

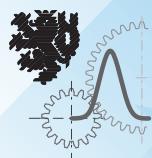
## Reihe 1

Konstruktions-  
technik/  
Maschinen-  
elemente

Nr. 451

Nico Feller, M.Eng.,  
Hürth

## Konzept zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung



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





BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

# Konzept zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

Dissertation zur Erlangung eines Doktorgrades

(Dr.-Ing.)

in der  
Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik

der  
**Bergischen Universität Wuppertal**

vorgelegt von

**Nico Feller**

aus Leverkusen

Wuppertal 2020

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Janoske  
Referent: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Gust  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. André Klußmann  
Beisitzer: Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Antoine Tordeux  
Tag der Disputation: 27. Juli 2020

# Fortschritt-Berichte VDI

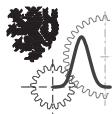
Reihe 1

Konstruktionstechnik/  
Maschinenelemente

Nico Feller, M.Eng.,  
Hürth

Nr. 451

Konzept zur alters- und  
belastungsorientierten  
Entwicklung und  
Bewertung von  
Arbeitssystemen in der  
industriellen Fertigung



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

Feller, Nico

## **Konzept zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 1 Nr. 451. Düsseldorf: VDI Verlag 2021.

220 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen.

ISBN 978-3-18-345101-2 ISSN 0178-949X,

€ 76,00/VDI-Mitgliederpreis € 68,40.

**Für die Dokumentation:** Arbeitssystemgestaltung – Körperliche Fähigkeiten – Alterungsprozesse – Zusammengesetzte Belastungen - Beanspruchungssimulation

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieurinnen und Ingenieure aus dem Bereichen Konstruktion, Produktionsplanung und Simulation. Sie befasst sich mit einem Simulationsmodell für die alters- und belastungsorientierte Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung. Hierbei werden individuelle körperliche Fähigkeiten und altersassoziierte körperliche Veränderungen von Erwerbstäigen berücksichtigt. Das Simulationsmodell ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung von Belastungsverläufen bei hauptsächlich körperlicher Arbeit sowie die Prognose von Beanspruchungsverläufen. Das Simulationsmodell wurde im Rahmen einer Feldstudie in zwei KMU validiert.

### **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).

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit habe ich während meiner Tätigkeit als Projektmanager an der Technischen Hochschule Köln und parallel als externer Doktorand am Lehrstuhl für Konstruktion an der Bergischen Universität verfasst.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Gust von der Bergischen Universität Wuppertal für seine fachliche und persönliche Unterstützung und Gesprächsbereitschaft, sowohl während meiner Forschungstätigkeiten als auch bei der Erstellung dieser Arbeit. Des Weiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Ulf Müller von der Technischen Hochschule Köln für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die Förderung dieser Arbeit.

Herr Prof. Dr.-Ing. habil. André Klußmann danke ich herzlich für das entgegengebrachte Interesse und die kritische Durchsicht dieser Arbeit, sowie für die Übernahme des Korreferats. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske gilt mein Dank für die Bereitschaft den Vorsitz der Prüfungskommission zu übernehmen, sowie Herrn Jun.-Prof. Dr. rer. nat. Antoine Tordeux für den Beisitz in der Kommission.

Nicht zu vergessen ist mein Team an der Technischen Hochschule Köln, das mich auf unterschiedliche Weise motiviert und unterstützt hat. Ganz besonders herzlich möchte ich Martina und Bernd für fachliche Diskussionen und freundschaftlichen Rat danken.

Bedanken möchte ich mich vor allem auch bei meiner Familie und insbesondere bei meiner Frau Manuela. Ihr habt mir immer die notwendige Kraft und den Rückhalt für diese Arbeit gegeben.

*Nico Feller*

---

*für Manuela*

## Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Zielstellung .....	3
1.2 Vorgehen.....	4
<b>2 Wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen.....</b>	<b>6</b>
2.1 Demographischer Wandel: Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit alternder Belegschaften .....	8
2.2 Arbeitnehmer im Wandel der Digitalisierung.....	12
<b>3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung .....</b>	<b>16</b>
3.1 Personalabbildung in der Simulation im Bereich von Produktion und Logistik (Makroperspektive) .....	19
3.2 Ergonomische und digitale Abbildung von Menschen (Mikroperspektive).....	28
3.3 Regelwerk und Methoden für die Gestaltung und Bewertung von Arbeitssystemen.....	34
3.3.1 Regelwerk.....	35
3.3.2 Methoden.....	39
3.4 Handlungsbedarf.....	48

<b>4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme .....</b>	<b>52</b>
<b>4.1 Modellelemente des Simulationssystems.....</b>	<b>55</b>
4.1.1 Attribute zur individuellen Beschreibung von Erwerbstägigen .....	56
4.1.2 Parametrierung der Basiskomponente Arbeitsplatz.....	67
<b>4.2 Beschreibung individueller und altersassozierter physischer Veränderungen .....</b>	<b>82</b>
4.2.1 Geschlecht.....	85
4.2.2 Sauerstoffaufnahme .....	98
4.2.3 Visuelle Veränderungen .....	105
4.2.4 Auditive Veränderungen .....	113
<b>4.3 Berechnungsansatz zur Bestimmung einer ganzheitlichen Arbeitsbelastung .....</b>	<b>119</b>
4.3.1 Ganzheitliche Arbeitsbelastung .....	120
4.3.2 Beanspruchung.....	123
4.3.3 Regeneration .....	127
<b>4.4 Ansatz zur Berücksichtigung außerberuflicher Aktivitäten .....</b>	<b>130</b>
4.4.1 Arbeitszeit und Schichtarbeit .....	132
4.4.2 Freizeit und Ruhephasen.....	138
<b>4.5 SWOT-Analyse des Simulationsmodells.....</b>	<b>140</b>
<b>5 Prototypische Umsetzung des Simulationsmodells als Software-Applikation .....</b>	<b>145</b>
<b>5.1 Systemidee WorkDesigner .....</b>	<b>145</b>
<b>5.2 Ablaufstruktur.....</b>	<b>147</b>
<b>5.3 Erwerbstäige als zentrales Simulationselement .....</b>	<b>153</b>
<b>5.4 Implementierung des Simulators in SWIFT .....</b>	<b>155</b>

5.4.1	Zufällige Generierung von Arbeitstagen – WorkProcessingSheet .....	155
5.4.2	Diskrete Simulation von Tätigkeiten bzw. außerberuflichen Aktivitäten – doSimulation.....	161
<b>5.5</b>	<b>Reflektion des Software-Realisierungsprozesses.....</b>	<b>162</b>
<b>6</b>	<b>Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen.....</b>	<b>165</b>
6.1	Zielsetzung und Methodik der Simulationsstudie .....	165
6.2	Generierung der Datenbasis .....	168
6.2.1	Probanden .....	170
6.2.2	Arbeitsplätze .....	172
6.2.3	Tätigkeitsprofile.....	174
6.3	Simulationsexperimente und Analysen .....	176
6.3.1	Beanspruchung und Auswirkung auf die Testpersonen für ein Jahr betrachtet.....	176
6.3.2	Beanspruchung und Auswirkung auf das Arbeitsergebnis für ein Jahr betrachtet.....	178
6.3.3	Mikroperspektivische Betrachtung von Beanspruchungs-verläufen über eine Woche.....	183
6.3.4	Biorhythmus, Schlafphasen, Resilienz und Stress.....	187
6.4	Fazit der Feldstudie.....	189
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>191</b>
<b>Literatur .....</b>		<b>197</b>

## Zusammenfassung

Die Megatrends „Demographischer Wandel“ und „Digitalisierung“ sind aktuell die größten Treiber wirtschaftlicher, technischer und sozialer Veränderungen und Herausforderungen – aber auch großer Chancen. Während der nächsten zehn Jahre wird der Demographische Wandel in den Industrienationen zu einem weltweiten Fachkräftemangel von mehr als 85 Mio. Erwerbstägigen führen und in Folge dessen global einen wirtschaftlichen Schaden von über \$ 8.450 Mrd. verursachen (vgl. Korn Ferry 2018). Die Digitalisierung hat das Potential diesen Fachkräftemangel um etwa 50 % durch die Substitution von Arbeitsplätzen durch intelligente Computer Systeme und Roboter abzufangen. In Deutschland könnten bspw. im Bereich industriellen Fertigung, bis zum Jahr 2030, voraussichtlich zwei Drittel aller Arbeitsplätze durch intelligente Systeme ersetzt werden (vgl. Dibrani et al. 2018 und PWC 2018). Beide Megatrends werden die Zukunft der Arbeit hinsichtlich Inhalten, Zeitmodellen und der Gestaltung von Arbeitsplätzen formen. Dies führt zu zwei zentralen Fragen: „wird die Belastung der Erwerbstägigen mit der Digitalisierung der Arbeitswelt zunehmen?“ und „wie müssen zukünftige Arbeitssysteme gestaltet sein, um die Leistungsfähigkeit, die Gesundheit und das Wohlbefinden von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu erhalten und zu steigern?“.

Diese Arbeit leistet einen wissenschaftlichen Beitrag zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen. Es werden drei miteinander verknüpfte Forschungsfragen bearbeitet:

- Wie können die individuelle Arbeitsleistungsfähigkeit und altersassoziierte körperliche Veränderungen in einem Simulationsmodell abgebildet werden?
- Wie können zusammengesetzte Arbeitsbelastungen und sukzessive Belastungsverläufe von Erwerbstägigen über mittel- und langfristige Zeiträume simuliert werden?
- Wie kann die Beanspruchung von Erwerbstägigen prognostiziert werden, als Basis für die Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen?

## Abstract

Today, the two megatrends “Demographic Change” and “Digitalization” are the strongest drivers for economical, technical and social changes and challenges – but also for great opportunities. During about the next ten years, the Demographic Change will lead to a dramatic global talent crunch of more than 85 million skilled employees and to an enormous global economic damage of more than \$ 8.450 trillion in the developed countries (see Korn Ferry 2018). The Digitalization has the potential to intercept the global talent crunch by about 50 % due to the substitution of workplaces by intelligent computer systems and robots. Just in the field of the German industrial production and manufacturing, for example, more than two-thirds of all workplaces are expected to be substituted by intelligent systems until the year 2030 (see Dibrani et al. 2018 and PWC 2018). Both megatrends will shape the future of work in the dimensions of work content, organization of working time and workspace design. This leads to the following connected questions: “is the employees’ work stress increasing due to the digitalization of the working world?” and “how do future work systems have to be designed to maintain and to support the employees’ work ability, health and wellbeing?”.

This research work makes a scientific contribution to the age- and stress-based development and assessment of work systems and deals with three joined research questions:

- How can the employees’ individual work ability and their age-related physical changes be mapped within a tool for the design of work systems?
- How can complex work stress compositions and the employees’ successive stress trends be simulated over middle and long-term periods?
- How can the employees’ strain be predicted as a basis for the development and assessment of work systems?



## 1 Einleitung

Die Megatrends „Demographischer Wandel“ und „Digitalisierung“ sind die wohl größten Treiber wirtschaftlicher, technischer und sozialer Veränderungen und Herausforderungen, aber auch Chancen unserer Zeit (vgl. Hackl et al. 2017, S. 11 ff.). Nach einer Studie der Unternehmensberatung Korn Ferry zum globalen Fachkräftemangel, wird der deutschen Wirtschaft, aus dem Mangel an qualifiziertem Personal, bis zum Jahr 2030 in Summe ein Schaden von über 245 Mrd. € entstehen (Korn Ferry 2018); bis zum Jahr 2030 werden in Deutschland etwa 5 Mio. Fachkräfte fehlen (Korn Ferry 2018). Hier ist „die Digitalisierung eine große Chance für deutsche Unternehmen. Der Einsatz neuer Technologien wird den bis [zum Jahr] 2030 erwarteten Arbeitskräfte-Engpass [...] halbieren“ (PWC 2016, S. 2). Diese Arbeit stellt mit dem „Konzept zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung“ einen Beitrag in diesem skizzierten Kontext vor.

Der Demographische Wandel prägt in den Industrienationen vor allem durch die drei zentralen Faktoren Geburtenstatistik, Lebenserwartung und Wanderungssaldo maßgeblich die Größe, das Alter und die Zusammensetzung der Bevölkerung und letztlich auch der Arbeitsbevölkerung (vgl. Hackl et al. 2017, S. 12-13). Insbesondere in der Bundesrepublik Deutschland müssen sich Unternehmen mit den Folgen „[der] Alterung der Gesellschaft und [dem] Rückgang der Erwerbsbevölkerung [...]“ (Hackl et al. 2017, S. 13) massiv auseinandersetzen (s. ergänzend Schlick et al. 2013b, S. 1-5). Bis 2060 ist eine Abnahme der Menschen im Erwerbsalter von etwa 50 auf 34,5 Mio. prognostiziert, mit einem Anteil von 30 % an Erwerbstätigen über 50 Jahren (vgl. Müller et al. 2015b, S. 177 und Statistisches Bundesamt 2015b, S. 19-25). „Aufgrund ihrer altersdifferenzierten physischen und psychischen Fähigkeiten, haben ältere Menschen gegenüber jüngeren sowohl im Alltag, als auch am Arbeitsplatz unterschiedliche Anforderungen an ihre Umwelt und die Interaktion mit technischen Systemen“ (Müller et

## 1 Einleitung

---

al. 2015b, S. 177-178 mit Verweis auf Boot et al. 2012, S. 1444, s. ergänzend Schlick et al. 2013b, S. 4-5).

Die Digitalisierung steht für die globale Vernetzung von Menschen, Produkten, Dienstleistungen und Ressourcen, was sich bspw. im weltweiten Kundenstrukturwandel, einer hohen Wettbewerberagilität und immer neuen softwaregetriebenen Technologien besonders signifikant ausprägt. Kunden überall auf der Welt mit unterschiedlichsten sozio-kulturellen Hintergründen wünschen bzw. fordern Individualprodukte und personalisierte Dienstleistungen (vgl. Gust et al. 2016, S. 3-4). Der Handel von Produkten über das Internet auf allen Ebenen – Business to Business (B2B), Business to Consumer (B2C) und Consumer to Consumer (C2C) – eröffnet auf der ganzen Welt neue Märkte und Partnerschaften. Agile Start-ups und aus dem universitären Umfeld ausgegründete Hightech-Unternehmen beschleunigen im Bereich digitaler Technologieinnovationen immer weiter die Entwicklungszyklen auf wenige Monate oder Wochen bzw. senken die Halbwertzeit von Wissen dramatisch ab (vgl. Gust et al. 2016, S. 3-4). Unternehmen müssen in neue Märkte diversifizieren und ihre Produkte und Geschäftsmodelle umgestalten; zukunftsfähige Produktionssysteme müssen wandlungs-, echtzeit- und netzwerkfähig sein (vgl. Gust et al. 2016, S. 3-4, s. ergänzend Hackl et al. 2017, S. 17-21 und 24-38).

Beide skizzierten Megatrends wirken sich unmittelbar auf die Zukunft der Arbeit aus – wandeln Arbeit inhaltlich, zeitlich und räumlich, verändern sie durch neue Wertevorstellungen, Ansprüche und Fähigkeiten der Bevölkerung (vgl. Hackl et al. 2017, S 24-45). In diesem Kontext ist die Gestaltung von Arbeitssystemen, sowohl die Entwicklung neuer Systeme als auch die Bewertung und ggf. Optimierung bestehender Systeme, von Relevanz: Wie können zukünftig Leistungsfähigkeit, Gesundheit und Wohlbefinden von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern kontinuierlich erhalten bzw. verbessert werden?

## 1.1 Zielstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein alters- und belastungsorientiertes Simulationswerkzeug für die prospektive Gestaltung von Arbeitssystemen zu entwickeln und zu erproben. Neben der Berücksichtigung bzw. Abbildung von individuellen Fähigkeiten und Entwicklungsmöglichkeiten der Erwerbstätigen steht zudem die Einfachheit des Simulationswerkzeugs im Fokus, um eine hohe Anwendbarkeit in der industriellen Praxis, auch für nicht speziell geschulte Anwender, zu gewährleisten.

Zwar fordern aktuelle Gesetze und technische Regelwerke sowohl eine prospektive Gestaltung von Arbeitssystemen als auch eine ganzheitliche Bewertung und Beurteilung von Belastungen am Arbeitsplatz, jedoch zeigt sich in der industriellen Praxis, dass diesen Forderungen oft nur rudimentär nachgekommen wird bzw. nachgekommen werden kann. Wie im weiteren Verlauf der Arbeit ausführlich herausgearbeitet ist (s. Kapitel 3), sind i. d. R. die zu hohe Komplexität, der hohe Kosten-, Zeit-, und Personalaufwand und final eine nicht ausreichende Funktionalität bestehender (Software-)Werkzeuge hierfür verantwortlich.

Wie bereits einleitend angesprochen, rückt durch aktuelle Megatrends wie den Demographischen Wandel und der Digitalisierung die Gestaltung von Arbeitssystemen in den zentralen Fokus gleichermaßen von Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft. So steht für die Bundesrepublik Deutschland das Wissenschaftsjahr 2018 unter dem Thema „Arbeitswelten der Zukunft“ (vgl. Wissenschaftsjahr 2018). Wie flexibel sollte oder muss Arbeit zukünftig in Zeit und Raum sein? (vgl. BMAS 2016b, S. 88 ff., s. ergänzend BMAS 2016a) „Steigt mit der Digitalisierung der Arbeitswelt [...] die [...] Belastung der Beschäftigten?“ (BMAS 2016b, S. 94 ff., s. ergänzend BMAS 2016a)

## 1 Einleitung

---

Die vorliegende Arbeit leistet einen wissenschaftlichen Beitrag explizit zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen. Zur Erreichung der zuvor skizzierten Zielstellung wurden die nachfolgenden Forschungsfragen formuliert:

- Wie können die individuelle physische Arbeitsleistungsfähigkeit und altersassoziierte körperliche Veränderungen von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in einem simulationsbasierten Softwaretool abgebildet werden?
- Wie können zusammengesetzte Belastungen am Arbeitsplatz und sukzessive Belastungsverläufe über mittlere und längere Zeiträume simuliert werden?
- Wie kann die Beanspruchung von Erwerbstägigen als Basis für die Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen prognostiziert werden?

