

Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 445

Dipl.-Ing. Jörg Miehling,  
Nürnberg

## Berücksichtigung biomechanischer Zusammenhänge in der nutzergruppen- spezifischen virtuellen Produktentwicklung

Lehrstuhl für

**Konstruktionstechnik**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack





**Berücksichtigung biomechanischer  
Zusammenhänge in der  
nutzergruppenspezifischen  
virtuellen Produktentwicklung**

Der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg  
zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von  
**Jörg Miehling**  
aus Weißenburg i. Bay.

Als Dissertation genehmigt  
von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 5. Juli 2018

Vorsitzender des Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. R. Lerch  
Gutachter: Prof. Dr.-Ing. S. Wartack  
Prof. Dr.-Ing. B. Bender

# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 1

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Dipl.-Ing. Jörg Miehling,  
Nürnberg

Nr. 445

Berücksichtigung  
biomechanischer  
Zusammenhänge in  
der nutzergruppen-  
spezifischen virtuellen  
Produktentwicklung

Lehrstuhl für

**Konstruktionstechnik**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack



Miehling, Jörg

## **Berücksichtigung biomechanischer Zusammenhänge in der nutzergruppenspezifischen virtuellen Produktentwicklung**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 445 . Düsseldorf: VDI Verlag 2018.

186 Seiten, 74 Bilder, 6 Tabellen.

ISBN 978-3-18344501-1 ISSN 0178-949X,

€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 60,30.

**Für die Dokumentation:** Nutzerzentrierte Produktentwicklung – Virtuelle Produktentwicklung – Ergonomische Produktgestaltung – Biomechanik – Simulation – Muskuloskeletale Menschmodelle – Virtuelle Nutzergruppe – Physische Nutzer-Produkt-Interaktion – Optimierung

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler aus dem Bereich der nutzerzentrierten Produktentwicklung und ergonomischen Produktgestaltung. Sie stellt eine Vorgehensweise zur nutzergruppenspezifischen Simulation und Optimierung von Nutzer-Produkt-Konfigurationen vor. Im Fokus stehen dabei physische Nutzer-Produkt-Interaktionen. Ausgangspunkt stellt die Modellierung der virtuellen Nutzergruppe bzw. Nutzerpopulation in Form muskuloskeletaler Menschmodelle unter Berücksichtigung unterschiedlicher Modellierungsdomänen sowie eine parametrische Produktmodellierung dar. Darauf aufbauend werden Methoden zur automatisierten Konfiguration, Vorhersage und Simulation von Nutzer-Produkt-Interaktionen bereitgestellt. Basierend auf den Ergebnissen der biomechanischen Simulationen werden Metamodelle erzeugt, die eine Optimierung der Designparameter für vorgegebene demographische Nutzerparameter ermöglichen. Die resultierenden Produktparameterverteilungen für die herangezogene Nutzergruppe/-population dienen schließlich als Handlungsvorschlag für die weiteren Schritte der Produktentwicklung.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at [www.dnb.de](http://www.dnb.de).

D 29

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-949X

ISBN 978-3-18-344501-1

## Vorwort

*„Der menschliche Körper ist das beste Bild der menschlichen Seele.“*

LUDWIG WITTGENSTEIN

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Das Gelingen dieser Arbeit wurde erst durch die Unterstützung zahlreicher Personen ermöglicht, bei denen ich mich an dieser Stelle herzlich bedanke.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack, meinem Doktorvater und Leiter des Lehrstuhls, für das entgegengebrachte Vertrauen und die gewährte wissenschaftliche Freiheit. Großer Dank gilt zudem Frau Prof. Dr.-Ing. Beate Bender für das Interesse an meiner Arbeit sowie die Übernahme des Koreferats. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Frieder R. Lang, dass er sich als fachfremder Prüfer zur Verfügung stellte und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei meinen aktiven und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich für die stets angenehme und freundschaftliche Atmosphäre während der gemeinsamen Zeit am Lehrstuhl. Mein besonderer Dank gilt vor allem auch der Fachgruppe Nutzerzentrierte Produktentwicklung und all denen die täglich mit mir auf fachlicher aber auch organisatorischer Ebene zusammengearbeitet haben, obgleich in konstruktiven Gesprächen im Büro oder in den Kaffeepausen.

