

# DAS »NUMERISCHE VERHALTENSMODELL DES MENSCHEN« – SIMULATION VON WERKERN UNTER ERHÖHTER BEANSPRUCHUNG

Doz. Dr. sc. techn. Wolfgang Leidholdt, Christina Wohlschläger

## 1 Einleitung

In der Digitalen Fabrik ist die Simulation menschlicher Arbeit ein Gebiet, das in der Anwendungsbreite deutlich nachhinkt, obwohl weiterhin das größte Optimierungspotenzial im Bereich der menschlichen Arbeit zu finden ist. Vor dem Hintergrund des demographischen Wandels und der Bestrebungen der Industrie, bei der Gestaltung von Arbeitsplätzen immer besser auf ergonomische Erfordernisse einzugehen, ist es notwendig, die der Simulation zugrundeliegenden Menschmodelle in ihren Verhalten weiter zu qualifizieren.

Die imk automotive GmbH ist seit vielen Jahren auf dem Gebiet der Planung und Simulation menschlicher Arbeit, aber auch in der Entwicklung von Anwendersoftware tätig. Neben der Simulation von Normverhalten und Normleistung – also des durchschnittlichen Arbeitens des gesunden, normalbelasteten Arbeiters – steht jetzt die Verhaltensveränderung des erhöht beanspruchten Arbeiters an. Die Beanspruchung kann psychischer und physischer Art sein. Zwar gibt es viele psychologisch-medizinische Untersuchungen dazu, aber leider noch kein für die Integration in Simulationssoftware taugliches Modell. Es wurde deshalb das »Numerische Verhaltensmodell des Menschen« entwickelt, das hier erstmals der Fachwelt vorgestellt wird. Es basiert auf der Simulation menschlicher Arbeit mithilfe des »Editors menschlicher Arbeit«, kurz »ema«, einer Entwicklung der imk automotive GmbH. Die hier beschriebene Entwicklung eines Modells ist getragen von der induktiven wissenschaftlichen Arbeitsweise. Es wird zuerst das Modell hypothetisch nach bestem Wissen aufgestellt und dann auf Richtigkeit geprüft. Aufgrund des erheblichen Defizits zwischen der arbeitswissenschaftlichen Forschung und den nunmehr vorhandenen Möglichkeiten der mechanischen / mechanistischen Arbeitsbeschreibung mit dem Tool »ema« ist die deduktive Methode nicht ausreichend schnell zielführend. Die Welt der Wissenschaft wird aufgefordert, an der Weiterentwicklung des Modells mitzuarbeiten.

## 2 Das Modell

### 2.1 Die Phänomene des Modells

Die zu verarbeitenden Phänomene des Modells zeigt die Abbildung 1:

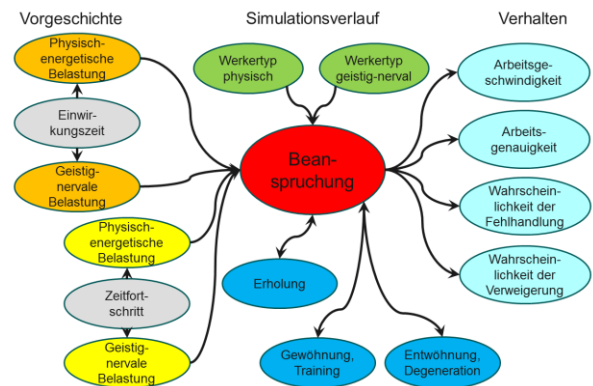


Abbildung 1: Phänomenologisches Modell

Es werden die physisch-energetischen Belastungen zum großen Teil aus der Simulation der Arbeit abgeleitet oder vom Nutzer eingegeben. Die geistig-nervalen Belastungen werden größtenteils durch den Nutzer gesetzt. Es kann zu Beginn der Simulation bereits eine erhöhte Beanspruchung vorliegen, deshalb kann eine Initialbelastung durch den Nutzer eingegeben werden, die der Werker "von zu Hause mitbringt".

