Alexander Cherednichenko

Funktionales Modell der Einstiegsbewegung in einen PKW

Herbert Utz Verlag · München

Ergonomie

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2007

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2008

ISBN 978-3-8316-0766-2

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.de

Zusammenfassung

Zu den zentralen ergonomischen Fragestellungen in der Automobilindustrie gehört neben dem Sitz- und Bedienungskomfort der Ein- und Ausstieg. Im Gegensatz zu den vielfältig untersuchten Fragen nach der Insassenergonomie ist die ergonomische Beurteilung dynamischer Vorgänge – wie z. B. der Einstieg – immer noch nur begrenzt analytisch durchführbar. Die menschlichen Willkürbewegungen sind sehr komplex, unterliegen großen Schwankungen und werden stark von unterschiedlichen Parametern beeinflusst, deren Wirkungen noch zum größten Teil unbekannt sind.

Die weit verbreitete Methode des Vergleichs von geometrischen Maßen einzelner Fahrzeuge und daraus resultierende Schlussfolgerungen – bekannt auch als Benchmarking – erlaubt nur eine eingeschränkte und stark erfahrungsbasierte Diagnose der vorliegenden Situation. Solche sogenannten induktiven Schlüsse bilden Tatsachen ab, können aber bestehende logische Zusammenhänge in einem System nicht offen legen [Cher06]. Dieser induktiven Herangehensweise der empirischen Geltung wird die deduktive Methode der Erkenntnislogik entgegen gestellt. Erst die Antworten auf solche Fragen, z. B. wie die Einstiegsbewegungen begründet und beschrieben werden, wovon sie logisch abhängen und womit sie im Widerspruch stehen, erlauben eine umfassende ergonomische Analyse und Beurteilung.

Diese Forschungsarbeit ist ein Bestandteil des BMW Forschungs- und Entwicklungsprojektes „RAMSIS dynamisch“. Im Rahmen dieser Arbeit wurden menschliche Bewegungen beim Einstieg in verschiedene Fahrzeugkonfigurationen beobachtet, analysiert, mathematisch modelliert und simuliert. Dafür wurden drei Reihenuntersuchungen zur Erhebung der Bewegungsdaten konzipiert und durchgeführt. Die Bewegungsaufnahme erfolgte mit dem Motion Capturing System VICON in einem speziell dafür entwickelten variablen Versuchsaufbau VEMO. An den Versuchen nahmen insgesamt 25 Versuchspersonen in bis zu 20 unterschiedlichen Fahrzeugkonfigurationen teil. Durch die Systematisierung und Optimierung des Versuchsablaufs konnte der maximal zu erwartende Messfehler in der gesamten Prozesskette von der Bewegungsaufzeichnung bis zur Bereitstellung der Analysedaten mit 11,8 mm im akzeptablen Bereich gehalten werden.

Die Bewegungsanalyse zeigte, dass die Bewegungsregulation beim Einstieg basierend auf der Regelungstheorie in die Planungs-, Führungs- und Stabilisierungsebene eingeteilt werden kann. Den einzelnen Regulationsebenen wurden klare Funktionen während der Vorbereitung und Ausführung der Einstiegsbewegung zugewiesen, z. B. wurde die Einstiegsbewegung auf der Führungsebene in fünf funktionale Bewegungsphasen eingeteilt. Darüber hinaus konnte ein rückwärtsgerichteter Verlauf der Planungsschritte während der Bewegungsvorbereitung nachgewiesen werden. Die Rückwärtsgerichtetheit ist damit das Hauptmerkmal der Bewegungsplanung. Die Bewegungsabläufe sowie deren Veränderungen in ausgewählten Fahrzeugkonfigurationen wurden danach hinsichtlich ihrer funktionalen, morphologischen, biomechanischen und funktionell-anatomischen Eigenschaften analysiert. Dabei konnten besondere Eigenschaften einzelner „führender“ Körperteile bei der Ausführung komplexer Ganzkörperbewegungen aufgezeigt werden. Diese führenden Körperteile (FKT) bestimmen die Bewegung des Gesamtkörpers, indem sie diesen von einem zum nächsten funktionalen Bewegungsziel lenken. Es wurde mathematisch nachgewiesen, dass die Bewegung der FKT im Raum als eine Bewegung in einer Ebene beschrieben werden kann. Die maximale mittlere statistische Abweichung von einer

solchen Bewegungsebene lag bei 10,6 mm. Einen weiteren bedeutenden Schwerpunkt der Bewegungsanalyse bildete eine gesonderte Versuchsreihe, die die Bewegungsstrukturen beim Einstieg hinsichtlich ihrer funktionalen und räumlichen Verläufe auf die relative Konstanz hin überprüfte. Dabei zeigte sich, dass die individuelle Reaktion auf die Veränderung festgelegter Fahrzeugkonfigurationen immer konstant ist. Das bedeutet, dass eine relative Veränderung des Bewegungsraums immer eine proportionale relative Veränderung des räumlichen Bewegungsverlaufs verursacht.

Ausgehend von der Bewegungsanalyse wurden Modellparameter abgeleitet und mit den Methoden der beurteilenden Statistik sowie höheren Mathematik auf die fahrzeugspezifischen Zusammenhänge geprüft. Die skalaren Parameter in den multivariaten statistischen Modellen, z. B. die Bewegungsdauer, konnten durch den Einsatz der funktionalen Datenanalyse mit funktionalen Parametern, z. B. dem Geschwindigkeitsverlauf, kombiniert werden. Für eine effiziente Verarbeitung der großen Bewegungsdatenmengen wurden die mathematischen Funktionen mit Hilfe des Statistikprogramms R [Rprj06] zu spezifischen Analyseeinheiten zusammengefasst und in Form einer Programmdatenbank organisiert. Darauf basierend wurden statistische Modelle gebildet, die es ermöglichen, für das jeweilige führende Körperteil die Lage der Bewegungsebene im Raum sowie den Verlauf der Bewegungsbahn in dieser Bewegungsebene abhängig von Fahrzeugparametern zu berechnen.

Für die Bewegungssimulation wurden die theoretischen Grundlagen der reversiven Bewegungsplanung zur Konstruktion des Bewegungsablaufs beim Einstieg ins Fahrzeug verwendet. Dabei werden die Bewegungen der führenden Körperteile ausgehend vom Ziel hin zum Start berechnet, die charakteristischen Stützhaltungen prognostiziert und mit dem Menschmodell RAMSIS visualisiert. Die statische kraftbasierte Haltungsprognose im Ergonomiesystem RAMSIS wurde dafür auf die dynamische Haltungssimulation erweitert. Für die Darstellung der Einstiegsbewegung werden dazu die Trägheitskräfte der führenden Körperteile zu bestimmten Zeitpunkten anhand ihrer Teilkörpermassen und geschätzten Bewegungsbahnen ermittelt und der RAMSIS-Kraft-Haltungssimulation als Randbedingungen übergeben. Diese stellt entsprechend das dynamische Systemgleichgewicht durch die Veränderung der Körperhaltung ein und bestimmt auf diese Weise die Position der geführten Körperteile.

Das ausgearbeitete Modellierungs- und Simulationskonzept wurde anhand einer separaten realen Versuchsstichprobe plausibilisiert. Die durchgeführten Beispielrechnungen zeigten, dass die Bewegungsbahnen der führenden Körperteile für eine beliebige Person in einer bestimmten Fahrzeugkonfiguration mit einer akzeptablen Genauigkeit (von maximal 25 mm) vorhergesagt werden können. Darüber hinaus wurden die realen Bewegungen der geführten Körperteile mit den von RAMSIS simulierten verglichen. Die größten Unterschiede wurden bei einzelnen Analysepunkten an den Übergängen der funktionalen Phasen festgestellt. Die Ursachen für diese Abweichungen liegen einerseits im RAMSIS-Modell selbst mit seiner eingeschränkten lateralen Flexibilität im Becken- und Oberkörperbereich und andererseits in der Unvollständigkeit der Systembedingungen z. B. die unbekannten Trägheitskräfte der geführten Körperteile. Übergreifend betrachtet befindet sich die Simulationsstreuung innerhalb der real beobachteten interindividuellen Vertrauensbereiche. Deswegen kann sowohl der Modellierungs- als auch der Simulationsansatz als plausibel und zielführend bestätigt werden.

Das entwickelte funktionale Bewegungsmodell erlaubt somit eine zuverlässige Simulation der Einstiegsbewegung und bildet eine wesentliche Grundlage für eine weitergehende ergonomische Beurteilung von Fahrzeugkonzepten.

Abstract

Along with seating and operating comfort, ingress/egress is among the most important ergonomic concerns in automotive design. While static driver and passenger ergonomics have been researched extensively, ergonomic analysis of dynamic occupant behaviour, for example ingress and egress motion, remains possible only to a limited extent. Human motion is seemingly arbitrary, of a highly complex nature, subject to large variations and determined by parameters of which the individual influence is largely unknown.

The widespread method of comparing geometric dimensions of different vehicles, generally referred to as benchmarking, allows for limited and mostly experiential ergonomic analyses. The so-called inductive conclusions resulting from benchmarking experiments reflect certain facts, but do not reveal logical relations within the overall system [Cher06]. Counterpart of the inductive approach with its empirical validity is the deductive approach of knowledge-based research. Only when such questions as how ingress motion can be explained and described or by what parameters it is logically affected and constrained can be answered, comprehensive ergonomic analysis and assessment will be possible.

This study is part of the BMW research and development project “RAMSIS dynamic”. As part of this study human vehicle ingress motion for various vehicle configurations was observed, analyzed, mathematically modelled and simulated. For the collection of human motion data, three experiments were conducted. A VICON motion capture system was used to record human ingress motion in a variable test setup, called VEMO. A total of 25 subjects participated in the experiments and 20 different vehicle configurations were used. Through systemization and optimization of test procedures, the maximum measurement error in the entire experimental process chain, from motion capturing to the final preparation of analysis data, was 11.8 mm, which was considered to be within an acceptable range.

It was demonstrated that, based on the principles of general regulation theory, regulation of human ingress motion can be divided in a planning level, a guiding level and a stabilization level. To each level distinct functions can be assigned during preparation and execution of an ingress motion. For example, ingress motion at the guiding level was divided into five functional motion phases. Additionally, it was demonstrated that during preparation of an ingress motion, the required motion steps are planned in reverse order. This reverse orientation is the main characteristic of motion planning. Subsequently the recorded motion sequences and their variations in the selected vehicle configurations were analyzed with respect to their functional, morphological, biomechanical and functional-anatomical characteristics. This revealed particular characteristics of so-called “leading body parts” during execution of a complex motion by the entire body. These leading body parts (LBP) control the motion of the entire body by “steering” the body from one functional motion target to the next. It was mathematically proven that spatial motion of LBPs can be described in a plane. The maximum mean statistical deviation from such motion planes was 10.6 mm. Another main focus of the analysis of ingress motion constituted of a separate experiment, in which the relative constancy of motion patterns was analyzed with respect to spatial and functional progression. Analysis showed that the individual response to modifications of a vehicle configuration is at all times constant. This means that a relative modification of the environment consistently causes a proportional relative modification of the spatial motion pattern.

Based on analysis of the recorded motion data, model parameters were derived and, using methods from evaluative statistics and higher mathematics, verified with respect to vehicle-specific correlations. By means of functional data analysis, scalar parameters in the multivariate statistical models, e.g. motion time, were combined with functional parameters, e.g. velocity progression. To efficiently process the large quantity of motion data, mathematical functions were grouped in specific analysis clusters, using the statistics software R [Rprj06], and organized in the form of a program database. These formed the foundation for statistical models that, for each leading body part and dependent on vehicle parameters, enable calculation of the spatial orientation of its motion plane, as well as the corresponding motion trajectory in that plane.

For motion simulation the theoretical fundamentals of reversive motion planning were used. The reverse motion of the LBPs, i.e. from target to start are calculated while the corresponding characteristic support postures are predicted and visualized with the digital human model RAMSIS. For this purpose, the statistical force-based posture prediction of RAMSIS was enhanced by a dynamic posture simulation. For simulation of ingress motion the inertia forces of the LBPs are determined for specific points in time, based on the masses of the corresponding body segments and their estimated motion trajectories. They serve as input constraints for RAMSIS' force-based posture simulation. RAMSIS automatically calculates the corresponding dynamic system equilibrium by adjusting the overall body posture and by doing so determines the position of the LBPs.

The modelling- and simulation concept was validated by means of a separate experiment with real subjects. The resulting example calculations showed that for a random subject in a defined vehicle configuration, motion trajectories of leading body parts can be predicted with an acceptable accuracy (of maximal 25 mm). In addition, real LBP motion was compared with LBP motion simulated by RAMSIS. The largest deviations at selected analysis points were identified at transitions between the functional phases. The causes for these deviations are on the one hand the limited lateral flexibility in the pelvis and thorax areas of the RAMSIS model, on the other hand incomplete system input, e.g. the unknown inertia forces of the non-leading (guided) body parts. Overall, variance of simulation results lies within the inter-individual confidence intervals observed in reality. Thus, the modelling as well as the simulation approach can be considered plausible and feasible.

Summarizing, the functional motion model developed in the course of this study enables sufficiently accurate and reliable simulation of ingress motion and provides a substantial basis for advanced ergonomic evaluation of vehicle concepts.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ..... **I**
Abstract ..... **III**
Danksagung ..... **V**
Begriffe ..... **IX**
Abkürzungen ..... **X**
1 Motivation und Forschungsbedarf **1**
1.1 Ein-/Ausstieg in der Fahrzeugkonzeptentwicklung 1
1.1.1 Ein-/Ausstiegsanalyse als Aufgabe der Fahrzeugergonomie 1
1.1.2 Anforderungen an eine ergonomische Ein-/Ausstiegskonstruktion 2
1.1.3 Fahrzeugkonzept und Konzeptparameter 3
1.1.4 Konzeptspezifische Zusammenhänge 4
1.2 Ansätze zur Bewegungsmodellierung und -simulation 6
1.2.1 Definition von Bewegung und Modell 6
1.2.2 Modellierungs- und Simulationsansätze für Ein-/Ausstieg 6
1.3 Forschungsbedarf und Aufgabenstellung 8
1.3.1 Einleitende methodologische Betrachtung 8
1.3.2 Erste Eingrenzung des Problems 8
1.3.3 Aufgabenstellung 9
1.3.4 Lösungsansatz 10
2 Theoretische Einordnung **12**
2.1 Bewegungsregulation 12
2.2 Bewegungsplanung 13
2.2.1 Bewegung als Gegenstand psychologischer Untersuchungen 13
2.2.2 Handlung in der Bewegungsregulation 14
2.2.3 Zielbildung und Festlegung des Handlungsweges 15
2.3 Bewegungsstabilisierung 16
2.3.1 Gelenk- und Muskelfunktionen für die Kraftübertragung 16
2.3.2 Der menschliche Bewegungsapparat 18
2.3.3 Gültigkeit biomechanischer Regeln und Prinzipien 19
2.4 Bewegungssteuerung 20
2.4.1 Zentrales Nervensystem und Bewegungsprogrammierung 20
2.4.2 Motorisches Lernen und Komplexität von Bewegungsverläufen 22
2.5 Zusammenfassung zur Gesamteinordnung 23
3 Methodik **25**
3.1 Forschungsansatz 25
3.1.1 Ablaufplanung des Forschungsprozesses 25
3.1.2 Vorbereitung von Entscheidungen bei der Datenanalyse 26
3.2 Bewegungsmessung und Bewegungsrekonstruktion 27
3.2.1 Methoden der Bewegungserfassung 27
3.2.2 Motion Capturing System VICON 28
3.2.3 Variables Ein-/Ausstiegsmodell (VEMO) 29
3.2.4 Anforderungen an den Versuchsaufbau 31
3.2.5 Bewegungsrekonstruktion 32
3.3 Bewegungsanalyse 34
3.3.1 Einstiegsstrategien und Bewegungsphasen 34
3.3.2 Vergleich von Einstiegsbewegungen 34
3.3.3 Festlegung der Analysebewegungen 35
3.3.4 Anforderungen an die Bewegungsmodellierung 38
3.3.5 Messgenauigkeit und Fehlerminimierung 39

3.3.6 Vorgehensweise zur ganzheitlichen Bewegungsanalyse 41
3.4 Mathematisch-statistische Analyse 43
3.4.1 Beschreibung der Bewegungsdaten 43
3.4.2 Multivariate statistische Modelle 43
3.4.3 Funktionale Datenanalyse 45
3.5 Festlegung der Modellparameter 47
3.5.1 Umgebungsspezifische Parameter 47
3.5.2 Bewegungsspezifische Parameter 48
4 Versuchsdurchführung und Bewegungsanalyse 50
4.1 Empirische Basiserhebung (Versuch A) 50
4.1.1 Zielsetzung 50
4.1.2 Probandenkollektiv 50
4.1.3 Konfigurationsauswahl 51
4.1.4 Versuchsablauf 54
4.2 Analyse der Bewegungsstrukturen 55
4.2.1 Struktur der Einstiegsbewegung 55
4.2.2 Festlegung der Planungsphasen 55
4.2.3 Festlegung der Funktionsphasen 56
4.2.4 Biomechanische Betrachtung der Funktionsphasen 58
4.2.5 Beanspruchungen im Bewegungsapparat beim Einstieg 61
4.3 Definition führender Körperteile 64
4.3.1 Bewegungsbestimmende Körperteile und motorische Führung 64
4.3.2 Hypothese der planaren Raumkoordination 66
4.3.3 Kriterien zur Bestimmung der Führungsabschnitte 67
4.3.4 Interindividuelle Streuung 70
4.4 Erweiterte Versuchsreihe (Versuch B) 71
4.4.1 Zielsetzung 71
4.4.2 Probandenkollektiv 72
4.4.3 Konfigurationsentwicklung 73
4.4.4 Versuchsablauf 74
4.5 Theorie der allgemeinen Bewegungskoordination 75
4.5.1 Nachweis der allgemeinen funktionalen Bewegungsregulation 75
4.5.2 Nachweis der allgemeinen motorischen Bewegungsregulation 75
4.6 Bestätigung der allgemeinen Bewegungskoordination 78
5 Bewegungsmodellierung 79
5.1 Bewegung führender Körperteile 79
5.1.1 Zur allgemeinen Systembetrachtung 79
5.1.2 Phase I: Annäherung 79
5.1.3 Phase II: Stabile Stützposition einnehmen 81
5.1.4 Phase III: Sitzposition einnehmen 96
5.1.5 Phase IV: Überführung in die frontale Sitzposition 105
5.1.6 Phase V: Fahrerhaltung einnehmen 115
5.1.7 Zeitliche Phasensynchronisation 116
5.2 Ableitung der Stabilitätsparameter 117
5.2.1 Gültigkeitsbereiche der Modellparameter 117
5.2.2 Verwendung von Stabilitätsparametern im Bewegungsmodell 118
6 Bewegungssimulation 121
6.1 Gesamtkonzept der Bewegungssimulation 121
6.2 Abbildung auf RAMSIS 122
6.2.1 Lösungsweg des Abbildungsproblems 122
6.2.2 Anpassung des Modells an die reale Bewegung 122
6.3 Definition der Stützhaltungen 124

