methoden der Menschmodellierung angewandt worden. In [Chaffin 2002] werden die wichtigsten Ansätze zusammengefasst. Grundsätzlich lassen sich zwei Vorgehensweisen unterscheiden:

- 1) Bei der ersten Vorgehensweise wird aus einer sehr großen Bewegungsdatenbank die zu den Vorgaben am besten passende Bewegung ausgewählt. Die Bewegung wird über Berechnungsalgorithmen an die exakten Vorgaben (Geometrie, Anthropometrie) angepasst und als Ergebnis der Bewegungssimulation ausgegeben.

Der Nachteil dieses Ansatzes – abgesehen vom enormen Aufwand, eine ausreichend große Anzahl von Bewegungen zu sammeln – ist, dass das Ergebnis nur eine individuelle Lösung darstellt. Es lässt sich keine Aussage über die allgemeine Gültigkeit dieses Ergebnisses machen. In einem ungünstigen Fall kann eine geringfügige Veränderung in den Vorgaben zu einer komplett anderen Lösung führen.

Andererseits bietet diese Vorgehensweise den Vorteil, dass sie nicht auf eine bestimmte Bewegung beschränkt ist, sondern für beliebige Bewegungen verwendet werden kann. Die Anwendung für einfache Bewegungen wie dem Greifen nach einem Gegenstand wird in [Chaffin 2002] beschrieben.

- 2) Die zweite Vorgehensweise geht von einem allgemeingültigen Modell einer Bewegungsaufgabe von Körperbewegungen aus. Über die Vorgaben werden die Variablen des Modells so spezifiziert, dass daraus die spezielle Bewegung berechnet wird.

Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass durch die Allgemeingültigkeit des Modells das Ergebnis der Simulation voraussagbar und nicht zufällig ist. Allerdings ist offen, ob eine komplexe Bewegungsaufgabe in einem allgemeingültigen Modell beschrieben werden kann. Des Weiteren muss für jede Bewegung und Bewegungsstrategie ein eigenes Modell aufgestellt werden.

Das Modul „RAMSIS dynamisch“, mit dem einfache Bewegungen wie das Greifen nach einem Gegenstand bereits simuliert werden können, wurde auf Basis eines Haltungsmodells realisiert.

Der Einstieg ist im Wesentlichen aus zwei Gründen eine besonders komplexe Bewegungsaufgabe: Zum einen umfasst der Bewegungsvorgang mehrere Bewegungsphasen mit wechselnden Teilzielen, z.B. das Herantreten an das Fahrzeug, das Heben des rechten Fußes in das Fahrzeug usw.. Zum anderen ist die Anzahl der unabhängigen Variablen sehr groß, da sowohl die Geometrie des Einstiegs als auch der zu untersuchende Mensch in seiner Anthropometrie in weiten Bereichen variiert werden und daraus eine noch größere Anzahl an Kombinationen gebildet werden kann.

Eine Umsetzung auf Basis eines allgemeingültigen Modells erscheint aufgrund der großen Anzahl an unabhängigen Variablen nicht möglich. Aus diesem Grund soll nach einem „**gemischten Ansatz**“ vorgegangen werden, dessen Grundlage idealisierte, in einer Datenbank abgelegte Referenzbewegungen sind. Die Referenzbewegungen repräsentieren Bewegungen mit bestimmten anthropometrischen und geometrischen Variablen und decken deren Wertebereiche ab. Durch Interpolation und Kombination soll aus diesen Bewegungen nach den Vorgabedaten die spezielle Lösung berechnet werden.

Der Vorteil des „gemischten“ Ansatzes ist, dass das Ergebnis nicht nur eine individuelle Lösung repräsentiert. Allerdings bedarf es eines aufwendigen Algorithmus, der aus den idealisierten Referenzbewegungen die zu den Vorgaben passende spezielle Lösung berechnet. Für das Projekt „Einstiegssimulation“ gilt es deshalb zunächst, die Bewegung umfassend zu analysieren.

In den Berechnungsalgorithmus sollen die Bewegungsmodelle der **führenden Körperteile** und der **Schutzabstände** einfließen:

„Führende Körperteile“

Die Beschreibung der Bewegungen in der Datenbank erfolgt mit einer überschaubaren Anzahl von besonderen Bewegungsbahnen (Trajektorien):

Grundlage dieser Idee ist, dass die Bewegung durch die Bewegungsbahnen von speziellen Körperteilen, den sog. *führenden Körperteilen*, gesteuert wird. Die Theorie leitet sich aus der modellhaften Vorstellung der „zielgerichteten Bewegung“ ab [Artt 1998]. Diese beruht auf der Beobachtung, dass beispielsweise das Greifen der Hand nach einem Gegenstand angesehen werden kann, als ob die Hand den Arm steuert und nicht umgekehrt [Sivak 1992]. Die Hand wird sozusagen als das den Arm *führende Körperteil* betrachtet. Auf eine komplexe Bewegung übertragen, kann die Bewegung des gesamten Körpers als eine Kombination von mehreren *führenden*

Körperteilen angesehen werden. Eine ähnliche Vorgehensweise verwendet Ilg bei seiner Methode. Er geht ebenfalls davon aus, dass komplexe Bewegungsmuster durch die Bewegungsbahnen von „Schlüsselpunkten“ charakterisiert werden können [Ilg 2002].

Diese Art der Beschreibung hat den Vorteil, dass sie sehr kompakt ist. Da die Trajektorien die absolute Lage von Punkten im Raum festlegen, sind die Auswirkungen von Änderungen auf die Bewegung einfach nachvollziehbar.

Die letztendliche Ganzkörperbewegung soll auf Basis der *führenden Körperteile* im bereits existierenden Modul „RAMSIS dynamisch“ berechnet werden. Dabei gilt es noch nachzuweisen, dass ausgehend von den *führenden Körperteilen* eine natürliche, realitätsnahe Bewegung erzeugt werden kann (Hypothese I). Diese Vorgehensweise kann man als eine Art von Bewegungsanimation bezeichnen.

Die eigentliche Simulationsarbeit wird bei der geometrie- und anthropometrie-spezifischen Anpassung der Trajektorien der *führenden Körperteile* geleistet. Dafür ist ein Algorithmus zu entwickeln, der aus den anthropometrischen Maßen des Manikins und den Einstiegsmaßen den Verlauf der *führenden Körperteile* berechnet. Bei diesem Modell soll von Referenztrajektorien ausgegangen werden, die entsprechend der Randbedingungen angepasst werden.

Es wird angenommen, dass durch eine geschickte Anpassung der Trajektorien der *führenden Körperteile* eine neue, natürliche Bewegung berechnet werden kann (Hypothese II). Dabei muss berücksichtigt werden, dass sich Änderungen in einer Bewegungsbahn auf die anderen Bewegungsbahnen auswirken können. So kann beispielsweise ein stärkeres Anheben des Fußes bei einem höheren Schweller dazu führen, dass auch das Knie oder sogar die Hüfte angehoben werden muss.

„Schutzabstände“

Bei der Berechnung der Bewegung soll mit dem Modell der „Schutzabstände“ [Arlt 1997] der Einfluss der Geometrie berücksichtigt werden.

Arlt stellte fest, dass bei einer Bewegung in Abhängigkeit vom Körperteil ein bestimmter Mindestabstand eingehalten wird. Dieser ist beispielsweise für die Füße und Hände geringer als für den Kopf. Die Beschaffenheit der Geometrie hat ebenfalls einen Einfluss. So wird bei einer Bewegung um ein mit Schaumstoff gepolstertes Bauteil ein geringerer Sicherheitsabstand eingehalten als bei einem scharfkantigen Bauteil aus Metall.

Daraus wird die Hypothese abgeleitet, dass bei der Einstiegsbewegung die Körperteile ebenfalls einen bestimmten Mindestabstand zur Einstiegsgeometrie einhalten (Hypothese III). In den Versuchen soll herausgefunden werden, wie groß dieser Mindestabstand je nach Körperteil ist und von welchen Faktoren er abhängt (z.B. die Mindestabstände der Füße zur A-Säule und zum Schweller in Abhängigkeit von der Lage der Geometrien).

2.2.3 Die vier Bausteine der quantitativen Analyse der Einstiegsbewegung

Die entwickelte Methode zur quantitativen Analyse der Einstiegsbewegung besteht aus vier Bausteinen, die aufeinander aufbauen: die variable Ein- und Ausstiegsgeometrie, das Bewegungsaufzeichnungssystem, die Bewegungsmodellierung und die Bewegungsanalyse (Abb. 5). Im Folgenden werden die vier Bausteine detailliert beschrieben.

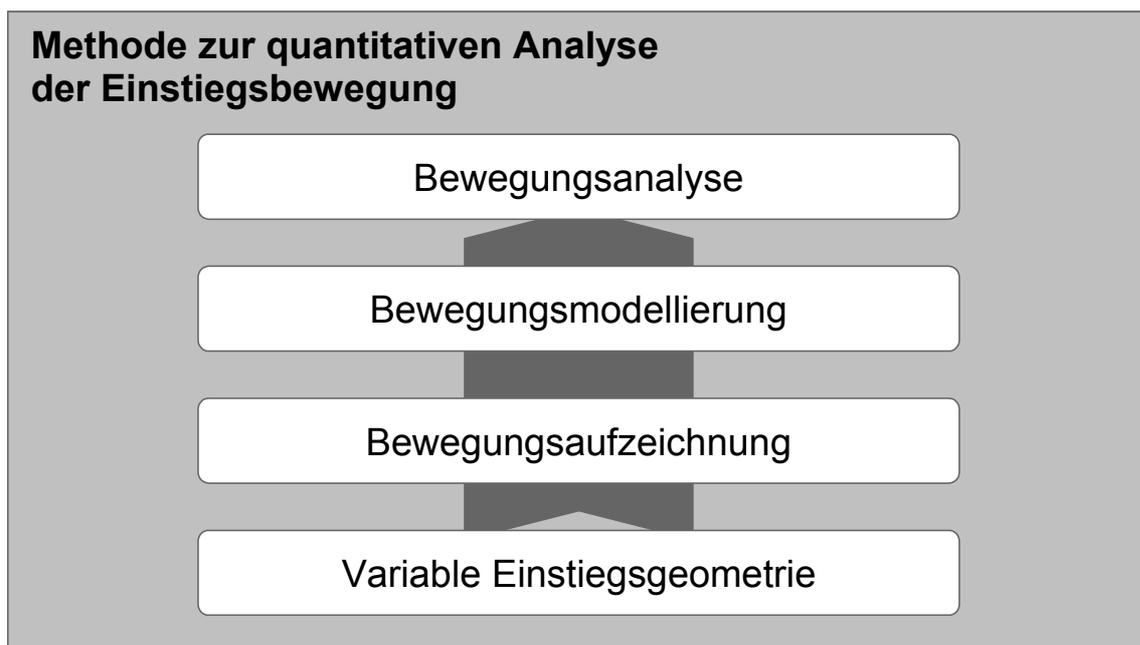


Abb. 5: Die vier Bausteine der quantitativen Analyse der Einstiegsbewegung

2.2.3.1 Die variable Einstiegsgeometrie

Der Bewegungsverlauf beim Einsteigen hängt primär von zwei Faktoren ab: der Anthropometrie der Person und der Geometrie des Einstiegs. Der Einfluss der Anthropometrie wird über die Auswahl der Versuchspersonen berücksichtigt, deren Bewegung analysiert werden soll (vgl. Kap. 3.1, Vorstudie zum Einstiegsverhalten).

Zur Analyse des Einflusses der Geometrie auf die Bewegung bedarf es eines möglichst in allen einstiegsrelevanten Bereichen verstellbaren Versuchsaufbaus. Eine Analyse von Teilbewegungen an vereinfachten Modellen, z.B. das Heben eines Fußes über einen Balken, ist nicht zielführend, da die Anfangs- und Endzustände der Einzelbewegungen jeweils von den vorhergehenden und nachfolgenden Teilbewegungen und den entsprechenden Geometrien abhängen. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse wäre damit nur bedingt gegeben. Aus diesem Grund müssen am Versuchsaufbau alle bewegungsbeeinflussenden Geometrien gleichzeitig berücksichtigt werden können. Die Verstellbereiche müssen die Einstiegsgeometrien von Sportwagen, Limousinen und SUV's abdecken (vgl. Kap. 2.2).

Die Darstellung soll der Komplexität von realen Einstiegsöffnungen so nahe wie möglich kommen, damit sich die Versuchspersonen so natürlich wie möglich bewegen. Die Erwartungshaltung der Versuchsperson am Modell muss nahezu die gleiche sein wie am realen Fahrzeug. Dies gilt vor allem für die Ausführung des Modells, die die Bewegung erheblich beeinflussen kann. So wird ein scharfkantiger Aufbau dazu führen, dass ein größerer Sicherheitsabstand zu einer Geometrie eingehalten wird als bei einer weichen Polsterung. Eine weitere Anforderung betrifft die Verstellung des Modells. Sie soll mit Hilfe von möglichst wenigen Handgriffen möglich sein, so dass während des Versuchs keine großen Pausen durch das Einstellen von Variationen entstehen. Von realen Einstiegsgeometrien müssen dazu vereinfachte und abstrahierte Geometrien abgeleitet werden, die ein einfaches Anpassen mit möglichst wenigen Verstellungen erlauben und die Komplexität des Modells in einem überschaubaren Rahmen halten.

Einen sehr großen Einfluss auf die Ausführung des Aufbaus hat das zu wählende Bewegungsaufzeichnungssystem. Damit die Kameras eine möglichst freie Sicht auf die einsteigende Person haben, sind alle im Sichtbereich befindlichen Bauteile auf die minimal erforderliche Größe zu reduzieren. Sekundärgeometrien wie Verstellmechanismen, Streben etc. sind weitestgehend außerhalb der Sichtbereiche der Kameras anzuordnen.

Für die Konzeption des Aufbaus muss also ein für den Versuch optimaler Kompromiss zwischen Realitätsnähe und Abstraktion der Einstiegsgeometrie gefunden werden.

2.2.3.2 Bewegungsaufzeichnung

Eine große Herausforderung stellt die Bewegungsaufzeichnung dar. Da die Analyse quantitativ möglich sein soll, muss die Bewegung dreidimensional erfasst werden können. Hierfür soll ein optisches Bewegungsmesssystem eingesetzt werden.

Normalerweise werden derartige Systeme in nahezu leeren Räumen eingesetzt. Die Hauptschwierigkeit bei der Untersuchung der Einstiegsbewegung ist, dass im Messvolumen eine große Anzahl von sichtbehindernden Bauteilen liegt. Das sind zum einen die Bauteile, die direkt die Einstiegsgeometrie einschließlich des Fahrerplatzes darstellen (z.B. Schweller, A- und B-Säule, Sitz). Zum anderen schränken strukturelle Elemente wie Träger oder Verstelleinrichtungen die Sicht ein.

Für das Abdecken des Messvolumens und das dreidimensionale Erfassen der Bewegung müssen mehrere Kameras zum Einsatz kommen. Die Schwierigkeit liegt darin, eine Kameraaufstellung zu finden, die es ermöglicht, alle erforderlichen Daten für das gesamte Versuchspersonenkollektiv und alle Geometrieinstellungen zuverlässig aufzuzeichnen. Dabei sollen die Daten nach der Aufzeichnung ohne großen Nachbereitungsaufwand bearbeitet werden können. Bei dem zu erwartenden Datenvolumen (etwa 30 bis 40 Personen in 10 bis 15 Geometrieinstellungen) sollte eine Bewegungssequenz in weniger als 10 Minuten aufbereitet werden können.

2.2.3.3 Bewegungsmodellierung

Das Bewegungsmodell der *führenden Körperteile* erfordert die Klärung der Frage: „Was sind die *führenden Körperteile* und wo sind die Schlüsselpunkte?“ Aus Sicht der Mechanik ist es sinnvoll, dass die Führung jeweils in den Gelenkzentren liegt. Dadurch müssen keine Hebeleffekte berücksichtigt werden. Die Klärung der *führenden Körperteile* soll durch die Vorstudie (Kap. 3.1) erfolgen.

Da die Bewegungsaufzeichnung anhand äußerer, an der Versuchsperson angebrachter Marker erfolgt, soll mit Hilfe eines kinematischen Modells die Bewegung der zugrunde liegenden kinematischen Struktur berechnet werden. Neben den Orts-Zeit-Kurven der Gelenkzentren wird auch der Verlauf der Gelenkwinkel über der Zeit berechnet.

Diese Vorgehensweise bietet im Gegensatz zu dem bei anderen Forschungsvorhaben gewählten Weg¹ (z.B. [Galopin 2001]) den Vorteil, dass die Zuordnung von äußeren Markern zur kinematischen Struktur auf Basis einer Berechnung erfolgt. Der Prozess ist damit automatisierbar, reproduzierbar und anwenderunabhängig.

Vom kinematischen Modell wird gefordert, dass es in den einstiegsrelevanten Körperbereichen dem Aufbau von „RAMSIS“ entspricht. Das hat den Vorteil, dass die Ergebnisse der Analyse später nicht auf die „RAMSIS“-Verhältnisse übertragen werden müssen. In „RAMSIS“ lässt sich so direkt ein sog. „virtueller Zwilling“ der Versuchsperson erzeugen.

Neben der Bewegung der Versuchsperson ist bei der Modellierung die Einstiegsgeometrie zu berücksichtigen. Damit lässt sich die Interaktion der Versuchsperson und der Geometrie in die Analyse mit einbeziehen, z.B. bei der Betrachtung der Sicherheitsabstände des Körpers zu bewegungsbegrenzenden Geometrien.

2.2.3.4 Bewegungsanalyse

Der letzte Baustein, die Analyse der Einstiegsbewegung, ist das eigentliche Ziel der Prozesskette. Letztendlich soll mit den Ergebnissen der Analyse eine Einstiegsimulation realisiert werden. Für eine erfolgreiche Analyse sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen:

- 1) Die zu analysierenden Daten liegen in einer ausreichenden Genauigkeit vor. Die bestimmenden Prozessschritte sind die Aufzeichnung und Modellierung der Bewegung.
- 2) Die Analyse der Bewegungsdaten erfolgt nach den für die Bewegung relevanten Aspekten.

¹Die aufgezeichneten äußeren Marker werden u.a. bei Galopin verwendet, um die Bewegung direkt zu treiben. Da die Lage der Marker relativ zu den Gelenken nicht aus der Bewegung der Marker berechnet, sondern vorher festgelegt wird, führen schon leichte Abweichungen zu einer deutlichen Verfälschung der Bewegung. Zudem wirken sich Relativbewegungen der Marker auf den Körperteilen auf das Ergebnis stärker aus.

Die Modellierung liefert für die Analyse u.a. folgende Größen:

- Orts-Zeit-Kurven der Gelenkzentren,
- Verläufe der Körperwinkel über der Zeit (Flexion/Extension, Ab-/ Adduktion und Rotation),
- Verläufe der Abstände von Körperpunkten zu Bauteilen, insbesondere von Körperendpunkten.

Bei allen Größen müssen die drei Ortskomponenten und deren zeitlicher Verlauf berücksichtigt werden, so dass bei jeder Bewegungssequenz eine sehr große und unübersichtliche Datenmenge anfällt. Hier gilt es eine Verdichtung zu finden, bei der keine wichtigen Informationen verloren gehen. Zudem sollen Bewegungen bei verschiedenen Geometrien von einer Person und Bewegungen von verschiedenen Personen verglichen werden können.

2.2.4 Alternative Vorgehensweise

Der eigentliche Bedarf für eine Ein- und Ausstiegssimulation entsteht im Wesentlichen dadurch, dass frühzeitig virtuell der Ein- und Ausstiegskomfort für eine Einstiegsgeometrie vorausgesagt werden soll.

Dieses Ziel kann auf zwei Wegen erreicht werden: einem direkten und einem indirekten Weg.

Der oben beschriebenen Vorgehensweise liegt der Ansatz zugrunde, dass als erstes aus den Eingangsgrößen, die die zu untersuchende Person und die Einstiegsverhältnisse beschreiben, eine Bewegung berechnet wird. Aus dieser Bewegung und den daraus resultierenden physikalischen Größen wie den Körperwinkeln soll anschließend der Diskomfort abgeleitet werden.

Dieses Projekt ist mit folgenden Risiken verbunden:

- 1) Die Untersuchungsmethode ist sehr aufwendig. Insbesondere die Datenverarbeitung ist sehr zeitintensiv, so dass fraglich ist, ob für eine Modellbildung die erforderliche Anzahl an Versuchspersonen und Einstiegsgeometrien untersucht werden kann.
- 2) Die Qualität des Untersuchungsergebnisses wird von mehreren Fehlerquellen negativ beeinflusst. Neben dem Mess- und Modellierungsfehler verfälschen intra-

und interindividuelle Streuungen das Ergebnis. In diesem Zusammenhang ist eine geringe Anzahl an Versuchspersonen noch kritischer zu bewerten.

- 3) Es ist offen, ob die Bewegungen eines in sich homogenen Testkollektivs eine ausreichende Ähnlichkeit aufweisen, dass sie zu einer idealisierten Bewegung zusammengefasst werden können.
- 4) Die Versuchsbedingungen sind aufgrund des Messsystems mit realen Einstiegsverhältnissen nur bedingt vergleichbar. Ursachen sind der vereinfachte Versuchsaufbau und die Einschränkungen, die durch das Messsystem erforderlich sind.

Eine **Alternative würde die direkte Bestimmung der Komfort- bzw. Diskomfortbewertung** (vgl. zum Diskomfort Kap. 4.1.2) der Ein- und Ausstiegsbewegung **aus den Maßen der Einstiegsgeometrie** darstellen.

Im Mittelpunkt dieses Ansatzes steht ein Modell, das den Diskomfort in Abhängigkeit der Einstiegsmaße (z.B. Höhe des Sitzes über der Fahrbahn, Schwellerhöhe) und der Parametern der Versuchsperson (Anthropometrie, Gewicht, Beweglichkeit, etc.) beschreibt. Auf den „Umweg“ der Bewegungsberechnung und der aufwendigen Bewegungsanalyse könnte dabei verzichtet werden.

Die für das Alternativmodell erforderlichen Daten müssten in einer umfangreichen Untersuchung gesammelt werden, bei der Versuchspersonen Einstiegsgeometrien beurteilen. Die Beurteilung erfolgt differenziert nach Körperteilen und Bewegungsphasen, so dass im Diskomfortmodell eine ebenso detaillierte Bewertung umgesetzt werden kann.

Durch den Verzicht auf die Analyse der Bewegung kann der Schwerpunkt der Untersuchung auf einem größeren Umfang an Versuchsparametern und Versuchspersonen liegen. So ließen sich z.B. nicht nur Einstiegsgeometrien berücksichtigen, bei denen nur ein einzelner Parameter verändert wird, sondern bei denen mehrere Parameter gleichzeitig verändert werden. Damit können gegenseitige Wechselwirkungen besser untersucht werden.

Für diesen Ansatz spricht ebenso, dass die Einschränkungen durch die Bewegungsaufzeichnung nicht zu berücksichtigen sind. Beispielsweise können dann verschiedene Öffnungswinkel der Tür oder verschiedene Pedallagen untersucht werden.

Der größte Vorteil aber wäre, dass durch den direkteren Weg sowohl in der Analyse als auch in der Simulation die Fehlerquellen reduziert werden. Gleichzeitig kann durch eine umfangreichere Untersuchung die Ergebnisverlässlichkeit gesteigert werden. Der

Arbeitsschwerpunkt des Projekts wird zu Gunsten der Qualität des Ergebnisses von der Analyse auf die Untersuchung verschoben.

Die Problematik, von Versuchspersonen eine detaillierte und konsistente Bewertung zu erhalten und diese anschließend in einer Diskomfortberechnung umsetzen zu müssen, stellt bei beiden Ansätzen eine große Herausforderung dar.

Der größte Nachteil dieses Alternativwegs allerdings ist, dass das Berechnungsmodell keine Verallgemeinerung zulässt. Eine Übertragung des Modells auf andersartige Bewegungen ist nicht möglich, da die Diskomfortberechnung nicht an ein Bewegungsmodell, sondern direkt an die Einstiegsparameter gekoppelt wäre. Der indirekte Weg über die Bewegungsmodellierung dagegen bietet dieses Potential, da die in Kapitel 2.2.2 aufgestellten Bewegungshypothesen nicht ein- bzw. ausstiegsspezifisch sind.

Die wichtigsten Vor- und Nachteile der Modellierungsansätze sind in der Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Vor- und Nachteile des alternativen „Diskomfortmodell“-Ansatzes

Vorteile	Nachteile
+ größere Anzahl an Versuchspersonen	- keine Visualisierung der Bewegung
+ größere Anzahl von unabhängigen Variablen	- Objektivierung der Diskomfortbewertung
+ Kombinationen von unabhängigen Variablen	- kein allgemeingültiges Bewegungsmodell, das auf andere Bewegungen übertragen werden kann
+ keine Einschränkungen durch Bewegungsmesssystem	
+ weniger Fehlerquellen	
+ kürzere Projektdauer	

3 Realisierung

3.1 Vorstudie zum Einstiegsverhalten

Aus Sicht der Ergonomie unterscheiden sich Menschen nicht nur bezüglich ihrer Anthropometrie. Menschen zeigen auch starke Unterschiede bei der Lösungsstrategie von Bewegungsaufgaben. Im konkreten Fall des Einstiegs in einen Pkw können im Bewegungsablauf von Versuchspersonen deutliche Abweichungen beobachtet werden. Unklar ist jedoch, welche Faktoren die Wahl der Bewegungsstrategie beeinflussen.

Als Faktoren kommen neben den anthropometrischen Maßen wie Körperhöhe und Stammlänge individuelle Größen wie Alter der Person, Gewicht, Beweglichkeit und körperliche Einschränkungen bzw. Behinderungen in Frage.

Dabei ist zu erwarten, dass die gewählte Strategie das Erleben und Beurteilen der Situation beeinflusst. Dies muss in der Versuchsplanung berücksichtigt werden, da die Vergleichbarkeit sowohl der Bewegung als auch der Komfortbewertung bei differierenden Einstiegsstrategien nur bedingt gegeben ist. Somit hat der Aspekt der Einstiegsstrategien einen erheblichen Einfluss auf die Durchführung der Einstiegsuntersuchung.

Zur Vorbereitung der quantitativen Analyse werden deshalb in einer Vorstudie die Einstiegsstrategien näher untersucht. Die Vorstudie hat folgende Ziele:

- Die Bewegungsstrategien sollen ermittelt, eindeutig definiert und voneinander abgegrenzt werden.
- Es soll untersucht werden, von welchen Faktoren die Wahl der Einstiegsstrategie abhängt.
- Aus den Ergebnissen der Vorstudie sollen die Kriterien für die Auswahl der Versuchspersonen des Hauptversuchs abgeleitet werden.

3.1.1 Versuchsbeschreibung

Die Vorstudie wurde in einem Parkhaus durchgeführt. Neben der Erfassung der persönlichen Daten der Versuchsperson wie Geschlecht, Alter, Körperhöhe, Gewicht, Marke und Art ihres Pkw und der Jahresfahrleistung wurde die Einstiegsbewegung in den eigenen Pkw auf Video aufgezeichnet, wobei ausschließlich Fahrer von limousinenartigen² Fahrzeugen für die Studie herangezogen wurden. Abschließend wurde nach einer Bewertung der Einstiegsverhältnisse und den Verbesserungspotentialen des eigenen Pkw gefragt.

Die Befragung dauerte pro Versuchsperson etwa fünf Minuten.

3.1.2 Ergebnis

Insgesamt wurden 225 Personen im Alter zwischen 22 und 68 Jahren befragt, 30 Frauen und 195 Männer.

Die bei den Teilnehmern des Versuchs beobachteten Bewegungsabläufe lassen sich in Bezug auf die gewählte Bewegungsstrategie nach Haupt- und Unterstrategie klassifizieren. Das Unterscheidungskriterium ist der Orts-Zeit-Verlauf der Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile*.

Danach ergibt sich eine Hauptstrategie, wenn die Gesamtheit der *führenden Körperteile* in Lage und Ablauf ein eigenständiges Bewegungsschema bilden. In der Vorstudie zeigten sich darüber hinaus innerhalb der Hauptstrategien zeitlich begrenzte Abweichungen einzelner *führender Körperteile*. Diese werden zu Unterstrategieklassen zusammengefasst.

² Unter limousinenartig werden im Wesentlichen Fahrzeuge mit einem H5 zwischen 470 und 515mm und einem H30 zwischen 245 und 285mm verstanden [BMW 2000].

3.1.2.1 Beschreibung der Haupt- und Unterstrategien

In Anlehnung an die Arbeiten von [Höllrich 1992] und [Layer 1992] wird zwischen vier Hauptstrategien unterschieden:

„Schlüpf“-Strategie

Bei der „Schlüpf“-Strategie (Abb. 6) wird beim Einstiegen auf den Fahrersitz zunächst das rechte Bein ins Fahrzeug gehoben, wobei das rechte Knie auf der linken Seite des Lenkrads bzw. der Lenksäulenverkleidung verbleibt. Nach dem Absenken des Rumpfs auf den Sitz wird das linke Bein ins Fahrzeug gehoben. Das rechte Knie wird unter dem Lenkrad bzw. der Lenksäulenverkleidung hindurchbewegt und der rechte Fuß auf das Fahrpedal gestellt.

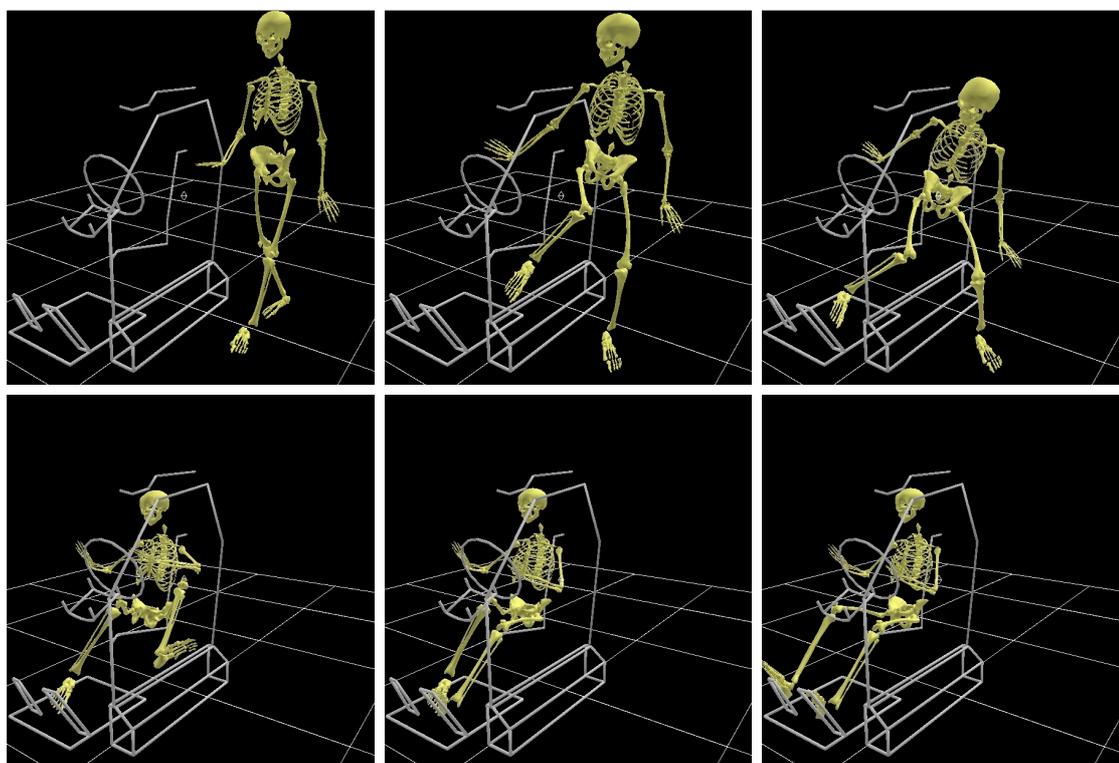


Abb. 6: Bewegungsphasen der „Schlüpf“-Strategie³

³ Die Abbildungen sind einer Bewegungsanalyse mit „Vicon Polygon“ entnommen. Zur übersichtlicheren Visualisierung der Bewegung können in „Polygon“ die mit „Golem“ modellierten Körpersegmente (vgl. Kap. 3.4.2.1) als Skelett dargestellt werden. Die Bewegung kann in „Polygon“ als echte 3D-Animation wiedergegeben und so aus jeder beliebigen Perspektive betrachtet werden.

„Fädel“-Strategie

Ein „Fädler“ (Abb. 7) hebt ebenfalls zuerst den rechten Fuß ins Fahrzeug. Dabei wird das rechte Knie nach außen gedreht, so dass es sofort unter dem Lenkrad durchgefädelt werden kann. Der rechte Fuß steht bereits auf bzw. vor dem Fahrpedal, bevor der Rumpf vollständig auf den Sitz abgesenkt worden ist. Der Bewegungsvorgang wird mit dem Heben des linken Beins ins Fahrzeug abgeschlossen.

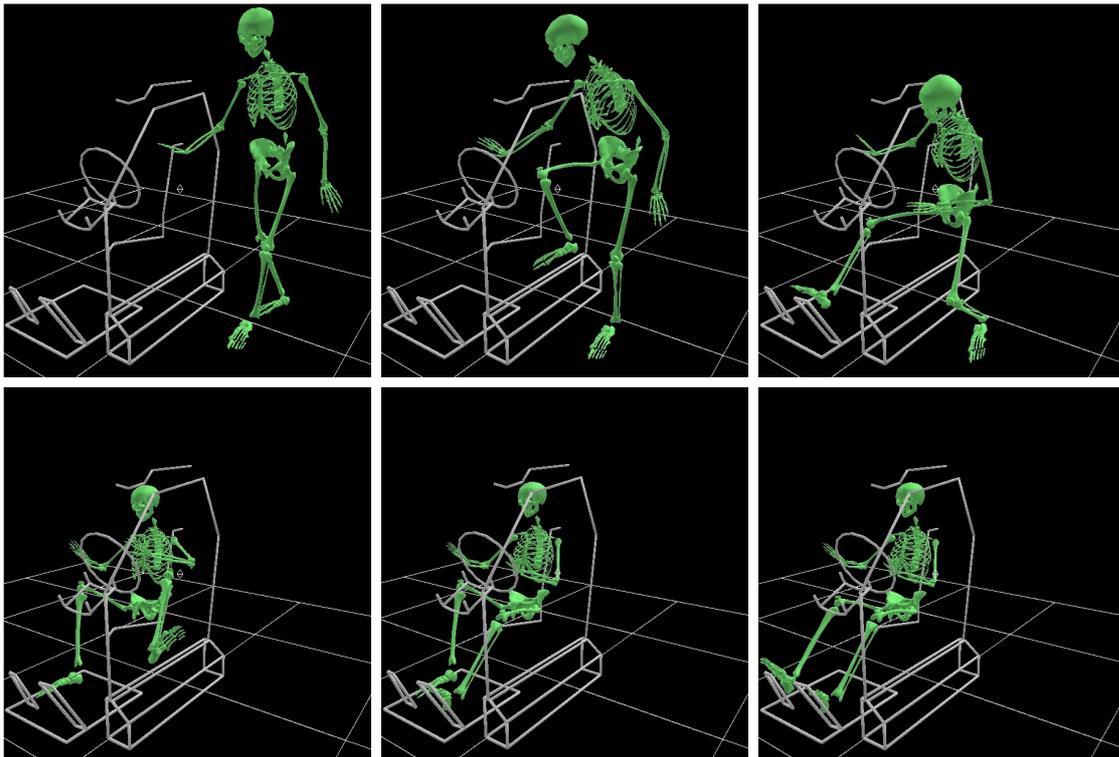


Abb. 7: Bewegungsphasen der „Fädel“-Strategie

„Plumps“-Strategie

Im Gegensatz zu den ersten beiden Strategien wird bei der „**Plumps**“-Strategie (Abb. 8) als erstes der Rumpf auf den Sitz abgesenkt. Dazu steht die Person rückwärtig zum Sitz und neigt beim Absenken den Rumpf nach vorne. Sitzend werden zuletzt beide Beine ins Fahrzeug gehoben und das rechte Knie unter dem Lenkrad hindurchbewegt.

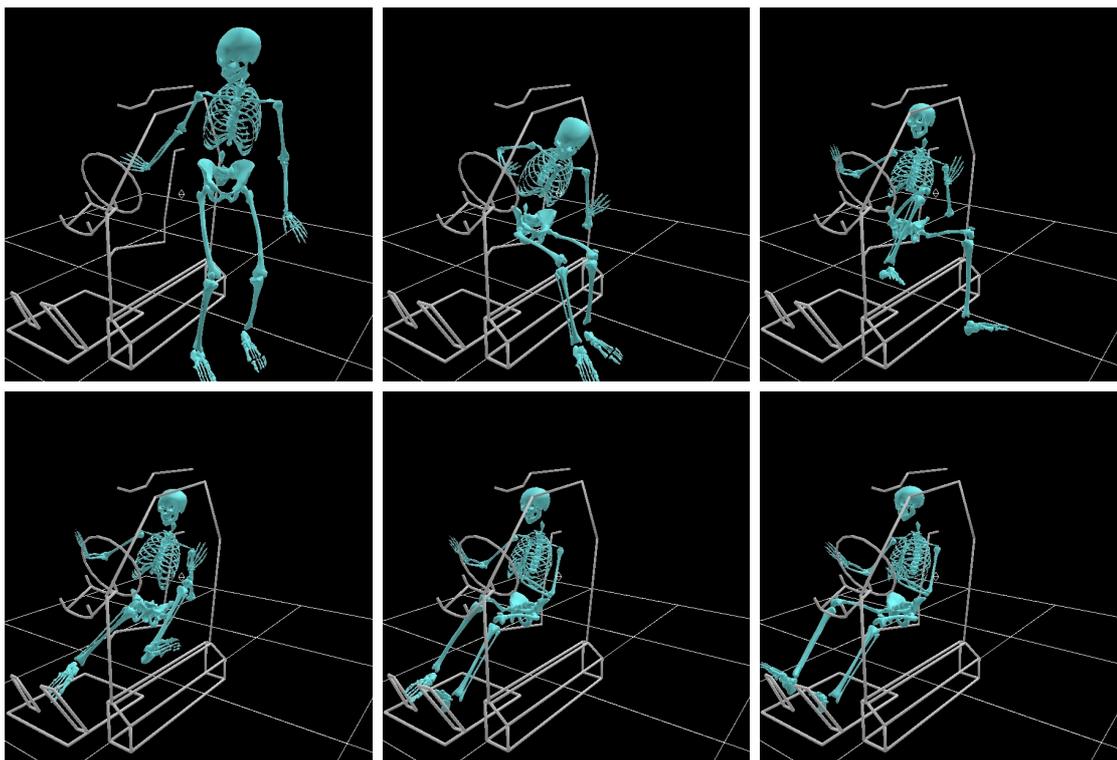


Abb. 8: Bewegungsphasen der „Plumps“-Strategie

„Hürden“-Strategie

Bei der vierten Variante, der „**Hürden**“-Strategie (Abb. 9), bewegt sich die Person ähnlich einem Hürdenspringer mit dem Kopf voraus in das Fahrzeug, wobei der rechte Fuß gleichzeitig am Lenkrad vorbei in Richtung Fahrpedal bewegt wird. Der Rumpf wird mit der linken Hand am Lenkrad, mit der rechten auf der Mittelkonsole oder dem Sitz stabilisiert. Anschließend wird das Becken durch eine Drehbewegung über den Sitz geschwenkt und dann abgesenkt. Abschließend wird der linke Fuß ins Fahrzeug gehoben.