Die Werkertypen beziehen sich auf die Belastbarkeit unterschiedlicher Menschen, für beide Belastungskategorien getrennt.

Erholung, Gewöhnung, Training und Degeneration sind typische Phänomene, die über den Simulationsverlauf hinweg die Wirkungsgröße der Belastung beeinflussen. Alle Einzelbelastungen entäußern sich in einer Globalbeanspruchung. Das ist zugegebenermaßen sehr simplifiziert, aber notwendig, weil andernfalls die Weiterverarbeitung in der Simulation durch die Verhaltensfunktion im Aufwand ausufernd.

Die Beanspruchung des Menschen über die Normalbeanspruchung hinaus führt nun in der Simulation zu vier darstellbaren Verhaltensänderungen: Die Arbeitsgeschwindigkeit wird beeinflusst, die Arbeitsgenauigkeit (und mithin die Prozessfähigkeit des Arbeitssystems) verschlechtert sich und die Wahrscheinlichkeit einer Fehlhandlung ("Schraube fällt aus der Hand zu Boden") steigt an, was den Prozess behindert und stört. Zuletzt steigt die Wahrscheinlichkeit der Arbeitsverweigerung, gleichgültig ob geistig-nerval ("Schnauze voll!") oder physisch-energetischer ("Ich kann nicht mehr!") Ursache.

## 2.2 Die Funktionen des Modells

Für die Berechnung der numerischen Werte der Phänomene werden Funktionen verwendet (Abbildung 2)Abbildung 1:

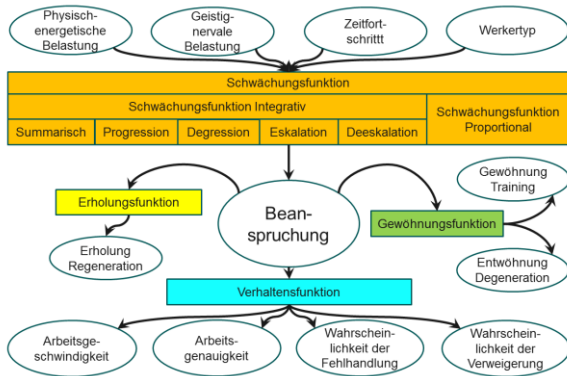


Abbildung 2: Funktionsmodell

Die Schwächungsfunktion ist ein komplexes Gebilde aus Einzelfunktionen, die auf das jeweils umzusetzende Phänomen zugeschnitten und parametrisiert sind. Während in der (ohnehin spärlichen) Literatur über die Art der Funktionen ein gewisser Konsens besteht, gehen die Parameter – sofern überhaupt erforscht – weit auseinander. Proportional wirkende Belastungen zeigen keinen Zeitverlauf bei ihrer Wirkung auf die Beanspruchung. Die integrativen Belastungsarten führen zur Zunahme der Beanspruchung über die fortschreitende Zeit. Dies kann linear geschehen, progressiv ("hineinsteigern") oder degressiv ("nicht so aufregend"). Ferner kommt es bei einigen Belastungsarten zur Gewöhnung, die trotz gleichbleibender Belastung die Beanspruchung wieder abklingen lässt. Sie verschwindet aber, wenn die Belastung einige Zeit ausbleibt. Es gibt punktförmige Ereignisse, die die Beanspruchungen sofort steigern oder vermindern können. Das sind die Eskalatoren (Tadel vom Chef) und die Deeskalatoren (Lob vom Chef). Die Beanspruchung, insbesondere die Überbeanspruchung, verringert sich durch den Effekt der Erholung, wenn die Überbelastung verschwindet.

## 2.3 Die Maßeinheiten

... sind ebenso strittig und kaum aus der Literatur ableitbar. Es werden definiert:

- % für alle Beanspruchungen und proportionalen Belastungen,
- %/h für die integrativen Belastungen,
- Nm als Gelenkmomente,
- Ws als mechanische Arbeit,
- W als mechanische Leistung,
- Nms als mechanischer Drehimpuls,
- eine Menge einheitsloser Faktoren in den Formeln.

