

Anwendungsgebiete des Motion Capture in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses zur Ergonomie- bewertung

vorgelegt von
Diplom-Ingenieur
Sebastian Schmickartz
aus Berlin

von der Fakultät V
Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
— Dr.-Ing. —

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting

Gutachter: Dr.-Ing. habil. Andreas Müller

Gutachter: Dr.-Ing. Cord Busche

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 28.07.2014

„Mehr als die Vergangenheit interessiert mich die Zukunft, denn in ihr gedenke ich zu leben.“

Albert Einstein

Berichte aus der Ergonomie

Sebastian Schmickartz

**Anwendungsgebiete des Motion Capture in frühen
Phasen des Produktentstehungsprozesses
zur Ergonomiebewertung**

D 83 (Diss. TU Berlin)

Shaker Verlag
Aachen 2014

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.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2014

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2998-7

ISSN 1617-1055

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit für den Bereich Planung Marke Volkswagen bei der Volkswagen AG am Standort Wolfsburg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Psychologie und Arbeitswissenschaft an der Fakultät für Verkehrs- und Maschinensysteme der Technischen Universität Berlin.

Zunächst möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Rötting für die wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation, die wertvollen Gespräche und sein fachliches Interesse bedanken. Weiterhin danke ich Herrn Dr.-Ing. habil. A. Müller für die umfassende Unterstützung hinsichtlich wissenschaftlicher und methodischer Vorgehensweisen, für die zahlreichen inhaltlichen Diskussionen sowie der vertrauensvollen Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Cord Busche für die außergewöhnliche Betreuung meiner Dissertation bei der Volkswagen AG, die ausführlichen Fachgespräche sowie die sehr persönliche und engagierte Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit.

Weiterer Dank gilt Herrn Dr. Ing. A. Keil für interessante und zielführende inhaltliche Diskussionen, die der Arbeit viele Impulse gegeben haben.

Außerdem bedanke ich mich ganz herzlich bei meinen Kollegen Dr.-Ing. Andreas Hoffmeyer, Dr.-Ing. Andrea Spillner, Dipl.-Ing. Dirk Koriath, Dipl.-Ing. David Becker, Dipl.-Ing. Mario Wegner und Dipl.-Ing. Anna-Charlotte Fleischmann mit denen ich zahlreiche Pilotprojekte im Bereich Virtuelle Techniken und Ergonomieanalysen im Volkswagen Konzern umsetzen konnte.

Nicht zuletzt möchte ich Herrn Dipl. Medienwissenschaftler Robert Scheibe und Herrn Dipl. Ing. Ullrich Probst von der A.R.T. GmbH und Herrn Dipl.-Ing. Thomas Härtel und Herrn Dipl.-Ing. Norman Hofmann vom Institut für Mechatronik e.V. für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit danken.

Umfangreiche Anregungen erhielt ich auch von den Studenten, deren Studien-, Diplom, Master- und Bachelorarbeiten ich betreute. Besonderer Dank gilt hierbei Mario Wegner, David Becker, Hannes Röpke, Fabian Nöhring und Jens Lutterklas.

Schließlich geht ein großes Dankeschön an meine langjährige Partnerin Kim, die mein Promotionsvorhaben stets unterstützt hat und an meine Familie, vor allem meine Eltern Marina und Manfred, die meine Ausbildung immer gefördert und mich bei meinen Ideen und Visionen unterstützt und alle Wege offen gehalten haben.

Kurzfassung

Der demographische Wandel Westeuropas sowie der erhöhte Wettbewerbsdruck bedingen für die Industrie eine steigende Bedeutung der ergonomischen Arbeitsgestaltung. Einerseits soll die Erwerbsfähigkeit der Arbeitnehmer bis ins Renteneintrittsalter sichergestellt werden, andererseits soll sich, durch die Reduzierung von Ausfallzeiten der Mitarbeiter, die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens steigern. Die Berücksichtigung der Ergonomie bei der Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung muss daher so früh wie möglich im Planungsprozess etabliert werden um zukünftig hohe, später anfallende, Änderungskosten zu vermeiden.

