

Analyse von Hebetätigkeiten mit dem biomechanischen Menschmodell AnyBody™

Verena C. KNOTT, Tabea SCHIESSL, Klaus BENGLER

*Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München
Boltzmannstraße 15, D-85747 Garching b. München*

Kurzfassung: Hohe Lastgewichte und repetitive Bewegungen gelten als enorme Belastungen für den Körper und führen dazu, dass zunehmend Muskel-Skelett-Erkrankungen bei Arbeitnehmern zu verzeichnen sind. Im Rahmen einer Studie werden Hebetätigkeiten mithilfe eines Motion-Capture-Systems erfasst. Die Aufbereitung und der Import der Bewegungsdaten in ein biomechanisches Menschmodell ermöglichen es, die Bewegungen hinsichtlich ihrer Beanspruchung im Körper zu analysieren. Aussagen zur Genauigkeit der simulierten Werte im Vergleich zu real über die indirekte Kalorimetrie erhobenen Daten werden abschließend diskutiert.

Schlüsselwörter: Lastenhandhabung, Hebetätigkeit, Belastung, Beanspruchung, Motion Capturing, AnyBody Modeling System™

1. Der Hebeprozess und seine Folgen

Zahlreiche Aufgaben in Produktion und Logistik sind mit manuellen Lastenhandhabungsvorgängen verbunden (Smedley et al., 1997). Diese Tätigkeiten können zu irreversiblen Schädigungen/Verletzungen des Muskel-Skeletts und zu Gefährdungen des Herz-Kreislauf-Systems führen. Schmerzen im unteren Rückenbereich gelten als das häufigste Krankheitsbild und die häufigste Ursache für krankheitsbedingte Fehlertage (Bongwald et al., 1995; Nöllenheidt & Brenscheidt, 2013), wodurch für Arbeitgeber und Volkswirtschaft erhebliche Kosten entstehen (Hettinger, 1991). Sowohl aus gesundheitlichen als auch ökonomischen Aspekten besteht deshalb Optimierungsbedarf bezüglich der Arbeitsbedingungen im Bereich der Lastenhandhabung. Die Entwicklung neuer Assistenzsysteme zur Handhabung von Lasten stellt einen wichtigen Beitrag für die zukünftige Arbeitswelt dar und zahlreiche Forschungsansätze verfolgen das Ziel, die Lastenhandhabung über derartige Systeme zu unterstützen.

Werkzeuge zur Menschmodellierung wie AnyBody Modeling System™ (AnyBody Technology A/S, Denmark) werden zur Auslegung und Bewertung dieser Systeme eingesetzt, wobei als Grundlage Motion Capture Daten dienen, die über Bewegungserfassungssysteme (z.B. VICON Motion Systems Ltd., UK) erhoben werden. Basierend auf diesen Simulationen können Aussagen zur Belastung und Beanspruchung getroffen werden. Doch kann in Zeiten von Industrie 4.0 ganz auf Probandenstudien verzichtet werden und bilden derzeit verfügbare Menschmodelle den Menschen und dessen Belastung bzw. Beanspruchung bei Hebetätigkeiten korrekt ab?

2. Grundlagen zum Metabolismus des Menschen und dessen Berechnung

Der Mensch verbraucht zur Aufrechterhaltung der Körperfunktionen und der Körperstruktur im Schlaf oder bei Bewegung Energie (Thews & Vaupel, 2005). Für Mus-