Das Modell ist zutiefst mechanistisch, anders aber nicht zu programmieren. Die Simulation benötigt am Ende Zahlen, keine Sofffacts.

Die Beanspruchungen werden in % ausgedrückt, um eine numerische Bemessung zwischen zwei Grenzwerten zu ermöglichen. Die Grenzwerte: 0 % bedeutet »normalbeansprucht, normleistungsfähig«, 100 % bedeutet »handlungsunfähig«.

## 3 Die Modellapplikation

### 3.1 Die Belastungen

#### 3.1.1 Physisch-energetische Belastungen

Die vollständige Bewegungsbeschreibung des Menschmodells durch den Arbeitsprozess hindurch lässt es zu, sämtliche Gelenkwinkel-Zeitverläufe zu gewinnen, nunmehr auch über z. B. eine ganze Arbeitsschicht hinweg. Das biomechanische Menschmodell (verwendet wird ein Dynamikus-Derivat unter ALASKA des IfM Chemnitz) als Mehrkörpersimulationsmodell liefert darüber hinaus alle Gelenkmomentverläufe. Es liegt eine vollständige mechanische und energetische Beschreibung des Arbeitsprozesses (oder auch anderer Prozesse menschlichen Tuns) vor. Nun müssen diese völlig neuen (weil bisher nicht bereitstellbaren) Daten mit den menschlichen Energieressourcen in Beziehung gesetzt werden. Dazu sind sie zu klassifizieren und mit "Wirkungsgraden" zu versehen.

Den verwendeten Ansatz der Klassifizierung zeigt die Abbildung 3.

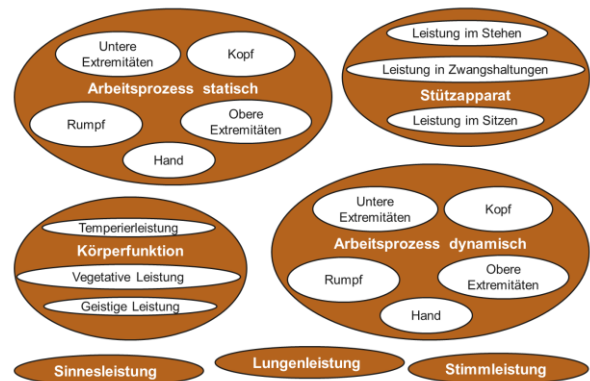


Abbildung 3: Belastungsarten physisch-energetisch

Es wurden Körperregionen und Funktionen abgegrenzt. Die Temperierleistung tritt bei Schwitzen und Frieren auf, die geistige Leistung bei angestrenzter Denkarbeit (Simultan-Schach, Mathe-Prüfung), die Sinnesleistung bei übermäßiger Aufmerksamkeit und Wahrnehmung (Eisbergschau vor der TITANIC), die Lungenleistung bei Atemschutzgerät und die Stimmeleistung bei z. B. diesem Tagungsvortrag, wenn das Mikrophon ausfällt. Ein mehrschichtiges Problem ist die gesamte Muskelarbeit. Bei dynamischer Belastung tritt zum einen {Gelenkmoment • Winkel} auf, wenn der Muskel gegen die Kraft wirkt. Es tritt aber zum anderen { - Gelenkmoment • Winkel} auf, wenn der Muskel in Richtung der Kraft

bewegt wird, z. B. beim Absetzen einer Last. Der Muskel wird de facto »geschoben«. Während ein Elektroantrieb in diesem Fall sofort rekurert, bleibt dem biologischen Muskel diese Art der Energierückgewinnung versagt – im Gegenteil, es wird weiterhin Körperenergie verbraucht. Es tritt zum dritten der Fall der statischen Haltearbeit auf. Die Physik liefert dabei keine Arbeit, sondern einen Drehimpuls {Gelenkmoment • Zeit}. Das verbraucht im biologischen System gleichfalls Energie. Alle drei Energieanteile müssen durch Faktoren – nach Körperregion getrennt – in die verbrauchte biologische Energie<sup>1</sup> umgerechnet werden. Literatur? – bisher leider nicht gefunden. Nur indirekte Angaben, die der Auswertung harren.