Weiterhin möchte ich allen inner- und außeruniversitären Partnern meinen Dank für die stets positive Kooperation, die Anerkennung und die damit verbundene Befähigung der Betrachtung und Reflexion meiner eigenen Forschungsaktivitäten aus verschiedenen Blickwinkeln ausdrücken.

Meiner Familie und meinen Freunden sei auf diesem Wege herzlich für die Begleitung und den Rückhalt während der Anfertigung dieser Arbeit gedankt. Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei meiner Frau Nadja für das entgegengebrachte Verständnis und die nachhaltige Unterstützung bedanken. Ebenso danke ich meinen Eltern für die stete Förderung meiner schulischen und akademischen Ausbildung, wodurch diese Arbeit erst entstehen konnte.

Erlangen, im Juli 2018

Jörg Miehl



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Zielsetzung und Forschungsbedarf .....	3
1.3	Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Wissenschaft .....</b>	<b>7</b>
2.1	Grundlagen der Produktentwicklung .....	8
2.1.1	Methodische und Integrierte Produktentwicklung .....	8
2.1.2	Virtuelle Produktentwicklung (VPE) .....	11
2.1.3	Nutzerzentrierte Produktentwicklung .....	13
2.1.3.1	Nutzer-Produkt-Beziehung .....	13
2.1.3.2	Nutzerorientierter Gestaltungsprozess .....	15
2.1.3.3	Universal Design und Mass Customization .....	21
2.1.3.4	Subjektive Faktoren in der Produktentwicklung .....	22
2.2	Ergonomie/Human Factors Engineering .....	23
2.2.1	Ziele nutzerorientierter Gestaltung .....	23
2.2.2	Erweitertes Belastungs-Beanspruchungs-Konzept .....	26
2.2.3	Klassische Herangehensweisen .....	27
2.2.4	Virtuelle Methoden und Werkzeuge .....	29
2.3	Biomechanik und muskuloskeletale Modellierung .....	31
2.3.1	Anwendungsgebiete .....	32
2.3.2	Bewegungsapparat .....	33
2.3.3	Muskuloskeletale Mehrkörperdynamik .....	35
2.3.4	Muskelphysiologie und Muskelmodellierung .....	36
2.4	Muskuloskeletale Simulation .....	40
2.4.1	Modellanpassung .....	40
2.4.2	Berechnungsmethoden .....	41
2.4.3	Konventionelle Vorgehensweise .....	44
2.4.4	Bewegungssynthese .....	45
2.4.4.1	Bewegungsbibliotheken .....	45
2.4.4.2	Kinematische Bewegungserzeugung .....	46
2.4.4.3	Dynamische Bewegungssynthese .....	48
2.5	Ausgewählte Ansätze zum Design for Human Variability .....	48
2.6	Ableitung des Handlungsbedarfs .....	49