kelkontraktionen dient Adenosintriphosphat (ATP) als Hauptenergiequelle (Stege-
mann, 1984) und zur Herstellung dessen wird beim aeroben Stoffwechsel Sauerstoff
benötigt, der in Richtung Muskel transportiert werden muss (Löllgen et al. 2010).
Nach Pohl (2010) entsprechen sich Energie- und Sauerstoffbedarf weitgehend und
aus der Messung des Sauerstoffverbrauchs bzw. der Sauerstoffaufnahme $V'O_2$ über
die indirekte Kalorimetrie können der Sauerstoff- und Energiebedarf des Menschen
abgeleitet werden (Pohl, 2010). Ulmer (1985, S. 607) verweist darauf, dass die „*Sau-
erstoffaufnahme (...) ein Maß für die Beanspruchung*“ ist. Neben der Messung der
Beanspruchung über die indirekte Kalorimetrie unter Zuhilfenahme der Messmetho-
dik der Spiroergometrie (vgl. Knott et al. 2016) versuchen Berechnungsmodelle ent-
sprechende Werte zu simulieren. In heutiger Zeit reicht dies bis zu dreidimensionalen
Muskel-Skelett-Modellen (Damsgaard et al., 2006), bei denen zumeist mehrere Ein-
flussgrößen miteinbezogen werden können. Das im Rahmen dieser Publikation ver-
wendete Ganzkörpermuskellmodell (MoCapModel) von AnyBody Modeling System™
(AnyBody Technology A/S, Dänemark) verfügt über eine Implementierung des meta-
bolischen Energieverbrauchs P_{met} eines jeden Muskels, wobei P_{met} wie folgt be-
schrieben ist: „ *P_{met} is a crude estimate of the metabolic power consumption of the
muscle*“ (AnyBody Technology, 2016a, Lesson 5). Nach Rasmussen et al. (2001a)
können die Daten für den gesamten Hebeprozess ermittelt werden, indem eine
Summe über alle metabolischen Leistungen eines individuellen Muskels zu einem
Zeitpunkt gebildet wird ($P_{met, total}$), womit ein Vergleich mit realen Daten – erhoben
über die Spiroergometrie – möglich wäre.

3. Methodik zur Datenerhebung und Simulation

Die Simulation von Hebebewegungen mit dem biomechanischen Menschmodell
AnyBody Modeling System™ erfordert die Aufzeichnung von realen Hebetätigkeiten
mit einem Motion Capture System, wobei in diesem Falle das Bewegungserfas-
sungssystem VICON (VICON Motion Systems Ltd., England) genutzt wird. Mittels
inverser Kinematik besteht die Möglichkeit, die für die Bewegung benötigten Muskel-
und Gelenkkräfte rückwirkend zu berechnen (Damsgaard et al., 2006).

3.1 Erfassung und Aufbereitung der Daten zur Hebetätigkeit mittels VICON

3.1.1 Versuchsaufgabe und Versuchsumgebung

Für die Bewegungsaufzeichnung ist die Versuchsumgebung am Lehrstuhl für Er-
gonomie der Technischen Universität München auf das Wesentliche reduziert (Abbil-
dung 1). Als Aufgabe wird die manuelle Kommissionierung in der Logistik zugrunde
gelegt. Eine Start- und eine Zielpalette, jeweils imitiert durch einen Papierstapel
(30 cm x 21 cm x 10,5 cm), begrenzen den Raum der Bewegungsausführung. Auf
der Startpalette befinden sich sechs Getränkekisten (30 cm x 20 cm x 26,5 cm) als
Lagen 1-6 jeweils um 90° versetzt gestapelt. Das Gewicht beträgt je nach Bedingung
0 kg als Baseline und 6,5 kg als durchschnittliches Lastgewicht aus der manuellen
Kommissionierung und wird randomisiert eingesetzt. Das Kamerasystem VICON zur
Aufnahme der Hebetätigkeiten, bestehend aus zehn Kameras der MX T-Serie (sechs
T-10 Kameras und vier T-10-S Kameras) ist auf Stativen positioniert und mit der MX
Ultranet Unit sowie einem Laptop verbunden. Die dazugehörige Software VICON
Nexus (Version: 1.8.5) dient als Aufzeichnungs- und Bearbeitungsprogramm.

