

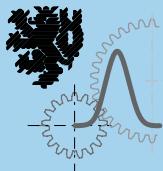
Reihe 22

Mensch-Maschine-  
Systeme

Nr. 37

Aydin Ünlü, M.Sc.,  
Viersen

## Ergonomie Verfahren zur objektiven Analyse der Handbelastung



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des  
**Lehrstuhls für Konstruktion**  
an der Bergischen Universität Wuppertal



# **Ergonomie Verfahren zur objektiven Analyse der Handbelastung**

**Dissertation  
zur Erlangung eines Doktorgrades  
(Dr.-Ing.)**

im  
**Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik**  
der  
**Bergischen Universität Wuppertal**

**– Lehrstuhl Konstruktion –**

vorgelegt von  
**Aydin Ünlü**  
geboren in Viersen

Wuppertal 2016

Referent: Prof. Dr. -Ing. Peter Gust (Bergische Universität Wuppertal)

Korreferent: Prof. Dr. -Ing. habil. Karsten Kluth (Universität Siegen)

# Fortschritt-Berichte VDI

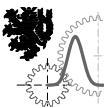
Reihe 22

Mensch-Maschine-  
Systeme

Aydin Ünlü, M.Sc.,  
Viersen

Nr. 37

Ergonomie Verfahren  
zur objektiven Analyse  
der Handbelastung



Ingenieurwissenschaftliche Berichte des  
**Lehrstuhls für Konstruktion**  
an der Bergischen Universität Wuppertal

Ünlü, Aydin

## Ergonomie Verfahren zur objektiven Analyse der Handbelastung

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 22 Nr. 37. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

158 Seiten, 112 Bilder, 16 Tabellen.

ISBN 978-3-18-303722-3, ISSN 1439-958X,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

**Für die Dokumentation:** Einflussfaktoren – Produktgestaltung – Belastungsbewertung – Handgewebebelastung – Handgelenkbelastung – Simulationsmodell – Druckverteilung – Messsystem – Belastungsindex

Die Hand steht ständig in Kontakt mit Produkten und wird dabei unterschiedlich belastet. Um Handbelastungen objektiv zu analysieren, werden in dieser Arbeit zwei Verfahren entwickelt und vorgestellt, die eine Simulation der Handgewebebelastung sowie eine Messung der Handgelenkbelastung ermöglichen. Um diese Verfahren zu realisieren, wird neben einem digitalen Handmodell auch ein Handsystem (Sensorhandschuh) entwickelt. Zu den Ergebnissen des digitalen Handmodells gehören die Untersuchung der Materialeigenschaften sowie die Bewegungssimulation von Greifvorgängen. Aus der Simulation können anschließend Vorschläge zur ergonomischen Produktgestaltung – so zum Beispiel bereits für das CAD-Modell – abgeleitet werden. Ein wesentlicher Beitrag des Sensorhandschuhs ist dabei die Ermittlung der Einflussfaktoren von Beobachtungsverfahren zur Bestimmung des Belastungsindexes. Im Vergleich zur klassischen Vorgehensweise zeigen die Ergebnisse am Ende eine höhere Genauigkeit bei schnellerer Bewertung der Handgelenkbelastung.

### Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.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 <http://dnb.ddb.de>.

---

# Vorwort

Bevor ich die vorliegende Arbeit mit dem Forschungsschwerpunkt der Ergonomie begann, erlitt ich gesundheitliche Probleme an beiden Händen. Dabei kam es aufgrund einer Überbelastung beinahe zum Mondbeintod im linken Handgelenkwrzelknochen. Durch einen Kahnbeinbruch, der operativ mit einer Titanschraube zusammengeschmolzen ist, sowie einem Riss am Sattelgelenk des Daumens, leidet mein rechtes Handgelenk nun an Arthrose. Mit Blick auf die Aussage eines Handchirurgen, dass keine Möglichkeit existiere, die Schmerzen in Gänze zu lindern, befasse ich mich nun seit einiger Zeit mit der Frage, mit welchen Mitteln Handschmerzen verringert werden können.

Die Suche nach Antworten auf genau diese Frage ist die wesentliche Motivation für die vorliegende Dissertation gewesen. Als in diesem Zusammenhang der Vorschlag zur Themenrichtung „Objektivierung der Ergonomie“ von Herrn Professor Peter Gust kam, konnte diese Arbeit anschließend realisiert werden. Daher gilt ein besonderer Dank meinem Doktorvater Herrn Professor Peter Gust. Darüber hinaus danke ich Herrn Professor Karsten Kluth von der Universität Siegen für die Betreuung sowie Förderung dieser Arbeit.

Ebenso möchte ich mich ganz herzlich bei meinem Kollegen Frank Mersch für die vielen fachlichen Diskussionen und die angenehme Atmosphäre im Büro bedanken. Ohne seine kritischen Anmerkungen und seinen Sachverstand wäre die Arbeit nicht zu der geworden, die sie heute ist. Auch allen anderen (ehemaligen) Kollegen des Lehrstuhls gilt mein Dank für deren Zuspruch und die positive Arbeitsatmosphäre.