### 3.1.2 Geistig-nervale Belastungen

Diese Belastungen sind nicht unmittelbar aus dem Arbeitsprozess ableitbar, lediglich aus der Teamarbeit oder einer abgeschätzten Arbeitscharakteristik (hochrepetitive Tätigkeiten, Teamarbeit) können einige Belastungsarten gewonnen werden. Ansonsten obliegt es der Einschätzung des Nutzers der Simulation, aus angenommenen Szenarien die Belastungen abzuleiten. Es wurden 24 Belastungsarten ausgewählt, in Anlehnung an McCreath [3] (Abbildung 4):

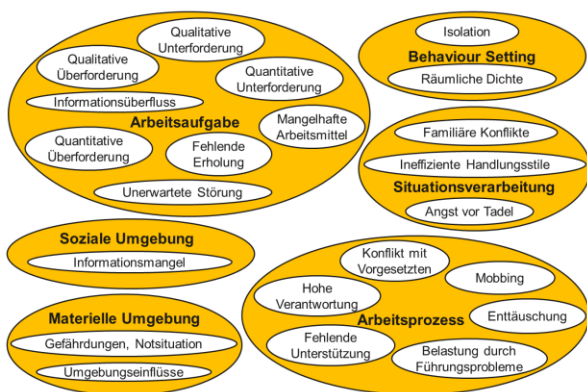


Abbildung 4: Belastungsarten geistig-nerval

## 3.2 Die Beanspruchungen

### 3.2.1 Beanspruchungen physisch-energetisch

Mit Hilfe der Schwächungsfunktion werden die Belastungen in Beanspruchungen umgerechnet. Das geschieht durch Summierung der Energieanteile in ein biologisches Ressourcenmodell. Es war zum Redaktionsschluss dieses Beitrages noch in Erforschung begriffen und wird voraussichtlich im Vortrag genauer beschrieben. Es werden drei Ressourcenarten gebildet, deren Erschöpfung das Maß der Globalbeanspruchung liefert (Abbildung 5).

<sup>1</sup> Die Energie, die der Stoffwechsel primär bereitstellen muss, unter Einbezug des Wirkungsgrades

Die Ressourcen werden durch das Stoffwechselsystem des Menschen aufgefüllt. Übersteigt die abgeforderte Leistung den Stoffwechsel, werden die Reserven abgerufen. Die Kurzzeitreserve ("Hau ruck! – Uff!") kann viel Leistung liefern, enthält aber wenig Energievorrat. Demgegenüber enthält die Saisonreserve viel Energie, kann aber nur wenig Leistung abgeben – das dafür aber über lange Zeit hinweg ("Urlaubsreif!"). Dazwischen liegt die Tagesreserve ("Abgespannt!").

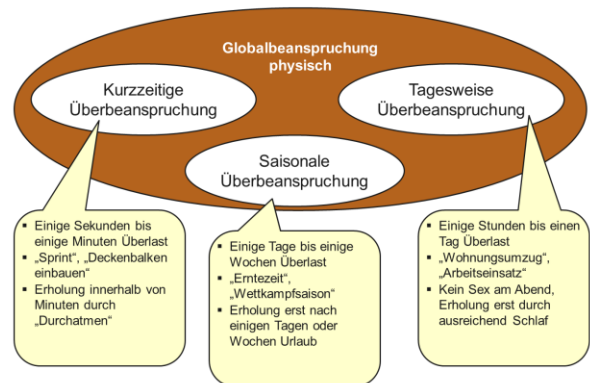


Abbildung 5: Beanspruchungsarten physisch-energetisch

An dieser Stelle setzen die physisch-energetischen Werkertypen an (Abbildung 6):