<b>3</b>	<b>Vorgehensweise zur nutzergruppenspezifischen VPE .....</b>	<b>52</b>
3.1	Vorgehensweise im Überblick .....	52
3.2	Erzeugung virtueller muskuloskelettaler Nutzergruppen .....	54
3.2.1	Entwicklung generischer muskuloskelettaler Ganzkörpermodelle.....	55
3.2.1.1	Assemblierung vorhandener Teilmodelle .....	55
3.2.1.2	Anthropometrische Skalierung .....	56
3.2.1.3	Überprüfung der resultierenden generischen Menschmodelle.....	58
3.2.1.4	Virtuelle Marker zur Identifikation von Interaktionspunkten.....	60
3.2.2	Konzeption biomechanischer Menschmodelle .....	60
3.2.2.1	Vorgehen im Überblick.....	60
3.2.2.2	Populationspyramide .....	62
3.2.2.3	Körpergröße .....	64
3.2.2.4	Body Mass Index .....	65
3.2.2.5	Stärke .....	66
3.2.2.6	Beweglichkeit .....	67
3.2.3	Anthropometrische Anpassung .....	68
3.2.4	Algorithmus zur Stärkee Anpassung .....	69
3.2.4.1	Problemstellung und Vorgehensweise .....	69
3.2.4.2	Simulation vordefinierter Körperhaltungen .....	72
3.2.4.3	Identifikation maximaler Gelenkmomente.....	74
3.2.4.4	Bestimmung der Muskelbeiträge.....	75
3.2.4.5	Berechnung der Skalierungsfaktoren .....	76
3.2.5	Überprüfung demographisch angepasster Modelle .....	77
3.2.5.1	Verifikation .....	77
3.2.5.2	Validierung.....	78
3.3	Parametrische Produktmodellierung .....	79
3.4	Statistische Versuchsplanung .....	80
3.4.1	Erzeugung statistischer Merkmalskonfigurationen .....	80
3.4.2	Ableitung der Nutzer- und Produktmerkmale .....	81
3.5	Vorhersage der Nutzer-Produkt-Interaktionen .....	82
3.5.1	Geometrische Kopplung der Nutzer mit dem Produktmodell .....	82
3.5.2	Kinematische Bewegungserzeugung .....	84
3.5.3	Abschätzung externer Reaktionskräfte .....	85
3.6	Muskuloskelettale Simulation .....	86
3.6.1	Methode zur kinetischen Kopplung von Nutzer- und Produktmodell.....	86
3.6.2	Inverse Dynamik unter statischer Optimierung .....	88
3.7	Analyse und Interpretation der Simulationsergebnisse.....	88
3.7.1	Metamodellierung.....	89
3.7.2	Optimierung der Produktparameter für die virtuellen Nutzer .....	90

<b>4 Erzeugung und Überprüfung der muskuloskelettalen Menschmodelle</b>	<b>93</b>
4.1 Virtuelle Nutzergruppe .....	93
4.1.1 Verifikation der Modellparameter .....	94
4.1.2 Validierung der Stärkeverteilung .....	95
4.2 Virtuelles Individuum .....	99
<b>5 Anwendungsbeispiele .....</b>	<b>101</b>
5.1 Allgemeine Vorbemerkungen .....	101
5.2 Simulationsstudie 1: Radfahren .....	102
5.2.1 Nutzerindividuelle Simulation .....	102
5.2.1.1 Aufzeichnung der Radfahrbewegung .....	102
5.2.1.2 Inverse Kinematik .....	103
5.2.1.3 Abschätzung des Kurbeldrehmoments .....	104
5.2.1.4 Muskuloskelettale Simulation .....	106
5.2.2 Parametrisches Fahrradmodell .....	108
5.2.3 Nutzergruppenspezifische Simulation .....	110
5.2.3.1 Erzeugung der Nutzer-Produkt-Interaktionen .....	110
5.2.3.2 Simulation der Nutzer-Produkt-Konfigurationen .....	114
5.2.3.3 Metamodellierung und Optimierung der Produktparameter .....	117
5.2.4 Evaluation und Interpretation der Simulationsergebnisse .....	121
5.3 Simulationsstudie 2: Rudern .....	122
5.3.1 Nutzerindividuelle Simulation .....	122
5.3.1.1 Aufzeichnung der Ruderbewegung und der Zugkraft .....	122
5.3.1.2 Inverse Kinematik .....	123
5.3.1.3 Muskuloskelettale Simulation .....	124
5.3.2 Parametrisches Ruderbootmodell .....	126
5.3.3 Nutzergruppenspezifische Simulation .....	127
5.3.3.1 Erzeugung der Ruderbewegungen .....	127
5.3.3.2 Simulation der Nutzer-Produkt-Konfigurationen .....	130
5.3.3.3 Metamodellierung und Optimierung der Produktparameter .....	131
5.3.4 Evaluation und Interpretation der Simulationsergebnisse .....	135
<b>6 Diskussion .....</b>	<b>139</b>
6.1 Ergebnisse der Forschungsarbeit .....	139
6.2 Implikationen für die Anwendung und weitere Forschung .....	142
6.3 Limitationen und Potenziale zur Weiterentwicklung .....	144
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>148</b>
<b>Literatur .....</b>	<b>151</b>