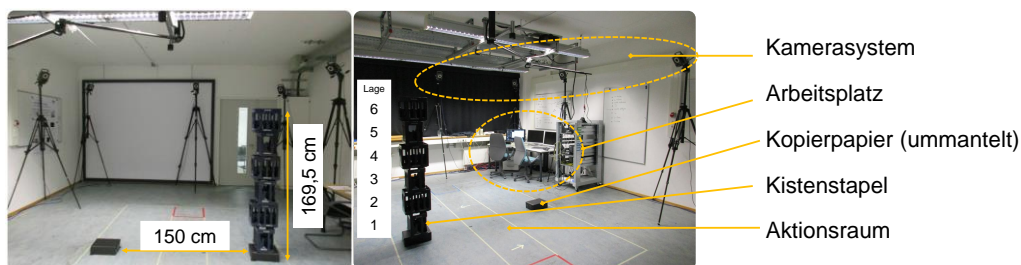


Abbildung 1: Versuchsumgebung am Lehrstuhl für Ergonomie (Technische Universität München)

3.1.2 Versuchsablauf

Nach den vorbereitenden Maßnahmen werden die vorab nach Geschlecht und Körpergröße akquirierten Probanden begrüßt werden. Die Testpersonen erklären ihr Einverständnis, freiwillig an der Untersuchung teilzunehmen. Ein demografischer Fragebogen erfasst zudem Daten zum Gesundheits- und Fitnesszustand sowie zum Erfahrungsgrad in der Lastenhandhabung. Für die spätere Bearbeitung der Daten in VICON Nexus und AnyBody™ werden anthropometrische Daten (Körpergröße, -gewicht) der jeweiligen Versuchsteilnehmer erfasst. Anschließend werden die passiven Marker mittels doppelseitigem Klebeband gemäß PlugInGait FullBody (UPA & FRM) an den entsprechenden Körperstellen angebracht.

Die Abfolge der kompletten Datenaufzeichnung durch VICON Nexus ist in Abbildung 2 veranschaulicht. Der Proband hat die Aufgabe aus einer definierten Startposition heraus eine Getränkekiste vom Stapel abzunehmen und eine 180°-Drehung zu absolvieren, um anschließend die Kiste in 150 cm Entfernung auf der vorgesehenen Zielpalette wieder abzulegen. Im Anschluss nimmt er seine Startposition wieder ein. Zudem wird der Proband darauf hingewiesen die Richtlinien zum ergonomischen Heben einzuhalten und die Kisten von unten zu greifen. Um einen einheitlichen Bewegungsablauf aller Versuchspersonen sicher zu stellen, wird ein digitales Metronom der Firma M&M Systeme (Version 2.0.0.3) zur Taktvorgabe der Bewegung (6 min^{-1}) verwendet. Im Hinblick auf die Auswertung in AnyBody™ wird jeder Ablauf in Teilschritten für Lastgewicht und Aufnahme- bzw. Ablagehöhe variiert, mit VICON Nexus nach einer Übungsphase einzeln aufgenommen und jeweils dreimal wiederholt (Backup). Nach Entfernen der Marker wird dem Probanden für die Teilnahme gedankt und die Versuchsnachbereitung kann erfolgen, wobei in VICON Nexus die Marker entsprechend gelabelt und auftretende Lücken über den Prozess „Gap Filling“ gefüllt werden. Abschließend werden die Aufzeichnungen auf den reinen Hebeprozess gekürzt (L-Pose bis L-Pose) und als *.c3d-Dateien für die folgende Simulation exportiert.