6.4 Einführung des Kraft-Haltungsmodells ... 126
6.4.1 Statische Kraft-Haltungsprognose ... 126
6.4.2 Dynamische Kraft-Haltungsprognose ... 127
7 Plausibilisierung des Modells ... 129
7.1 Inhalt und Umsetzung ... 129
7.1.1 Plausibilisierungsansatz (Versuch C) ... 129
7.1.2 Probanden- und Konfigurationsauswahl ... 130
7.1.3 Plausibilisierung des Bewegungsmodells ... 131
7.1.4 Plausibilisierung der Bewegungssimulation ... 135
7.2 Diskussion der Abweichungen ... 138
8 Diskussion ... 140
8.1 Bewertung der Ergebnisse ... 140
8.2 Diskomfortempfinden beim Ein-/Ausstieg ... 142
8.3 Weitere Schritte zum allgemeinen Bewegungsmodell ... 143
9 Anhang ... 144
9.1 Einstiegsstrategien ... 144
9.1.1 „Schlüpf“-Strategie ... 144
9.1.2 „Fädel“-Strategie ... 144
9.1.3 „Plumps“-Strategie ... 144
9.1.4 „Hürden“-Strategie ... 144
9.2 Bewegungsrichtungen, -ebenen und -achsen ... 145
9.3 Markerpositionierung ... 146
9.4 Verstellbereiche der VEMO-Knoten ... 147
9.5 Spezifische Gesamtfahrzeugmaße ... 148
9.6 Versuchsdokumentation. ... 149
9.6.1 Versuch A: Checkliste zur Konfigurationseinstellung ... 149
9.6.2 Versuch A: Reihenfolge der Versuchskonfigurationen ... 150
9.6.3 Versuch A: Vermessungstabelle ... 150
9.6.4 Versuch A: Versuchsablaufplan ... 151
9.6.5 Versuch B: Versuchskonfigurationen ... 152
9.6.6 Versuch C: Körpermaße und Körperteilmassen der Testperson ... 153
9.6.7 Versuch C: Fahrzeugmaße der Plausibilisierungskonfiguration ... 154
9.6.8 Versuch C: Analysepunkte am RAMSIS ... 154
9.7 Abbildungsverzeichnis ... 155
9.8 Tabellenverzeichnis ... 158
9.9 Literaturverzeichnis ... 160

Begriffe

Begriff	Erläuterung
Afferenz	Signal, das vom Rezeptor zum zentralen Nervensystem geleitet wird
Agonist	Bewegungsbestimmender Muskel
Antagonist	Dem Agonist entgegenwirkender Muskel
Bewegung	Äußere, umweltbezogene Komponente der menschlichen Tätigkeit, die in Ortsveränderungen des menschlichen Körpers beziehungsweise seiner Teile und der Wechselwirkung menschlicher Kräfte zwischen Organismus und Umwelt zum Ausdruck kommt [MeSn98].
Bewegungsrhythmus	Merkmal der zeitlichen Ordnung der Bewegung. Zeigt sich in der Dynamik und dem räumlich-zeitlichen Verlauf der Bewegung. Tritt beim Einstieg als Subjektrhythmus in Erscheinung.
Dilatation	Ausdehnung
Efferenz	Signal, das vom zentralen Nervensystem weg zum Erfolgsorgan geleitet wird
Extrafusal	Arbeitsmuskulatur. Außerhalb der Muskelspindeln gelegene Muskelfaser
Handlung	Eine über die Zeit verlaufende Einheit zielgerichteten Verhaltens [Hack83]
Histologie	Die Wissenschaft von den biologischen Geweben
Führendes Körperteil	Das Körperteil mit funktionaler und motorischer Führungsaufgabe während einer Bewegungsphase, das die Bewegung des Gesamtkörpers bestimmt
Implizites Lernen	Unbewusste Aneignung des (motorischen) Wissens
Intrafusal	Muskulatur der Muskelspindel
Invariante	Konstante, Unveränderliche
Inverse Dynamik	Bestimmung der Kräfte und Momente, die zu einem bestimmten Bewegungszustand geführt haben
Kinästhetischer Analysator	Rezeptoren zur Aufnahme, Weiterleitung und Verarbeitung von Bewegungsempfindung (z. B. Golgi-Organe oder Muskelspindel)
Kinesiologie	Wissenschaft menschlichen Bewegungsverhaltens [Barh82]
Kohärent	Zusammenhängend
Konzentrische Muskelarbeit	Überwindungsarbeit bei der Verkürzung des Muskels
Modell	Annahmen über Entstehung und Struktur der zu analysierenden Daten [Sach02]
Neuromuskulär	Nerven und Muskeln betreffend oder von Nerven und Muskeln ausgehend
Perzeptiv	Wahrnehmend
Plausibilität	Stimmigkeit, Richtigkeit
Plausibilisierung	Eine Methode, in dessen Rahmen ein Wert oder allgemein ein Ergebnis überschlagsmäßig daraufhin überprüft wird, ob es überhaupt plausibel sein kann
Prävalenz	Krankheitshäufigkeit
Propriozeption	Rezeptoren der Tiefensensibilität. Vermitteln überwiegend die unbewusste Lageempfindung [Mann04]

Propulsiv	Vorantreibend
Pronation	Mediale, nach innen gerichtete Drehbewegung der Extremitäten um ihre Längsachse
Renshawhemmung	Hemmung der Aktivität der Motorneurone
Sensomotorisch	Zusammenspiel von Sinnesorganen und Muskeln
Supination	Der Pronation entgegengesetzte Drehbewegung
Systemergonomie	Die methodische, ergonomische Vorgehensweise bei der Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen, basierend auf der Denkweise der Systemtechnik. Die Systemergonomie befasst sich mit der Entwicklung von ergonomischen Analyse- und Gestaltungsmethoden und ihren Anwendungen auf die Lösung von Mensch-Maschine-Systemproblemen, die während der Entwicklung einer Systemauslegung entstehen. [Smke93 zit. nach Bubb S. 305]
Tiefensensibilität	Eigenwahrnehmung. Sie vermittelt alle Informationen des Bewegungsapparates: Anspannung der Muskeln und Sehnen, Stellung der Gelenke, Haltung und Stellung des Kopfes, Kraftaufwand. [Mann04]

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CAS	Computer Aided Styling
d.h.	das heißt
DLT	Direkte lineare Transformation
engl.	Englisch
EPSP	Erregendes postsynaptisches Potential
Fzg.	Fahrzeug
GCIE	Global Car Manufacturers Information Exchange Group
ggf.	gegebenenfalls
GKL	Großklassenlimousine
H-Punkt	Hüftpunkt
KQ	Kleinste Quadrate
PNS	Peripheres Nervensystem
SG	Subject Group
SRP	Sitzreferenzpunkt
SSE	Sum of Squares Error
SVD	Single Value Decomposition
u. a.	unter anderem
VEMO	Variables Ein-/Ausstiegsmodell
vgl.	vergleiche
VP	Versuchsperson
z. B.	zum Beispiel
ZNS	Zentrales Nervensystem

1 Motivation und Forschungsbedarf

1.1 Ein-/Ausstieg in der Fahrzeugkonzeptentwicklung

1.1.1 Ein-/Ausstiegsanalyse als Aufgabe der Fahrzeugergonomie

Nach aktuellen Angaben der „International Association for the Study of Pain“ (IASP) haben etwa 20% der Erwachsenen in den Industrienationen chronische Schmerzen insbesondere in den Bereichen Wirbelsäule und Hüftgelenke. Laut tns-emnid-Umfrage aus dem Jahr 2004 [TNS04] zur Rückengesundheit im Auftrag des BKK Bundesverbandes klagen mehr als zwei Drittel (68%) der Bevölkerung in Deutschland im Alter über 14 Jahren über Rückenschmerzen. Im Vergleich zum Jahr 1998 mit 53% ergibt das eine Steigerung um 15% innerhalb von sechs Jahren. Rückenschmerzen haben demnach 17% der Befragten mindestens einmal im Monat (1998: 14%), 16% einmal pro Woche (1998: 10%) und 17% täglich (1998: 6%). Überdurchschnittlich zugenommen haben die Beschwerden dabei in der Altersgruppe der 14- bis 29jährigen (von 36 auf 61%). Die steigende Tendenz der degenerativen Erkrankungen des Bewegungsapparates führt zu einem verstärkten Kundenbewusstsein für menschengerechte Produkte. Dies stellt die Produktergonomie vor die Aufgabe, die möglichen Belastungsquellen im Mensch-Maschine-System bereits während des Produktentstehungsprozesses zu identifizieren und geeignete Maßnahmen zu deren Minimierung zu entwickeln. Aus diesem Grund wird die Systemergonomie in die Reihe der wichtigsten Felder der Produktarchitektur wie z. B. Sicherheit, Umweltverträglichkeit, Qualität etc. eingeordnet.

Das Fahrzeug als Arbeits- oder Transportmittel stellt mit seiner Zugänglichkeit sowie dem fahrzeugspezifischen Sitz- und Fahrkomfort ein System von Randbedingungen dar, welches hohe individuelle Beanspruchungen des Bewegungsapparates verursacht. Ein Beweis dafür ist z. B. eine erhöhte Prävalenz von Krankheiten des Bewegungsapparates mit 17,2% bei Berufsfahrern [Haas86]. Bereits der Zugang zur Sitzposition ist wegen seiner motorischen und biomechanischen Komplexität eine Herausforderung für den Bewegungsapparat. Der Einstieg ins Fahrzeug erfordert im Vergleich zu normalen Alltagsbewegungen nicht nur einen erhöhten Koordinationsaufwand, sondern auch eine größere Kraftanstrengung und infolgedessen eine erhöhte Beanspruchung der gesamten Skelett- und Bandstrukturen. Die Ursache dafür sind äußere und innere Kräfte, die auf die einzelnen Teile des menschlichen Bewegungsapparates während des Bewegungsvollzuges einwirken. Die erhöhte Belastung der Gelenke steigert das Risiko einer dauerhaften Schädigung der Gelenkknorpelschicht und damit die Entstehung des Krankheitsbildes der Arthrose [Grub87].

Die Produktergonomie in der Automobilindustrie ist damit zum Handeln aufgefordert. Dies bestätigen zahlreiche gegenwärtige Anstrengungen von Automobilherstellern wie BMW, DaimlerChrysler, PSA, Renault, Ford, GM und Toyota, eine breite Wissensbasis über den Ein-/Ausstieg aufzubauen sowie spezielle Werkzeuge zur Bewegungssimulation zu entwickeln. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dabei helfen, die bezüglich Belastung/Beanspruchung zulässigen Bewegungsbereiche beim Ein-/Ausstieg ins Fahrzeug bereits in frühen Produktentwicklungsphasen abzuschätzen und entsprechende Anforderungen der Fahrzeugkonzeptentwicklung zur Verfügung zu stellen.

1.1.2 Anforderungen an eine ergonomische Ein-/Ausstiegskonstruktion

Der Ein-/Ausstiegskomfort definiert eine kundenwerte Eigenschaft des Fahrzeugs und setzt damit die Festlegung der entsprechenden Ziele während der Fahrzeugentwicklung voraus. Die Positionierung des Fahrzeugs im Markt und im Wettbewerbsumfeld bestimmt die Ausprägung bzw. die Schärfe der Zielsetzung im Produkteigenschaftsprofil. Demnach ist die Anforderung an einen komfortablen Ein-/Ausstieg z. B. bei den GKL-Fahrzeugen im Vergleich zu Fahrzeugen der UKL bzw. Roadster-Klasse deutlich höher.

Damit der Erfüllungsgrad verschiedener Konzepte hinsichtlich dieses Kundennutzens beurteilt werden kann, müssen die Ziele eindeutig quantifizierbar und messbar sein. Grundsätzlich ist der Komfort eine subjektive Wahrnehmung eines Individuums in einer bestimmten Situation. Deswegen ist der Komfort objektiv nicht messbar, sondern muss aus einer Reihe beobachtbarer Ergebnisse erschlossen und interpretiert werden [Bauc98]. Die Überführung der subjektiven Überzeugung in die wissenschaftliche Objektivität gelingt der Ergonomie durch die Anwendung von dem Konzept des Diskomforts. Der Diskomfort wird nicht komplementär, sondern orthogonal zum Begriff Komfort eingeordnet und kann aus der individuellen Beanspruchung meistens physikalisch gemessen werden [Bubb04].

Die Messbarkeit der kundenwerten Eigenschaft erlaubt die Ableitung der technischen Anforderungen. Dieser Ableitungsprozess setzt nach Heißing und Schön eine konsequente Eigenschaftsorientierung voraus. Dadurch werden die Eigenschaften mit den zu entwickelnden Fahrzeugkomponenten mittels der aus den Eigenschaften abgeleiteten Funktionen [HeSc00 S.3-52] verknüpft (vgl. Abbildung 1-1).

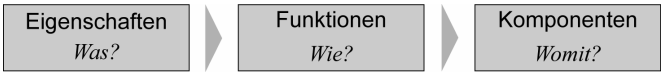

Abbildung 1-1. Eigenschaftsorientierung bei der Zielsystemdefinition nach [HeSc00].

Eine objektive Quantifizierung des Diskomforts beim Ein-/Ausstieg ins Fahrzeug gestaltet sich schwierig, weil die Funktionen oder Systemgrößen wie z. B. die Beanspruchung des Bewegungsapparates entweder gar nicht oder nur eingeschränkt messbar sind. Aus diesem Grund werden die Anforderungen an die Fahrzeugkonstruktion bzw. an die einzelnen Bauteile derzeit auf zwei Wegen indirekt bzw. direkt hergeleitet.

Beim indirekten Weg beruht die Definition der technischen Ziele auf Maßvergleichen. Dabei werden die zu entwickelnden Fahrzeuge mit Vorgängern, anderen Derivaten sowie unmittelbaren Wettbewerbern hinsichtlich relevanter Fahrzeughauptabmessungen (Konzeptparameter) verglichen. Die Vergleichsergebnisse werden basierend auf vorhandener Erfahrung sowie auf Rückmeldungen aus dem Markt entsprechend bewertet. Bei der Entwicklung neuer Nischenmodelle ist diese Vorgehensweise aber nur begrenzt anwendbar, da auf entsprechende Erfahrung nicht zugegriffen werden kann. Hierfür sind reale Modelle bzw. Prototypen erforderlich. Diese werden für eine direkte Absicherung des Ein-/Ausstiegs durch Reihenuntersuchungen mit Versuchspersonen eingesetzt. Dabei werden die Fahrzeugkonstruktionen bewertet und Anforderungen abgeleitet. Ausgehend von diesen Anforderungen werden Zielgrößen für die Konzeptparameter festgelegt.

1.1.3 Fahrzeugkonzept und Konzeptparameter

Das Fahrzeugkonzept ist der konstruktive Entwurf einer Produktidee, mit dem die grundsätzliche Realisierbarkeit abgesichert wird [Brae03]. Der Entwurf umfasst die Zusammenstellung wesentlicher Parameter, Hauptmodule und Komponenten, die die Fahrzeugcharakteristik und die Fahrzeugeigenschaften beeinflussen. Für die geometrische Gestaltung und eindeutige Beschreibung des Fahrzeugkonzeptes werden Fahrzeughauptabmessungen festgelegt. Die von der GCIE [GCIE06] international vereinheitlichte Definition der wichtigsten Außen- und Innenmaße ermöglicht eine transparente Fahrzeugbeschreibung sowie einen konsistenten Vergleich der Fahrzeugkonzepte untereinander. Demnach werden die entsprechenden Fahrzeughauptmaße als GCIE-Maße bezeichnet.

In Abhängigkeit vom Fahrzeuggrundkonzept stellen sich bei der Erarbeitung der Maßkonzeption unterschiedliche Maßketten als wesentlich heraus. Für die Gestaltung des Ein-/Ausstiegs können aus der Sicht der Ergonomie relevante Fahrzeugmaße bzw. Fahrzeugparameter klar definiert werden. Der Begriff Relevanz wird in diesem Zusammenhang als Merkmal der Bedeutung genutzt. Die Auswahl basiert im Grundsatz auf der Tatsache, dass jeder bewegungsbeeinflussende geometrische Parameter die Umgebung abgrenzt, in der die Ein-/Ausstiegsbewegung durchgeführt werden kann. Darüber hinaus beschreiben diese Fahrzeugparameter die Sitzposition des Fahrers im Fahrzeug eindeutig (vgl. Abbildung 1-2 und Abbildung 1-3).

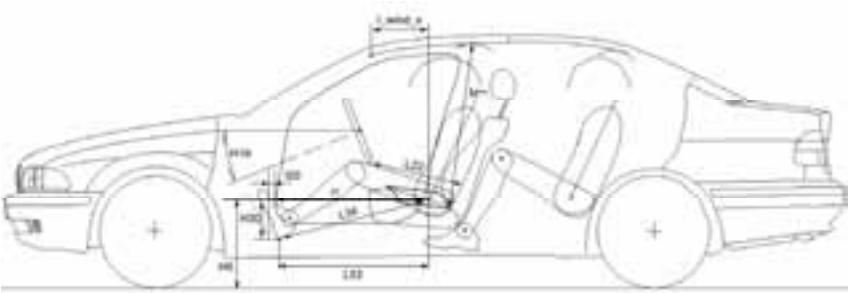

Abbildung 1-2. Einstiegsrelevante Hauptmaße (Seitenansicht, xz-Ebene).

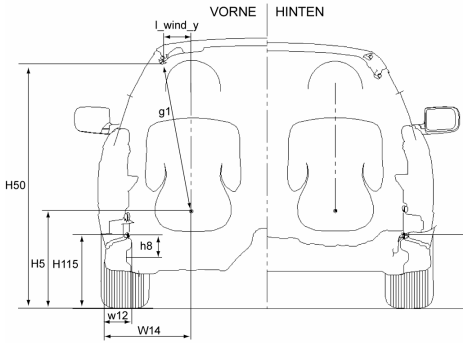

Abbildung 1-3. Einstiegsrelevante Hauptmaße (Ansicht yz-Ebene).

Ein wesentlicher Teil der ein-/ausstiegsrelevanten Maße bezieht sich auf den konstruktiven Sitzreferenzpunkt (SRP). Der Sitzreferenzpunkt ist die Position des H-Punkts der 3DH-Einrichtung (d.h. der Hüftpunkt der genannten Einrichtung) bei der in ISO-6549-1980 angegebenen Sitzposition oder die konstruktiv festgelegte Bezugsposition auf dem Sitz entsprechend dem genannten H-Punkt. Die Sitzposition der jeweiligen Person im Sitzverstellfeld ist jedoch individuell unterschiedlich. Für die Analyse und Modellierung der Einstiegsbewegungen werden daher individuelle Hauptfahrzeugmaße abgeleitet, z. B. *H30_ind.* Dies sind Fahrzeugparameter, die sich auf eine individuell gemessene Sitzposition beziehen (vgl. Tabelle 9-4 im Anhang).

Parallel zu den GCIE-Maßen können zusätzliche Fahrzeugparameter definiert werden. Sie präzisieren die fahrzeugspezifischen Ein-/Ausstiegsverhältnisse (vgl. Tabelle 9-4 im Anhang).

Die Variationsbereiche der Konzeptparameter sind nicht beliebig festlegbar und sind meistens voneinander abhängig. Durch Gesetze und Vorschriften z. B. für die Fahrzeugsicherheit sowie durch konzeptspezifische Zusammenhänge werden die Variationsbereiche der einzelnen Parameter eingegrenzt bzw. mit den anderen Parametern verknüpft. Bei der Planung von Ein-/Ausstiegsversuchen müssen diese Zusammenhänge beachtet werden.