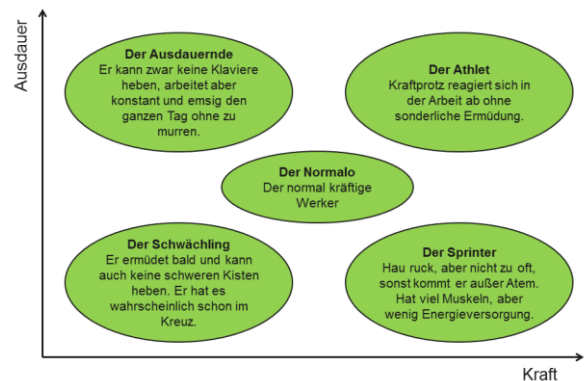


Abbildung 6: Werkertypen physisch-energetisch

Sie werden durch unterschiedliche Größen der Energievorräte und Leistungsströme der Ressourcen abgebildet.

### 3.2.2 Beanspruchungen geistig-nerval

Mit Hilfe des psychischen Teils der Schwächungsfunktion werden die geistig-nervalen Belastungen und De-/Eskalatoren in Beanspruchungen umgerechnet. Das geschieht gleichsam durch Aufsummierung/Integration der Belastungen über die Zeit unter Verwendung verschiedener Funktionen für Progression, Degression, Gewöhnung, Entwöhnung und Erholung. Es werden im Modell sechs Beanspruchungsarten verwendet (Abbildung 7). Sie werden aus den integrierten Belas-

tungen durch eine Bewertungsmatrix gebildet, das heißt, die 24 Belastungsarten wirken jede auf alle sechs Beanspruchungen.

Die Einzelbeanspruchungen werden anschließend zur »Globalbeanspruchung geistig-nerval« zusammengefasst. Das geschieht aber nicht durch Addition, sondern durch nichtlineare Überlagerung. Es liegt eine Superheterodynfunktion zugrunde. Die Anwendung dieser Überlagerungsart bewirkt, dass im Falle einer vorherrschenden Beanspruchungsart die weiteren, geringeren Beanspruchungen wesentlich schwächer wirken (weil vielleicht gar nicht wahrgenommen).

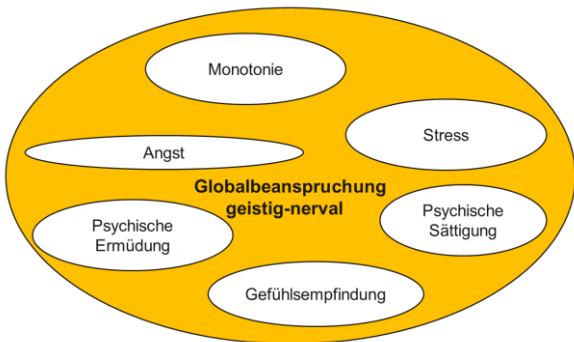


Abbildung 7: Beanspruchungsarten geistig-nerval

Auch für den geistig-nervalen Bereich werden Werkertypen formuliert:

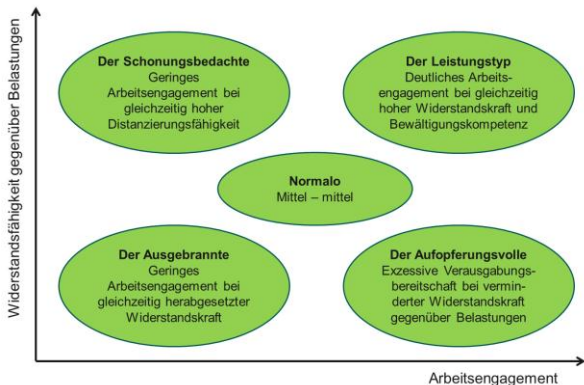


Abbildung 8: Werkertypen geistig-nerval

Die Wirkungsweise der Werkertypeneigenschaften ist eine andere als bei der Physis. Es wird davon ausgegangen, dass die Typen die einzelnen Belastungen unterschiedlich – mehr oder weniger – wahrnehmen. Mittels einer Matrix aus 5 • 24 Faktoren werden die vom Nutzer eingegebenen Belastungswerte umgerechnet.