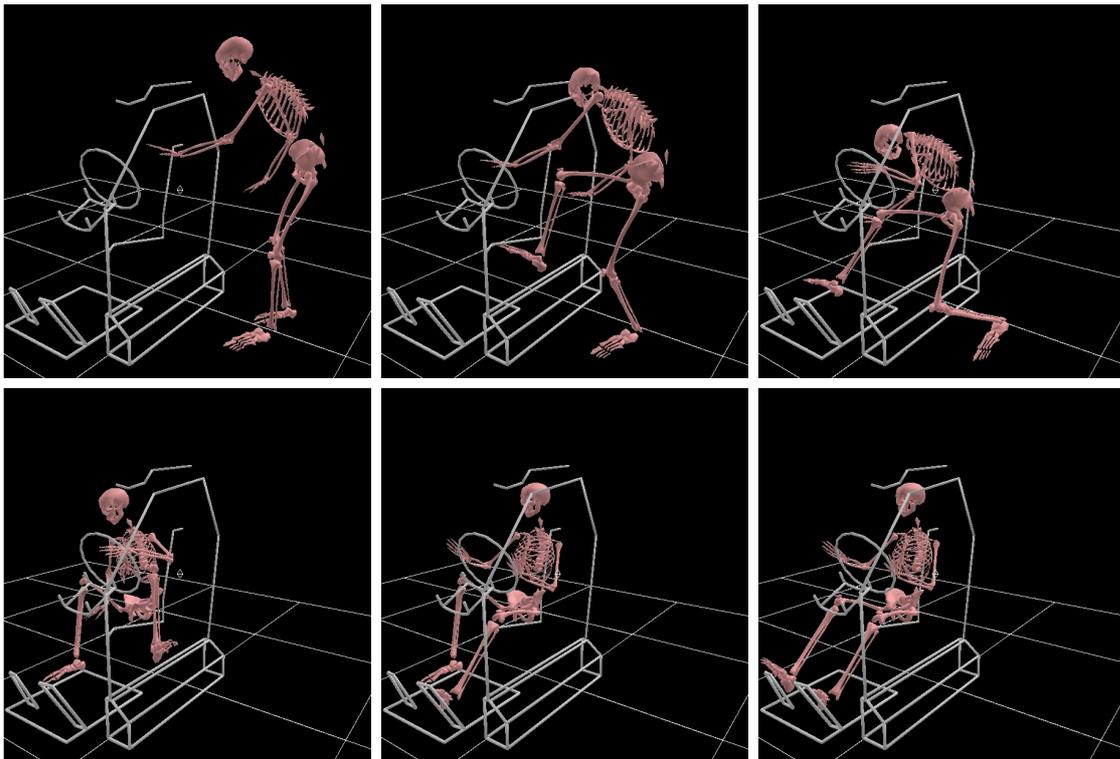


Abb. 9: Bewegungsphasen der „Hürden“-Strategie

Entsprechend der beschriebenen Festlegung in Haupt- und Unterstrategien kann die Einteilung der Bewegungen innerhalb der „Schlüpf“- und „Fädel“-Strategie noch weiter detailliert werden [Arnold 2003].

Bei der „Schlüpf“-Strategie wurden drei Bewegungsvarianten beobachtet, die theoretisch beliebig miteinander kombinierbar sind. Somit lassen sich acht Unterstrategien bilden. Sie betreffen das rechte Knie, den rechten und den linken Fuß. Die Varianten sind in der nachfolgenden Tab. 2 aufgeführt:

Tab. 2: Unterstrategien bei der „Schlüpf“-Strategie

Kriterium		
Wann wird das rechte Knie unter dem Lenkrad durchgeführt?	Variante 1	vor dem Heben des linken Beins ins Fahrzeug
	Variante 2	nach dem Heben des linken Beins ins Fahrzeug
Wird der rechte Fuß beim Durchführen des Knies unter dem Lenkrad vom Fahrzeugboden gehoben?	Variante 3	rechter Fuß muss angehoben werden
	Variante 4	rechter Fuß muss nicht angehoben werden
Wo wird der linke Fuß nach dem Heben ins Fahrzeug abgestellt?	Variante 5	linker Fuß wird auf den Boden im Fahrzeug gestellt
	Variante 6	linker Fuß wird direkt auf die Fußstütze gestellt

Die Varianten 1 und 2 unterscheiden sich durch den Zeitpunkt, zu dem das rechte Knie unter der Lenksäulenverkleidung durchgeführt wird. Bei Variante 1 geschieht dies bevor, bei Variante 2 nachdem das linke Bein ins Fahrzeug gehoben wird.

Die zweite Unterscheidung entsteht dadurch, dass beim Durchfädeln des rechten Knies unter der Lenksäulenverkleidung der rechte Fuß vom Boden angehoben werden muss (Variante 3) oder nicht (Variante 4).

Die letzten Varianten unterscheiden, ob der linke Fuß nach dem Heben ins Fahrzeug auf dem Boden abgestellt wird (Variante 5) oder direkt auf die Fußstütze geführt wird (Variante 6).

In der Klasse der „Fädler“ wurden bei der Bewegung des linken Fußes ebenfalls die Varianten mit und ohne Absetzen des Fußes auf den Boden beobachtet (Varianten 5 und 6). Da die beiden anderen Hauptstrategien („Plumps“- und „Hürden“-Strategie) nur selten auftraten, war die Beobachtung von Unterstrategien nicht möglich.

3.1.2.2 Statistische Auswertung

Die mit Abstand am häufigsten verwendete Hauptstrategie ist mit 80% die „Schlüpf“-Strategie, gefolgt von der „Fädel“-Strategie mit 18%. Die „Plumps“- und die „Hürden“-Strategie werden insgesamt nur viermal verwendet (Anteil unter 2%). Die Aufteilung nach Geschlecht ergibt, dass die Frauen – abgesehen von einer Ausnahme – alle die „Schlüpf“-Strategie (97%) anwendeten. Bei den Männern liegt der Anteil der „Schlüpf“-Strategie bei 77% (Abb. 10).

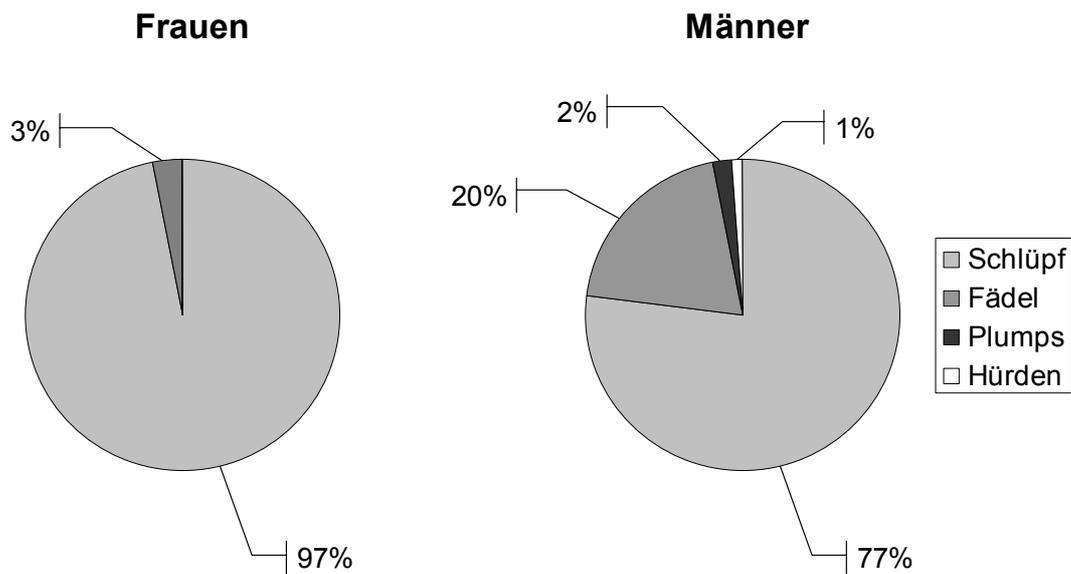


Abb. 10: Anteil der Hauptstrategien bei Frauen und Männern

Als nächstes soll untersucht werden, ob die Wahl der Einstiegsstrategie mit bestimmten Faktoren wie der Körperhöhe oder dem Gewicht zusammenhängt. Die Überprüfung dieser Zusammenhangshypothesen erfolgt mittels Regressionsrechnung.

Auswirkungen ausgewählter Faktoren auf die Wahl der Hauptstrategie

Bei den zu untersuchenden Faktoren (Körperhöhe, Gewicht, Alter) handelt es sich um Merkmale, die intervallskaliert sind. Die Hauptstrategien werden in die zwei Kategorien „Schlüpfstrategie“ und „Nicht-Schlüpfstrategie“ eingeteilt. Der Zusammenhang zwischen einem solchen künstlich dichotomisierten und einem intervallskalierten Merkmal wird mit der biserialen Korrelation berechnet [Bortz 1999].

Die Berechnung des Korrelationskoeffizienten und der Signifikanz erfolgt mit der Statistiksoftware „SPSS“ (vgl. [SPSS 2002]).

Für die Merkmale Körperhöhe und Gewicht ergeben sich folgende Werte (Tab. 3):

Tab. 3: Korrelationen zwischen der Hauptstrategie und der Körperhöhe bzw. des Gewichts der Versuchspersonen

Hauptstrategie (n = 195)	Korrelationskoeffizient	Signifikanz
Körperhöhe	0,341*	0,001
Gewicht	0,226*	0,002

*signifikant

Der Anteil der „Schlüpf“- bzw. „Fädel“-Strategie ist in Bezug auf die Körperhöhe und das Gewicht nicht gleichbleibend. Tendenziell nimmt der Anteil der „Fädler“ mit steigendem Gewicht bzw. Körperhöhe zu. Die Korrelation ist allerdings sehr schwach.

Der Anteil der „Schlüpf“-Strategie fällt in keiner Gewichts- bzw. Körperhöhenklasse⁴ unter 50%. Das bedeutet, dass die „Schlüpf“-Strategie in jeder Klasse die häufigste Einstiegsstrategie ist (Abb. 11).

⁴ Die Versuchspersonen wurden zu fünf Klassen nach Gewicht (<45kg, 45-59kg, 60-74kg, 75-89kg, ≥90kg) und nach Körperhöhe (<158cm, 158-169cm, 170-181cm, 182-193cm, >194cm) zugeordnet (Intervalleinteilung nach [Bortz 1999]).

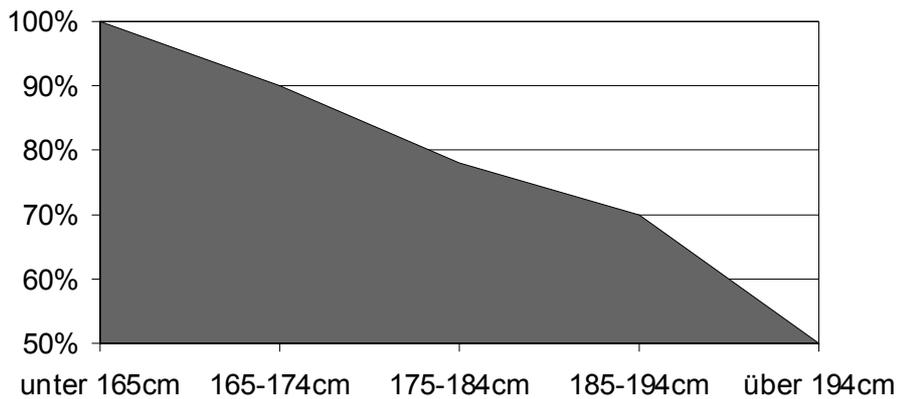


Abb. 11: Anteil der „Schlüpf“-Strategie in Abhängigkeit von der Körperhöhenklasse

Aus Gründen des Aufwands erscheint die Festlegung für die weiterführenden Untersuchungen und Analysen auf zunächst eine Strategie sinnvoll. Die Wahl fällt auf die „Schlüpf“-Strategie, da diese sowohl absolut als auch in den einzelnen Klassen bei Männern und Frauen die am häufigsten verwendete Strategie ist.

Auswertung der Unterstrategien

Von den acht theoretisch möglichen Unterstrategien der „Schlüpf“-Strategie traten sieben tatsächlich auf. In Abb. 12 kann man erkennen, dass die Unterstrategie „246“ (Knie wird nach dem Heben des linken Beins ins Fahrzeug unter der Lenksäule hindurchgeführt, der Fuß muss dabei nicht angehoben werden, der linke Fuß wird direkt auf der Fußstütze abgestellt) mit 25% am häufigsten angewendet wurde.

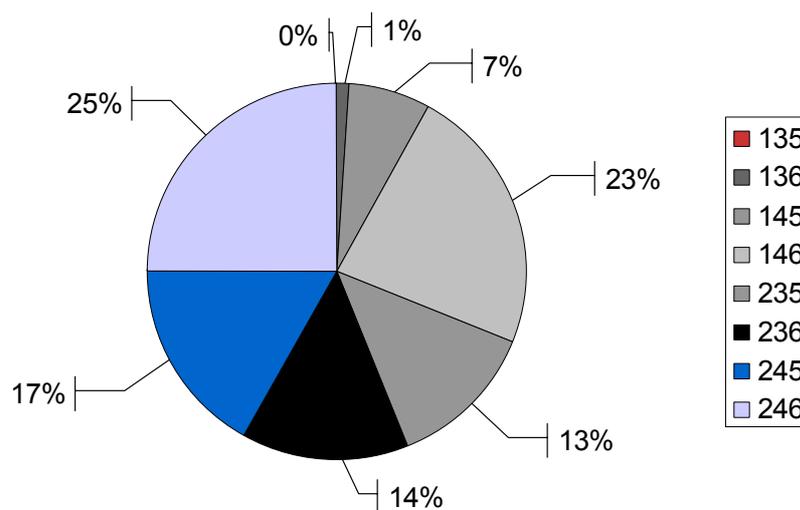


Abb. 12: Häufigkeiten der Unterstrategien bei der „Schlüpf“-Strategie

Auswirkungen ausgewählter Faktoren auf die Wahl der Unterstrategie

Analog zu den Hauptstrategien wurde ein möglicher Zusammenhang der Unterstrategien mit den Merkmalen Körperhöhe und Gewicht untersucht:

Für die „Schlüpf“-Strategie ergeben sich die in Tab. 4 aufgelisteten Werte:

Tab. 4: Korrelationen zwischen den Unterstrategien und der Körperhöhe bzw. des Gewichts der Versuchspersonen bei der „Schlüpf“-Strategie

Unterstrategie	Merkmal	Korrelationskoeffizient	Signifikanz
1 / 2	Körperhöhe	0,277*	0,001
Lage re. Knie	Gewicht	-0,004	0,960
3 / 4	Körperhöhe	-0,437*	0,001
Heben re. Fuß	Gewicht	-0,196*	0,020
5 / 6	Körperhöhe	0,244*	0,004
Abstellen li. Fuß	Gewicht	-0,075	0,381

*signifikant

Wie schon bei der Hauptstrategie ergibt sich lediglich eine schwache Korrelation der Unterstrategien mit der Körperhöhe.

Ein quantitativer Vergleich der Unterstrategien zeigt, dass nur die Variation 5/6 zu einer erheblichen Abweichung der Bewegungen (bzgl. Lage und Ablauf) führt, die entsprechend bei der Datenverarbeitung berücksichtigt werden muss.

Die Unterschiede in der Bewegung durch die Unterstrategien 1/2 und 3/4 fallen wesentlich geringer aus und bedürfen bei der Analyse keiner speziellen Unterscheidung. Oftmals fällt die Zuordnung einer Bewegung zu der entsprechenden Unterstrategie nicht leicht, da die Übergänge fließend sind. Quantitativ betrachtet liegen die Bewegungsunterschiede der Varianten 1 bis 4 im Bereich der intra- und interindividuellen Bewegungsstreuung (vgl. Kap. 4.3.5.4 und 4.3.5.6). Aus diesem Grund werden diese Varianten im Folgenden nicht weiter unterschieden und gleichwertig behandelt.

In Bezug auf den Zeitpunkt des Abstellens des linken Fußes auf die Fußstütze tritt die Variante 6, also das direkte Abstellen des Fußes auf der Fußstütze, mit 67% am häufigsten auf. Wie schon bei der Hauptstrategie scheint es eine schwache Tendenz zu geben, dass der Anteil der „Variante 6“-Einsteiger mit zunehmender Körperhöhe abnimmt.

Für die Unterstrategien bei der „Fädel“-Strategie (5/6) ergibt sich ein ähnliches Ergebnis wie bei der „Schlüpf“-Strategie (Tab. 5):

Tab. 5: Korrelationen zwischen der Unterstrategie und der Körperhöhe bzw. des Gewichts der Versuchspersonen bei der „Fädel“-Strategie

Unterstrategie	Merkmal	Korrelationskoeffizient	Signifikanz
5 / 6	Körperhöhe	0,339*	0,040
Abstellen li. Fuß	Gewicht	-0,240	0,153

*signifikant

Auswahl der Versuchspersonen für die quantitative Analyse

Die Vorstudie zeigt, dass es im Bewegungsablauf beim Einstieg in ein Fahrzeug eine große Bandbreite an Variationen gibt. Um den Aufwand bei der Versuchsdurchführung und ebenso bei der Umsetzung in eine Simulation zu begrenzen, ist die Beschränkung auf eine Strategie und eine homogene Versuchspersonengruppe sinnvoll. In der ersten Projektphase sollen daher zunächst Versuche mit drei Gruppen aus der bei BMW festgelegten Nutzerpopulation (5. Perzentil Frau bis 95. Perzentil Mann) durchgeführt werden. Um die gesamte Nutzerpopulation annähernd einheitlich abzudecken, wird eine Gruppe sehr kleiner Frauen (etwa 5. Perzentil Körperhöhe), eine Gruppe mittelgroßer Männer (etwa 50. Perzentil Körperhöhe) und eine Gruppe sehr großer Männer (etwa 95. Perzentil Körperhöhe) herangezogen.

Die Vorstudie zeigte, dass bei allen drei Gruppen die Hauptstrategie „Schlüpfen“ am häufigsten angewendet wurde. Ebenfalls für alle drei Gruppen gleich ist das mehrheitliche Auftreten der Unterstrategie 6, bei der der linke Fuß nach dem Heben ins Fahrzeug direkt auf der Fußstütze abgestellt wird. Bei der Auswahl der Versuchspersonen ist demzufolge darauf zu achten, dass sie mit der „Schlüpf“-Strategie und der Variante „Direktes Abstellen des linken Fußes auf der Fußstütze“ einsteigen.

In der Vorstudie wurden ausschließlich Fahrer mit limousinenartigen Fahrzeugen berücksichtigt, da bei der quantitativen Analyse der Einstiegsbewegung (vgl. Kap. 4.3) ebenfalls nur limousinenartige Verhältnisse untersucht werden sollen. Da der Wechsel einer Einstiegsstrategie nur bei extremen Änderungen der Geometrie beobachtet wurde (z.B. bei Wechsel von Sportwagen zu SUV, Türöffnungswinkel deutlich kleiner), kann davon ausgegangen werden, dass die Ergebnisse der Vorstudie auf die Versuchsverhältnisse der quantitativen Untersuchung übertragen werden können.

3.1.2.3 Sonstige Ergebnisse

- Die Auswertung der **Handbewegung** ergibt, dass sich etwa die Hälfte der Versuchspersonen mit einer oder mit beiden Händen während des Einsteigens abstützt. Dabei wird die rechte Hand fast ausschließlich auf dem Lenkrad, die linke Hand von zwei Dritteln der Versuchspersonen auf dem Lenkrad und von einem Drittel auf dem Türzuziehgriff abgestützt. Aus der visuellen Auswertung der Videoaufzeichnungen wird die Einschätzung abgeleitet, dass sich drei Viertel der Versuchspersonen nur abstützen, um den Rumpf beim Einstieg zu stabilisieren. Daraus lässt sich für die Modellierung die sehr wichtige Folgerung ableiten, dass bei der Mehrzahl der Versuchspersonen der Rumpf nicht durch die Hände geführt wird.
- In der Vorstudie wurden die Versuchspersonen zusätzlich um eine **Beurteilung der Einstiegsverhältnisse** ihres Pkw und der Angabe der am meisten störenden Geometrie gebeten. 80% der Befragten gaben keine Beanstandungen an. Die restlichen 20% bemängelten eine leichte Behinderung. Stark behindert fühlten sich nur zwei Versuchspersonen.

Eine leichte Behinderung beim Einsteigen wird demnach vom Kunden akzeptiert. Bis zu einem gewissen Grad gewöhnt sich der Kunde an die Einstiegsverhältnisse eines Fahrzeugs und passt entsprechend seinen Bewegungsablauf an. Ein wichtiger Faktor bei der Bewertung der Einstiegsverhältnisse ist die Erwartungshaltung des Kunden. Bei einem Fahrzeug der Oberklasse (z.B. Mercedes S-Klasse) wird ein besonders bequemes und einfaches Ein- und Aussteigen vorausgesetzt. Hingegen werden nur wenige Fahrer von Sportwagen, wie dem Lotus Elise (Abb. 13), die objektiv ungünstigen Einstiegsverhältnisse kritisieren, sondern die Herausforderung sportlich annehmen.



Abb. 13: Mercedes S-Klasse und Lotus Elise

- Als das **am meisten störende Bauteil** wird von über einem Drittel der Befragten das Lenkrad (35%) angegeben, gefolgt von Sitz (28%) und Tür (13%). Die Betrachtung der verschiedenen Bewegungsstrategien legt die Schlussfolgerung nahe, dass zumindest bei der „Schlüpf“- , „Fädel“- und „Hürden“-Strategie das Lenkrad in Kombination mit der Körperhöhe den Ausschlag für die Verwendung einer der drei Strategien gibt. Bei der „Plumps“-Strategie verhält es sich anders. Der Bewegungsablauf führt zwar durch das rückwärtige Absenken des Rumpfs eher indirekt zum Ziel. Der Vorteil der Strategie ist aber, dass die Bewegung zu jeder Bewegungsphase stabiler und der koordinative Aufwand geringer ist. Zudem findet sie in Sondersituationen Anwendung, z.B. wenn verschmutzte Schuhe vor dem Heben der Füße ins Fahrzeug abgeklopft werden oder wenn Frauen mit einem engen Rock einsteigen.

3.1.2.4 Führende Körperteile bei der „Schlüpf“-Strategie

In der Hauptversuchsreihe sind u.a. die Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* zu analysieren (vgl. Kap. 2.2.2). Bei der für die weitere Untersuchung ausgewählten Bewegungsstrategie („Schlüpf“- mit Unterstrategie 6) werden folgende *führenden Körperteile* beobachtet:

Das Heben des rechten Fußes ins Fahrzeug (und später analog das Heben des linken) wird durch die Bewegung des Fußes selbst bestimmt. Ein sinnvoller „Führungspunkt“ ist das **Sprunggelenk**, da mit dem Sprunggelenk direkt auf die Bewegung des Unterschenkels Einfluss genommen wird. Für das Feinausrichten des Fußes ist ein weiteres *führendes Körperteil* erforderlich. Hier bietet sich das „Segmentende“ an, also die **Fußspitze**.

Generell ist es sinnvoll, die Gelenkzentren als *führende Körperteile* zu verwenden, da mit den Gelenkzentren direkt zwei Körperteile geführt werden. Sonderfälle sind die „Endgelenke“ der Segmente, z.B. die Fußspitze. Dementsprechend wäre es genauer, anstatt von *führenden Körperteilen* von führenden Körperpunkten oder Körpergelenken zu sprechen. Zur Vereinfachung wird der Begriff des *führenden Körperteils* beibehalten.

Als *führende Körperteile* müssen auch die **Kniegelenke** berücksichtigt werden, die u.a. dafür sorgen, dass die Beine nicht mit dem Lenkrad kollidieren und das rechte Bein unter der Lenksäule durchgeführt wird.

Für die Führung des Beckens um die B-Säule und das Absenken des Rumpfs auf den Sitz sind mindestens zwei *führende Körperteile* erforderlich, um neben der Lage die Ausrichtung des Beckens zu berücksichtigen. Dafür bieten sich die **Hüftgelenkszentren** an.

Die Bewegung des Rumpfs wird beim Absenken auf den Sitz von den **Schultergelenken** und der **Kopfspitze** gesteuert.

Die Vorstudie hat gezeigt, dass die Arme bei der Einstiegsbewegung eine passive Rolle spielen. Die Betrachtung der Hand- und Armbewegung ist im Hinblick auf die Bewegungssimulation deshalb zweitrangig. Sollten sie dennoch untersucht werden, sind die Ellenbogen- und die Handgelenke als *führende Körperteile* zu verwenden.

Insgesamt sind für die Bestimmung der Bewegung des Unterkörpers acht und der Bewegung des Rumpfs drei *führende Körperteile* hinreichend. Für eine Berücksichtigung der Armbewegung sind zusätzlich vier *führende Körperteile* erforderlich.

Aktivität der führenden Körperteile über der Zeit

Bei den *führenden Körperteilen* können die Zustände passiv, aktiv und inaktiv unterschieden werden:

Ein *passiv führendes Körperteil* sorgt dafür, dass ein bestimmter Mindestabstand zu einer Geometrie eingehalten wird. Ein *aktiv führendes Körperteil* berücksichtigt nicht nur Mindestabstände, es treibt zusätzlich das entsprechende Segment bzw. eine Segmentkette voran. Wird ein Segment nicht bewegt, dann sind die *führenden Körperteile* inaktiv.

Die Bewegung des Rumpfs beim Absenken auf den Sitz beispielsweise wird aktiv durch die Hüftgelenkszentren gesteuert. Sie leiten die Segmentkette aus Rumpf und Kopf in das Fahrzeug. Die Schultergelenke und der Kopf verhalten sich passiv, allerdings sorgen die *führenden Körperteile* dafür, dass es zu keiner Kollision mit dem Dach kommt. Sobald der Rumpf auf dem Sitz zur Ruhe gekommen ist, sind sämtliche *führenden Körperteile* des Rumpfs inaktiv, während u.a. das linke Sprunggelenk aktiv dafür sorgt, dass die Segmentkette aus linkem Fuß, linkem Unterschenkel und linkem Oberschenkel ins Fahrzeug gelangt.

Für die Bewegungsanalyse sind in erster Linie die *aktiv führenden Körperteile* von Bedeutung, da diese das Grundschema der Bewegung festlegen. Die *passiv führenden Körperteile* dienen der Feinabstimmung.

In Abb. 14 sind die Zustände der *führenden Körperteile* während des Einstiegsvorgangs dargestellt:

führende Körperteile	Phase 1 Heben rechter Fuß ins Fahrzeug	Phase 2 Absetzen Rumpf	Phase 3 Heben linker Fuß ins Fahrzeug	Phase 4 Abstellen re. Fuß auf Fahrpedal
re. Fußspitze	passiv			passiv
re. Sprung-Gel.	aktiv			aktiv
re. Knie-Gel.	passiv			passiv
re./li. Hüft-Gel.	aktiv			
re./li. Schulter-Gel.	passiv	aktiv		
Kopfspitze	passiv	aktiv		
li. Fußspitze			passiv	
li. Sprung-Gel.			aktiv	
li. Knie-Gel.			passiv	

Abb. 14: Zustände der führenden Körperteile während eines Einstiegsvorgangs

3.2 Das „Variable Ein- und Ausstiegsmodell“

Die für die Versuche erforderliche einstellbare Einstiegsgeometrie wurde mit dem „Variablen Ein- und Ausstiegsmodell“ (VEMO) realisiert (Abb. 15). Das Modell wurde in neunmonatiger Arbeit konzipiert, konstruiert und aufgebaut.

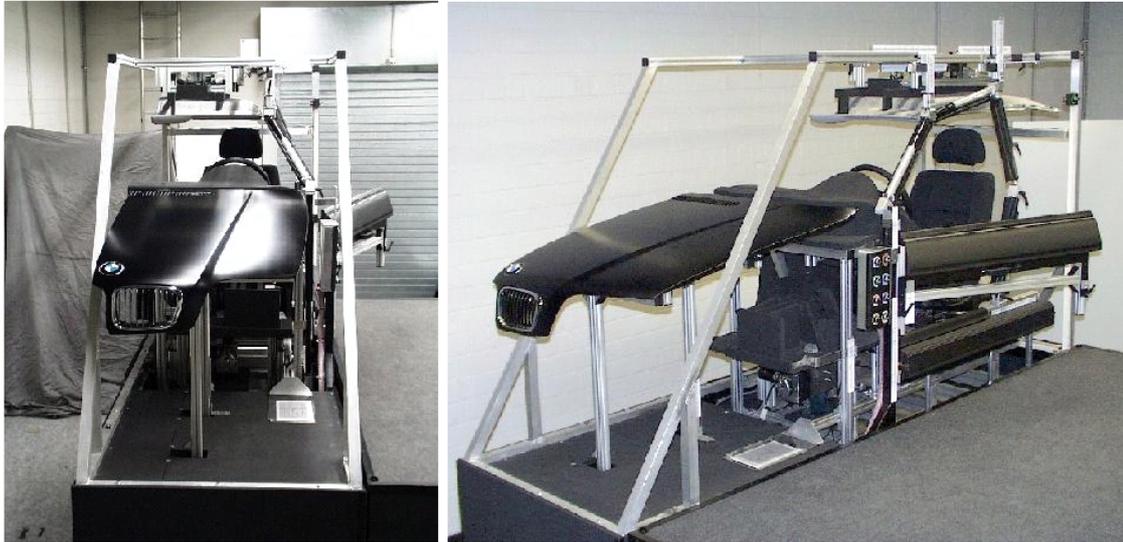


Abb. 15: Gesamtansicht VEMO

3.2.1 Dargestellte Bauteile

Das VEMO stellt im Wesentlichen einen Fahrerplatz mit einer Einstiegsöffnung dar. Die Verstellbereiche wurden so ausgelegt, dass alle aktuellen Fahrzeuge der BMW-Produktpalette dargestellt werden können.

Als Basis- bzw. Referenzfahrzeug wurde die Limousine der 3er-Reihe (E46/4) verwendet. Folgende Gründe waren hierfür ausschlaggebend:

- Mit Serienteilen (z.B. Sitz, Dachverkleidung, Frontklappe) und von der Serie abgeleiteten Teilen (z.B. Instrumententafel, Schweller, Säulenverkleidungen) lassen sich die Einstiegsverhältnisse der anderen Fahrzeuge simulieren. Ein Austausch von Bauteilen ist nicht erforderlich (bis auf Lenkrad und Schweller). Dies hält die Komplexität des Aufbaus in Grenzen und verringert den Umrüstaufwand.
- Der Bauraumbedarf der Bauteile, insbesondere bei ihrer Verstellung, führt zu keiner Kollision. Im Einstiegsbereich kommt es zu keinen unbeabsichtigten Behinderungen.

- Die Package- und Einstiegsmaße des E46/4 liegen im mittleren Bereich der betrachteten Fahrzeuge. Deshalb wurden die aufgrund ihres geringen Einflusses auf die Einstiegsbewegung nicht veränderlichen Bauteile entsprechend des E46/4 gestaltet.

Bei der Konzeption wurde das Modell so ausgelegt, dass keine Umrüstung von Bauteilen bei einer Verstellung erforderlich ist. Entsprechend wurde ein Einheitsprofil für die Verkleidung der Säulen entwickelt, das teleskopisch auf die jeweilige Länge des Säulensegments angepasst werden kann. Die äußere Form des Schwellers kann je nach Fahrzeugtyp stark variieren. Aus diesem Grund lassen sich am Modell in diesem Bereich verschiedene Profile anbringen. Alle übrigen Bauteile sind der 3er-Limousine (E46/4) entnommen (z.B. Sitz, Frontklappe, Dachverkleidung) oder entsprechen ihrer Ausführung (z.B. Pedale).

Der Fahrerplatz umfasst einen elektrisch verstellbaren Sitz (Basisausführung ohne Sitzkissenneigungsverstellung), einen Fußraumboden mit Pedalerie und ein Lenkrad mit Lenksäulenverkleidung. Im Fußraum sind eine Fußstütze, ein Brems- und Kupplungspedal (für die Bewegungsaufzeichnung entnehmbar), und ein Fahrpedal dargestellt. Das Lenkrad kann im Rahmen des Lenkradverstellfelds der 3er-Limousine verstellt werden. In den Fahrerplatz ist eine an die 3er-Reihe angelehnte Instrumententafel und Mittelkonsole aus Schaumstoff integriert.

Um der Versuchsperson bei der Einstellung des Sitzes nach ihren individuellen Bedürfnissen einen Anhalt bezüglich Kopffreiheit und Sicht auf die Fahrbahn zu geben, sind zudem eine Frontklappe und eine Dachverkleidung verbaut.

Der Einstiegsbereich besteht aus einer A- und B-Säule, dem Dachbereich und dem Schweller. Zur seitlichen Begrenzung der Einstiegsöffnung verfügt das Modell über eine Türe mit verstellbarer Brüstungshöhe.

3.2.2 Aufbau des Modells

Das Modell ist strukturiert in drei Bereiche: das „Innere System“, die Einstiegsöffnung und die sekundären Bauteile. Die Abb. Abb. 16 zeigt schematisch die Hauptelemente und ihre Verstellungen.

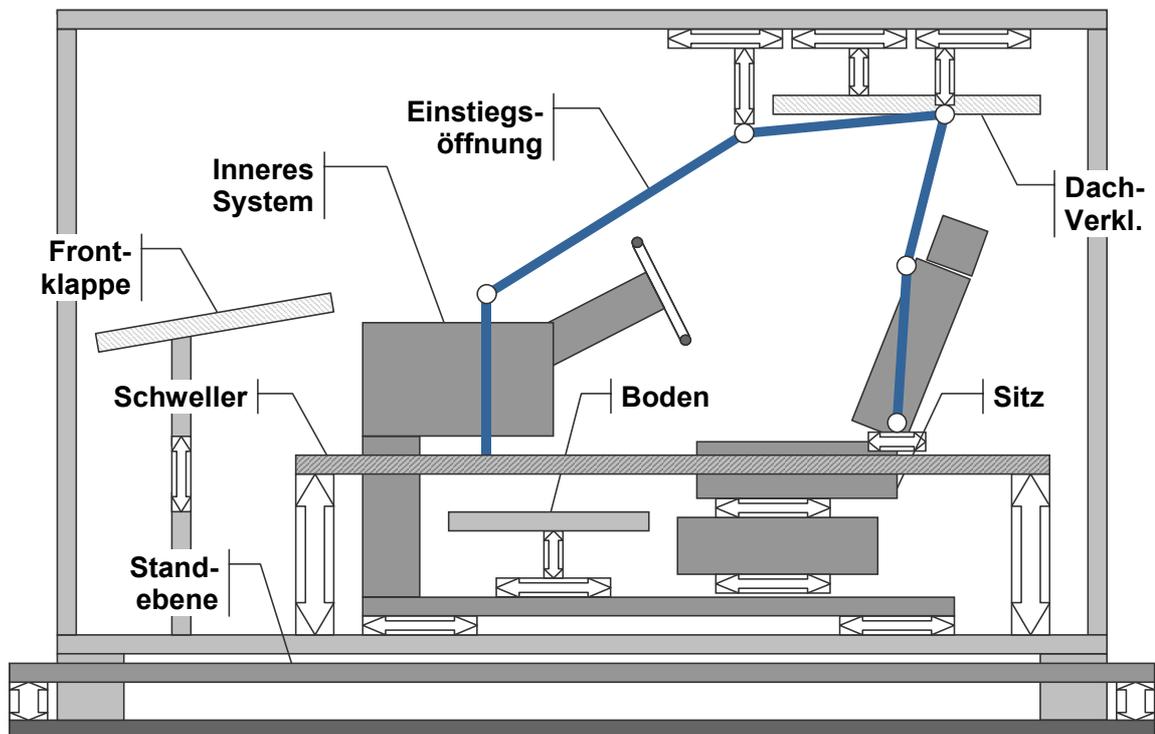


Abb. 16: Schematische Darstellung des VEMO

3.2.2.1 Das „Innere System“

Das „Innere System“ fasst den Sitz, das Lenkrad und den Fußraumboden mit Pedalerie zu einer Einheit zusammen. Die einzelnen Elemente können zueinander translatorisch (x-Richtung) verändert werden. Zudem kann die Höhe des Fußraumbodens relativ zum Sitz verstellt werden. Die Anordnung der Elemente in y ist fix auf die Verhältnisse des E46/4 eingestellt, ebenso wie die Höhe des Lenkrads über dem Sitz. Das komplette „Innere System“ kann gegenüber der Einstiegsöffnung in der Länge und in der Breite verfahren werden. Alle Verstellungen erfolgen elektrisch.

3.2.2.2 Die Einstiegsöffnung

Die Einstiegsöffnung (ohne Schweller) wird aus fünf Geradensegmenten gebildet, die so eingestellt werden können, dass sie tangential die tatsächlichen realen Einstiegsverhältnisse begrenzen. Die Einstellung erfolgt so, dass die Einstiegsmaße H50, I1 und w16 exakt dargestellt werden (vgl. Abb. 17).

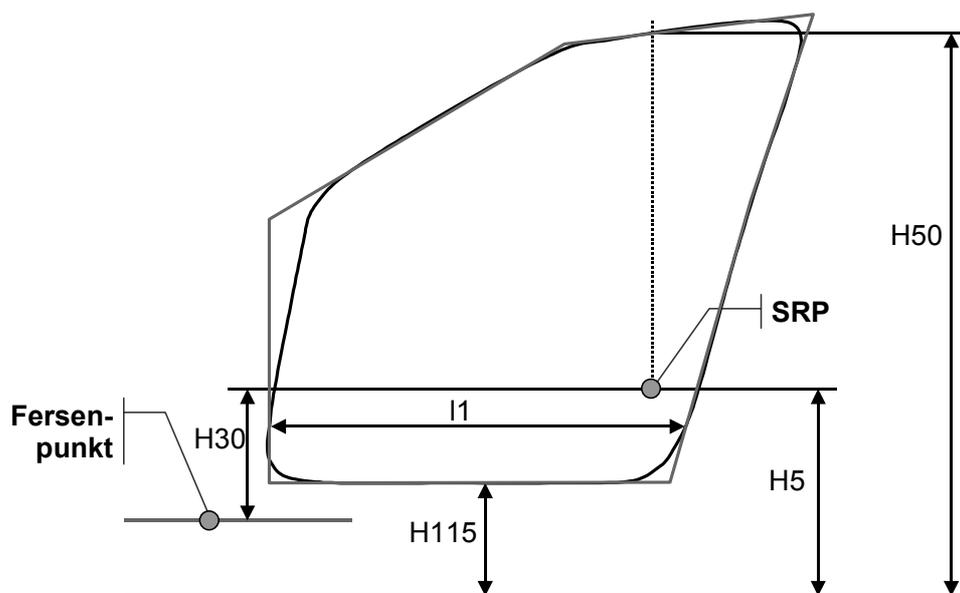


Abb. 17: Einstiegsöffnung mit bestimmenden Maßen

Der Dachbereich verläuft vereinfacht immer parallel zur Fahrzeuglängsachse. Die Veränderung der Einstiegsöffnung erfolgt über die Verschiebung der Knotenpunkte in x-, y- und z-Richtung. Dies geschieht teils elektrisch, teils manuell.

Der Schweller begrenzt die Einstiegsöffnung nach unten. Er kann in der Breite und in der Höhe elektrisch verstellt werden. Für das Profil der Außenseite des Schwellers stehen zwei Varianten zur Verfügung: Die Basisvariante stellt das Profil des Schwellers der 3er-Limousine dar. Dieses Profil ist typisch für limousinenartige Fahrzeuge. Für geländewagenartige Fahrzeuge kann auf das Profil des X5 umgerüstet werden (Abb. 18).