1.1.4 Konzeptspezifische Zusammenhänge

Die Unterteilung der Variationsbereiche von Hauptfahrzeugabmessungen wird für die Definition und Beschreibung von Fahrzeugklassen sowie für die gezielte Positionierung von neuen Fahrzeugen innerhalb der jeweiligen Klasse verwendet. Die Fahrzeughöhe *H100* als eines der bestimmenden Hauptmaße wird z. B. durch die Maßkette aus Bodenfreiheit *H156*, Bodenaufbau = *H5-H30-H156*, der Höhe SRP über Fersenpunkt *H30*, dem Kopfraum vorne *H61* (umgerechnet in die Projektion auf die z-Achse $H61_z=H61*cos(8°)$) und dem Dachaufbaumaß definiert. Die Festlegung der Sitzhöhe bezüglich der Fahrbahn *H5* erfolgt demzufolge nicht ohne Berücksichtigung des Maßes *H30*. Niedrigere Fahrzeuge haben in der Regel eine niedrigere Sitzposition *H30* (vgl. Abbildung 1-4).

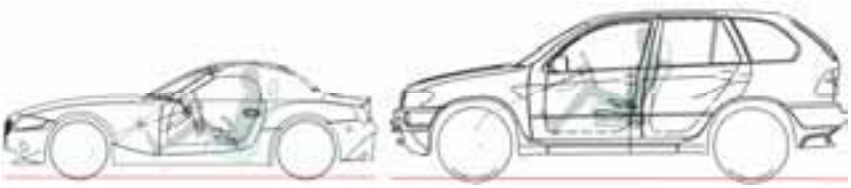

Abbildung 1-4. Fahrzeugkonzept Roadster und SUV (BMW Z4 und X5).

Eine niedrigere Sitzposition wirkt sich beispielsweise unmittelbar weiter auf das Maß *L53* und somit auf die Länge des erforderlichen Beinraums aus, der wiederum in die x-Maßkette für die Bestimmung der Fahrzeuglänge eingeht. Wird die Entwicklung des Maßes *H5* in Relation zum Maß *H30* betrachtet, können für die einzelnen Fahrzeugklassen die Variationsbereiche dieser Maße näherungsweise festgelegt werden. Zum Beispiel können anhand der Abbildung 1-5 die Variationsbereiche der beiden Maße für die Fahrzeugklasse Roadster, Limousine und SUV abgeleitet werden. Auf diesem Zusammenhang basiert in dieser Arbeit die Auslegung der „extremen“ Versuchskonfigurationen.

2 Theoretische Einordnung

2.1 Bewegungsregulation

Die Erfassung, Übertragung, Verarbeitung und Verwendung von Informationen zur Organisation von Lebensprozessen wird als biologische Regulation bezeichnet. Die Bewegung (vgl. Abschnitt 1.2.1) als Bestandteil menschlicher Tätigkeit kann somit als biologische Regulation zur Erreichung von Bewegungsaufgabe verstanden werden. Daraus resultiert, dass die Bewegungsregulation sehr eng mit der Aufnahme, Verarbeitung und Anwendung von Informationen zur Planung und Abstimmung von Bewegungen verbunden ist.

Die Theorien, wie eine komplexe Bewegung geplant und abgestimmt (koordiniert) wird, gehen auseinander. In der Bewegungs- bzw. Verhaltensforschung gibt es bis heute noch keine einheitliche Sichtweise, welche Vorgänge im Körper ablaufen, bevor eine Bewegung vollzogen wird. In den letzten Jahren haben sich zwei Richtungen abgezeichnet. Die erste wird als „motor approach“ oder „motor control“ (d. h. motorisch basierte Regulation) bezeichnet und betrachtet die Bewegung aus motorischer bzw. dynamisch-technischer Sicht. Die andere wird „action control“ (d. h. handlungsbasierte Regulation) genannt und erklärt das Prinzip der Bewegungsregulation mehr aus wahrnehmungstechnischen Gesichtspunkten [Mora97 S. 569]. Daraus ergeben sich unterschiedliche Sichtweisen auf die Struktur des Regulationssystems.

Eine allgemeine (auch mathematische) theoretische Fundierung erhält die Frage nach der Bewegungsregulation seitens der Regelungstheorie. Die Ausgangsgröße – Bewegungsvollzug – wird demnach auf das angestrebte Systemverhalten – Bewegungsziel – abgestimmt. In seinen Untersuchungen bestätigt Hacker [Hack67 S. 126] den Ansatz von Setschenow, der die Frage nach der Determination der Bewegungskoordination auf die übergreifende Frage nach der Determination des jeweiligen Regulationssystems verschiebt, d. h. auf seine Art und Wirkungsform, die primär von der Aufgabenstellung abhängig ist. Infolgedessen hängt die Struktur der Bewegung in erster Linie vom Sinngehalt der Aufgabe, also vom Bewegungsplan, und nicht von äußeren Bewegungsmerkmalen ab. Der übergeordnete Regelkreis ist daher das langfristige Planen [Smke93 S. 405] und die Bewegungsplanung ist demnach ein wichtiger Baustein der Bewegungsregulation.

Das Ergebnis des Planens ist die Führungsfunktion des Handelns [Smke93 S. 405]. Die äußeren Bewegungsmerkmale z. B. Körperwinkel, Lageänderungen der einzelnen Körperteile, Geschwindigkeit oder Zeit der Bewegung sind individuelle Randbedingungen und bestimmen die Ausprägung der zielgerichteten Bewegung [Ster04 S. 5]. Wie diese äußeren Merkmale angeordnet und abgestimmt werden, um das festgelegte Bewegungsziel zu erreichen, hängt von der Steuerung des Bewegungsvollzuges ab. Der Begriff „Steuerung“ ist das Synonym zum Begriff „Führung“. Verknüpft mit der Bewegung hat die Bewegungssteuerung bzw. -führung die Aufgabe, die Frage nach der detaillierten Vorgehensweise bzw. dem Programm zur Umsetzung des Bewegungsplans zu beantworten.

Der eigentliche Regler ist der menschliche Bewegungsapparat, der bei seiner dynamischen Funktion stabilisiert werden muss. Die Stabilisierung ist eine wichtige Eigenschaft der Bewegungsregulation. Hierbei geht es um die unmittelbare Ausführung des Bewegungsvollzuges und um die Minimierung von Abweichungen bestimmter dynamischer Zustände. In einem Regelkreis z. B. werden Systemabweichungen über

die Rückkopplung durch den Regler korrigiert. Im willengesteuerten Handeln wird eine solche Rückkopplung als Reafferenz bezeichnet. Rückgekoppelte Afferenzen und ihre Verarbeitung zum Zwecke der Regulation sind ein wesentlicher Grundbestandteil des Mechanismus der Willkürbewegung [Hack67].

Zusammenfassend lassen sich die einzelnen Aufgaben der Bewegungsregulation in Anlehnung an die Regelungstheorie in die folgenden drei Gruppen einteilen:

1) Bewegungsplanung
2) Bewegungssteuerung bzw. Bewegungsführung
3) Bewegungsstabilisierung

In den folgenden Kapiteln wird ausführlich auf die einzelnen Aufgaben der Bewegungsregulation eingegangen, deren Funktionen analysiert und anschließend zur Grundlage der Modellierung und Simulation der Einstiegsbewegung aufgearbeitet.

Aus Gründen der Verständlichkeit wird die Beschreibung der Aufgabe zur Bewegungsstabilisierung (vgl. Punkt 3) dem Abschnitt „Bewegungssteuerung“ (vgl. Punkt 2) vorgezogen. Für die Analyse der Bewegungssteuerung ist es sinnvoll, zunächst die grundsätzlichen Möglichkeiten in Form von anatomischen Gegebenheiten und biomechanischen Zusammenhängen des menschlichen Bewegungsapparates zu verstehen, um die notwendigen Steuerungsschritte entsprechend einordnen zu können.

2.2 Bewegungsplanung

2.2.1 Bewegung als Gegenstand psychologischer Untersuchungen

Psychische Prozesse erscheinen größtenteils als ein auf die Lösung von Aufgaben zielendes Handeln. Hacker [Hack67] stellte fest, dass jede psychische Erscheinung sowohl eine Widerspiegelung der Wirklichkeit als auch ein Glied in der Regulation der Tätigkeit ist. Damit gehören zum Bereich der psychologischen Forschung nicht nur geistige Tätigkeiten, sondern auch Bewegungen des Menschen. Darüber hinaus ist die menschliche Tätigkeit auf Grund ihres aufgabenlösenden Charakters und der damit gegebenen gegenständlichen Ausrichtung die entscheidende Quelle kognitiver Prozesse [Sets84]. Physiologische Prozesse können ohne psychische Erscheinungen verlaufen, nicht aber umgekehrt. Das zeigt, dass die psychischen Prozesse von den physischen nicht zu trennen sind [Fuch76 S. 100].

Zahlreiche Untersuchungen beweisen, dass die kinematische oder geometrische Struktur der Bewegungen nicht die Invariante ist, die den Erfolg einer Bewegungsabfolge bestimmt. Zahlreiche unterschiedliche und austauschbare Bewegungsstrukturen führen zum gleichen Ergebnis. Der Effekt bestimmt sich im einzelnen Bewegungsabschnitt nicht zwangsläufig aus seinen Komponenten, sondern das aktuelle Geschehen richtet sich vorwiegend nach dem Effekt [Hack67 S. 15].

Eigenschaften von Bewegungen sind demnach größtenteils nur als Handlungen zu erklären. Handlungen verändern die physische oder soziale Umgebung, indem ihre künftigen Resultate antizipiert und als Ziele gespeichert werden. Damit gehen die mentalen Veränderungen der Realität den motorischen Veränderungen voraus [Hack83 S. 19] und werden aus diesem Grund im folgenden Abschnitt genauer betrachtet.

2.2.2 Handlung in der Bewegungsregulation

Handlung wird einheitlich (vgl. Tabelle 2-1) als eine auf das Endziel ausgerichtete Tätigkeit des Menschen betrachtet. Dabei wird die Zielgerichtheit einer solchen Tätigkeit ausdrücklich betont. Die Bewegung als äußeres Abbild der Handlung ist somit unverzichtbarer Bestandteil der Bewegungsregulation.

Tabelle 2-1. Definition der Handlung.

Autor	Definition
Oesterreich [zit. nach Hack83 S. 110]	Eine über die Zeit verlaufende Einheit zielgerichteten Verhaltens.
Meinel/Schnabel [MeSn98] (abgeleitet aus der Theorie der Sportmotorik)	Handlungen sind in sich abgeschlossene, zeitlich und inhaltlich strukturierte Einheiten einer Tätigkeit, die auf das Erreichen eines bestimmten Zieles gerichtet und durch Vorausnahme des Handlungsergebnisses und des Handlungsprogramms durch bewusste Entscheidungen sowie durch ständige analytisch-synthetische Kontroll- und Regulationsprozesse gekennzeichnet sind.
Scheid/Prohl [Schd04 S. 40]	Bewusste, auf ein Ziel orientierte Tätigkeit, die in Situationen stattfindet und mit Energieaufwand, Motivation und Anstrengung verbunden ist.

Der Einstieg ins Fahrzeug ist demzufolge eine Handlung. Die eigentliche Einstiegsbewegung ist dabei nur eine äußere Abbildung der inneren Prozesse. Im Allgemeinen umfassen Handlungen Vorbereitungs- und Ausführungsphasen. Die Handlungsvorbereitung oder Handlungsplanung soll von der Handlungsausführung oder dem Handlungsvollzug unterschieden werden.

Nach Meinel [MeSn98] wird die Handlungsvorbereitung nach der Orientierung über die jeweilige Situation, der Programmierung auf den verschiedenen Ebenen und der Entscheidung für den Vollzug einer Handlung abgeschlossen. Merkmale der Vorbereitungsphase sind somit die Breite und Selektivität der notwendigen Orientierung, die Antizipation von Rückmeldungen, das Erinnern, Anpassen oder Erzeugen von Handlungsprogrammen und Verinnerlichungsmöglichkeiten von Erzeugungs- und Kontrolloperationen. Auch umfasst die Handlungsvorbereitung laut Hacker [Hack83] eine Orientierung auf die Ausgangszustände und Überführungsbedingungen in das zu erreichende Resultat, die Differenzierung des Ziels oder sogar seine Redefinition sowie die Auswahl bzw. Entwicklung von Verfahren, also Mustern von Ausführungsoperationen.

Bei einer Einstiegsplanung muss die morphologische Grundstruktur der Bewegung definiert werden. Diese wird durch die zukunftsbezogenen globalen Teilziele beschrieben. Diese Ziele legen den auszuführenden Handlungsweg fest und stellen einen allgemeinen gesamthaften Handlungs- bzw. Bewegungsplan auf. Die Ausführung der beschriebenen Schritte kann einer sogenannten Planungsebene zugeordnet werden.

Zu den Hauptaufgaben der Planungsebene gehören somit die Bildung eines stimmigen Zielsystems und die Definition des dazugehörigen optimalen Handlungsweges.

2.2.3 Zielbildung und Festlegung des Handlungsweges

Ziele sind jene gespeicherten Invarianten, die für jeden Regulationsvorgang unerlässlich sind [MeSn98]. Ziele regulieren Handlungen zusammen mit internen Repräsentationen der Verfahren zu ihrem Erreichen, d.h. Modellen geeigneter Muster von Operationen. Ziele werden hinsichtlich unterschiedlicher Optimierungskriterien, darunter der Effektivität (Verhältnis von Aufwand zu Resultat), in der Vorbereitungsphase der Handlung bewertet [Hack83]. Identische Ziele können mit Hilfe verschiedener, austauschbarer Verfahren erreicht werden. Diese Eigenschaft ist auch als Polystrukturalismus von Handlungen bekannt. Dadurch sind Entscheidungen über die zu wählenden Methoden erforderlich.

Die Zielkategorie des Einstiegs kann nach Göhner [Göhn93] als Erreichungsziel kategorisiert werden, ausdifferenziert in ein Bewältigungsziel. Der Einstieg muss demnach durch eine geeignete Bewegungsabfolge bewältigt werden, um eine optimale Fahrerposition einnehmen zu können. Ziele können dabei dem Verwirklichen anderer, umfassenderer Ziele (hierarchische Anordnung) dienen. Die übergeordneten Ziele determinieren die untergeordneten, die zu einem abhängigen Mittel der Hauptziele werden. Das Einnehmen der Fahrerposition ist das übergeordnete Hauptziel der Handlung. Für das Erreichen dieses Hauptziels müssen zeitlich vorausgehend Teilziele bewältigt werden, die eventuell wiederum zu erfüllende Teil-Teilziele voraussetzen. Auch hier gibt es Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Zielen; so wird das vorherige Ziel durch das nachfolgende Ziel bestimmt und muss dementsprechend geplant werden (vgl. Abbildung 2-1). Diese Rückwärtsgerichtetheit der Zielbildung setzt ein hohes Abstraktionsvermögen voraus.

Im Gedächtnis gespeicherte Handlungsverfahren scheinen in einer verallgemeinerten oder schematischen Form gespeichert zu sein, um in künftigen Aufgaben hypothetisch eingesetzt zu werden (vgl. Abschnitt 4.5.2). Die zu verarbeitende Information und die Muster von Ausführungsoperationen sind in hohem Maße aufgabenabhängig. Für das Ausführen der Aufgabe werden erforderliche Operationen sequentiell in solcher Weise zusammengeschlossen, dass jede Operation den subjektiven Abstand ihres Teilziels zum Gesamtziel verringert (vgl. Abbildung 2-1).

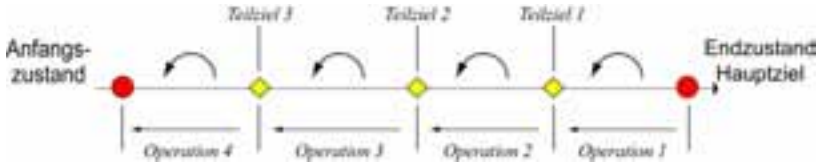

Abbildung 2-1. Festlegung des Handlungsweges durch Ziel- und Operationsdefinition.

Diese Definition der Zielstruktur und Festlegung des Handlungsweges bildet einen der theoretischen Ansätze für die Konzeption der Einstiegssimulation. Die hierarchische Zielstruktur wird durch die Regulationsebenen der Einstiegsbewegung berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.5). Die rückwärts verlaufende sequenzielle Handlungswegfestlegung wird für die Beschreibung der funktionalen Struktur sowie für die Simulation der Einstiegsbewegung verwendet (vgl. Abschnitte 4.2.3 und 6.3).

2.3 Bewegungsstabilisierung

2.3.1 Gelenk- und Muskelfunktionen für die Kraftübertragung

Motorische Systeme haben die Funktion, Bewegungen des Körpers auszuführen, die Ausführung zu überwachen, das Ergebnis zu bewerten und die Ausführungsvorschriften dieser Ergebnisse zu speichern [Oliv03]. Die Motorik übernimmt die Aufgaben der Stabilisierung der Körperhaltungen und der Gewährleistung gerichteter koordinierter Ortsveränderungen des gesamten Körpers oder einzelner Teile. Demnach wird zwischen der Stütz- und Zielmotorik unterschieden. Diese Teilfunktionen werden von verschiedenen Stufen des Nervensystems gesteuert (vgl. Abschnitt 2.4.1).

In diesem Kapitel sollen zunächst die anatomischen und biomechanischen Grundlagen betrachtet werden, die zur Ausführung der geplanten Bewegung zur Verfügung stehen. Basierend auf der Funktionsgrundlage der motorischen Mechanismen kann bei der Bewegungsvorbereitung entschieden werden, wie diese Werkzeuge eingesetzt werden sollen. Für die Einstiegsbewegung ist die Frage nach Gelenk- und Muskelfunktionen für die Kraftübertragung, Bewegungsausführung und demzufolge die Bewegungsstabilisierung besonders wichtig.

Die Gelenke des menschlichen Körpers sind ihrer gesamten anatomischen und histologisch-physiologischen Bauweise nach auf Bewegung konstruiert [Boro81]. Abhängig von der Gelenkform kann das jeweilige Gelenk die Bewegung nur innerhalb seiner vorhandenen Freiheitsgrade übertragen. Die Gelenkflächen sind mit einer Knorpelschicht überzogen. Trotz dieser Knorpelschicht, die die Reibung der sich gegeneinander bewegenden Skelettknochen minimiert und den Verschleiß des Gelenkes verhindern soll, erfolgt die Bewegung im Gelenk nicht ohne Widerstand. Der Gelenkwiderstand stellt die Kraft dar, die im Gelenk entgegen der Bewegungsrichtung wirkt und somit die Bewegung einschränkt. Er setzt sich aus einer dissipativen und aus einer elastischen Komponente zusammen.

1) Die dissipative Komponente wird durch die mechanische Reibung in dem Gelenk repräsentiert.
2) Die elastische Komponente wird durch die Muskeln, Sehnen und Bänder beeinflusst. Beispielsweise steigt die elastische Gelenkwiderstandskomponente an den Grenzen der Gelenkbeweglichkeit stark an und wirkt somit der Überschreitung physiologischer Beweglichkeitsbereiche entgegen.

Die Skelettmuskulatur besitzt ein charakteristisches Verhalten bezüglich der bereitgestellten Muskelkraft und der momentanen Länge der beteiligten Muskelfasern. Während die Muskellänge wegen der Verkürzung des Antagonistenmuskels zunimmt, fällt die aktive Muskelkraft in dem Muskel ab. Dagegen nimmt die passive Muskelkraft stark zu, was die Gesamtkraft und somit den elastischen Widerstand im Muskel wieder ansteigen lässt. Die ausführliche funktionale Beschreibung kann z.B. bei [Enok02] nachgelesen werden. Für die Modellierung und die Simulation der Einstiegsbewegung ist der Kraft-Längen-Zusammenhang von Bedeutung, da dieser in erster Linie für die elastische Gelenkwiderstandskomponente verantwortlich ist.