Abbildung 2: Teilschritte bei der Datenaufnahme mit dem VICON Motion Capture System

3.2 Simulation und Auswertung der Daten zur Hebetätigkeit mittels AnyBody™

3.2.1 Simulationsumgebung

Das AnyBody Modeling System™ (AMS, hier Version: 5.3.0.3365) hat die Simulation der Mechanik des menschlichen Körpers während alltäglicher Bewegungen oder der Interaktionen mit der Umwelt mittels inverser Kinematik zum Ziel. Umgesetzt wird

dies durch ein Muskel-Skelett-Modell, das mehrere hundert Muskeln umfasst, deren Berechnung auf einen integrierten Muskel-Rekrutment-Algorithmus zurückgreift (Rasmussen et al., 2001b). Die objektorientierte Programmiersprache AnyScript ähnelt C++ und kann dazu genutzt werden eigene Körpermodelle beliebiger Größe, Haltung oder Bewegung zu codieren oder um frei zugängliche Quellcodes zu individualisieren (Rasmussen et al., 2005). Zudem ist eine Integration von zusätzlich aufgezeichneten Bewegungsdaten im *.c3d-Format möglich. Ergebnisparameter sind unter anderem Muskelkräfte, Gelenkkräfte und Gelenkmomente, Stoffwechselgrößen oder elastische Energien. Im Rahmen dieser Publikation wird das vorgefertigte Template MoCapModel (Version 1.6.2) für die Bewegungsanalyse eigens aufgenommener Daten herangezogen, wobei zwischen zwei Teilmodellen untergliedert wird: MotionAndParameterOptimizationModel und InverseDynamicModel. Zudem werden für die Berechnungen zur kinematischen Analyse sowie zur inversen Dynamik Adaptionen bzgl. grundlegender Einstellungen sowie des Markersets durchgeführt. Da keine Kraftmessplatten die Bodenreaktionskräfte aufzeichnen, werden die Kräfte basierend auf der aufgenommenen Bewegung errechnet (Fluit et al., 2014), wobei der Code von AnyBody Technology A/S, Dänemark zur Verfügung gestellt wird (AnyBody Technology, 2016b). Zudem werden die Kraftvektoren zur Simulation der zu handhabenden Lasten (0 kg und 6,5 kg) implementiert. Des Weiteren wird der Code um die Simulation der metabolischen Gesamtleistung $P_{met, total}$ erweitert.

3.2.2 Simulationsablauf

Grundsätzlich werden der Reihe nach die folgenden zwei Analysen durchlaufen: Während in der MotionAndParameterOptimization Segmentlängen und Markerpositionen optimiert werden und der Bewegungsablauf rekonstruiert wird, werden im Rahmen der InverseDynamicAnalysisSequence mittels inverser Kinematik die Muskelaktivierung, -kräfte sowie die metabolischen Kennwerte berechnet (Abbildung 3). Die simulierten Werte können grafisch im Programm selbst betrachtet oder für weitere Analysen exportiert werden. Im Rahmen dieser Publikation wird Letzteres gewählt.

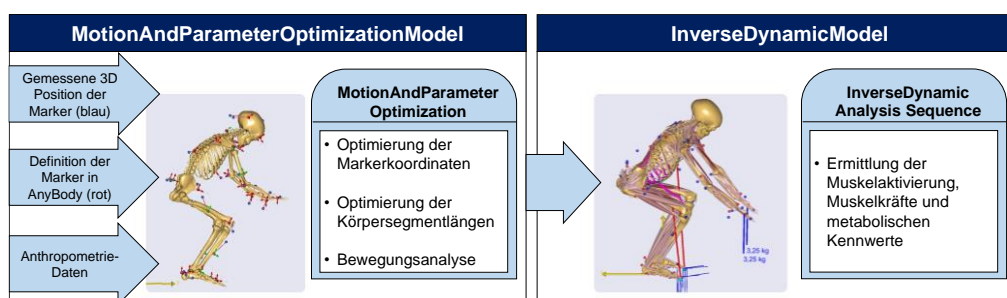


Abbildung 3: Funktionsweise der Simulation über das biomechanische Menschmodell AnyBody™

4. Ergebnisse der Analyse der Hebetätigkeiten mit AnyBody™

4.1 Probandenkollektiv

Die Stichprobe ($M_{Alter}=24,25$ Jahre; $SD_{Alter}=\pm 0,83$) umfasst zwei männliche Probanden, die dem 50. bzw. 95. Perzentil Körperhöhe entsprechen. Zusätzlich werden zwei weibliche Versuchspersonen (VP) des 5. und 50. Perzentils derselben Stichprobe in die Messreihe hinzugezogen (Datenquelle: Deutschland, Altersgruppe 18-65 Jahre Männer bzw. Frauen (HUMAN SOLUTIONS GmbH, 2016)).