Die Beantwortung dieser Forschungsfragen gliedert sich in einen wissenschaftlichen Kanon aus theoretischer Konzeption (Simulationsmodell), iterativer Implementierung (Software-Applikation) und empirischer Validierung (Feldstudie). Um das Forschungsfeld einzugrenzen, liegt der Fokus auf hauptsächlich körperlicher Arbeit in der industriellen Fertigung; thematisch ist die Arbeit der Arbeitswissenschaft sowie der Simulation zuzuordnen.

## 1.2 Vorgehen

Die vorliegende Arbeit untergliedert sich einschließlich der Einleitung in insgesamt sieben Kapitel. Kapitel 2 ordnet die Arbeit in den aktuellen wirtschaftlichen, technologischen und sozialen Kontext ein; besonders fokussiert werden die beiden Megatrends „Demographischer Wandel“ und „Digitalisierung“ und deren Auswirkungen insbesondere auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU).

Kapitel 3 setzt sich mit der „Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung“ auseinander. Einleitend wird die Thematik kurz in den aktuellen gesetzlichen und regulatorischen Rahmen eingeordnet; im Anschluss erfolgt eine detaillierte Standortbestimmung zur Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen aus den Perspektiven Simulation, Digitale Menschmodelle und Beurteilungsverfahren. Das Kapitel schließt mit einer expliziten Zusammenfassung des Handlungsbedarfs bzw. der Darstellung aktueller Forschungs- und Entwicklungstrends im Bereich der Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen: Humanisierung, Individualisierung, ganzheitliche Betrachtung und Digitalisierung.

Als Antwort auf das identifizierte Handlungsdesiderat wird in Kapitel 4 mit dem Konzept der Software-Applikation „WorkDesigner“ ein „alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme“ präsentiert. Besonders hervorzuhebende Merkmale des Simulationsmodells sind die Abbildung der individuellen Arbeitsleistungsfähigkeit und altersassozierter physischer Veränderungen von Erwerbstägigen, die Simulation ganzheitlicher bzw. zusammen gesetzter Belastungen und Beanspruchungsprognosen über mittel- und langfristige Zeiträume. Bei der dargestellten Beschreibung des Simulationsmodells wurde besonders Wert auf die literaturbasierte wissenschaftliche Absicherung der Eigenschaften der Modellelemente sowie der zugehörigen (Übertragungs-)Funktionen gelegt. Eine SWOT-Analyse (Stärken, Schwächen, Chancen, Gefahren) des Simulationsmodells schließt das Kapitel 4 ab.

Kapitel 5 beschreibt die prototypische Implementierung des Simulationsmodells „WorkDesigner“ als Softwaretool. Der Fokus des Kapitels liegt auf der Beschreibung der Programmstruktur und der elementaren Verhaltensbausteine des Simulationssystems. Da Software-Entwicklungsprojekte praktisch nie ganz abgeschlossen sind, marktübliche Software-Applikationen stets nur einen Moment im Produktlebenszyklus

## 2 Wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen

---

darstellen, ist zum Abschluss des Kapitels 5 der aktuelle Lebenslauf des Simulations-tools „WorkDesigner“ tabellarisch zusammengefasst.

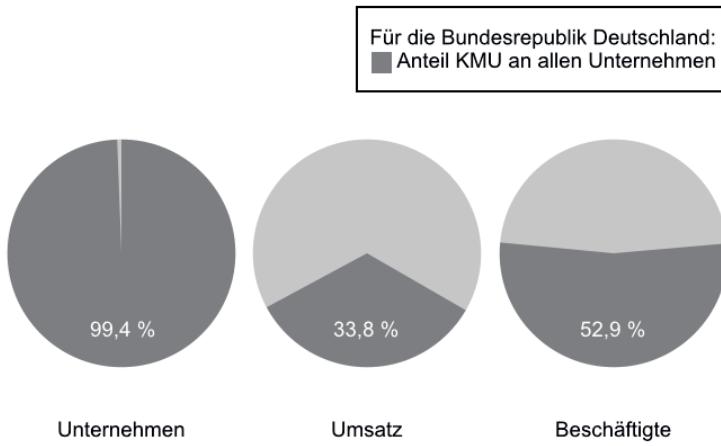
In Kapitel 6 ist die „Feldstudie zur Validierung des Simulationstools in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen“ beschrieben. Konsequenterweise wurde nach Konzeption und Implementierung die Software-Applikation WorkDesigner bei zwei KMU mit Probanden getestet. Zu Beginn des Kapitels sind hinreichende Zielkriterien für die Validität von WorkDesigner auf Basis aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse formuliert; im Anschluss wird die Datenbasis beschrieben und nachfolgend werden die Simulationsergebnisse detailliert analysiert. Ein Fazit zur Machbarkeit respektive Anwendbarkeit des Simulationstools „WorkDesigner“ bildet den Abschluss des Kapitels 6.

Final sind in Kapitel 7 die im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse konkludiert. Zudem sind in einem Ausblick Perspektiven und Potentiale möglicher weiterführender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, ausgehend vom präsentierten „Konzept zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung“, aufgezeigt.

## 2 Wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen

„Die kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) prägen den Wirtschaftsstandort Deutschland. Die Stärke unseres Wirtschaftsmodells beruht nicht auf der Dominanz einzelner Unternehmen, Branchen oder Wirtschaftsregionen – sondern auf der Vielfalt kleiner, mittlerer und großer Unternehmen. Sie sind in den unterschiedlichsten Bereichen spezialisiert, oftmals eng verzahnt und im ganzen Land verteilt.“ (BMWI 2018)

Kleine und mittlere Unternehmen haben einen Anteil von über 99 % an der deutschen Unternehmenslandschaft, erwirtschaften rund ein Drittel des Gesamtumsatzes aller deutschen Unternehmen und stellen bundesweit mehr als die Hälfte aller Arbeitsplätze (vgl. IFM Bonn 2018). Die Informationsgraphik des Instituts für Mittelstandsforschung IFM Bonn (s. Abb. 1) visualisiert ergänzend die Anteile von KMU an der deutschen Unternehmenslandschaft. Die Einordnung von KMU bzgl. Beschäftigte, Jahresumsatz und Jahresbilanzsumme erfolgte gem. KMU-Definition der Europäischen Kommission (vgl. IFM Bonn 2018). Wird die statistische Betrachtung kleiner und mittlerer Unternehmen auf die Europäische Union erweitert, ergibt sich ein vergleichbares und eindeutiges Bild: „99 von 100 Firmen in der EU sind KMU [...] KMU in der EU beschäftigen 2 von 3 Angestellten [...] und produzieren 57 ct von jedem Euro Mehrwert“ (Zitat entnommen aus Informationsgrafik von BMWI 2018).



**Abbildung 1:** Anteil kleiner und mittlerer Unternehmen (KMU) an der deutschen Unternehmenslandschaft für das Jahr 2015 nach der KMU-Abgrenzung der EU-Kommision (< 250 Beschäftigte, Umsatz p.a. < 50 Mio. €, Bilanzsumme p.a. < 43 Mio. €); Replikat einer Informationsgraphik zum Unternehmensbestand des IFM Bonn (2018)

## 2 Wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen

---

Zweifelsohne sind kleine und mittlere Unternehmen von besonderer wirtschaftlicher Relevanz und stehen daher im Fokus der vorliegenden Arbeit.

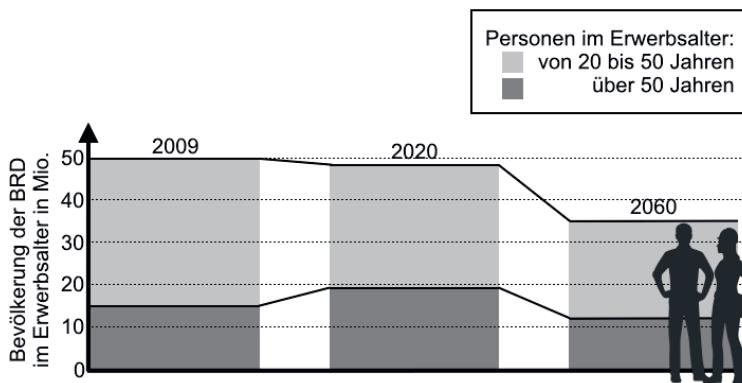
Hinsichtlich der bereits einleitend zu dieser Arbeit skizzierten Megatrends „Demographischer Wandel“ und „Digitalisierung“ „[stehen] mittelständische Unternehmen jedoch vielfach aufgrund ihrer Größe oder ihrer Führungs- und Beschäftigungsstruktur vor besonderen Herausforderungen“ (BMW1 2016, S. 4). Beispielsweise ist ein sehr großer Anteil von KMU familiengeführt, wobei „[...] immer mehr Unternehmer [...] das Ruhestandsalter [erreichen und] [...] immer weniger potenzielle Nachfolger [nachwachsen]“ (BMW1 2016, S. 4). Auch ist die Mehrheit von KMU dem Lohnfertigungssektor zuzuordnen, was i. d. R. häufig wechselnde Produktionsprozesse, hohen Wettbewerbsdruck und limitierte Ressourcen impliziert (vgl. Müller et al. 2015a, S. 2).

In den nachfolgenden Unterkapiteln 2.1 und 2.2 sind die beiden Megatrends „Demographischer Wandel“ und „Digitalisierung“ jeweils detailliert betrachtet; abschließend ist jeweils in diesem Kontext der aktuelle Bedarf an einem simulationsbasierten Werkzeug für die alters- und belastungsorientierte Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung resümiert.

### 2.1 Demographischer Wandel: Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit alternder Belegschaften

Wie in Abbildung 2 sehr gut ersichtlich ist, wird die Bevölkerung Deutschlands im Erwerbsalter mittelfristig zunächst altern und ab etwa 2030 (vgl. Hackl et al. 2017, S. 13) zudem signifikant schrumpfen.

## 2 Wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen



**Abbildung 2:** Entwicklungsprognose der deutschen Bevölkerung im Erwerbsalter bis in das Jahr 2060 auf Basis der „13. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung“ (Statistisches Bundesamt 2015b)

Walch und Günthner (2010) weisen bereits 2010 darauf hin, dass „dabei [...] von einem Wandel bereits keine Rede mehr sein [kann], eher nur von einer Verschärfung der momentanen Situation, da sich die Gesellschaft und Arbeitswelt bereits mitten im demographischen Wandel befindet“ (S. 7). Wie bereits im Kapitel zuvor kurz angesprochen, ist das Zusammenwirken der Faktoren Geburtenstatistik, Lebenserwartung und Wanderungssaldo als Ursache für den Demographischen Wandel zu nennen (vgl. Hackl et al. 2017, S. 12-13, Schlick et al. 2013, S. 2-4, Walch und Günthner 2010, S. 7-10).

Die Geburtenstatistik hat etwa in den 1980er Jahren den kritischen und für einen konstanten Erhalt der Bevölkerung notwendigen Geburtenkennwert von > 2,0 Kindern pro Frau unterschritten. Seit etwa 1990 bringt jede Frau in Deutschland lediglich rund 1,4 Kinder zur Welt (vgl. Hackl et al. 2017, S. 12, Schlick et al. 2013, S. 3 oder Walch und Günthner 2010, S. 7).

## 2 Wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen

---

Parallel steigt die Lebenserwartung von Männern und Frauen seit über 50 Jahren kontinuierlich an (vgl. Schlick et al. 2013, S. 3-4 und Walch und Günthner 2010, S. 7). „Gleichzeitig wird die deutsche Bevölkerung im Alter zunehmend gesünder und leistungsfähiger“ (Hackl et al. 2017, S. 12).

Der Wanderungssaldo, d. h. die Verrechnung von Auswanderungen mit dem Zuzug von Migranten, war in den vergangenen Jahren deutlichen Schwankungen unterworfen. Nach heutigem Stand werden Zuzüge nach Deutschland den Demographischen Wandel ggf. abmildern, aber auf gar keinen Fall umkehren können (vgl. Hackl et al. 2017, S. 13 und Walch und Günthner 2010, S. 7-8).

*„Die Alterung der Gesellschaft und der Rückgang der Erwerbsbevölkerung haben für die Unternehmen zur Folge, dass die Menge geeigneter Bewerber sinkt. Gleichzeitig steigt der Bedarf an qualifizierten Arbeitskräften und entsprechend die Nachfrage auf dem Arbeitsmarkt. [...] Der Demographische Wandel bringt jedoch nicht nur einen Fachkräftemangel als große Herausforderung für Wirtschaft und Unternehmen mit sich. Auch der Umgang mit den Generationen [...] muss berücksichtigt werden.“ (Hackl et al. 2017, S. 13)*

Wie bereits einleitend zu Kapitel 1 mit einem Zitat von Müller et al. (2015b) und mit Verweis auf Boot et al. (2012) sowie Schlick et al. (2013) angeführt, haben ältere Menschen sowohl im Alltag als auch bei der Arbeit andere Anforderungen an ihre Umwelt und die Interaktion mit technischen Systemen als ihre Mitmenschen bzw. Kolleginnen und Kollegen. Wie im späteren Verlauf dieser Arbeit (s. Unterkapitel 4.1.1) noch detailliert beschrieben ist, nimmt die Leistungsfähigkeit von Menschen etwa ab dem 30. Lebensjahr konsequent ab. Es ist wichtig hervorzuheben, dass es sich hierbei nicht um einen Abbau bzw. Verfall körperlicher und geistiger Funktionen handelt, sondern vielmehr um einen altersbedingten Wandel von Fähigkeiten im Alter (vgl. Schlick et al.

2010, S. 120-122). Besonders hervorzuheben sind u. a. altersassoziierte Veränderungen des visuellen und auditiven Systems. Beispielsweise ist mit dem biologischen Altern der Augen bereits ab den 30er Lebensjahren eine signifikante Sehleistungsminde rung (erhöhter Lichtbedarf, erhöhte Blendempfindlichkeit, verminderte Sehschärfe) verbunden; das biologische Altern des Gehörs zeigt sich etwa ab dem 30. Lebensjahr merklich durch eine Abnahme der Hörfähigkeit (vgl. Schlick et al. 2010, S. 122 ff.). Altersassoziierte physische Veränderungen werden ebenfalls im späteren Verlauf dieser Arbeit (Unterkapitel 4.2) umfassend dargestellt.

Während noch vor einigen wenigen Jahren im Rahmen des Megatrends „Demographischer Wandel“ vor allem die Berücksichtigung altersgewandelter Fähigkeiten und Bedürfnisse von Menschen 50 plus im Fokus der Produktentwicklung und Arbeitsgestaltung standen, liegt heute – maßgeblich motiviert durch den Fachkräftemangel – der Fokus auf der Erhaltung und Steigerung der individuellen Leistungsfähigkeit, der Gesundheit und des Wohlbefindens jeder Mitarbeiterin und jedes Mitarbeiters während des gesamten Berufslebens (s. ergänzend Schlick et al. 2013, S. 5). Dieser Perspektivenwechsel wird im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit (s. Unterkapitel 3.1) nochmals detaillierter betrachtet.

Im Rahmen dieses Unterkapitels ist es wichtig abschließend festzuhalten, dass vor allem im Zuge des Demographischen Wandels die sinnvolle Gestaltung von Arbeit mehr denn je Kenntnisse über die individuellen Fähigkeiten der Erwerbstätigen und über die Belastungen und Beanspruchungen resultierend aus Arbeitsequipment, Arbeitsumfeld und Arbeitsaufgabe beinhaltet (vgl. Schlick et al. 2013, S. 5). Vor allem in der betrieblichen Ebene besteht jedoch i. d. R. noch ein großes Desiderat bei der Einführung und Umsetzung einer prospektiven Arbeitssystemgestaltung (vgl. Pieper und Gebhardt 2016, S. 125).

## 2 Wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen

---

### 2.2 Arbeitnehmer im Wandel der Digitalisierung

Etwa seit acht Jahren findet getrieben durch internetbasierte bzw. -fähige Soft- und Hardwareinnovationen die vierte industrielle Revolution (auch Informationsrevolution), d. h. die Digitalisierung und globale Vernetzung von Produktionssystemen, Produkten und Anwendern, statt (vgl. Hackl et al. 2017, S. 27 und Gust et al. 2016, S. 3-4). Seit ca. 2011 fasst das in politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussionen beliebte und bereits inflationär verwendete Schlagwort „Industrie 4.0“ diesen disruptiven, soziotechnischen Wandel zusammen (vgl. Hackl et al. 2017, S. 24-26).

Lediglich der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle noch kurz das Schlagwort „Industrie 4.0“ bzw. die Bezeichnung „vierte industrielle Revolution“ kontextualisiert; in diversen wissenschaftlichen Disziplinen finden sich hierzu bereits eine breite Fülle an Publikationen. In der retrospektiven Betrachtung der internationalen industriellen Entwicklung haben sich während der letzten Jahrhunderte drei disruptive Revolutionen ereignet.

Gegen Ende des 18. Jahrhunderts prägt die Erfindung der Dampfmaschine die erste industrielle Revolution. Von Menschen ausgeführte Tätigkeiten werden zum ersten Mal in der Historie durch mechanische Produktionsanlagen ergänzt oder ggf. sogar ersetzt; ein prominentes Beispiel ist der erste mechanische Webstuhl 1784. Neue Industriezweige entstehen und Fabriken prägen die Gestaltung von Arbeit (vgl. Hackl et al. 2017, S. 26).