Je früher die Gestaltungsdefizite erkannt werden, desto kostengünstiger ist eine Behebung. Hier bieten sich insbesondere die Werkzeuge der Digitalen Fabrik in Verbindung mit den Methoden zur Ergonomieanalyse an. Einen wesentlichen Schwerpunkt bilden in diesem Zusammenhang digitale Menschmodelle, Trackingtechnologien und der zeitlich richtige Einsatz in den Produktentstehungsprozessen. In einem weit verbreiteten Einsatz ebendieser sowie weiterer rechnergestützter Modelle und Methoden der Ergonomie ist ein großes Potential zur Gestaltung ergonomisch günstiger Arbeitsplätze zu sehen.

Im Fokus dieser Dissertation stehen die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik zur Ergonomiebewertung, welche sich bereits in weiten Teilen der Automobilbranche etabliert haben, bisher jedoch als Insellösungen vorliegen und keine standardisierte Anwendung finden. Ihre Integration in den Planungsprozess ermöglicht das frühzeitige Erkennen von Problemen am Arbeitsplatz, welches für die Optimierungen der Arbeitssituation des Mitarbeiters essenziell ist. Ergonomisch ungünstige Prozesse werden meist zu spät erkannt. Aufgrund der immensen Kosten im fortgeschrittenen Produktentstehungsprozess wird häufig, zu Lasten der Mitarbeiter, auf Änderungen verzichtet. Es ist somit zu klären, ob sich diese Problematik mit dem Einsatz digitaler Planungswerkzeuge lösen lässt.

Abstract

The demographic change in Western Europe and the increased competitive pressure cause a rising importance of the work design. On one hand it is necessary to ensure the earning capacity of the employees until the retirement age, on the other hand the profitability of the company should be increased by reducing the downtime of the employees. Therefore the consideration of ergonomics in product and workplace design has to be established as early as possible in the planning process to avoid high and later incurred modification costs.

The sooner the deficiencies of design are identified, the less expensive will be an elimination. In particular tools of the Digital Factory combined with the methods for ergonomics analysis suggest themselves in this context. Here a major focus is formed by digital human models, tracking technologies and the correct use in the product development processes. A widespread use of these models and technologies as well as other computer-based models and methods of ergonomics, shows a great potential for designing ergonomic workplaces.

The dissertation focuses on methods and tools of the Digital Factory for ergonomics evaluation which have established themselves in many parts of the automotive industry but so far exist as stand-alone solutions and find no standardized application. Their integration into the planning process enables the early identification of problems at the workplace, which is essential for the optimization of the working conditions of the employee. Ergonomically unfavorable processes are usually detected too late. Due to immense costs in the advanced product development process changes are often omitted to the detriment of the employees. Therefore it is necessary to examine if this problem can be solved by the use of digital planning tools.

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	III
KURZFASSUNG	IV
ABSTRACT	V
INHALTSVERZEICHNIS	VII
1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION	2
1.2 ZIELSETZUNG DER ARBEIT	4
1.3 AUFBAU DER ARBEIT	6
2 TECHNISCHE GRUNDLAGEN	8
2.1 DIGITALE FABRIK	8
2.1.1 GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG	8
2.1.2 DEFINITION UND ZIELE DER DIGITALEN FABRIK.....	10
2.1.3 AUFGABEN DER DIGITALEN FABRIK	11
2.1.4 DIE DIGITALE FABRIK IN DER AUTOMOBILINDUSTRIE	14
2.2 VIRTUELLE TECHNIKEN.....	14
2.2.1 <i>Virtual Reality</i>	16
2.2.2 <i>Mixed Reality</i>	18
2.2.3 <i>Augmented Reality</i>	18
2.3 MOTION CAPTURE	20
2.4 TRACKING IN DER VIRTUELLEN REALITÄT	21
2.4.1 <i>Grundlagen und Funktionsweise</i>	21
2.4.2 <i>Trackingarten</i>	23
2.4.3 <i>Trackingverfahren</i>	25
2.4.4 <i>Analyse bestehender Trackingsysteme</i>	34
2.4.5 <i>Anforderungen an Trackingsysteme</i>	39
2.5 DIGITALE MENSCHMODELL-SIMULATIONEN	40
2.6 ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG DER ENTWICKLUNG	44
3 METHODISCHE GRUNDLAGEN	45
3.1 GRUNDLAGEN ZUR ERGONOMISCHEN ARBEITSPLATZBEWERTUNG.....	45
3.1.1 <i>Arbeitsplatzanalyse</i>	47
3.1.2 <i>EAWS (Ergonomic Assessment Worksheet)</i>	52
3.1.3 <i>Zusammenfassung</i>	57
3.2 METHODS-TIME-MEASUREMENT	58
3.2.1 <i>MTM-Grundlagen</i>	59
3.2.2 <i>MTM-1 und UAS Bausteinsystematik</i>	59
3.3 ANFORDERUNGEN AN DIE ARBEITSPLATZANALYSE IN DER AUTOMOBILBRANCHE	61
3.3.1 <i>Ausgangssituation</i>	61
3.3.2 <i>Arbeitsplatzanalyse in der Automobilbranche am Beispiel der VW AG</i>	62