4.2 Simulierte Beanspruchung abgeleitet aus der metabolischen Leistung P_{met}

Exemplarisch seien im Folgenden die Ergebnisse der Verläufe der metabolischen Leistung P_{met} für die männliche VP des 50. Perzentils angegeben (Abbildung 4).

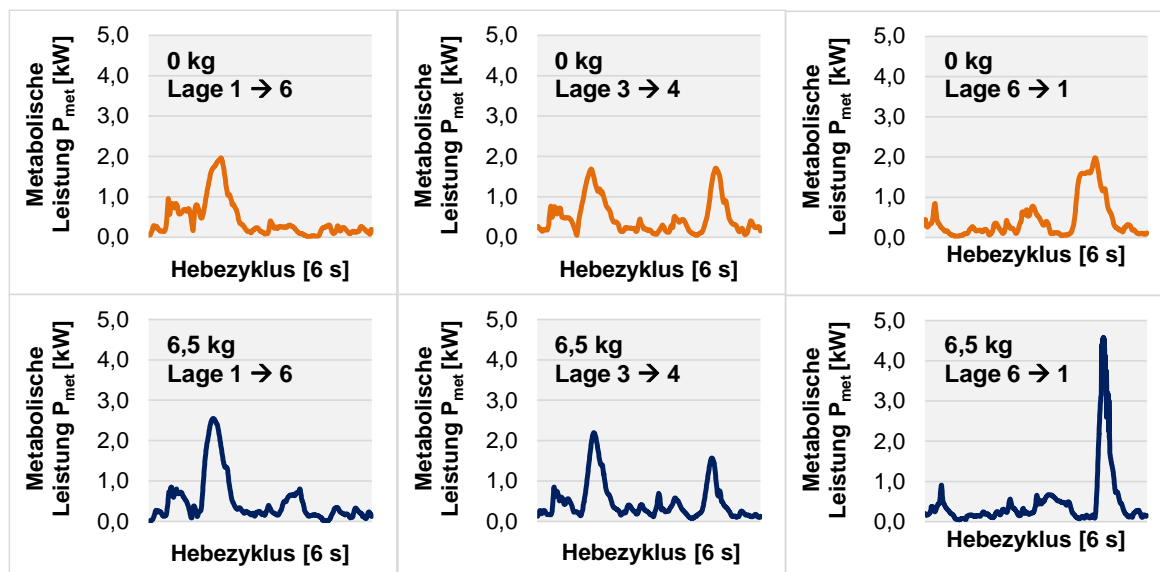


Abbildung 4: P_{met} -Verläufe für unterschiedliche Gewichte und Hebeaufgaben Heben (Lage 1 → 6), Tragen (Lage 3 → 4), Senken (Lage 6 → 1) für den männlichen Probanden (50. Perzentil Körperhöhe)

Wie Abbildung 4 zeigt, ergeben sich im Vergleich der Gewichtsklassen unterschiedliche Peakwerte der metabolischen Leistung. Es fällt allerdings auch auf, dass während der Transportphase mit Last, in der physiologisch Arbeit verrichtet wird, der Parameter P_{met} keine Erhöhung im Vergleich zur Gehphase ohne Last zeigt.