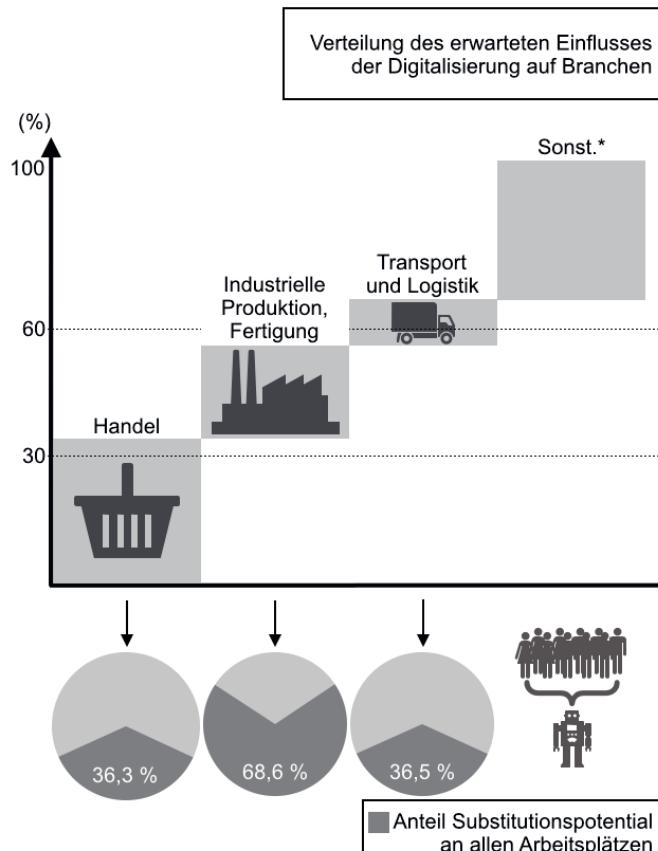
Ende des 19. Jahrhunderts wird mit der Einführung des Fließbands und dem Einsatz elektrischer Energie – hier sind als Vorreiter die Automobilindustrie und die Nahrungsmittelindustrie zu nennen – die zweite industrielle Revolution (sog. Energierevolution) eingeleitet. Diese technischen Innovationen ermöglichen Ende des 19. bzw. Anfang

des 20. Jahrhunderts eine völlig neue Art der Produktion von Gütern: die sog. Massenproduktion (vgl. Hackl et al. 2017, S. 26).

Die dritte industrielle Revolution (sog. digitale Revolution) ereignete sich ab etwa den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts. Der Einsatz von Elektronik und Informationstechnologien führte zu einer weiteren Automatisierung der Produktion, bei der erstmals nicht nur Tätigkeiten, sondern auch kognitive Aufgaben von Maschinen okkupiert wurden. Ein wichtiges Beispiel ist hier die erste speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) für Maschinen und Anlagen im Jahr 1969 (vgl. Hackl et al. 2017, S. 26). Letztlich ist damals wie heute jeder disruptive Wandel stets multidimensional, d. h. technisch, gesellschaftlich und strukturell.

Die Digitalisierung führt aktuell zu einer Umstrukturierung von Arbeit: mehr Wissensarbeit, weniger körperliche Arbeit. „[...] Routinearbeiten und körperlich belastende Tätigkeiten [werden in Zukunft] abnehmen und durch digitale Lösungen ersetzt [wobei] [...] die Auswirkungen der Digitalisierung auf Branchen und Berufe stark [variieren] [...]“ (Hackl et al. 2017, S. 19). Nach einer Studie von PWC (2016) zum „[...] Einfluss der Digitalisierung auf die Arbeitskräftesituation in Deutschland [...] bis zum Jahr 2030“ werden vor allem der Handel, die industrielle Produktion und Transport und Logistik bspw. deutlich weniger Arbeitskräfte nachfragen (vgl. S. 55). Abbildung 3 zeigt ein Pareto-Diagramm zum prognostizierten Einfluss der Digitalisierung auf unterschiedliche Branchen in Deutschland. Deutlich zu erkennen ist, dass die Auswirkungen der Digitalisierung zu rund zwei Dritteln in den drei zuvor genannten Branchen spürbar werden.

## 2 Wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen



**Abbildung 3:** Prognostizierter Einfluss der Digitalisierung auf Branchen in Deutschland und Zuordnung des Substitutionspotentials basierend auf PWC (2016) und Dibrani et al. (2018)

Dibrani et al. (2018) gehen in ihrer literaturbasierten Studie zu den „Beschäftigungseffekte[n] der Digitalisierung in Deutschland und NRW“ bewusst provokant der Frage nach: „Geht uns die Arbeit aus?“. Ihre Untersuchung zum Substitutionspotential von Berufen und Tätigkeiten, d. h. zur Wahrscheinlichkeit mit der bereits heute oder in Zukunft ein Computer oder eine intelligente Maschine einen Arbeitsplatz übernehmen könnte oder wird, kommt dabei zu einem ähnlichen Ergebnis (vgl. Dibrani et al. 2018, S. 1-2): vor allem gefährdet sind Berufe in der industriellen Fertigung (s. Abb. 3). Besonders im Bereich der Fertigung eilt die Wandlung von Arbeit und Berufen bereits heute den theoretischen Einsatzmöglichkeiten neuer Technologien hinterher (vgl. Dibrani et al. 2018, S. 5-7).

Pieper und Gebhardt (2016) weisen im Kontext „Industrie 4.0“ darauf hin, dass „[...] die Folgen für die Arbeitsbedingungen und damit auch die Folgen für Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit [offenbleiben]“ (S. 125). Sie führen weiter aus, dass „dies [...] die Arbeitszeitgestaltung, die Arbeitssystemgestaltung in Bezug auf Bewertung von Arbeitsbelastungen [und] die Folgen für die physische und psychische Gesundheit [...] [betrifft]“ (S. 125). Bzgl. der Arbeitsgestaltung im Rahmen der Digitalisierung fordern Pieper und Gebhardt (2016) explizit eine „[...] menschengerechte Gestaltung, unter Berücksichtigung der Diskussion um den ‚Fachkräftemangel‘ bzw. die ‚Fachkräftesicherung‘ und den ‚Demographischen Wandel‘“ (S. 125). Hierfür bedarf es ihrer Meinung nach „[...] geeigneter Gestaltungskonzepte und praktikabler Gestaltungsinstrumente für die betriebliche Ebene“ (S. 125).

Die vorliegende Arbeit kommt dem skizzierten Innovationsbedarf an Werkzeugen zur Arbeitssystemgestaltung nach und berücksichtigt hierbei besonders die Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen in der industriellen Fertigung.

### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

Um dieses Kapitel inhaltlich und strukturell optimal erfassen zu können, muss einleitend auf die enge Verflechtung von Gesetzen und Regelwerken im Rahmen der deutschen Gesetzgebung eingegangen werden. Ganz überwiegend sind deutsche Gesetze abstrahierend-generalisierend verfasst, d. h., an Stelle konkreter Beispiele treten abstrakt-generelle Begriffe, wodurch eine unbestimmte Vielzahl an Anwendungsfällen erfasst wird (vgl. Köhler 2011, S. XIV). Normen, Richtlinien und (technische) Regeln bilden das für die konkrete Umsetzung der Gesetze notwendige kasuistische bzw. anwendungsspezifische Regelwerk.

Die Arbeitswissenschaft definiert Arbeitssysteme als Interaktion von Erwerbstätigen und Arbeitsmitteln mit einer bestimmten Aufgabe bzw. Arbeitsinhalt unter Beeinflussung durch die physikalische und soziale Umwelt am Arbeitsplatz (bspw. Bullinger 1994, S. 2, Spath et al. 2012, S. 1651 oder DIN EN ISO 6385:2016, S. 7). Bei der Entwicklung neuer und der Bewertung bestehender Arbeitssysteme ist „[...] das Gesamtwissen auf dem Gebiet der Ergonomie [zu] berücksichtig[en] [...]“ (DIN EN ISO 6385:2016, S. 5) und besonders „[...] die Rolle des Arbeitenden innerhalb dieser Systeme zu beachten [...]“ (S. 5).

Die Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen ist juristisch flankiert durch:

- das „Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG)“, insbesondere zweiter Abschnitt „Pflichten des Arbeitgebers“ (vgl. ArbSchG 2015),
- die „Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV)“, insbesondere §§3, 3a und 4 (vgl. ArbStättV 2017),

- das Arbeitszeitgesetz (ArbZG) u. a. zur Definition der Rahmenbedingungen für Arbeitszeitmodelle (vgl. ArbZG 2016).

Explizit verweisen das ArbSchG (2015, §4 Abs. 1) und die ArbStättV 2017 (§2 Abs. 11) auf die Einhaltung des Stands von Technik, Arbeitsmedizin, Hygiene und sonstigen gesicherten arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen. Unter Berücksichtigung der Fokussierung auf Arbeitssysteme in der industriellen Fertigung und hauptsächlich körperliche Arbeit sind dementsprechend u. a. die nachfolgenden nationalen und größtenteils internationalen Normen und technischen Regeln besonders zu beachten:

- DIN EN ISO 6385 „Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen“,
- DIN EN 16710-2 „Verfahren der Ergonomie – Teil 2: Eine Methode für die Arbeitsanalyse zur Unterstützung von Entwicklung und Design“,
- Normenreihe der DIN EN 1005 zur „Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung“,
- Normenreihe der DIN EN 614 zur „Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze“,
- DIN EN ISO 14738 „Sicherheit von Maschinen – Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen“,
- DIN EN ISO 12100 „Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze“,
- DIN EN ISO 26800 „Ergonomie – Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte“ und
- die Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR).

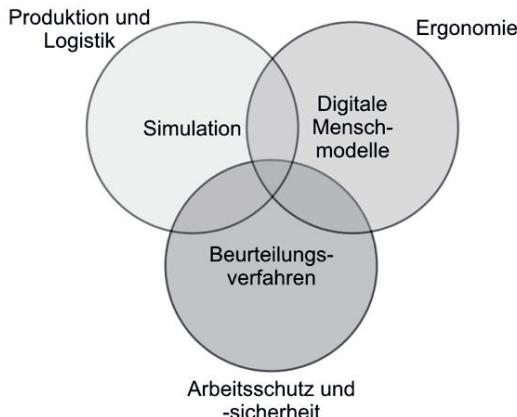
Das skizzierte gesetzliche und regulatorische Feld kann auf den Nukleus reduziert werden, dass die (ergonomische) Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen auf der Berücksichtigung bzw. Einhaltung von Gestaltungskriterien basiert, „[...] [welche] durch die physiologischen Leistungen und psychologischen Bedingungen des

### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

---

Menschen sowie dessen Abmessungen bestimmt werden“ (Schlick et al. 2010, S. 949). Ergänzend sei an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass Wechselwirkungen „[...] zwischen [...] Personen und den Bestandteilen des Arbeitssystems, wie den Arbeitsaufgaben, den Arbeitsmitteln, dem Arbeitsraum und der Arbeitsumgebung [...]“ (DIN EN ISO 6385:2016, S. 10) sowie kontextuelle, inter- und intraindividuelle Variabilitätsquellen wie bspw. Alter, Geschlecht, Chronobiologie oder Zeiteinteilung integraler Bestandteil bei der Gestaltung von Arbeitssystemen sind (vgl. DIN EN 16710-2:2016, S. 8).

Ein zentrales Werkzeug für die Gestaltung von Arbeitssystemen ist die Analyse von Arbeitsaktivitäten u. a. durch den Einsatz von Beobachtungs- bzw. Beurteilungsverfahren, digitalen Modellen und/oder Simulation. Wie in Abbildung 4 dargestellt, werden für die Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung je nach Fragestellung respektive technisch-wissenschaftlicher Domäne (Produktion und Logistik, Ergonomie, Arbeitsschutz und -sicherheit) unterschiedliche Analysewerkzeuge präferiert. Simulation, Digitale Menschmodelle und Beurteilungsverfahren grenzen sich dabei nicht exklusiv voneinander ab – sehr häufig sind Analysewerkzeuge in Schnittmengen der Domänen zu lokalisieren (vgl. ASR V3 2017, Mühlstedt 2016, Zülch 2016, DIN EN ISO 6385:2016, DIN EN 16710-2:2016, VDI 4499 Bl. 4:2015, Zülch 2010 und VDI 3633 Bl. 6:2001).



**Abbildung 4:** Schnittmenge der Disziplinen Simulation, Digitale Menschmodelle und Beurteilungsverfahren hinsichtlich der Gestaltung von Arbeitssystemen

In den nachfolgenden Unterkapiteln 3.1, 3.2 und 3.3 werden die Rechercheergebnisse zum technisch-wissenschaftlichen Standort der Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung domänenspezifisch vorgestellt. Abschließend wird in Unterkapitel 3.4 der aktuelle Handlungsbedarf konkludiert.

### 3.1 Personalabbildung in der Simulation im Bereich von Produktion und Logistik (Makroperspektive)

Wie bereits zuvor in Abbildung 4 dargestellt, wird die Simulation vor allem bei Fragestellungen im Rahmen der Planung, der Realisierung und des Betriebs von Produktions- und Logistiksystemen eingesetzt (vgl. VDI 3633 Bl. 1:2014, S. 4-6). Nach der VDI

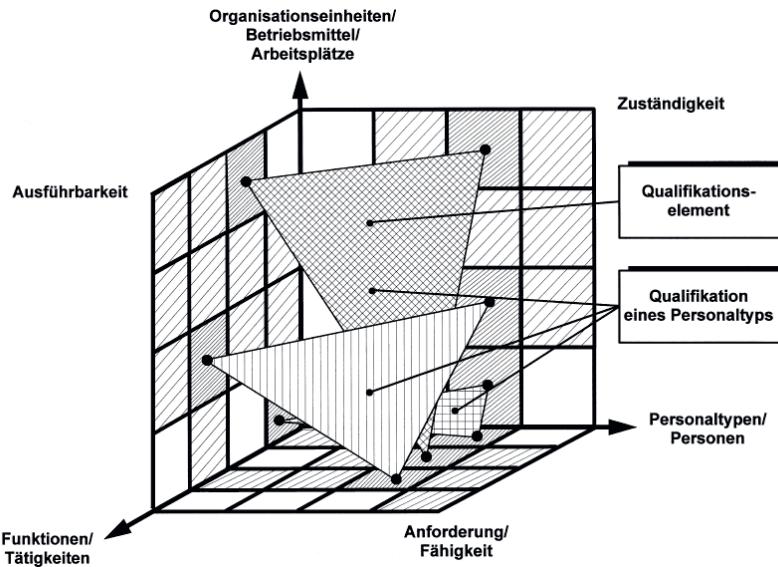
### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

---

3633 Bl. 1:2014 ist die Simulation definiert als das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind [...]“ (S. 3). Die Simulation ermöglicht insbesondere die zeitdiskrete Analyse komplexer technischer, real nicht existenter Systeme bzw. real existierender Systeme ohne direkten Eingriff und über lange Zeiträume (vgl. VDI 3633 Bl. 1:2014, S. 5-6). Hierbei ist die Abbildung respektive Berücksichtigung von Personal eine (eigenständige) Disziplin der Simulation.

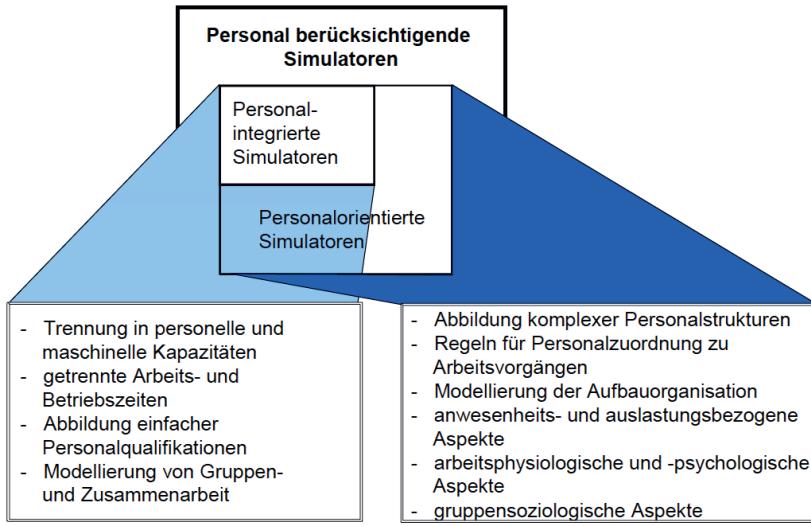
Zülch (2010) resümiert ausgehend von der von Baines et al. (2004) aufgeworfenen Suggestivfrage „[h]umans: the missing link in manufacturing simulation?“ die chronologische Entwicklung der „Einbeziehung des Personals in produktionslogistische Simulationsverfahren“ (S. 1) ab den frühen Anfängen in den 1980er Jahren. Unter anderem verweist Zülch (2010) auf die Ursprünge der Personal berücksichtigenden Simulation im Bereich der Ermittlung von Verrichtungszeiten (Betrieb, Rüsten, Warten etc.) bei der simultanen Bedienung mehrerer NC-Maschinen durch eine Arbeitsperson (vgl. S. 2). Einen weiteren wichtigen Schritt bei der Abbildung von Personal in der Simulation stellen ca. Anfang bzw. Mitte der 1990er Jahre die „Mehr-Ressourcen-Verfahren“ dar, bei welchen „[...] Maschinen und Personen als eigenständige Simulationselemente modelliert werden [und] [...] sich alle maschinellen und personellen Vorgänge in separater Form zeitlich bewerten [lassen]“ (Zülch 2010, S. 3); entscheidend hierbei ist die detaillierte Beschreibung notwendiger Relationen zwischen Arbeitsplätzen bzw. Maschinen, Personen und auszuführenden Funktionen bzw. Tätigkeiten. Abbildung 5 zeigt ein Beispiel für die Modellierung von Personalqualifikationen.

Im Jahr 2001 wird mit der Veröffentlichung der VDI 3633 Bl. 6 „Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simulationsmodellen“ erstmals der Stand der Technik im Bereich der personalberücksichtigenden Simulation definiert. Das VDI-Richtlinienblatt ist bis heute gültig.



**Abbildung 5:** Beispiel für die Modellierung von Personalqualifikationen; Darstellung nach Zülich und Heel (1997) entnommen aus VDI 3633 Bl. 6:2001 (S. 8), auch zu finden bei Zülich (2010, S. 5)

Im Rahmen dieser Richtlinie wird differenziert zwischen personalintegrierter und -orientierter Simulation. Während die personalintegrierte Simulation lediglich das Personal bei der Modellierung von Produktionssystemen als Ressource berücksichtigt, besitzt die personalorientierte Simulation darüber hinaus einen deutlich höheren Detailierungsgrad bei der Abbildung von Personal zur Analyse personalbezogener Fragestellungen wie bspw. Belastungs-, Beanspruchungs- und Erholungsverläufe, Unter- und Überforderung oder Rückwirkungen der Arbeitssituation auf die Produktivität (vgl. VDI 3633 Bl. 6:2001 S. 2 ff. und Zülich 2010, S. 6 ff.). Wesentliche Merkmale zur Unterscheidung von personalintegrierter und -orientierter Simulation sind in Abbildung 6 zusammengefasst.