Die Muskelarbeit wird durch das Muskelgewebe verrichtet. Der Muskelaufbau wird ausführlich in der medizinischen Fachliteratur beschrieben (z. B. [Enok02 S. 220-231], [Oliv03]). In diesem Abschnitt werden nur Muskelfunktionen erläutert, die für das Verständnis der Bewegungsstabilisierung von Bedeutung sind. Dazu gehört das Muskelfunktionsprinzip, das Anhand von motorischen Reflexen erklärt wird.

3 Methodik

3.1 Forschungsansatz

3.1.1 Ablaufplanung des Forschungsprozesses

Der Prozess der wissenschaftlichen Arbeit kann im Allgemeinen als systematische Konstruktion von Theorien und konzeptuellen Entwürfen, deren kritische Nachprüfung und Weiterverarbeitung in wiederholten Tests und die anschließende Einordnung der Schlussfolgerungen mit Hilfe der Entscheidungslogik ins theoretische Gebilde verstanden werden.

Typisch für die wissenschaftliche Methodik nach Sachs [Sach02] ist der Kreisprozess, angefangen mit Mutmaßungen oder Ideen über Planung, Beobachtungen, Analyse der Ergebnisse bis hin zu neuen Mutmaßungen bzw. neuen Ideen. Hierbei werden Widersprüche und Unverträglichkeiten ausgeschaltet sowie die Modelle und Theorien verbessert. Das in Abbildung 3-1 dargestellte Ablaufschema der Forschungsarbeit ist aus den theoretischen Modellen für die Planung und Durchführung von Forschungsstudien von Sachs [Sach02], Drew [Drew85] und Rohmert/ Rutenfranz [RoRu75] abgeleitet.

Abbildung 3-1. Ablaufschema der Forschungsarbeit.

Dieser Vorgehensweise wurde darüber hinaus das „Double-Loop Prinzip“ zu Grunde gelegt. Ein solcher doppelter Kreislaufprozess gewährleistet die Berücksichtigung der an das Gesamtsystem seitens der Bewegungssimulation gestellten Anforderungen sowie eine ständige Geltungsprüfung der bei der Modellbildung festgelegten Annahmen und Modellparameter.

Der äußere Kreis überwacht das Forschungsziel Simulation und stellt sicher, dass die Anforderungen vom ausgewählten Simulationssystem von vornherein berücksich-

tigt werden. Der innere Kreis stellt die typische Vorgehensweise zur Lösung der Forschungsaufgaben dar. Ausgehend von der Ideenentwicklung werden Hypothesen gebildet, mit geeigneten Werkzeugen in den festgelegten Untersuchungen geprüft und anhand der gewonnenen Daten verifiziert. Aus den Schlussfolgerungen wird das statistisch basierte theoretische Modell aufgebaut.

Im Allgemeinen bilden zwei Typen von Schlussfolgerungen die Vorgehensweise der wissenschaftlichen Forschungslogik.

1) Eine Deduktive Vorgehensweise beschreibt die Logik „vom Ganzen zum Einzelnen“. Dabei wird vom Gesamtmodell ausgegangen und dann auf die Einzelteile in spezifischer Ausprägung geschlossen. Im Allgemeinen verwendet die deduktive Logik folgende Formulierung: „Wenn die Grundidee/Theorie A wahr ist, dann ist es möglich, den spezifischen Effekt A.1 zu beobachten“
2) Die Induktive Vorgehensweise beschreibt den umgekehrten Weg der logischen Schlussfolgerung. Aufgrund einzelner Befunde wird auf das Ganze geschlossen. Die Formulierung trägt folgende Form: „Wenn der spezifische Effekt beobachtet worden ist, dann muss im Allgemeinen gelten...“

Die deduktive Vorgehensweise wird bei der Aufstellung der Theorie der führenden Körperteile, bei der Überprüfung der biomechanischen Grundsätze und bei der Verallgemeinerung der Bewegungsplanung verwendet.

Die induktive Vorgehensweise wird bei der Diskussion der Ergebnisse und bei der statistisch-mathematischen Modellbildung angewandt sowie zur Bestätigung der aufgestellten allgemeinen theoretischen Grundsätze der Bewegungskonstruktion und Bewegungsplanung.

3.1.2 Vorbereitung von Entscheidungen bei der Datenanalyse

Die Datenanalyse nach Sachs [Sach02] ist die systematische Suche nach aufschlussreichen Informationen über Erscheinungen, Strukturen und Vorgänge anhand von Datenkörpern und graphischen, mathematischen sowie insbesondere statistischen Verfahren ohne oder mit Wahrscheinlichkeitskonzept. Das Ziel dabei ist nicht, die Daten zu Wahrscheinlichkeiten zu „vermahlen“ und statistisch signifikante Befunde zu erzielen, die dennoch bedeutungslos oder unwichtig sein können. Nicht die statistische Signifikanz, sondern die praktische Relevanz zählt.

Bei der Analyse der Einstiegsbewegung wird die wissenschaftliche Fragestellung und die Vorbereitung der Entscheidungen nach der von Sachs vorgeschlagenen Struktur in fünf Schritten durchgeführt:

1) Formulierung der Fragestellung
2) Prüfung aller Informationsquellen
3) Wahl und Prüfung der Strategie
4) Festlegung und Realisierung der Strategie
5) Schlussfolgerungen und Entscheidungen

Stellt man bei der Formulierung der Fragestellung eine Hypothese H_1 auf und versucht sie zu beweisen, so ist sie meistens direkt nicht zu bestätigen. Die Nachweisführung wird auf dem indirekten Weg durchgeführt. In diesem Fall wird eine Gegenhypothese H_0 formuliert. Wird diese anhand statistischer Tests abgelehnt, gilt H_1 als indirekt bestätigt.

3.2 Bewegungsmessung und Bewegungsrekonstruktion

3.2.1 Methoden der Bewegungserfassung

Für die Untersuchung der Zusammenhänge physiologischer Mechanismen der motorischen Fähigkeiten des Menschen bedarf es Methoden, mit deren Hilfe die Bewegungen erfasst, beschrieben und analysiert werden können. Heute existiert eine umfangreiche Anzahl von Messsystemen und -methoden [ASB95], die für Bewegungsuntersuchungen eingesetzt werden können. Das Ziel der Bewegungserfassung (engl. Motion Capture) besteht in der Aufnahme der menschlichen Bewegungen mit Hilfe von Sensoren und in der Überführung der Messdaten in eine computerlesbare Form.

Die Verwendung einzelner Verfahren richtet sich nach den jeweiligen Aufgaben. Es existiert kein universelles System, das für alle Fragestellungen eingesetzt werden kann. Die Unterschiede zwischen den Systemen liegen zum Beispiel in der Genauigkeit der erfassten Daten, der Geschwindigkeit der Datensammlung (Frequenz), der Möglichkeit zur Echtzeitverarbeitung, der Bewegungseinschränkung durch das System, der Anfälligkeit gegenüber Umwelteinflüssen, der Automatisierung und Qualität bei der Weiterverarbeitung von aufgezeichneten Daten sowie in der Kompatibilität mit anderen Messsystemen beispielsweise zur Kraftmessung.

Grenzt man die Messverfahren, die sich maßgeblich auf die inneren Bewegungsparameter wie Nervensignale oder Muskel- und Gelenkmomente beim Bewegungsvollzug beziehen, von den Messverfahren, die die äußeren Bewegungsparameter wie den Bewegungsverlauf einzelner Körperteile über die Zeit erfassen, voneinander ab, so können im Wesentlichen die in der Tabelle 3-1 dargestellten technologischen Ansätze zur Erfassung der Einstiegsbewegung unterschieden werden.

Tabelle 3-1. Beispiel für Systeme zur Erfassung der Bewegung als Ortsveränderung der Körperteile im Raum.

Systemtyp	Systembezeichnung	Name und Kurzbeschreibung
Kinetisch/ Inertial	iTrack Xsens GypsyGyro	Am Körper angebrachte Sensoren bestehen aus Beschleunigungsmesser und Gyroskop. Beschleunigungsmesser erfassen die Geschwindigkeit und Gyroskope bestimmen die Lage der Körperteile im Raum. Nachteile: Nur relative Bewegungsmessung. Bewegungseinschränkung durch die Sensorverkabelung.
Optisch/ Videobasiert	PCMAN	Die Bewegung wird mit Videokameras aus verschiedenen Perspektiven aufgezeichnet. Die Überführung der Bewegung in dem Computer basiert auf der Überlagerung des Software-Menschmodells RAMSIS mit den kalibrierten Videobildern (vgl. [Seitz01]). Nachteile: Großer Nachbearbeitungsaufwand.
Optisch/ Infrarot-videobasiert	Qualisis VICON	In den Videokameras eingebaute Stroboskope senden infrarotes Licht, das von den am Körper angebrachten Markern reflektiert wird. Die Markerreflektionen werden als 2D-Abbild von den Kameras aufgezeichnet. Anschließend werden diese „2D-Bilder“ durch die photogrammetrische Rekonstruktion automatisch zur 3D-Szene konvertiert, welche die Position des jeweiligen Markers im 3D-Raum zum gegebenen Zeitpunkt darstellt. Nachteile: Spezielle abgedunkelte Laborumgebung erforderlich.

3.2.2 Motion Capturing System VICON

Das Motion Capturing System VICON gehört zu den berührungslosen optisch-elektronischen infrarotbasierten Messsystemen. Die Untersuchungen von Rigel [Rigel05] haben gezeigt, dass VICON für die Erfassung und die Analyse der Einstiegsbewegung am besten geeignet ist. VICON bietet entscheidende Vorteile gegenüber anderen kommerziellen Systemen. Dazu gehören eine hohe Qualität der Datenaufzeichnung und umfangreiche Möglichkeiten zur Datenweiterverarbeitung und Datenanalyse. Die VICON Software besitzt robuste Algorithmen zur Markererkennung, Koordinatenrückführung sowie Markerrekonstruktion. Das VICON-System ermöglicht demzufolge die Aufnahme und schnelle Bearbeitung großer Mengen von Bewegungsdaten.

Das Funktionsprinzip des Systems basiert im Allgemeinen auf der Methode der photogrammetrischen Rekonstruktion [ASB95 S. 11]. Für die Bewegungsaufnahme werden Reflektionsmarker verwendet, die an fest definierten Körperstellen der Versuchsperson angebracht sind (vgl. Abbildung 9-2 im Anhang) und den Probanden als 3D-Objekt im Raum beschreiben. Die von den Videokameras erfassten Markerreflektionen stellen zu jedem Zeitpunkt der Bewegung eine 2D-Projektion des 3D-Objektes dar. Die aufgezeichneten 2D-Bilder werden in das Videosignal als 2D-Koordinaten konvertiert und durch die anschließende Direkte Lineare Transformation (DLT) [AbAz71] im Computer zu einem 3D-Abbild zusammengeführt.

Die genaue Markerrekonstruktion setzt eine sorgfältige Kamerakalibrierung voraus. Die Qualität der Kamerakalibrierung beeinflusst somit direkt die Qualität der Bewegungsrekonstruktion. Die Kamerakalibrierung erfolgt in zwei Schritten.

Im ersten Schritt wird die dynamische Systemkalibrierung durchgeführt. Dabei werden sowohl die Positionen der Kameras relativ zueinander als auch die internen Linsendaten in Form von fokalen Distanzen berechnet. Diese Informationen werden dem DLT-Rekonstruktionsverfahren in Form von Transformationsmatrizen übergeben. Diese werden von der VICON-Software automatisch anhand der aufgezeichneten Bewegungen eines Kalibrierstabes mit drei Markern erzeugt.

Der zweite Schritt wird für die Festlegung des Koordinatensystems und Koordinatenursprungs durchgeführt. Die Definition des Koordinatensystems erfolgt mit Hilfe einer definierten Markerschablone.

Aufgrund des Funktionsprinzips des Systems gelten bestimmte Anforderungen an die Laborumgebung und die Ausrüstung der Versuchspersonen. Die Bewegungsaufnahme erfolgt bei indirekter Beleuchtung im abgedunkelten Raum. Durch die indirekte Beleuchtung werden die Sichtverhältnisse aufrechterhalten und für die Kameras störende Lichtreflektionen vermieden. Die spezielle Versuchsausrüstung der Probanden besteht aus einem elastischen Anzug, der für die Befestigung der retroreflektierenden Marker erforderlich ist. Die Marker werden durch den am Markerfuß angebrachten Klettstoff am Anzug befestigt. Der Einsatz der elastischen Marker trägt zur Minimierung der möglichen störenden Einflüsse während der Einstiegsbewegung z. B. beim Hineinsetzen in den Sitz bei.

Für die Bewegungsaufnahme werden insgesamt 14 Kameras verwendet. Die Anzahl und Anordnung der Kameras ist speziell auf die Ein- und Ausstiegsbewegung sowie auf die Laborumgebung angepasst und optimiert worden (vgl. [Rigel05]).

3.2.3 Variables Ein-/Ausstiegsmodell (VEMO)

Das Variable Ein-/Ausstiegsmodell (VEMO) stellt die Versuchsumgebung dar (vgl. Abbildung 3-2). Das VEMO wurde von Rigel [Rigel05] entwickelt, aufgebaut und evaluiert. Das Ziel dieses Aufbaus ist, ein großes Spektrum möglicher Fahrzeugkonfigurationen realitätsgetreu, aber vereinfacht darzustellen. Innerhalb dieser Umgebung können die Bewegungen eines Menschen beim Ein-/Ausstieg beobachtet werden.

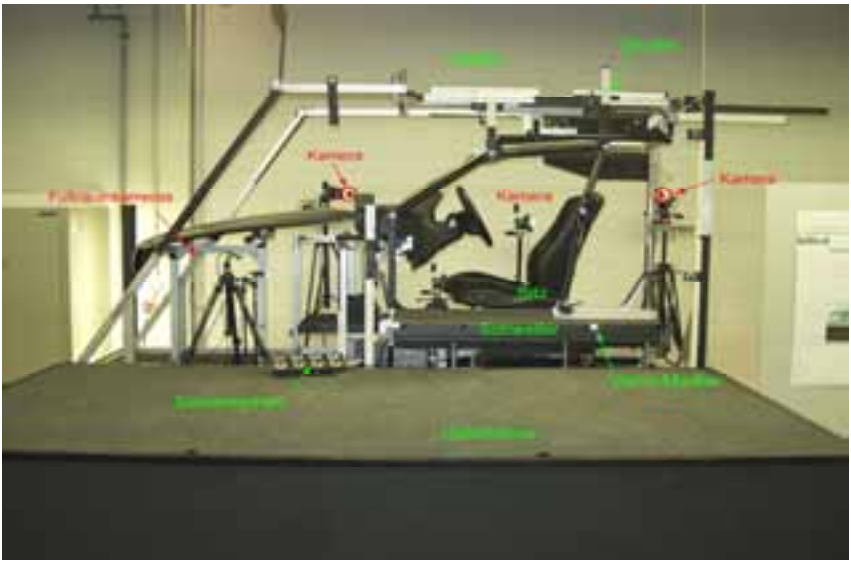

Abbildung 3-2. Das variable Ein-/Ausstiegsmodell (VEMO).

Das VEMO stellt einen Fahrerplatz mit einer Einstiegsöffnung dar. Der Fahrerplatz umfasst einen elektrisch verstellbaren Sitz, einen Fußboden mit Pedalerie und ein Lenkrad mit Lenksäulenverkleidung. Im Fußraum sind eine Fußstütze, ein Brems- und Kupplungs- sowie ein Fahrpedal dargestellt. Das Lenkrad kann im Rahmen des Lenkradverstellfelds verstellt werden. In den Fahrerplatz ist eine Instrumententafel aus Schaumstoff integriert. Um der Versuchsperson bei der Einstellung des Sitzes einen Anhalt bezüglich Kopffreiheit und Sicht auf die Fahrbahn zu geben, sind zudem eine Frontklappe und eine Dachverkleidung verbaut. Der Einstiegsbereich besteht aus der A- und der B-Säule, dem Dach und dem Schweller.

Die einzelnen Bauteile können entweder elektrisch über eine Steuereinheit oder manuell über mechanische Verstellmechanismen verstellt werden. Um die Verstellungen reproduzierbar und beschreibbar zu machen, sind an den verstellbaren Bauteilen Skalen angebracht. Ein maßlich bekanntes Fahrzeugmodell kann anhand der Skalenmarkierungen auf diesem Weg innerhalb von drei Minuten abgebildet werden. Die verstellbaren VEMO-Bauteile sind durch Knotenpunkte miteinander verbunden. Die Verstellung eines Bauteils kann entweder durch die Verschiebung von einem oder mehreren Knoten dargestellt werden. Die Variationsbereiche der einzelnen Knoten sind dem Anhang 9.4 zu entnehmen. Darüber hinaus kann im VEMO eine Gruppe von Bauteilen gleichzeitig verstellt werden. Diese Gruppe wird als das „Innere

4 Versuchsdurchführung und Bewegungsanalyse

4.1 Empirische Basiserhebung (Versuch A)

4.1.1 Zielsetzung

Das VEMO stellt eine Fahrzeuggeometrie dar und definiert damit den objektiven Bewegungsfreiraum für den Einstieg. Die Bewegungseinschränkungen durch die VEMO-Bauteile haben direkten Einfluss auf die Merkmale des Bewegungsvollzuges, insbesondere z. B. auf die Form, Dauer oder Geschwindigkeit. Durch eine Reihenuntersuchung sollen diese Einflüsse systematisch überprüft und analysiert werden.

Die vorausschauende Versuchsplanung erfordert eine genaue Definition der Versuchsziele. Die Versuchsreihe wird im Folgenden als „Versuch A“ bezeichnet und umfasst folgende Zielsetzungen:

1) Systematische Erfassung des Bewegungsverhaltens in Abhängigkeit der Fahrzeuggeometrie. Aufbau der empirischen Datenbasis.
2) Erarbeitung eines allgemeinen Verständnisses der Einstiegsbewegung und Gewinnung von Einsichten in die Bewegungsstrukturen.
3) Identifikation der wichtigen Einfluss- und Zielgrößen. Ermittlung der zugehörigen Variationsbereiche.
4) Prognostizierung der Beziehungen zwischen Einfluss- und Zielgrößen. Prüfung auf Abhängigkeit bzw. Unabhängigkeit. Formulierung von Hypothesen.
5) Darstellung der Erkenntnisse als statistisch-mathematische Modellen.

Bei der Konzeption der Versuchsreihe müssen die Konfigurationsauswahl, das Probandenkollektiv, die Ausgangsbedingungen und der Versuchsablauf im Sinne des beschriebenen Zielsystems bestimmt werden.

4.1.2 Probandenkollektiv

Bei dem Probandenkollektiv muss über Anzahl und Repräsentativität der Versuchspersonen entschieden werden.

Die Anzahl der Versuchspersonen hängt von der Homogenität der Population und von den Anforderungen an die Verallgemeinerungsfähigkeit der Befunde ab. Je höher die Variabilität der Population ist, desto mehr Versuchspersonen sind nötig. Da die Bewegungsforschung große Varianzen aufweist und extreme Datenmengen produziert, die analysiert werden müssen, gilt es, einen Kompromiss zwischen der Versuchspersonenanzahl und den zu analysierenden Daten zu finden. Drew [Drew85 S. 169] gibt als Mindestanzahl 12-14 Versuchspersonen an.