4.3 Diskussion zur Beanspruchungssimulation mithilfe AnyBody™ über P_{met}

Neben den Vorteilen, dass das AnyBody Modeling System™ unterschiedlichste Tätigkeiten nachbilden kann und über einen hohen Grad an Flexibilität bzw. Variabilität verfügt, indem Bewegungsdaten zur Muskelsimulation herangezogen werden können, stellt die weitreichende Adaptionmöglichkeit des Modells einen weiteren positiven Aspekt dar. Anthropometrische Eigenschaften wie Segmentlängen und Körpergewicht können begrenzt angepasst werden.

Jedoch weist das Simulationsprogramm einige beträchtliche Limitationen auf, die eine Untersuchung der Beanspruchung bei Lastenmanipulationen durchaus erschweren. Eine Berechnung aller Muskelaktivitäten zu jedem definierten Zeitintervall wird für die Analyse der metabolischen Gesamtleistung benötigt – erfordert allerdings gleichzeitig enorme Rechenzeit. Eine Analyse einer Arbeitstätigkeit wie der manuellen Kommissionierung hinsichtlich der metabolischen Beanspruchung lässt sich – im Gegensatz zur indirekten Kalorimetrie – simulationsbasiert nicht durchführen. Die Implementierung von P_{met} sowie die Berechnung der Gesamtleistung ist äußerst vereinfacht umgesetzt. Zudem ist nicht sichergestellt, dass der Energieumsatz allumfassend dargestellt wird, da im Algorithmus des AMS die Simulation von P_{met} auf der Berechnung der mechanische Arbeit P_{mech} beruht. Dies ist insofern problematisch, da dadurch in statischen Haltungen, d.h. während der Trage- oder Standphase, die metabolische Energie als Null ausgegeben wird, was aus physiologischer Sicht allerdings nicht der Realität entspricht.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zwar betont Yang et al. (2013), dass der Metabolismus im AMS durchaus als experimentelle Basis für ergonomische Auslegungen geeignet ist. Hierbei liegt allerdings nur dynamische Muskelarbeit vor. Generell kann jedoch gesagt werden, dass für komplexe Bewegungsabläufe mit Anteilen isometrischer Muskelarbeit – wie bei Hebetätigkeiten – die Variable P_{met} definitiv nicht geeignet ist und die reale Erfassung der Beanspruchung über die Nutzung der Spiroergometrie vorzuziehen ist.