### 3.3 Globalbeanspruchung und Verhaltensfunktion

Nach dem Superheterodynprinzip werden nun die physisch-energetische Globalbeanspruchung und geistig-nervale Globalbeanspruchung zusammengefasst. Sie

liegt vereinbarungsgemäß zwischen 0 % (normalbeansprucht) und 100 % (handlungsunfähig).

Es gibt für jede Arbeitsverrichtung (aus der Verrichtungsbibliothek, die der Simulation zugrunde liegt) vier Verhaltensfunktionen. Jede einzelne beschreibt das Verhalten des digitalen Arbeiters bei der Verrichtungsausführung. Abbildung 9 zeigt zwei unterschiedliche Arbeitsverrichtungen: oben das genaue Ankörnen einer Bohrung nach Anriss und unten das Einsortieren von Flaschen in ein Supermarktregal. Die Diagramme stellen den Verlauf des in der Simulation verwendeten Parameters über der Globalbeanspruchung dar. Während beim Ankörnen die Geschwindigkeit und Genauigkeit bei Überbeanspruchung schnell abnehmen, ist das beim Flascheneinsortieren aufgrund der einfachen Arbeit erst später der Fall. Dabei nimmt die Genauigkeit (Etikett sauber nach vorn zeigend) schneller ab als die Geschwindigkeit. Fehler beim Ankörnen (Punkt außerhalb der Toleranz) stellen sich alsbald ein, während das Herabfallen der Flasche erst bei erheblicher Beanspruchung wahrscheinlicher wird – zumal die darauffolgenden Unannehmlichkeiten erheblich sind. Die Verweigerung ("Meister ich kann das nicht mehr, ich zittere schon zu sehr!") wird beim Ankörnen wahrscheinlicher sein als beim Flascheneinsortieren – da muss die Angestellte schon sehr "fertig" sein.

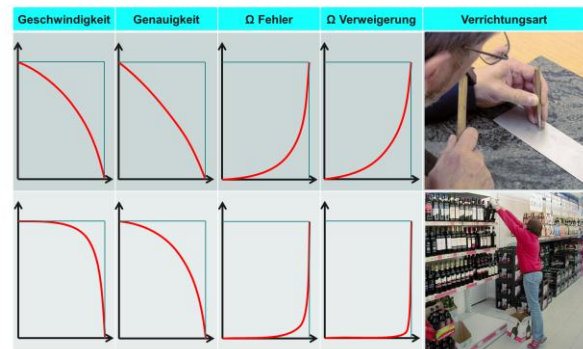


Abbildung 9: Zwei Beispiele für Verhaltensfunktionen

## 4 Das Gesamtmodell

Die Abbildung 10 gibt einen Eindruck von den Verknüpfungen im gesamten Modell.

Die zahlreichen verwendeten Formeln und Wertetabellen können in diesem Beitrag nicht dargestellt werden. Die Formeln sind zum Teil sehr empirisch. Die Zahlenwerte sind indirekt oder durch Schwarmintelligenz ermittelt worden.