Die Repräsentativität der Versuchsperson ergibt sich aus den Anforderungen. Wesentlich sind die Festlegung von Altersgruppe, Körpermaßen, Körpergewicht sowie der Beweglichkeit. Bös und Mechling [BöMe78 S. 85] fanden bei der Analyse von komplexen motorischen Leistungen mit Hilfe korrelationsstatistischer Methoden, dass somatische Variablen wie Alter, Körpergröße und Körpergewicht den größten Einfluss auf das motorische Leistungsvermögen ausüben. Zusätzlich wird die Beweglichkeit in diesem Kontext mit ins Anforderungsprofil aufgenommen.

Für eine homogene anthropometrische Abbildung der Grundgesamtheit der Bevölkerung durch das Testkollektiv wurden drei Körpergrößengruppen definiert: SG1-„klein“ mit einer Körpergröße von 1500 mm bis 1630 mm, SG2-„mittel“ von 1650 mm bis 1820 mm und SG3-„groß“ mit 1840 mm bis 2010 mm. Jede Körpergrößengruppe deckt annähernd 30% der Grundgesamtheit ab. Die Versuchspersonen sind so gewählt, dass die Verteilung der Körpergröße in der jeweiligen Gruppe möglichst gleichmäßig ist. Am Versuch haben insgesamt 13 Personen teilgenommen, 6 Frauen und 7 Männer (vgl. Tabelle 4-1) mit durchschnittlichem Körperbau (BMI von 20 bis 28) und normaler Beweglichkeit.

Tabelle 4-1. Versuchspersonenkollektiv Versuch A.

VP-Nr.	Körperhöhe [mm]	Stammlänge [mm]	Beinlänge [mm]	Alter	BMI	Gewicht [kg]	Geschlecht	Gruppe
VP01	1852	940	1053	26	22,4	77	männlich	SG3
VP02	1893	990	1088	25	27,9	100	männlich	SG3
VP03	1932	999	1087	28	25,2	94	männlich	SG3
VP04	1861	945	1046	29	21,4	74	männlich	SG3
VP05	1580	845	955	29	20,4	51	weiblich	SG1
VP06	1591	853	851	40	20,5	52	weiblich	SG1
VP07	1604	816	913	28	24,3	63	weiblich	SG1
VP08	1992	1000	1136	27	23,7	94	männlich	SG3
VP09	1560	785	873	24	22,6	55	weiblich	SG1
VP10	1580	863	902	26	21,2	53	weiblich	SG1
VP11	1794	935	999	28	24,5	79	männlich	SG2
VP12	1766	958	979	29	24,0	75	männlich	SG2
VP13	1648	893	923	24	20,3	55	weiblich	SG2

4.1.3 Konfigurationsauswahl

Für eine möglichst breite empirische Basis wird die Untersuchung auf die drei Fahrzeugklassen Roadster, Limousine und Geländewagen (SUV) mit dem Schwerpunkt auf Limousinen ausgerichtet. Die Auswahl der Parameter für die Definition der einzelnen Versuchskonfigurationen erfolgt anhand der Relevanz für den Einstieg aus Sicht der Ergonomie. Da der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Einstiegsbewegung zunächst unbekannt ist, wird dieser durch Expertenbeurteilung abgeschätzt.

Für diese Abschätzung wird die Einstiegsgeometrie in zwei Bereiche aufgeteilt. Der erste Bereich besteht aus der Einstiegsöffnung, der zweite beschreibt den Fahrerplatz im Fahrzeug sowie seine relative Anordnung zur Fahrbahn. Aus jedem Bereich werden die Parameter ausgewählt, die für die Beschreibung maßgeblich verantwortlich sind (vgl. Abschnitt 1.1.3). Die Einstiegsöffnung wird durch die Lage des Schwellers, der A- und B-Säule sowie des Dachrahmens definiert, so dass folgende Einstiegsparameter festgelegt werden:

1) Schwellerhöhe als Begrenzung der Einstiegsöffnung unten,
2) Lage der B-Säule als Begrenzung der Einstiegsöffnung hinten,
3) Lage des Dachrahmens als obere Begrenzung der Einstiegsöffnung oben,
4) Lage und Neigung der A-Säule als Begrenzung der Einstiegsöffnung vorne.

Die Sitzposition wird durch die Höhe relativ zur Fahrbahn und durch die Position innerhalb des Fahrzeuges definiert. Für den Fahrerplatzbereich werden dementsprechend folgende Einstiegsparameter festgelegt:

1) Sitzposition hinsichtlich Sitzhöhe im Fahrzeug,
2) Sitzposition hinsichtlich Sitzhöhe relativ zur Fahrbahn,
3) Sitzposition hinsichtlich der Anordnung des Sitzes relativ zur Einstiegsöffnung,
4) Lage der Dachverkleidung als obere Begrenzung des Fahrerplatzes.

Aus Sicht der Datenanalyse und der Modellbeschreibung ist es sinnvoll, die Versuchskonfigurationen so zu gestalten, dass diese im direkten Vergleich zur Basiskonfiguration die Veränderung von nur einem Parameter aufweisen. Je mehr Parameter bei einer Versuchskonfiguration relativ zur Basis verändert werden, desto schwieriger ist es, deren Einflüsse zu ermitteln. Da jeder Einstiegsparameter P_i ($i=1..n$, n = Anzahl der Einstiegsparameter) in zwei Richtungen verstellt werden kann (P_i^+ bzw. P_i^-), errechnet sich die Anzahl der Versuchskonfigurationen N inklusive der Basiskonfiguration als $N=2n+1$. Zur Variantenreduzierung werden die Parameter „obere Begrenzung der Einstiegsöffnung“ und „obere Begrenzung des Fahrerplatzes“ zusammengefasst. Darüber hinaus wird aufgrund der fahrzeugspezifischen Zusammenhänge (vgl. Abschnitt 1.1.4) die Sitzhöhe im Fahrzeug und die Sitzhöhe relativ zur Fahrbahn immer gemeinsam als Parameter „Sitzhöhe“ verändert. Dieser Einstiegsparameter dient in erster Linie zur Darstellung der Roadster- und SUV-Konfiguration. Daraus ergeben sich die in Tabelle 4-2 zusammengefassten Versuchskonfigurationen. Dort ist für jede Versuchskonfiguration die erforderliche Verstellung der relevanten VEMO-Knoten (vgl. Abbildung 3-3) in Millimetern relativ zur Basis K01 aufgeführt.

Tabelle 4-2. Konfigurationsauswahl.

	Konfiguration														
Knoten	K01	K02	K03	K04	K05	K06	K07	K08	K09	K10	K11	K12	K13	K14	K15
$A0_Z$	0	-150	80	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	-100
$A1_Z$	0	0	0	0	-50	45	45	0	0	0	0	0	0	0	0
$A2_X$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25	-120	0	0	0	0
$A2_Y$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$A2_Z$	0	0	0	-50	-50	45	45	0	0	0	0	0	0	0	0
$B2_X$	0	0	0	0	0	0	200	200	-25	0	0	0	0	0	0
$B2_Y$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$B2_Z$	0	0	0	-50	-50	45	45	0	0	0	0	0	0	0	0
$B1_Z$	0	150	-80	-80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-40	100
$B0_X$	0	0	0	0	0	0	200	200	-25	0	0	0	0	0	0
Inneres $System_X$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inneres $System_Y$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-40	40	0	0
$Dach_X$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$Dach_Y$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-40	40	0	0
$Dach_Z$	0	0	0	-30	-30	45	45	0	0	0	0	0	0	0	0
Fzg.-$Boden_X$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fzg.-$Boden_Z$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	-60
$Standebene_Z$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	-200

Bei der Bewegungsanalyse sind meistens die Randbereiche von besonderer Bedeutung, da diese die Gültigkeit der Einstiegsstrategie eindeutig definieren. Eine zuverlässige Beschreibung erfordert allerdings eine besondere konzeptionelle Auslegung der Experimente. Aus Sicht der mathematischen Modellierung ist eine exakte Definition solcher Randbereiche für die Aufstellung des Grundmodells nicht erforderlich. Allerdings werden für die Erhöhung der Robustheit des Modells an dessen Grenzen zwei spezielle Konfigurationen definiert, die zur Abschätzung des Gültigkeitsbereiches nach unten (K04, gleichbedeutend der stärksten Raumeinschränkung) und nach oben (K07, gleichbedeutend dem größten Raumangebot) dienen. Diese werden als Übergangskonfigurationen bezeichnet.

Die Veränderungen der wichtigsten Package- und Einstiegsmaße in jeder Versuchskonfiguration sind in Tabelle 4-3 zusammengefasst. Diese sind insbesondere für die robuste Erkennung der stochastischen Abhängigkeit zwischen den Fahrzeugmaßen und den Bewegungsparametern von Bedeutung.

Tabelle 4-3. Veränderung der Fahrzeugmaße bei den Versuchskonfigurationen.

Konfiguration	Bezeichnung	Direkter Einfluss	Indirekter Einfluss
K01	Basis	Keiner	Keiner
K02	Schweller abgesenkt	H115	H50_H115,h8
K03	Schweller angehoben	H115	H50_H115,h8
K04	Schweller angehoben und Dach abgesenkt	H115, H50	H50_H115,h8,M,r, g1
K05	Dach abgesenkt	H50	H50_H115,M,r, g1
K06	Dach angehoben	H50	H50_H115,M,r, g1
K07	Dach angehoben, B-Säule hinten	H50	H50_H115,M,r, g1
K08	B-Säule hinten	l1	-
K09	B-Säule vorne	l1	-
K10	Oberer A-Säulenknoten hinten	r, l_wind_x	-
K11	Oberer A-Säulenknoten vorne	r, l_wind_x	-
K12	Inneres System Verschiebung -Y	W14	W7,l20,g1
K13	Inneres System Verschiebung +Y	W14	W7,l20,g1
K14	Konfiguration „Roadster“	H5,H30,H115	H50,H50_H115,l34,h8,l20
K15	Konfiguration „SUV“	H5,H30,H115	H50,H50_H115,l34,h8,l20

Der Einfluss des jeweiligen Fahrzeugmaßes wird deutlicher, wenn der Korrelationsanalyse nur die Konfigurationen unterzogen werden, in denen sich dieses verändert hat. Aus diesem Grund wird Tabelle 4-3 durch die restlichen Fahrzeugparameter aus Tabelle 3-6 vervollständigt und entsprechend deren Veränderung in den einzelnen Konfigurationen zur Tabelle 4-4 umgeformt.

Tabelle 4-4. Veränderung der Fahrzeugmaße bei den Versuchskonfigurationen.

Fahrzeugmaße	Veränderung in den Konfigurationen
H30 und H30_ind	K14, K15
H5 und H5_ind	K14, K15
H50 und H50_ind	K04, K05, K06, K07, K14, K15
H115	K02, K03, K04, K14, K15
H50_H115	K02, K03, K04, K05, K06, K07,K14,K15
H74 und L22	Individuell verschieden. In allen Konfigurationen konstant.
L53	Konstant
L53_ind	Individuell verschieden. Zusätzliche Veränderung in K14, K15.
L34	K14, K15
L34_ind	Individuell verschieden. Zusätzliche Veränderung in K14, K15
W7 und W14	K12, K13
w12 und w16	Konstant
M	K04, K05, K06, K07
h8	K02, K03, K04, K14, K15
r	K04, K05, K06, K07, K10, K11
l_wind_x	Individuell verschieden. Zusätzliche Veränderung in K10, K11
g1	K04, K05, K06, K07, K12, K13, K14, K15.
g1_ind	Individuell verschieden. Zusätzliche Veränderung in K04, K05, K06, K07, K12, K13, K14, K15.
l20	K12, K13, K14, K15
l18	Individuell verschieden. In allen Konfigurationen konstant.
l1	Individuell verschieden. Zusätzliche Veränderung in K08, K09.

5 Bewegungsmodellierung

5.1 Bewegung führender Körperteile

5.1.1 Zur allgemeinen Systembetrachtung

Das mathematisch-statistische Einstiegsmodell stellt die empirische Wissensbasis auf die theoretische Grundlage. Das Bewegungsmodell bildet mit seinem funktionalen System den Kern der Einstiegssimulation. Die Aufgabe dieses funktionalen Systems ist, den gesamten Bewegungsablauf in Abhängigkeit von anthropometrischen, biomechanischen und fahrzeugspezifischen Parametern zu schätzen. Der Bewegungsverlauf des Gesamtkörpers wird durch die führenden Körperteile maßgeblich bestimmt (vgl. Abschnitt 4.3). Aus diesem Grund werden in dem Modell primär die Bewegungen dieser bewegungsbestimmenden Körperteile verarbeitet und zueinander in Verbindung gesetzt.

In jeder Phase wird die Bewegung der führenden Körperteile statistisch ausgewertet und mathematisch beschrieben. Die Beschreibung erfolgt aus räumlich-dynamischer Sicht, dabei werden sowohl die geometrischen Bewegungsparameter wie Raumkoordinaten, Raumwinkel oder Schutzabstände zur Fahrzeugumgebung als auch die dynamischen Parameter wie Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Dauer der Bewegungsvollzüge analysiert.

Eine komplexe koordinierte Bewegung ist erst durch das Zusammenspiel aller Teilvollzüge möglich. Daher müssen die phasenübergreifenden Zusammenhänge mit betrachtet werden. Dazu gehören z. B. das Bewegungstempo oder die zeitliche Synchronisation einzelner Bewegungsphasen inklusive der Geschwindigkeitsverläufe der führenden Körperteile. Dies wird unter den Aspekten Zeit- und Geschwindigkeitssteuerung betrachtet.

Ein wesentlicher Bestandteil des Bewegungsmodells sind die Rahmenbedingungen oder Stabilitätsbedingungen. Sie werden anhand der Stabilitätsparameter definiert und sorgen für eine schnelle Konvergenz bei der Berechnung der Modellparameter sowie für die Reduktion der Freiheitsgrade des Lösungsraums. Die Verwendung der Stabilitätsparameter ist im Anschluss an die Modellbeschreibung zu diskutieren und zu bewerten.

5.1.2 Phase I: Annäherung

Bei der Phase I handelt es sich um einen Abschnitt der Gangbewegung mit der Verlagerung des linken Fußes aus der Schwungbewegung nach vorne. Der menschliche Gang ist als zyklische Bewegung in der Bewegungswissenschaft breit erforscht. Es existieren umfangreiche Modelle, die unterschiedliche Gangarten abbilden. Aus diesen Gründen wird die Modellierung der Phase I auf die Parameter reduziert, die für die Einstiegsbewegung relevant sind. Dazu zählen die Annäherungsrichtung und die Position des linken Fußes am Ende der Bewegungsphase.

Die Annäherungsrichtung beschreibt die Richtung, aus der die Einstiegsbewegung eingeleitet wird. Sie wird durch den Annäherungswinkel ω_I^0 definiert (vgl. Abbildung 5-1), der zwischen der Fahrzeuglängsachse X und dem Vektor $LFSP_{Anfang}LFSP_{Ende}$ gemessen wird. Da der maximale Türöffnungswinkel bei den meisten Fahrzeugen etwa bei 60° liegt, sollte der Annäherungswinkel aus Konsistenzgründen diesen Wert

nicht überschreiten. Aufgrund der festgelegten Versuchsrahmenbedingungen (vgl. Abschnitt 4.1.4 Versuchsablauf) wird dieser Anforderung Rechnung getragen. Die Auswertung zeigt, dass der Annäherungswinkel im Schnitt aller Versuchspersonen bei 46,6° liegt. Damit ist sicher gestellt, dass der Einfluss der Tür implizit im Modell enthalten ist.

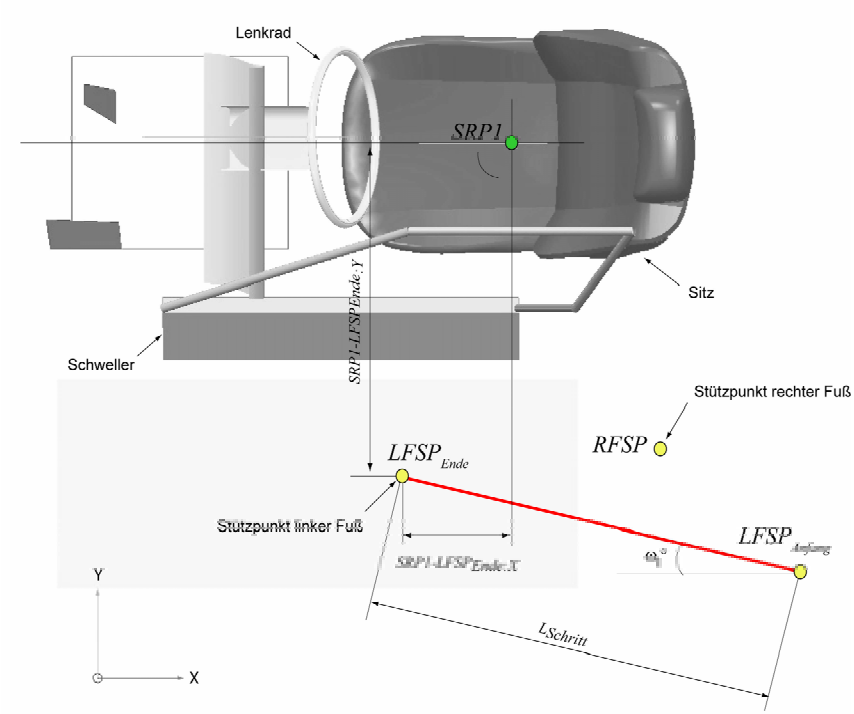

Abbildung 5-1. Annäherungsrichtung und die Lage der Stützpunkte in der Bewegungsphase I. Schematische Darstellung in der Draufsicht.

Die Endposition des linken Fußes $LFSP_{Ende}$ ist besonders beachtenswert, da sie über Phase II und III konstant gehalten wird. Beim Heben des rechten Fußes ins Fahrzeug in Phase II wird das Körpergewicht auf den linken Fuß verlagert, in Phase III sorgt unter anderem die Lage des linken Fußes für eine ausreichende Bewegungsstabilität und Gleichgewichtserhaltung.

Die Analyse zeigt, dass die Lage des Stützpunktes $LFSP_{Ende}$ an der individuellen Sitzposition ausgerichtet wird. Im Durchschnitt tendiert der horizontale Versatz des Fußstützpunktes $SRP1\text{-}LFSP_{Ende:X}$ (vgl. Abbildung 5-1) zu einem Erwartungswert von 0 (vgl. Abbildung 5-2). Aufgrund einer relativ großen Streuung der Parameterrealisierungen und der damit verbundenen Unschärfe wird für die Definition des Toleranzbereiches von $SRP1\text{-}LFSP_{Ende:X}$ das zentrale 1σ-Intervall definiert. Das 1σ-Intervall überdeckt somit annähernd 70% aller Parameterrealisierungen.