Ohne die tatkräftige Unterstützung vieler Studenten und Studentinnen wäre diese Arbeit in dieser Zeit nicht zu bewältigen gewesen. Erwähnen möchte ich an dieser Stelle daher

---

gerne folgende Studenten: Tobias Bulert, Max Hoppe, Huan Xin, sowie Preeti Dhandam und Thorsten Zahn.

Ein weiterer Dank geht auch an Herrn Dr. Stephan Riedel (Sanofi-Aventis), Herrn Wolfgang Schneider (Lean Concept) sowie an Herrn Dr. Christian John (Bergische Universität Wuppertal), diese Personen haben mir immer mit wertvollen Ratschlägen zur Seite gestanden. Außerdem danke ich Herrn Hansen und Herrn Leuchtenberg (CMV Hoven) für die Ermöglichung der Druckmessungen und Herrn Sanker (Freund) für die Zusammenarbeit. Daneben gilt ebenso ein Dank an Sandra Krieger, insbesondere für die Korrektur meiner Arbeit.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Verlobten Emine, die mir immer wieder die nötige Kraft gegeben hat, auch schwierige Phasen durchzustehen. Zudem bedanke ich mich bei meinem Bruder Nedim und Onkel Kenan, die mich während der Promotion ermutigt haben. Und zum Schluss danke ich meinen Eltern Fatma und Nihat für ihre Unterstützung über all die Jahre.

Viersen, den 06.06.2017

gez. Aydin Ünlü

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Nomenklatur</b>	<b>VIII</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>XI</b>
<b>Abstract</b>	<b>XII</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation und Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung und Beitrag	2
1.3 Aufbau der Arbeit	4
<b>2 Einführung in die Ergonomie</b>	<b>6</b>
2.1 Ergonomie in der Produktgestaltung	6
2.1.1 Einflussfaktoren der Produktgestaltung	7
2.1.2 Hinweise zur Produktgestaltung	10
2.2 Belastungssituation bei der Nutzung von Produkten	12
2.2.1 Einflussfaktoren der Produktnutzung	13
2.2.2 Hinweise zur Belastungsminderung bei der Produktnutzung	14
<b>3 Literaturrecherche zur Bewertung der Handbelastung</b>	<b>16</b>
3.1 Bewertung der Handgewebebelastung	16
3.1.1 Bewertung der Belastung im Hautgewebe	18
3.1.2 Simulation der Druckverteilung	22
3.2 Bewertung der Handgelenkbelastung	28
3.2.1 Bewertung der Belastung im Handgelenk	28
3.2.2 Messung der Handbelastung	32
3.3 Diskussion der Literaturrecherche	34

<b>4 Handmodell zur Simulation der Handgewebebelastung</b>	<b>37</b>
4.1 Grundlagen zur Bewertung der Handgewebebelastung	37
4.1.1 Experiment zur Bewertung der Handgewebebelastung	38
4.1.2 Ergebnisse	40
4.2 Erstellung des Handmodells	44
4.2.1 Geometrie	44
4.2.2 Eigenschaften der Hand	47
4.3 Anwendung des Handmodells	59
4.3.1 Einflussanalyse zur Griffgestaltung	60
4.3.2 Einflussanalyse zur Kappengestaltung	70
4.4 Diskussion des Handmodells	78
<b>5 System zur Messung der Handgelenkbelastung</b>	<b>81</b>
5.1 Grundlagen zur Bewertung der Handgelenkbelastung	81
5.1.1 Experiment zur Bewertung der Handgelenkbelastung	82
5.1.2 Ergebnisse	84
5.2 Entwicklung des Handsystems	87
5.2.1 Kalibrierung	90
5.2.2 Programmierung	94
5.3 Anwendung des Handsystems	97
5.3.1 Versuchsdurchführung	98
5.3.2 Versuchsergebnisse	101
5.3.3 Überprüfung der Genauigkeit	104
5.4 Diskussion des Handsystems	107
<b>6 Objektive Handbelastungsanalyse</b>	<b>110</b>
6.1 Darstellung der Verfahren	110
6.2 Entwicklungsaussichten	111
6.2.1 Comfortyping	112
6.2.2 Sensaglove	115
<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>117</b>

<b>A Anhang</b>	<b>120</b>
A.1 Handanthropometrie	120
A.2 Kompressionsversuche	122
A.3 FSR-Sensor	124
A.4 Werkstattzeichnungen	127
A.5 Schaltplan	130
A.6 Programmablaufplan	132
A.7 Quellcode	135
<b>Literatur</b>	<b>137</b>