**Abbildung 6:** Unterteilung Personal berücksichtigender Simulatoren; Darstellung entnommen aus Zülch 2010 basierend auf VDI 3633 Bl. 6:2001 (S. 2)

Hinsichtlich des Fokus dieser Arbeit auf die alters- und belastungsorientierte Simulation von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung, d. h. auf arbeitsphysiologische Aspekte im Rahmen der personalorientierten Simulation, ist insbesondere die Arbeit von Gebhardt (1994) „Grundlagen eines rechnergestützten arbeitswissenschaftlichen Prognose- und Informationssystems“ anzuführen. Gebhardt (1994) weist zunächst darauf hin, dass bei der Bewertung und vor allem der Prognose von Belastungen bzw. Belastungsfolgen „[...] die Auswirkungen vorausgegangener Belastungen, Ermüdung oder Erschöpfung [...] [und [...] [der] Einfluss der physischen Leistungsfähigkeit [...]“ (S. 119) zu berücksichtigen sind. Erstmals präsentiert Gebhardt (1994) zudem ein Simulationsmodell, welches die Belastungsintensität basierend auf der Arbeitspulsfrequenz, die Belastungsdauer mehrstündiger Arbeitsabläufe, die physische Leistungs-

fähigkeit in drei Stufen (schwach, mittel, hoch) und die Historie vorausgegangener Belastungen integriert (vgl. S. 112 ff.). Lorenz et al. (1996) führen diese Arbeit mit der „Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Belastung des Menschen und des Einflusses manueller Tätigkeiten im innerbetrieblichen Materialfluss“ fort. Beide Arbeiten haben maßgeblich den in der VDI 3633 Bl. 6:2001 (S. 16-17) zusammengefassten Stand der Technik mitgeprägt. Abbildung 7 zeigt nachfolgend ein entsprechendes Beispiel für Ergebnisdaten zur physischen Belastung eines Mitarbeiters über einen mehrstündigen Arbeitszeitraum.



**Abbildung 7:** Beispiel für Ergebnisdaten zur physischen Belastung eines Mitarbeiters mit Bezug zu Aufenthaltsorten, ausgeführten Tätigkeiten, Arbeitsenergieumsatz und Beanspruchungsverlauf; Darstellung entnommen aus VDI 3633 Bl. 6:2001 (S. 17) und ist Arbeiten von Gebhardt und Lorenz et al. am ASER zuzuordnen

Auch ist an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die angeführten Arbeiten u. a. in die Entwicklung des Softwaretools BAB/BDS (Beurteilung arbeitsbedingter Belastungen/Belastungs-Dokumentations-System) eingeflossen sind. Das in Kooperation vom Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie e.V. (ASER) und der GEWITEB mbH entwickelte BAB/BDS-System wird in Unterkapitel 3.3 näher besprochen.

#### ***Entwicklungstrend***

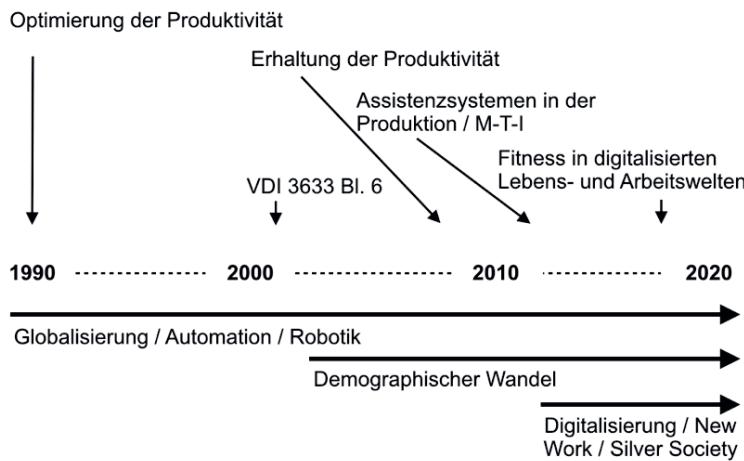
Abbildung 8 visualisiert die Wandlung des Fokus von Fragestellungen im Bereich der personalorientierten Simulation zwischen den Jahren 1990 und 2020. Oberhalb des Zeitstrahls sind die übergeordneten Themengebiete zeitlich grob eingeordnet. Unterhalb des Zeitstrahls sind die relevanten technischen, wirtschaftlichen und sozialen Megatrends zugeordnet, welche maßgeblich den Wandel der Fragestellungen beeinflusst bzw. initiiert haben.

Maßgeblich motiviert durch die Megatrends Globalisierung, Automation und Robotik befassten sich Fragestellungen im Bereich der Simulation in den 1990er Jahren nahezu ausschließlich mit dem „[...] zentralen Erfolgsfaktor [innovativer Unternehmen]: Optimierung von Produktivität und Logistik“ (Gangl 1994, S. 2). Toussaint (1994) weist darauf hin, dass „[...] das Personal einer der wichtigsten Erfolgsfaktoren einer Unternehmung ist [und] [...] es bisher in der Fertigungssimulation häufig nicht oder nur hinsichtlich einzelner Untersuchungsziele berücksichtigt [wird]“ (S. 553). Toussaint (1994) stellt zudem prägnant beschrieben personalbezogene Untersuchungsziele in der Fertigungssimulation vor, wie bspw.:

- die „Ermittlung fertigungstechnischer Größen“ (S. 553; Auslastung, Durchlaufzeit, Bestände etc.) bzgl. (noch) „[...] nicht vollkommen automatisierter Fertigungsprozesse [...]“ (S. 553),

- die „Ermittlung des Personalbedarfs und des Personaleinsatzes“ (S. 553) hinsichtlich Anzahl, Qualifikation und Auslastung der Mitarbeiter sowie Absicherung von Produktivität und Termintreue,
- die Gestaltung von Arbeitszeitmodellen unter besonderer Berücksichtigung von „[...] Auswirkungen auf die Betriebsmittelnutzungszeit, die Durchlaufzeiten und die Kosten und [ggf.] entstehende Engpässe [...]“ (S. 554).

Resümee für die 1990er Jahre ist, dass die Simulation bei der Analyse personalbezogener Fragestellungen, wie zuvor einleitend beschrieben, bereits in einigen Fällen eingesetzt wurde, wobei der Fokus der Simulationsuntersuchungen auf der Automatisierung von Produktionssystemen und der Rationalisierung von Personal lag.



**Abbildung 8:** Grobe zeitliche Einordnung dominierender Fragestellungen im Bereich der personalorientierten Simulation und Zuordnung prägender Megatrends zwischen 1990 und 2020

Bedingt durch den Megatrend „Demographischer Wandel“, verlagerte sich in den 2000er Jahren der Fokus personalbezogener Fragestellungen in der Simulation hin zum Verhalten bzw. der Erhaltung der Produktivität bei alternden Belegschaften und der Gestaltung alters- und altersrobuster Arbeitssysteme, vor allem in Produktion und Logistik. Beispielsweise haben Baines et al. (2004) den Einfluss der altersbedingten Abnahme der Leistungsfähigkeit von Erwerbstägigen simuliert und die Auswirkungen auf die Verrichtungszeiten in der Montage der Ford Motor Company in England analysiert. Ein weiteres Beispiel sind die von Zülch und Waldherr (2010) publizierten Forschungsergebnisse einer Simulationsstudie „[...] zur altersrobusten Planung eines Montagesystems“ (S. 219) in der Pkw-Komponentenmontage. Der von Zülch und Waldherr (2010) verwendete Simulator berücksichtigte ebenfalls altersabhängige physische Leistungsveränderungen der Erwerbstägigen und bezog die resultierende Arbeitsbelastung bei der Analyse von Montagesystemen mit ein.

*„Bei der altersrobusten Planung besteht die Zielstellung darin, ein Montagesystem so zu gestalten, dass es während seiner Nutzungsdauer nicht mehr angepasst werden muss, sondern ohne Veränderung eine gleichbleibende Mengenleistung aufweist“* (Zülch und Waldherr 2010, S. 227).

In den Folgejahren wurden u. a. von Zülch et al. (2013) weitere Simulationsuntersuchungen zu den Auswirkungen alternder Belegschaften auf die Produktivität von Montagesystemen durchgeführt (s. ergänzend Schlick et al. 2013a). Für die Dekade der Jahre von 2000 bis 2010 kann konkludiert werden, dass der Fokus personalorientierter Simulationsuntersuchungen im Verhältnis zum vorherigen Jahrzehnt deutlich menschzentrierter geworden ist: Erhaltung der Produktivität durch belastungsorientierte Personalplanung (d. h. präventive Gestaltung von Arbeitssystemen).

### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

---

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle auch auf Fragestellungen im Bereich von Assistenzsystemen in der Produktion zur Arbeitserleichterung hingewiesen. Hierbei bilden vor allem mit Menschen kollaborierende Robotersysteme einen wesentlichen Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt. Da hier jedoch mehrheitlich die Fragestellungen in die Bereiche (Arbeits-)Psychologie, Informatik, Automatisierung und Robotik einzuordnen sind, wird an dieser Stelle nicht weiter darauf eingegangen.

Seit etwa 2010 und vor allem aktuell prägen die Megatrends „Digitalisierung“, „New Work“ und „Silver Society“ signifikant den Fokus von Fragestellungen im Bereich der personalorientierten Simulation. Innovative Informations- und Kommunikationstechnologien eröffnen u. a. durch die globale Vernetzung von Menschen, Produkten, Dienstleistungen und Ressourcen auch für die personalorientierte Simulation neue Herausforderungen und Perspektiven (vgl. Gust et al. 2016, s. ergänzend Stowasser 2016). Der gesellschaftliche „[...] Wandel von der Industrie- zur Wissensgesellschaft [...] verändert[...] Unternehmensstrukturen und Arbeitsräume [...]“ (Zukunftsinstut 2018a) und durch die weltweit steigende Lebenserwartung gesellt sich zum Älterwerden das „Downaging“, „[...] das Heraustreten aus traditionellen Altersrollen derer, die man einst als ‚Senioren‘ bezeichnete“ (Zukunftsinstut 2018b).

Wie nachfolgend näher spezifiziert, fokussieren aktuelle und zukunftsorientierte Fragestellungen die individuelle Erhaltung und Steigerung des Wohlbefindens und der Gesundheit von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern (d. h. prospektive Gestaltung von Arbeitssystemen) und verbinden innovative Technologien zu neuartigen Lösungstools.

Beispielsweise werden optische Sensorsysteme, innovative Applikationen in der Bildverarbeitung und im Data Management, ergonomische Bewertungsverfahren und Simulationstools zu hybriden Softwaresystemen verknüpft für automatisierte ergonomische Analysen und individuelle belastungsorientierte Personalplanung (vgl. Brandl et al. 2016 und Brandl und Hellig 2016). Ein weiteres Beispiel im zuvor skizzierten Kontext ist das hybride Simulationstool EMMA-CC (Ergo-dynamic Moving Manikin with Cognitive Control), das in Kooperation der Fraunhofer Institute ITWM, IGD, IPK, IAO

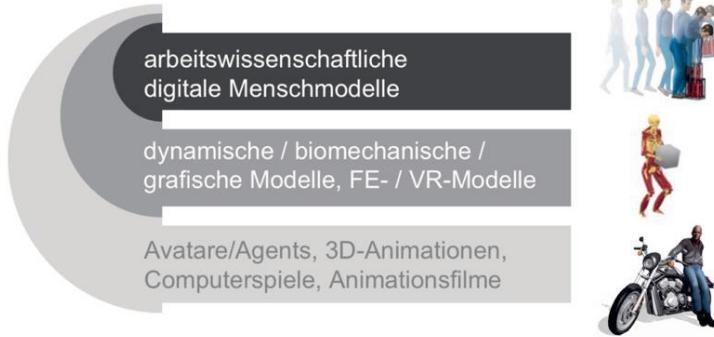
und IPA entwickelt wird; EMMA-CC verbindet Digitale Menschmodelle, Virtual Reality, kognitive Steuerungsmodelle und Ergonomiebewertung in einem Simulationstool (vgl. EMMA-CC 2018 und Dangelmaier und Theissen 2017). Das Softwaretool ermöglicht u. a. die ergonomische Analyse individueller körperlicher und kognitiver Arbeitsbelastungen und simuliert parallel die Auswirkungen der Tätigkeiten auf die körperliche Fitness. Dieser Aspekt ist besonders im Rahmen der aufgezeigten aktuellen Megatrends von hoher Relevanz, da zunehmend Bewegungsmangel zu Einschränkungen von Wohlbefinden und Gesundheit führt (vgl. Dangelmaier und Theiss 2017).

## 3.2 Ergonomische und digitale Abbildung von Menschen (Mikroperspektive)

Digitale Menschmodelle sind ein zentrales Werkzeug der Digitalen Fabrik. In der Regel sind digitale Menschmodelle als „[...] dreidimensionale, modellhafte Abbilder der Realität“ (Mühlstedt et al. 2009, S. 5) bzw. als hoch detaillierte Modelle „[...] geometrischer und weiterer Eigenschaften und Fähigkeiten des Menschen [...]“ (Mühlstedt 2016a, S. 73) Teil von computerunterstützten Entwicklungssystemen. Sie werden neben medizinischen Trainingsszenarien und militärischen Simulationen hauptsächlich bei Fragestellungen im Bereich der Ergonomie hinsichtlich Ausführbarkeit, Erträglichkeit und/oder Zumutbarkeit während des Produkt- und Produktionsentstehungsprozesses eingesetzt. Der Schwerpunkt liegt hierbei in der ergonomischen, arbeitsmethodischen und zeitwirtschaftlichen Produktionsplanung und Gestaltung der Fabrik, bspw. der Montage- und Fertigungsprozessplanung oder der Planung von Fertigungsanlagen (vgl. Mühlstedt 2016a, VDI 4499 Bl. 4:2015, Jochems 2012, Spanner-Ulmer und Mühlstedt 2010 und Mühlstedt et al. 2009; s. ergänzend Richtlinienreihe VDI 4499 „Digitale Fabrik“).

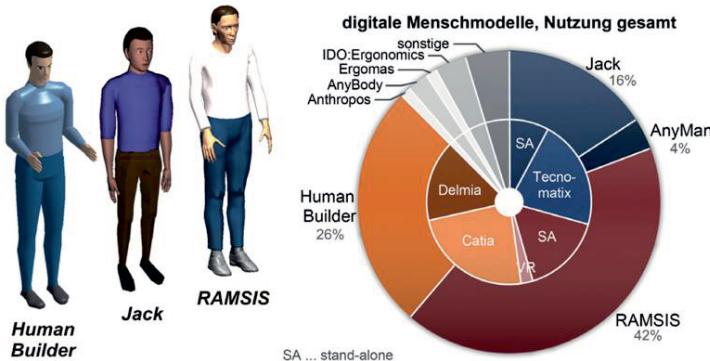
Die in diesem Unterkapitel betrachtete ergonomische und digitale „[...] Abbildung des Menschen grenzt sich von der personalintegrierten und -orientierten Simulation ab [...]“ (VDI 4499 Bl. 4:2015, S. 3; s. 3.1). Im Gegensatz zur Simulation ermöglichen digitale Menschmodelle zwar graphisch hochdetaillierte, realitätsnahe Analysen von Arbeitssystemen, insbesondere der Interaktion von Menschen und Technik, jedoch lediglich „[...] im Bereich von einigen Sekunden bis zu wenigen Minuten [...]“ (VDI 4499 Bl. 4:2015, S. 3).

Etwa seit den 1960er Jahren wurde eine Vielzahl an Menschmodellen entwickelt; die ersten Ansätze gehen hierbei auf die Digitalisierung von zweidimensionalen anthropometrischen Zeichenschablonen zurück (vgl. VDI 4499 Bl. 4:2015, S. 12-14 und Mühlstedt et al. 2009, S. 5-6). Wie in Abbildung 9 dargestellt, werden drei Arten von digitalen Menschmodellen unterschieden: arbeitswissenschaftliche bzw. ergonomische Menschmodelle, arbeitswissenschaftlich nutzbare Modelle und weitere z. T. nicht arbeitswissenschaftlich nutzbare Modelle. „Während [arbeitswissenschaftliche bzw. ergonomische] Menschmodelle sich vorrangig mit der Modellierung und Simulation von Körpermaßen und Haltungen [bei der Gestaltung von Produkten und Arbeitsplätzen] beschäftigen, ist der Schwerpunkt [arbeitswissenschaftlich nutzbarer, bspw.] biomechanischer [oder anatomischer] Modelle auf die Modellierung und Analyse des zeitveränderlichen, dynamischen Verhaltens des menschlichen Bewegungsapparats gelegt“ (Jochems 2012, S. 5). Biomechanische Menschmodelle werden u. a. in den Gebieten Prothetik, Rehabilitation oder (Leistungs-)Sport eingesetzt. Die dritte Art von digitalen Menschmodellen sog. Avatare sind „[...] menschenähnliche Repräsentanten [...], dreidimensionale Animationen [...] in Computerspielen (z. B. „Die Sims“) oder in Filmen (z. B. basierend auf „Final Fantasy“)“ (VDI 4499 Bl. 4:2015, S. 14).



**Abbildung 9:** Unterschiedliche Arten von digitalen Menschmodellen in Anlehnung an VDI 4499 Bl. 4:2015 (S. 13). Kategorisierung (links) und Beispiele (rechts) jeweils entnommen aus Mühlstedt (2016a, S. 80, 95, 104, 157) und zusammengeführt; Beispiele: Human Builder (oben), Any Body (Mitte), Santos (unten). Eine vergleichbare Unterteilung von Arten Digitaler Menschmodelle findet sich bei Jochems (2012, S. 5-6)

Abbildung 10 zeigt nachfolgend die Ergebnisse einer empirischen Studie von Spanner-Ulmer und Mühlstedt (2010) zur Verbreitung digitaler Menschmodelle in der Praxis.



**Abbildung 10:** Verbreitung digitaler Menschmodelle in der Praxis auf Basis einer von der Professur Arbeitswissenschaft der TU Chemnitz in Deutschland durchgeföhrten empirischen Studie. Darstellung entnommen aus Spanner-Ulmer und Mühlstedt (2010, S. 70); s. ergänzend Mühlstedt et al. (2009, S. 7 ff.)