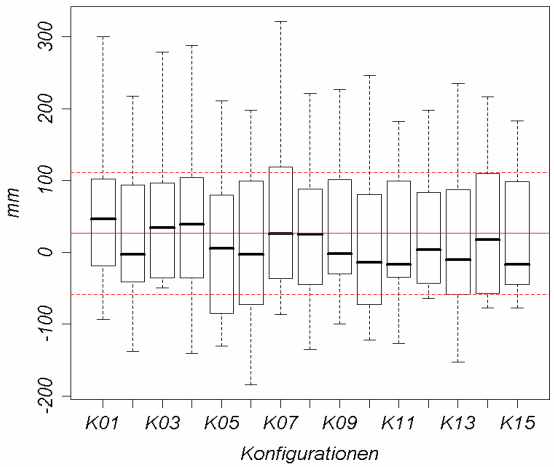

Abbildung 5-2. Versatz des Stützpunktes (SRP1-LFSP$_{Ende:X}$) relativ zur individuellen Sitzposition.

Durch die Kopplung des linken Stützpunktes an die individuelle Sitzposition wird die motorische Bewegungsplanung vereinfacht. Der linke Fuß wird bereits in Phase I so gesetzt, dass die nachfolgenden Bewegungsvollzüge in den Phasen II und III ohne zusätzliche Korrekturen möglich sind. Der Sitz dient als wesentliche Orientierung zur Abschätzung der erforderlichen Einstiegsposition.

Die Dauer der Annäherungsphase liegt im Schnitt bei 0,72 s. (vgl. Tabelle 5-1). Die Phasendauer bei großen Personen (SG1) beträgt 0,76 s. Im Vergleich beansprucht die Annäherungsbewegung bei kleinen Personen (SG3) mit 0,64 s aufgrund der geringeren Schrittlänge weniger Zeit.

Tabelle 5-1. Die mittlere Dauer der Bewegungsphase I in allen Versuchskonfigurationen nach Versuchspersonen in [s].

VP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Mittelwert
K00-K15	0,78	0,90	0,78	0,71	0,65	0,68	0,53	0,62	0,68	0,67	0,71	0,77	0,83	0,72

Mit dem Ablösen des rechten Fußstützpunktes $RFSP$ vom Boden wird die II. Bewegungsphase des Einstiegsvorganges eingeleitet.

5.1.3 Phase II: Stabile Stützposition einnehmen

Die Lage der Bewegungsebene im Raum für die Bewegung des rechten Fußes hängt sowohl von den anthropometrischen Maßen der Person als auch von den geometrischen Parametern der Einstiegskonfiguration ab. Dabei werden die einzelnen Richtungsvektoren der Bewegungsebene unterschiedlich durch die Parameter beeinflusst.

In der Tabelle 5-2 sind die körpermaßzentrierten Fahrzeugmaße dargestellt, die mit den Einheitsvektoren der Bewegungsebene eine Korrelation $r \neq 0$ aufweisen. Die

6 Bewegungssimulation

6.1 Gesamtkonzept der Bewegungssimulation

Der Simulationsansatz stützt sich in seinem Gesamtkonzept auf die beschriebene Struktur der Bewegungsplanung. Das Konzept beruht auf dem Prinzip der Zielzerlegung und der reversiven Bewegungskonstruktion. Das oberste Ziel der zu planenden Handlung, hier der Einstieg, wird in abhängige Teilziele zerlegt, die in ihrer Gesamtheit und in ihrer funktionalen Verknüpfung zueinander einen, der geometrischen Umgebung entsprechenden, Bewegungsentwurf bilden, der danach ausgehend vom Endzustand unter Berücksichtigung der definierten funktionalen Ziele rückwärts aufgebaut wird. Dafür sind die führenden Körperteile verantwortlich. In ihrer Lenkungsfunktion bestimmen sie auf diese Weise die Bewegung des Gesamtkörpers beim Einstieg.

Die funktionalen Ziele werden durch die Stützhaltungen abgebildet. Jede Stützhaltung beschreibt die Haltung des Gesamtkörpers zum Zeitpunkt des Erreichens des Teilzieles, das mit dem Ende der funktionalen Phase zusammen fällt. Die Bewegungen der führenden Körperteile werden durch das statistisch-mathematische Modell vollständig beschrieben und anhand der körpermaßzentrierten Fahrzeugmaße geschätzt. Der Gesamtkörper wird dabei als ein geführtes kinematisches System betrachtet. Die Bewegungen der geführten Körperteile werden basierend auf den Methoden der inversen Dynamik mit dem Menschmodell RAMSIS berechnet und visualisiert. Die Grundstruktur der Bewegungssimulation kann daraus als wiederholbare Abfolge von fünf Hauptschritten (vgl. Abbildung 6-1) dargestellt werden.

Abbildung 6-1: Struktur der Bewegungssimulation.

Das Menschmodell RAMSIS wird für die Berechnung der Stützhaltungen und für die Prognose der Bewegung der geführten Körperteile verwendet. RAMSIS ist in der Lage, die wahrscheinlichsten Körperhaltungen in der gegebenen CAD-Umgebung zu prognostizieren (vgl. Abschnitt 6.4). Die Bewegung wird dabei als eine Abfolge der Körperhaltungen zu den einzelnen Zeitpunkten des Einstiegsvorganges dargestellt.

Die dafür entwickelte Methode ermöglicht die Überführung der statischen Haltungsprognose in eine dynamische Haltungssimulation (vgl. Abschnitt 6.4.2).

Für eine schnelle Konvergenz der Optimierungsalgorithmen werden in das Modell unabhängige Stabilitätsparameter (vgl. Abschnitt 5.2.2) eingeführt. Die Unabhängigkeit bezieht sich auf ihre Allgemeingültigkeit. Die Stabilitätsvariablen wie Blick- und Handbewegung sowie Beckenrotation folgen global betrachtet immer dem gleichen Bewegungsmuster bzw. -entwurf. Sie orientieren sich in ihrer Ausprägung an den relativen Verhältnissen des zur Verfügung stehenden Bewegungsraums und beeinflussen damit die Lage und Ausrichtung der anderen Körperteile.

Das Konzept der reversiven Bewegungskonstruktion und der dynamischen Haltungssimulation ermöglicht, basierend auf nur wenigen statistisch berechneten Bewegungsbahnen, die gesamte Einstiegsbewegung zu prognostizieren und zu visualisieren.

6.2 Abbildung auf RAMSIS

6.2.1 Lösungsweg des Abbildungsproblems

Das Menschmodell stellt allgemein eine vereinfachte Nachbildung eines Menschen dar. Modellvereinfachungen sind für die Komplexitätsreduktion von Berechnungs- und Visualisierungsalgorithmen erforderlich, haben jedoch Einfluss auf die Genauigkeit der Bewegungssimulation. Das bedeutet zum Beispiel auch, dass die real aufgezeichneten Bewegungen nur mit einer bestimmten Genauigkeit auf das virtuelle Menschmodell übertragen werden können. Diese Übertragung kann grundsätzlich auf zwei Wegen erfolgen.

Der erste Weg kann als Modellkonvertierung charakterisiert werden. Hierbei wird die Anpassung der Bewegungsbahnen an die kinematische Struktur des jeweiligen Menschmodells unmittelbar bei der Bewegungsrekonstruktion durchgeführt. Die kinematische Struktur des Menschmodells wird direkt an die vom Motion Capturing System aufgezeichneten Bewegungsdaten angepasst. Die Bewegungsanalyse erfolgt anschließend auf der Basis der umgerechneten bzw. konvertierten Bewegungsbahnen. Die Nachteile dieser Vorgehensweise sind eine starre Kopplung an das jeweilige Menschmodell und der „Verlust“ der realen Bewegungsdaten bei der Analyse der Bewegung. Dieser Wegfall der realen Bewegungsstrukturen macht eine tiefgehende Bewegungsanalyse unmöglich.

Der andere Weg kann als Modellanpassung bezeichnet werden. Bei dieser Variante wird die Konvertierung der Bewegungsdaten ans Ende des Umrechnungs- und Analyseprozesses gestellt. Die Analyse erfolgt dementsprechend auf Basis der realen Bewegungsdaten, so dass die Zusammenhänge nicht verloren gehen. Die Anpassung des Menschmodells an die Bewegungsbahnen erfolgt dann beim Übergang in das CAD-System. Aufgrund der Bedeutung der realen Bewegungsstrukturen für die Simulation wird dieser Weg der Modellanpassung weiter verfolgt.

6.2.2 Anpassung des Modells an die reale Bewegung

Für die Überwindung der Unterschiede zwischen der realen Person und dem Menschmodell wird im Rahmen der Bewegungssimulation eine Synthese des ausgewählten Menschmodells RAMSIS mit der realen Bewegung durchgeführt.

Bei der Anpassung der realen Einstiegsbewegung an das Menschmodell RAMSIS müssen im Allgemeinen zwei Aspekte betrachtet werden. Zum Einen ist eine anthropometrische Anpassung des Modells an die Körpermaße der realen Person erforderlich, zum Anderen müssen die verwendeten realen Analysepunkte bzw. Marker exakt auf RAMSIS übertragen werden. Diese werden dann als Koppelpunkte bezeichnet. Der entscheidende Vorteil bei der Verwendung der führenden Körperteile für die Bewegungssimulation besteht in der geringen Anzahl der Koppelpunkte und somit der Bewegungsbahnen, die für die Nachführung des Modells verwendet werden. Der Berechnungsaufwand der Modellbewegung steigt überproportional mit der Anzahl der führenden Bewegungsbahnen. Darüber hinaus schränkt dies die Freiheitsgrade des Modells ein und kann sich unter Umständen in einer Überbestimmtheit der Modellführung äußern. Die Modellführung ist überbestimmt, wenn eine gleichzeitige Bewegung der Koppelpunkte entlang der Bewegungsbahnen aus geometrischen Gründen nicht gewährleistet werden kann.

Die Bewegung der führenden Körperteile ist anhand der Bewegung der Analysepunkte beobachtet und analysiert worden, die in RAMSIS in Koppelpunkte umgewandelt werden. Jedes führende Körperteil verfügt somit über seinen eigenen Koppelpunkt, der entlang der geschätzten Bewegungsbahn bewegt wird. Gemäß dem Simulationskonzept werden die Bewegungsbahnen nur für die führenden Körperteile geschätzt. Dementsprechend werden am RAMSIS die Koppelpunkte definiert.

Für die Modellnachführung werden gemäß der Definition der Analysepunkte $RFSP$ und $LFSP$ die Koppelpunkte $RFSP_R$ und $LFSP_R$ abgeleitet (vgl. Abbildung 6-2).

Abbildung 6-2. Der Fußstützpunkt (FootSupportPoint) bei RAMSIS.

Der Hüftpunkt $PHPT$ stellt in RAMSIS die mittlere statistische Position des anatomischen Hüftzentrums dar. Der Hüftpunkt dient darüber hinaus der Kopplung des RAMSIS-Modells mit dem Sitz, die ihrerseits die Berechnung der Fahrerhaltung ermöglicht. Aus diesem Grund ist der $PHPT$ nicht starr an die innere Skelettstruktur von RAMSIS gekoppelt, sondern wird separat anhand der RAMSIS-Datenbank der Fahrzeugsitze errechnet. Der Hüftpunkt entspricht annähernd dem realen Analysepunkt $PEL0$ und wird demzufolge für die Nachführung des Beckens verwendet (vgl. Abbildung 6-3).

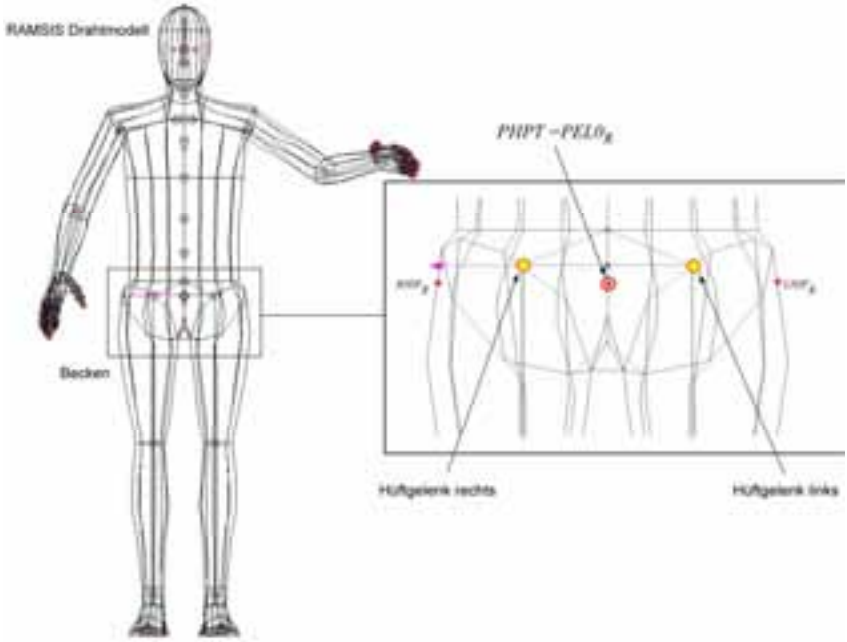

Abbildung 6-3. Festlegung des Koppelpunktes $PEL0_R$ in RAMSIS.

Das Nachführen des Gesamtmodells erfolgt anhand der drei beschriebenen Koppelpunkte. Für die Darstellung der Bewegungsbahnen der führenden Körperteile ist die Berechnung der Position des Start- bzw. Endpunktes erforderlich. Die Lage dieses Punktes im Raum wird der Stützhaltung entnommen, welche das Erreichen des entsprechenden funktionalen Teilziels abbildet (vgl. Abschnitt 6.3). Daraus wird deutlich, dass das Menschmodell selbst für die Generierung der Bewegungsbahnen dient und damit den entscheidenden Beitrag zur Konsistenz der Bewegungsvorgaben leistet.

6.3 Definition der Stützhaltungen

Das Erreichen der funktionalen Bewegungsteilziele wird durch die Stützhaltungen gesichert. Sie bilden die Bewegungszustände an den Grenzen der Bewegungsphasen ab. Für die Einstiegsbewegung mit fünf funktionalen Bewegungsphasen ergeben sich insgesamt sechs erforderliche Stützhaltungen. Die reversive Bewegungskonstruktion sieht vor, dass diese in einer der Bewegung entgegengesetzten Reihenfolge, also rückwärts, berechnet werden. Diese Vorgehensweise entspricht dem menschlichen Verhalten bei der Bewegungsplanung. Sie gewährleistet eine stimmige funktionale Struktur der simulierten Einstiegsbewegung sowie eine parallele Haltungsanpassung an die gegebene Fahrzeugkonfiguration. Die Stützhaltungen an den Phasenübergängen werden auch als Übergangskorridor bezeichnet. Durch eine definierte Festlegung der Körperhaltung im Übergangskorridor wird die Bewegungsberechnung durch diese Wendepunkte in die richtige Richtung gelenkt. In Abbildung 6-4 bis Abbildung 6-6 sind exemplarisch die in RAMSIS berechneten Stützhaltungen dargestellt.

7 Plausibilisierung des Modells

7.1 Inhalt und Umsetzung

7.1.1 Plausibilisierungsansatz (Versuch C)

Die Methode der kritischen Nachprüfung ist nach Popper [Popp82 S. 7] immer die folgende: Aus dem vorläufig unbegründeten theoretischen System werden auf logisch-deduktivem Weg Folgerungen abgeleitet. Diese müssen untereinander und mit anderen Sätzen auf ihre Widerspruchslosigkeit geprüft werden. Eine der Prüfrichtungen ist die Prüfung durch „empirische Anwendung“ der abgeleiteten Folgerungen. Aus dem theoretischen System werden möglichst leicht nachprüfbare bzw. anwendbare singuläre Folgerungen deduziert und aus diesen insbesondere jene ausgewählt, die aus bekannten Systemen nicht ableitbar sind. Fällt der Vergleich positiv aus, werden die singulären Folgerungen anerkannt bzw. verifiziert.

Das Ziel der Plausibilisierung besteht folglich darin, den Nachweis zu führen, dass die Bewegung einer realen Person in einer festgelegten Fahrzeugkonfiguration durch das aufgestellte statistisch-mathematische Bewegungsmodell adäquat beschrieben und durch die Menschmodellsimulation vollständig reproduziert werden kann.

Dem Plausibilitätsnachweis wird die Alternativhypothese zu Grunde gelegt. Folglich wird der Nachweis der Modellplausibilität als erbracht angesehen, wenn mindestens eine Person existiert, die mit festgelegten anthropometrischen Abmessungen in der vordefinierten geometrischen Umgebung die Bewegung vollzieht, die mit einer vom Bewegungsmodell prognostizierten und vom Menschmodell visualisierten Bewegung vergleichbar ist (vgl. Abbildung 7-1). Die Vergleichbarkeit der Bewegungsabläufe wird durch die zugestandenen Toleranzbereiche (vgl. Abschnitt 3.3.5) begrenzt.

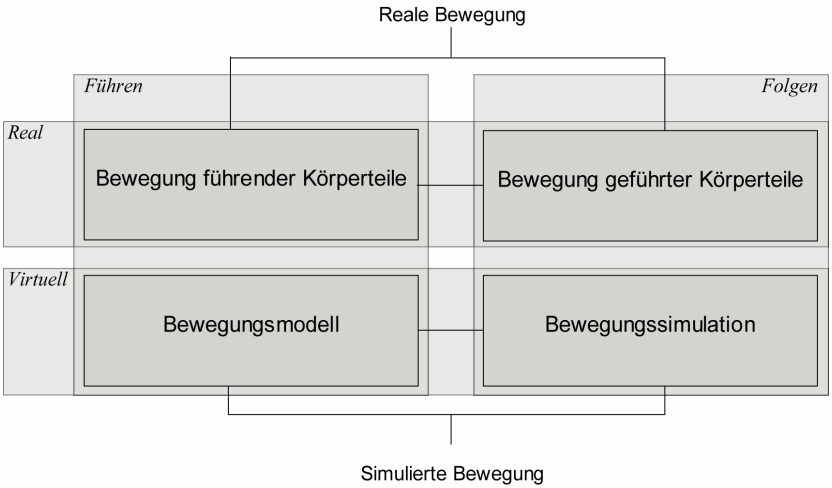

Abbildung 7-1. Vorgehensweise zum Plausibilitätsnachweis.

9 Anhang

9.1 Einstiegsstrategien

Definition der Einstiegsstrategien nach Rigel [Rigel05 S. 21-24].

9.1.1 „Schlüpf“-Strategie

Bei der „Schlüpf“-Strategie wird beim Einsteigen 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.

9.1.2 „Fädel“-Strategie

Ein „Fädler“ 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.

9.1.3 „Plumps“-Strategie

Im Gegensatz zu den ersten beiden Strategien wird bei der „Plumps“-Strategie 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.

9.1.4 „Hürden“-Strategie

Bei der vierten Variante, der „Hürden“-Strategie, 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.