3.4	HANDLUNGSBEDARF UND MOTIVATION	64
4	EINSATZ EINES SYSTEMS ZUR DIGITALISIERUNG VON BEWEGUNGEN	66
4.1	BEWEGUNGSVORGABE DURCH MOTION CAPTURE DATEN	66
4.2	TECHNISCHE SYSTEMSPEZIFIKATION	68
4.2.1	<i>Das Optische Trackingsystem</i>	68
4.2.2	<i>Das Inertiale System</i>	71
4.2.3	<i>Hybrides Tracking</i>	72
4.3	METHODISCHE SYSTEMKONFIGURATION	74
4.3.1	<i>Ergonomiebewertung nach dem EAWS-Verfahren</i>	74
4.3.2	<i>Die Simulationssoftware Alaska</i>	75
4.3.3	<i>Umsetzung der EAWS-Bewertung in Alaska Dynamicus</i>	77
4.4	WERKZEUGKETTE ZUR ERGONOMISCHEN BEWERTUNG MITTELS MOTION CAPTURE SYSTEM	78
4.4.1	<i>Dynamiksimulation mit dem digitalen Menschmodell Dynamicus</i>	79
4.4.2	<i>Anthropometrische Maße</i>	83
4.4.3	<i>Kinematik des Modells</i>	85
4.5	DATEN- UND BEWEGUNGS-AUFNAHME MIT DEM MOTION CAPTURE SYSTEM	87
4.5.1	<i>Vorbereitung zur Daten- und Bewegungsaufnahme</i>	88
4.5.2	<i>Durchführung der Bewegungsaufnahme</i>	88
4.5.3	<i>Auswertung der Bewegungsaufnahme</i>	90
4.6	AUTOMATISIERTES ERKENNEN VON PROZESSBAUSTEINEN	91
4.6.1	<i>Ausgangssituation und Herausforderungen</i>	92
4.6.2	<i>Durchführung und Pilotierung des Motion Detektors</i>	94
4.6.3	<i>Ergebnisse des Pilotversuches mit dem Motion Detektor</i>	97
4.7	ZWISCHENERGEBNIS VORSTELLUNG MOTION CAPTURE SYSTEM	98
5	VALIDIERUNG DES MOTION CAPTURE BEWERTUNGSVERFAHREN	99
5.1	GENAUIGKEITSTEST OPTISCHES TRACKING	99
5.1.1	<i>Versuchsaufbau und Durchführung</i>	100
5.1.2	<i>Versuchsauswertung</i>	101
5.2	GENAUIGKEITSTEST INERTIALES TRACKING	106
5.2.1	<i>Versuchsaufbau und Durchführung</i>	107
5.2.2	<i>Versuchsauswertung</i>	109
5.3	AUSWIRKUNG DER INERTIALSENSORENDRIFT AUF DAS MENSCHMODELL DYNAMICUS	110
5.3.1	<i>Driftsimulation</i>	112
5.3.2	<i>Versuchsdurchführung</i>	114
5.3.3	<i>Versuchsauswertung</i>	120
5.4	AUSWIRKUNGEN DER INERTIALSENSORENDRIFT AUF DIE EAWS-BEWERTUNG	128
5.4.1	<i>Experimentelle Überprüfung der EAWS-Module hinsichtlich des Einflusses der Sensordrift</i>	128
5.4.2	<i>Abschätzung der Auswirkungen anhand realistischer Parameter</i>	132
5.5	ZUSAMMENFASSENDE ERKENNTNISSE AUS DEN VALIDIERUNGSSTUDIEN ZUR AUSWIRKUNG DER DRIFT AUF DAS MENSCHMODELL UND DIE EAWS-BEWERTUNG	134
5.6	BENCHMARK CEYEBERMANS	136