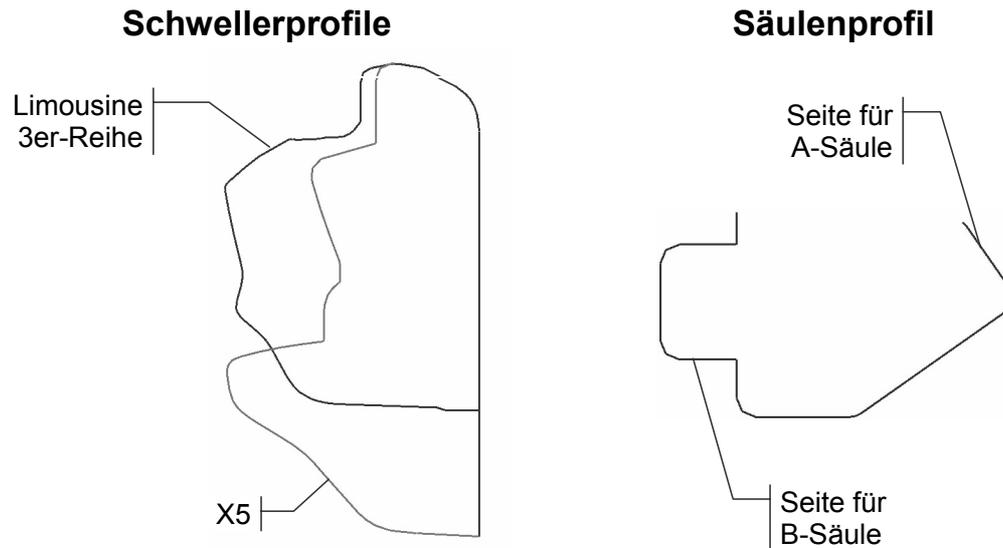


Abb. 18: Profile des Schwellers und Profil der Säulenverkleidungen

Der Einstieg erfolgt von einer in der Höhe verstellbaren Standebene. Durch die Höhenverstellung wird das Maß H5 (Höhe Sitz über Fahrbahn) eingestellt. Diese ersetzt eine Höhenverstellung des „Inneren Systems“. In Abb. 19 sind die direkten Einstiegsgeometrien und die Hilfsgeometrien farblich differenziert dargestellt:

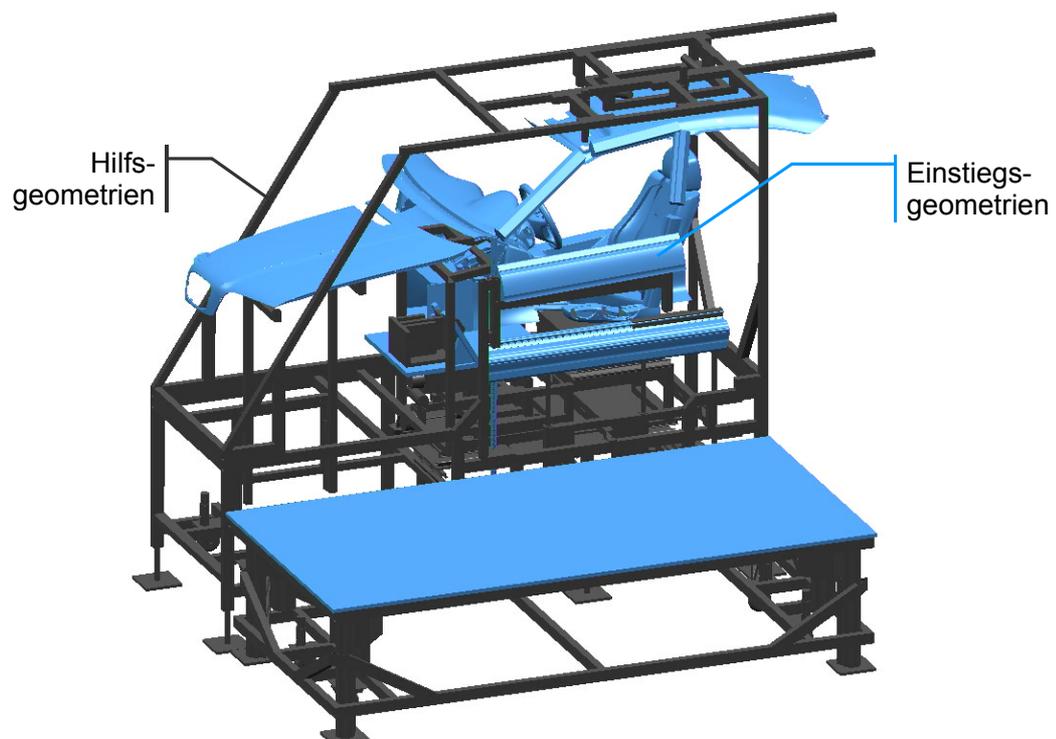


Abb. 19: Einstiegs- und Hilfsgeometrien am VEMO

3.2.2.3 Sekundäre Geometrien

Um die Einstellung des Sitzes für die Versuchsperson zu vereinfachen, ist eine in der Höhe veränderliche Frontklappe und eine in x-, y- und z-Richtung verstellbare Dachverkleidung im Modell dargestellt.

Die Frontklappe wird in der Höhe so eingestellt, dass sie die Sichtbegrenzung des entsprechenden Fahrzeugs auf die Fahrbahn simuliert. Analog dazu wird die Dachverkleidung in der Höhe so eingestellt, dass das Modell die gewünschte Kopffreiheit aufweist. Die Position in x-Richtung wird durch die darzustellende Sicht nach vorne oben vorgegeben. Die Tür ist nur im oberen Bereich massiv ausgeführt. Die Brüstungshöhe kann ebenfalls verändert werden.

3.2.3 Versuchsmethodik

Zur Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung sind mit dem VEMO grundsätzlich zwei verschiedene Vorgehensweisen realisierbar:

- 1)** Bei der ersten werden alle Einstellungen so gewählt, dass mit dem Modell die Einstiegsverhältnisse eines bestimmten Fahrzeugs simuliert werden. Die Werte für die aktuellen Fahrzeuge der BMW-Produktpalette sind auf den Skalen der Verstellungen bereits markiert, so dass die entsprechenden Modelle sehr einfach eingestellt werden können. Auf diese Art lassen sich ebenso neue Fahrzeugkonzepte bezüglich der Einstiegsverhältnisse bewerten, ohne dafür ein aufwändiges Modell anfertigen zu müssen. Die Maße der Einstellungen müssen vorher aus den CAD-Daten ermittelt werden. Diese Vorgehensweise wird beim ersten Vorversuch verwendet (Kap. 4.1).
- 2)** Die zweite Vorgehensweise geht von einer festzulegenden Konfiguration aus, einer sog. Basiskonfiguration. Im Versuch werden dann einzelne Parameter der Geometrie verstellt, z.B. die Schwellerhöhe. Der Hauptversuch (Kap. 4.3) läuft nach diesem Prinzip ab. Der Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass sich Veränderungen der Bewegung und Bewertung direkt auf die Veränderung der Geometrie zurückführen lassen.

3.3 Bewegungsaufzeichnung

Unter „Motion Capture“ (Bewegungsaufzeichnung) wird die Aufzeichnung von Bewegungen mit Hilfe einer Reihe von Videokameras verstanden, wobei die Bewegung in digitaler 3D-Umgebung reproduziert wird [Vicon 2002].

Derartig aufgezeichnete Bewegungen lassen sich anschließend dreidimensional und quantitativ analysieren. Die Hauptanwendungsgebiete der Bewegungsaufzeichnung sind die Bewegungsanimation in der Film- und Spielindustrie und die Bewegungsanalyse in der Medizin (z.B. Ganganalyse, Optimierung von Bewegungen im Hochleistungssport).

Die Untersuchung der Einstiegsbewegung nimmt eine Sonderstellung ein, da sie Anforderungen aus beiden Anwendungsbereichen kombiniert:

- Wie in der Medizin müssen die Bewegungen des Menschen sehr genau wiedergegeben werden. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Animation „nur“ darauf an, dass die Bewegungen schön und natürlich aussehen.
- Andererseits ist die Einstiegsbewegung eine unperiodische Bewegung, die in einer komplexen Umgebung stattfindet. Diese ist eine Art von Anwendung, wie sie häufig im Animationsbereich auftritt.

Eine besonders wichtige Anforderung an das Messsystem ergibt sich aus der Versuchsdurchführung: Die Kalibrierung des Systems und die nachfolgende Datenverarbeitung müssen einfach, genau und reproduzierbar sein.

3.3.1 Bewegungsmesssystem

Das optische Bewegungsmessverfahren von „Vicon“ erfüllt die Anforderungen am besten. Für die Versuche wird das System „Vicon 624“ verwendet. Da das Bewegungsmesssystem einen erheblichen Einfluss auf die Versuchsumgebung und den Versuchsablauf hat, wird im Folgenden die Funktionsweise kurz beschrieben:

3.3.1.1 Funktionsweise

Das verwendete Bewegungsmesssystem „Vicon 624“ arbeitet nach dem optoelektrischen Prinzip. Dabei werden Kameras um das Bewegungsvolumen aufgestellt. An jeder Kamera ist um das Objektiv ein Ring mit LED's angebracht, die Lichtblitze mit einer konstanten Frequenz aussenden. Diese Lichtblitze werden an den am Körper der Versuchsperson angebrachten Markern reflektiert und von den Kameras aufgefangen. Aus den 2D-Informationen von mindestens zwei Kameras kann dann die Lage des Markers im Raum und über der Zeit rekonstruiert werden (Abb. 20).

Die Platzierung der Marker ist nicht beliebig. Sie müssen an speziellen Körperstellen der Versuchspersonen angebracht werden, so dass bei der anschließenden Bewegungsmodellierung aus den Bewegungsbahnen dieser Marker die Bewegung des Skeletts berechnet werden kann. Am einfachsten ist es, wenn für die Versuche ein spezieller „Motion Capture“-Anzug verwendet wird, an dem die Marker angeklebt werden können.

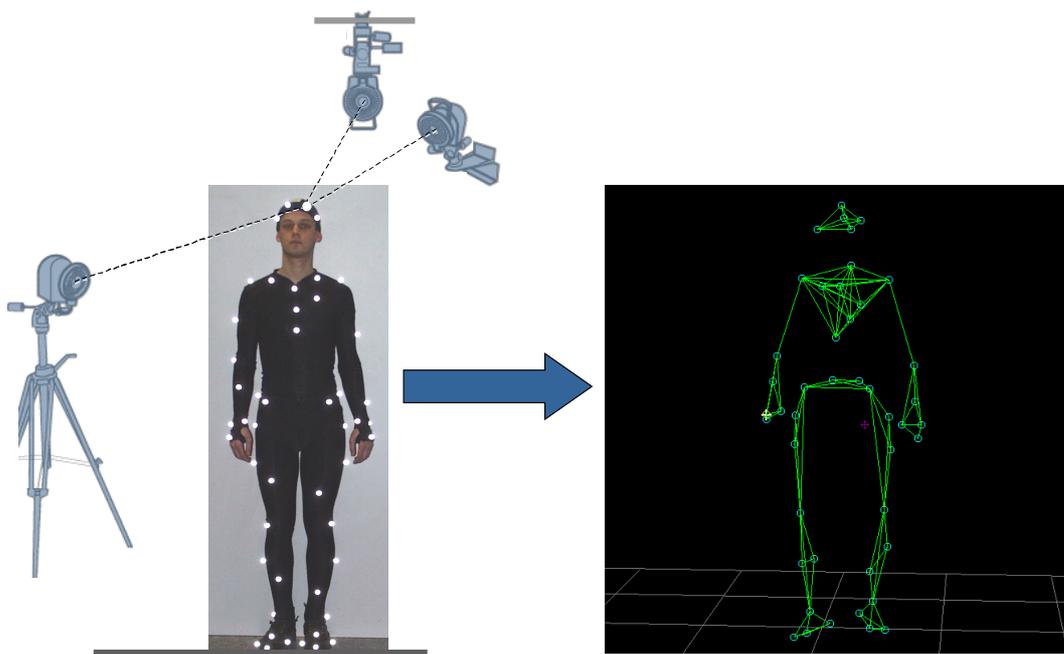


Abb. 20: Funktionsweise der optischen Bewegungsaufzeichnung

Aus den 2D-Informationen von mindestens zwei Kameras pro Marker wird die Lage bzw. die Bewegung der Marker im Raum rekonstruiert.

3.3.1.2 Hardware

Für die Aufzeichnung der Einstiegsbewegung werden zwei Arten von Kameras verwendet: „MiscCam’s“ und „LCam’s“ (Abb. 21).



Abb. 21: Kameras zur Bewegungsaufzeichnung

Diese Kameratypen werden mit einer Frequenz von 50Hz betrieben, d.h. es werden 50 Bilder pro Sekunde aufgezeichnet. „LCam’s“ haben den Vorteil, dass sie aufgrund ihrer geringen Baugröße auch in räumlich eingeschränkten Bereichen wie dem Fußraum eingesetzt werden können. „MiscCam’s“ verfügen über eine größere Leuchtintensität und können dadurch tiefer in den Raum „sehen“.

Parallel dazu zeichnet eine synchronisierte digitale Videokamera die Bewegung konventionell auf.

Die Kameras werden von einer sog. Datenstation gesteuert. Die während einer Bewegungsaufzeichnung anfallenden Daten werden dort gesammelt und an einen PC weitergeleitet, auf dem sie gespeichert werden.

Während der Installation stellte sich heraus, dass mit der zunächst vorgesehenen Anzahl an Kameras die erforderliche Datenqualität nicht erzielbar war. Zudem gelang die Kalibrierung, die eine essentielle Voraussetzung für die Bewegungsaufzeichnung ist, nur sporadisch. Das Kamerasystem wurde aus diesem Grund um vier auf insgesamt 14 Kameras erweitert (neun „MiscCam’s“, fünf „LCam’s“).

3.3.1.3 Software

Für die Bewegungsaufzeichnung, -aufbereitung und -analyse werden folgende Softwarewerkzeuge eingesetzt:

- Vicon Workstation
- Vicon iQ
- Vicon Bodybuilder
- Vicon Polygon

Die Software „Workstation“ ist die zentrale Anwendung für die Bewegungsaufzeichnung. Sowohl die Kalibrierung als auch die Aufzeichnung der Daten erfolgen mit diesem Programm.

Die aufgezeichneten Daten werden mit „iQ“ anschließend editiert und gereinigt. Dabei werden u.a. irrtümlich berechnete Marker, sog. „Ghosts“, gelöscht und falsch rekonstruierte Bewegungsbahnen korrigiert. Den verbliebenen Markern wird ihr Name zugewiesen, so dass das Programm weiß, zu welchem Körperteil der Marker gehört.

Im nächsten Schritt lässt sich mit diesen Daten in „Bodybuilder“ die Bewegung eines kinematischen Modells berechnen.

Für die Analyse und visuelle Darstellung der Bewegungsdaten wird anschließend das Werkzeug „Polygon“ verwendet. Es ermöglicht u.a. die synchrone Überlagerung von mehreren Bewegungen sowie die synchrone Darstellung von Verlaufskurven und 3D-Bewegungen.

Die erforderlichen Vicon-Softwarewerkzeuge sind in Abb. 22 zusammengefasst.

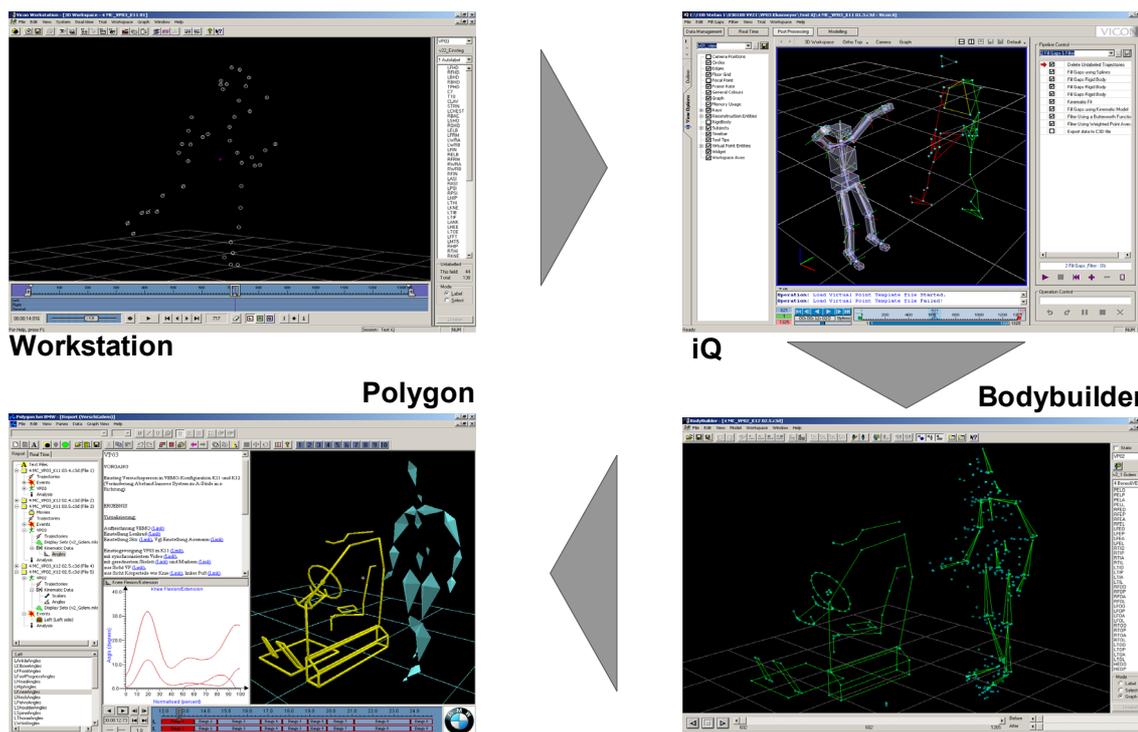


Abb. 22: „Vicon“ Softwarewerkzeuge

3.3.2 Versuchsspezifische Aufstellung der Kameras

Im Fall der Einstiegsuntersuchungen sieht man sich bei der Bewegungsaufzeichnung mit einem für diese Art der Anwendung eher ungewohnten Problem konfrontiert, da sich mitten im Messvolumen die Geometrien des VEMO befinden. Die Schwierigkeit dabei ist, ein Optimum zwischen der Anzahl an Kameras (mit dem System können maximal 24 Kameras betrieben werden), Kalibrieraufwand und Datenqualität zu finden: Grundsätzlich sind für die Bestimmung eines Markers im Raum mindestens zwei Kameras ausreichend. Da durch den Körper der Versuchsperson, andere Marker und durch die Einstiegsgeometrie Marker verdeckt werden, ist für die Aufzeichnung einer Bewegung eine deutlich größere Anzahl an Kameras erforderlich. Mit der Anzahl an Kameras steigt allerdings auch der Platzierungs- und Kalibrieraufwand. Die Schwierigkeit bei der Aufstellung der Kameras ergibt sich dadurch, dass sich für die Kalibrierung die Sichtbereiche der Kameras ausreichend überlappen müssen. Gleichzeitig dürfen sich die Kameras nicht gegenseitig „sehen“, da es sonst mit dem zur Verfügung stehenden Softwarestand zu einer fehlerhaften Kalibrierung kommen kann [Winter 2002]. Zu diesem Zweck wurden am Modell sog. Sichtschutzelemente angebracht. Die Reduzierung des Sichtbereichs der Kameras wird dabei bewusst in Kauf genommen (Abb. 23).

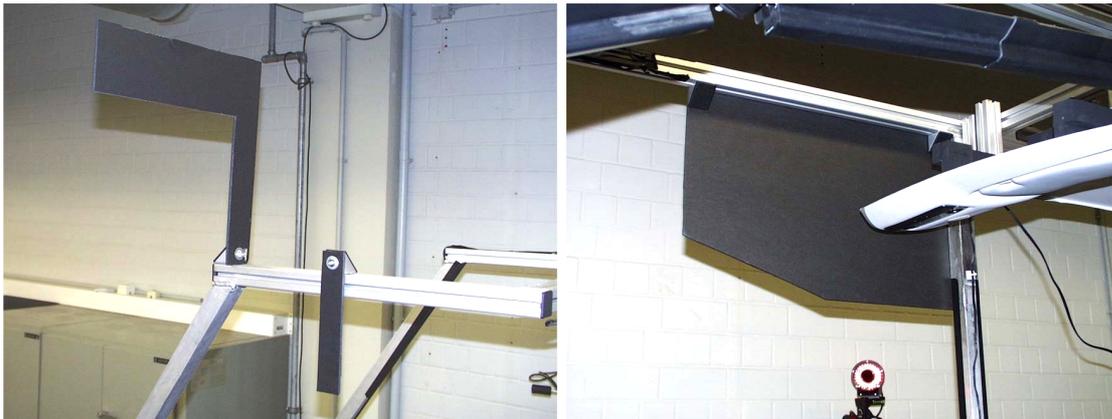


Abb. 23: Sichtschutzelemente

Zuletzt sind noch als Faktor bei der Entscheidung über die Anschaffung weiterer Kameras die nicht unerheblichen Kosten anzumerken.

Bei der Aufstellung der Kameras hat sich zudem gezeigt, dass es sinnvoll ist, das gesamte Bewegungsvolumen in möglichst zusammenhängende Teilvolumina aufzuteilen und jeweils eine Gruppe von Kameras auf die einzelnen Untervolumen zu konzentrieren. Allerdings muss auf eine ausreichende Überlappung zwischen den Teilvolumina geachtet werden [Sellmeir 2002].

Die Kameraaufstellung (Abb. 24) wurde für Versuche mit limousinenartigen Fahrzeugen optimiert. Die Aufzeichnung von Fahrzeugen mit deutlich kleinerem oder größerem H5-Maß kann eine Anpassung der Ausrichtung der Kameras bedingen.



Abb. 24: Aufstellung der Kameras

3.3.3 Versuchsspezifische Kalibrierung der Kameras

Die Kalibrierung des Kamerasystems stellt einen für den weiteren Verlauf der Untersuchung entscheidenden Prozessschritt dar. Von ihr hängt maßgeblich die Qualität der aufgezeichneten Bewegung und damit der Aufwand bei der Datenweiterverarbeitung ab.

Der Kalibrierungsvorgang des „Vicon“-Systems läuft in zwei Schritten ab: Als erstes wird ein L-Rahmen (Abb. 25, links) in einer statischen Aufnahme aufgezeichnet. Dieser folgt eine dynamische Aufnahme, bei der ein Stab mit zwei Markern (Abb. 25, rechts) durch das Messvolumen bewegt wird. Detailliert wird der Kalibrierungsvorgang in [Vicon 2001] beschrieben.

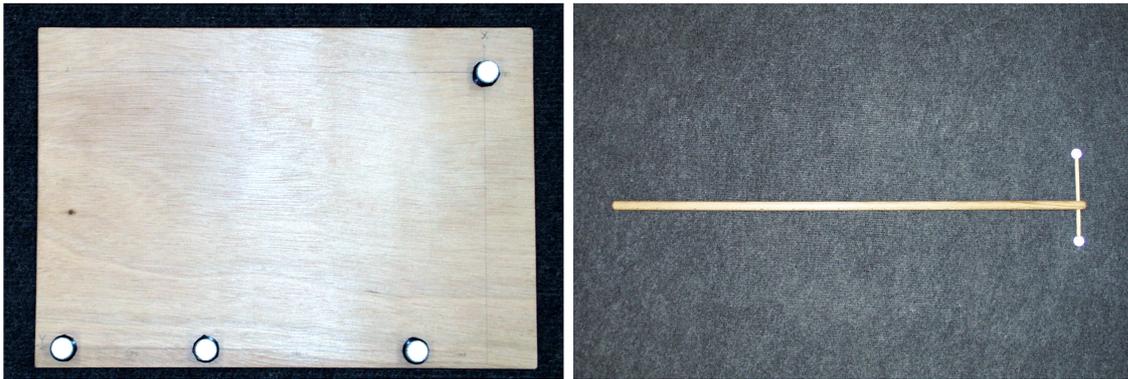


Abb. 25: Kalibrierungskörper (L-Rahmen links und Stab rechts)

Für den dynamischen Kalibrierungsvorgang werden insgesamt maximal 1000 Bilder verwendet. Diese entsprechen bei einer Frequenz von 50Hz einer Kalibrierungsdauer von 20 Sekunden. Bei längeren Kalibrierungsvorgängen erfolgt ein sog. „Down-sampling“, d.h. bei z.B. 5000 Bildern wird nur noch jedes fünfte Bild für die Berechnung verwendet. Der Kalibrierungsvorgang muss also bezüglich des Bewegungswegs, der Bewegungsgeschwindigkeit und der Dauer optimiert werden.

Für die Kalibrierung des Bewegungsvolumens im VEMO hat sich eine Dauer von etwa 2½ Minuten als optimal herausgestellt. Das Kalibrierungsobjekt wird dabei ruhig und gleichmäßig durch das Aufnahmevolumen bewegt, wobei jedes Teilvolumen etwa gleich lang kalibriert wird. Der Kalibrierungsweg ist in Abb. 26 dargestellt.

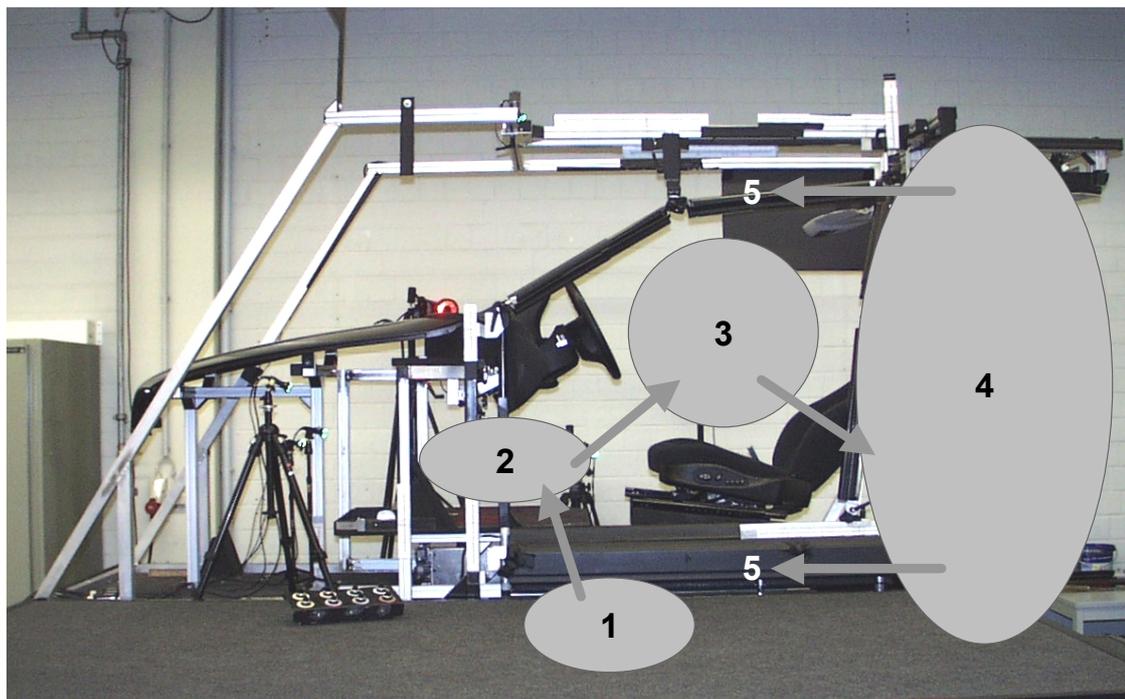


Abb. 26: Kalibrierungsweg

Die dynamische Kalibrierung beginnt über der Standebene im Fußbereich (1). Von dort aus wird über den Schweller der Fußraum kalibriert. Als nächstes folgt der Bereich über dem Sitz (3). Als letztes wird, beginnend am hinteren Ende der Standebene (4), das gesamte Volumen über der Standebene kalibriert (5).

Die Optimierung der Kalibrierung erwies sich als sehr aufwändig und erstreckte sich über einen Zeitraum von etwa sechs Monaten.

Für die Überprüfung der Qualität der Kalibrierung wurde folgende Bewertungsmethodik entwickelt. Diese umfasst vier Bedingungen:

- Alle Kameraresiduen⁵ müssen kleiner als zwei Millimeter sein.
- Der rekonstruierte Kalibriervorgang sollte nur die zwei zur Kalibrierung verwendeten Marker zeigen.
- Die Sichtbereiche der Kameras, die sog. „Kameraprismen“, sollten leicht über das zu messende Volumen hinausreichen.
- Das Volumen, das von mindestens vier Kameras eingesehen wird, sollte das tatsächliche Messvolumen abdecken.

⁵ Die Kameraresiduen werden nach einer erfolgreichen Kalibrierberechnung ausgegeben. Je kleiner der Wert desto genauer ist die Berechnung der Position und Ausrichtung der Kamera anhand des Kalibriervorgangs.

Von einer ausreichenden Qualität der Kalibrierung kann nur dann ausgegangen werden, wenn diese vier Bedingungen erfüllt sind. Ist dies nicht der Fall, sollte die Kalibrierung wiederholt werden.

3.3.4 Versuchsspezifische Bewegungsaufzeichnung

Das Aufzeichnen der Einstiegsbewegung erfolgt in vier Stufen (vgl. auch Abb. 27):

Zunächst wird die gewählte VEMO-Ausgangskonfiguration in Basis- und individueller Einstellung der Versuchsperson aufgezeichnet. Diese beiden Aufzeichnungen dienen der Erfassung der Einstiegsgeometrie und der versuchspersonenspezifisch individuellen Einstellung von Sitz und Lenkrad. Die Dauer beträgt wie bei allen statischen Aufzeichnungen drei Sekunden.

Als nächstes erfolgt eine Kalibrier- und „Range of Motion“-Aufzeichnung der Versuchsperson, aus der die konstanten Modellparameter für die Modellierung der Versuchsperson berechnet werden. Zusätzlich werden daraus die Bewegungsgrenzen der Körpergelenke bestimmt, die für die Datenvorbereitung in „iQ“ erforderlich sind. Die Versuchsperson muss dafür die sogenannte T-Haltung einnehmen: Sie steht mit gestreckten Beinen vor dem Modell, die Arme sind waagrecht auf Schulterhöhe ausgestreckt. Daran schließt sich eine Bewegung der wichtigsten Gelenke (Sprung-, Knie-, Hüft-, Schulter-, Ellenbogengelenke, dazu Rumpf und Kopf) an.

Diese drei Aufzeichnungen sind für die Modellierung erforderlich und müssen bei jeder Versuchsperson vor dem Versuchsbeginn gemacht werden. Anschließend kann mit der Aufzeichnung der Einstiegsbewegungen begonnen werden.

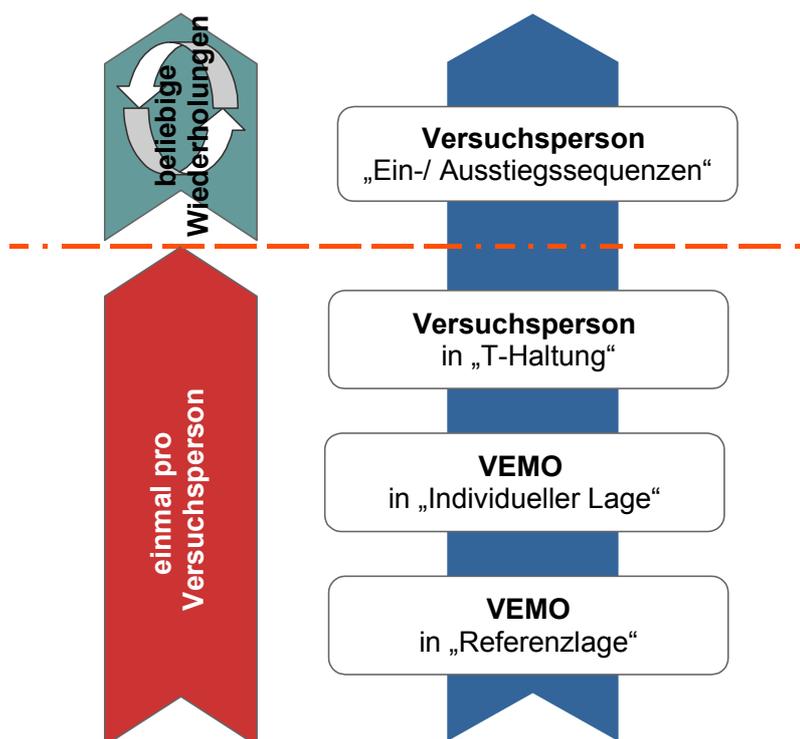


Abb. 27: Vierstufige Bewegungsaufzeichnung

Die Bewegungsaufzeichnung beginnt damit, dass die Versuchsperson in T-Haltung vor dem VEMO steht. Das erleichtert die spätere Datenverarbeitung. Nach ein bis zwei Sekunden bewegt sich die Versuchsperson zum Anfangspunkt der Einstiegsbewegung neben dem Modell. Es folgen ein bis zwei Annäherungsschritte, bevor die Einstiegsbewegung mit dem Heben des rechten Fußes ins Fahrzeug beginnt. Das Ende der Einstiegsbewegung ist erreicht, sobald der Rumpf der Versuchsperson auf dem Sitz und der linke Fuß auf der Fußstütze bzw. der rechte auf dem Fahrpedal zur Ruhe gekommen sind.

Nach mehrsekündigem Verweilen steigt die Versuchsperson wieder aus, stellt sich vor das Modell und nimmt abschließend wieder die T-Haltung ein.

3.4 Bewegungsmodellierung

Meist können an den für die Analyse bedeutenden Punkten die Marker nicht direkt angebracht werden (z.B. an den Gelenkszentren). Deren Lage bzw. Bewegung wird mit Hilfe der Bewegungsmodellierung berechnet. Als Ergebnis erhält man sog. „virtuelle Marker“, die in die Aufzeichnung ausgegeben werden können.

Im einfachen Fall handelt es sich um statische Marker am Modell, die durch ihre Lage die Bewegung stören würden (z.B. Marker in der Einstiegsöffnung). Für die Bewegungsanalyse ist aber vor allem die einfache und reproduzierbare Berechnung der Bewegung des Skeletts nach dem Prinzip der inversen Kinematik von Bedeutung.

Im Folgenden werden die für die Einstiegsuntersuchung entwickelten Modelle erläutert:

3.4.1 Modellierung des VEMO

Einen Spezialfall der „Bewegungsmodellierung“ stellt die Berechnung von Starrkörpern auf Basis von statischen Markern dar (Abb. 28).

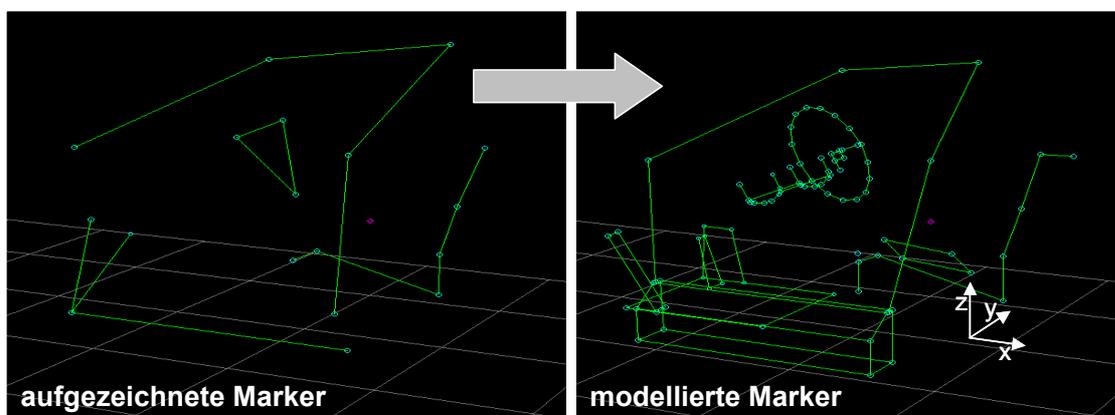


Abb. 28: Modellierung des VEMO

Das linke Bild zeigt die Aufzeichnung der am VEMO angebrachten Marker. Aus diesen werden in der Modellierung die für die Einstiegsversuche relevanten Geometrien berechnet (rechtes Bild).

Die Modellierung der VEMO-Geometrie ist parametrisch aufgebaut. Die Marker bestimmen die Koordinaten von Bezugspunkten der veränderlichen VEMO-Geometrien (z.B. Lage des Bodens in x-, y- und z-Richtung). Ausgehend von den Bezugspunkten werden über Vektoren die gesamten Geometrien berechnet (im Fall des Fußraumbodens die Bodenfläche mit Fahrpedal und Fußstütze).

Durch die Parametrisierung sind für die Erfassung der Geometrien nur 19 Marker erforderlich. Damit wird die Lage aller einstiegsrelevanten Bauteile (Sitz, Lenkrad, Lenksäulenverkleidung, Fußraumboden mit Fahrpedal und Fußstütze, Schweller, A-, B-Säule, Dachverkleidung und Fahrbahnebene) eindeutig bestimmt. Ausgehend von der aufgezeichneten Referenzgeometrie lassen sich analog dazu alle für die Einstiegsuntersuchung verwendeten VEMO-Varianten modellieren.

Eine weitere wichtige Funktion des Modells ist die nachträgliche Überlagerung der VEMO-Varianten (und entsprechend der Bewegungen) im hintersten, untersten Sitz-*H-Punkt*. Dieser Punkt bietet sich deshalb an, da der Sitz die Endposition aller Bewegungen vorgibt und für die Bewegungen ein konstantes Element darstellt. Durch die Überlagerung lassen sich die Bewegungen und geometriebedingten Bewegungsänderungen übersichtlicher darstellen.

Eine Untersuchung der Abweichungen der realen von den modellierten Einstiegsgeometrien wird in Kap. 4.2.3 vorgenommen.

3.4.2 Menschmodelle „Golem“ und „RAMSIS“

Das Kernstück der in dieser Arbeit entwickelten Methode bildet die Modellierung der menschlichen Bewegung. Dabei wird ausgehend von den aufgezeichneten Markern die Bewegung des menschlichen Skeletts berechnet. Vereinfachend werden dabei die Körperteile als Starrkörper angenommen, die über Gelenke bestimmter Freiheitsgrade miteinander verbunden sind.

Die Besonderheit bei dieser Berechnung ist, dass sie vollständig automatisierbar und damit absolut reproduzierbar und konsistent ist.

Folgende zwei Menschmodelle sind für diese Arbeit von zentraler Bedeutung:

- „Golem“, das in Verbindung mit „Vicon“-Systemen am weitesten verbreitete Menschmodell zur Bewegungsanalyse und
- „RAMSIS“, das Menschmodell des gleichnamigen Ergonomiesimulationssystems.

3.4.2.1 „Golem“-Menschmodell

Das bei „Vicon“-Anwendern in der Bewegungsanalyse am weitesten verbreitete Menschmodell ist „Golem“ [Vicon 2003]. So bildet „Golem“ u.a. die Grundlage für das Modul „Plug-in Gait“, das weltweit bei der Ganganalyse zusammen mit „Vicon“-Systemen eingesetzt wird. Das Modell basiert auf klinischen anerkannten Menschmodellen (u.a. [Kadaba 1990], [Ramakrishnan 1991], [Bell 1990]) und wurde in einer Vielzahl von Studien validiert.

Das „Golem“-Modell setzt sich aus einem Unter- und einem Oberkörpermodell zusammen. Die beiden Teile sind grundsätzlich voneinander unabhängig. Das Modell ist von einem Zentrum nach außen additiv aufgebaut. Das Unterkörpermodell beginnt in den Hüftgelenkszentren, das des Oberkörpers in den Schulterzentren. Die weiter nach außen liegenden Gelenkzentren werden den Freiheitsgraden des Gelenks entsprechend aus dem oder den das Segment treibenden Marker(n) berechnet.

Die Gelenke sind, abgesehen von den vorgegebenen Freiheitsgraden, in ihrem Bewegungsbereich nicht eingeschränkt. Damit erlaubt das Modell auch die Bewegungsanalyse von körperlich behinderten Personen.

Die Berechnung der modellierten Bewegung auf Basis der aufgezeichneten Marker erfolgt bildweise mit einer Frequenz von 50Hz und bis auf die in der Parameterdatei abgelegten Konstanten unabhängig vom vorherigen Bild. Bei den Parametern handelt es sich um Größen, die entweder gemessen (z.B. die Kniegelenksdicke) oder aus der statischen Aufnahme berechnet wurden (z.B. Fußlänge).

Zur Visualisierung der Bewegung, insbesondere der Bewegung zwischen zwei in einem Gelenk verbundenen Knochen, kann auf die Golem-Segmente in dem Modul „Polygon“ ein Skelett „gemappt“ werden.

3.4.2.2 „RAMSIS“-Menschmodell

Die Untersuchung der Einstiegsbewegung und die hierfür zu entwickelnde Methode soll die Grundlage für eine Einstiegssimulation in „RAMSIS“ schaffen. Aus diesem Grund ist es sehr wichtig, dass alle Untersuchungen und damit die Ergebnisse von vornherein konform mit dem Menschmodell von „RAMSIS“ (vgl. Abb. 29) sind.

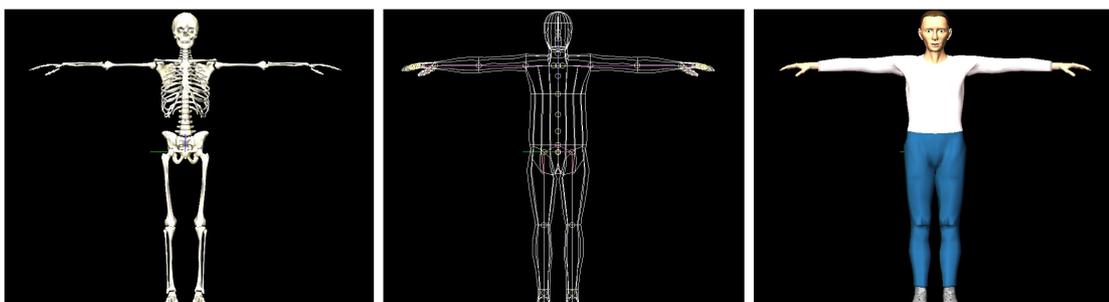


Abb. 29: Darstellungsformen von „RAMSIS“ (Skelett, Struktur und Hülle, Präsentationsdarstellung)

Das „RAMSIS“-Menschmodell ist im Vergleich zu „Golem“ detaillierter. Dies wird vor allem im Bereich der Wirbelsäule und des Schultergürtels deutlich. Die Hände wurden bei „RAMSIS“ mit allen Fingern und Fingergliedern dargestellt (Abb. 30), während bei „Golem“ die Hand nur als zweiteiliges mit einem Scharniergelenk verbundenes Segment modelliert ist.