Mit einem Gesamtanteil von 84 % („Jack“ 16 %, RAMSIS 42 %, „Human Builder“ 26 %) sind arbeitswissenschaftliche Menschmodelle am stärksten verbreitet. Sie werden in der Industrie i. d. R. ausschließlich von Spezialisten (Konstrukteuren, Planern und Entwicklern) mit mehrjähriger Berufserfahrung genutzt (vgl. Spanner-Ulmer und Mühlstedt 2010, S. 70-72, s. ergänzend Spitzhirn und Bullinger-Hoffmann 2016).

Das Menschmodell „Human Builder“ ist implementiert in die CAD-Entwicklungsumgebung Catia von Dassault Systems mit dem Schwerpunkt auf Untersuchungen zur Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Human Builder ermöglicht u. a. Haltungsanalysen, Bewegungs-, Ergonomie- und Handhabungsuntersuchungen und die Simulation von Arbeitsprozessen zur Kontrolle ergonomischer, gesundheits- und sicherheitstechnischer Aspekte (vgl. Mühlstedt 2016a, S. 75-76 und 78, Jochems 2012, S. 6 und Mühlstedt et al. 2009, S. 7-8).

### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

---

„Jack“ ist ein biometrisch akkurate Menschmodell und Teil des PLM-Systems Tecnomatix von Siemens; „er“ ist speziell abgestimmt auf Anwendungen bzw. Aufgabenstellungen der Digitalen Fabrik. Hauptanwendungsgebiet sind Analysen von Arbeitssequenzen und -abläufen, von Arbeitsplätzen, Taktzeiten und ergonomischen Bedingungen. „Jill“ ist das weibliche Pendant mit identischer Funktionalität und entsprechend geschlechtsspezifischer Anthropometrie (vgl. Mühlstedt 2016a, S. 76 und 78, Jochems 2012, S. 6 und Mühlstedt et al. 2009, S. 8-9).

RAMSIS (Rechnergestütztes Anthropologisch-Mathematisches System zur Insassen-Simulation) wurde primär als Stand-alone-System unter der Federführung der TU München entwickelt. RAMSIS ist besonders geeignet für ergonomische Untersuchungen von Cockpits und Fahrzeuginnenräumen, bspw. Analysen bzgl. Komfortempfinden, Körperhaltung, Sichtfeld oder der Erreichbarkeit von Elementen (vgl. Mühlstedt 2016a, S. 77-78, Jochems 2012, S. 6 und Mühlstedt et al. 2009, S. 9-10).

An dieser Stelle muss auch auf die Schwächen Digitaler Menschmodelle hingewiesen werden. Sowohl aus der Perspektive von Anwendern (Konstruktion und Produktionsplanung) als auch aus der Sicht von Experten (Wissenschaft und Entwicklung) sind die Systeme meist zu zeitintensiv in der Anwendung, erfordern oft ein umfangreiches ergonomisches Hintergrundwissen bzw. eine ausführliche Schulung und stellen z. T. nur bedingt befriedigende Analysefunktionen zur Verfügung (vgl. Spitzhirn und Bullinger-Hoffmann 2016, Mühlstedt 2016a, S. 74-75, VDI 4499 Bl. 4:2015, S. 8-9 und Spanner-Ulmer und Mühlstedt 2010, S. 69-70).

Ergänzend finden sich detaillierte Beschreibungen von insgesamt 90 verschiedenen, hauptsächlich aktuellen und auch historischen, arbeitswissenschaftlichen Digitalen Menschmodellen und umfangreiche Übersichten zu den weiteren unterschiedlichen Arten Digitaler Menschmodelle bei Mühlstedt (2016a).

#### ***Aktuelle Entwicklungstrends***

Im Bereich der Digitalen Menschmodelle sind drei aktuelle Entwicklungstrends zu identifizieren. Zum einen ist die Berücksichtigung bzw. Systemintegration altersassozierter Veränderungen vor allem körperlicher Fähigkeiten wie bspw. der Beweglichkeit hinsichtlich einer altersgerechten Gestaltung von Arbeitssystemen zu nennen (vgl. Spitzhirn und Bullinger 2017, Mühlstedt 2016b, S. 216 ff. und Jochems 2012). Zum anderen ist die Prognose von Belastungen und ggf. Beanspruchungen und deren sukzessiver Verläufe durch mehrere simultan wirkende Umgebungseinflüsse wie bspw. Klima oder Lärm anzuführen (vgl. Mühlstedt 2016b, S. 220 ff., Spitzhirn und Bullinger-Hoffmann 2016, S. 236-237, Zülch 2016, S. 251-252, VDI 4499 Bl. 4:2015, S. 8 und Zülch 2013, S. 59-60). Etwa Mitte 2019 soll diesbezüglich die Richtlinienreihe VDI 4499 um Blatt 5 „Digitale Fabrik – Prognose von Umgebungseinflüssen auf den arbeitenden Menschen“ erweitert werden. Als drittes ist die Integration psychischer Arbeitsbelastungen in Digitale Menschmodelle zu erwähnen (vgl. Mühlstedt 2016b, S. 219, Zülch 2016, S. 252). Zu Recht jedoch spricht Mühlstedt (2016b) diesbezüglich von einer Vision bzw. von einem „[gänzlich neue[n] Feld [...] Verfahren [der Psychologie] in Menschmodelle zu integrieren [...]“ (S. 219); Zülch (2016) verweist diesbezüglich auf die Anfang 2018 offiziell veröffentlichte Normenreihe der DIN EN ISO 10075 „Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastungen“ und hebt explizit den Bedarf an „[...] allgemein gültigen und quantifizierbaren Bewertungsmodellen [...], die sich in Softwarewerkzeuge der Digitalen Fabrik integrieren lassen“ (S. 252) hervor.

### **3.3 Regelwerk und Methoden für die Gestaltung und Bewertung von Arbeitssystemen**

Wie einleitend zu Kapitel 3 dargestellt, ist die Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung durch Gesetze, Normen und technische Regeln umfassend reguliert. Für die konkrete Anwendung bzw. die Umsetzung in der betrieblichen Praxis steht eine breite Palette an Methoden zur Verfügung.

Regelwerk und Methoden differenzieren zwischen der Bewertung und der Beurteilung von Arbeitssystemen. Die Bewertung ist die „Zuordnung eines quantitativen Werts zu einem Kriterium oder Merkmal“ (VDI 4499 Bl. 4:2015, S. 11); bspw. die messtechnische Erfassung von Lärm (dB(A)) am Arbeitsplatz und die entsprechende Einordnung der Messwerte in i. d. R.  $\geq$  drei Belastungs- bzw. Gefährdungszonen (sog. Ampelschema; vgl. DIN EN 614-1:2009 Anhang A und Schlick et al. 2010, S. 1134 ff., s. ergänzend Abb. 14 Schema zur vereinfachten Bewertung von Lärm am Arbeitsplatz). Die darauf aufbauende Beurteilung ist die „Zumessung eines qualitativen Werturteils zu einem Kriterium oder Merkmal [...]“ (VDI 4499 BL. 4:2015, S. 11), d. h. die kontextuelle Interpretation der zuvor aufgenommenen Kennwerte u. a. hinsichtlich Sicherheit, Gesundheit und/oder Komfort.

In den beiden nachfolgenden Unterkapitel werden mit besonderem Fokus auf hauptsächlich körperliche Arbeit in der industriellen Fertigung das wesentliche Regelwerk und die in der Praxis wichtigsten Methoden vorgestellt.

### 3.3.1 Regelwerk

#### **ASR V3 „Technische Regeln für Arbeitsstätten – Gefährdungsbeurteilung“**

Die ASR V3 (2017) gibt „[...] den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse für das Einrichten und Betreiben von Arbeitsstätten wieder“ (S. 1) und konkretisiert explizit die Anforderungen an eine Gefährdungsbeurteilung und die entsprechende Vorgehensweise gem. ArbSchG und ArbStättV. Kern der ASR V3 (2017) ist die abstrakt-generalisierte Beschreibung von Prozessschritten der Gefährdungsbeurteilung: Vorbereiten, Ermitteln von Gefährdungen, Beurteilen der Gefährdungen, Festlegen von Maßnahmen, Umsetzen der Maßnahmen, Überprüfen der Wirksamkeit, Dokumentieren und Fortschreiben (vgl. S. 6 ff.). Unter anderem ist detailliert das Ermitteln (vgl. ASR V3 2017, S. 7-8) und das Beurteilen (ASR V3 2017, S. 8-11) von Gefährdungen beschrieben, mit Verweis auf entsprechende Methoden, Kennwert, etc.

Die ASR V3 (2017) stellt für fachkundige Anwender wie „[...] betriebliche Führungskräfte oder die Fachkraft für Arbeitssicherheit oder die Betriebsärztin oder [den] -betriebsarzt [...]“ (S. 4) lediglich eine umfangreiche Beschreibung respektive theoretische Grundlage für die Bewertung und Beurteilung von Arbeitsstätten dar und ist kein unmittelbar anwendbares Werkzeug.

#### **DIN EN 614 „Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze“**

Ebenso wie die zuvor beschriebene ASR V3, beinhaltet auch die Normenreihe DIN EN 614 für den Fachkundigen kein unmittelbar anwendbares Werkzeug für die Bewertung

### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

---

von Arbeitssystemen, jedoch legt die europäische Norm wesentliche ergonomische Grundsätze und Verfahren für die Gestaltung von Maschinen und Arbeitsaufgaben fest, insbesondere hinsichtlich einer ergonomischen Mensch-Maschinen-Interaktion (vgl. DIN EN 614-1:2009, S. 5 und DIN EN 614-2:2008, S. 5).

Hierbei fokussiert die DIN EN 614-1 „Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze“ zum einen die „[...] Berücksichtigung der Unterschiede in den individuellen Merkmalen [der] Bedienpersonen [...]“ (2009, S. 8) wie „[...] Körpermaße [...], Körperhaltung [...], Körperbewegungen [...], Körperkraft [...], psychische Fähigkeiten [...]“ (S. 8) und Auswirkungen der Arbeitsumgebung auf die Bedienperson (vgl. S. 9). Zum anderen werden „ergonomische Aufgabenstellungen, die im Gestaltungsprozess von Maschinen durchzuführen sind“ (DIN EN 614-1:2009, S. 16 ff.), beschrieben und ein „3-Zonen-Bewertungssystem“ als „[...] Methode zur Bewertung ergonomischer Risiken“ (S. 20 ff.) vorgestellt.

Der Schwerpunkt der DIN EN 614-2 „Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 2 [liegt auf den] Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung von Maschinen und den Arbeitsaufgaben“ (2008). Unter anderem wird ein „Vorgehen bei der Aufgabengestaltung“ (DIN EN 614-2:2008, S. 9 ff.) vorgestellt und „[...] Hinweise für die Gestaltung von Arbeitstätigkeiten im Zusammenhang mit der Gestaltung von Maschinen [...]“ (S. 16 ff.) gegeben.

#### ***DIN EN 1005 „Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung“***

Im Gegensatz zum bereits vorgestellten Regelwerk, gibt die Normenreihe DIN EN 1005 dem fachkundigen Anwender für unterschiedliche Aspekte vorrangig körperlicher Arbeit in der industriellen Fertigung konkrete Werkzeuge an die Hand:

- DIN EN 1005-1 „Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 1: Begriffe“,
- DIN EN 1005-2 „Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 2: Manuelle Handhabung von Gegenständen in Verbindung mit Maschinen und Maschinenteilen“,
- DIN EN 1005-3 „Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 3: Empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung“,
- DIN EN 1005-4 „Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 4: Bewertung von Körperhaltungen und Bewegungen bei der Arbeit an Maschinen“,
- DIN EN 1005-5 „Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 5: Risikobeurteilung für kurzyklische Tätigkeiten bei hohen Handhabungsfrequenzen“.

Bezüglich der Schwerpunkte bzw. Anwendungsbereiche sind die jeweiligen Titel der Normenreihenteile selbsterklärend.

Die DIN EN 1005-2:2009 beschreibt ein unmittelbar anwendbares Verfahren zur Beurteilung (3-Zonen-Risikobeurteilung) von Massen von Gegenständen bei der Handhabung und unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anwendungsbereiche (privat, beruflich), Anwenderpopulationen (Männer, Frauen, Kinder, ältere Personen) sowie Art, Dauer und Häufigkeit einer Tätigkeit.

Die DIN EN 1005-3:2009 definiert ein direkt nutzbares Verfahren zur Beurteilung von menschlichen körperlichen Kräften bei der Interaktion beziehungsweise der Bedienung von Maschinen. Das Verfahren berücksichtigt ebenfalls unterschiedliche Anwenderpopulationen und Anwendungsbereiche sowie die Bewegungs-geschwindigkeit, die Betätigungszeit und -frequenz und die kumulierte Dauer vergleichbarer Tätigkeiten (s. ergänzend Abb. 22 Schema zur vereinfachten Bewertung der Arbeitsintensität und

Schlick et al. 2010, S. 254). Die z. T. benötigten populations- und ausführungsspezifischen Kraftkennwerte sind ergänzend bspw. der DIN 33411 „Körperkräfte des Menschen“ zu entnehmen.

Ein Verfahren zur Beurteilung gesundheitlicher Risiken infolge von „[...] Körperhaltungen und Bewegungen bei der Arbeit an Maschinen“ ist in der DIN EN 1005-4:2009 dargestellt. Im Fokus des Verfahrens steht eine auf Winkelzonen basierende Bewertung von Körperhaltungen (Neigung, Verdrehung). Im Rahmen der Bewertung wird zudem differenziert zwischen statischen Haltungen und niedrig- und hochfrequenten Bewegungen.

Die DIN EN 1005-5:2007 präsentiert ein konkret anwendbares Verfahren zur Beurteilung „[...] von muskulo-skeletalen Erkrankungen der oberen Gliedmaßen [...], die aus dem Ausüben kurzyklischer Tätigkeiten entstehen“ (S. 10). Neben einer detaillierten und diskreten Beschreibung der Tätigkeit fokussiert das Verfahren insbesondere die Haltung von Oberkörper, Armen und Händen (Handgelenkwinkel und Greifarten).

#### ***DIN 33411 „Körperkräfte des Menschen“***

Anders als das bereits beschriebene Regelwerk, stellen die einzelnen Teile der Normenreihe DIN 33411 kein(e) Verfahren vor. Die Teile der Normenreihe sind jeweils empirisch ermittelte, wissenschaftlich gesicherte Datensammlungen der „Körperkräfte des Menschen“ für unterschiedliche Anwenderpopulationen und Körperstellungen. Sie werden bei der Anwendung von Bewertungsverfahren wie bspw. nach DIN EN 1005-3 (s. o.) oder bei der Entwicklung bzw. Konstruktion von Maschinen und Arbeitsplätzen berücksichtigt (vgl. Schlick et al. 2010, S. 253-254, s. ergänzend DIN 33411-1:1982, DIN 33411-4:1987 und DIN 33411-5:1999).

### 3.3.2 Methoden

Wie bereits einleitend zu diesem Kapitel beschrieben, stellt das juristische und technische Regelwerk zur Gestaltung von Arbeitssystemen explizit ergonomische Analysen zu Gefährdungen und Risiken am Arbeitsplatz vor, was schnell einsetzbare und robuste Bewertungsmethoden erforderlich macht. In den letzten Jahrzehnten wurde daher eine Vielzahl an praxisorientierten Bewertungswerkzeugen entwickelt, die sich vor allem durch eine kurze Einstufungsdauer von Belastungen und eine nachvollziehbare Ergebnisdarstellung in der betrieblichen Praxis bewährt haben (vgl. Schlick et al. 2010, S. 1134 ff.). Caffier et al. (1999) weisen in diesem Kontext darauf hin, dass „[...] bei der routinemäßigen Anwendung von Belastungs-, Beanspruchungs- und medizinischen Untersuchungen [lediglich] eine begrenzte Anwenderqualifikation bei geringem Zeiteinsatz vorauszusetzen [ist]“ (S. 18).

Generell wird bei der Bewertung bzw. Beurteilung differenziert zwischen Belastungen und Beanspruchungen. Diese Unterscheidung basiert auf dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (s. DIN EN ISO 26800:2011, S. 13-15), das „[...] den Zusammenhang zwischen absoluten, wiederholt messbaren, objektbezogenen Belastungen und konkreten subjektbezogenen Beanspruchungen eines Menschen, die von [dessen] individuellen Eigenschaften abhäng[en]“ (Mühlstedt 2016c, S. 30), beschreibt.

Verfahren bzw. Methoden zur Beanspruchungsermittlung sind stets auf ein Individuum bezogen und werden unterteilt in objektive und subjektive Verfahren. Objektive Verfahren basieren auf der Messung physiologischer Größen wie bspw. „[...] Herzfrequenz und Arrhythmie via Elektrokardiografie (EKG), elektrische Muskelaktivität via Elektromyografie (EMG) [oder] Augenbewegung und Netzhautpotenziale via Elektrookulografie (EOG)“ (Mühlstedt 2016c, S. 35). Sie sind i. d. R. sehr aufwendig, technisch und wissenschaftlich anspruchsvoll und für den praktischen Einsatz in der in-

dustriellen Fertigung ungeeignet. Subjektive Verfahren hingegen basieren auf Befragungen von Personen und sind meist „[...] sehr schnell und unkompliziert in ihrer Anwendung“ (Mühlstedt 2016c, S. 36). Jedoch stellen Methoden zur Beanspruchungsermittlung nur eine ungefähre Abschätzung bzw. „[...] Prüfung auf mögliche Überlastung“ (Schlick et al. 2010, S. 951) dar.

Belastungsbewertungsverfahren bzw. -methoden basieren entweder auf der Bewertung einzelner Parameter von Anwenderpopulationen, wie bspw. Körperhaltungen und -bewegungen, Körperkräften, Kräfteverhältnissen in der Wirbelsäule, Lastenhandhabung oder Energieumsatz, oder der Kombination mehrerer oder aller Parameter (vgl. Mühlstedt 2016c, S. 32-34). Diese ergonomischen Belastungsbewertungsmethoden sind vor allem in der Praxis bei „[...] Unternehmen der Automobil- und Zulieferindustrie [...] aber auch in der Metall- und Elektroindustrie [...]“ (Schlick et al. 2010, S. 1135) von sehr großer Bedeutung; eine detaillierte Übersicht der Verfahren bzw. Methoden findet sich bei Mühlstedt (2016b, S. 190 ff.). Die ursprünglich als „Pen&Paper“-Werkzeuge entwickelten Methoden sind heute zum größten Teil als Analysefunktionen in Digitale Menschmodelle integriert. Nachfolgend werden ausgewählte Methoden mit besonderem Bezug zur vorliegenden Arbeit exemplarisch vorgestellt.