9.7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1. Eigenschaftsorientierung bei der Zielsystemdefinition nach [HeSc00]. 2
Abbildung 1-2. Einstiegsrelevante Hauptmaße (Seitenansicht, xz-Ebene). 3
Abbildung 1-3. Einstiegsrelevante Hauptmaße (Ansicht yz-Ebene). 3
Abbildung 1-4. Fahrzeugkonzept Roadster und SUV (BMW Z4 und X5). 4
Abbildung 1-5. Sitzhöhe vorne (H30) in Abhängigkeit zur Sitzhöhe bzgl. Fahrbahn (H5). 5
Abbildung 1-6. Schwellerhöhe (H115) in Abhängigkeit zur Sitzhöhe bzgl. Fahrbahn (H5). 5
Abbildung 1-7. Datenbankbasierter Simulationsansatz. Prinzipdarstellung. 7
Abbildung 1-8. Funktionaler Simulationsansatz. Prinzipdarstellung. 7
Abbildung 1-9. Lösungsansatz der wissenschaftlichen Aufgabe. 10
Abbildung 2-1. Festlegung des Handlungsweges durch Ziel- und Operationsdefinition. 15
Abbildung 2-2. Reflexgesteuerter motorischer Regelkreis. 17
Abbildung 2-3. Großhirn. Motorische Rindengebiete. Zeichnung nach [Mann04]. 21
Abbildung 2-4. Struktur der Bewegungsprogrammierung zur Bewegungssteuerung. 22
Abbildung 2-5. Ebenen der Einstiegsregulation. 23
Abbildung 2-6. Rückwärtsgerichtetheit der Bewegungsvorbereitung. 24
Abbildung 3-1. Ablaufschema der Forschungsarbeit. 25
Abbildung 3-2. Das variable Ein-/Ausstiegsmodell (VEMO). 29
Abbildung 3-3. VEMO-Knoten mit Verstellrichtungen. 30
Abbildung 3-4. Zweistufige Vorgehensweise zur Bewegungsrekonstruktion. 32
Abbildung 3-5. Rekonstruierte Versuchsperson (GOLEM-Modell) und VEMO. 33
Abbildung 3-6. Haupteinstiegsstrategieanteile bei Frauen und Männern nach Rigel. 34
Abbildung 3-7. Bewegung des rechten Fußes am Beispiel des Fußmarkers RTOE. 37
Abbildung 3-8. Absolutkoordinaten des A-Säulenknotens oben in allen Versuchskonfigurationen der Versuchsreihe A. 39
Abbildung 3-9. Vergleich der rekonstruierten mit der gefilterten Bewegungsbahn. 40
Abbildung 3-10. Gesamthafte Betrachtung zur Analyse der Einstiegsbewegung. 42
Abbildung 3-11. Beispiel Regressionsfunktion $\beta(t)$. 46
Abbildung 3-12. Darstellung der Euler-Winkel nach [Hane04]. 48
Abbildung 3-13. Bewegungsbahnparameter. Exemplarische Darstellung an der Bewegungsbahn des rechten Fußstützpunktes (RFSP). 49
Abbildung 4-1. Phasen der Einstiegsbewegung auf der Planungsebene. 55
Abbildung 4-2. Phasen der Einstiegsbewegung auf der Führungsebene. 56
Abbildung 4-3. Kritische Gelenkbelastungen in Phase II. 62
Abbildung 4-4. Kritische Gelenkbelastungen in Phase III. 63
Abbildung 4-5. Kritische Gelenkbelastungen in Phase IV. 63
Abbildung 4-6. Bewegung des rechten Fußes ins Fahrzeug. 65
Abbildung 4-7. Mittlere Abweichung der führenden Körperteile von der Bewegungsebene. 67
Abbildung 4-8. Bestimmung des Analysepunktes des Fußes. 68
Abbildung 4-9. Analysepunkt für das Becken PEL0. 68
Abbildung 4-10. Führungs- und Übergangsabschnitt der Bewegungsphase II. 69
Abbildung 4-11. Definition der Vektorbasis für die Beschreibung der Bewegungsbahn in der Bewegungsebene am Beispiel der Bewegung des rechten Fußes. 70
Abbildung 4-12. Prinzipdarstellung der Konfigurationsanpassung. 73
Abbildung 5-1. Annäherungsrichtung und die Lage der Stützpunkte in der Bewegungsphase I. Schematische Darstellung in der Draufsicht. 80
Abbildung 5-2. Versatz des Stützpunktes ($SRP1\text{-}LFSP_{Ende:X}$) relativ zur individuellen Sitzposition. 81
Abbildung 5-3. Graphische Darstellung der statistischen Regression $v_y=f(v_x)$. 84
Abbildung 5-4. Prinzipskizze der Fußstützpunkte. 85

Abbildung 5-5. Regressionsgerade und 90%-Prognoseintervall für den x-Versatz von $RFSP_{Ende}$ relativ zum SRP1. ..... *86*
Abbildung 5-6. Regressionsgerade und 90%-Prognoseintervall für den y-Versatz von $RFSP_{Ende}$ relativ zum SRP1. ..... *86*
Abbildung 5-7. Gemessene Schutzabstände an den Schwellerkanten. *88*
Abbildung 5-8. Abhängigkeit des Schutzabstandes A_P13_min von der körpermaßzentrierten Schwellerhöhe. Regressionskurve mit dem 90%- und 60%-Prognoseintervall. *89*
Abbildung 5-9. Konstruktion der Bewegungsbahn in der Bewegungsebene. Prinzipskizze. ... *90*
Abbildung 5-10. Graphische Darstellung des Regressionsmodells für die Bestimmung des Landewinkels des rechten Fußes. *91*
Abbildung 5-11. Erzeugung der Bewegungsbahn als Spline-Kurve. *92*
Abbildung 5-12. Verteilung der Bewegungsdauer von Phase II. *93*
Abbildung 5-13. Phasendauer in den Versuchkonfigurationen (T_Phase). *93*
Abbildung 5-14. Das Geschwindigkeitsprofil in Phase II. *95*
Abbildung 5-15. Der statistische Zusammenhang zwischen der y- und z-Komponente des Vektors w. *97*
Abbildung 5-16. Regressionsgerade $v_y=f(v_z)$ mit 90%-Prognoseintervall. *98*
Abbildung 5-17. Parabelförmige Bewegungsbahn des Beckens in der Bewegungsebene. *98*
Abbildung 5-18. Graphische Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Länge L und den körpermaßzentrierten Fahrzeugparametern H5_ind und W14. ..... *99*
Abbildung 5-19. Verteilungsfunktion des Winkels alpha. *100*
Abbildung 5-20. Beckendrehung (RPO_G_z) um die vertikale Achse. Auspartialisiert nach Körpergrößengruppen inklusive 90% Prognoseintervall. *101*
Abbildung 5-21. Torsoneigung (RTO_Gs) in der Sagittalebene. Auspartialisiert nach Körpergrößengruppen inklusive 90% Prognoseintervall. *101*
Abbildung 5-22. Perspektivische Ansicht der Torsoneigung in der Sagittalebene für VP01 in K14. ..... *102*
Abbildung 5-23. Funktionales mathematisches Modell für die Torsoneigung RTO_Gs inklusive dem 90%-Prognoseintervall. *103*
Abbildung 5-24. Isokurven des funktionalen Regressionsmodells $f(RPO_G_Z)=ff(RTO_Gs)$. *103*
Abbildung 5-25. Graphische Darstellung des Regressionsmodells $f(RPO_G_Z)=ff(RTO_Gs)$. *104*
Abbildung 5-26. Geschwindigkeitsprofil inklusive 90% Prognoseintervall. *104*
Abbildung 5-27. Korrekturabschnitt bei der Bewegung des linken Fußes für eine große (links) und eine kleine Person (rechts) in der Draufsicht. *105*
Abbildung 5-28. Zielaufteilung bei der Bewegung des linken Fußes in der Draufsicht. *106*
Abbildung 5-29. Zielaufteilung bei der Bewegung des linken Fußes mit Korrekturbewegung in der Draufsicht. *106*
Abbildung 5-30. Maximale Abweichung des linken Fußes von der Bewegungsebene zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Bewegungsphase IV. *107*
Abbildung 5-31. Bereichsaufteilung für den Hebekraftindex k_0. ..... *108*
Abbildung 5-32. Kombinierter Quotient Qk. *109*
Abbildung 5-33. Statistischer Zusammenhang zwischen der z- und y-Komponente des Vektors u. *110*
Abbildung 5-34. Bewegungsbahnkonstruktion. Phase IV. *111*
Abbildung 5-35. Regressionsfunktion des Sicherheitsabstandes des linken Fußes zum Schweller in Abhängigkeit zum kombinierten Quotienten Q_k. *112*
Abbildung 5-36. Regressionsgerade $\alpha_1=f(k_1)$ und $\beta_1=f(k_2)$ mit 90%-Prognoseintervall. *113*
Abbildung 5-37. Geschwindigkeitsprofil inklusive 90% Prognoseintervall. *114*
Abbildung 5-38. Die Regressionsfunktion der Phasendauer in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsverlauf $T_{Phase}=f(v_{LFSP})$ mit 90%-Konfidenzintervall. *115*

Abbildung 5-39. Phase V. Eingenommene Fahrerhaltung. *116*
Abbildung 5-40. Zeitliche Synchronisation der Bewegungsphasen. *117*
Abbildung 5-41. Gleichgewichtsstabilisierung durch den rechten und linken Arm. *119*
Abbildung 5-42. Verteilungsfunktion der Beckenverdrehung (RPO_Gz) um die vertikale z-parallele Achse der Versuchspersonengruppe SG1 in Phase III. *120*
Abbildung 5-43. Beckenwinkel RPO_G_Z mit 90%-Prognoseintervall der Versuchspersonengruppen SG1 und SG3 in Phase II. *120*
Abbildung 6-1: Struktur der Bewegungssimulation. *121*
Abbildung 6-2. Der Fußstützpunkt (FootSupportPoint) bei RAMSIS. *123*
Abbildung 6-3. Festlegung des Koppelpunktes $PEL0_R$ in RAMSIS. *124*
Abbildung 6-4. RAMSIS Stützhaltung 6 und 5. ..... *125*
Abbildung 6-5. RAMSIS Stützhaltung 4 und 3. ..... *125*
Abbildung 6-6. RAMSIS Stützhaltung 2 und 1. ..... *125*
Abbildung 6-7. Anwendung des Kraft-Haltungsmodells auf den statischen Fall. *127*
Abbildung 6-8. Einführung der Trägheitskräfte in das Kraft-Haltungsmodell. *128*
Abbildung 7-1. Vorgehensweise zum Plausibilitätsnachweis. *129*
Abbildung 7-2. Auswahl der Testperson. *130*
Abbildung 7-3. Plausibilisierungskonfiguration. Veränderungen gegenüber Basiskonfiguration in mm. *131*
Abbildung 7-4. Vergleich der Bewegung in der Bewegungsebene in Phase II. *133*
Abbildung 7-5. Vergleich der Bewegung in der Bewegungsebene in Phase III. *134*
Abbildung 7-6. Vergleich der Bewegung in der Bewegungsebene in Phase IV. *135*
Abbildung 7-7. Vergleich der Bewegung der Schulterpunkte LSHO und RSHO. *136*
Abbildung 7-8. Vergleich der Bewegung der Beckenpunkte LAPSI und RAPSI. *137*
Abbildung 7-9. Berechnete und reale Bewegungshaltung am Phasenübergang II-III. *139*
Abbildung 8-1. Bewegungssimulation als Voraussetzung für eine umfassende Diskomfortanalyse. *142*
Abbildung 9-1. Die Lage der anatomischen Ebenen und Achsen am menschlichen Körper. Abbildung nach [Gotl06]. *145*
Abbildung 9-2. Markerpositionierung an der Versuchsperson. 47-Markerset. *146*
Abbildung 9-3. Beispiel für eine Konfigurationscheckliste (Konfiguration XY). *149*
Abbildung 9-4. Ablaufplan des Ein-/Ausstiegsversuches. *151*
Abbildung 9-5. Analysepunkte am RAMSIS. Anordnung entsprechend Markerdefinition. *154*

9.8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1. Definition der Handlung. *14*
Tabelle 3-1. Beispiel für Systeme zur Erfassung der Bewegung als Ortsveränderung der Körperteile im Raum. *27*
Tabelle 3-2. VEMO-Parameter. *30*
Tabelle 3-3. Bewegungsdauer beim Heben des rechten Fußes ins Fahrzeug. *37*
Tabelle 3-4. Maximale Rundungsfehler der Bewegungsparameter. *41*
Tabelle 3-5. Zusammenfassung der Fehlerquellen und Schätzung des Gesamtfehlers. *41*
Tabelle 3-6. Körpermaßzentrierte Fahrzeugparameter. *47*
Tabelle 4-1. Versuchspersonenkollektiv Versuch A. *51*
Tabelle 4-2. Konfigurationsauswahl. *52*
Tabelle 4-3. Veränderung der Fahrzeugmaße bei den Versuchskonfigurationen. *53*
Tabelle 4-4. Veränderung der Fahrzeugmaße bei den Versuchskonfigurationen. *53*
Tabelle 4-5. Biomechanische Detailbetrachtung der Bewegungsphase II. *59*
Tabelle 4-6. Biomechanische Detailbetrachtung der Bewegungsphase III. *60*
Tabelle 4-7. Biomechanische Detailbetrachtung der Bewegungsphase IV. *61*
Tabelle 4-8. Interindividuelle Streuung der führenden Körperteile in der Basiskonfiguration. *70*
Tabelle 4-9. Versuchskollektiv B. *72*
Tabelle 4-10. Korrelationskoeffizienten r nach Pearson zwischen ausgewählten Fahrzeugparametern und den Einheitsvektoren der Bewegungsebene w, u und v. *76*
Tabelle 4-11. Das multivariate Modell für die z-Komponente des Einheitsvektors w. *77*
Tabelle 5-1. Die mittlere Dauer der Bewegungsphase I in allen Versuchskonfigurationen nach Versuchspersonen in [s]. *81*
Tabelle 5-2. Korrelationen der körpermaßzentrierten Fahrzeugmaße mit den Einheitsvektoren der Bewegungsebene. *82*
Tabelle 5-3. Das multivariate Modell für die x-Komponente des Einheitsvektors w. *82*
Tabelle 5-4. Das Regressionsmodell für die y-Komponente des Einheitsvektors w. *83*
Tabelle 5-5. Das Regressionsmodell für die x-Komponente des Einheitsvektors v. *83*
Tabelle 5-6. Das Regressionsmodell für die y-Komponente des Einheitsvektors v. *84*
Tabelle 5-7. Das multivariate Modell für den x-Versatz von $RFSP_{Ende}$ *relativ zum SRP1.* *85*
Tabelle 5-8. Das Regressionsmodell für den y-Versatz von $RFSP_{Ende}$ *relativ zum SRP1.* *87*
Tabelle 5-9. Variation der Zeitpunkte T_Max_Hoehe und T_P13_min. *88*
Tabelle 5-10. Modellterme für die Berechnung des Schutzabstandes A_P13_min. *88*
Tabelle 5-11. Das multivariate Modell für die Schätzung des Zeitpunktes T_P13_min. *89*
Tabelle 5-12. Das multivariate Modell für die Schätzung der y-Komponente des Ablösevektors V_2D_Abflug. *90*
Tabelle 5-13. Das Regressionsmodell für die Schätzung der x-Komponente des Ablösevektors V_2D_Abflug. *91*
Tabelle 5-14. Perzentilwerte der Ablösegeschwindigkeit des Fußes in m/s entsprechend der Aufteilung der Bewegungsrhythmusgruppen. *91*
Tabelle 5-15. Die mittlere effektive Bahnlänge in allen Versuchskonfigurationen in [m]. *94*
Tabelle 5-16. Das multivariate Modell für die Schätzung der Phasendauer. *94*
Tabelle 5-17. Das multivariate Modell für die Schätzung der z-Komponente des Vektors w. *96*
Tabelle 5-18. Quantilwerte der Abweichung des Hüftzentrums PEL0 von der endgültigen Sitzposition in [mm]. *100*
Tabelle 5-19. Das multivariate Modell für die Schätzung der x-Komponente des Vektors w. *109*
Tabelle 5-20. Das Regressionsmodell für die Schätzung der y-Komponente des Vektors w. *110*

Tabelle 5-21. Das Regressionsmodell für die Schätzung der y-Komponente des Vektors u.. 110
Tabelle 5-22. Das Regressionsmodell für die Schätzung der z-Komponente des Vektors u.. 110
Tabelle 5-23. Quantilwerte der Ablöse- und Landewinkel in [°]. 112
Tabelle 5-24. Das Regressionsmodell $\alpha_1=f(k_1)$. 113
Tabelle 5-25. Das Regressionsmodell $\beta_1=f(k_2)$. 113
Tabelle 5-26. Das multivariate Modell für die Schätzung der z-Lage des Punktes P_a. 114
Tabelle 5-27. Das multivariate Modell für die Schätzung der z-Lage des Punktes P_l. 114
Tabelle 5-28. Dauer der Einstiegsphasen in allen VEMO-Konfigurationen in Sekunden. 117
Tabelle 5-29. Phasenendzeitpunkte in Sekunden. 117
Tabelle 5-30. Maximale seitliche Kopfneigung im Raum am Beispiel der Versuchskonfigurationen K01, K05, K06, K14 und K15. 118
Tabelle 7-1. Relevante körpermaßzentrierte Fahrzeugparameter. 132
Tabelle 7-2. Vergleich der Ausrichtung der Bewegungsebene in der Phase II. 132
Tabelle 7-3. Vergleich der Ausrichtung der Bewegungsebene in der Phase III. 133
Tabelle 7-4. Vergleich der Ausrichtung der Bewegungsebene in Phase IV. 134
Tabelle 9-1. Lage und Richtungsbezeichnungen. 145
Tabelle 9-2. Bewegungsbezeichnungen. 145
Tabelle 9-3. VEMO-Knoten und ihre relative Verstellbarkeit in mm. 147
Tabelle 9-4. Ein-/Ausstiegsrelevante Fahrzeugparameter. 148
Tabelle 9-5. Reihenfolge der Versuchskonfigurationen. 150
Tabelle 9-6. Tabelle zur Körpermaßvermessung. 150
Tabelle 9-7. Konfigurationseinstellungen für Körpergrößengruppen SG1, SG2 und SG3. 152
Tabelle 9-8. Körpermaßtabelle. Vergleich der Versuchsperson mit dem RAMSIS-Modell. 153
Tabelle 9-9. Körperteilmassen der Versuchsperson berechnet in RAMSIS. 153
Tabelle 9-10. Abmessungen der Testkonfiguration. Plausibilitätsprüfung. 154

9.9 Literaturverzeichnis

[AbAz71] Abdel-Aziz, Y.I., Karara, H. M: Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry (pp. 1-18). Falls Church, VA: American Society of Photogrammetry. 1971.

[AbSh84a] Abraham, R., Show, D. C.: Dynamics-The Geometry Of Behavior. Aerial Press, Inc. California 1984.

[Abr89] Abramowski, S.: Exakte Algorithmen zur Bewegung gelenkgekoppelter Objekte zwischen festen Hindernissen. Dissertation. Universität Karlsruhe 1989.

[ASB95] Allard, P., Stokes, I., Blanchi, J.: Three Dimensional Analysis of Human Movement. Human Kinetics 1995.

[Arlt99] Arlt, F.: Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell. Dissertation. TU München. München 1999.

[Balz83] Balzer, W.; Heidelberger, M.: Zur Logik empirischer Theorien. Berlin. 1983.

[Barh82] Barham, J: Mechanische Kinesiologie. Thieme. Stuttgart 1982.

[Barn49] Barnes, R. M.: Motion and time Study. New York 1949 (zit. nach Hacker 1967)

[Bate96] Bates, B. T.: Single-subject methodology. An alternative approach. Medicine and Science in Sports and Exercise, 1996 28(5): 631-638 (zit. nach Sirgiou 2004).

[Bauc98] Bauch, A. E.; Untersuchung zum Komforteindruck ausgewählter Armhaltungen. Technische Universität München. Lehrstuhl für Ergonomie. 1998.

[Bell90] Bell A. L., Pedersen D. R., Brand R. A.: A comparison of the accuracy of several hip center location prediction methods. London, UK. 1990.

[Bern34] Bernstein, N. A.: The Techniques Of The Study Of Movements. In: Textbook of the Physiology of Work. Moscow 1934.