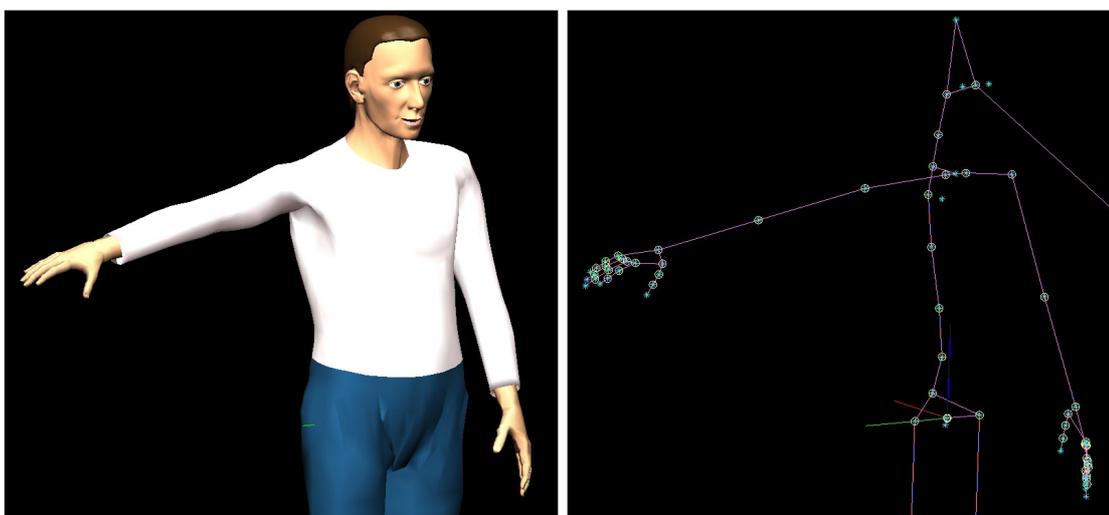


Abb. 30: Wirbelsäule und Schulterbereich des „RAMSIS“-Menschmodells

In „RAMSIS“ können für die Erzeugung eines Manikins verschiedene Menschmodelle verwendet werden, die sich bezüglich ihrer Hand- und Fußmodelle unterscheiden. Für die Transformation von „Golem“ zu „RAMSIS“ eignet sich das Modell ohne Schuhe am

besten, weil bei diesem Modell alle Maße unabhängig voneinander verändert werden können (Abb. 31). Für die Handbewegung kann das optisch ansprechendere Modell der 5-Finger-Hand verwendet werden, da die Bewegung der Hand nicht berücksichtigt wird.

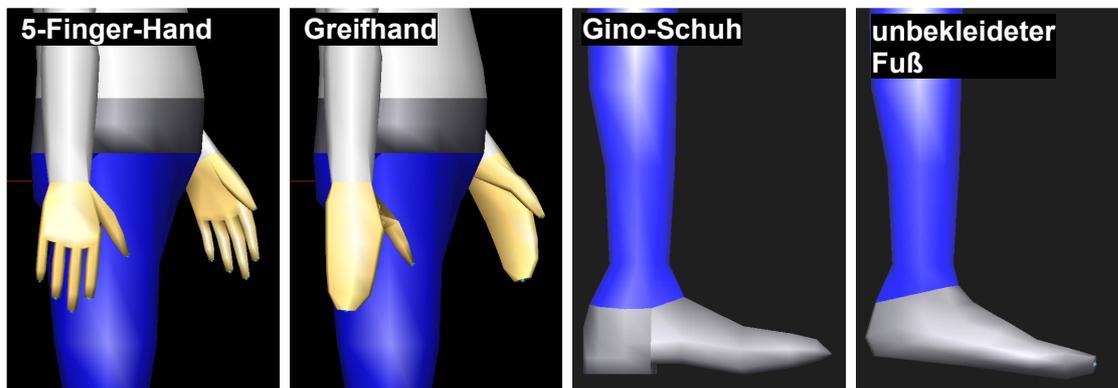


Abb. 31: Hand- und Fußmodelle in „RAMSIS“

In punkto Beweglichkeit ist die Struktur von „RAMSIS“ eingeschränkter, da die Bewegungsbereiche der einzelnen Gelenke fest vorgegeben sind. Die Beweglichkeit entspricht der eines durchschnittlichen und gesunden Menschen.

3.4.3 Untersuchungsspezifische Menschmodelle

Für die Berechnung der passenden Kinematik zur Einstiegsbewegung der Versuchspersonen, also für die Modellierung der Bewegung, sind aufgrund der Forderung nach „RAMSIS“-konformen Bewegungsdaten erhebliche Anpassungen von „Golem“ erforderlich.

3.4.3.1 Allgemeine Anforderungen an die Bewegungsmodellierung

Die Forderung nach „RAMSIS“-konformen Messergebnissen hat starke Auswirkungen auf die Modellierung der Bewegung. Im Hinblick auf das Untersuchungsziel müssen die Versuchsdaten weitestgehend die Eigenschaften der Kinematik von „RAMSIS“ entsprechen. Dieses stellt ebenfalls ein vereinfachtes Modell dar, da der menschliche Bewegungsapparat zu komplex für eine exakte Modellierung ist. Die beiden vereinfachten Menschmodelle sind nun so zusammenzuführen, dass die Qualität der Ergebnisse nicht darunter leidet.

In der nachfolgenden Tab. 6 sind die Anforderung an die Anpassung der Segmente von „Golem“ an „RAMSIS“ aufgelistet:

Tab. 6: Anforderungen an die Anpassung der Segmente

Segment	Anbindung über	Art des Gelenks	Bemerkung
Oberschenkel	Hüftgelenk	Kugel	
Unterschenkel	Kniegelenk	Scharnier	
Fuß	Sprunggelenk	Kugel	
Zehen	Zehengelenk	Scharnier	Ende der Zehen mit fester Fußspitze
Oberarm	Schultergelenk	Kugel	
Unterarm	Ellenbogengelenk	Scharnier mit Rotation	
Hand	Handgelenk	Scharnier	
Finger	Fingergelenk	Scharnier	Ende der Finger mit fester Fingerspitze
Kopfspitze			

In „RAMSIS“ soll der „virtuelle Zwilling“ der Versuchsperson durch Eingabe der Körpersegmentlängen in der „Längen“-Datei erzeugt werden. Die hierfür erforderlichen Maße müssen ebenfalls mit dem Bewegungsmodell berechnet und ausgegeben werden.

Der Wirbelsäulen- und Schulterbereich soll nicht modelliert werden. Die in „RAMSIS“ erforderlichen Anpassung der Segmente soll durch Skalierung erfolgen.

Die Umsetzung dieser Anforderungen erfolgt mit Hilfe eines zweiteiligen Modells. Der erste Teil ist ein angepasstes „Golem“-Modell. Im zweiten Teil des Modells erfolgt die Transformation der „Golem“- in eine „RAMSIS“-Bewegung.

3.4.3.2 Angepasstes „Golem“-Modell

Das ursprüngliche „Golem“-Modell sieht bei einigen Segmenten je nach Markersatz bzw. bei temporär verdeckten Markern und entsprechenden Lücken in Trajektorien alternative Berechnungswege vor. Da diese Programmierung zu Unstetigkeiten im Verlauf von Ortskurven führen kann, wird das Modell auf einen Hauptberechnungsweg reduziert. Damit werden gleichzeitig die für die Alternativwege vorgesehenen Marker überflüssig.

Das Programm „iQ“ ermöglicht den weitgehenden Verzicht des „Replace“-Makros, mit dem lückenhafte Trajektorien mit Hilfe von redundanten Markern rekonstruiert werden können. Problematisch am „Replace“-Makro ist, dass für diese Art der Berechnung eine starre Verbindung der Marker auf ein und demselben Starrkörper vorausgesetzt wird, was in den meisten Fällen nur bedingt zutrifft. Mit dem Weglassen des „Replace“-

Makros kann daher bei den meisten Segmenten auf redundante Marker verzichtet werden.

Die damit erreichte Reduzierung der Markeranzahl bringt mehrere Vorteile mit sich:

- Zum einen verringert sich der Aufwand bei der Markeranbringung und das Fehlerpotential bei der Platzierung der Marker.
- Zum anderen sinkt der Aufwand bei der Datennachbereitung. Es treten weniger berechnungsbedingte Fehlzuordnungen von Markern zu Trajektorien anderer Marker auf, wodurch ein geringerer Korrekturaufwand erforderlich ist (Abb. 32). Gleichzeitig bedeuten weniger Marker, dass bei der Nachbereitung entsprechend weniger Bewegungsbahnen bearbeitet werden müssen (u.a. Trajektorie zusammenfügen, Lücken füllen, filtern).

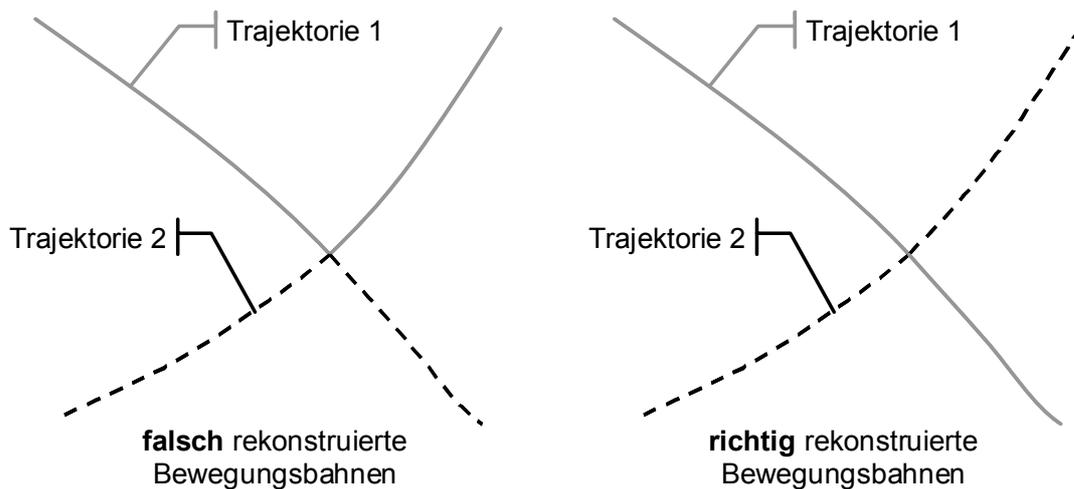


Abb. 32: Falsche Zuordnung eines Trajektorienstücks bei sich kreuzenden Markerbahnen

Bei sich kreuzenden Markerbahnen kann es zu einer fehlerhaften „Rekonstruktion“ kommen (links). Die Bahnen müssen dann manuell korrigiert werden.

Insgesamt erfordert das „Golem“-Menschmodell zur eindeutigen Bestimmung aller Körperteile und Freiheitsgrade 41 Marker. Da die Füße und Unterschenkel bei der Bewegungsaufzeichnung in das VEMO die problematischsten Körperteile darstellen, wird an diesen jeweils ein redundanter Marker verwendet. An diesen Körperteilen ist die Platzierung der redundanten Marker unkritisch. Insgesamt werden somit 45 Marker für die Aufzeichnung der Versuchsperson verwendet (Abb. 33).

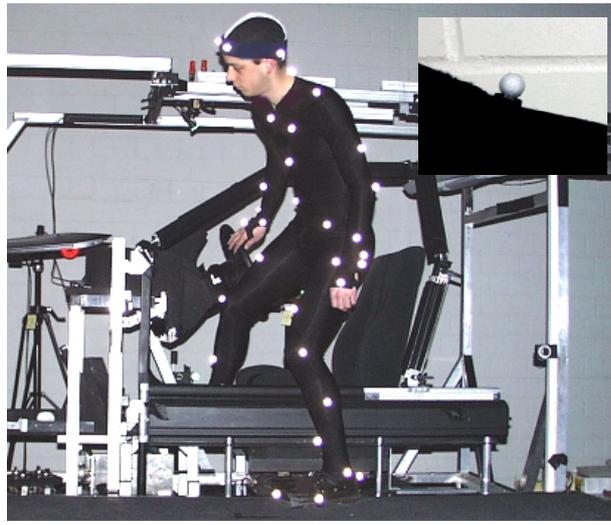


Abb. 33: Versuchsperson mit 45 Markern

3.4.3.3 Transformationsmodell „Gosis“

Der größte Unterschied zwischen den Menschmodellen „Golem“ und „RAMSIS“ betrifft die Länge der Segmente bzw. den Abstand zwischen benachbarten Gelenkzentren.

Bei „RAMSIS“ wird ein individuelles Manikin durch die Festlegung der Körpermaße erzeugt. Damit wird der Abstand zwischen benachbarten Gelenken festgelegt und verändert sich nicht mehr.

Dagegen wird bei der Berechnung des Skeletts auf Basis des „Golem“-Modells die Bewegung der Gelenkzentren direkt aus Markertrajektorien berechnet. Diese setzt einen konstanten Abstand der Segmente nicht voraus.

In Abb. 34 ist das Ergebnis einer exemplarischen Auswertung der Längenänderung von Unter- und Oberschenkel in „Golem“ bei einer Einstiegsbewegung einer männlichen Versuchsperson dargestellt:

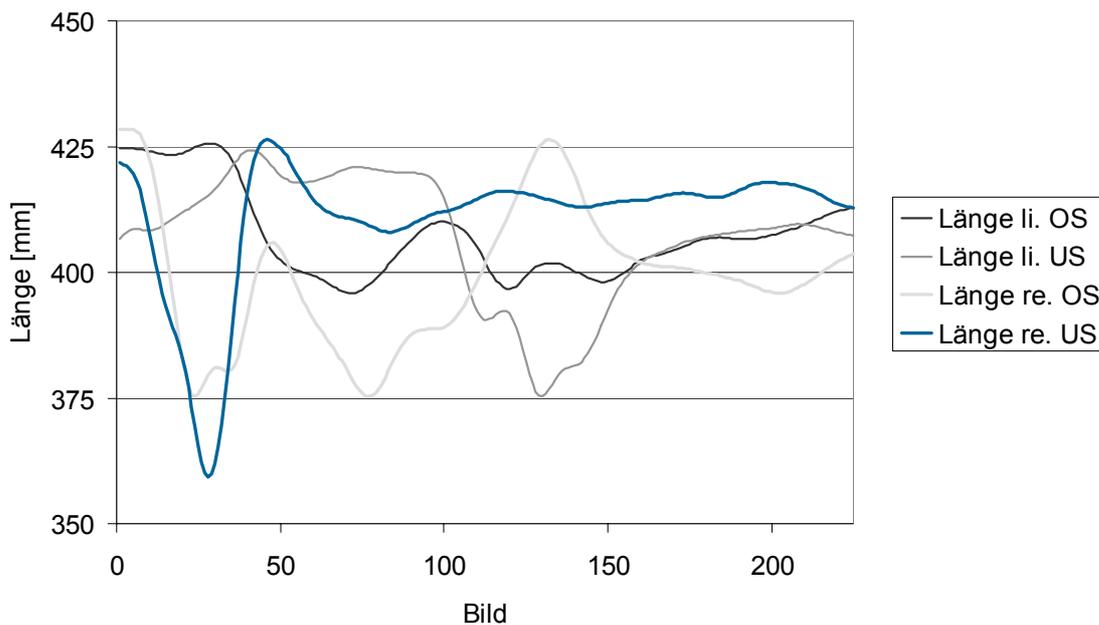


Abb. 34: Längenänderung des linken und rechten Unter- und Oberschenkels bei einer Einstiegsbewegung

Im ungünstigsten Fall des rechten Unterschenkels beträgt die Differenz zwischen maximaler und minimaler Segmentlänge 67mm. Die größte Standardabweichung der Segmentlängen beträgt 14mm.

Das Ergebnis einer direkt mit „Golem“-Trajektorien geführten Bewegung in „RAMSIS“ weicht daher stark von der tatsächlich aufgezeichneten Bewegung ab, da die vorgegebenen Bewegungsziele zum Teil nicht eingehalten werden können. Die Bewegung wirkt unharmonisch und unnatürlich, es treten Unstetigkeiten und Sprünge auf. In einzelnen Fällen kann es sogar zu Kollisionen bzw. Überschneidungen mit der Einstiegsgeometrie kommen.

Zur Vermeidung dieser Abweichungen wird ein spezielles Transformationsmodell entwickelt:

Das Transformationsmodell „Gosis“ („**Golem**“ in „**Ramsis**“) muss sicherstellen, dass die Segmente während der Bewegung eine vorgegebene konstante Länge haben. Randbedingungen zur Umgebung dürfen durch die Transformation nicht verletzt werden. Beispielsweise dürfen die Füße nicht den Boden durchdringen.

Die zweite Aufgabe des Transformationsmodells liegt in der sog. „Haltungsnormierung“:

Unter Haltungsnormierung ist zu verstehen, dass mit den modellierten Bewegungsdaten übereinstimmende Haltungen in „RAMSIS“ erzeugt werden können. In „RAMSIS“

liegt z.B. bei einem durchgestreckten Bein der Unter- und Oberschenkel auf einer Geraden. Dagegen zeigen die mit Golem modellierten Aufnahmedaten einen kleinen Winkel (Abb. 35).

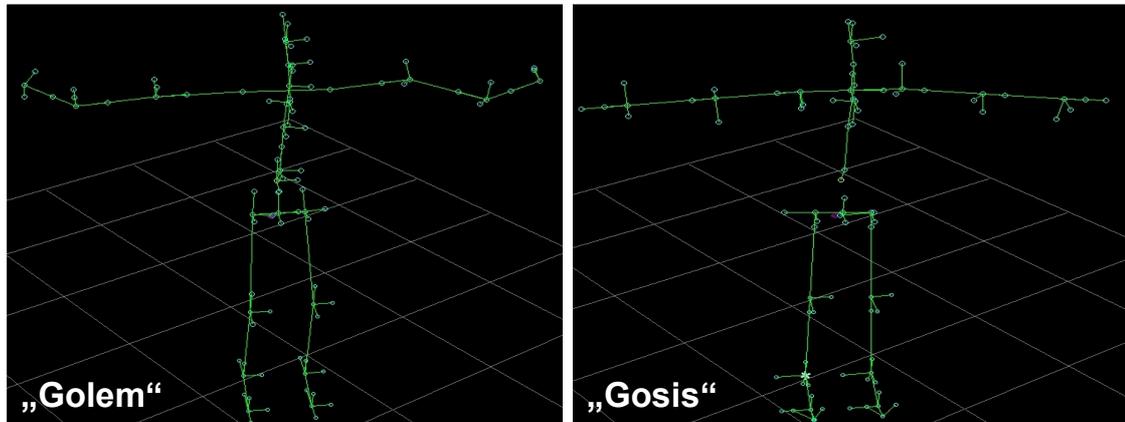


Abb. 35: Versuchsperson in T-Haltung modelliert mit „Golem“ und „Gosis“

Für die Normierung kommen nur Haltungen in Frage, die von Versuchspersonen reproduzierbar eingenommen werden können. Eine Haltung, die sich besonders gut eignet, ist die T-Haltung, bei der im Stand die Arme auf Höhe der Schultern seitlich ausgestreckt sind.

Die T-Haltung stellt auch modellseitig in „RAMSIS“ einen Sonderfall dar, da dabei u.a.

- die Ellenbogengelenke auf einer Geraden durch Schulter- und Handgelenke,
- die Kniegelenke auf einer Geraden durch Hüft- und Sprunggelenk liegen und
- die Arme zu den Beinen einen 90°-Winkel einnehmen.

Folgende Normierungen werden bei der Haltungsnormierung vorgenommen:

- Die Kniegelenkszentren werden auf die jeweilige Gerade durch das Hüft- und Sprunggelenk verschoben.
- Das gleiche gilt für die Ellenbogengelenkszentren, die auf die Gerade durch Schulter- und Handgelenk verschoben werden.
- Als letztes werden die Zehensegmente parallel zur Standebene ausgerichtet.

Die Berechnung der im „Gosis“-Modell fixen Segmentlängen erfolgt ebenfalls auf Basis der T-Haltung.

3.4.4 Arbeitsablauf bei der Modellierung

Der gesamte Ablauf der Bewegungsmodellierung ist in der Abb. 36 zusammengefasst:

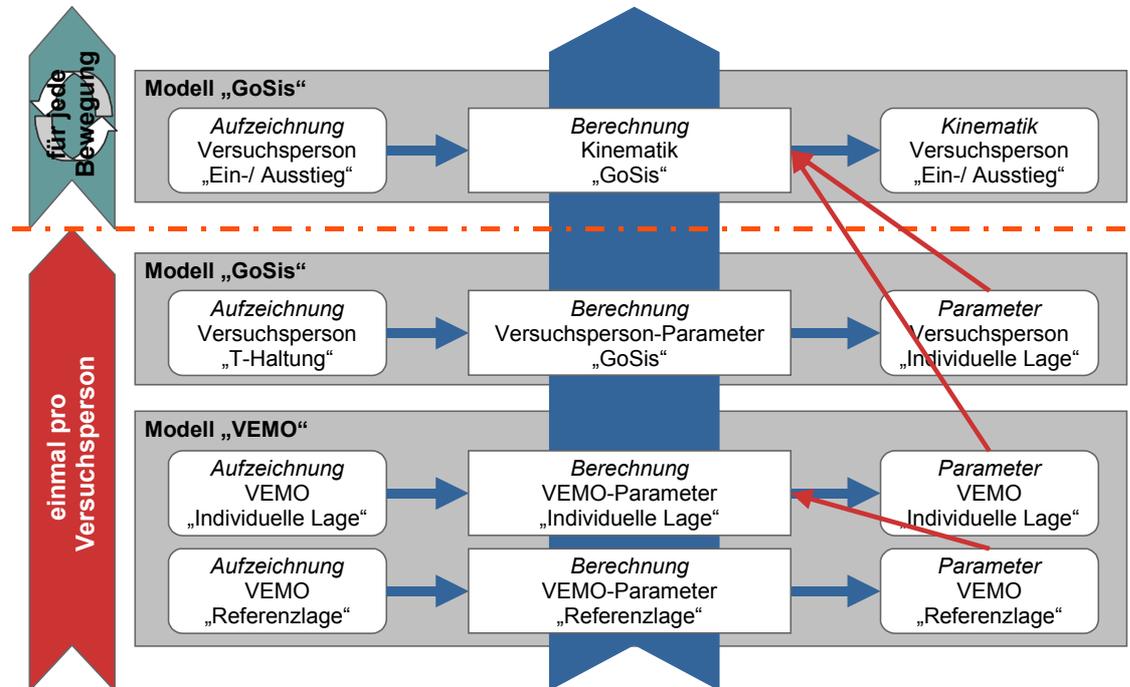


Abb. 36: Arbeitsablauf bei der Modellierung

Im ersten Teil der Modellierung erfolgt eine Anpassung der allgemeinen Modelle von „Golem“, „GoSis“ und des VEMO an die Versuchsverhältnisse. Die dabei berechneten Parameter, die über die Einstiegsversuche unverändert bleiben, werden in der Parameterdatei gespeichert und können bei den nachfolgenden Berechnungen des zweiten Teils abgerufen werden.

3.5 Datenfluss

Von der Bewegungsaufzeichnung bis zur Bewegungsanalyse durchlaufen die Daten vier Verarbeitungsschritte, die im Folgenden beschrieben werden.

Nach der **Bewegungsaufzeichnung** (Schritt 1) wird aus den unvollständigen und teilweise fehlerhaften Daten in der **Datenvorbereitung** (Schritt 2) die vollständige Bewegung der kinematischen Struktur von „Gosis“ berechnet. Die Daten werden anschließend in der **Datenwandlung** (Schritt 3) für die Analyse angepasst. Der Schwerpunkt der **Analyse** (Schritt 4) liegt auf der Betrachtung der Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile*.

3.5.1 Datenaufzeichnung

Die Datenaufzeichnung hält sich im Wesentlichen an die in [Vicon 2002] beschriebene Standardvorgehensweise. Als Besonderheit wird vor den Einstiegsversuchen das VEMO in Referenz- und Individuallage aufgezeichnet (vgl. Kap. 3.3.4).

3.5.2 Datenvorbereitung

Die Datenvorbereitung umfasst alle mit der „Vicon“-Software durchgeführten Schritte der Datenbearbeitung.

Bei der Datenvorbereitung werden zunächst aus den 2D-Aufzeichnungen der einzelnen Kameras die Bewegungsbahnen der Marker im Raum rekonstruiert. Diese Daten werden anschließend in einem halbautomatischen Verfahren mit Hilfe des Programms „iQ“ vervollständigt, sofern erforderlich korrigiert und mit Namen versehen, so dass die Marker vom Modell den entsprechenden Körpersegmenten zugeordnet werden können.

Als nächstes wird in „Workstation“ die Bewegungssequenz in vier Bewegungsphasen unterteilt. Die Unterteilung ist für die spätere Normierung der Bewegungsphasen auf eine einheitliche Dauer erforderlich.

Die Unterteilung der Bewegungsphasen ist selbstverständlich von der Bewegungsstrategie abhängig. Die nachfolgende Festlegung der Bewegungsphasen bezieht sich auf die für die Analyse im Hauptversuch ausgewählte „Schlüpf“-Strategie mit Unterstrategie „Direktes Abstellen des linken Fußes auf der Fußstütze“ (Kap. 4.3, vgl. auch Kap. 3.1.2.2).

Definition der Bewegungsphasen

Die Einstiegsbewegung wird in vier nacheinander ablaufende Phasen unterteilt. Die Phasen sind so definiert, dass sie klar voneinander trennbar sind und streng sequenziell ablaufen:

Phase 1: Heben des rechten Beins ins Fahrzeug

Die erste Bewegungsphase beginnt mit dem Anheben der rechten Ferse vom Boden, um den rechten Fuß ins Fahrzeug zu heben. Der linke Fuß steht zu diesem Zeitpunkt auf der Standebene. Die erste Bewegungsphase endet mit dem Absetzen des rechten Fußes auf dem Fußraumboden (Abb. 37).

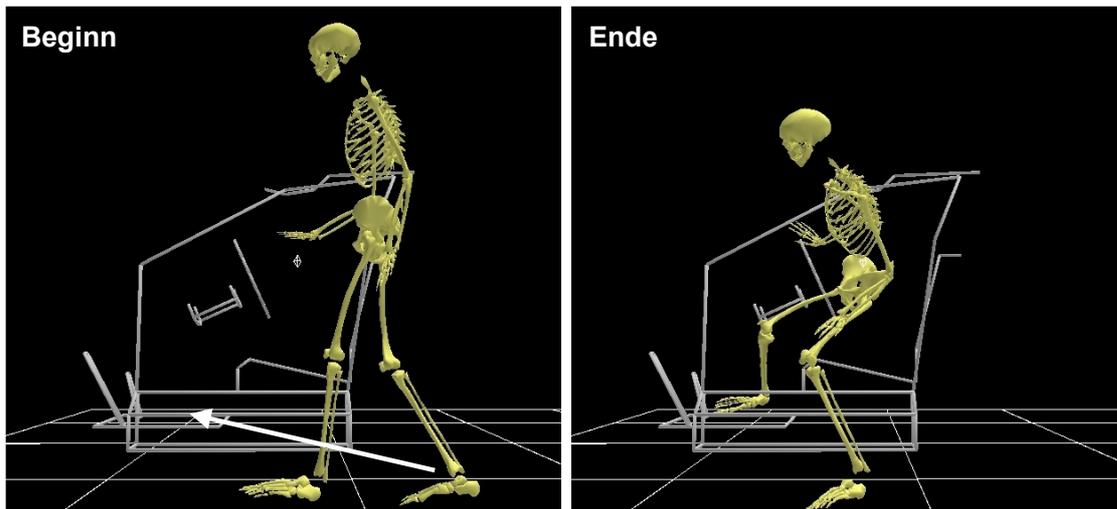


Abb. 37: Erste Bewegungsphase

Phase 2: Absenken des Rumpfs auf den Sitz

Die zweite Bewegungsphase schließt sich direkt an die erste an. Die Absenkbewegung des Rumpfs auf den Sitz wird dabei vollendet (Abb. 38).

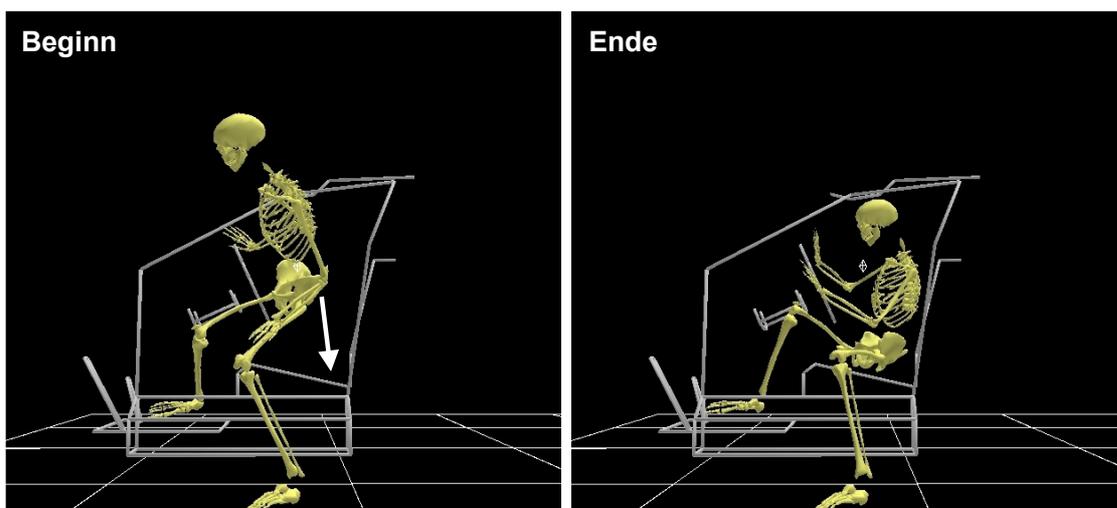


Abb. 38: Zweite Bewegungsphase

Phase 3: Heben des linken Beins ins Fahrzeug

Der Anfang der dritten Bewegungsphase ist festgelegt mit dem Beginn des Hebens des linken Fußes ins Fahrzeug. Die Phase ist beendet, sobald der linke Fuß auf der Fußstütze ruht (Abb. 39).

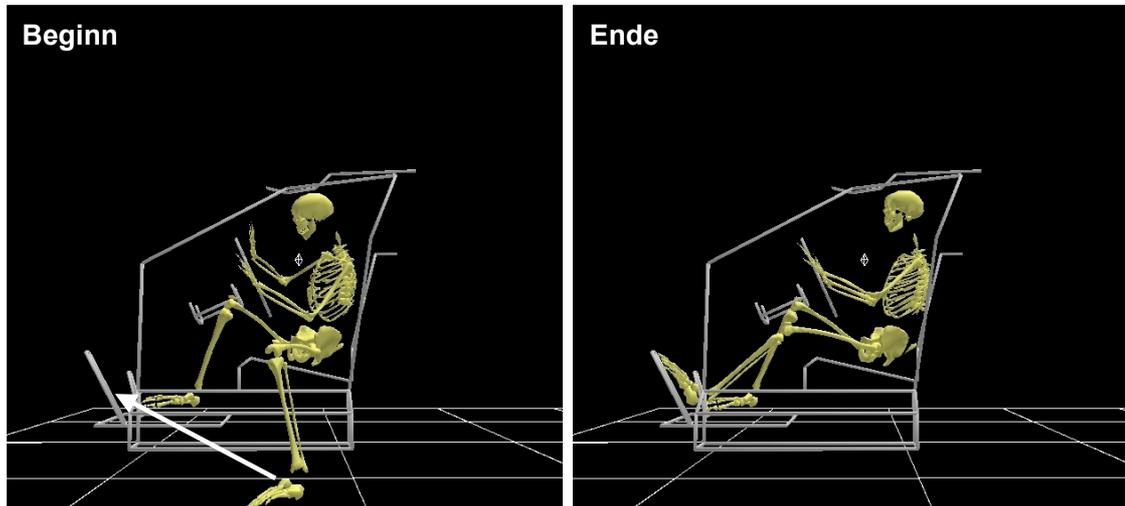


Abb. 39: Dritte Bewegungsphase

Phase 4: Abstellen des rechten Fußes auf dem Fahrpedal

Die vierte und letzte Bewegungsphase beinhaltet das Abstellen des rechten Fußes auf dem Fahrpedal. Sobald der rechte Fuß auf dem Fahrpedal zur Ruhe gekommen ist, ist die Einstiegsbewegung abgeschlossen (Abb. 40).

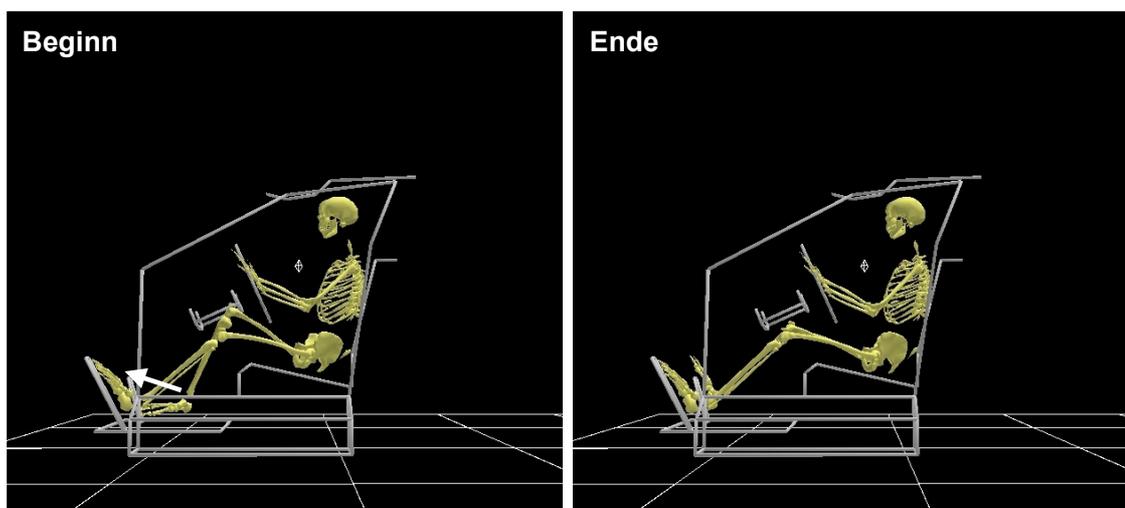


Abb. 40: Vierte Bewegungsphase

Anfang und Ende der Bewegungsphasen werden in „Workstation“ markiert und die Zeitpunkte für die spätere Normierung (vgl. Kap. 3.5.3) notiert.

Im letzten Schritt der Datenvorbereitung werden auf Basis der bereinigten Markerdaten mit Hilfe der Modelle „Golem“ und „Gosis“ die Bewegungen im Programm „Bodybuilder“ modelliert. Das beinhaltet u.a. die Berechnung der Bewegung der Gelenkzentren und die Ausgabe als virtuelle Marker in die Bewegungssequenz.

Eine Checkliste für den Arbeitsablauf bei der Datenvorbereitung befindet sich im Anhang.

3.5.3 Datenwandlung

Dieser Schritt dient der Umwandlung der Daten in eine der Analyse angepasste Form. Da der Fokus der Analyse auf den *führenden Körperteilen* und deren Bewegungsbahnen liegt (vgl. Kap. 2.2.2, Kap. 3.1.2.4), werden in der Datenverarbeitung die Trajektorien der *führenden Körperteile* als spezifische Messgrößen der Bewegung weiterverarbeitet.

Das Ziel der Datenwandlung ist es, die Bewegungsbahnen in eine Form zu bringen, die einen Vergleich bzw. eine Mittelung von Bewegungen von einer oder mehreren Person(en) erlaubt. Da dieser Prozessschritt sehr rechenintensiv ist, muss das Verfahren zur Bewältigung einer großen Datenmenge automatisierbar sein.

Die Datenwandlung, die im Folgenden als *lineares Morphen* bezeichnet wird, läuft in zwei Schritten ab:

- 1) Im ersten wird die Zeitkomponente bezogen auf die Gesamteinstiegsdauer in einheitslose Prozent umgerechnet. Zusätzlich werden die vier Bewegungsphasen zeitlich auf gemittelte Werte skaliert. Die Mittelwerte werden entweder aus den Bewegungen einer Person (bei Vergleich von Bewegungen einer Person) oder mehrerer Personen (bei Vergleich von Bewegungen mehrerer Personen) berechnet.
- 2) Die Mittelung von zwei oder mehreren Bewegungen zu einer neuen Bewegung wird durch eine lineare Approximierung und Parametrisierung ermöglicht.

Dazu werden zunächst die einzelnen Komponenten der Bewegungsbahnen stückweise linear approximiert. Die Anzahl der erforderlichen Geradensegmente ergibt sich aus der Komplexität der Trajektorie und der vorgegebenen Genauigkeit der Approximierung. Das Schema der Linearisierung für jedes Gelenk und jede Komponente ist für alle Einstiegsbewegungen innerhalb einer Strategie gleich.

Die *Linearisierungsschemata* sind so aufgebaut, dass die für die Bewegung charakteristischen Punkte, wie Anfangs-, End-, sowie Extremwertpunkte exakt wiedergegeben werden. Auf diese Weise ist sichergestellt, dass sich durch die Linearisierung keine Kollisionen ergeben.

In Abb. 41 ist beispielhaft die lineare Approximierung des rechten Sprunggelenks dargestellt. Für die Annäherung der x-, y- und z-Komponente werden jeweils fünf Geradensegmente verwendet. Die Anfangs- und Endwerte der Komponenten, sowie das Maximum der z-Komponente beim Heben des rechten Fußes über den Schweller werden exakt wiedergegeben.

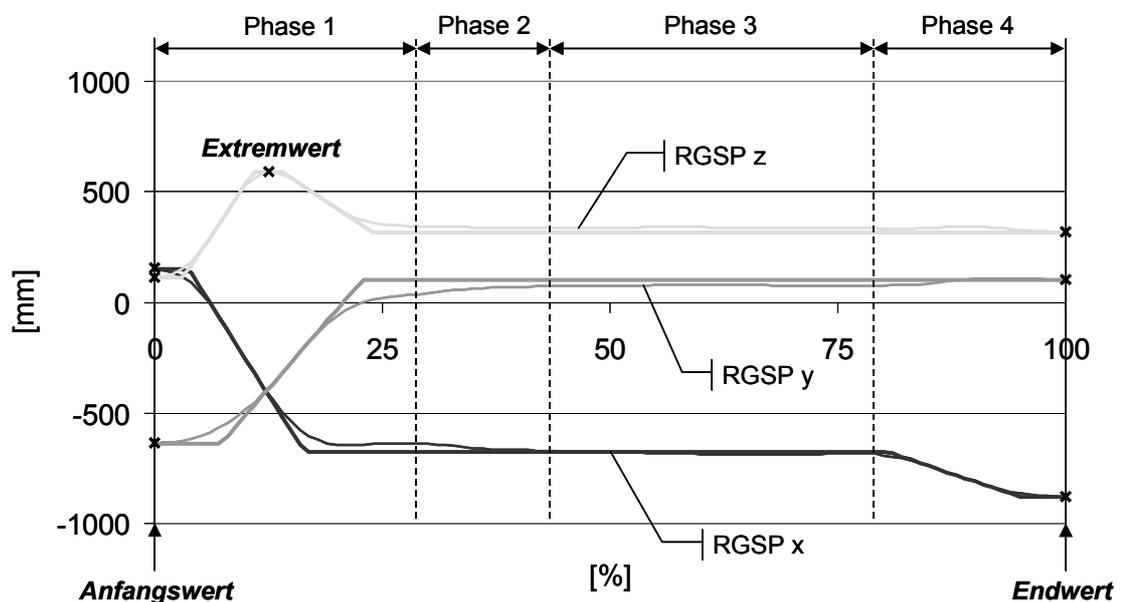


Abb. 41: Normierter und parametrisierter Verlauf der Trajektorie des rechten Sprunggelenks

Die Berechnung einer neuen Bewegung aus zwei oder mehreren Einstiegsvorgängen erfolgt über die Mittelung der Koeffizienten der Geradengleichungen der einzelnen Segmente. Damit wird erreicht, dass die Form der Kurve, im Gegensatz zur direkten Mittelung der Einzelwerte, erhalten bleibt, wie in Abb. 42 dargestellt.