6. Literatur

- AnyBody Technology (2016a). Tutorial Lesson 5: Muscle Models. Abgerufen 12. April 2016. http://www.anybodytech.com/fileadmin/AnyBody/Docs/Tutorials/chap5_Muscle_modeling/lesson5.html
- AnyBody Technology (2016b). AnyScript Wiki: Ground Reaction Force Prediction. Abgerufen 5. April 2016. <http://wiki.anyscript.org/images/2/2a/AddingGRFpredictiontoaMoCapmodel.pdf>
- Bongwald, O., Laurig, W., & Luttmann, A. (1995). Leitfaden für die Beurteilung von Hebe- und Tragetätigkeiten: Gesundheitsgefährdung, gesetzliche Regelungen, Meßmethoden, Beurteilungskriterien und Beurteilungsverfahren. Sankt Augustin: HVBG.
- Damsgaard, M., Rasmussen, J., Christensen, S., Surma, E., & de Zee, M. (2006). Analysis of musculoskeletal systems in the AnyBody Modeling System. *Simulation Modelling Practice and Theory* (14), 1100–1111.
- Fluit, R., Andersen, M., Kolk, S., Verdonschot, N., & Koopman, H. (2014). Prediction of ground reaction forces and moments during various activities of daily living. *Journal of Biomechanics* (47), 2321–2329.
- Hettinger, T. (1991). Handhabung von Lasten: Ergonomische Gesichtspunkte. (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorgan e.V., Hrsg.) München: Carl Hanser Verlag.
- HUMAN SOLUTIONS GmbH (Hrsg.). (2016). iSize. Abgerufen am 5. September 2016. <https://portal.i-size.net/SizeWeb/pages/home.seam>
- Knott, V. C., Wiest, A. & Bengler, K. (2016). Repetitive Lifting Tasks in Logistics – Effects on Humans at Different Lifting Task Durations. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 60 (1), 2034-2038. DOI: 10.1177/1541931213601462.
- Löllgen, H., Erdmann, E. & Gitt, A. (2010). Ergometrie. Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis. Heidelberg: Springer Medizin Verlag. ISBN: 978-3-540-92729-7.
- Nöllnheidt, C., & Brenscheidt, S. (2013). Arbeitswelt im Wandel: Zahlen - Daten - Fakten. A. Auflage. Dortmund: BAuA – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.
- Pohl, U. (2010). Der Sauerstoff im Gewebe: Substrat, Signal und Noxe. In R. F. Schmidt, F. Lang & M. Heckmann (Hrsg.), *Physiologie des Menschen. Mit Pathophysiologie* (Springer-Lehrbuch, 31. Aufl., S. 764-777). Heidelberg: Springer.
- Rasmussen, J., Damsgaard, M., & Christensen, S. (2001a). Simulation of Tendon Energy Storage in Pedaling. IX Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing., (S. 4-7). Pula, Kroatien.
- Rasmussen, J., Damsgaard, M., & Voigt, M. (2001b). Muscle recruitment by the min/max criterion - a comparative numerical study. *Journal of Biomechanics* (34), 409-415.
- Rasmussen, J., Damsgaard, M., Christensen, S., & de Zee, M. (2005). AnyBody - decoding the human musculoskeletal system by computational mechanics. Konferanse i beregningsorientert mekanikk (Computational Mechanics). Trondheim, Norwegen.
- Smedley, J., Egger, P., Cooper, C., & Coggon, D. (1997). Prospective Cohort Study of Predictors of Incident Low Back Pain in Nurses. *British Medical Journal*, 314 (7089), 225-1228.
- Stegemann, J. (1984). Leistungsphysiologie: Physiologische Grundlagen der Arbeit und des Sports (Flexibles Taschenbuch, 3. Aufl.). Stuttgart u.a: THIEME. ISBN: 3-13-462403-6.
- Thews, G., & Vaupel, P. (2005). *Vegetative Physiologie* (5. Ausg.). Berlin: Springer Verlag.
- Ulmer, H.-V. (1985). Arbeitsphysiologie - Umweltphysiologie. In R. F. Schmidt & G. Thews (Hrsg.), *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Yang, Z., Zheng, Y., & Fu, S. (2013). Simulation of Pushing the Push-Pull Rod Action Based on Human Body Dynamics. DHM/HCI 2013, Part II, LNCS 8026 (S. 393-401). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.



Gesellschaft für
Arbeitswissenschaft e.V.

Soziotechnische Gestaltung des digitalen Wandels – kreativ, innovativ, sinnhaft

63. Kongress der
Gesellschaft für Arbeitswissenschaft

FHNW Brugg-Windisch, Schweiz

15. – 17. Februar 2017

GfA Press

Bericht zum 63. Arbeitswissenschaftlichen Kongress vom 15. – 17. Februar 2017

FHNW Brugg-Windisch, Schweiz

Herausgegeben von der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Dortmund: GfA-Press, 2017

ISBN 978-3-936804-22-5

NE: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft: Jahresdokumentation

Als Manuskript zusammengestellt. Diese Jahresdokumentation ist nur in der Geschäftsstelle erhältlich.

Alle Rechte vorbehalten.

© **GfA-Press, Dortmund**

Schriftleitung: Matthias Jäger

im Auftrag der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V.

Ohne ausdrückliche Genehmigung der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. ist es nicht gestattet, den Kongressband oder Teile daraus in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) zu vervielfältigen.

USB-Print: Dr. Philipp Baumann, Olten

Screen design und Umsetzung

© 2017 fröse multimedia, Frank Fröse

office@internetkundenservice.de · www.internetkundenservice.de