Das Modell ist zwar bereits in einem plausiblen Zustand, aber bei weitem noch nicht validiert. Das muss im Weiteren durch intensive Forschungsarbeit geschehen. Ferner gibt es Phänomene, die noch nicht beachtet wurden:

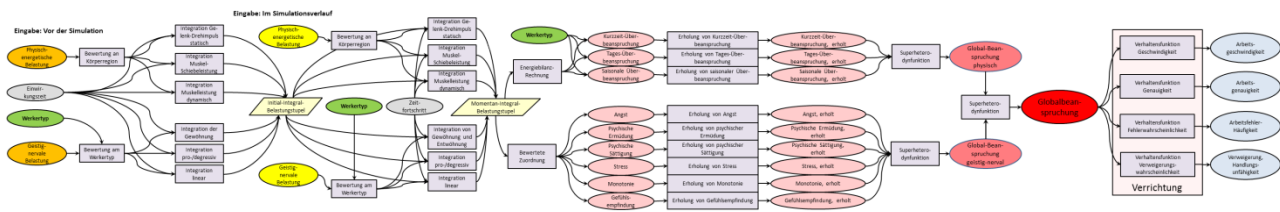


Abbildung 10: Übersicht über das Gesamtmodell

- Lernen und Vergessen,
- Anpassung,
- Physische und psychische Krankheiten,
- Fitnessaufbau und -abbau.

Diese wurden in der gegenwärtigen Entwicklungsphase als vorerst entbehrlich eingestuft und müssen später ergänzt werden. Sie treten außerdem nur bei extremer Langzeitsimulation (über mehrere Wochen) auf, was derzeit noch keine geübte Praxis ist.

## 5 Zusammenfassung

Es ist ein Modell aufgestellt worden, welches auf mechanistische Weise Belastungen, Beanspruchungen und Menschentypen in Zahlen fasst. Ausgangspunkt ist die Tatsache, dass mithilfe kompletter Bewegungsbeschreibungen menschlicher Arbeit über längere Zeit, z. B. eine ganze Arbeitsschicht, die kompletten mechanischen Leistungsdaten für das digitale Menschmodell vorliegen. Diese werden verwendet, um die physisch-energetische Beanspruchung des Menschen digital simulativ abzubilden. Auch für die geistig-nervalen Belastungen und Beanspruchungen wurde das Modell aufgebaut. Ergebnis ist, dass die digital berechnete globale Beanspruchung des Menschmodells in der Simulation auf Arbeitsgeschwindigkeit, Arbeitsgenauigkeit, Fehlerwahrscheinlichkeit und Verweigerungswahrscheinlichkeit wirkt.

Das Modell ist plausibel, aber noch lange nicht validiert. Die Wissenschaft wird aufgefordert, an der Validierung des Modells mitzuwirken.

## 6 Literatur

ALLMER, H.: Erholung und Gesundheit. Grundlagen, Ergebnisse und Maßnahmen. Gräfe Verlag, Göttingen, 1996 [1]

LEHMANN, G.: Praktische Arbeitsphysiologie. 2. Aufl. Georg Thieme-Verlag, Stuttgart, 1962 [2]

MCGRATH, J. E.: Stress and behavior in organizations. In M. D. Dunnette (Hrsg.), Handbook of industrial and organizational psychology (S. 1351-1395). Chicago: McNally, 1976 [3]

Richter, P. & Hacker, W.: Belastung und Beanspruchung: Stress, Ermüdung und Burnout im Arbeitsleben. Roland Asanger Verlag, Heidelberg, 1998 [4]

ROHMERT, W.: Zur Theorie der Erholungspausen bei dynamischer Arbeit. Intern. Zeitschrift. für angewandte Physiologie einschließlich Arbeitsphysiologie 18, 191-212. 1960 [5]

ROHMERT, W.; RUTENFRANZ, J.: Praktische Arbeitsphysiologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1983 [6]

ROHMERT, W.: Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept. Z.Arb.Wiss. 38 (10 NF): 196-200. 1984 [7]

Schlick, Christopher; Bruder, Ralf; Luczak, Holger: Arbeitswissenschaft. Springer-Verlag, Heidelberg, 2010 [8]

SIMONSON, E & HEBESTREIT, H.: Zum Verhalten des Wirkungsgrades bei körperlicher Arbeit. 7. Mitteilung: Zur Physiologie des Energieumsatzes. Pflügers Archiv für die gesamte Physiologie 225, 496-53. 1930 [9]