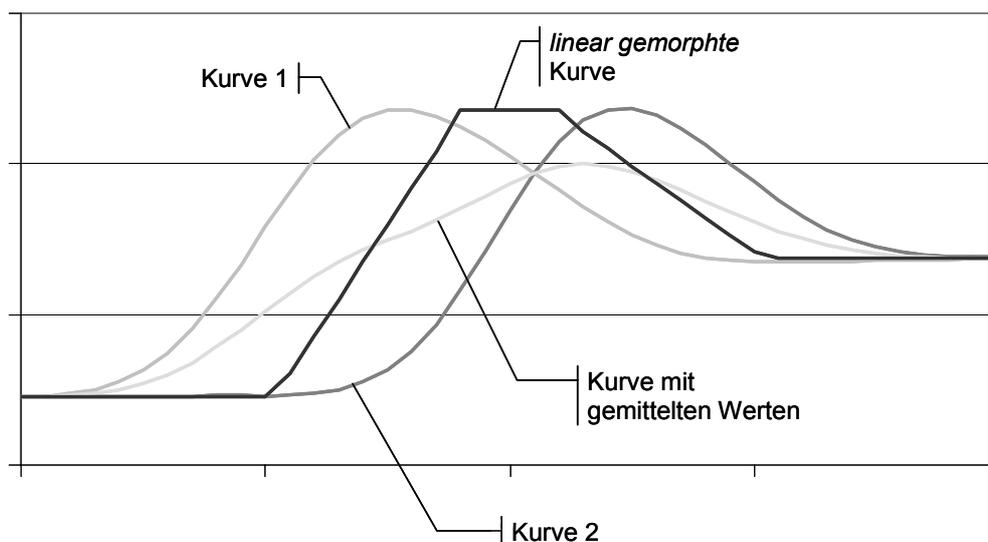


Abb. 42: Mittelung von Komponentenkurven

Die direkte Mittelung von Einzelwerten bei Kurven (Kurve 1 und Kurve 2) mit zeitlich versetzten Extrema führt zu einer „Abflachung“ der Kurve. Dies wird durch die parametrische Mittelung vermieden.

Die wesentliche Anwendung des *linearen Morphens* ist die Mittelung von mehreren gleichwertigen Bewegungen. In Voruntersuchungen zeigten die nacheinander ausgeführten Einstiegsbewegungen einer Versuchsperson in eine nicht veränderte Geometrie erhebliche Abweichungen (vgl. Kap. 4.3.5.4). Eine Vorauswahl von Bewegungen mit geringer intraindividuelle Abweichung ist nicht möglich, da die Abweichungen häufig in wechselnden Körperteilen und Bewegungsphasen auftreten. Zur Reduzierung der intraindividuellen Streuung wird deshalb in der Analyse mit dem Mittel aus drei gleichwertigen Einstiegsvorgängen (gleiche Person, gleiche Geometrie und in einem Zyklus aufgezeichnet) gearbeitet. Damit sichergestellt ist, dass auch mindestens drei verwertbare Datensätze vorliegen, wird bei jeder Einstiegs-konfiguration ein Zyklus von fünf Bewegungen aufgezeichnet.

3.5.4 Datenanalyse

Der letzte Schritt und das eigentliche Ziel des Prozesses ist die Datenanalyse.

Wie bereits in Kap. 3.1.2.4 ausgeführt, steht dabei die Analyse der Bewegungsbahnen der *aktiv führenden Körperteile* im Mittelpunkt. Diese liegen als stückweise linear approximierte Kurvenverläufe vor. Zusätzlich werden die Verläufe der Gelenkwinkel und -geschwindigkeiten, die für eine später geplante Korrelation mit dem Komfort von Interesse sein werden, sowie die Abstände von Körperteilen zur Einstiegsgeometrie berechnet.

Die zentrale Frage der Analyse lautet:

Wie wirken sich Änderungen der Einstiegsgeometrie auf die Bewegung aus?

Im Rahmen der Arbeit werden dabei folgende Teilaspekte betrachtet (Kap. 4.3):

- Wie wirken sich Veränderung ausgewählter Geometrieparameter auf die Bewegung aus? Welche Körperteile sind von den Veränderungen betroffen?
- Können Bewegungen durch Interpolation bzw. Kombination berechnet werden?

Für die Untersuchung werden aus den Verläufen der *aktiv führenden Körperteile* spezielle Punkte ausgewählt, die für die jeweilige Bewegungsbahn charakteristisch sind. *Charakteristische Punkte* der Bewegungsbahnen sind die Anfangs- und Endpunkte, sowie Punkte mit Extremwerten.

3.6 Versuchsplanung

Die entwickelte Analysemethode soll dazu dienen, die Auswirkungen von Veränderungen an der Einstiegsgeometrie auf die Bewegung von Versuchspersonen zu untersuchen. Der Versuch umfasst entsprechend versuchspersonen- und geometriespezifische unabhängige Variablen.

Für die geplante Reihenuntersuchung wird es entscheidend sein, die Zahl der unabhängigen Variablen aus Gründen des Untersuchungsumfangs möglichst klein zu halten, ohne gleichzeitig Gefahr zu laufen, die Aussagekraft des Ergebnisses zu stark einzuschränken.

3.6.1 Auswahl der Geometrievariablen

Die Einstiegsgeometrie lässt sich innerhalb des Bereichs, der durch die BMW-Produktpalette aufgespannt wird, beliebig verstellen. Die wesentlichen, den Einstieg beeinflussenden Bauteile sind A-Säule, B-Säule, Schweller, Dach und Sitz. Zudem kann durch Veränderung der Zuordnung von Standebene zu Sitz, Pedalerie und Lenkrad der Fahrzeugcharakter von Sportwagen über Limousine zu SUV variiert werden, was wiederum die Einstiegsbewegung beeinflusst.

Bezüglich der Einstiegsgeometrie werden folgende Größen verändert:

- Lage der A-Säule in x-Richtung
- Lage der B-Säule in x-Richtung
- Breite des Schwellers
- Lage der Schwelleraußenkante in y-Richtung (Abstand zu Sitz)
- Dach in z-Richtung
- Dach in y-Richtung

Diese Größen bieten den Vorteil, dass sie

- den größten Einfluss auf den Einstiegscomfort haben [BMW 2000] und
- in „fühlbaren“ Dimensionen, d.h. mindestens um das Zweifache der intraindividuellen Streuung (vgl. auch Kap. 4.3.5.4), symmetrisch zu einer Basis-konfiguration verändert werden können.

Zunächst soll nur eine Fahrzeugklasse untersucht werden, bevorzugt die mittlere Klasse der Limousinen. Das bedeutet, dass die Zuordnung von Standebene, Sitz, Pedalerie und Lenkrad bei den Versuchen nicht verändert wird. Bei der Variation der Einstiegsgeometrien sollte während der Versuche jeweils nur eine Variable verändert werden (z.B. die Schwellerhöhe). Damit lässt sich später eine bei der Analyse ermittelte Bewegungsänderung – abgesehen von der intraindividuellen Streuung – eindeutig auf die Geometrieänderung zurückführen. Pro Einstiegsvariable sollten zwei Geometrielagen untersucht werden, die symmetrisch zu einer sog. Basiskonfiguration liegen. Die maximal möglichen Verstellwege des Modells sollten zunächst weitestgehend ausgenutzt werden.

Auf Basis dieser Vorschläge werden für den Versuch die in Abb. 43 dargestellten sechs Variationen verwendet, so dass sich mit der Basiskonfiguration insgesamt 13 Versuchskonfigurationen des VEMO ergeben:

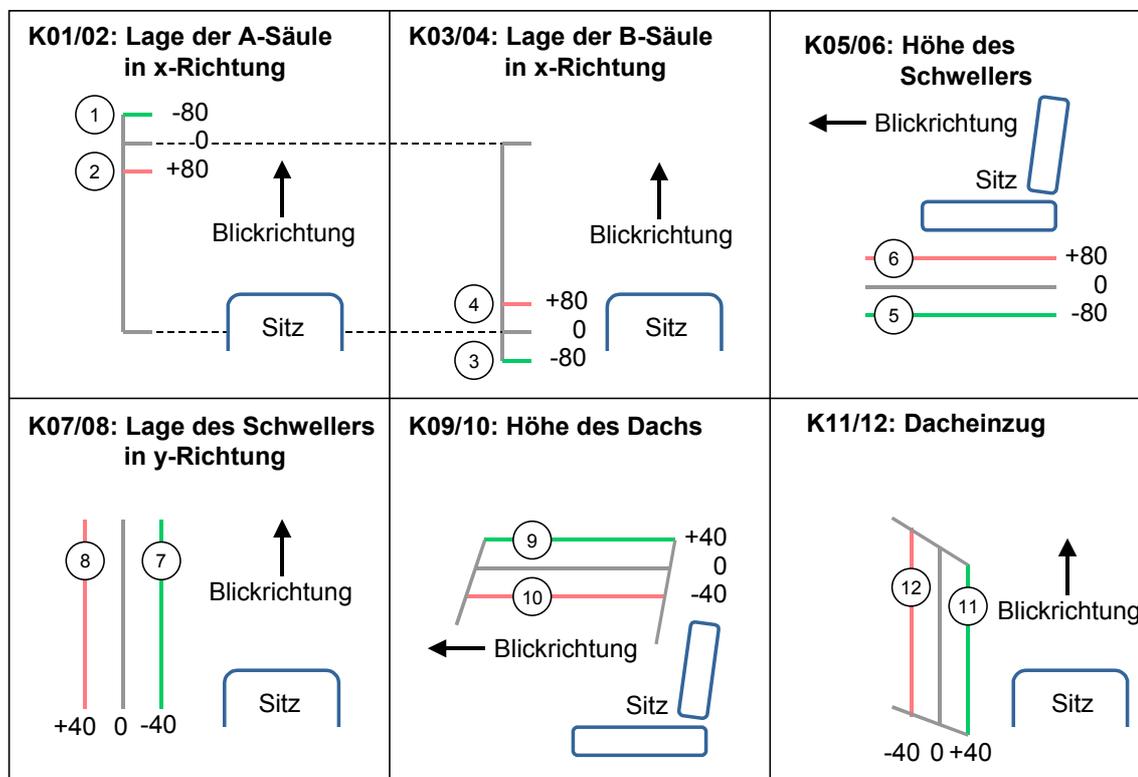


Abb. 43: Versuchskonfigurationen des VEMO

3.6.2 Auswahl der Versuchspersonen

Bei den Versuchspersonen ist zu erwarten, dass im Wesentlichen die Faktoren Körperhöhe, Korpulenz und Beweglichkeit einen Einfluss auf die Einstiegsbewegung haben. In der Vorstudie wurde zudem herausgefunden, dass die Versuchspersonen mit verschiedenen Strategien einsteigen, was zu grundsätzlich verschiedenen Bewegungen führt.

Um den Untersuchungsumfang überschaubar zu halten, sollte bei der Auswahl der Versuchspersonen nur eine unabhängige Variable berücksichtigt werden. Bezüglich der anderen unabhängigen Variablen sollten die Versuchspersonen ähnlich sein.

Im Versuch soll deshalb mit Versuchspersonengruppen gearbeitet werden, die sich im Wesentlichen nur in der Körperhöhe unterscheiden und die die bei BMW übliche Nutzerpopulation (Frau 5p Körperhöhe bis Mann 95p Körperhöhe) abdecken. Es bietet

sich an, mit Versuchspersonengruppen zu arbeiten, die entsprechend der in Kap. 3.1.2.2 vorgenommenen Einteilung klassifiziert werden.

Zunächst sollen folgende drei Versuchspersonengruppen untersucht werden:

- kleine Frauen mit einer Körperhöhe von $165\text{cm} \pm 5\text{cm}$
- mittelgroße Männer mit einer Körperhöhe von $175\text{cm} \pm 5\text{cm}$
- große Männer mit einer Körperhöhe von $190\text{cm} \pm 5\text{cm}$

Bezüglich der übrigen unabhängigen Variablen (Korpulenz, Beweglichkeit etc.) sollten die Versuchspersonen im mittleren Bereich liegen. Entsprechend der Ergebnisse der Vorstudie wird vorgeschlagen, für die Versuche nur Personen heranzuziehen, die nach der „Schlüpf“-Strategie verbunden mit Unterstrategie „Typ 6“ einsteigen. Insgesamt sollten pro Versuchspersonenklasse mindestens fünf bis zehn Personen untersucht werden, um eine statistische Signifikanz nachweisen zu können.

3.6.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wird in sieben Schritte unterteilt:

- 1) Als erstes wird der Versuchsaufbau für den Versuch vorbereitet. Das betrifft in erster Linie das Kamerasystem, das entsprechend der in Kap. 3.3.3 beschriebenen Vorgehensweise kalibriert wird.
- 2) Die Anwesenheit der Versuchsperson ist erst ab dem zweiten Schritt erforderlich. Die Versuchsperson wird in die Versuchsreihe eingewiesen und bzgl. allgemeiner Daten wie Körperhöhe, Gewicht und Fahrgewohnheiten befragt. Anschließend stellt die Versuchsperson den Sitz und das Lenkrad nach ihren Bedürfnissen ein und macht sich mit dem Versuchsaufbau durch mehrfaches Ein- und Aussteigen vertraut.

Alternativ dazu kann die Position des Sitzes und Lenkrads vorgegeben werden. Die der Versuchspersonengruppe entsprechende wahrscheinlichste Position kann mittels Simulation mit „RAMSIS“ vorher bestimmt werden. Das hat den Vorteil, dass innerhalb einer Versuchspersonengruppe die Endposition der Hüfte und Hände einheitlich ist.

- 3) Nachdem die Versuchsperson den „Motion Capture“-Anzug angezogen hat, werden die für die Bewegungsmodellierung erforderlichen Maße aufgenommen.

- 4) Die Versuchsperson wird anschließend mit den Markern versehen und einmalig in T-Kalibrierhaltung und mit „Range-of-Motion“-Bewegung aufgezeichnet.
- 5) Vor der Aufzeichnung der Einstiegsbewegungen wird die Versuchsperson angewiesen, zur Gewöhnung an die Einstiegsverhältnisse etwa drei bis fünfmal ein- und auszustiegen. Durch den Trainingseffekt soll sich die intraindividuelle Streuung auf einen konstanten und möglichst kleinen Betrag einpendeln (vgl. Kap. 4.3.5.4).
- 6) Die Einstiegsbewegungen zu einer Geometrieconfiguration werden in einem Zyklus von mindestens fünf Bewegungen aufgezeichnet. Zum Abschluss eines Zyklus wird das Diskomfortempfinden der Versuchsperson bei der Einstiegsbewegung abgefragt (zum Diskomfortfragebogen siehe Kap. 4.1.2).

Danach wird die nächste Einstiegsconfiguration eingestellt. Der sechste Schritt wird für alle zu untersuchenden Einstiegsconfigurationen wiederholt.

Die Checkliste für den Versuchsablauf befindet sich im Anhang.

3.6.4 Versuchsauswertung

Die Bedeutung der *führenden Körperteile* im Rahmen dieser Arbeit wurde bereits mehrfach erläutert. In der Simulation sollen, ausgehend von den geometrischen Randbedingungen die Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* berechnet werden. Ausgangspunkt dieser Berechnung wird die Lage der *führenden Körperteile* zu bestimmten Zeitpunkten der Bewegung sein. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Anfangs- und Endpunkte und die Punkte, an denen sich die Bewegungsrichtung ändert. Diese *charakteristischen Punkte werden* für die Analyse herangezogen.

Zusätzlich werden die minimalen Abstände der *führenden Körperteile* zu einstiegsgrenzenden Geometrien analysiert. Folgende Werte werden bereits im „Vicon“-Modell berechnet und stehen für eine Analyse zur Verfügung (Tab. 7):

Tab. 7: Abstände von führenden Körperteilen zu Einstiegsgeometrien

Führendes Körperteil	Abstand zu Einstiegsgeometrie
rechtes und linkes Sprunggelenk	Schweller außen, oben und innen
rechte und linke Fußspitze	Schweller außen, oben und innen A-Säule
rechtes und linkes Sprunggelenk	Schweller außen, oben und innen
rechtes und linkes Hüftgelenk	B-Säule
rechtes Schultergelenk	Dach
Kopfspitze	Dach

Bei jedem Versuchszyklus werden, soweit es die Datenqualität zulässt, die letzten drei aufgezeichneten Bewegungen für die Analyse verwendet. Aus diesen wird eine mittlere Bewegung berechnet und werden die resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen analysiert.

4 Validierung der Methode

Die Validierung der in Kap. 3 beschriebenen Methode zur quantitativen Analyse der Einstiegsbewegung erfolgt in zwei Schritten:

- 1) Zunächst werden zwei Vorversuche durchgeführt, die das „Variable Ein- und Ausstiegsmodell“ (Kap. 4.1) und das Bewegungsmesssystem (Kap. 4.2) untersuchen.
- 2) Anschließend soll im Hauptversuch die gesamte Methode in einer exemplarischen Untersuchung angewandt werden (Kap. 4.3). In erster Linie soll der Versuchsablauf und die Vorgehensweise bei der Datenverarbeitung und Analyse bestätigt werden. Zusätzlich sollen erste Erkenntnisse zum Einstiegsverhalten gewonnen werden.

4.1 Voruntersuchung zur subjektiven Beurteilung des VEMO (Vorversuch 1)

In einer Voruntersuchung wurde die Empfindung der Versuchspersonen beim Einsteigen in das VEMO untersucht. Besonderer Augenmerk lag auf den Bereichen, die stark vereinfacht (z.B. der Einstiegsflansch) oder nicht exakt (z.B. die Lenkradlage) dargestellt sind.

Der Versuch soll nachweisen, dass Diskomfortbeurteilungen vom VEMO auf reale Fahrzeuge übertragbar sind. Dies ist die Voraussetzung dafür, dass die Ergebnisse für die Umsetzung einer Diskomfortbewertung in der Simulation übernommen werden können.

4.1.1 Vorgehensweise

Zur Untersuchung der Übertragbarkeit der subjektiven Bewertung der Einstiegsverhältnisse am VEMO bewerteten neun Versuchspersonen die Einstiegsverhältnisse zuerst am VEMO und anschließend an einem realen Fahrzeug. Das VEMO wird so eingestellt, dass die Einstiegsverhältnisse soweit als möglich denen der realen Fahrzeuge entsprechen. Mit einer Limousine der 3er-Reihe (E46/4), dem Z3 und X5 wurde je ein Fahrzeug aus der Klasse der Limousinen, der Sportwagen und der SUV untersucht.

Für die Untersuchung wurden drei sehr kleine Frauen (etwa 5. Perzentil), drei mittelgroße Männer (etwa 50. Perzentil) und drei sehr große Männer (etwa 95. Perzentil) herangezogen.

4.1.2 Diskomfortfragebogen zur Beurteilung der Einstiegsverhältnisse

Zur Bewertung der Einstiegsverhältnisse wurde ein Fragebogen entwickelt. Die Fragen sind so formuliert, dass – analog der Haltungsbewertung nach Corlett und Bishop [Corlett 1976] – einzelne Bereiche des Körpers, wie z.B. das rechte Bein, zu bewerten sind. Zusätzlich beschränken sich die Fragen auf eine bestimmte Bewegungsphase, z.B. auf das Heben über den Schweller.

Helander und Zhang u.a. haben ausgeführt, dass es wesentlich einfacher ist, Diskomfort mit physikalischen Eigenschaften in Verbindung zu bringen als Komfort [Helander 1997]. Dies ist im Fragebogen so berücksichtigt, dass die Versuchsperson beurteilen soll, ob sie bei der Bewegung eine Behinderung festgestellt hat. Ist dies nicht der Fall, wird dies als ein Nichtvorhandensein von Diskomfort gewertet [Vink 2002].

Für die Umsetzung einer Diskomfortbewertung soll aus kinematischen Größen, z.B. den Körperwinkeln, auf den Diskomfort der simulierten Bewegung geschlossen werden. Denkbar ist beispielsweise, dass aus dem minimalen Kniewinkel und der maximalen Höhe beim Heben des rechten Fußes ins Fahrzeug der Diskomfort für das Bein abgeleitet wird.

Folgende Einstiegsbereiche werden mit dem Fragebogen abgefragt:

- Tür (Breite)
- Schweller (Außenkante, Höhe, Wannentiefe)
- A-Säule (Lage in x)
- Sitz (Höhe, Form der Sitzfläche und Sitzlehne)
- Dach (Höhe)
- Pedalerie (Freiraum für Füße beim Einstieg)
- Lenkrad und Lenksäulenverkleidung (Freiraum für Beine beim Einstieg)

Der Fragebogen ist im Anhang aufgeführt.

Für die möglichen Antworten wird eine fünfstufige, eindimensionale Antwortskala vorgegeben (Abb. 44):



Abb. 44: Fünfstufige Antwortskala

Die Versuchspersonen wurden ausdrücklich darauf hingewiesen, bei der Beurteilung des jeweiligen Fahrzeugs bzw. der jeweiligen Konfiguration den Fahrzeugtyp (Limousine, SUV und Sportwagen) zu berücksichtigen. In die Bewertung sollte also die Erwartungshaltung der Versuchspersonen in Bezug auf den Einstiegskomfort einfließen. Das bedeutet, dass z.B. eine niedrige Sitzposition in einem Sportwagen erwartet und eine entsprechende Einschränkung des Einstiegskomforts eher in Kauf genommen wird. Die gleiche Sitzposition wäre in einer Limousine unangebracht und würde zu einer negativeren Bewertung führen.

Abb. 45 zeigt den Versuchsaufbau.



Abb. 45: Bewertung der Einstiegsverhältnisse an einem realen Fahrzeug und am VEMO

4.1.3 Ergebnisse

Zunächst wird die Übereinstimmung der Diskomfortbewertung betrachtet. Für die Auswertung wird die Anzahl der um mindestens zwei Stufen differierenden Bewertungen ermittelt. Dieser Vorgabe liegt die Hypothese zugrunde, dass eine Abweichung um eine Stufe im Bereich der intra- und interindividuellen Streuung liegt. Erst bei einer Abweichung von zwei Stufen wird von einem Geometrieinfluss ausgegangen.

Die Auswertung über alle Versuchspersonen ergibt für die 3er-Limousine für alle Bereiche eine Übereinstimmung von über 80% (vgl. Tab. 8). Das war auch zu erwarten, da die 3er-Limousine das Referenzfahrzeug des VEMO darstellt. Das bedeutet, dass Bereiche, die nicht veränderlich sind, wie z.B. die Höhe und Neigung des Lenkrads, in der Lage der 3er-Limousine verbaut sind. Zudem basieren die im VEMO fix verbauten Bauteile wie Instrumententafel, Mittelkonsole und Sitz auf Geometrien der 3er-Limousine.

Tab. 8: Übereinstimmung der Bewertungen bei Limousine, Sportwagen und SUV

	Limousine	Sportwagen	SUV
Höhe Schweller	89%	89%	100%
Schweller außen	100%	89%	78%
Breite Schweller	89%	100%	100%
Tiefe Wanne	89%	100%	100%
A-Säule unten	100%	100%	100%
Dach	100%	89%	89%
Pedalerie	89%	100%	89%
Lenkrad	89%	56%	78%
Sitz	100%	89%	100%
Durchschnitt	94%	91%	94%

Die Bewertung des Z3 spiegelt vor allem die deutliche Abweichung im Bereich des Lenkrads und der Lenksäulenverkleidung wider. Die Übereinstimmung liegt nur bei 56%. Die differierenden Bewertungen sind auf die abweichende Neigung und Höhe des Lenkrads, sowie auf den größeren Lenkraddurchmesser im VEMO zurückzuführen.

Ebenso wie beim Z3 wird beim Vergleich in der SUV-Klasse der Lenkradbereich deutlich abweichend bewertet. Ein weiterer Bereich mit einer geringen Übereinstimmung von unter 80% ist der Schweller außen. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass die Kontur des Schwellers im VEMO vereinfacht dargestellt ist. Beim Einsteigen kann es am Unterschenkel bei Kontakt statt zu einer Linienberührung zu einer flächigen und damit weniger deutlich spürbaren Berührung kommen.

Insgesamt ist die Übereinstimmung hoch. Sie liegt durchschnittlich bei über 90%. Die Genauigkeit des Modells bei der Einhaltung der Vorgaben sind zwar gegeben, jedoch präsentiert sich das VEMO als eine eindeutig abstrakte Variante einer realen Einstiegsgeometrie. Die für den Einstiegsvorgang bestimmenden Geometrien erfüllen aber offensichtlich die ihnen zugeordneten Eigenschaften, so dass am VEMO eine realistische Beurteilung möglich wird. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der Diskomfortbewertung ist somit gegeben. Eine im Bereich der Einstiegsöffnung durch die Segmentierung befürchtete abweichende Bewertung war nicht festzustellen. Die auftretenden Unterschiede sind auf modellspezifische Abweichungen in der Darstellung (v.a. im Bereich des Lenkrads) zurückzuführen. Die größte Übereinstimmung ergab sich für die 3er-Limousine und den X5 mit durchschnittlich 94%, die geringste für den Z3 mit 91%.

Die Auswertung nach den drei Versuchspersonenklassen ergab bei den sehr kleinen Frauen die geringste, bei den sehr großen Männern die größte Übereinstimmung. Die Erklärung hierfür ist, dass bei den kleinen Frauen durch ihre sehr weit vorne liegende Sitzposition die Lenkradposition einen größeren Einfluss auf den Einstiegskomfort hat. Die vom realen Fahrzeug abweichend dargestellten Bereiche empfinden deshalb die kleinen Frauen am deutlichsten.

4.1.4 Sonstige Ergebnisse

Ein weiteres interessantes Ergebnis liefert die Auswertung der absoluten Bewertungen der drei realen Fahrzeuge. So wird bei der 3er-Limousine der große Abstand des Schwellers zum Sitz am meisten bemängelt (33%), gefolgt von der zu niedrigen Höhe des Sitzes (25%) und dem Lenkrad (22%). Der Hauptkritikpunkt am X5 ist mit 36% das Lenkrad. Der Z3, das faktisch von den Einstiegsmaßen ungünstigste der drei Fahrzeuge, wird bezüglich Lenkrad (39%), Dach (28%) und Schwellerhöhe (22%) kritisiert (vgl. Abb. 46).

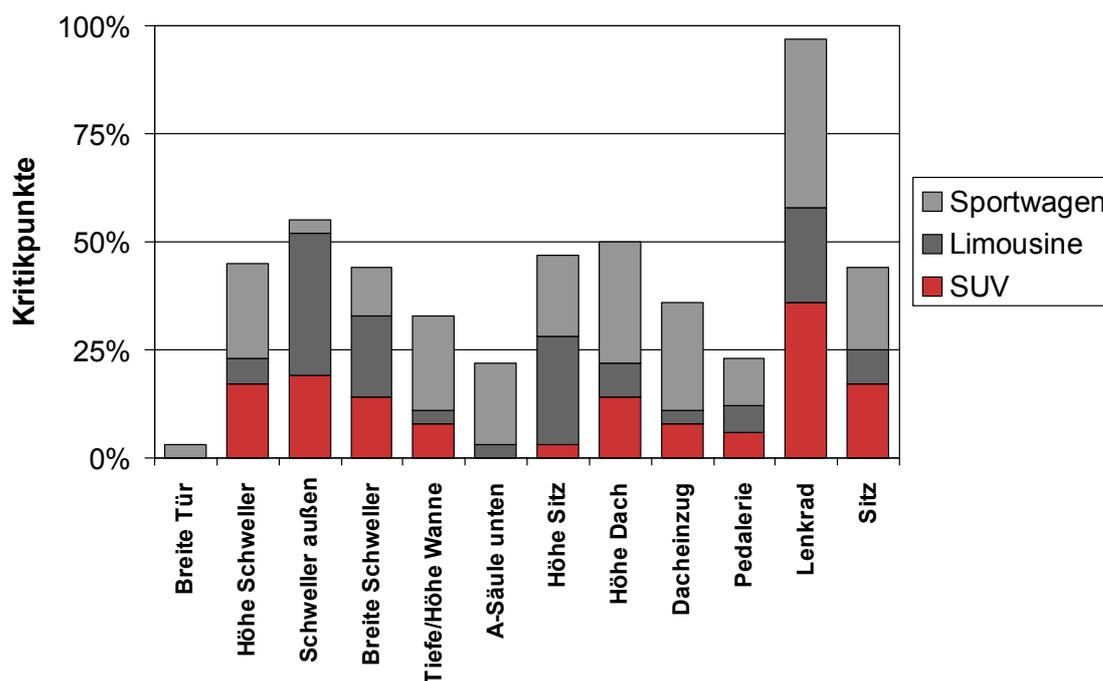


Abb. 46: Diskomfortbewertung der realen Fahrzeuge

Dargestellt sind die summierten Kritikpunkte (ein Punkt für Note 2, zwei Punkte für Note 3 etc.). Die Prozent beziehen sich auf die maximale Punktzahl für ein Fahrzeug.

Die Voruntersuchung bestätigt damit ein Ergebnis der Vorstudie, in der mit Abstand der größte Teil der Befragten das Lenkrad als das störendste Bauteil angaben. Als so gut wie gar nicht störend wurde im Vorversuch der Bereich der Tür bewertet. Der Versuch wurde allerdings mit komplett geöffneter Tür durchgeführt.

Der Versuch zeigte, dass der Fragebogen dazu geeignet ist, das Diskomfortempfinden der Versuchspersonen beim Einstieg abzufragen. Die Versuchspersonen attestierten eine klare Verständlichkeit der Fragen. Sie gaben ferner an, keine Schwierigkeiten mit der Differenzierung des Diskomfortempfindens nach Körperteilen und der Zuordnung zu der fünfstufigen Bewertungsskala gehabt zu haben. Es wird deshalb empfohlen, den Fragebogen in dieser Form für die Diskomfortbewertung in der Reihenuntersuchung zu verwenden.

Einstiegsstrategien

Bei der Auswahl der Versuchspersonen wurde als einziges Kriterium auf die Körperhöhe geachtet. Entsprechend heterogen waren die Versuchspersonen bezüglich ihrer Einstiegsstrategie. Fünf der Versuchspersonen stiegen nach der „Schlüpf“-Strategie ein, zwei nach der „Fädel“-Strategie und jeweils eine Versuchsperson nach der

„Plumps“- und „Hürden“-Strategie. Interessant war es zu beobachten, dass keine der Versuchspersonen im Laufe der Versuchsreihe die Einstiegsstrategie wechselte. Vermutlich waren die Unterschiede zwischen den untersuchten drei Fahrzeugklassen nicht groß genug, um einen Strategiewechsel zu bewirken.

Dies bekräftigt die Vermutung aus der Vorstudie (Kap. 3.1.2.2), dass ein Wechsel der Einstiegsstrategie nur durch extreme Änderungen der Einstiegsgeometrie, wie sie beispielsweise bei sehr engen Parklücken vorliegt, bewirkt wird. Es ist nicht zu erwarten, dass die im Hauptversuch (Kap. 4.3) geplanten Variationen des VEMO zu einem Wechsel der Einstiegsstrategie führen.

4.2 Fehlerabschätzung in der Prozesskette von der Bewegungsaufzeichnung bis zur Bewegungsmodellierung (Vorversuch 2)

In der Prozesskette von der Bewegungsaufzeichnung bis zur modellierten Bewegung können mehrere Fehlerquellen das Versuchsergebnis negativ beeinflussen. Die wesentlichen Fehlerquellen sind in nachfolgender Tab. 9 aufgeführt:

Tab. 9: Fehlerquellen der Methode

Prozessschritt	Fehlerquelle
Bewegungsaufzeichnung	Aufzeichnungs- und Rekonstruktionsfehler bei der Bestimmung der Lage der Marker (Messfehler) (1)
Modellierung	Vermessungsfehler, Platzierungsfehler der Marker, Algorithmusfehler (2)
Analyse	Parametrisierungsfehler (3)

Eine Abschätzung des Fehlers bei der Bewegungsaufzeichnung und der Modellierung wird in den folgenden Kapiteln vorgenommen. Auf den Fehler durch die Parametrisierung wird bei der Auswertung des Hauptversuchs in Kap. 4.3.5.3 eingegangen.

4.2.1 Abschätzung des Fehlers bei der Bewegungsaufzeichnung

Die aufgezeichneten und rekonstruierten 3D-Bewegungsbahnen der Marker sind mit einem Messfehler (1) behaftet. Dieser kann durch die Betrachtung zweier in fixem Abstand montierter Marker, die durch das Messvolumen geführt werden, abgeschätzt werden. Der konventionell mittels Abtastung ermittelte Abstand der Marker beträgt 132,0mm.

Die Auswertung ergibt, dass die Standardabweichung des berechneten Abstandes offensichtlich messvolumenabhängig ist: Die Standardabweichung beträgt im günstigsten Fall im Bereich über dem Sitz 0,8mm. Im Fußraum ergeben sich 0,9mm, über der Standebene sind es 1,6mm (Abb. 47).

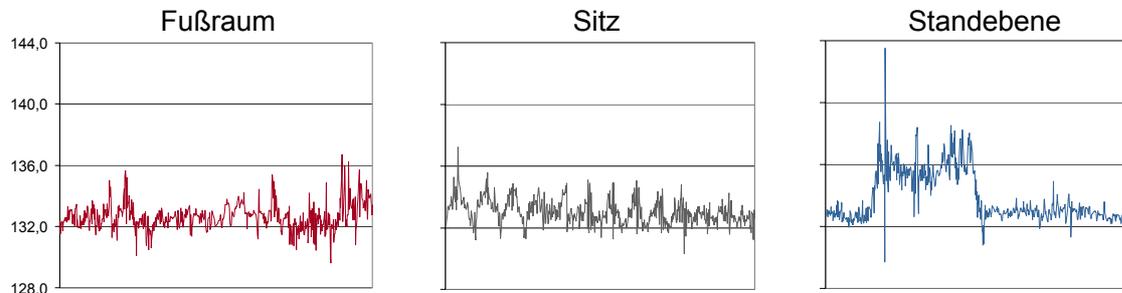


Abb. 47: Fehler bei der Aufzeichnung der Marker im Bereich Fußraum (links), Sitz (Mitte) und Standebene (rechts)

Durchschnittlich beträgt die Standardabweichung 1,2mm. Der Fehler durch die reine Messung der Marker (ohne Modellierung) ist also im Vergleich zu den weiteren Fehlerquellen (2, 3) vernachlässigbar (vgl. Kap. 4.2.2, Kap. 4.2.3).

Für die volumenabhängigen Unterschiede im Messfehler sind in erster Linie zwei Gründe verantwortlich:

- Eine große Anzahl an Kameras in einem kleinen Messvolumen führt zu einer genaueren Messung.
- Der Rekonstruktionsfehler fällt geringer aus, wenn die Bewegungsgeschwindigkeit des Messobjekts langsamer ist. Dies trifft für den Bereich innerhalb des Modells zu, da das Volumen dort verwinkelt ist.

4.2.2 Abschätzung des Fehlers bei der Modellierung der Versuchsperson

Die Abschätzung des Fehlers bei der Modellierung der Versuchsperson ist äußerst schwierig. Das liegt daran, dass der Gegenstand der Messung, nämlich die Gelenkzentren, nicht direkt zugänglich und messbar sind. Grundsätzlich sind – neben dem Messfehler von „Vicon“ – folgende Fehlerquellen zu beachten:

- 1) **Fehler des Kinematikmodells** (also des Skeletts): Die Kinematikberechnung basiert auf einem vereinfachten Modell des menschlichen Bewegungsapparats. Neben der Vereinfachung führt die Idealisierung der Bewegung im Modell dazu, dass in die resultierende Bewegung des Skeletts ein Fehler eingebracht wird. So

geht das Modell davon aus, dass die Segmente des Körpers in einem Punkt miteinander verbunden sind. Tatsächlich findet allerdings eine relative Bewegung zwischen Nachbarsegmenten statt. Weiter sind die Gelenke teilweise zur Vereinfachung mit reduzierten Freiheitsgraden (z.B. nur Flexion und Extension) modelliert.

- 2) **Markerfehler:** Die zweite Fehlerquelle ist die Ungenauigkeit bei der Platzierung der Marker an der Versuchsperson. Der potentielle Fehlerbeitrag ist abhängig von der Lage des Markers und dessen Aufgabe. Marker, mit denen direkt die Gelenkachsen bestimmt werden (wie am Knie, Sprung- oder Ellenbogengelenk), führen bei falscher Platzierung zu einem großen Fehler. Bei Markern, die nicht in Knochennähe angebracht werden, kann es zu einem Fehlereintrag durch die Relativbewegung des Markers auf dem Segment kommen.

4.2.2.1 Vorgehensweise

Zur Abschätzung des Fehlers bei der Modellierung wird anhand einer Bewegungsaufzeichnung mit einer Versuchsperson folgende exemplarische Überprüfung durchgeführt:

An der Versuchsperson werden neben den üblichen 45 Markern weitere, für die Modellierung nicht verwendete Marker angebracht, wobei diese Marker möglichst nahe an den Gelenkmittelpunkten angebracht werden, so dass sie einen möglichst konstanten Abstand zu den Gelenkmittelpunkten haben (also eine möglichst starre Verbindung, z.B. durch das Anbringen in Knochennähe).

Folgende Gelenke werden betrachtet:

- Halsgelenk
- Schultergelenke
- Hüftgelenke
- Kniegelenke
- Sprunggelenke

4.2.2.2 Ergebnis

Zur Auswertung wird die Abstandsänderung der Kontrollmarker zu den berechneten Gelenkzentren während des Einstiegsvorgangs berechnet.

Als Ergebnis erhält man eine durchschnittliche Abweichung von 8mm. Die größten Abweichungen traten beim rechten und linken Hüftgelenk mit 10mm und 16mm auf, die geringsten Abweichungen mit unter einem Millimeter ergaben sich für die Sprunggelenke (Abb. 48).

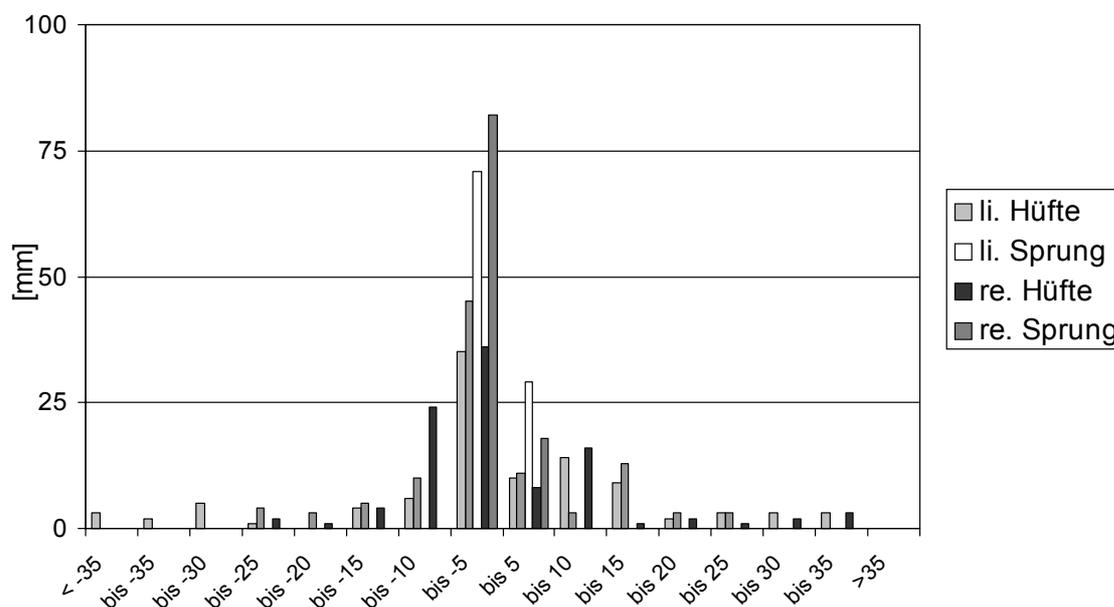


Abb. 48: Abweichungen der modellierten Gelenkpunkte von den Kontrollmarkern

In Abb. 48 sind aus Gründen der Übersichtlichkeit nur die Abweichung der Gelenke mit den geringsten (Sprunggelenke) und den größten Abweichungen (Hüftgelenke) dargestellt.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die durchschnittlichen Abweichungen mit unter 10mm auf einem niedrigen Niveau liegen. Das Ergebnis fällt noch besser aus, wenn berücksichtigt wird, dass die Kontrollmarker ihrerseits Fehlerquellen unterworfen sind: Insbesondere bei den Hüftgelenken kommt zum Tragen, dass die Kontrollmarker – anatomisch bedingt – mit etwa 140mm relativ weit vom Gelenkzentrum platziert waren (beim Sprunggelenk sind es dagegen maximal 40mm). Dazu kommt, dass die Marker gerade im Hüftbereich durch die verschiedenen Gewebeschichten stärker auf dem Oberschenkel verschoben werden, was in Kombination mit dem großen Abstand einen deutlichen Fehler bewirken kann.