# Nomenklatur

## Abkürzungen

ADP	Adenosindiphosphat
ATP	Adenosinriphosphat
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BMI	Body Mass Index
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAM	Computer Aided Manufacturing
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMC	Computed Muscle Control
CPM	Characteristics-Properties Modeling
CT	Computertomographie
DfHV	Design for Human Variability
DfX	Design for X
DIN	Deutsches Institut für Normung
EAWS	Ergonomic Assessment Worksheet, European Assembly Worksheet
ema	Editor menschlicher Arbeit
EMG	Elektromyographie
EN	Europäische Norm
FEM	Finite-Elemente-Methode
ID	Inverse Dynamik
IEA	International Ergonomics Association
IK	Inverse Kinematik
IPE	Integrierte Produktentwicklung
ISO	International Organization for Standardization
MKS	Mehrkörpersimulation, Mehrkörpersystem
MRT	Magnetresonanztomographie
MTM	Methods-Time-Measurement
Nasa-TLX	Nasa Task Load Index
NVH	Noise, Vibration and Harshness
NVS II	Nationale Verzehrsstudie II
NZP	Nutzerzentrierte Produktentwicklung

OCRA	Occupational Repetitive Actions
OWAS	Ovako Working Posture Analysis System
P5, P50, P95	5., 50., 95. Perzentil
PDD	Property-Driven Development
REBA	Rapid Entire Limb Assessment
RULA	Rapid Upper Limb Assessment
SMA	Strength Mapping Algorithm (Algorithmus zur Stärkeanpassung)
SO	Statische Optimierung
STAI	Subjektives Adaptionsfähigkeitsinventar
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VPE	Virtuelle Produktentwicklung
VR	Virtual Reality
ZNS	Zentralnervensystem

## Formelzeichen

$\alpha$	Fiederungswinkel	°
$\varphi$	(Körper-)Winkel	°
$\Phi_{Kurbel}, \Phi_{Ruder}$	Kurbelwinkel, Ruderwinkel	°
$a$	Alter	Jahre
$B$	Kinematische Bewegungsausführbarkeit	
$BMI$	Body Mass Index	kg/m <sup>2</sup>
$F$	Kraft	N
$\mathbf{F}_M$	Vektor der Muskelkräfte in der SO	N
$\mathbf{F}_{Muskel}$	Matrix der Muskelkräfte im SMA	N
$g$	Geschlecht	
$h$	Körpergröße	m
$J$	Gesamtbeanspruchung in der SO	
$K, K_{Netto}$	(Netto-)Kraftbedarf	
$l_{Basis}, l_{P50}$	Segmentmaße	m
$l_{Kurbel}$	Kurbellänge	m
$l_M$	Normierte Muskellänge	
$\mathbf{L}_{Muskel}$	Matrix der Muskelhebelarme im SMA	m
$m$	Körpermasse, Körpergewicht	kg
$M$	Drehmoment	Nm
$\mathbf{M}_{Muskel}$	Matrix der Muskelmomente im SMA	Nm
$\mathbf{M}_{Ziel}$	Vektor der Zielgelenkmomente im SMA	Nm

$MW$	Mittelwert	
$n$	Stichprobengröße	
$n_{Kurbel}$	Kurbeldrehzahl, Kadenz	1/s, 1/min
$\mathbf{P}_{demo}$	Vektor der demographischen Nutzerparameter	
$P_{effektiv}$	Effektive Tretleistung	W
$\mathbf{P}_{Produkt}$	Vektor der Produktparameter	
$\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$	Vektoren der generalisierten Koordinaten, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen	
$\mathbf{R}$	Vektor der Muskelhebelarme in der SO	m
$Reg$	Regressionsmodell	
$Sf$	Skalierungsfaktor	
$SD$	Standardabweichung	
$SE$	Standardfehler	
$t$	Zeit	s
$\mathbf{T}_M$	Vektor der Muskelmomente in der ID	Nm
$v_M$	Normierte Verkürzungsgeschwindigkeit	
$w, \omega$	Gewichtungsfaktoren	
$W_{Produkt}$	Am Produkt verrichtete Arbeit	J
$\mathbf{x}$	Markerposition in der IK	

## Indizes

$exp$	experimentell
$iso$	isometrisch
$M$	Muskel
$max$	maximal
$min$	minimal
$opt$	optimiert
$sin$	sinusförmig
$tan$	tangential

## Zusammenfassung

Die nutzerzentrierte Entwicklung von Produkten gewinnt immer mehr an Bedeutung. Kundenzufriedenheit und Kaufentscheidungen hängen immer mehr von Aspekten wie der Nutzbarkeit, dem Komfort, dem Nutzungserlebnis, aber auch von der Ästhetik oder dem Markenwert eines Produkts ab. Neben physiologischen Aspekten bedarf es in der Produktentwicklung auch immer mehr der Berücksichtigung psychologisch-emotionaler Aspekte. Ganz im Gegensatz zum Bereich der klassischen Produktentwicklung, findet die nutzerzentrierte Produktentwicklung bisher vorwiegend mittels realer Nutzerstudien statt.