5.7	PRAXIS DIGITALER ARBEITSPLANUNG – VALIDIERUNG ZUM EINSATZ DES EDITOR MENSCHLICHER ARBEIT	138
5.7.1	<i>Methode</i>	138
5.7.2	<i>Ergebnisse</i>	140
5.7.3	<i>Vergleich der Ergonomiebewertungen Experte vs. System</i>	140
5.7.4	<i>Diskussion</i>	141
6	KONZEPT ZUM EINSATZ DES MOTION CAPTURE SYSTEMS IN FRÜHEN PHASEN DES PRODUKTENTSTEHUNGSPROZESS	142
6.1	GEGENÜBERSTELLUNG DER WERKZEUGE ZUR ERGONOMIEBEWERTUNG	142
6.1.1	<i>Bewertung der Werkzeuge zur Ergonomiebewertung – Auswahl der Unterziele und Zielkriterien</i>	142
6.1.2	<i>Bewertung der Werkzeuge zur Ergonomiebewertung – Bildung der Hierarchie</i>	143
6.1.3	<i>Bestimmung von Ziel- und Maßnahmenprioritäten für die gesamte Hierarchie</i>	145
6.2	KOSTENVERGLEICHSRECHNUNG	148
6.2.1	<i>Gegebenes Szenario</i>	149
6.2.2	<i>Einflussfaktoren der variablen Kosten</i>	151
6.2.3	<i>Kritische Würdigung der Kostenvergleichsrechnung</i>	152
6.3	INTEGRATION DER SIMULATIONSWERKZEUGE IN DAS ERGONOMIEKONZEPT	152
6.4	FAZIT.....	158
7	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	159
7.1	ZUSAMMENFASSUNG.....	159
7.2	AUSBLICK.....	161
	LITERATURVERZEICHNIS	164
	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	175
	ABBILDUNGSVERZEICHNIS	179
	TABELLENVERZEICHNIS	183
	ANHANG	187
A.1	<i>Studentische Arbeiten und Erfindungsmeldung</i>	187
A.2	<i>Motografie</i>	188
A.3	<i>Ergebnisse Literaturrecherche – Marktübersicht Motion Capture Systeme</i>	189
A.4	<i>Marktübersicht Motion Capture Systeme</i>	192
A.5	<i>Digitale Menschmodell-Simulation</i>	197
A.6	<i>MTM-Grundlagen – Datenkarten UAS-Bausteine</i>	198
A.7	<i>EAWS-Methodik – Ausschnitt Modul 1 (Körperhaltung)</i>	198
A.8	<i>Technische Daten A.R.T. Kameras</i>	199
A.9	<i>Ergebnisse aus des Pilotversuches mit dem Motion Detektor</i>	199
A.10	<i>Ergebnisse aus Genauigkeitsuntersuchung der inertialen Sensoren</i>	200
A.11	<i>Ergebnisse aus Genauigkeitsuntersuchung der optischen Sensoren</i>	200
A.12	<i>Auswirkung der Inertialsensordrift auf das Menschmodell – Ergebnisse</i>	201

<i>A.13</i> Werkzeuge zur Ergonomiebewertung – Unterziele und Zielkriterien	202
<i>A.14</i> Werkzeuge zur Ergonomiebewertung – Bildung der Hierarchie	206
<i>A.15</i> Ziel- und Maßnahmenprioritäten für die gesamte Hierarchie	224