Hervorzuheben ist noch ein weiterer Vorteil der Methode: Die Modellierung des kinematischen Modells erfolgt automatisch. Das bedeutet, dass die Qualität des

Messergebnisses anwenderbedingt nicht beeinflusst wird. Den größten Einfluss hat der Anwender bei der Platzierung der Marker. Dieser wird aber durch die sehr genaue Definition der Markersolllagen anhand von anatomischen Merkmalen minimiert.

4.2.3 Abschätzung des Fehlers bei der Modellierung der Einstiegsgeometrie

In einer weiteren Voruntersuchung wird der Fehler bei der Modellierung der Einstiegsgeometrie betrachtet. Von der Konzeption bis zum Einsatz für die Untersuchung der Einstiegsbewegung beeinflussen mehrere Fehlerquellen die Genauigkeit der Einstiegsgeometrie. Folgende Fehler sind zu unterscheiden:

- Der erste Fehler resultiert aus der Konzeption durch die Annäherung realer Einstiegsgeometrien durch vereinfachte Geometrieelemente. Beispielsweise ist die Einstiegsöffnung über fünf Geradensegmente angenähert.

In diese Kategorie fallen auch die Vereinfachungen der Geometrie, wie die einheitliche Lenkradhöhe und -neigung. Dieser Fehler wirkt sich aus, wenn reale Einstiegsgeometrien mit dem VEMO nachgestellt und beurteilt werden sollen. Die Dimension des Fehlers kann aus den CAD-Daten exakt ermittelt werden, wird aber aus Gründen der Vereinfachung bewusst in Kauf genommen.
- Ein weiterer Fehlerbeitrag entstand beim Aufbau des VEMO. Hier handelt es sich um reale Abweichungen der Einstiegsgeometrie gegenüber der im CAD vorgegebenen Solllagen. Laut Abtastung liegt der Fehler unter 3mm. Ebenso wie der Konzeptionsfehler kommt dieser Fehler nur bei der Untersuchung realer Einstiegsgeometrien zum Tragen, da diese direkt über die Skalen am Modell eingestellt werden.
- Für die Einstiegsversuche ist vor allem die dritte Fehlerquelle relevant, nämlich die Abweichung der modellierten Einstiegsgeometrie von der realen Einstiegsgeometrie des Versuchs. Die modellierte Einstiegsgeometrie wird z.B. benötigt, um Abstände von Körperteilen zu Geometrien analysieren zu können. Die Berechnung erfolgt anhand von direkt an der Geometrie angebrachten Markern. Die beiden ersten Fehler wirken sich also weder auf den Versuch noch auf die Auswertung aus.

Der Messfehler der Markerposition mit dem „Vicon“-System liegt unter einem Millimeter und kann vernachlässigt werden.

4.2.3.1 Vorgehensweise

Der Fehler bei der Modellierung des VEMO soll, analog zur Vorgehensweise bei der Abschätzung des Fehlers bei der Modellierung der Versuchsperson, über Kontrollmarker bestimmt werden.

Insgesamt werden 15 Kontrollmarker am VEMO angebracht. Aus dem Abstand der Kontrollmarker zu den berechneten Geometrien (Schweller, Einstiegsöffnung, Boden mit Fahrpedal und Fußstütze, Lenkrad und Dachverkleidung) wird auf den Fehler bei der Modellierung geschlossen.

Abb. 49 zeigt die realen, aufgezeichneten und die berechneten Marker des Modells aus dem Vorversuch. Die Kontrollmarker wurden so platziert, dass mit ihnen Abstände zu Flächen, z.B. der Außenfläche des Schwellers oder der Bodenfläche berechnet werden können.

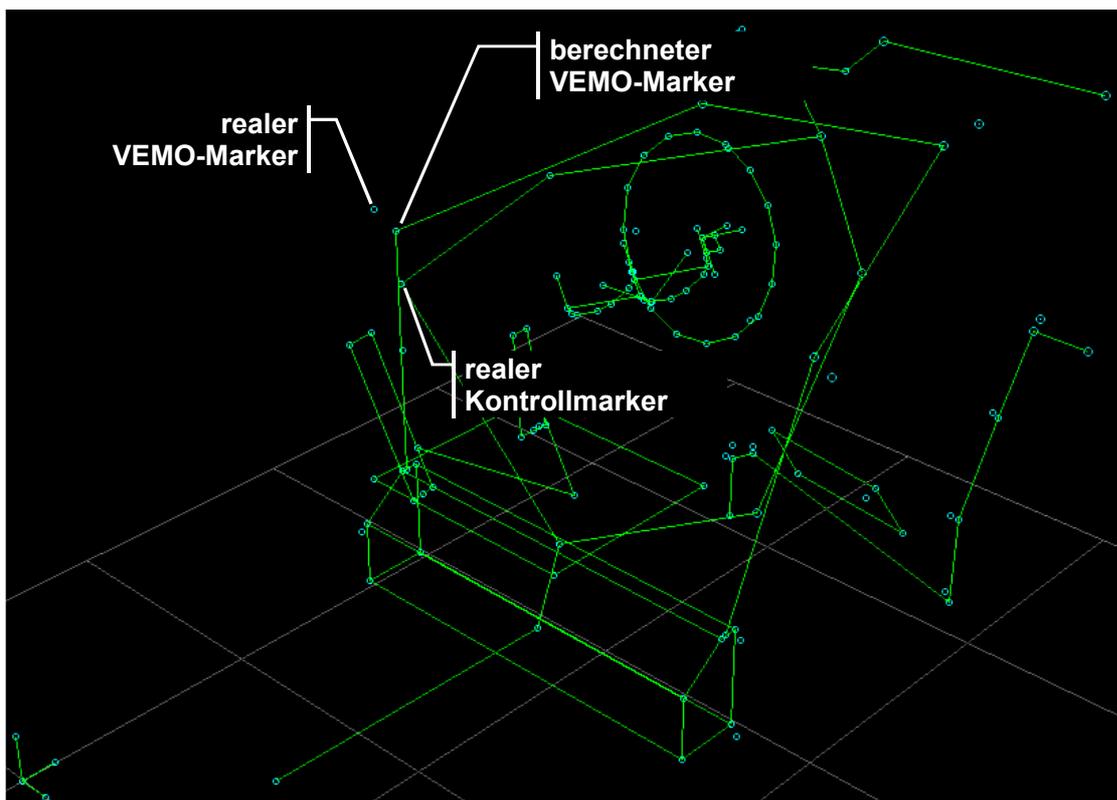


Abb. 49: VEMO mit realen und berechneten Markern

4.2.3.2 Ergebnis

Die im Vorversuch ermittelten Abweichungen sind in der nachfolgenden Tab. 10 aufgeführt:

Tab. 10: Abweichungen der modellierten VEMO-Geometrien

Bereich	VEMO-Geometrie	Abweichung
Einstieg	Schwellerhöhe	1mm
	Schwellerbreite	-4mm
	A-Säule unten	1mm
	A-Säule oben	-3mm
	Dach	4mm
	B-Säule unten	10mm
	B-Säule oben	1mm
Boden	Boden	-2mm
	Fahrpedal	1mm
	Fußstütze	2mm
Lenkrad	Lenksäulenverkleidung links	-4 mm
	Lenksäulenverkleidung unten	-7 mm
	Lenksäulenverkleidung rechts	4 mm
Dachverkleidung	Höhe der Dachverkleidung	6 mm

Die maximale Abweichung liegt bei 10mm. Durchschnittlich beträgt die Abweichung 4mm. Die überdurchschnittlich hohe Abweichung der unteren B-Säule ist darauf zurückzuführen, dass die Marker zur Bestimmung der Einstiegsöffnung nicht direkt am Säulendrehgelenk angebracht werden können. Ähnliches gilt für die Lenksäulenverkleidung, die aus den drei auf dem Lenkrad angebrachten Markern berechnet wird.

Bezogen auf den Verstellweg von 80mm beträgt die Abweichung weniger als 5%. Die Dimension liegt in der gleichen Größenordnung wie bei der Modellierung der Versuchsperson. Die Ergebnisse der quantitativen Analyse sind im Rahmen der beschriebenen Fehlerabschätzung zu interpretieren.

4.3 Exemplarische Untersuchung zur Validierung der Untersuchungsmethode (Hauptversuch)

Die in den vorausgehenden Kapiteln beschriebenen Vorversuche dienten in erster Linie dazu, einzelne Teile der Methode zur Bewegungsanalyse zu validieren. Im Hauptversuch soll nun die komplette Methode von der Bewegungsaufzeichnung bis zur Analyse getestet werden.

4.3.1 Versuchsziel

Im Mittelpunkt des Hauptversuchs steht die ganzheitliche Validierung der Methode zur Untersuchung der Einstiegsbewegung. Dabei kommt es in erster Linie darauf an zu zeigen, dass die Methode für die systematische Analyse der Einstiegsbewegung verwendet werden kann.

Die Ergebnisse sollen helfen, eine v.a. in Bezug auf die Anzahl der Versuchspersonen umfangreichere Untersuchung vorzubereiten. Im Mittelpunkt des Hauptversuchs stehen deshalb untersuchungsspezifische Faktoren wie der Untersuchungs- und Datenverarbeitungsaufwand und die bei der Analyse zu berücksichtigende Dimension der inter- und intraindividuellen Streuung.

Darüber hinaus sollen die ersten quantitativen Erkenntnisse von Einstiegsbewegungen helfen, die in Kap. 2.2.2 aufgestellten Hypothesen zu detaillieren und die Richtigkeit der gewonnenen Einsichten ähnlich einem Erkundungsexperiment (Bortz 1999) zu unterstreichen.

4.3.2 Versuchsplanung

Für die Validierung der Methode soll exemplarisch die Einstiegsbewegung eines mittelgroßen Mannes untersucht werden. Die Auswertung wird auf die Bewegung des Unterkörpers beschränkt. Die Vorgehensweise kann später für den Rumpf analog übernommen werden. Entsprechend werden für die Untersuchungen Geometrie-konfigurationen ausgewählt, die sich beim Einsteigen in erster Linie auf die Bewegung des Unterkörpers auswirken.

Zur Überprüfung wird der Versuch mit einem zweiten Probanden aus der gleichen Versuchspersonenklasse wiederholt, so dass die Ergebnisse verifiziert werden können. Zusätzlich sollen erste Aussagen zur interindividuellen Streuung abgeleitet werden.

In Tab. 11 und Tab. 12 sind die wesentlichen unabhängigen Variablen dargestellt. Die grau hinterlegten Felder illustrieren die für den Hauptversuch herangezogene Versuchskombination.

Tab. 11: Ausgewählte unabhängige Variablen der Versuchsperson

Versuchsperson	Körperhöhe	klein	mittel	groß	
	Proportion	Sitzzwerg	mittel	Sitzriese	
	Korpulenz	schlank	mittel	korpulent	
	Geschlecht	männlich		weiblich	
	Beweglichkeit	gering	mittel	groß	
	Einstiegstrategie	Fädel	Schlüpf	Plumps	Hürden

Tab. 12: Ausgewählte unabhängige Variablen der Einstiegsgeometrie

Fahrzeugklasse		Sportwagen	Limousine	SUV
Einstiegsgeometrie	Lage A-Säule in x	nah	mittel	weit
	Lage B-Säule in x	nah	mittel	weit
	Höhe Schweller	niedrig	mittel	hoch
			Basis- konfiguration	

4.3.3 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf hält sich an die in Kap. 3.6.3 beschriebene Vorgehensweise.

In einem zusätzlichen Versuch werden zur Abschätzung des intraindividuellen Fehlers fünf Einstiegszyklen mit unveränderter Geometrie aufgezeichnet (erster Teil des Hauptversuchs). Als Einstiegsgeometrie wird die Basiskonfiguration gewählt. Zur Simulation eines normalen Versuchsablaufs wird zwischen den Zyklen eine Pause eingelegt, wie sie typischerweise bei der Einstellung einer neuen Konfiguration auftritt. Die Untersuchung soll zeigen, ob durch eine größere Anzahl an Wiederholungen – entsprechend einer längeren Übungsphase – eine Reduzierung der intraindividuellen Streuung erreicht werden kann.

Im zweiten Teil des Hauptversuchs erfolgt die Aufzeichnung der Einstiegsbewegungen in die ausgewählten sieben Einstiegskonfigurationen.

4.3.4 Versuchsauswertung

Nach der Datenverarbeitung liegen die Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* als stückweise lineare Kurven vor. Da die für die Bewegungsaufzeichnung ausgewählten Konfigurationen hauptsächlich die Bewegung des Unterkörpers beeinflussen, werden in der Auswertung nur die Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* des Unterkörpers betrachtet.

In Abb. 50 und Abb. 51 sind exemplarisch die Bewegungsbahnen des rechten Sprunggelenks bei den sieben Einstiegskonfigurationen dargestellt. Als Orientierung ist in der Abbildung zusätzlich der Schweller in Basislage (K00) eingezeichnet.

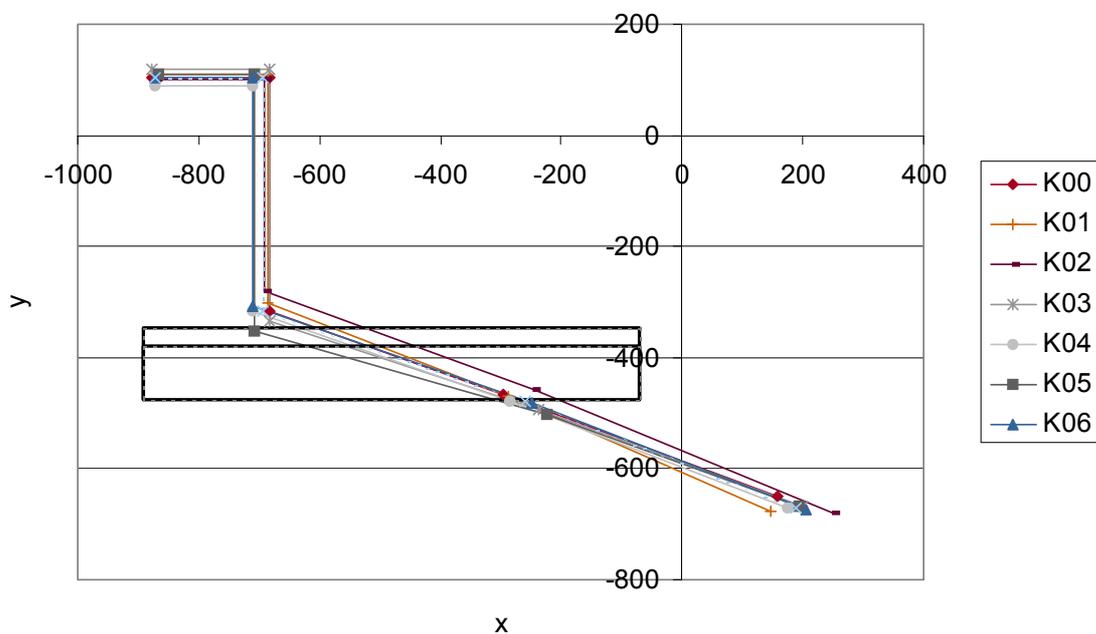


Abb. 50: Aufgezeichnete linear angenäherte Bewegungsbahnen des rechten Sprunggelenks (xy-Ansicht)

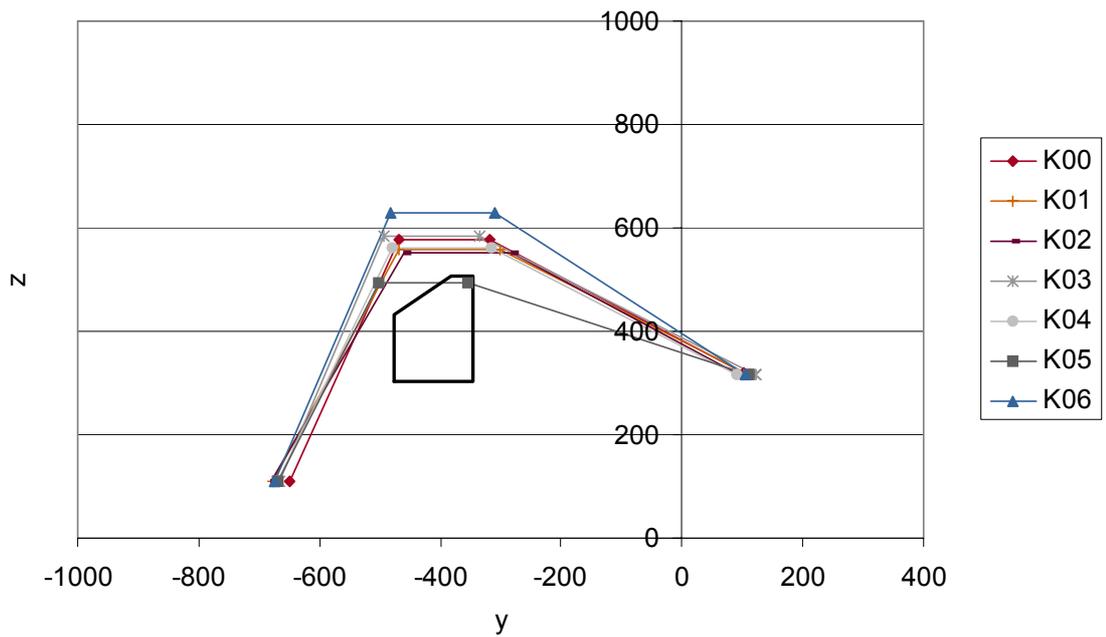


Abb. 51: Aufgezeichnete Bewegungsbahnen des rechten Sprunggelenks (xz-Ansicht)

Wie in Kap. 3.5.4 ausgeführt werden in der Analyse die *charakteristischen Punkte* der *aktiv führenden Körperteile* betrachtet. In Tab. 13 sind die entsprechenden Punkte für den Unterkörper aufgelistet.

Tab. 13: Analysepunkte der führenden Körperteile im Hauptversuch

führendes Körperteil⁶	Analysepunkt		Bemerkung
rechtes Sprunggelenk	Punkt 1	Anfangspunkt (x,y,z)	z-Komponente geführt
	Punkt 2	höchster Punkt (z)	
	Punkt 4	Zwischenpunkt (x)	x-, y- u. z-Komponente geführt
	Punkt 5	Endpunkt (x,y,z)	
rechtes Hüftgelenk	Punkt 1	Anfangspunkt (x,y,z)	z-Komponente geführt
	Punkt 3	vorderster Punkt (x,y)	x-, y- u. z-Komponente geführt
	Punkt 5	Endpunkt (x,y,z)	
linkes Hüftgelenk	Punkt 1	Anfangspunkt (x,y,z)	z-Komponente geführt
	Punkt 3	vorderster Punkt (x,y)	x-, y- u. z-Komponente geführt
	Punkt 4	Endpunkt (x,y,z)	
linkes Sprunggelenk	Punkt 1	Anfangspunkt (x,y,z)	z-Komponente geführt
	Punkt 4	höchster Punkt (x, z)	x-, y- u. z-Komponente geführt
	Punkt 5	Endpunkt (x,y,z)	

Einen Sonderfall stellen die *geführten charakteristischen Punkte* dar, bei denen mindestens eine Komponente durch den Kontakt des Körperteils mit der Einstiegsgeometrie direkt beeinflusst wird. Beispiele für *geführte Punkte* sind die Anfangspunkte der Sprunggelenke (z-Komponente durch Standebene „geführt“) und alle Endpunkte (x-, y-, und z-Komponente).

In Abb. 52 sind die Analysepunkte auf den Bewegungsbahnen dargestellt:

⁶ Die Reihenfolge der führenden Körperteile resultiert aus dem Zeitpunkt ihrer ersten aktiven Phase. Diese Ordnung wird – soweit sinnvoll – im weiteren Verlauf der Arbeit beibehalten.

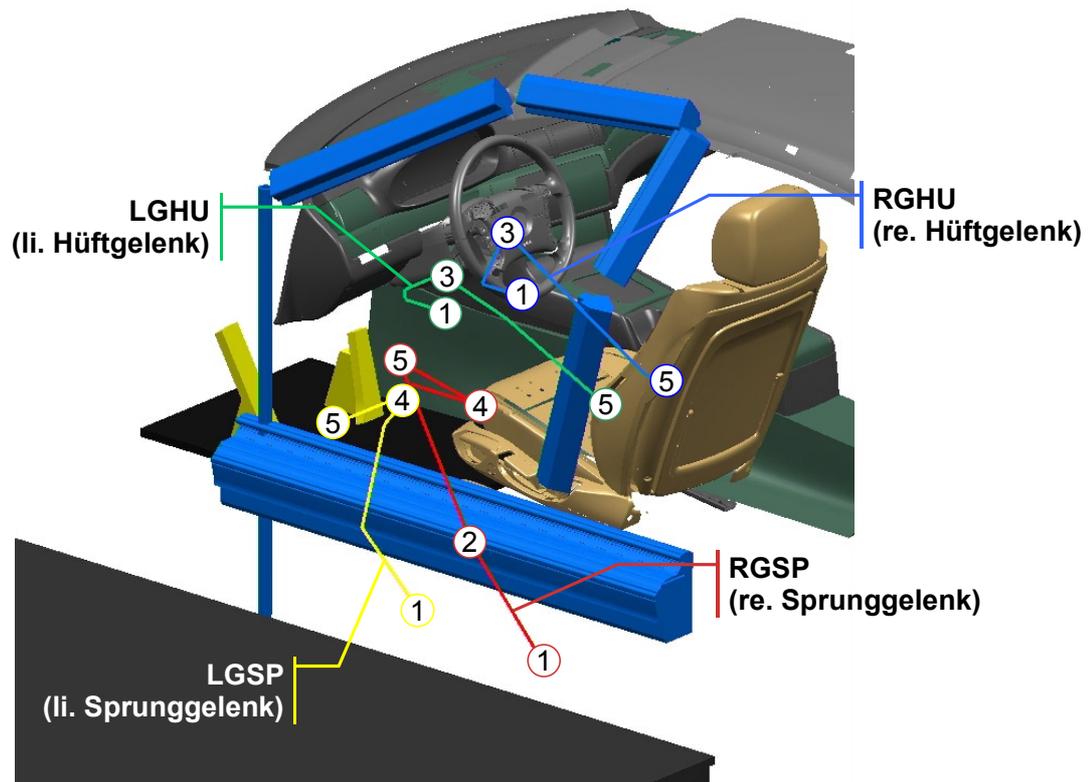


Abb. 52: *Bewegungsbahnen der führenden Körperteile des Unterkörpers mit den Analysepunkten*

Bei den Endpunkten der Bewegungen handelt es sich um besondere Punkte, da sich deren Lage durch den Kontakt des Körpers mit der Geometrie (Sitz, Lenkrad, Pedalerie bzw. Boden) durch eine „geführte Bewegung“ ergibt. Das gleiche gilt für die Anfangspunkte in z-Richtung, die sich durch die stehende Haltung immer auf der gleichen Höhe befinden.

Für den Rumpf kann die Vorgehensweise bei der Analyse analog übernommen werden.

4.3.5 Ergebnisse

4.3.5.1 Versuchsdauer

Die Vorbereitung des Versuchs dauert mit entsprechender Praxis des Versuchsleiters etwa eine Stunde. Die Zeit ist ausreichend, um parallel dazu das Kamerasystem zu kalibrieren und den Versuchsaufbau in die erste Einstiegsconfiguration zu bringen.

Die Vorbereitung der Versuchsperson auf den Versuch nimmt etwa eine weitere Stunde in Anspruch. Die Zeit wird für die Einweisung, die Beantwortung des Fragebogens vor der Versuchsreihe, das Umkleiden, Vermessen und das Anbringen der Marker benötigt.

Die Dauer der Aufzeichnung hängt stark von der Versuchsperson ab. Für eine erfolgreiche Aufnahme darf während des Ein- und Ausstiegsvorgangs kein Marker abfallen. Andernfalls muss sie wiederholt werden. Je nach Körperhöhe und Bewegungsablauf tendieren manche Versuchspersonen aufgrund ihrer individuellen Bewegungspräferenz eher dazu, Marker abzustreifen. Entsprechend liegt die Aufzeichnungsdauer für einen Konfigurationszyklus mit gleicher Geometrieconfiguration und fünf Bewegungsvorgängen zwischen 10 und 20 Minuten.

Insgesamt muss damit für einen kompletten Versuch mit einer Versuchsperson und den empfohlenen 13 VEMO-Konfigurationen (vgl. Kap. 3.6.1) mit bis zu vier Stunden Versuchsdauer gerechnet werden. Dazu kommt eine Stunde Versuchsvorbereitung. Es wird daher empfohlen, die Vorbereitung des Versuchs am Vormittag, den Versuch selber am Nachmittag durchzuführen. Pro Versuchsperson muss also ein Versuchstag eingeplant werden.

4.3.5.2 Datenverarbeitungsdauer

Die Datenverarbeitung setzt sich aus der Datenvorbereitung und der Datenwandlung zusammen.

Die **Datenvorbereitung**, die in der „Vicon“-Software abläuft, beinhaltet einen einmal pro Versuchsperson durchzuführenden Teil, der etwa eine halbe Stunde beansprucht. Die Aufbereitung einer Bewegungssequenz dauert dann etwa 15 Minuten. Für eine Versuchsperson mit 39 Bewegungssequenzen (13 Konfigurationen mit je drei Einstiegsbewegungen) ergibt sich somit etwa eine Datenvorbereitungsdauer in „Vicon“ von ungefähr 10 Stunden.

Der zeitintensivere Prozessschritt ist die **Datenwandlung**, da die lineare Approximierung der Bewegungsbahnen noch weitestgehend manuell erfolgt. Da bei diesem Schritt nur die Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* bearbeitet werden, hängt der Zeitbedarf in erster Linie von deren Anzahl ab. Für eine Ganzkörperanalyse sind sieben Bewegungsbahnen notwendig. Pro Bewegungsbahn muss mit zwei bis drei Minuten gerechnet werden, so dass sich eine Bearbeitungsdauer zwischen 9 und 14 Stunden ergibt.

Die Datenverarbeitung für eine Versuchsperson dauert somit insgesamt etwa eine Arbeitswoche.

Bei einer größeren Anzahl an Versuchspersonen empfiehlt sich die Programmierung einer voll automatisch ablaufenden Datenwandlung. Mittels geeigneter Algorithmen gilt es, die Bereiche konstanter Geschwindigkeit (innerhalb einer vorgegebenen Toleranz) zu ermitteln und mit den so gefundenen Werten die Annäherungsgeraden zu berechnen.

4.3.5.3 Fehler durch die lineare Approximierung

Aus der Parametrisierung der Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* durch stückweise lineare Kurven resultiert eine Abweichung. Zur Ermittlung der Größenordnung des Fehlers wurde für die beiden Versuchspersonen des Hauptversuchs eine entsprechende Auswertung durchgeführt:

Der mittlere Fehler durch die lineare Approximierung beträgt im Hauptversuch bei VP 1 für den Unterkörper 19mm, bei VP 2 18mm (Tab. 14).

Tab. 14: Durchschnittlicher Fehler durch lineare Approximierung in Millimeter

	RGSP			RGHU			LGHU			LGSP			Mittel
	x	y	z	x	y	z	x	y	z	x	y	z	
VP 1	22	33	11	15	15	16	15	14	18	34	27	7	19
VP 2	27	21	11	14	13	20	16	15	18	32	34	10	18

Die Werte geben die durchschnittliche Abweichung an, die aus den sieben Konfigurationen und je drei Bewegungswiederholungen ermittelt wurden. Die Auflistung der 42 Einzelwerte ist im Anhang aufgeführt.

Unabhängig von der intra- und interindividuellen Streuung schwankt die Standardabweichung durch die Linearisierung der insgesamt 42 Einzelbewegungen von VP 1 und VP 2 nur um $\pm 3\text{mm}$. Damit stellt das Linearisierungsmuster eine einheitliche Parametrisierung sicher.

Die größten Abweichungen treten beim rechten und linken Sprunggelenk mit maximal 34mm in x- und y-Richtung auf. Zudem schwanken bei diesem Gelenk die einzelnen Abweichungen mit bis zu 7mm überdurchschnittlich stark. Deshalb sollte bei diesem Gelenk das Parametrisierungsmuster verfeinert werden, so dass die Abweichungen auf das Maß der anderen Komponenten (unter 20mm) reduziert werden.

Auf die Bewegungsanalyse hat der Fehler durch die Approximierung nur einen zweitrangigen Einfluss, da

- 1) das Linearisierungsmuster so gewählt ist, dass die für die Analyse wichtigen Positionen exakt erreicht werden und
- 2) durch das einheitliche Linearisierungsmuster die Bewegungssequenzen einem ähnlichen Fehlereintrag unterworfen sind. Bei einem Relativvergleich zwischen den einzelnen Bewegungen gleicht sich der Fehler aus.

4.3.5.4 Intraindividuelle Streuung

Die Auswertung der fünf identischen Versuchszyklen mit der Einstiegsgeometrie in Basiskonfiguration ergibt für die *charakteristischen Punkte* (ohne die *geführten Punkte*) eine durchschnittliche Standardabweichung von 18mm (vgl. Tab. 15). Die geführten Punktkomponenten werden nicht berücksichtigt, weil durch die Führung die intraindividuelle Streuung erheblich reduziert wird. Das Ergebnis würde damit positiver ausfallen, als es sich in Wirklichkeit verhält.

Tab. 15: Standardabweichung der charakteristischen Punkte in Millimeter

Punkt	RGSP			RGHU				LGHU				LGSP			Mittel		
	1		2	1		3		1		3		1		4			
	x	y	z	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x		z	
Zykl. 1	38	12	2	4	44	14	16	74	43	13	3	25	5	17	11	4	20
Zykl. 2	28	13	15	16	27	16	12	29	18	15	3	19	8	8	25	8	16
Zykl. 3	18	16	9	11	6	14	21	32	9	16	9	14	33	21	18	4	16
Zykl. 4	48	6	3	18	47	6	11	31	41	6	10	19	11	5	6	3	17
Zykl. 5	26	12	10	16	41	17	17	35	34	15	9	38	10	14	12	4	19
Mittel	31	12	8	13	33	13	15	40	29	13	7	23	14	13	14	5	18

Die Einzelwerte geben die Standardabweichung der drei in jedem Zyklus ausgewerteten Bewegungen an. Die geführten Punktkomponenten sind nicht berücksichtigt.

Die höchsten Standardabweichungen ergeben sich beim ersten, vierten und fünften Block, so dass davon ausgegangen werden kann, dass eine längere Trainingsphase nicht zu einer Verbesserung des Ergebnisses führt. Gleichzeitig kann nach den etwa 30 bis 35 Wiederholungen ein Ermüdungseffekt nicht beobachtet werden.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss eine Streuung der Einzelwerte um durchschnittlich etwa 20mm berücksichtigt werden. Vereinzelt treten sogar Abweichungen von etwa 50mm auf.

Bemerkenswert ist, dass die Streuung der gewählten Punkte in z-Richtung mit 6mm deutlich geringer ausfällt als die Streuung in x- und y-Richtung (20mm und 19mm). Durch die Mittelung von je drei Bewegungen wird erreicht, dass im Vergleich der Zyklen zueinander die durchschnittliche Abweichung mit 15mm etwas geringer ausfällt.

Ein ähnliches Bild liefern die Ergebnisse der Versuche zu den sieben verschiedenen Geometrieconfigurationen. Die Abweichungen der Versuchszyklen liegen in der gleichen Größenordnung. Das bedeutet, dass durch die Änderung der Einstiegsgeometrie keine Zunahme der intraindividuellen Streuung auftritt. Die mittlere Abweichung beträgt hier bei VP 1 17mm, bei VP 2 18mm.

4.3.5.5 Geometriebedingte Bewegungsänderungen

Das Herausfiltern geometriebedingter Bewegungsänderungen stellt eine der größten Herausforderungen bei der Analyse der Einstiegsbewegungen dar. Eine Quantifizierung dieser Veränderungen, d.h. das Aufstellen einer numerischen Beziehung zwischen Einstiegsmaßen und Bewegungskurven stellt noch erhöhte Anforderungen an die zugrunde liegenden Daten.

Das liegt daran, dass trotz der Mittelung mehrerer Einstiegsbewegungen die Ergebnisse durch die intraindividuelle Streuung beeinflusst werden. Bei der Betrachtung von mehreren Versuchspersonen kommt zusätzlich die interindividuelle Streuung hinzu. Diese Streuung ist hauptsächlich auf die anthropometrischen Unterschiede der Versuchspersonen und die persönlichen Vorlieben im Bewegungsablauf zurückzuführen. In einer praxisrelevanten Simulation müssen diese Parameter berücksichtigt werden.

Wegen der interindividuellen Streuung könnte es sinnvoll sein, nicht nur die wiederholten Bewegungssequenzen eines Probanden zu mitteln, sondern innerhalb einer Versuchspersonenklasse eine mittlere Bewegung zu berechnen und diese anschließend zu analysieren. Damit würden die abgeleiteten Modelle nicht nur auf einem Bewegungstyp, sondern auf einer versuchspersonenklassenspezifischen Bewegung basieren. Allerdings muss die Anzahl der Versuchspersonen ausreichend hoch sein, damit durch Ausreißer das Ergebnis nicht negativ beeinflusst wird. Ein

weiterer Vorteil wäre, dass der Einfluss der interindividuellen Streuung durch die Mittelung einer größeren Anzahl von Bewegungen reduziert werden könnte.

Aus dem Vergleich der *charakteristischen Punkte* von VP 1 lassen sich dennoch bereits wertvolle Erkenntnisse ableiten:

Die **Lage der Endpunkte** der vier betrachteten Bewegungsbahnen werden durch die im Versuch veränderten Geometrien nicht beeinflusst. Die Streuung der Punkte ist in z- und x-Richtung mit durchschnittlich einem und drei Millimeter sehr gering. Dies war zu erwarten, da die Körperteile durch die Geometrien von Pedalerie, Sitz und Lenkrad zu den Endpositionen „geführt“ werden.

Die **Bewegung der Sprunggelenke** wird im Wesentlichen durch die Veränderung der Schwellerhöhe beeinflusst. Die Absenkung des Schwellers um 80mm führt dazu, dass die Sprunggelenke um 71mm (rechts) bzw. 75mm (links) weniger hoch gehoben werden. Die Anhebung des Schwellers führt dagegen zu einer um 65mm bzw. 57mm erhöhten Bewegung. Diese Bewegungsänderungen entsprechen näherungsweise den Geometrieänderungen von $\pm 80\text{mm}$.

Eine Ausnahme stellt Konfiguration K06 (Schweller in hoher Position) dar, bei der tendenziell eine nicht ganz so starke Anhebung des Fußes erfolgt. Eine mögliche Erklärung ist, dass der Proband versucht, das Diskomfortempfinden durch das deutlich höhere Heben des Fußes zu minimieren – allerdings auf Kosten eines geringeren Sicherheitsabstands zum Schweller.

In Abb. 53 sind die Auswirkungen der Veränderung der Schwellerhöhe auf jeweils den höchsten Punkt des rechten und des linken Sprunggelenks der beiden Versuchspersonen visualisiert.

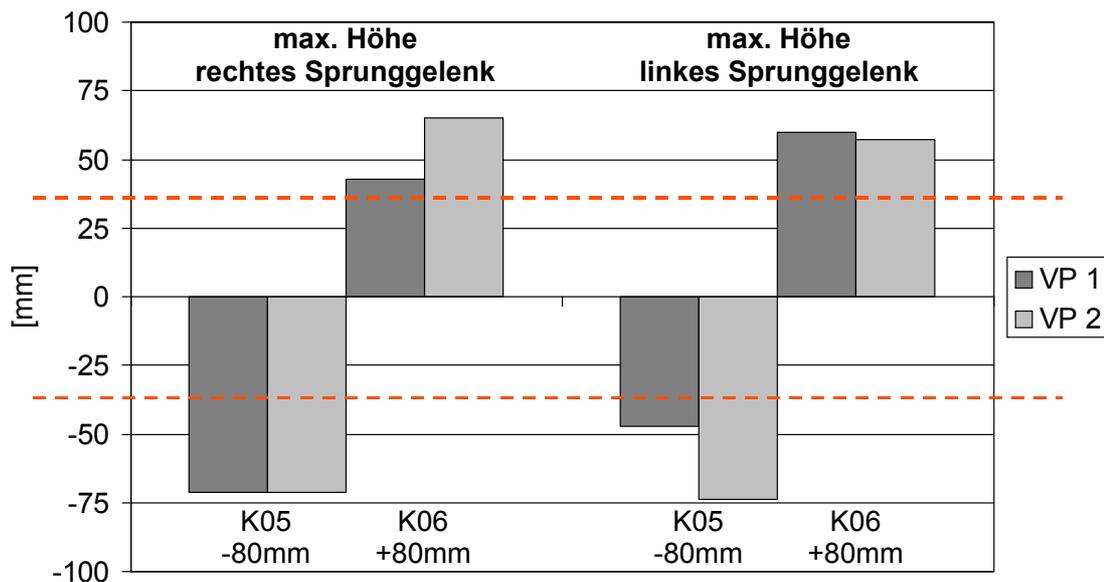


Abb. 53: Auswirkung der Veränderung der Schwellerhöhe auf den höchsten Punkt der Bewegungsbahnen des rechten und linken Sprunggelenks

Die Veränderungen beziehen sich auf einen über alle Konfigurationen gemittelten Wert. Zur Verdeutlichung der Veränderungen ist der doppelte Wert der gemittelten intraindividuellen Streuung als Bezugslinie angetragen.

Die Veränderung der Lage der B-Säule hat keinen signifikanten Einfluss auf die Bewegungsbahnen der Sprunggelenke. Im Fall von Konfiguration K03 (B-Säule in hinterer Position) war dies zu erwarten, da sich die B-Säule bei dieser Konfiguration bereits hinter dem Sitz befindet. Offen ist, ab welcher B-Säulenlage v.a. der Anfangspunkt der Bewegung beeinflusst wird bzw. ob bei größeren Personen bereits Konfiguration K03 zu einer Änderung führt.

Ähnliches gilt für die Auswirkungen der Variation der A-Säulenlage. Tendenziell scheint der Anfangspunkt in x-Richtung entsprechend leicht verschoben. Dies gilt auch für die Anfangspunkte der anderen *führenden Körperteile* (Abb. 54).

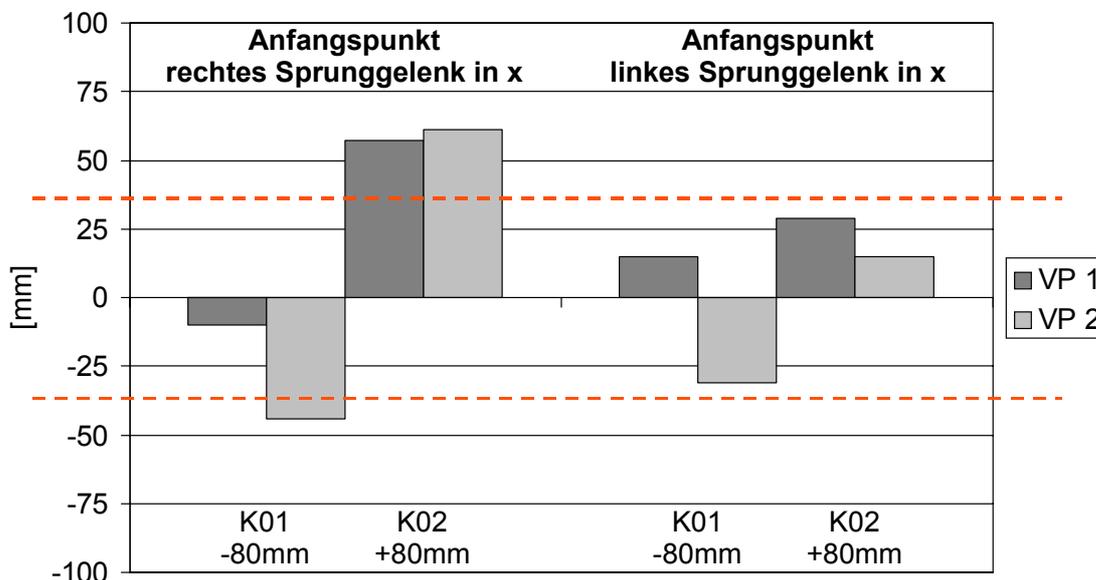


Abb. 54: Auswirkung der Veränderung der Lage der A-Säule auf den Anfangspunkt der Bewegungsbahnen des rechten und linken Sprunggelenks in x-Richtung

Ein weiterer Einfluss resultiert daraus, dass die Veränderung des Abstands der A-Säule zum Sitz durch eine Verschiebung des Sitzes realisiert wird. Ein absolut zur Umgebung gleicher Anfangspunkt bedeutet damit, dass sich der Anfangspunkt relativ zum Sitz geändert hat. Dies ist wahrscheinlich, da sich die Versuchspersonen zu Bewegungsbeginn an den Grenzen des Modells orientieren. Die Verschiebung der A-Säule sollte sich – falls überhaupt – auf die Position des Fußes beim Heben über den Schweller auswirken (Zwischenpunkt 4, vgl. auch Abb. 52). Wie Abb. 55 verdeutlicht, ist dies aber nicht der Fall. Der Abstand der Füße zur A-Säule ist bei VP 1 und VP 2 selbst bei der kritischeren Konfiguration K02 (A-Säule in hinterer Position) groß genug, dass der „normale“ Bewegungsablauf durch die A-Säule nicht behindert wird.