#### ***Leitmerkmalmethode – Die praxisorientierte „Pen&Paper Screening“- Methode***

Die Leitmerkmalmethode ist wohl die in der betrieblichen Praxis am häufigsten angewendete Methode zur Bewertung von Arbeitssystemen bzw. zur Beurteilung von Risiken und Gefährdungen am Arbeitsplatz. Caffier et al. (1999, S. 22) beschreiben bzgl. der Entwicklung der Leitmerkmalmethode in den 1990er Jahren zunächst eine große Diskrepanz hinsichtlich der Anwendbarkeit und Verbreitung von praxisorientierten und wissenschaftlich-orientierten Werkzeugen zur Belastungsbewertung. Um die Kluft zwi-

schen Wissenschaft und Praxis zu schließen und den Bedarf nach einer schnell einsetzbaren, robusten und möglichst einheitlichen Methode zu bedienen, wurde Ende der 1990er Jahre unter maßgeblicher Führung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), auf Basis einer umfangreichen Standortbestimmung bekannter Bewertungsmethoden und -verfahren, die Leitmerkmalmethode als Werkzeug für die betriebliche Routinearbeit entwickelt (vgl. Caffier et al. 1999, S. 22-23).

Die Leitmerkmalmethode basiert auf der Bewertung der Lastenhandhabung bzw. der aus der Ausführung der Arbeitsaufgabe „[...] zu erwartenden mechanischen Belastung der Wirbelsäule“ (Schlick et al. 2010, S. 951) anhand der Merkmale Lastgewicht, Zeitdauer, Körperhaltung und Ausführungsbedingungen (vgl. Schlick et al. 2010, S. 952). Im Anschluss an die Einschätzung der Leitmerkmale wird ein Risikowert zur Beurteilung der Gesundheitsgefährdung errechnet.

Das Methodeninventar der Leitmerkmalmethode wird kontinuierlich weiterentwickelt; aktuell stehen Formblätter für die Beurteilung der Belastungsarten „Heben, Halten und Tragen“, „Ziehen und Schieben“ und „manuelle Arbeitsprozesse“ zur Verfügung (vgl. BAuA 2018a). Nachfolgend zeigt Abbildung 11 exemplarisch die Formblätter zur Beurteilung von „Heben, Halten und Tragen“.

### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

Beurteilung von Heben, Tragen, Halten anhand von Leitmerkmalen						Version 2001																																																												
Die Gesamtbewertung ist auf 10 Tafelblättern zu gliedern. Jede Tafelblatt mit einzelnen körperlichen Belastungen ist genauer zu beurteilen.																																																																		
Arbeitsplatz/Tätigkeiten:																																																																		
1. Schritt: Bestimmung der Zeitwichtung (Nur eine schreitende Spalte ist auszufüllen)																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Hebe- oder Unterstützzeit (&lt; 5 s)</th> <th colspan="2">Halten</th> <th colspan="2">Tragen</th> <th rowspan="2">Ausführungsbedingungen</th> <th rowspan="2">Aus-wichtung</th> </tr> <tr> <th>Zeit- wichtung</th> <th>Gesamtdauer am Arbeitstag</th> <th>Zeit- wichtung</th> <th>Gesamtdauer am Arbeitstag</th> <th>Zeit- wichtung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 10</td> <td>1</td> <td>&lt; 5 min</td> <td>1</td> <td>&lt; 300 min</td> <td>1</td> <td>Gute ergonomische Bedingungen, z.B. ausreichend Platz, keine Hindernisse im Arbeitsbereich, ebener nutzbarer Boden, ausreichend beleuchtet, geringe Greifbelastungen</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>10 bis &lt; 40</td> <td>2</td> <td>5 bis &lt; 15 min</td> <td>2</td> <td>300 min bis &lt; 1 km</td> <td>2</td> <td>1. Bewegungsrhythmus durch zu geringe oder zu hohe Belastungen durch eine Arbeitsfläche unter 1,5 m<sup>2</sup> gestört oder 2. Standsicherheit durch unebenen, weichen Boden eingeschränkt</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>40 bis &lt; 200</td> <td>4</td> <td>15 min bis &lt; 1 Stunde</td> <td>4</td> <td>1 km bis &lt; 4 km</td> <td>4</td> <td>Stark eingeschränkte Bewegungsfreiheit und/oder Instabilität des Lastschwungpunktes (z.B. Patiententransfer)</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>200 bis &lt; 500</td> <td>6</td> <td>1 Stunde bis &lt; 2 Stunden</td> <td>6</td> <td>4 bis &lt; 8 km</td> <td>6</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>500 bis &lt; 1000</td> <td>8</td> <td>2 Stunden bis &lt; 4 Stunden</td> <td>8</td> <td>8 bis &lt; 16 km</td> <td>8</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>≥ 1000</td> <td>10</td> <td>&gt; 4 Stunden</td> <td>10</td> <td>≥ 16 km</td> <td>10</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						Hebe- oder Unterstützzeit (< 5 s)	Halten		Tragen		Ausführungsbedingungen	Aus-wichtung	Zeit- wichtung	Gesamtdauer am Arbeitstag	Zeit- wichtung	Gesamtdauer am Arbeitstag	Zeit- wichtung	< 10	1	< 5 min	1	< 300 min	1	Gute ergonomische Bedingungen, z.B. ausreichend Platz, keine Hindernisse im Arbeitsbereich, ebener nutzbarer Boden, ausreichend beleuchtet, geringe Greifbelastungen	0	10 bis < 40	2	5 bis < 15 min	2	300 min bis < 1 km	2	1. Bewegungsrhythmus durch zu geringe oder zu hohe Belastungen durch eine Arbeitsfläche unter 1,5 m <sup>2</sup> gestört oder 2. Standsicherheit durch unebenen, weichen Boden eingeschränkt	1	40 bis < 200	4	15 min bis < 1 Stunde	4	1 km bis < 4 km	4	Stark eingeschränkte Bewegungsfreiheit und/oder Instabilität des Lastschwungpunktes (z.B. Patiententransfer)	2	200 bis < 500	6	1 Stunde bis < 2 Stunden	6	4 bis < 8 km	6			500 bis < 1000	8	2 Stunden bis < 4 Stunden	8	8 bis < 16 km	8			≥ 1000	10	> 4 Stunden	10	≥ 16 km	10			
Hebe- oder Unterstützzeit (< 5 s)	Halten		Tragen		Ausführungsbedingungen		Aus-wichtung																																																											
	Zeit- wichtung	Gesamtdauer am Arbeitstag	Zeit- wichtung	Gesamtdauer am Arbeitstag		Zeit- wichtung																																																												
< 10	1	< 5 min	1	< 300 min	1	Gute ergonomische Bedingungen, z.B. ausreichend Platz, keine Hindernisse im Arbeitsbereich, ebener nutzbarer Boden, ausreichend beleuchtet, geringe Greifbelastungen	0																																																											
10 bis < 40	2	5 bis < 15 min	2	300 min bis < 1 km	2	1. Bewegungsrhythmus durch zu geringe oder zu hohe Belastungen durch eine Arbeitsfläche unter 1,5 m <sup>2</sup> gestört oder 2. Standsicherheit durch unebenen, weichen Boden eingeschränkt	1																																																											
40 bis < 200	4	15 min bis < 1 Stunde	4	1 km bis < 4 km	4	Stark eingeschränkte Bewegungsfreiheit und/oder Instabilität des Lastschwungpunktes (z.B. Patiententransfer)	2																																																											
200 bis < 500	6	1 Stunde bis < 2 Stunden	6	4 bis < 8 km	6																																																													
500 bis < 1000	8	2 Stunden bis < 4 Stunden	8	8 bis < 16 km	8																																																													
≥ 1000	10	> 4 Stunden	10	≥ 16 km	10																																																													
<p><b>Bemerkung:</b> • Setzen von Maunsteinen, -Ergänzen von Werkstücken in einer Maschine, -Setzen von Werkstücken entnehmen und auf ein Band legen</p>																																																																		
<p><b>Bemerkung:</b> • Halten und Führen eines Gusszuges bei der Bearbeitung an einem Maschinenkopf, -Führen eines Schleifzuges an einer Schleifmaschine, -Führen einer Motorsäge</p>																																																																		
<p><b>Bemerkung:</b> • Halten von Gegenständen vom Liegen auf, -Tragen von Gegenständen vom Liegen auf, -Zum Aufsetzen</p>																																																																		
<p><b>2. Schritt: Bestimmung der Wichtungen von Last, Hal tung und Ausführungsbedingungen</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Wirksame Last<sup>1)</sup> für Männer</th> <th>Lastwichtung</th> <th>Wirksame Last<sup>1)</sup> für Frauen</th> <th>Lastwichtung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>&lt; 10 kg</td> <td>1</td> <td>&lt; 5 kg</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>10 bis &lt; 20 kg</td> <td>2</td> <td>5 bis &lt; 10 kg</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>20 bis &lt; 30 kg</td> <td>4</td> <td>10 bis &lt; 15 kg</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>30 bis &lt; 40 kg</td> <td>7</td> <td>15 bis &lt; 25 kg</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>≥ 40 kg</td> <td>25</td> <td>≥ 25 kg</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>						Wirksame Last <sup>1)</sup> für Männer	Lastwichtung	Wirksame Last <sup>1)</sup> für Frauen	Lastwichtung	< 10 kg	1	< 5 kg	1	10 bis < 20 kg	2	5 bis < 10 kg	2	20 bis < 30 kg	4	10 bis < 15 kg	4	30 bis < 40 kg	7	15 bis < 25 kg	7	≥ 40 kg	25	≥ 25 kg	25																																					
Wirksame Last <sup>1)</sup> für Männer	Lastwichtung	Wirksame Last <sup>1)</sup> für Frauen	Lastwichtung																																																															
< 10 kg	1	< 5 kg	1																																																															
10 bis < 20 kg	2	5 bis < 10 kg	2																																																															
20 bis < 30 kg	4	10 bis < 15 kg	4																																																															
30 bis < 40 kg	7	15 bis < 25 kg	7																																																															
≥ 40 kg	25	≥ 25 kg	25																																																															
<p>1) Mit der "Wirkenden Last" ist die Gewichtskraft bzw. Zug/Druckkraft gemeint, die der Beschäftigte tatsächlich bei der Lastenhandhabung ausüben muss. Sie entspricht nicht immer der Lastmasse. Beim Kippen eines Kartsens wirkt nur das 50 %, die im Verhältnis einer schrägen Last zu einer horizontalen Last abweichen.</p>																																																																		
<p>Charakteristische Körperhaltungen und Lastposition<sup>2)</sup></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Körperhaltung, Position der Last</th> <th>Halte-wichtung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberkörper aufrecht, nicht verdreht</li> <li>• Last am Körper</li> </ul> </td> <td>1</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• geringes Vorneigen oder Verstehen des Oberkörpers</li> <li>• Last am Körper oder Körpermaß</li> </ul> </td> <td>2</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tiefes Beugen oder weites Vorneigen</li> <li>• geringe Verkürzung mit gleichzeitigem Verstreichen des Oberkörpers</li> <li>• Last Körpern oder über Schulterhöhe</li> </ul> </td> <td>4</td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <ul style="list-style-type: none"> <li>• weites Vorneigen mit gleichzeitigem Verstreichen des Oberkörpers</li> <li>• Last Körpern</li> <li>• tiefe, eingespannte Haltungsstabilität beim Stehen</li> <li>• Hocken oder Kneien</li> </ul> </td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>						Körperhaltung, Position der Last		Halte-wichtung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberkörper aufrecht, nicht verdreht</li> <li>• Last am Körper</li> </ul>		1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringes Vorneigen oder Verstehen des Oberkörpers</li> <li>• Last am Körper oder Körpermaß</li> </ul>		2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• tiefes Beugen oder weites Vorneigen</li> <li>• geringe Verkürzung mit gleichzeitigem Verstreichen des Oberkörpers</li> <li>• Last Körpern oder über Schulterhöhe</li> </ul>		4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• weites Vorneigen mit gleichzeitigem Verstreichen des Oberkörpers</li> <li>• Last Körpern</li> <li>• tiefe, eingespannte Haltungsstabilität beim Stehen</li> <li>• Hocken oder Kneien</li> </ul>		8																																														
Körperhaltung, Position der Last		Halte-wichtung																																																																
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Oberkörper aufrecht, nicht verdreht</li> <li>• Last am Körper</li> </ul>		1																																																																
<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringes Vorneigen oder Verstehen des Oberkörpers</li> <li>• Last am Körper oder Körpermaß</li> </ul>		2																																																																
<ul style="list-style-type: none"> <li>• tiefes Beugen oder weites Vorneigen</li> <li>• geringe Verkürzung mit gleichzeitigem Verstreichen des Oberkörpers</li> <li>• Last Körpern oder über Schulterhöhe</li> </ul>		4																																																																
<ul style="list-style-type: none"> <li>• weites Vorneigen mit gleichzeitigem Verstreichen des Oberkörpers</li> <li>• Last Körpern</li> <li>• tiefe, eingespannte Haltungsstabilität beim Stehen</li> <li>• Hocken oder Kneien</li> </ul>		8																																																																
<p>2) Für die Bestimmung der Haltewichtung ist die bei der Lastenhandhabung eingenommene charakteristische Körperhaltung entscheidend, z.B. bei unterschiedlichen Körperhaltungen mit der Last sind mittlere Werte zu bilden – keine geografischen Extremwerte verwenden.</p>																																																																		
<p>Aufbauend des errechneten Punktwertes und der folgenden Tabelle kann eine grobe Bewertung vorgenommen werden. Unabhängig davon gelten die Bestimmungen des Mutter-Checklistenzes.</p>																																																																		
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Risikobereich</th> <th>Punktwert</th> <th>Beschreibung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>&lt; 10</td> <td>geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich.</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10 bis &lt; 25</td> <td>Erhöhte Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei verhindert belastbaren Personen<sup>3)</sup> möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmöglichkeiten sinnvoll.</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>25 bis &lt; 50</td> <td>Wenigwahrscheinliche Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmöglichkeiten sinnvoll.</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>≥ 50</td> <td>Höchstwahrscheinliche Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmöglichkeiten sind erforderlich.</td> </tr> </tbody> </table>						Risikobereich	Punktwert	Beschreibung	1	< 10	geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich.	2	10 bis < 25	Erhöhte Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei verhindert belastbaren Personen <sup>3)</sup> möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmöglichkeiten sinnvoll.	3	25 bis < 50	Wenigwahrscheinliche Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmöglichkeiten sinnvoll.	4	≥ 50	Höchstwahrscheinliche Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmöglichkeiten sind erforderlich.																																														
Risikobereich	Punktwert	Beschreibung																																																																
1	< 10	geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich.																																																																
2	10 bis < 25	Erhöhte Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei verhindert belastbaren Personen <sup>3)</sup> möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmöglichkeiten sinnvoll.																																																																
3	25 bis < 50	Wenigwahrscheinliche Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmöglichkeiten sinnvoll.																																																																
4	≥ 50	Höchstwahrscheinliche Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmöglichkeiten sind erforderlich.																																																																
<p>Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit steigenden Punktwerten die Belastung des Muskel-Knochen-Systems zunimmt. Die Damit darf die Erreichung des Risikobereichs 4 aufgrund der individuellen Arbeitsbedingungen und Leistungsvoraussetzungen befeindet werden. Verschieden belastbare Personen sind in diesem Zusammenhang zu unterscheiden, die älter als 40 oder jünger als 21 Jahre alt, der Gestaltungserfordernisse lassen sich unterschiedlich anpassen. Durch Gewichtsverminderung, Verkürzung der Ausführungszeitdauern oder Verengung der Belastungsbereiche können Belastungen vermieden werden.</p>																																																																		
<p>Prüfung des Arbeitsplatzes aus sonstigen Gründen erforderlich: <input type="checkbox"/></p>																																																																		
<p>in der Beurteilung: _____ Beurteilt von: _____</p>																																																																		
<p><small>Ring: Bundesamt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin und Länderinstitut für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik 2001</small></p>																																																																		

**Abbildung 11: Beispiel für Formblätter der Leitmerkalmethode, hier zur Beurteilung von Heben, Halten, Tragen; entnommen aus BAuA (2001, S. 2-3)**

Aktuell werden unter Leitung der BAuA zwei Forschungsprojekte zur Erweiterung des Werkzeugportfolios zur Gefährdungsbeurteilung physischer Belastungen am Arbeitsplatz durchgeführt (vgl. BAuA 2018b und BAuA 2018c).

- MEGAPHYS – Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz: Ziel des Projektes ist die Bereitstellung eines Methodeninventars zur Berücksichtigung möglichst aller Formen arbeitsbedingter physischer Belastungen, wie manuelle Lastenhandhabung, repetitive Arbeitsprozesse, Krafteinwirkungen, Körperhaltungen und -bewegungen und kombinierte Belastungen bei Mischarbeit (vgl. BAuA 2018b).

- Interaktive Handlungsanleitung zur Messung ausgewählter physikalischer Faktoren im Rahmen von Gefährdungsbeurteilungen: Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines rechnergestützten Werkzeugs, welches als interaktive Handlungsanleitung durch die Ermittlung und Beurteilung umgebungsspezifischer Belastungen führt (vgl. BAuA 2018c).

#### ***Siemens – Alter und Fitness berücksichtigendes „Pen&Paper“-Verfahren***

Das nachfolgend skizzierte Berechnungsverfahren basiert auf Arbeiten von Burandt und Schultetus bei Siemens etwa in den 1970er Jahren. Bullinger (1994) weist darauf hin, dass das Verfahren „[...] der Praxis [entstammt] und [...] nicht als wissenschaftlich gesichert angesehen werden [kann]“ (S. 218). Er hebt jedoch sogleich hervor, dass „es [...] sich aber über viele Jahre in der Praxis bei der Montage von kleinen bis mittelgroßen Produkten der Elektroindustrie bewährt [hat]“ (S. 218). In ihren kurzen Abhandlungen zum „Siemens Verfahren“ stellen Bullinger (1994, S. 218) und Mühlstedt (2016b, S. 204) unabhängig voneinander den prägenden Einfluss des Verfahrens auf spätere ähnliche Verfahren dar.