[Blic97] Blickhan, R., Kirchner, G.: Biomechanik und Motorik. Czwalina Verlag Hamburg. 1997.

[BöMe78] Bös, K; Mechling, H.: Ein Modell zur Vorhersehbarkeit motorischer Leistung. In: Motorik 1 (1978), S. 82-87.

[Boro81] Borowski, B.: Einseitige Körperhaltung am Arbeitsplatz. In: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung. Wirtschaftsverlag NW. 1981. (zit. nach Paul, 2002)

[Brae03] Braess, H-H.; Seifert, U.: Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Vieweg Verlag. 2003.

[Brod09] Brodmann, K.: Vergleichende Lokalisationslehre der Großhirnrinde in ihren Prinzipien dargestellt auf Grund des Zellenbaues. Barth Verlag. Leipzig. 1909.

[Bro04] Brosius, F.: SPSS 12. Bonn 2004.

[Brow60] Brown, J. S.; Knauft, E.B.: Positioning Reaction of uniform length executed at various distance from the body. Off. Nav. Res. Rep. 57, 2, 4, 1948 (zit. nach Schmidtke 1960)

[Bubb04] Bubb, H.: Licht für Komfort und gegen Diskomfort – Forderungen der Ergonomie. Kick-off Meeting zum TRAFO-Projekt „Modellbasierte Entwicklung der Sichtbedingungen bei Nachtfahrten“, L-LAB Paderborn. 2004.

[Bubb06] Bubb, H., Engstler, F., Fritzsche, F., Mergl, Ch., Sabbah, O., Schaefer, P. and Zacher, I.: The development of RAMSIS in past and future as an example for the cooperation between industry and university. Int. J. of Human Factors Modelling and Simulation, Vol. 1, No. 1, pp.140-157. 2006.

[Burk03] Burkschat, M.: Beschreibende Statistik. Springer. 2003.

[Chaf84] Chaffin, D. B.: Occupational biomechanics. A Wiley-Interscience Publication. 1984.

[Chaf01] Chaffin, D. B.: Digital human modeling for vehicle and workplace design. SAE International. Warrendale, Pa. 2001.

[Chaf02] Chaffin, D. B.: Simulation of Human Reach Motions for Ergonomic Analysis. SAE Digital Human Modeling Conference. Munich. 2002.

[Cher06] Cherednichenko, A., Assmann, E., Bubb, H.: Experimental study of human ingress movements for optimization of vehicle accessibility. Paper presented at the IEA Congress Maastricht. In proceedings. 2006.

[Carm93] Do Carmo, Manfredo, P.: Differenzialgeometrie von Kurven und Flächen. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden. 1993 (zit. nach Musto 2000).

[Drew85] Drew, C. J.: Designing and conducting behavioral research. Pergamon Press Inc. 1985.

[Enok02] Enoka, R. M.: Neuromechanics of human movement. Human Kinetics. 2002.

[Eule96] Euler, E.: Das Becken. Anatomie, Biomechanik, Frakturversorgung und Tumorprothetik. Springer. 1996.

[Fahr96] Fahrmeir, L.: Hamerle, A. und T. (Hrsg.): Multivariate statistische Verfahren. Walter der Gruyter (2. überarbeitete Auflage), Berlin New York. 1996.

[Fahr01] Fahrmeir, L., Künstler, R., Pigeot, I. und Tutz, G.: Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 2001.

[Fitt51] Fitts, P. M.: Engineering Psychology and Equipment Design, in: Handbook of Experimental Psychology. New York/London 1951.

[Fuch76] Fuchs-Kittowski, K.: Probleme des Determinismus und der Kybernetik in der molekularen Biologie. Tatsachen und Hypothesen über das Verhältnis des technischen Automaten zum lebenden Organismus. Gustav Fischer Verlag Jena. 1976.

[GCIE06] Global Car Manufacturers Information Exchange Group. Decisions Taken at the Last GCIE Meeting. Gaydon JUNE 2005. Issue 2006.

[Geor86] Georgopolos, A., Schwartz, A., Kettner, R.: Neuronal population coding of a movement direction. Science 233:1416-1419. 1986. (zit. nach Morasso 1997)

[Glit01] Glitsch, U.: Computersimulation in der Biomechanik. Academia Verlag. Sankt Augustin. 2001.

[Göhn93] Göhner, U.: Einführung in die Bewegungslehre des Sports. Sport und Sportunterricht. Band 4. Schorndorf: Hofmann. 1993.

[Gotl06] Gottlob, A.: Differenziertes Krafttraining. Urban & Fischer Verlag. 2006.

[GrNo06] Grabner, J., Nothhaft, R.: Konstruieren von Pkw-Karosserien. Grundlagen, Elemente und Baugruppen, Vorschriftenübersicht, Beispiele mit CATIA V4 und V5. Springer. 2006.

[Gros01] Grosser, M., Starischka, S.; Zimmermann, E: Das neue Konditionstraining. 8. überarbeitete Auflage. München: BLV. 2001.

[Grub87] Gruber, K.: Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Kräfte im Knie- und Hüftgelenk bei sportlichen Bewegungsabläufen mit hohen Beschleunigungen. Dissertation. Universität Tübingen. 1987.

[Haas86] Haas, J., Wegner, K., Dziambor, G.: Arbeitsmedizinische Daten als Basis für den Abbau von Belastungen.TÜV Rheinlang (Hrsg.): Vorhaben 01 HG 184/1 Humanisierung des Arbeitslebens. 1986. (zit. Nach Paul 2002)

[Hack67] Hacker, W.: Grundlagen der Regulation von Arbeitsbewegungen. Probleme und Ergebnisse der Psychologie. Berlin 1967.

[Hack76] Hacker, W.: Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften. Berlin 1976.

[Hack83] Hacker, W.: Kognitive und motivationale Aspekte der Handlung. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften. Berlin 1983.

[Hane04] Hanebeck, U., Westphall, M.: Mathematische Grundlagen der Robotik. Proseminar Telepräsenz und Robotik. Universität Karlsruhe. 2004.

[HeSc00] Heißing, B.: Straßenfahrzeuge – Entwurf und Simulation. Technische Universität München. 2000.

[Hoch67] Hochmuth, G.: Biomechanik sportlicher Bewegungen. Frankfurt: Limpert. 1967.

[HS2004] Human Solutions GmbH. Kraft-Haltungsmodell. Allgemeine Haltungssimulation auf Basis biomechanischer Parameter. Manual RAMSIS Version 3.8.13. Kaiserslautern 2004.

[Ilg02] Ilg, W., Giese, M. A.: Modeling of human sequences based on hierarchical spatial-temporal correspondence of movement primitives (zit. nach Rigel 2005).

[Jeni73] Jenik P.: Biomechanische Analyse ausgewählter Arbeitsbewegungen des Armes. Beuth. Berlin 1973. (zit. nach Paul 2002)

[Kada90] Kadaba, M. P., Ramakrishnan, H. K., Wooten, M. E.: Measurement of Lower Extremity Kinematics During Level Walking. New York, USA. 1990.

[Kais97] Kaiser, R.: Einfluß von Wärmestrahlung bei informatorischer Arbeit. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 17 Nr. 163. VDI Verlag. Düsseldorf. 1997.

[Kell94] Kelle, U.: Empirisch begründete Theoriebildung. Weinheim. 1994.

[Kock00] Kockelkorn, U.: Lineare statistische Methoden. Oldenbourg Verlag. München Wien. 2000.

[KiPo05] Kirschner, G., Pöhlmann, R.: Lehrbuch der Sportmotorik – Psychomotorische Grundlagen und Anwendungen. (Psychomotorik in Forschung und Praxis, 37). Kassel: Zimmermann und Kaul. 2005.

[KtKw93] Katayama, M., Kawato, M.: Virtual Trajectory and stiffness ellipse during multi-joint arm movement predicted by neural inverse models. In Biological Cybernetics 69: 353-362. 1993. (zit. nach Morasso 1997)

[Klot94] Klotz, W.: Handlungssteuerung ohne bewusste Wahrnehmung. Eine experimentelle Untersuchung zur motorischen Verarbeitung visuell maskierter Reize. Dissertation. Fakultät für Psychologie und Sportwissenschaft. Universität Bielefeld 1994.

[Knot70] Knot, M., Voss, E. D.: Komplexbewegungen. Gustav Fischer Verlag. Stuttgart. 1970.

[Kunz83] Kunz, H.: Biomechanische Analyse als Mittel der Trainingsplanung. Limpert Verlag GmbH 1983.

[Kurz87] Kurz, B.: Biomechanische Einflussfaktoren auf die statischen und dynamischen Bodenreaktionskräfte des Fußes. Dissertation. Technische Universität München. 1987.

[Mann04] Mann, U. M.: Neurologie Neuroanatomie Neuropsychologie. BPB-Verlag. Eichstätt 2004.

[Mart93] Martin, D., Carl, K., Lehnertz, K.: Handbuch Trainingslehre. Schorndorf 1993

[Meij88] Meijer, O. G.: Complex Movement Behaviour. Elsevier Science Publishers B.V. 1988.

[Mora86] Morasso, P.: Human Movement Understanding. Advances In Psychology 33. Elsevier Science Publishers B.V. 1986.

[Mora97] Morasso, P.: Self-organisation, computational maps, and motor control. Advances In Psychology 119. Elsevier Science Publishers B.V. 1997.

[MeSn98] Meinel, K., Schnabel, G.: Bewegungslehre-Sportmotorik. Berlin 1998.

[Must00] Musto, A.: Qualitative Repräsentation von Bewegungsverläufen. Dissertation. Technische Universität München. 2000.

[Nick83] Nickel, U.: Angewandte Bewegungslehre. Schorndorf 1983.

[Oeve96] Oevel, W.: Einführung in die Numerische Mathematik. Spektrum Akademischer Verlag 1996.

[Oliv03] Olivier, N., Rockmann, U.: Grundlagen der Bewegungswissenschaft und -lehre. Karl Hofmann Verlag. Schorndorf 2003.

[Ott87] Ott, E.: Messtechnische Erfassung von Bewegungsabläufen bei menschlichen Gelenken. Dissertation. Technische Universität München 1987.

[Paul02] Paul, G.: Ein Beitrag zur Methode der ergonomischen Beurteilung des Einstieges ausgewählter Nutzfahrzeuge. Dissertation. TU Darmstadt. Aachen 2002.

[Perr03] Perry, J.: Ganganalyse. Norm und Pathologie des Gehens. Urban &Fischer. München. 2003.

[PeWe36] Peters, W.; Wendborne, A. A.: The Time Pattern of voluntary movements. Brit. J. Psychol. 26, 4, 388, 1936 und 27,1,60,1936. (zit. nach Hacker 1967)

[Plat99] Platzer, W.: Taschenatlas der Anatomie. Bewegungsapparat (7. Aufl.). Stuttgart: Thieme. 1999.

[Popp82] Popper, K. R.: Logik der Forschung. Tübingen 1982.

[Pöhl94] Pöhlmann, R.: Was ist, was kann Motorik? Eine Gegenstands- und Aufgabenbestimmung. In: Hirtz, P./Kirchner, G./Pöhlmann, R.: Sportmotorik. Grundlagen, Anwendungen und Grenzgebiete. Kassel. 1994.

[Rama91] Ramakrishnan, H. K., Wootten, M. E., Kadaba, M. P.: On the estimation of three dimensional joint angular motion in gait analysis. Las Vegas, USA. 1991.

[Rams02] Ramsay, J. O., Silverman, B. W.: Applied Functional Data Analysis. Methods and Case Studies. Springer-Verlag. New York. 2002.

[Rams06] Ramsay, J. O., Hadley W.: Functional Data Analysis. The FDA Package. http://www.functionaldata.org

[Rawl01] Rawlings, J. O., Pantula, S. G., Dickey, D.A.: Applied Regression Analysis. A Research Tool. Springer Verlag (2. Auflage). 2001.

[RC98] Rosenbaum, D. A.; Collyer, E.C.: Timing of Behavior. Neural, Psychological, and Computational Perspectives. London 1998.

[Rigel05] Rigel, S.: Entwicklung und Validierung einer Methode zur qualitativen Untersuchung der Ein- und Ausstiegsbewegung in einen Pkw. Dissertation. TU München Lehrstuhl für Ergonomie. München 2005.

[RoRu75] Rohmert, W., Rutenfranz, J.: Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen industriellen Arbeitsplätzen. Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung. Bonn. 1975. (zit. nach Paul 2002).

[Rose98] Rosenbaum, D.: Timing Of Behavior. London 1998.

[Rost03] Rostock, J.: Haltung und Bewegung im Sport. Theorie Aneignung Diagnostik aus biomechanischer, bewegungs- und trainingswissenschaftlicher Sicht. Chemnitz. 2003.

[Roth82] Roth, K.: Strukturanalyse koordinativer Fähigkeiten. Empirische Überprüfung koordinationstheoretischer Konzepte. Bad Homburg 1982.

[Roth99] Roth, K.; Willimczik, Klaus: Bewegungswissenschaft. Rororo Sport Verlag. Hamburg. 1999.

[Rprj06] R-Project. http://www.r-project.org/. Zugriff am 07.09.2006

[Rubi63] Rubinstein, S. L.: Prinzipien und Wege der Entwicklung der Psychologie, Berlin 1963. (zit. nach Hacker 1967)

[Sach88] Sachs, L.: Statistische Methoden 1. Springer 1988.

[Sach90] Sachs, L.: Statistische Methoden 2. Springer 1990.

[Sach02] Sachs, L.: Angewandte Statistik. Springer 2002.

[Seitz01] Seitz, T., Bubb, H.: Human-model Based Movement-capturing Without Markers for Ergonomic Studies. Digital Human Modelling Conference. SAE. 2001.

[Sidm60] Sidman, M.: Tactics of scientific research. Evaluating experimental data in psychology. New York 1960.

[Sivak92] Sivak, B.: The contributions of Peripheral and Central Vision (zit. nach Arlt99).

[Slat49] Slater-Hammel, A. T.; Brown, J. S.: The effect off speed-up instructions upon the performance of discrete movements in the horizontal plane. (zit. nach Schmidtke 1960) Off. Nav. Res. Rep. 57, 2, 3, 1949.

[Stke60] Schmidtke, H.: Über die Struktur willkürlicher Bewegungen. Psychol. Beiträge V/3, 1960, S 428 ff.

[Schd04] Scheid, V., Prohl R.: Bewegungslehre. Limpert Verlag. 2004.

[Schm88] Schmidt, R. A.: Motor And Action Perspectives On Motor Behavior. Elsever Science Publishers B.V. 1988.

[Schn97] Schneider, E.: Biomechanik des menschlichen Bewegungsapparates. Springer. 1997.

[Sets84] Setschenow, I. M.: Touch as a Sense Corresponding to Vision (1884), in: I.Sechenov, Selected Physiological and Psychological Works, Moscow 1952/56.

[Smke93] Schmidtke, H.: Ergonomie. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag. München. 1993.

[Smlz93] Schmalz, T.: Biomechanische Modellierung menschlicher Bewegungen. Schorndorf. 1993.

[Spey06a] Speyer, H.: RAMSIS. Anthropometrische Datenbanken. Human Solutions GmbH. 2006.

[Spey06b] Speyer, H.: RAMSIS. Definition der Anthropometrietypen. Human Solutions GmbH. 2006.

[Spor01] Sporrer, A.: Grundlagen und Modellierung eines biomechanischen Mehrkörpersystems des Menschen zur Computersimulation von Bewegungsabläufen bei rechtsmedizinischen Fragestellungen. Dissertation. Ludwig-Maximilians-Universität zu München. 2001.

[Stba99] Steinbach, E.: Data-driven 3-D Rigid Body Motion and Structure Estimation. Dissertation. Erlangen 1999.

[Stdl99] Steidle, G.: Instrumentierte Ganganalyse: Einfluss der Oberkörperbewegung auf das Gehen. Dissertation. München 1999.

[Stei97] Stein, P.: Neurons, Networks, and Motor Behavior. Massachusetts Institute of Technology. 1997.

[Ster04] Stergiou, N.: Innovative Analyses of Human Movement. Human Kinetics. 2004.

[Subk96] Subke, J.: Visualisierung biomechanischer Bewegungen und biomechanische Computersimulationen zur Berechnung innerer Kräfte während extremer Bewegungsabläufe beim Menschen mittels Modellierung der Muskelkräfte. Dissertation. Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen. 1996.

[Toer79a] Törnig, W.: Numerische Mathematik für Ingenieure und Physiker. Band 1: Numerische Methoden der Algebra. Springer-Verlag 1979.

[Toer79b] Törnig, W.: Numerische Mathematik für Ingenieure und Physiker. Band 2: Eigenwertprobleme und numerische Methoden der Analysis. Springer-Verlag 1979.

[Tond03] Tondl, L.: Technisches Denken und Schlussfolgern. Edition Sigma. Berlin 2003.

[TNS04] TNS Emnid: Rückengesundheit (Baden-Württemberg). Zusammenfassung der Ergebnisse einer Repräsentativbefragung des BKK Bundesverbandes Befragungszeitraum: März 2004. http://www.bkk-bw.de/369

[VDA06] Normenausschuss Kraftfahrzeuge. Jahresbericht 2006.

[Vicon05] VICON Motion Systems. The VICON Manual. Oxford. 2005.

[Watk83] Watkins, J.: An Introduction to Mechanics of Human Movement. MTP Press Limited. England 1983.

[Whit84] Witting, H. T. A.: Human Motor Actions. Bernstein Reassessed. Elsevier Science Publishers B.V. Amsterdam 1984.

[Zimm87] Zimmermann, K.: Koordinative Fähigkeiten und Beweglichkeit. 1987

Ergonomie

Alexander Cherednichenko: **Funktionales Modell der Einstiegsbewegung in einen PKW**
2008 · 180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0766-2

Christian Mergl: **Entwicklung eines Verfahrens zur Optimierung des Sitzkomforts auf Automobilsitzen**
2006 · 156 Seiten · ISBN 978-3-8316-0613-9

Ryoko Fukuda: **Ergonomische Gestaltung der Webauftritte** · Analyse des menschlichen Verhaltens bei der Webnutzung und darauf basierende nutzerspezifische Vorschläge
2004 · 315 Seiten · ISBN 978-3-8316-0337-4

Andreas Penka: **Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen**
2001 · 160 Seiten · ISBN 978-3-8316-0097-7

Sandro Lang: **Auswirkungen von Gruppenarbeit in einem hochautomatisierten Fertigungsbereich in der Automobilindustrie**
2000 · 173 Seiten · ISBN 978-3-89675-834-7

Jochen Balzulat: **Ein holistischer Versuchsansatz zum Sitzverhalten**
2000 · 92 Seiten · ISBN 978-3-89675-764-7

Amin Marach: **CAD-fähiges Prognosenmodell für statische Körperhaltungen des Menschen**
1999 · 116 Seiten · ISBN 978-3-89675-613-8

Stefan Estermann: **Komfortprognose für ein CAD-Menschmodell auf der Basis realer Fahrversuche**
1999 · 156 Seiten · ISBN 978-3-89675-594-0

Frank Arlt: **Untersuchung zielgerichteter Bewegungen zur Simulation mit einem CAD-Menschmodell**
1999 · 116 Seiten · ISBN 978-3-89675-538-4

Erhältlich im Buchhandel oder direkt beim Verlag:
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · info@utz.de

Gesamtverzeichnis mit mehr als 3000 lieferbaren Titeln: www.utz.de