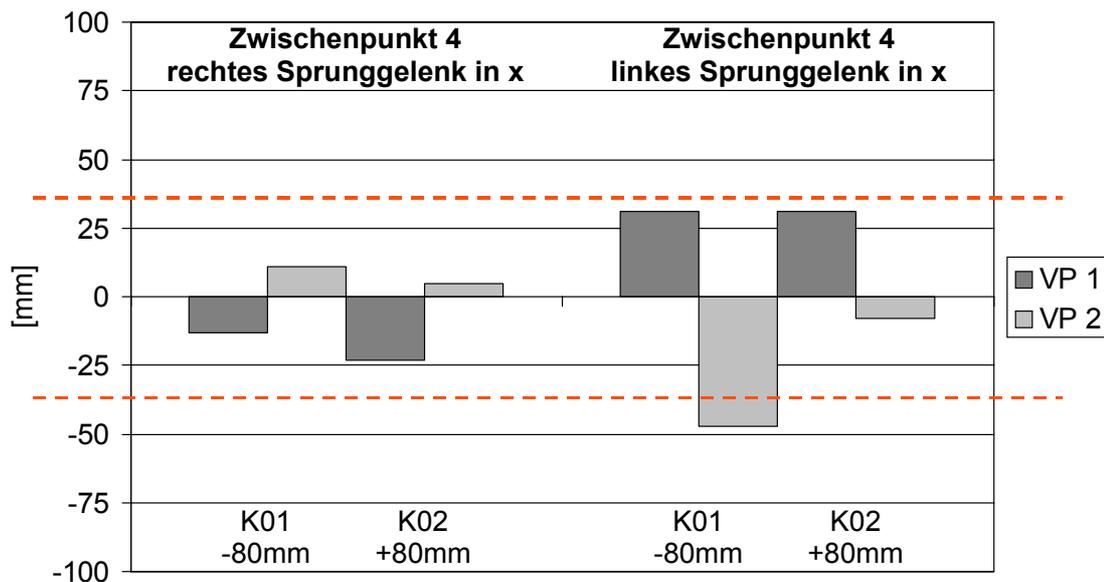


Abb. 55: Auswirkung der Veränderung der Lage der A-Säule auf den Zwischenpunkt 4 der Bewegungsbahnen des rechten und linken Sprunggelenks

Ebenso wie bei den Sprunggelenken scheint die Verschiebung der A-Säule zu einer Verschiebung der Ausgangslage der **Hüftgelenke** zu führen, wobei hierfür die gleiche Begründung wie für die Sprunggelenke gilt. Allerdings ist nur bei Konfiguration K04 (B-Säule in vorderer Position) erkennbar, dass die Hüfte weiter nach vorne geschoben werden muss, um an der B-Säule vorbeizukommen (Abb. 56). Die Vorverlagerung des vordersten Punktes der Bewegungsbahnen beträgt 34mm (rechts) und 47mm (links).

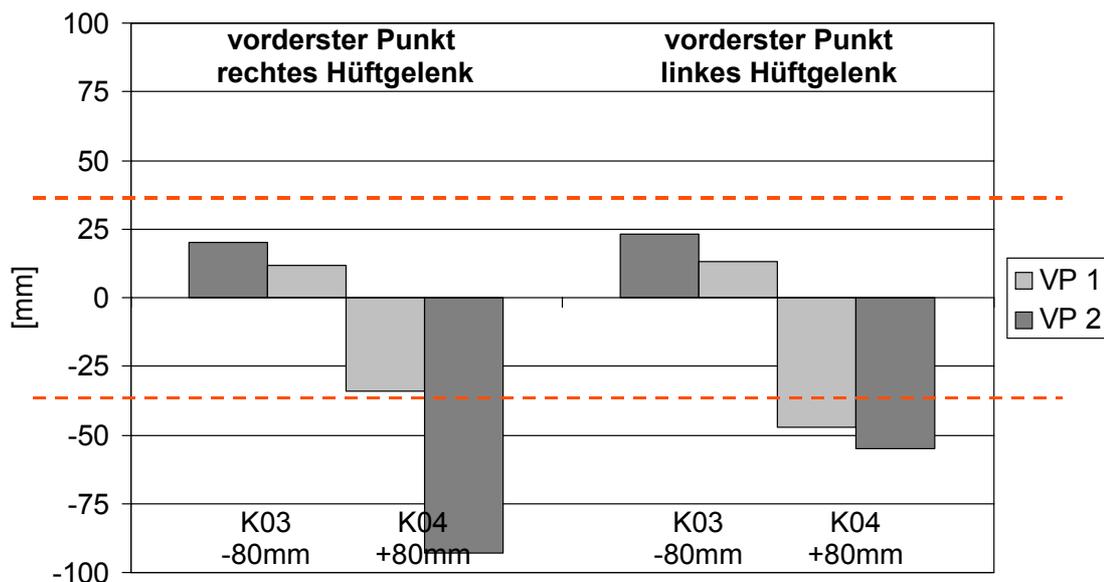


Abb. 56: Auswirkung der Veränderung der Lage der B-Säule auf den vordersten Punkt der Bewegungsbahnen des rechten und linken Hüftgelenks

Die Auswirkungen der Geometrieänderungen lassen sich entsprechend an den Veränderungen der minimalen Abstände der *führenden Körperteile* zu den Einstiegsgeometrien nachweisen.

In der nachfolgenden Abb. 57 sind die minimalen Abstände des rechten Fußes zum Schweller und zur A-Säule sowie des Hüftzentrums zur B-Säule dargestellt. Die Abstände des Fußes zur A-Säule sowie der linken Hüfte zur B-Säule verändern sich nahezu analog zur Verschiebung der jeweiligen Geometrie. Das bedeutet, dass sich die Veränderung der Einstiegsverhältnisse nicht auf den Bewegungsvorgang und damit auf die Form der Bewegungsbahnen auswirkt. Im Gegensatz dazu ändert sich der Abstand des Fußes zum Schweller durch die Veränderung der Höhe des Schwellers nur gering. Die Bewegung des Fußes wird also, entsprechend der Verschiebung des Schwellers, geändert.

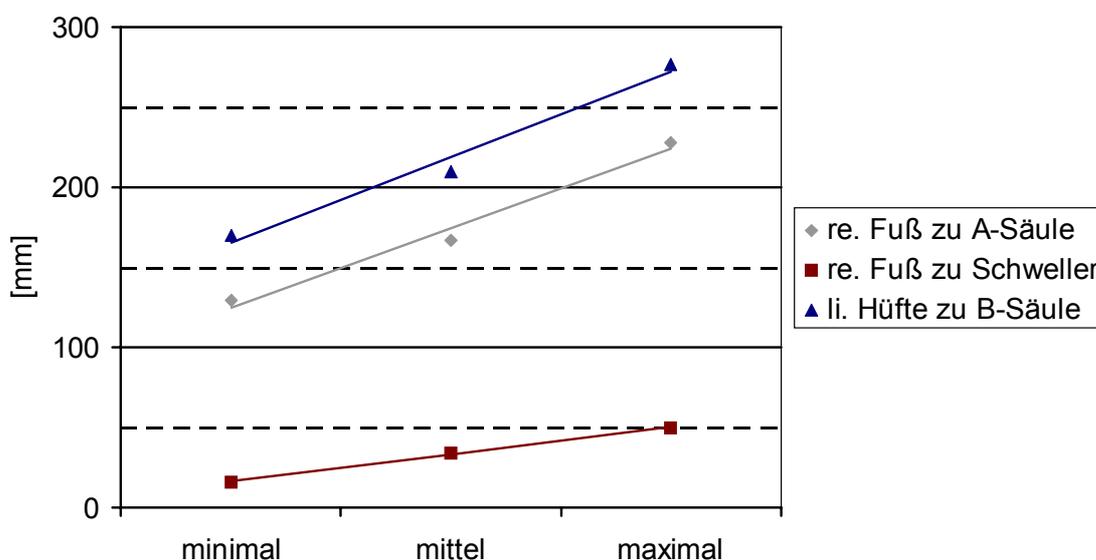


Abb. 57: Auswirkung der Geometrievariation (jeweils $\pm 80\text{mm}$) auf die Abstände von führenden Körperteilen von VP 1

Die verschiedenen Abstände resultieren aus der Variation der entsprechenden Geometrie. Der maximale Abstand zur A-Säule trat bei K01 (A-Säule in entfernter Position) auf, der minimale bei K02 (A-Säule in naher Position). Dies gilt analog für den Abstand der linken Hüfte zur B-Säule mit der B-Säule in entfernter und naher Position (K03 und K04) und für den Abstand des rechten Fußes zum Schweller bei K05 und K06 (Schweller in niedriger bzw. hoher Position). Die mittleren Abstände wurden in der Basiskonfiguration K00 gemessen.

Die Geometrievariationen wirken sich auf die Einstiegsbewegungen der zweiten Versuchsperson sehr ähnlich aus. Etwas deutlicher wirkt sich nur die Verschiebung der B-Säule (K04) aus. Die Anfangspunkte der Hüftgelenke sind bei VP02 um 46mm (rechts) und 50mm (links), die vordersten Punkte der Bewegungsbahnen um 94mm und 57mm vorverlagert. Vermutlich wirkt sich hier die um 40mm größere Körperhöhe von VP2 ggü. der VP1 aus.

Die Koordinaten aller *charakteristischen Punkte* von VP 1 und VP 2 sind im Anhang aufgeführt.

4.3.5.6 Interindividuelle Streuung

Die vorausgehende Auswertung zeigte, dass sich die Geometrievariationen auf die Einstiegsbewegung der beiden Versuchspersonen sehr ähnlich auswirken. Nach diesem relativen Vergleich der Bewegungen sollen jetzt die Absolutlagen der Bewegungsbahnen der beiden aufgezeichneten Versuchspersonen betrachtet werden:

Die Bewegungsbahnen der beiden Versuchspersonen folgen dem gleichen Muster (Abb. 58). Das war auch zu erwarten, da eine Bedingung für die Auswahl der Versuchspersonen war, dass sie nach der gleichen Strategie einsteigen („Schlüpf“-Strategie mit Unterstrategie 6). Die Vergleichbarkeit der Bewegungen ist somit gewährleistet.

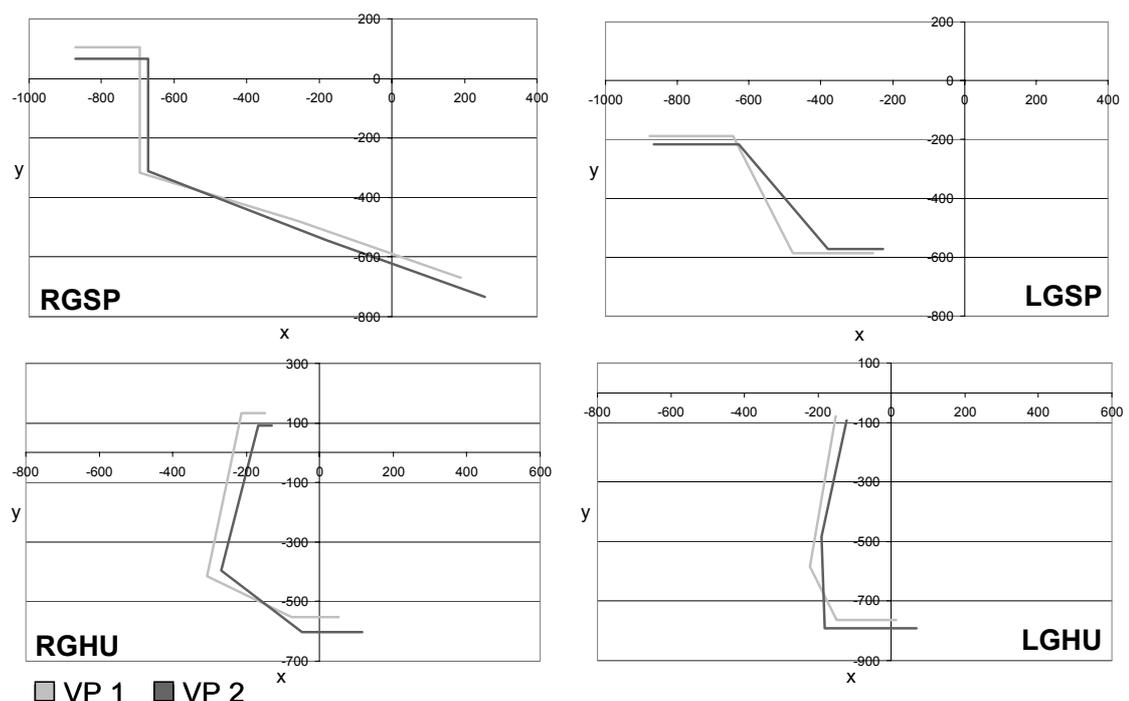


Abb. 58: Bewegungsbahnen von VP 1 und VP 2 (xy-Ansicht)

Der Vergleich der Absolutwerte der Bewegungsbahnen (betrachtet wird die durchschnittliche Bewegung) liefert keine einheitliche Tendenz (vgl. Tab. 16 bis Tab. 19). So beginnt die Bewegung des rechten Sprunggelenks von VP 2 etwas weiter außen (y-Richtung), ebenso die der Hüfte. Dagegen steht das linke Sprunggelenk zu Bewegungsbeginn etwas weiter innen. VP 2 hält mit der Hüfte zur B-Säule einen geringeren Abstand als VP 1, während sie das rechte Sprunggelenk leicht und das linke deutlich höher über den Schweller hebt. Die Abweichung in x- und y-Richtung liegt bei durchschnittlich etwa 40mm, in z-Richtung sind es etwa 20mm. Die maximale Differenz beträgt fast 100mm.

In den nachfolgenden Tabellen (Tab. 16 bis Tab. 19) sind die gemittelten Werte der *charakteristischen Punkte* einzeln aufgeführt. Sie verdeutlichen die oben ausgeführten Unterschiede der Bewegung von VP 1 und VP 2.

Tab. 16: Absolutwerte der charakteristischen Punkte des rechten Sprunggelenks von VP 1 und VP 2

RGSP	Punkt 1			Punkt 2	Punkt 4	Punkt 5		
	x	y	z	z	x	x	y	z
VP 1	189	-669	110	565	-695	-873	105	316
VP 2	257	-734	124	591	-671	-874	65	346
Δ	-68	65	-14	-25	-24	1	41	-30

Tab. 17: Absolutwerte der charakteristischen Punkte des rechten Hüftgelenks von VP 1 und VP 2

RGHU	Punkt 1			Punkt 3		Punkt 5		
	x	y	z	x	y	x	y	z
VP 1	53	-551	939	-306	-416	-148	134	501
VP 2	116	-602	957	-268	-396	-130	91	503
Δ	-64	51	-18	-38	-21	-18	42	-2

Tab. 18: Absolutwerte der charakteristischen Punkte des linken Hüftgelenks von VP 1 und VP 2

LGHU	Punkt 1			Punkt 3		Punkt 4		
	x	y	z	x	y	x	y	z
VP 1	13	-764	959	-222	-583	-151	-79	513
VP 2	67	-792	959	-191	-484	-121	-91	501
Δ	-54	27	0	-31	-99	-30	12	12

Tab. 19: Absolutwerte der charakteristischen Punkte des linken Sprunggelenks von VP 1 und VP 2

LGSP	Punkt 1			Punkt 4		Punkt 5		
	x	y	z	x	z	x	y	z
VP 1	-255	-587	113	-645	480	-878	-188	296
VP 2	-227	-573	122	-628	555	-866	-217	349
Δ	-29	-14	-9	-17	-75	-11	29	-54

Durchschnittlich ist damit die interindividuelle Streuung fast doppelt so groß wie die intraindividuelle Streuung.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt, dass trotz der Ähnlichkeit der Versuchspersonen (Körperhöhe, Korpulenz, Alter, Beweglichkeit und Einstiegsstrategie) ihre Einstiegsbewegungen im Detail individuelle Unterschiede aufweisen. Diese Unterschiede können bei allen aufgezeichneten Geometrieconfigurationen nachgewiesen werden.

Für die Auswertung einer Reihenuntersuchung mit einer größeren Probandenzahl pro Versuchspersonenklasse wird zur Reduzierung des intra- und interindividuellen Fehlers empfohlen, die Bewegungen (einer Probandenklasse) zu mitteln und die resultierenden mittleren Bewegungen auf ihren Geometrieinfluss zu analysieren.

4.3.5.7 Dauer der Bewegungsphasen

Alle Bewegungsbahnen einer Versuchsperson werden aus Gründen der Vergleichbarkeit bei der Datenwandlung auf eine einheitliche Dauer normiert. Dazu werden die vier Bewegungsphasen auf jeweils eine mittlere Dauer skaliert. Die Auswirkungen auf die Bewegung sind gering, da die Unterschiede in der Phasendauer ebenfalls klein sind, wie die nachfolgende Tab. 20 zeigt:

Tab. 20: Standardabweichung der Dauer der Bewegungsphasen von VP 1

	K00	K01	K02	K03	K04	K05	K06	gesamt
Phase 1	2%	1%	1%	2%	1%	1%	2%	2%
Phase 2	5%	4%	0%	4%	2%	1%	4%	3%
Phase 3	1%	1%	1%	3%	1%	4%	3%	2%
Phase 4	3%	4%	1%	0%	3%	2%	2%	2%

Für die mittlere Dauer der Bewegungsphasen ergeben sich für die beiden Versuchspersonen VP 1 und VP 2 folgende Werte (Tab. 21):

Tab. 21: Mittlere Dauer der Bewegungsphasen von VP 1 und VP 2 in Prozent der Gesamtdauer

	Phasenbeginn und –ende in [%]		Phasendauer in [%]	
	VP 1	VP 2	VP 1	VP 2
Phase 1	0 – 29	0 – 33	29	33
Phase 2	29 – 46	33 – 48	17	15
Phase 3	46 – 80	48 – 79	34	31
Phase 4	80 – 100	79 – 100	20	21

Die mittlere Dauer der Bewegungsphasen der beiden Versuchspersonen ist nahezu gleich. Die Abweichungen betragen weniger als fünf Prozent der Gesamtbewegungsdauer.

Es scheint daher möglich, für die Auswertung einer Reihenuntersuchung die Phasendauer nicht nur für eine Person, sondern für die Versuchspersonenklasse oder sogar für alle Versuchspersonen zu mitteln. Dazu sollte allerdings zunächst geprüft werden, ob die Dauer der Phasen von Personen aus verschiedenen Versuchspersonenklassen vergleichbar sind.

4.3.6 Interpolation als Simulationsansatz

Neben der Überprüfung der vorgeschlagenen Methode lassen sich mit den Messdaten des Hauptversuchs die im Kap. 2.2.2 aufgestellten Hypothesen I und II untersuchen.

Im Wesentlichen soll geprüft werden, ob

- 1) es möglich ist, mit Hilfe der *führenden Körperteile* eine natürliche, realitätsnahe Einstiegsbewegung zu berechnen (Hypothese I) und ob
- 2) durch Interpolation „neue“, ebenfalls natürliche und realitätsnahe Bewegungen berechnet werden können (Hypothese II).

Die Gültigkeit der dritten Hypothese, dass bei der Einstiegsbewegung die Körperteile einen bestimmten Mindestabstand zur Einstiegsgeometrie einhalten, kann mit dem Hauptversuch nicht untersucht werden, da die Bewegungsgrenzen der Versuchspersonen aufgrund ihrer mittleren Körperhöhe nicht ausreichend ausgenutzt werden.

4.3.6.1 Vorgehensweise

Für den Nachweis soll die Einstiegsbewegung in ein Fahrzeug mit einem mittelhohen Schweller „simuliert“ werden. Die Berechnung der simulierten Bewegungsbahnen soll durch Interpolation der Bewegungsbahnen über den hohen und den niedrigen Schweller (Konfiguration K05 und K06) erfolgen. Da die beiden Schwellereinstellungen nicht dazu führen, dass die Versuchsperson an ihre Bewegungsgrenzen stößt, wird für diesen Versuch angenommen, dass sich die Geometrieänderungen linear auf die Bewegung auswirken (vgl. Abb. 59).

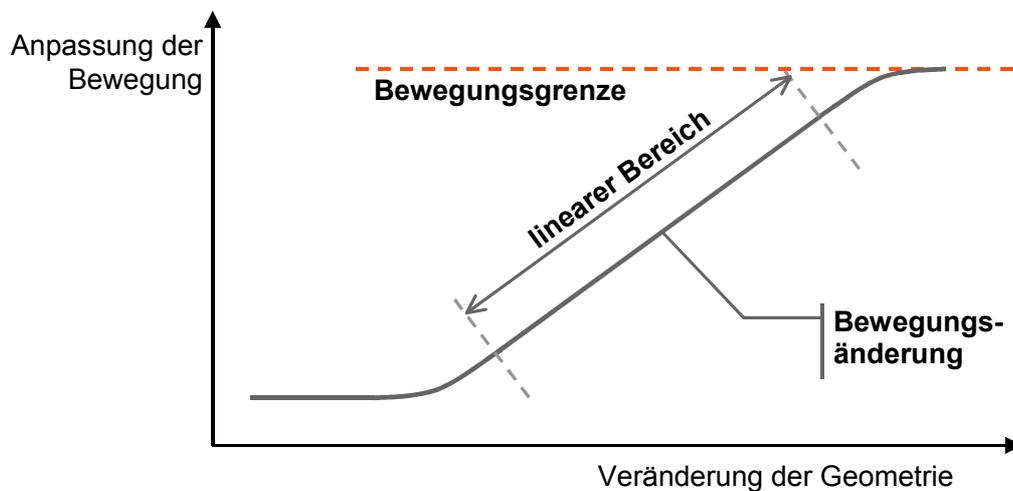


Abb. 59: Qualitativer Verlauf der Bewegungsanpassung bei Veränderung der Geometrie

Eine „Stör“-Geometrie führt ab einer bestimmten Lage zu einer Anpassung der Bewegung. Wird die Bewegungsgrenze erreicht, kann die Bewegung nicht weiter angepasst werden.

Die Bewegung soll anschließend direkt in „RAMSIS“ mit dem Modul „Bewegungssimulator“ berechnet werden. Dazu wird ein „virtueller Zwilling“ an die Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* geheftet. Die Maße zur Erzeugung des entsprechenden Manikins werden vom „Vicon“-Modell ausgegeben.

Zum Vergleich wird die Bewegung mit Hilfe der tatsächlich aufgezeichneten Bewegungsbahnen über den mittelhohen Schweller (K00) berechnet.

Darüber hinaus soll aus den durchschnittlichen Bewegungen der beiden Versuchspersonen eine einzige Bewegung berechnet werden. Dazu müssen neben den Bewegungsbahnen auch die Körpermaße gemittelt werden. Es soll gezeigt werden, dass man als Ergebnis wieder eine harmonische und natürliche Bewegung erhält.

4.3.6.2 Ergebnis

Die für das „Simulationsbeispiel“ gewählten Konfigurationen (niedriger, mittelhoher und hoher Schweller) haben auf die Bewegung der Sprunggelenke den größten Effekt. Deren Bewegungsbahnen veranschaulichen sehr gut das Ergebnis der „Simulation“ der Bewegungsbahnen. In Abb. 60 und Abb. 61 sind die in K05 und K06 aufgezeichneten Bewegungsbahnen, die gemittelten aufgezeichneten Bewegungsbahnen (K00 aufgez.) und die aus den Bewegungsbahnen von K05 und K06 berechneten mittleren Bewegungsbahnen (K00 ber.) des rechten Sprunggelenks dargestellt.

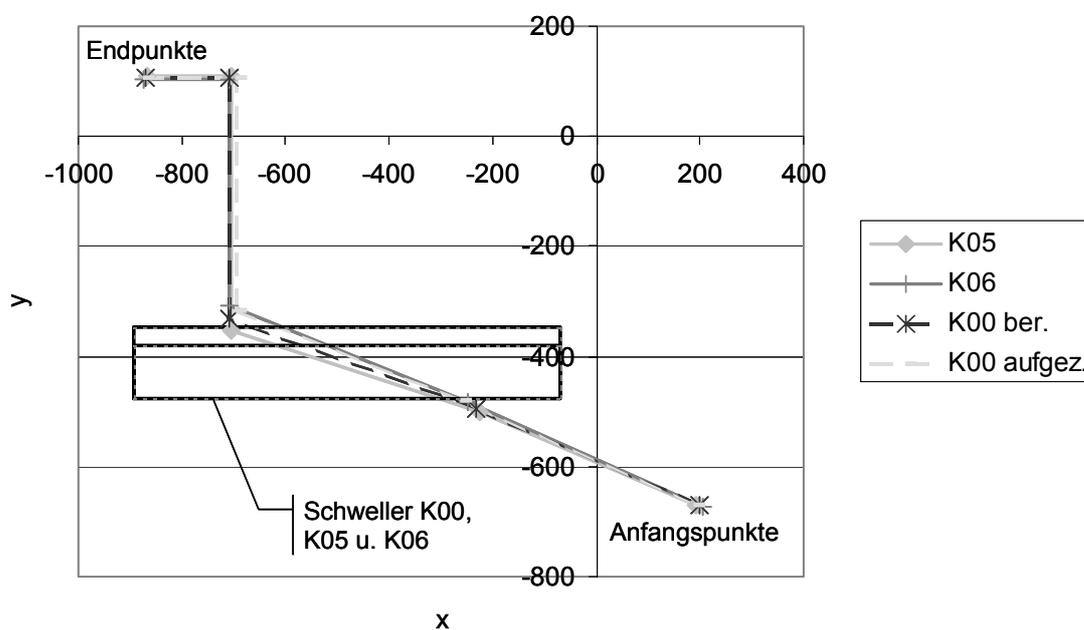


Abb. 60: Aufgezeichnete und berechnete Bewegungsbahnen des rechten Sprunggelenks (xy-Ansicht)

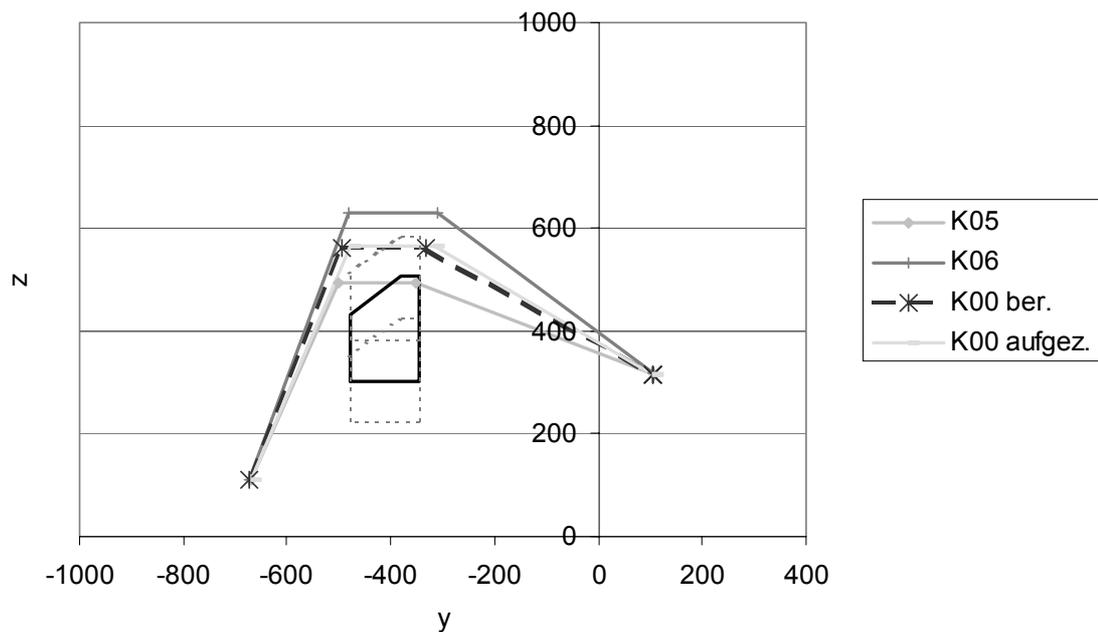


Abb. 61: Aufgezeichnete und berechnete Bewegungsbahn des rechten Sprunggelenks (yz-Ansicht)

Die Abbildungen zeigen, dass die aufgezeichneten Bewegungsbahnen durch die aus den Konfigurationen K05 und K06 berechneten Bewegungsbahnen sehr gut angenähert werden.

Quantitative Analyse

Quantitativ lassen sich die Bewegungen wieder durch den Vergleich der *charakteristischen Punkte* der Bewegungsbahnen bewerten (vgl. Tab. 22). Die Werte unterstreichen, dass die Bewegungsbahnen für die mittlere GeometrieEinstellung (K00) sehr gut aus den Konfigurationen mit dem niedrigen und hohen Schweller (K05 und K06) vorausgesagt werden können. Die Abweichungen der *charakteristischen Punkte* liegen mit einer Ausnahme sogar deutlich unter der zu berücksichtigenden intra-individuellen Streuung von 17mm. Die durchschnittliche Abweichung beträgt 9mm, die maximale 20mm.

Tab. 22: Abweichungen der berechneten von den aufgezeichneten Bewegungsbahnen

	RGSP				RGHU				LGHU				LGSP			
Pkt.	1	2	4		1	3			1	3			1	4		
	x	y	z	x	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	z
auf- gez.	189	-669	565	-695	53	-551	-306	-416	13	-764	-222	-583	-255	-587	-645	480
ber.	199	-671	562	-708	63	-552	-294	-412	24	-766	-210	-571	-236	-594	-631	471
Δ	-10	2	3	13	-10	1	-12	-5	-11	2	-12	-12	-20	7	-14	8

Dies legt die Folgerung nahe, dass mittels Interpolation von Bewegungsbahnen neue realistische Bewegungsbahnen erzeugt werden können.

Animation der Bewegung

Die möglichst gute Annäherung der Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* ist Voraussetzung für eine mit der Realität übereinstimmende Animation der Bewegung. Sie ist aber nicht hinreichend, da durch die *führenden Körperteile* die Bewegung nicht vollständig bestimmt ist. So ist beispielsweise die Haltung des Fußes bezüglich des rotatorischen Freiheitsgrads durch die Lage des Sprunggelenks und der Fußspitze noch nicht eindeutig festgelegt. Für die Berechnung der kompletten Körperhaltungen ist der in „RAMSIS“ implementierte Berechnungsalgorithmus verantwortlich. Das bedeutet, dass erst das Ergebnis der Animation zeigen kann, ob die Anzahl der *führenden Körperteile* ausreichend ist, um eine harmonische und natürliche Bewegung zu erzeugen.

Die Bewegungsanimation soll auch den Nachweis dafür liefern, dass das für die Auswertung entwickelte Modell „Gosis“ tatsächlich mit „RAMSIS“ kompatibel ist. Die für die Mittelung der Bewegungsbahnen erforderliche lineare Approximierung führt allerdings dazu, dass die Bewegungsbahnen nicht mehr exakt zur Kinematik passen. Die Animation wird zeigen, ob der Berechnungsalgorithmus in RAMSIS für diese Abweichungen stabil genug ist.

Die visuelle Überprüfung der berechneten Animationen (K00 aufgezeichnet und K00 berechnet) am Bildschirm ergibt, dass beide Bewegungen natürlich und harmonisch sind. Das Ergebnis ist in Bezug auf die Realitätsnähe absolut überzeugend. Auch die animierten Bewegungen passen zu der entsprechenden Einstiegsgeometrie.

Im Bereich des Rumpfs sind nach dem Absetzen auf dem Sitz leicht pumpende Bewegungen festzustellen. Diese entstehen durch die bildweise Berechnung der

Haltungen in „RAMSIS“. So kann es durch den Berechnungsalgorithmus von einem zum nächsten Bild zu kleinen Abweichungen kommen, die im Fall von sich kaum oder gar nicht bewegenden Körperteilen in einer leicht pumpenden Bewegung resultieren.

Der bildweise Vergleich der Bewegungen, exemplarisch dazu Abb. 62 und Abb. 63, zeigt leichte Abweichungen, z.B. in der Haltung des rechten Fußes beim Heben über den Schweller. Diese Abweichungen sind zum einen auf die Unterschiede in den Trajektorien der *führenden Körperteile*, zum anderen auf den Berechnungsalgorithmus von „RAMSIS“ zurückzuführen.

Das wichtigste Ergebnis des Vergleichs der beiden Animationen aber ist, dass die Abweichungen erneut im Bereich der intraindividuellen Streuung liegen und somit das Ergebnis ausreichend genau ist.

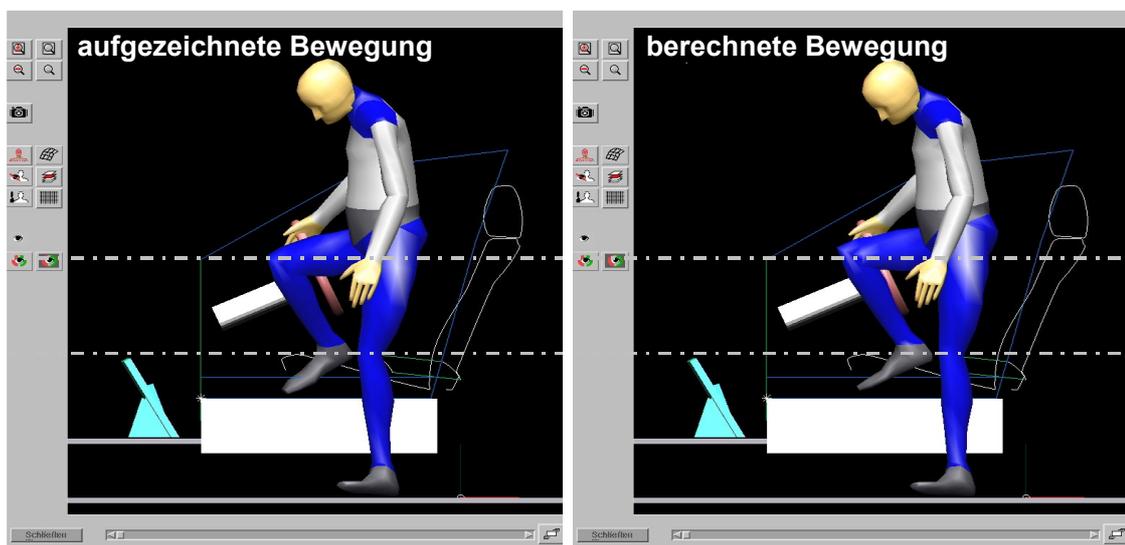


Abb. 62: Vergleich der animierten Haltung aus aufgezeichneten und berechneten Bewegungsbahnen (1. Bewegungsphase)

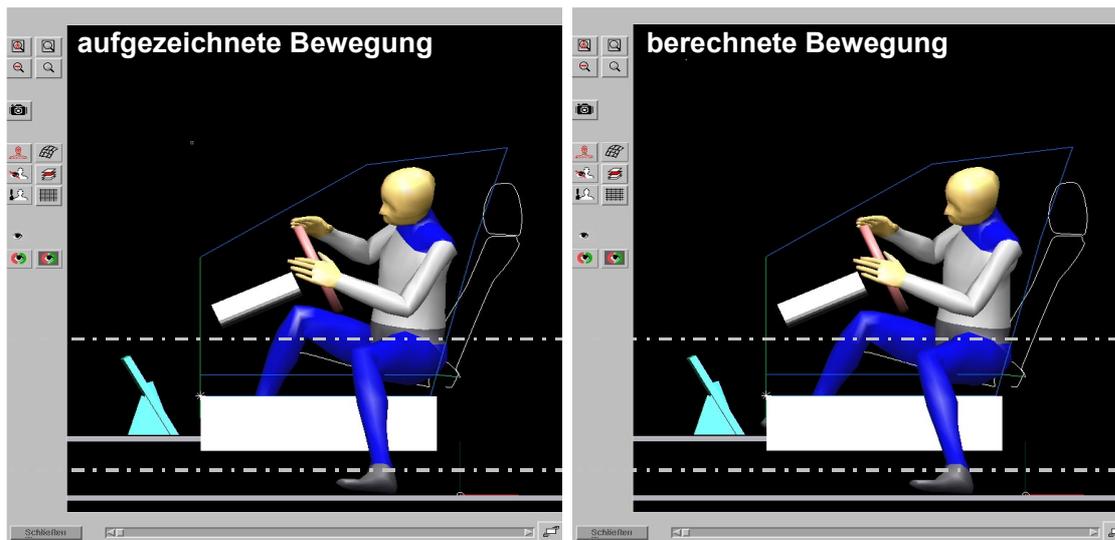


Abb. 63: Vergleich der animierten Haltung aus aufgezeichneten und berechneten Bewegungsbahnen (2. Bewegungsphase)

Das Ergebnis zeigt, dass der gewählte Ansatz einer linearen Approximierung der Bewegungsbahnen keinen signifikant negativen Einfluss auf die Bewegungsanimation hat. Das Ergebnis der Animation ist über den gesamten Einstiegsvorgang harmonisch. Dies ist insofern bemerkenswert, da der Berechnung unstetige (stückweise linear angenäherte) Bewegungsbahnen zu Grunde liegen.

Mittelung von zwei Versuchspersonen

Zum Abschluss der Auswertung soll die Bewegung von zwei verschiedenen Versuchspersonen gemittelt werden. Dazu wird aus den über alle aufgezeichneten Geometrieconfigurationen gemittelten Bewegungen von VP 1 und VP 2 eine mittlere Bewegung berechnet (mittlere Bewegung aus insgesamt 42 Einzelbewegungen). Die Maße für das entsprechende Manikin werden durch Mittelung der Maße der beiden Versuchspersonen berechnet.

Wie schon bei der Mittelung für eine Versuchsperson ist das Ergebnis der Bewegungsanimation in „RAMSIS“ mit den aus zwei Probanden gemittelten Bewegungsbahnen absolut überzeugend. Die resultierende Bewegung ist wieder natürlich und harmonisch. Visuell können keine qualitativen Unterschiede zu den Animationen der mittleren Bewegungen von VP 1 oder VP 2 festgestellt werden. Es sollte somit möglich sein, die aufgezeichneten Daten auf über die Versuchspersonenklasse gemittelte Bewegungen zu reduzieren.

Bei der Mittelung ist allerdings zu beachten, dass die Bewegungsmuster, also die Strategien, der einzelnen Bewegungen ähnlich sein müssen, da sonst nicht gewährleistet ist, dass die resultierende Bewegung natürlich ist.

Ähnlich argumentieren auch Giese und Poggio, bei ihrem Ansatz der Kombination von Bewegungen [Giese 2000]. Sie begründen das Auftreten von unnatürlichen Bewegungen bei einer Überlagerung damit, dass der „Bewegungsraum“, wie in Abb. 64 dargestellt, nicht gleichmäßig ist. So führt eine Überlagerung der Ausgangshaltungen A und B zu einer unnatürlichen Haltung, da diese außerhalb des „Bewegungsraums“ liegt. Bei der Überlagerung aus den Ausgangshaltungen A und C dagegen erhält man eine natürliche Haltung.

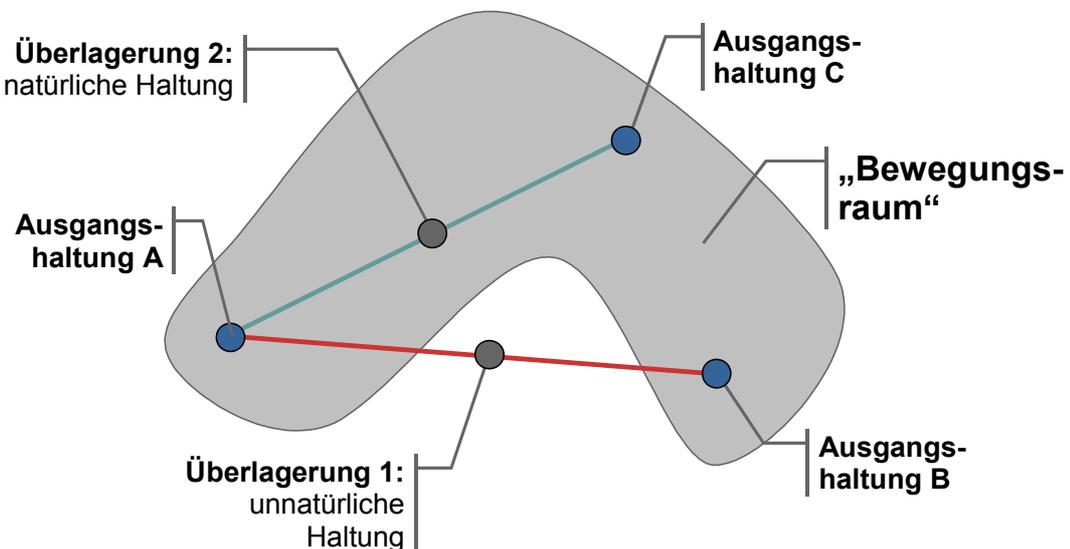


Abb. 64: „Bewegungsraum“ nach [Giese 2000]

4.3.6.3 Resümee

Der Hauptversuch zeigt, dass es mit der entwickelten Methode möglich ist, Bewegungen quantitativ zu analysieren. Damit ist das primäre Ziel der Arbeit erreicht.