Das Verfahren wurde für Analysen von Kräften und Momenten des Hand-Finger-Systems und des Hand-Arm-Systems bei dynamischer und statischer Muskelarbeit entwickelt. Es ist in zwei Stufen gegliedert. In der ersten Stufe wird unter Berücksichtigung von Alter, Geschlecht, Trainiertheit, Häufigkeit der dynamischen Kraftanstrengung und der Haltedauer bei statischer Kraftanstrengung die zulässige Kraft bzw. das zulässige Moment für das Hand-Finger-System oder das Hand-Arm-System ermittelt. In der zweiten Stufe wird unter Einbeziehung von Arbeitsposition und Angriffspunkt, Lage und Richtung von Kräften bzw. Momenten die entsprechende Maximalbelastung bestimmt (vgl. Bullinger 1994, S. 218-228, Mühlstedt 2016b, S. 204, VDI 4499 Bl. 4:2015,

### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung

S. 39 und Schlick et al. 2010, S. 251-252). Abbildung 12 zeigt nachfolgend exemplarisch einige Formblätter des „Pen&Paper“-Verfahrens.

**Arbeitsblatt zur Ermittlung zulässiger Kräfte**  
dr =  $\frac{1}{2} \cdot k \cdot F_{Hd}$

**1. Schritt** Ermitteln der Handbelastung  
**2. Schritt** Ermitteln der Zone, in der die Kraftbeanspruchung erfolgt

**3. Schritt** Ermitteln der Lage der Kraftbeanspruchung, nach Richtung und Welle, von Arbeiten aus gesehen.

**4. Schritt** Ermitteln der Kraftbeanspruchung von der arbeitenden Hand aus gesehen.

**5. Schritt** Werte für die jeweiligen Teile der Handbelastung

**Bild 1** Faktor  $k$  für Alter und Geschlecht

**Bild 2** Faktor  $k$  für Häufigkeit der dynamischen Kraftbeanspruchung

**Bild 3** Faktor  $k$  für Häufigkeit der statischen Kraftbeanspruchung

**Bild 13.22** Arbeitsblatt zur Ermittlung der Maximalkräfte des Hand-Arm-Systems

**Arbeitsblatt zur Ermittlung zulässiger Drehmomente des Hand-Arm-Systems**

**Bild 1** Faktor  $k$  für Alter und Geschlecht

**Bild 2** Faktor  $k$  für Trainiertheit

**Bild 3** Faktor  $k$  für Häufigkeit der statischen Kraftbeanspruchungen

**Bild 4** Faktor  $k$  für Häufigkeit der dynamischen Kraftbeanspruchungen

**Bild 13.25** Arbeitsblatt zur Ermittlung der zulässigen Drehmomente des Hand-Arm-Systems

**Bild 13.24** Datenblatt mit Maximalkräften des Hand-Arm-Systems

**Abbildung 12: Exemplarische Auszug an Formblättern aus dem Siemens-Verfahren (digitale Darstellung entnommen aus Mühlstedt 2016b, S. 204, ein umfassender Satz an Formblättern findet sich bei Bullinger 1994, S. 218-228)**

Das „Siemens Verfahren“ bzw. die „Burandt-Schultetus-Methode“ ist aktuell insbesondere bei der Analyse dynamischer Arbeitsbelastungen von Bedeutung; hierzu wurden die relevanten Funktionen und Werte in Digitale Menschmodelle wie bspw. RAMSIS integriert (vgl. Mühlstedt 2016b, S. 204 und VDI 4499 Bl. 4:2015, S. 39).

***Belastungs-Dokumentations-System BDS – Softwarebasiertes Screening-System für die ganzheitliche Beurteilung von Arbeitssystemen***

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Methoden und Verfahren ermöglicht das am Institut für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie e.V. (ASER) seit den 1980er Jahren kontinuierlich (weiter)entwickelte Belastungs-Dokumentations-System (BDS) eine ganzheitliche Beurteilung von Arbeitssystemen. Die BDS Screening Software ist ein Stand-alone-System. Die ganzheitliche Beurteilung inkludiert Bewertungen von „[...] physischen Belastungen durch die Arbeitsaufgabe, physischen Belastungen durch Umgebungsbedingungen, psychische Belastungen durch Arbeitsausführung und -organisation [und] Arbeitssicherheit (Unfallgefährdung und Schutzausrüstungen)“ (Gebhardt 1994, S. 34). Basis für das System bildet das 1981 von Müller und Hettinger vorgestellte Verfahren zur Beurteilung arbeitsbedingter Belastungen (BAB). Abbildung 13 zeigt Impressionen der Software.

### 3 Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung



**Abbildung 13: Informationsgrafik Belastungs-Dokumentations-System BDS; entnommen aus Produktflyer ASER 2018**

In ihrer Abhandlung zu „Interpretations- und Bewertungsverfahren arbeitswissenschaftlich-ergonomischer Felddaten“ beschreiben Müller und Hettinger (1981) zunächst die Diskrepanz zwischen wissenschaftlichem Erkenntnisgewinn und der Anwendung von Erkenntnissen in der betrieblichen Praxis (vgl. S. 82). Als Antwort auf das identifizierte Handlungsdesiderat präsentieren Müller und Hettinger (1981) das BAB Verfahren, welches auf der Annahme basiert, dass in vielen Fällen eine Expertenbeurteilung der für die Belastungssituation wesentlichen Komponenten für eine orientierende Aussage ausreichend genau ist (vgl. Gebhardt 1994, S. 33). Den Experten werden für die Beurteilung arbeitsbedingter Belastungen insgesamt 33 Merkmale aus den Bereichen physische Belastungen, Umgebungsbedingungen, psychische Belastungen und Arbeitssicherheit als 7-stufige Skala vorgegeben (vgl. Gebhardt 1994, 33, 35 und Müller und Hettinger 1981, S. 84). Die Skalierung ist orientiert an Arbeiten des Max-Planck-Instituts zum Arbeitsenergiemodus; die mittlere bzw. vierte Stufe entspricht der sog. Dauerleistungsgrenze (DLG, maximal erträgliche Arbeitsbelastung ohne Erholungspausen für eine 8-Stunden-Schicht; vgl. Müller und Hettinger 1981, S. 84). „Eine gewichtete Zusammenfassung der [Merkmale] wird nicht vorgenommen, da die hohe Intensität einer Belastungsform i. A. nicht durch die geringe Ausprägung einer anderen kompensiert werden kann“ (Gebhardt 1994, S. 34).

Unter zahlreichen und i. d. R. auf Feldforschung basierenden Weiterentwicklungen des Belastungs-Dokumentations-Systems sind hinsichtlich der vorliegenden Arbeit besonders zwei Funktionen der Software hervorzuheben. Zum einen bietet das BDS die „Möglichkeit der Simulation und Prognose von Belastungen und Gefährdungen z. B. bei geplanten Maßnahmen der Arbeitsgestaltung oder Unternehmensgründungen“ (ASER 2018, s. ergänzend Abb. 13). Zum anderen stellt das System ein Demographie Modul zur Verfügung; „über einzelne Abteilungen, Werke, Geschäftsbereiche lassen sich Kennzahlen z. B. zur Alter(n)sstabilität der Arbeitssysteme erstellen“ (ASER 2018).

### **3.4 Handlungsbedarf**

Aus der in diesem Kapitel präsentierten Standortbestimmung zur Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung wurden die nachfolgenden Aspekte von aktuellen Regelwerken und Systemen identifiziert. Dieses nachfolgend konkret charakterisierte Desiderat nach innovativen Lösungen zur Gestaltung von Arbeitssystemen stellt den Impetus für die Konzeption und prototypische Realisierung eines alters- und belastungsorientierten Simulationsmodells dar.

#### ***Humanisierung***

Wie in Unterkapitel 3.1 „Personalabbildung in der Simulation im Bereich von Simulation und Logistik“ herausgearbeitet, hat sich der Fokus bei der Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen, insbesondere im Bereich der personalorientierten Simulation, in den letzten Jahrzehnten deutlich gewandelt. Vor allem motiviert durch Megatrends der letzten zehn Jahre wie „Demographischer Wandel“, „Digitalisierung“, „New Work“ und „Silver Society“ hat eine Humanisierung im Bereich der Gestaltung von Arbeitssystemen stattgefunden. Aktuelle Fragestellungen befassen sich mit der individuellen Erhaltung und Steigerung von Wohlbefinden, Fitness und Gesundheit in digitalisierten Lebens- und Arbeitswelten.

#### ***Individualisierung***

Unmittelbar verbunden mit dem zuvor skizzierten Aspekt der Humanisierung ist die Individualisierung im Bereich der Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen.

Wie in den Unterkapiteln 3.1 „Personalabbildung in der Simulation im Bereich von Produktion und Logistik“ und 3.2 „ergonomische und digitale Abbildung von Menschen“ beschrieben, ermöglichen innovative digitale Entwicklungsumgebungen bereits seit einigen Jahren eine prospektive Gestaltung von Arbeitssystemen; Detaillierungsgrad und Funktionsumfang insbesondere der Digitalen Menschmodelle nehmen kontinuierlich zu. Wie in Unterkapitel 3.2 aufgezeigt, besteht aktuell Handlungsbedarf u. a. bei der Systemintegration altersassozierter Veränderungen vor allem körperlicher Fähigkeiten und bei der Prognose von Beanspruchungen bzw. sukzessiver Beanspruchungsverläufe.

#### ***Ganzheitliche Betrachtung***

Die Standortbestimmung zur Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung zeigt deutlich auf, dass im Bereich der ganzheitlichen Betrachtung von Belastungen und Beanspruchungen Handlungsbedarfe bestehen. Hier ist besonders das Desiderat an theoretischen Ansätzen und praktischen Forschungsarbeiten zur Wirkung mehrerer simultan auftretender Umgebungseinflüsse auf den arbeitenden Menschen hervorzuheben (s. Unterkapitel 3.2 und 3.3).

#### ***Digitalisierung***

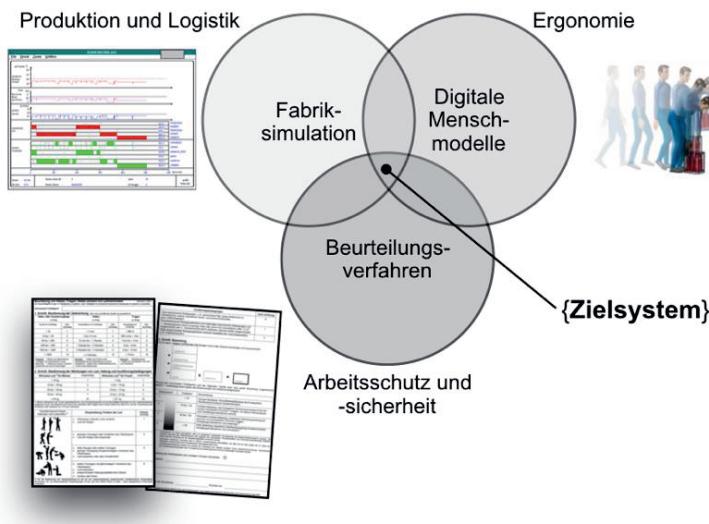
Während die Digitalisierung auf der einen Seite vielfältige Innovationen im Bereich der Gestaltung von Arbeitssystemen hervorbringt (s. Unterkapitel 3.1), führt auf der anderen Seite die Komplexität moderner Softwaresysteme zu großen Herausforderungen für Anwender (s. Unterkapitel 3.2). Besonders kleine und mittelgroße Unternehmen

(KMU) setzen auf Grund von i. d. R. stark limitierten personellen, finanziellen und zeitlichen Ressourcen nur sehr selten simulationsbasierte Softwaretools bei der Entwicklung und Bewertung ihrer Arbeitssysteme ein (s. Unterkapitel 3.3.1 und 3.3.2). Um Herausforderungen der Digitalisierung wie sich stetig schneller wandelnde, innovative Technologien, globaler Kundenstrukturwandel und hohe Wettbewerberagilität gewachsen zu sein, müssen KMU sowohl die Gestaltung ihrer Produkte als auch ihrer Fertigung neu denken (vgl. Gust et al. 2016, S. 3-5). Einzelne Projekte, wie in Unterkapitel 3.1 und 3.3.2 angeführt, schlagen hier bereits eine Brücke, indem sie die Potentiale der Digitalisierung für die Steigerung der Usability von Werkzeugen zur Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen nutzen.

#### **Zielsystem**

Mit dem Zielsystem wird im weiteren Verlauf dieser wissenschaftlichen Arbeit ein Simulationsmodell zur Gestaltung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung präsentiert, welches die zuvor dargestellten gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Veränderungen und Bedarfe, aber auch Potentiale, berücksichtigt.

Abbildung 14 ordnet das Zielgebiet des Simulationsmodells in die im Rahmen dieses Kapitels detailliert beschriebene technisch-wissenschaftliche Landschaft der Arbeitssystemgestaltung ein.



**Abbildung 14:** Einordnung des Zielsystems in die technisch-wissenschaftliche Landschaft der Arbeitssystemgestaltung

Das Simulationsmodell ist im nachfolgenden Kapitel 4 beschrieben, die prototypische Umsetzung als Software Applikation WorkDesigner ist im Anschluss in Kapitel 5 dargestellt.

4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

## **4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme**

Sowohl bei der Entwicklung neuer als auch bei der Bewertung bestehender Arbeitssysteme muss der Mensch und seine individuelle Beanspruchung während der Arbeit im Fokus stehen. Vor dem Hintergrund des in Kapitel 3 beschriebenen Entwicklungsdesiderats nach einem Simulationstool, welches die Simulation ganzheitlicher bzw. zusammengesetzter Belastungen am Arbeitsplatz und die daraus resultierende Mitarbeiterindividuelle Beanspruchung über mittlere und langfristige Zeiträume ermöglicht, ist die Software Applikation WorkDesigner entwickelt worden. Abbildung 15 zeigt die Systemstruktur des diskreten Simulationswerkzeugs WorkDesigner zur Modellierung, Simulation und Analyse von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

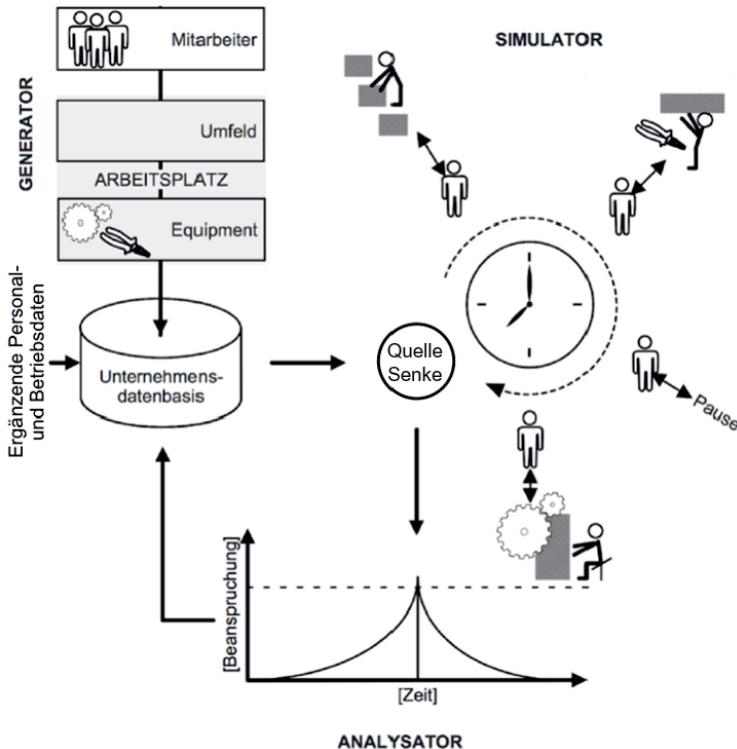


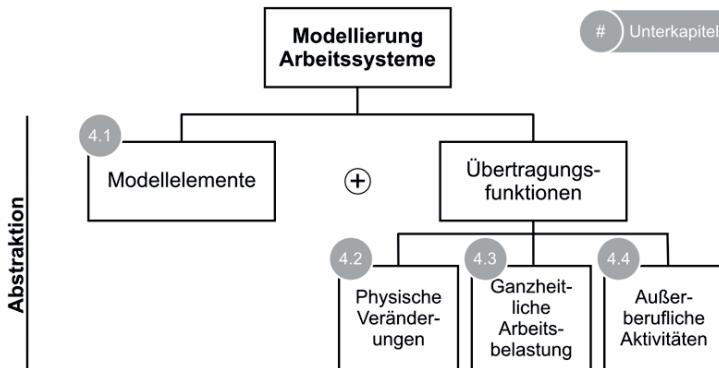
Abbildung 15: Systemstruktur WorkDesigner (Feller und Müller 2014, S. 142)

Wie die meisten marktlichen Simulationswerkzeuge besteht WorkDesigner ebenfalls aus einer Systemkomponente für Modellaufbau, Dateneingabe und Datenverwaltung, dem Generator, einer weiteren Komponente zur automatischen, chronologischen Erzeugung und Verarbeitung der Simulationseinzelschritte, dem Simulator, und einer dritten Komponente zur Auswertung und Darstellung der Simulationsergebnisse, dem Analyseator. Die prototypische Realisierung der Software wird in Kapitel 5 beschrieben.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Nachfolgend werden die einzelnen Modellelemente detailliert beschrieben und die verwendeten Algorithmen hergeleitet. Abbildung 16 visualisiert für ein schnelles Verständnis und eine einfache Orientierung die innere Gliederung dieses Kapitels als logische Baumstruktur. Wie dargestellt folgen sowohl die Abstraktion von Arbeitssystemen per se als auch die Struktur dieses Kapitels dem Verständnis der VDI 3633 Bl. 1:2014 bzgl. einer simulationssysteminternen Zusammengehörigkeit von Modell-elementen „plus“ Übertragungsfunktionen.



