

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 Daten-
verarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugs-
weiser 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 Haltungs-simulation 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 reversible 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

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