---

# Nomenklatur

## Formelzeichen

$F_L$	Längskraft [N]
$F_Q$	Querkraft [N]
$F_N$	Normalkraft [N]
$PPT$	Pressure Pain Thresholds [kPa]
$PDT$	Pressure Discomfort Thresholds [kPa]
$PLD$	Percentage Load Distribution [%]
$\bar{P}$	Mittlerer Druck [kPa]
$P_{max}$	Maximaler Druck [kPa]
$s$	Steifigkeit [ $\frac{N}{mm}$ ]
$E$	Elastizitätsmodul [MPa]
$\sigma$	Normalspannung [MPa]
$\varepsilon$	Dehnung/Stauchung [%]
$\mu$	Querkontraktionszahl [-]
$\rho$	Dichte [ $\frac{kg}{m^3}$ ]
$\xi$	Dämpfungsgrad [-]
$V_{out}$	Ausgangsspannung [V]
$R_m$	Vorwiderstand [ $\Omega$ ]
$R_{FSR}$	FSR Widerstand [ $\Omega$ ]

**Abkürzungen**

- CAD Computer Aided Design
- CATIA Computer Aided Three-Dimensional Interactive Application
- FEM Finite Elemente Methode
- MKS Methode der Mehrkörpersysteme
- FSR Force Sensing Resistor
- FDR Force Distributing Rigid
- DOF Degrees of Freedom
- LMM Leitmerkmalmethode
- MA Manuelle Arbeit
- RULA Rapid Upper Limb Assessment
- CP Category Partitioning
- CR Category Ratio
- R Radius
- B Breite
- L Länge
- CT Computertomographie
- P Palmar
- Q Thenar
- O Hypothenar
- IE Anstrengungsintensität
- DE Anstrengungsdauer
- EM Anstrengungshäufigkeit
- HWP Handhaltung
- SW Arbeitsgeschwindigkeit
- DD Arbeitsdauer
- E Dorsal Extension
- F Palmar Flexion
- D Ulnar Deviation

JSI	Job Strain Index
HAL	Handaktivitätsgrad
EMG	Elektromyographie
ADC	Analog-Digital-Converter
LCD	Liquid Crystal Display
PLX	Parallax
DAQ	Data Acquisition
PAP	Programmablaufplan
PPT	Druckschmerzgrenze
PDT	Druckdiskomfortgrenze
PLD	Prozentuale Lastverteilung

ACGIH American Conference of Governmental Industrial Hygienists

---

# Kurzfassung

Die Hand steht ständig in Kontakt mit Produkten und wird dabei unterschiedlich belastet. Hohe Belastungen, die im Handgewebe sowie im Handgelenk entstehen, können zu Beginn unangenehme Empfindungen hervorrufen und im schlimmsten Fall zu typischen Handkrankheiten führen. Um Handbelastungen objektiv zu analysieren, werden in dieser Arbeit zwei Verfahren entwickelt und vorgestellt, die eine Simulation der Handgewebebelastung sowie eine Messung der Handgelenkbelastung ermöglichen. Dabei beschränken sich die Verfahren auf statische Belastungen. Um diese Verfahren zu realisieren, wird neben einem digitalen Handmodell auch ein Handsystem (Sensorhandschuh) entwickelt. Zu den Ergebnissen des digitalen Handmodells gehören die Untersuchung der Materialeigenschaften sowie die Bewegungssimulation von Greifvorgängen. Zusätzlich zu den Materialeigenschaften werden Elastizitätsmodule der Handgewebe ermittelt und die Drucksimulation mit Druckmessungen verglichen. Bei den Greifvorgängen werden neben einer Druckanalyse auf der Handinnenfläche zwei besondere Greifarten der Finger zur Kappengestaltung von Insulinspritzen simuliert. Aus der Simulation können anschließend Vorschläge zur ergonomischen Produktgestaltung – so zum Beispiel bereits für das CAD-Modell – abgeleitet werden. Ein wesentlicher Beitrag des Sensorhandschuhs ist dabei die Ermittlung der Einflussfaktoren von Beobachtungsverfahren zur Bestimmung des Belastungsindexes. Zur Klassifikation der Einflussfaktoren werden Kraft- und Winkelsensoren eingesetzt und das Verfahren darüber hinaus anhand eines Beispiels aus der Montage geprüft. Im Vergleich zur klassischen Vorgehensweise zeigen die Ergebnisse am Ende eine höhere Genauigkeit bei schnellerer Bewertung der Handgelenkbelastung.

---

# Abstract

The hand is constantly in contact with products and therefore stressed differently. Heavy strain on the tissues of the hand and wrist is the cause of unpleasant sensation and can lead to common hand diseases in the worst case. In this work, two methods are developed and presented to analyze the hand strain objectively. These methods allow the simulation of hand tissue strain and the measurement of wrist strain. The methods are limited to static strains. To realize this method, a digital hand model and a hand system (sensor glove) have been developed. Final results of the digital hand model include the investigation of the material properties and the animation of grasping. For the material properties the Young's Modulus of the hand tissue are determined and the pressure simulation with pressure measurements proved. For gripping, two special grasping kinds of fingers, to the cap design of insulin pens, are simulated and a strain analysis on the palm performed. Out of the simulation, proposals for ergonomic product design for the CAD model can be derived. A significant contribution of the sensor glove is to determine the strain factors of monitoring method of determining the job strain index. For classifying the strain factors, force and angle sensors, are used and the procedure for an example of the assembly was tested. Compared to the classical approach, the results show a higher accuracy in faster review of wrist strain.