Die Ergebnisse des Hauptversuchs weisen ebenfalls nach, dass es mit den Bewegungsbahnen der *führenden Körperteile* möglich ist, eine komplexe Bewegung wie den Ein- und Ausstieg zu animieren. Im RAMSIS-Modul „RAMSIS dynamisch“ sind bereits die für die Berechnung der Bewegungsanimation erforderlichen Funktionen realisiert. Die Bewegungsanimation liefert natürliche und harmonische Bewegungssequenzen.

Das ist insofern bemerkenswert, als für die Berechnung stückweise linear angenäherte Trajektorien verwendet werden. Die Abweichungen durch die Annäherung sind also für die Haltungsberechnung unkritisch und führen zu keinen sichtbaren Unregelmäßigkeiten.

Die eigentliche Simulation findet bei der Berechnung der Trajektorien der *führenden Körperteile* statt. Anhand zweier Beispiele wurde nachgewiesen, dass aus zwei oder mehreren Bewegungen durch Interpolation eine neue natürliche und harmonische Bewegung berechnet werden kann. Theoretisch sollte es somit möglich sein (unter Beachtung der aufgeführten Randbedingungen), die Bewegungsbahnen einer beliebigen Person, die für die Berechnung der Bewegung erforderlich sind, durch eine geometrie- und anthropometriespezifische Skalierung zu berechnen (Abb. 65).

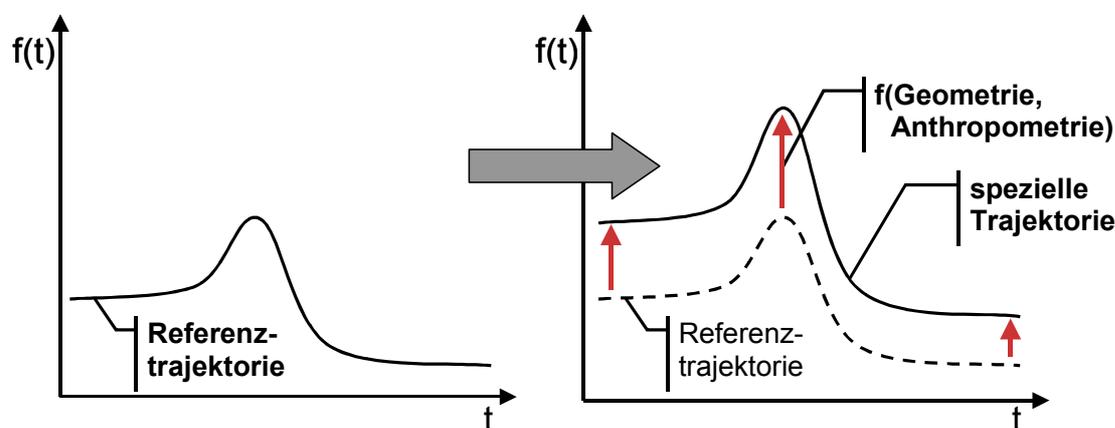


Abb. 65: Berechnung von Bewegungsbahnen durch Skalierung

Die Voraussetzung dafür ist allerdings, dass der Bewegungsbereich, der durch die Variation der Anthropometrie der Versuchspersonen und der Einstiegsgeometrie aufgespannt wird, vollständig bekannt ist. Die Daten dafür müssen noch in einer nachfolgenden umfangreichen Untersuchung gewonnen werden, in der die Anthropometrie und die Einstiegsgeometrie systematisch variiert werden.

Grundsätzlich ist die entwickelte Analysemethode (Bewegungsaufzeichnung, -modellierung und -analyse) nicht auf die Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung beschränkt, sondern kann für die Analyse von beliebigen Bewegungen herangezogen werden. Vermutlich sind die sieben *aktiv führenden Körperteile* (plus ggf. zwei für die Armbewegung) ausreichend, um beliebige menschliche Bewegungen mit ausreichender Genauigkeit und Qualität zu animieren.

4.3.6.4 Offene Punkte

Folgende Punkte bedürfen einer noch eingehenderen Klärung:

- Der Vergleich der beiden Versuchspersonen hat gezeigt, dass die untersuchten Einstiegsbewegungen vergleichbar sind. Die Geometrieänderungen wirken sich bei beiden Personen sehr ähnlich auf die Bewegung aus. Noch gänzlich offen ist aber die Frage, inwieweit sich die Bewegungen von Versuchspersonen aus verschiedenen Anthropometrie (z.B. Körperhöhe) unterscheiden.
- Aus Gründen des Untersuchungsumfangs wird es nicht möglich sein, jede mögliche Kombination bei der Einstiegsgeometrie zu untersuchen. Die Analyse sollte sich zunächst auf die Variation der sechs in Kap. 3.6.1 beschriebenen Hauptparameter und die drei vorgeschlagenen Fahrzeugklassen beschränken. Daher muss für die Simulation einer nicht untersuchten Einstiegsgeometrie die Bewegung durch eine Kombination (im Gegensatz zur Interpolation) von entsprechenden Referenzbewegungen gefunden werden.

Beispielsweise würde sich eine Bewegung in eine Einstiegsgeometrie mit einem hohen Schweller (analog K06) und einer weit vorne liegenden B-Säule (analog K04) aus den Bewegungen mit den Konfigurationen K04 und K06 zusammensetzen. Die kombinierte Bewegung muss dann für den rechten Fuß bezüglich des höchsten Punkts die Werte der Konfiguration K06 erfüllen und gleichzeitig die Bedingungen für die Anfangspunkte von Konfiguration K04.

Wie diese Kombination für eine Simulation umgesetzt werden kann, ist noch offen. Denkbar ist, dass die Bewegungsbedingungen in „Muss“- , „Soll“- und „Kann“-Bedingungen priorisiert werden. So wird z.B. eine „Muss“-Bedingung durch die Schwellerhöhe vorgegeben: die Füße müssen auf eine bestimmte Höhe gehoben werden, damit es nicht zu einer Kollision kommt. Die Position der Füße in x-Richtung dagegen könnte aus Sicht der Schwellerhöhe nur eine „Kann“-Bedingung darstellen.

- In einer realitätsnahen Simulation sollten insbesondere in Bezug auf den Menschen weitere Parameter wie Korpulenz oder Bewegungseinschränkungen berücksichtigt werden können. Insbesondere die altersbedingten Einflüsse auf die Bewegungsfähigkeit im Allgemeinen und den Ein- und Ausstieg im Besonderen werden in Zukunft durch das steigende Alter der Kunden an Bedeutung gewinnen.

4.4 Vision eines Simulationsmodells

Mit den im Hauptversuch gewonnenen Erkenntnissen soll nun zum Abschluss des Kapitels der mögliche Ablauf einer Einstiegssimulation durchgespielt werden. Die meisten Aussagen sind zum jetzigen Projektstand hypothetisch und sollen als Denkansätze für den weiteren Projektverlauf dienen.

4.4.1 Ablauf der Bewegungsberechnung

Im ersten Schritt werden aus den anthropometrischen Angaben Körperhöhe und Proportion sowie aus dem Geschlecht eine virtuelle Versuchsperson, das sog. Manikin, generiert. Damit sind die Abstände der Gelenkzentren des Manikins festgelegt.

Den Kern der Einstiegssimulation bildet die Bewegungsdatenbank. In ihr sind die sog. Referenzbewegungen abgelegt. Eine Referenzbewegung umfasst die sieben für die Bewegungsanimation erforderlichen Trajektorien der *führenden Körperteile*. Da es sehr schwierig sein dürfte, die Bewegungsbahnen allgemein in Abhängigkeit der Einstiegs- und Anthropometrievariablen zu beschreiben, ist für jede Kombination aus Fahrzeug- und Manikinklasse eine Referenzbewegung in der Datenbank abgelegt. Vorgesehen sind die drei Fahrzeugklassen Limousine, Sportwagen und SUV. Die Manikins sind nach der Körperhöhe in fünf Klassen unterteilt (sehr kleine Frau, mittelgroße Frau, kleiner Mann, mittelgroßer Mann, sehr großer Mann).

Entsprechend der für die Simulation spezifizierten Angaben (Manikin und Fahrzeugklasse) wird aus der Bewegungsdatenbank die passendste Referenzbewegung ausgewählt.

Diese Bewegung muss im nächsten Schritt an nicht erfüllte anthropometrische Bedingungen, z.B. der Körperproportion, und vor allem an die spezielle Einstiegsgeometrie angepasst werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass die Abstandsbedingungen der Gelenkzentren des Manikins und die Mindestabstände zur Einstiegsgeometrie eingehalten werden.

Nach der Berechnung der Trajektorien erfolgt die Generierung der Bewegungsanimation wie sie bereits im Modul „RAMSIS dynamisch“ umgesetzt ist.

Aus der Ganzkörperanimation können nun die während der Bewegung in den einzelnen Phasen auftretenden Körperwinkel bestimmt werden, z.B. der maximale Kniewinkel beim Heben der Füße ins Fahrzeug oder der Beugungswinkel des Rumpfs

beim Durchfädeln unter der Dachkante. Die Körperwinkel werden herangezogen, um mit Hilfe eines Diskomfortmodells die Bewegung zu bewerten.

In Abb. 66 ist der Simulationsablauf in einer Grafik zusammengefasst:

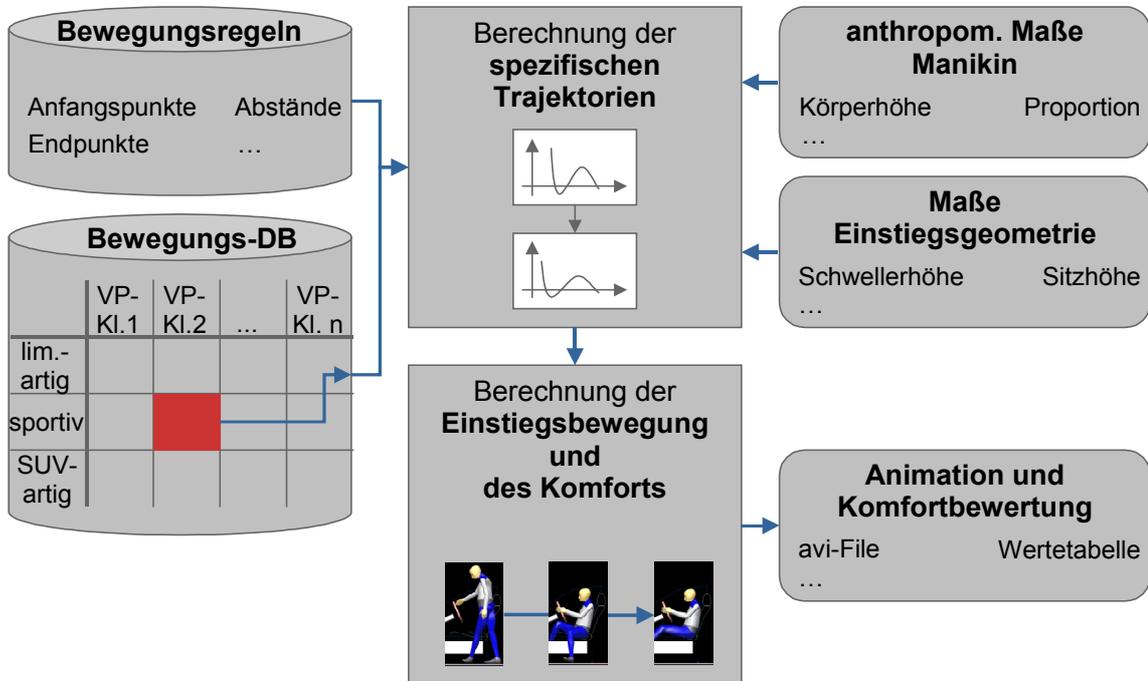


Abb. 66: Konzept des Simulationsablaufs

4.4.2 Berechnungsregeln für die Trajektorien

Aus den Ergebnissen des Hauptversuchs lassen sich erste qualitative Regeln aufstellen, nach denen die Bewegungsbahnen berechnet werden könnten:

- Die Anfangsposition des Körpers in x-Richtung wird festgelegt durch den Abstand des linken Sprunggelenks zum Sitz in x-Richtung. Der Abstand muss es ermöglichen, dass der Rumpf auf dem Sitz abgesenkt werden kann, während das linke Sprunggelenk an dieser Position fixiert ist. Für den Fall einer sehr weit vorne liegenden B-Säule wird der Anfangspunkt des linken Sprunggelenks nach vorne verschoben.
- In y-Richtung wird die Anfangsposition des Körpers durch den seitlichen Abstand des rechten Sprunggelenks zum Schweller bestimmt.
- Die erforderliche Höhe beim Heben der Füße ins Fahrzeug wird durch die Oberkante des Schwellers zuzüglich eines Abstandes definiert.

- Beim Heben der Füße ins Fahrzeug darf ein minimaler Abstand der Füße zur A-Säule nicht unterschritten werden.
- Die Bewegung der Hüfte um die B-Säule darf zu keiner Kollision (mit der B-Säule) führen.
- Die rechte Schulter und die Kopfspitze dürfen einen Minimalabstand zum Dach nicht unterschreiten.

5 Ausblick

Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Untersuchungsmethode geeignet ist, Ein- und Ausstiegsbewegungen so aufzuzeichnen, dass eine quantitative Analyse vorgenommen werden kann. Die zu berücksichtigende durchschnittliche Abweichung der modellierten von der realen Bewegung liegt mit etwa 10mm deutlich unter der von alternativen Messverfahren.

Eine Reduzierung des verbleibenden Fehlers könnte mit der Verwendung des „OLGA“-Algorithmus („Optimised Lower Limb Gait Analysis“) bei der Golem-Modellierung erzielt werden. Die erhöhte Genauigkeit kommt dadurch zustande, dass der „OLGA“-Algorithmus bei der Berechnung der Gelenke nicht nur ein einziges Bild betrachtet, sondern bei der Berechnung eine globale Optimierung vornimmt. Damit soll die bisher massiv auftretende Längenänderung der Knochen während der Bewegung minimiert werden, was direkt der Genauigkeit bei der RAMSIS-Modellierung zugute kommt. OLGA wurde nicht getestet, da es bis zum Abschluss der Versuche nicht verfügbar war.

Der Aufwand der Datenbearbeitung in „Vicon“ konnte mit Hilfe der Software „iQ“ deutlich reduziert werden. Für die Auswertung einer Versuchsperson (40 Bewegungssequenzen) muss nun mit etwa zwei Arbeitstagen gerechnet werden.

Der mit Abstand zeitaufwendigste Prozessschritt ist die Parametrisierung der Bewegung. Die Parametrisierung erfolgt derzeit nur halbautomatisch. Für die Auswertung einer größeren Anzahl von Versuchspersonen und damit Bewegungssequenzen würde sich der Aufwand lohnen, eine automatische Parametrisierung zu entwickeln.

In diesem Zusammenhang sollte auch das Parametrisierungsschema für das rechte und linke Sprunggelenk verfeinert werden. Des Weiteren ist zu überlegen, ob die zeitliche Korrelation der einzelnen Trajektorien bei der Annäherung bereits berücksichtigt werden soll. Beispielsweise wird beim Heben des Fußes ins Fahrzeug zeitgleich auch das Knie angehoben. Diese Information wird bislang in der Analyse nicht berücksichtigt, könnte aber zu einer Reduzierung der Variablen und damit des Analyse- bzw. Umsetzungsaufwands führen.

Der Hauptversuch hat gezeigt, dass der Simulationsansatz über die *führenden Körperteile* äußerst vielversprechend ist. Das einfache Beispiel des Hebens des Fußes über den Schweller hat demonstriert, dass es möglich ist, mittels Interpolation Einstiegsbewegungen zu „simulieren“.

Für die Simulation einer beliebigen Person und Einstiegsgeometrie werden allerdings wesentlich mehr Stützstellen benötigt. Es wird empfohlen, im weiteren Projektverlauf zunächst mindestens drei Versuchspersonengruppen (sehr kleine Frauen, mittelgroße Männer und sehr große Männer) mit jeweils zwischen fünf und zehn Versuchspersonen in den 13 vorgeschlagenen Einstiegskonfigurationen zu untersuchen. Die Ergebnisse sollten daraufhin geprüft werden, ob es möglich ist, die geometriebedingten Bewegungsänderungen so zu verallgemeinern, dass sie für alle Versuchspersonen gelten.

Ein Ergebnis der Vorstudie war, dass die Versuchspersonen das Lenkrad mit großem Abstand als die die Einstiegsbewegung am meisten störende Geometrie empfunden haben. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Einstiegscomfort vor allem durch ein temporäres oder komplettes Entfernen des Lenkrads erheblich verbessert werden könnte. Dies ist bei Fahrzeugen mit elektrischer Lenkradverstellung und Memoryfunktion zumindest innerhalb der Grenzen des Lenkradverstellfelds bereits berücksichtigt: Bei diesen Fahrzeugen fährt, wenn der Zündschlüssel abgezogen wird, das Lenkrad in die oberste Position.

Ein komplettes Wegklappen des Lenkrads oder das Ersetzen des Lenkrads beispielsweise durch einen „Steuerknüppel“ ist zwar noch Zukunftsmusik, könnte aber mit der „Steer-by-wire“-Technologie schon in einer der nächsten Fahrzeuggenerationen realisierbar sein (Abb. 67).



Abb. 67: „Steer-by-wire“-Konzepte von Mercedes (links) und BMW (rechts)

Für die Ein- und Ausstiegssimulation würde dies bedeuten, dass die Frage nach der Bewegungsstrategie neu gestellt werden muss und damit unter Umständen eine weitere, neue Bewegungsanalyse erforderlich wird.

6 Anhang

Checkliste „Datenvorbereitung“

	Software	Arbeitsschritt
einmalig	Vicon Workstation	Rekonstruieren
		Labeln von mind. 1 Frame mit allen Markern
		Schneiden von Frame (+/-1)
		Speichern unter
		Labeln von mind. 1 Frame mit allen Markern
		Schneiden von Frame (+/-1)
		Ändern in nicht-statisch
		Speichern unter
		Markieren von Frame mit allen Markern
		Labeln
		Erstellen "Autolabel Calibration" mit Subject-File
		Autolabeln
		Manuell nachlabeln
		Löschen ungelabelter Trajektorien
		Füllen Lücken (max. 15)
		Prozessieren [Kin Modell].vst
		Speichern unter
Importieren in Eclipse		
Speichern unter		
pro Einstieg	VICON iQ	Batch Processing "1 Automatisch Labeln"
		Manuell Labeln
		Speichern unter
		Piplining "2 Fill Gaps & Filter"
Speichern unter		
pro Einstieg	VICON Workstation	Timen
		Zeiten notieren
		Speichern unter
einmalig	VICON Bodybuilder	Berechnung Referenzlage VEMO
		Speichern unter
		Berechnung individ. Position Sitz, Lenkrad
		Speichern unter
		Berechnung statischer Golem/Gosis-Parameter
		Speichern unter
		Erzeugung VEMO
		Berechnung GoSis <--> Überprüfung Ausgleichswinkel
		Berechnung Analyse-Maße
		Export Trajektorien als ASCII-Daten
Speichern unter		
pro Einstieg		

Checkliste „Versuchsablauf“

Teil 1:		OK	Bemerkung
<input type="checkbox"/> Kalibrieren des Systems	<ul style="list-style-type: none"> VICON Workstation starten (zehn Minuten Warmlaufphase). Raum abdunkeln und indirekte Beleuchtung anschalten. VEMO in Kalibrierkonfiguration bringen. Sicht der Kameras auf Ghostmarker und Reflexionen prüfen, gegebenenfalls abdecken („Live Monitor“ Modus). Kalibrieren des Systems: <ul style="list-style-type: none"> statisch, dynamisch. Kalibrierung überprüfen: <ul style="list-style-type: none"> Residuals, Markerrekonstruktion 3D, Kamerapyramiden, Volumen von 4 Kameras. 		
	<ul style="list-style-type: none"> Konfiguration K00 einstellen. 		
	<ul style="list-style-type: none"> Sicht der Kameras auf Ghostmarker und Reflexionen prüfen. 		
	<ul style="list-style-type: none"> 19 Marker für statische Aufnahme an VEMO anbringen. 		
	<ul style="list-style-type: none"> Statische Aufnahme VEMO: <ul style="list-style-type: none"> Aufnahme überprüfen (alle 19 Marker vorhanden?). 		
	<ul style="list-style-type: none"> Marker entfernen oder abdecken. 		
<input type="checkbox"/> Statische Aufnahme des VEMO			
<input type="checkbox"/>			

	Teil 2:	OK Bemerkung
<input type="checkbox"/> dynamische Aufnahme des VEMO's	<ul style="list-style-type: none"> • VP macht sich mit dem VEMO vertraut (VP soll Sitz und Lenkrad nach persönlichen Bedürfnissen einstellen). • VP zieht sich um. • Neun Marker für dynamische Aufnahme an VEMO anbringen. • Dynamische Aufnahme VEMO: <ul style="list-style-type: none"> ○ Aufnahme überprüfen (alle 9 Marker vorhanden?). • Allgemeine Daten der VP abfragen und Versuchsperson vermessen. 	<div style="border: 1px solid black; height: 600px; width: 100%;"></div>
<input type="checkbox"/> Statische Aufnahme	<ul style="list-style-type: none"> • Versuchsperson bemarkern. • Range of Motion: <ul style="list-style-type: none"> ○ Aufnahme überprüfen (alle 45 Marker mind. einmalig vorhanden?). • Dynamische Aufnahme Versuchsperson: <ul style="list-style-type: none"> ○ 5 Vorgänge aufzeichnen, ○ Letzte Aufnahme überprüfen. 	
<input type="checkbox"/> Dynamische Aufnahme der Versuchsperson	<ul style="list-style-type: none"> • Fragenbogen zur eingestellten Konfiguration. VP zur Beantwortung der Fragen Zeit und mehrere Versuche zugestehen. • Nächste Konfiguration einstellen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Sicht der Kameras auf Ghostmarker prüfen, ○ Marker überprüfen. 	

Diskomfortfragebogen

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

1. Wie beurteilen Sie das **Heben des rechten Fußes** ins Fahrzeug?

1 keine Beein- trächtigung	2 geringe Beein- trächtigung	3 mittlere Beein- trächtigung	4 starke Beein- trächtigung	5 sehr starke Beein- trächtigung
-------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

2. Wie beurteilen Sie das **Heben des linken Fußes** ins Fahrzeug?

1 keine Beein- trächtigung	2 geringe Beein- trächtigung	3 mittlere Beein- trächtigung	4 starke Beein- trächtigung	5 sehr starke Beein- trächtigung
-------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

3. Wie beurteilen Sie das **Durchfädeln des rechten Knies** unter dem Lenkrad?

1 keine Beein- trächtigung	2 geringe Beein- trächtigung	3 mittlere Beein- trächtigung	4 starke Beein- trächtigung	5 sehr starke Beein- trächtigung
-------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

4. Wie beurteilen Sie das **Abwinkeln des Oberkörpers und des Kopfes** beim Hinsetzen?

1 keine Beein- trächtigung	2 geringe Beein- trächtigung	3 mittlere Beein- trächtigung	4 starke Beein- trächtigung	5 sehr starke Beein- trächtigung
-------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13

5. Wie beurteilen Sie den **Einstiegskomfort** insgesamt?

1 keine Beein- trächtigung	2 geringe Beein- trächtigung	3 mittlere Beein- trächtigung	4 starke Beein- trächtigung	5 sehr starke Beein- trächtigung
-------------------------------------	---------------------------------------	--	--------------------------------------	---

Abweichungen durch lineare Approximierung der Trajektorien

VP 1	Basis K00	A-Säule K01						B-Säule K03						Schwelller K05						K06					
		1		2		3		1		2		3		1		2		3		1		2		3	
RGSP	x	20	25	17	23	21	23	23	23	25	18	20	19	24	15	24	22	24	22	26	24	21	22	22	22
	y	29	33	25	33	37	37	24	22	28	40	38	39	22	38	30	43	34	40	28	46	25	33	33	33
	z	11	9	11	12	11	10	13	12	12	10	11	10	9	10	10	10	9	10	12	11	10	11	11	11
RGHU	x	8	15	19	15	15	13	12	12	14	13	12	14	14	13	16	21	20	18	13	16	14	15	15	
	y	14	17	12	16	15	15	13	11	13	15	15	14	15	18	16	15	17	13	19	16	13	15	15	
	z	15	14	18	19	15	17	15	15	16	12	14	17	20	20	18	10	13	14	20	21	23	16	16	
LGHU	x	12	14	14	12	14	12	14	16	14	16	17	11	23	18	19	16	16	15	16	16	17	15	15	
	y	11	17	12	13	12	16	19	17	16	13	15	18	10	10	12	16	15	11	12	14	19	14	14	
	z	16	19	19	19	17	18	17	17	19	20	19	16	20	18	19	16	18	17	13	16	18	18	18	
LGSP	x	28	46	33	25	37	31	29	42	34	35	28	31	34	37	32	37	52	25	37	40	29	34	34	
	y	34	39	32	17	23	28	23	43	27	27	20	22	31	25	28	32	37	22	26	18	21	27	27	
	z	4	8	4	8	8	7	7	8	6	8	7	6	11	9	10	5	9	4	8	10	10	7	7	
MW		17	21	18	18	19	19	17	20	19	19	18	18	19	19	20	20	22	18	19	21	18	19	19	
MW Konfig.		19			18		19				18		19				20		19			18			

VP 2	Basis K00	A-Säule K01						B-Säule K03						Schwelller K05						K06					
		1		2		3		1		2		3		1		2		3		1		2		3	
RGSP	x	25	20	21	27	21	34	28	28	31	32	25	25	30	25	32	26	23	29	32	25	25	27	27	
	y	22	38	21	24	19	30	14	19	18	19	29	36	23	22	20	21	14	14	14	15	18	21	21	
	z	11	8	11	11	12	10	11	11	12	10	11	10	10	10	15	9	10	10	10	9	12	11	11	
RGHU	x	13	17	16	14	15	15	14	15	19	11	11	12	10	13	15	13	13	12	16	13	11	14	14	
	y	16	17	13	11	12	12	14	16	12	15	13	17	12	9	14	13	12	13	8	12	13	13	13	
	z	21	18	19	20	16	20	18	15	24	22	15	20	14	13	19	19	23	19	29	28	30	20	20	
LGHU	x	13	10	11	21	20	16	15	15	17	11	12	13	15	15	20	20	13	20	14	17	22	16	16	
	y	14	15	15	11	15	12	17	19	17	14	14	14	13	10	13	13	15	18	15	16	16	15	15	
	z	20	19	18	16	20	17	14	15	17	16	19	15	17	19	16	21	20	20	18	20	21	18	18	
LGSP	x	17	28	21	24	20	12	23	21	19	27	14	21	25	29	24	13	16	22	26	26	26	22	22	
	y	28	29	30	34	30	34	35	34	32	40	32	44	31	26	20	34	39	47	42	38	34	34	34	
	z	11	10	10	9	12	8	8	11	9	11	12	9	10	13	10	8	8	8	9	9	9	10	10	
MW		18	19	17	19	18	18	18	18	19	19	17	20	18	17	18	18	17	19	19	19	20	18	18	
MW Konfig.		18			18		18				19		18				18		19			18			

Werte der „Charakteristischen Punkte“ von VP 1 und VP 2

VP 1		Basis	A-Säule x			B-Säule x		Schweller z		Mittel	StandAbw	
		K00	K01	K02	K03	K04	K05	K06				
RGSP	Pkt 1	x	156	145	250	200	173	193	204	189	35	
		y	-649	-678	-680	-667	-670	-669	-674	-669	10	
		z	111	109	110	110	108	109	111	110	1	
	Pkt 2	z	577	558	553	585	560	494	630	565	41	
		Pkt 4	x	-683	-684	-690	-682	-711	-707	-710	-695	13
	Pkt 5	x	-877	-874	-871	-877	-871	-866	-873	-873	4	
		y	103	109	100	120	90	109	104	105	9	
		z	319	315	313	317	317	316	317	316	2	
	RGHU	Pkt 1	x	36	18	97	58	33	76	49	53	27
			y	-547	-553	-551	-540	-560	-553	-551	-551	6
			z	944	938	935	938	939	942	937	939	3
		Pkt 3	x	-300	-327	-292	-294	-340	-283	-306	-306	21
y			-405	-437	-429	-391	-426	-402	-421	-416	17	
Pkt 5		x	-144	-150	-152	-154	-148	-141	-149	-148	5	
		y	137	131	130	132	136	137	134	134	3	
		z	504	500	498	501	503	501	501	501	2	
LGHU		Pkt 1	x	-4	-32	58	21	1	42	7	13	30
	y		-760	-765	-765	-754	-775	-767	-764	-764	6	
	z		963	956	956	958	961	963	957	959	3	
	Pkt 3	x	-217	-241	-198	-209	-269	-199	-220	-222	26	
		y	-595	-593	-572	-566	-614	-574	-569	-583	18	
	Pkt 4	x	-154	-148	-145	-148	-155	-156	-148	-151	4	
		y	-77	-81	-81	-81	-79	-77	-80	-79	2	
		z	512	514	512	512	515	516	510	513	2	
	LGSP	Pkt 1	x	-268	-287	-240	-254	-267	-236	-235	-255	19
y			-581	-601	-571	-577	-591	-591	-598	-587	11	
z			115	108	114	113	115	114	112	113	2	
Pkt 2		x	-377	-389	-368	-374	-376	-355	-339	-367	17	
		Pkt 4	x	-639	-692	-653	-647	-632	-646	-619	-645	23
Pkt 5		z	446	499	485	488	497	406	537	480	42	
		x	-879	-878	-884	-877	-883	-876	-866	-878	6	
		y	-175	-182	-173	-189	-199	-204	-191	-188	12	
		z	301	293	295	297	295	295	294	296	3	

VP 2		Basis	A-Säule x		B-Säule x		Schweller z		Mittel	StandAbw	
		K00	K01	K02	K03	K04	K05	K06			
RGSP	Pkt 1	x	226	247	313	245	228	262	313	257	37
		y	-711	-712	-735	-745	-747	-748	-734	-734	16
		z	129	127	126	126	125	123	117	124	4
	Pkt 2	z	605	608	588	596	577	520	634	591	36
	Pkt 4	x	-672	-684	-694	-702	-644	-642	-659	-671	24
	Pkt 5	x	-875	-870	-871	-884	-878	-865	-870	-874	6
		y	74	69	57	33	73	61	79	65	15
		z	346	343	343	348	348	349	346	346	2
	RGHU	Pkt 1	x	101	107	173	118	74	120	146	116
y			-583	-595	-604	-606	-601	-608	-613	-602	10
z			966	959	961	960	952	956	949	957	6
Pkt 3		x	-256	-239	-251	-248	-361	-282	-231	-268	44
		y	-327	-313	-357	-437	-438	-435	-383	-396	54
Pkt 5		x	-144	-128	-138	-143	-122	-119	-112	-168	13
		y	93	97	97	87	89	92	82	91	6
		z	504	505	509	499	502	498	502	503	4
LGHU		Pkt 1	x	65	44	132	72	21	66	98	67
	y		-775	-778	-796	-797	-790	-797	-802	-792	11
	z		963	961	961	958	954	962	955	959	3
	Pkt 3	x	-185	-191	-158	-168	-246	-199	-179	-191	29
		y	-506	-500	-493	-489	-493	-461	-449	-484	21
	Pkt 4	x	-111	-124	-135	-120	-134	-122	-101	-121	12
		y	-85	-87	-86	-99	-99	-90	-97	-91	6
		z	509	501	501	504	502	506	488	501	7
	LGSP	Pkt 1	x	-248	-211	-198	-209	-282	-222	-203	-227
y			-579	-578	-574	-555	-592	-561	-570	-573	12
z			125	124	122	122	122	119	121	122	2
Pkt 2		x	-271	-250	-272	-251	-337	-258	-235	-269	33
Pkt 4		x	-649	-597	-597	-605	-661	-660	-629	-628	29
		y	-229	-219	-229	-197	-218	-213	-219	-217	11
Pkt 5		x	-861	-870	-878	-877	-883	-873	-832	-866	17
		y	-229	-219	-229	-197	-218	-213	-219	-217	11
		z	355	346	347	343	346	344	359	349	6

7 Literaturverzeichnis

- Arlt 1998 F. Arlt (1998). Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell. München.
- Arnold 2003 K. Arnold (2003). Untersuchung des Einstiegsvorgangs mittels optischem Messverfahren. Unveröffentlichte Diplomarbeit. BMW. München.
- Auto-Manager 2002 Auto-Manager (2002). Audi nutzt Ergonomie-Software RAMSIS von Human Solutions GmbH. www.auto-manager.de.
- Bell 1990 A. L. Bell, D. R. Pedersen, R. A. Brand (1990). A comparison of the accuracy of several hip center location prediction methods. London, UK.
- BMW 2000 BMW (2000). Lastenheft Ein- und Ausstieg. Interne Veröffentlichung. BMW. München.
- Bortz 1999 J. Bortz (1999). Statistik für Sozialwissenschaftler. Berlin.
- Bubb 2000 H. Bubb, S. Estermann (2000). Influence of Forces on Comfort Feeling in Vehicles. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. Detroit, USA.
- Bubb 1996 H. Bubb, P. Bubb (1996). Möglichkeiten und Grenzen der Umsetzung ergonomischer Erkenntnisse. Psychologische Beiträge 38.
- Chaffin 2002 D. B. Chaffin (2002). Simulation of Human Reach Motions for Ergonomics Analysis. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. München.
- Corlett 1976 E. N. Corlett, R. P. Bishop (1976). A technique for measuring postural discomfort. *Ergonomics*, 9, S. 175-182.
- Faraway 2003 J. J. Faraway (2003). Data-Based Motion Prediction. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. Montreal, Canada.
- Faraway 2001 J. J. Faraway, J. Hu (2001). Modeling Variability in Reaching Motions. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. Washington, USA.
- Galopin 2001 S. Galopin (2001). Vehicle Accessibility. Presented at International RAMSIS User Conference. München.
- Geyer 2001 M. Geyer, B. Rösch (2001). Human Modeling and e-Manufacturing. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. Washington, USA.

- Giese 2003 M. A. Giese, B. Knappmeyer, H. H. Bühlhoff (2003). Automatic synthesis of sequences of human movements by linear combination of learned example patterns.
- Giese 2000 M. A. Giese, T. Poggio (2000). Morphable models for the analysis and synthesis of complex motion pattern. *International Journal of Computer Vision* 38, 59-73.
- Helander 1997 M. G. Helander, L. Zhang (1997). Field studies of comfort and discomfort in sitting, *Ergonomics*, 40, S. 895-915.
- Höllrich 1992 M. Höllrich (1992). Untersuchung des Einstiegsvorgangs beim PKW mittels Bildverarbeitung und Softdummy. Unveröffentlichte Diplomarbeit. BMW. München.
- Ilg 2002 W. Ilg, M. A. Giese (2002). Modeling of movement sequences based on hierarchical spatial-temporal correspondence of movement primitives.
- Jong 2002 M. de Jong (2002). Entwicklung einer Arbeitsmethodik zur Untersuchung der Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen von einem variablen Ein- und Ausstiegsmodell und realen Fahrzeugen und Validierung. Unveröffentlichte Diplomarbeit. BMW. München.
- Kadaba 1990 M. P. Kadaba, H. K. Ramakrishnan, M. E. Wooten (1990). *Measurement of Lower Extremity Kinematics During Level Walking*. New York, USA.
- Layer 1992 J. Layer (1992). Untersuchung dynamischer Vorgänge am Menschen beim Einsteigen in einen PKW. Unveröffentlichte Diplomarbeit. BMW. München.
- Milberg 1994 J. Milberg (1994). *Unsere Stärken stärken - Der Weg zu Wettbewerbsfähigkeit und Standortsicherung*. Landsberg/Lech.
- Monnier 2003 G. Monnier, X. Wang, J.-P. Verriest, S. Goujon (2003). Simulation of Complex and Specific Task-Oriented Movements - Application to the Automotive Seat Belt Reaching. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. Montreal, Canada.
- Monnier 2002 G. Monnier, X. Wang, C. Dolivet, J.-P. Verriest, F. Lino, F. Dufour (2002). Experimental Investigation on the discomfort of safety belt handling. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. München.
- Müller 2003 T. Müller (2003). *Massarbeit für den Komfort*. Stern. Hamburg.

- Park 2003 W. Park, D. B. Chaffin, K. Rider, B. J. Martin (2003). Simulating Complex Manual Handling Motions Via Motion Modification: Performance Evaluation of Motion Modification Algorithm. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. Montreal, Canada.
- Park 2002 W. Park, D. B. Chaffin, K. Rider, B. J. Martin (2002). Memory-based Motion Simulation. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. München.
- Ramakrishnan 1991 H. K. Ramakrishnan, M. E. Wootten, M. P. Kadaba (1991). On the estimation of three dimensional joint angular motion in gait analysis. Las Vegas, USA.
- Ramsis 2003 Homepage RAMSIS (2003). www.ramsis.de.
- Reichl 2002 S. Reichl (2002). Die Vision Digital Car und die Bedeutung für den Produktentstehungsprozess. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. München.
- Rohrmann 1978 B. Rohrmann (1978). Empirische Studien zur Entwicklung von Antwortskalen für die sozialwissenschaftliche Forschung.
- Schmidtke 1993 H. Schmidtke (1993). Ergonomie. München.
- Schrader 2002 K. Schrader, W. Remlinger, M. Meier (2002). Mixed Reality with RAMSIS. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. München.
- Seitz 2001 T. Seitz, H. Bubb (2001). Human-model Based Movement-capturing Without Markers for Ergonomic Studies. Presented at SAE Digital Human Modeling Conference. Washington, USA.
- Sellmeir 2002 F. Sellmeir (2002). Aufzeichnung des Einstiegsvorgangs mittels Motion-Capturing-System "Vicon 512". Unveröffentlichte Diplomarbeit. BMW. München.
- Sivak 1992 B. Sivak (1992). The contributions of Peripheral and Central Vision. Amsterdam, Niederlande.
- SPSS 2002 SPSS (2002). SPSS V11 Benutzerhandbuch.
- VDA 239-01 VDA Richtlinie 239-01 (1979). Maßstauschliste Personenkraftwagen. Frankfurt.
- Vicon 2003 Homepage Fa. Vicon (2003). www.vicon.com.
- Vicon 2002 Vicon: The Vicon Manual (2002). Oxford, UK.
- Vicon 1999 VICON 512 (1999). Manual, S. 43-53.
- Vink 2002 P. Vink (2002). Comfort. Delft, Niederlande.

- Winter 2002 O. Winter (2002). Ein- und Ausstiegsuntersuchungen mittels optischem Messverfahren. Unveröffentlichte Diplomarbeit. BMW. München.
- Zimmermann 2000 P. Zimmermann (2000). Virtual Reality (VR) - Forschung und Anwendung bei Volkswagen. In: Virtualisierung und Virtualität.

Lebenslauf

Name	Stefan Rigel
Geburtsdatum	23.04.1972
Geburtsort	Augsburg
Schulbildung	1978 – 1982 Hans-Adelhoch Grundschule in Augsburg 1982 – 1992 Maria-Theresia Gymnasium in Augsburg
Studium	1992 – 1998 Maschinenwesen an der Technischen Universität in München
Diplomarbeit	Visionäres Szenario einer Produktentwicklung am Beispiel eines Automobilherstellers. Projekt in Zusammenarbeit des iwb (TU München) und der BMW AG, München
Abschluss	1998 als Diplom-Ingenieur univ.
Promotion	2001 – 2004 bei der BMW AG in München im Bereich Design Ergonomie: Entwicklung und Validierung einer Methode zur quantitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einen Pkw
berufliche Tätigkeiten	1998 – 2001 als Versuchsingenieur bei der BMW AG in München im Bereich Versuch Gesamtfahrzeug seit 2004 als Konzeptingenieur bei der AUDI AG in Ingolstadt im Bereich Konzeptentwicklung

München, Januar 2006