Gelungene nutzerzentrierte Entwicklungsprozesse zeichnen sich allerdings durch die frühe Fokussierung auf den Nutzer und die Nutzungsszenarien, den Einsatz empirischer Messungen sowie hochiterative Vorgehensweisen aus. Dies macht die Entwicklungsprozesse sehr langsam und aufwendig, weshalb diese den Bedürfnissen des heutigen hochkompetitiven Marktumfelds nur sehr schwer gerecht werden. Darunter leidet nicht selten die Nutzerzentrierung. Falls virtuelle Methoden zur Anwendung kommen, so beschränken sich diese zumeist auf die Berücksichtigung der Anthropometrie der Nutzer. Es sind aber gerade biomechanische Aspekte, die beispielsweise Muskel-Skelett-Erkrankungen bedingen.

Als Antwort auf diese Herausforderungen stellt die vorliegende Arbeit eine umfassende, aber dennoch stets anwendbare Vorgehensweise zur Berücksichtigung biomechanischer Aspekte in der nutzergruppenspezifischen virtuellen Produktentwicklung zur Verfügung. Diese ermöglicht durch die Nutzung empirischer Populationsdaten in der virtuellen Welt die Simulation und Auslegung von Nutzer-Produkt-Interaktionen für virtuelle Nutzergruppen.

Der vorgeschlagene Ansatz zur Erzeugung virtueller muskuloskelettaler Nutzergruppen berücksichtigt neben der Heterogenität der Körpermaße beispielsweise auch Stärke- und Beweglichkeitsverteilungen. Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit erarbeitete Vorgehen zur Konfiguration und Simulation zufälliger Nutzer-Produkt-Konfigurationen zielt auf die Identifikation möglichst optimaler Produktmerkmalsausprägungen für jeden der virtuellen Nutzer ab. Die resultierenden Parameterverteilungen dienen schließlich als Handlungsvorschlag für die weitere Ausdetaillierung des entsprechenden Produkts.

Mittels zweier Anwendungsbeispiele aus der Sportgeräteindustrie werden der Nutzen und die Anwendbarkeit der vorgestellten Vorgehensweise aufgezeigt.

## Abstract

The user-centered development of products is becoming increasingly important. Customer satisfaction and purchasing decisions are increasingly dependent on aspects such as usability, comfort, user experience, but also aesthetics or brand value. In addition to physiological aspects, the consideration of psychological and emotional aspects is also becoming more and more important. Contrary to classical product development, user-centered product development is still predominantly been carried out in the real world by means of user studies.

However, successful user-centered development processes are characterized by the early focus on the user and the usage scenarios, the use of empirical measurements as well as highly iterative approaches. These aspects make such development processes very time-consuming making it difficult to meet the needs of the present highly competitive market environment and thus ultimately endangers user-centering. If virtual paradigms are applied, methods are usually limited to the anthropometry of the users while neglecting biomechanical aspects, although it is the biomechanical aspects leading to musculoskeletal disorders.

In response to these challenges, the present work provides a comprehensive, yet applicable approach to consider biomechanical aspects in the user group-specific virtual product development. This enables the simulation and specification of user-product interactions by the use of empirical population data in the virtual world.

The approach for the generation of virtual musculoskeletal user groups incorporates, besides the heterogeneity of anthropometric body measures, also strength and mobility distributions. The proposed procedure for the configuration and simulation of random user-product configurations aims at the identification of optimal product characteristics for each of the virtual users. Finally, the resulting parameter distributions serve as recommendation for further elaboration of the corresponding product.

Two case studies from the sports equipment industry illustrate benefit and applicability of the presented approach.