**Abbildung 16:** Logische Baumstruktur des Kapitels 4 gem. MECE-Prinzip (Mutually Exclusive and Collectively Exhaustive)

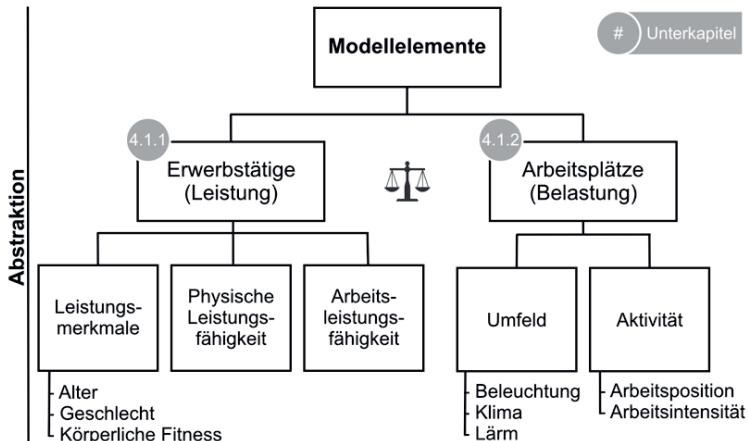
Zum Abschluss des Kapitels werden die Ergebnisse in einer SWOT-Analyse (Strength, Weak, Opportunities, Threats) reflektiert.

## 4.1 Modellelemente des Simulationssystems

Wie bereits einleitende zu Kapitel 3 angeführt, definiert die Arbeitswissenschaft Arbeitssysteme als Interaktion von Erwerbstägigen und Arbeitsmitteln mit einer bestimmten Aufgabe bzw. Arbeitsinhalt unter Beeinflussung durch die physikalische und soziale Umwelt am Arbeitsplatz (bspw. Bullinger 1994, S. 2 oder Spath et al. 2012, S. 1651). Entsprechend dieser Definition bilden Erwerbstägige und Arbeitsplätze die Modellelemente des Simulationssystems WorkDesigner. Unterschiedliche Arbeitsinhalte, also variable Dauern, Reihenfolgen und Häufigkeiten von Tätigkeiten, werden durch beliebig definierbare Simulationsszenarien abgebildet.

Um den Aufbau dieses Unterkapitels respektive die hoch komplexe Abstraktion der Modellelemente einfach und umfassend zu verstehen, zeigt Abbildung 17 die entsprechende innere Struktur als logischen Baum. Hierbei ist besonders hervorzuheben, dass der Aufbau dieses Unterkapitels konsequent nach dem ergonomischen Ansatz bzw. dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept gestaltet ist. Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept beschreibt durch ein Ersatzmodell, ähnlich einer Waage, den Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang von individueller Leistung, wirkender arbeitssystemspezifischer Belastung und der daraus resultierenden individuellen Beanspruchung (vgl. DIN EN ISO 26800:2011, S. 7-8 und 13-15 und Schlick et al. 2010, S. 38 ff.).

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme



**Abbildung 17:** Logische Baumstruktur des Unterkapitels 4.1 gem. MECE-Prinzip

### 4.1.1 Attribute zur individuellen Beschreibung von Erwerbstäigen

Wie bereits angeführt, ist die individuelle Beanspruchung einer Arbeitsperson bzw. die Auslastung ihrer Leistungsfähigkeit zu diskreten Simulationszeitpunkten der Indikator bzw. die Grundlage für die alters- und belastungsorientierte Bewertung und Gestaltung von Arbeitssystemen. In der Arbeitswissenschaft wird differenziert zwischen Belastung und Beanspruchung. Dabei wirken Umwelteinflüsse, der jeweilige Arbeitsplatz bzw. die Tätigkeit und die Arbeitsorganisation als Belastungsparameter auf die Person ein. In Abhängigkeit der körperlichen und mentalen Verfassung der Person resultiert daraus eine individuelle Beanspruchung (vgl. Bullinger 1994, S. 30).

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

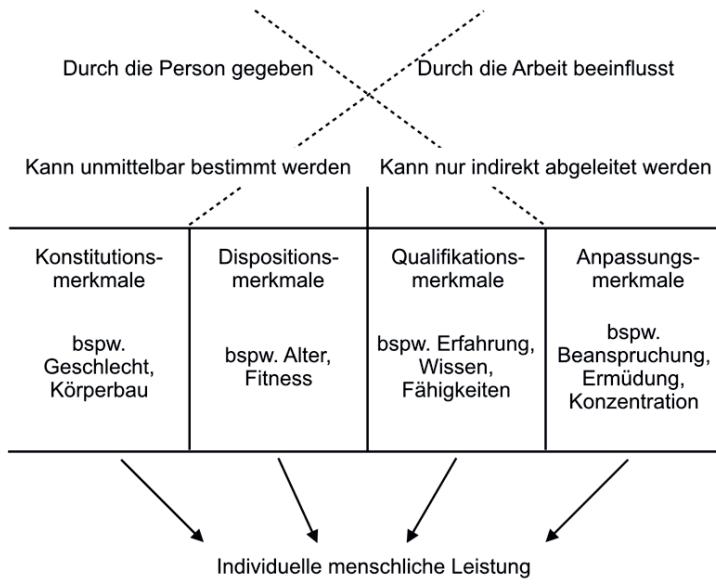
---

Abbildung 18 zeigt die Zusammensetzung der individuellen menschlichen Leistung bzw. Leistungsfähigkeit. Hierbei werden vier unterschiedliche Arten von Merkmalen differenziert (vgl. Luczak 1993, S. 32-33):

- Die Konstitutionsmerkmale wie Geschlecht und Körperbau, welche unveränderlich von Natur aus gegeben sind.
- Die Dispositionsmerkmale wie bspw. Alter und Fitness, welche „relativ stabil [...] aber dennoch [...] veränderlich“ (Schlick et al. 2010, S. 88) sind und durch die Person, wenn nur indirekt, beeinflusst werden können.
- Die Qualifikationsmerkmale, dazu gehören u. a. Erfahrung, Wissen und Fähigkeiten, sind Ergebnisse von kurz-, mittel- oder langfristigen Lernprozessen während der Arbeit bzw. Aus- und/oder Weiterbildung.
- Die Anpassungsmerkmale wie bspw. Beanspruchung, Ermüdung und Konzentration beschreiben die Reaktionen auf physische und psychische Belastungen (hier während der Arbeit).

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---



**Abbildung 18:** Zusammensetzung der individuellen menschlichen Leistung in Anlehnung an Luczak (1993, S. 33)

Konstitutions- und Dispositionsmerkmale lassen sich über einige wenige explizite Fragen bzw. Personenstammdaten unmittelbar eindeutig bestimmen. Hingegen können Qualifikations- und Anpassungsmerkmale nur aus umfangreichen Befragungen, Beobachtungen und z. T. messtechnischen Untersuchungen abgeleitet werden. Hinsichtlich einer guten Usability des Simulationsmodells in der industriellen Praxis, vor allem auch durch nicht speziell geschulte Anwender, und dem Schutz der Privatsphäre der Erwerbstätigen bzw. der Akzeptanz im Unternehmen ggf. nicht zuletzt durch einen Betriebsrat, muss mit einer minimalen Anzahl an Attributen die individuelle menschliche Leistung einer Arbeitsperson hinreichend genau modelliert werden. Da zudem der Fokus des Simulationsmodells ausschließlich auf Arbeitssystemen in der industriellen

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Fertigung bzw. hauptsächlich körperlicher Arbeit liegt, wurden zur individuellen Beschreibung von Erwerbstägigen die Attribute Alter, Geschlecht und Fitness definiert. Die Abbildung respektive Berücksichtigung des Geschlechts einer Arbeitsperson ist detailliert in Unterkapitel 4.2 „Abbildung individueller und altersassozierter physischer Veränderungen“ beschrieben.

### ***Individuelle körperliche Fitness***

Die individuelle körperliche Fitness und ihre Abhängigkeit vom Alter eines Menschen weist eine erhebliche Bandbreite auf, welche in der Literatur z. T. mit Schwankungen der körperlichen Leistungsfähigkeit von mehr als 200 % beschrieben ist (vgl. Löhr 1976, S. 70 oder Börner et al. 2013, S. 264). Sie ist zudem stark tagesformabhängig.

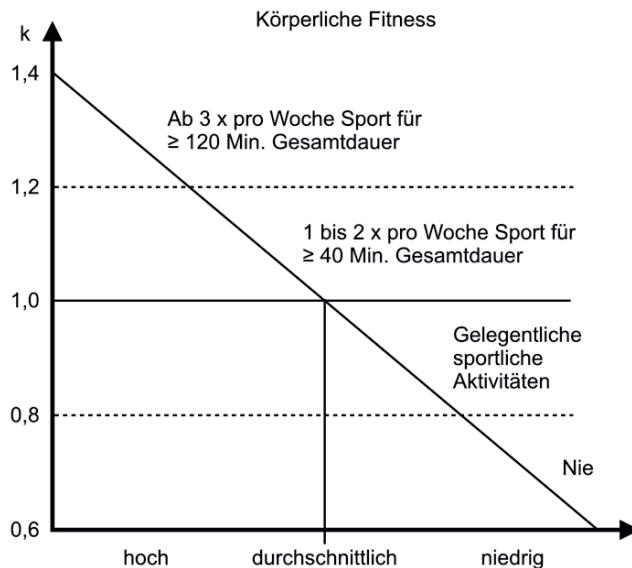
Bullinger beschreibt im Berechnungsverfahren „zur Ermittlung zulässiger Körperkräfte“ (1994, S. 218 ff.), mit Verweis auf das Handbuch „Daten und Hinweise zur Arbeitsgestaltung“ von Siemens (1978), „Montagegestaltung“ von Schultetus (1980) und auf das „Handbuch der Arbeitsgestaltung und Arbeitsorganisation“ vom VDI (1980), u. a. einen Faktor für die Trainiertheit. Dieser fällt linear von 1,4 = *sehr gut* über 1,0 = *durchschnittlich trainiert* auf 0,6 = *schlecht* ab; eine genauere Differenzierung ist nicht gegeben. Bullinger führt ergänzend aus, dass das Verfahren „nicht als wissenschaftlich gesichert angesehen werden kann“, „sich aber über viele Jahre in der Praxis [...] bewährt hat“ (1994, S. 218).

Für eine detailliertere Bestimmung der individuellen körperlichen Fitness wurde das ursprüngliche Diagramm um spezifische Definitionen für hohe, durchschnittliche und niedrige Fitness erweitert (s. Abb. 19). Orientiert an der „Bewegungspyramide“ zur Fitness im Alltag des Sport- und Gesundheitswissenschaftlers Froböse (2017) und den

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Empfehlungen der World Health Organisation (WHO) für gesundheitsfördernde körperliche Aktivität (Altersgruppe 18-64 Jahre; 2010, S. 23 ff.) wurden die Abstufungen der Fitness festgelegt. Froböse (2017) empfiehlt hier wenigstens zweimal pro Woche für mindestens 20 bis 30 Minuten Sport zu treiben; nach Angaben der WHO (2010, S. 23 ff.) sollte an 3 bis 5 Tagen pro Woche und in Summe für mindestens 150 Minuten Sport getrieben werden. Auf diese Weise kann die Fitness einfach fragenbasiert bzw. graphisch ermittelt werden.



**Abbildung 19:** Bestimmung der Konstante  $k$  für die individuelle körperliche Fitness

Eine Alternative ist die experimentelle Bestimmung der individuellen körperlichen Fitness in einem kurzen Test. In der Arbeitswissenschaft ist die Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Arbeitsperson über das dynamische Verhalten ihrer Pulsfrequenz,

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

d. h. Differenz und Zeitverhalten zwischen Ruhe- und Belastungspuls, und die Rückfolgerung auf den jeweiligen Trainingszustand gängige wissenschaftliche Praxis (s. bspw. Löhr 1976, S. 25 ff. und Börner et al. 2013, S. 264). Börner et al. verwenden in ihrer Feldstudie über alterskritische Montageprozesse in der Automobilindustrie (Börner et al. 2013, S. 253 ff.) die nachfolgende Gleichung (1) zur Bestimmung der kardiovaskulären Leistungsfähigkeit respektive individuellen Fitness. Nomenklatur der Konstante  $k$  und Wertebereich wurden auf das zuvor vorgestellte fragenbasierte bzw. grafische Verfahren zur Bestimmung der individuellen körperlichen Fitness adaptiert.

$$k = \frac{\text{Puls nach 20 Kniebeugen (BPM)} - \text{Ruhepuls (BPM)}}{\text{Zeit benötigt für 20 Kniebeugen (s)}} \quad (1)$$

Dabei bedeuten:

$k$  Konstante für individuelle Fitness:  $k < 1$  niedrige Fitness;  $1 \leq k \leq 2$  gute bis sehr gute Fitness

Beide vorgestellten Verfahren wurden im Rahmen der Feldstudie zur Validierung des Simulationstools eingesetzt (s. Kapitel 6).

### **Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft**

Für die Modellierung der physischen Leistungsfähigkeit und der damit verbundenen (körperlichen) Arbeitsleistungsfähigkeit wurde eine Vielzahl an Quellen ausgewertet bzw. berücksichtigt. Abbildung 20 konkludiert graphisch die wesentlichen Erkenntnisse der Literaturrecherche und visualisiert zudem den verwendeten Ansatz zur Bestimmung von physischer Leistungsfähigkeit und Arbeitsleistungsfähigkeit bei der Modellierung von Erwerbstägigen (bezogen auf körperliche Arbeit in der industriellen Fertigung).

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Bzgl. der Entwicklung der Leistungsfähigkeit einer Arbeitsperson über ihr Alter betrachtet herrscht in der Arbeitswissenschaft zunächst Konsens, dass die Leistungsfähigkeit bis etwa Mitte der 20er Lebensjahre zunimmt und ab etwa dem 30. Lebensjahr wieder stetig abnimmt (vgl. u. a. Löhr 1976, Bokranz und Landau 1991, Luczak 1993, Bullinger 1994, Schlick et al. 2010). Das Altern ist i. d. R. durch zwei konträre Modelle beschrieben:

- Das sog. Defizit-Modell, welches die Altersentwicklungen von Menschen pauschal als Abbau und Verfall von Qualifikation und Leistung ab etwa Ende der 20er Lebensjahre betrachtet (vgl. Schlick et al. 2010, S. 122).
- Im Gegensatz dazu steht seit Anfang 1990 das sog. Kompensations-Modell, dass von einem individuellen Wandel von Fähigkeiten im Alter ausgeht. Das heißt, altersassoziierte Veränderungen können bspw. durch Verhaltensstrategien, Erfahrung oder soziale Kompetenz ausgeglichen werden – ältere Erwerbstätige haben lediglich ein anderes Leistungsspektrum als junge (vgl. Schlick et al. 2010, S. 122 und Luczak et al. 2010, S. 117).

Baines et al. (2004, S. 3) unterscheiden treffend zwischen „high-level“-Modellen (z. B. Kompensations-Modell), welche individuelle, komplexe physiologische und psychologische Mechanismen berücksichtigen, und „low-level“-Modellen (z. B. Defizit-Modell), die Leistungsveränderungen direkt mit Umwelteinflüssen oder dem Alter in Verbindung bringen und leicht auf unterschiedliche Arbeitspersonen übertragbar sind. Im Kontext der diskreten computerbasierten Simulation von industriellen Fertigungssystemen ist nach Baines et al. (2004, S. 3) ein „low-level“-Modell ausreichend genau. Ihr literaturbasiertes Ansatz beschreibt eine kontinuierlich wachsende Abnahme der physischen Leistungsfähigkeit mit dem Alter einer Arbeitsperson von 0 % Abnahme-rate bei 30 Jahren auf bis zu 1 % Abnahmerate bei 65 Jahren (S. 4); u. a. dargestellt in Abbildung 20.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Bei ihren Simulationsuntersuchungen zur Beeinflussung der Produktivität von Fertigungssystemen durch eine alternde Belegschaft beziehen sich Zülch et al. (2013, S. 67 ff.) u. a. auf die Arbeiten von Baines et al. (2004). Sie verwenden bei ihrem Simulationsmodell einen vergleichbaren Ansatz wie Baines et al. (2004), im Wesentlichen basierend auf eigenen Vorarbeiten (Zülch und Waldherr 2010), jedoch mit einem in Relation abgeschwächten Wachstum der Abnahmerate der physischen Leistungsfähigkeit mit zunehmendem Alter (s. Abb. 20).

Detaillierte Ausführungen bzgl. Alter und Arbeitsleistung bzw. -leistungsfähigkeit finden sich bei Ilmarinen und Tempel (2002), die in einer Vielzahl von Studien die Arbeitsbewältigungsfähigkeit von männlichen und weiblichen Probanden unterschiedlicher Altersgruppen und Tätigkeitsbereiche (hauptsächlich körperliche oder geistige Arbeit oder gemischt körperliche und geistige Arbeit) z. T. über mehrjährige Zeiträume untersucht haben. Bemessungsgrundlage war der Arbeitsbewältigungsindex (ABI), ein fragebogenbasiertes Instrument respektive Verfahren zur Bestimmung des Mitarbeiterpotenzials für Forschungsuntersuchungen und praktische Anwendung im Betrieb (vgl. Ilmarinen und Tempel 2002, S. 170). Exemplarisch sind Ergebnisse von Ilmarinen und Tempel (2002, S. 174) zur altersabhängigen Veränderung des Arbeitsbewältigungsindexes bei körperlicher Arbeit auch dargestellt in Abbildung 20; hierfür wurden die experimentell ermittelten ABI-Werte auf 100 % skaliert.

Die Ergebnisse der Feldstudien von Landau et al. (2012, S. 80) zur Leistungsfähigkeit von Erwerbstätigen verschiedener Industriebereiche bei körperlicher Arbeit wurden bzgl. der Vergleichbarkeit ebenfalls auf 100 % skaliert. Sie weichen mit einer leichten, nahezu linearen Abnahme der Leistungsfähigkeit von 100 % bei der Altersgruppe von 18 bis 39 Jahren auf durchschnittlich über 80 % bei der Altersgruppe von 57 bis 65 Jahren von den zuvor beschriebenen Arbeiten deutlich ab (s. Abb. 20).

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Für das entwickelte Simulationsmodell wird für die Berechnung der physischen Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von Alter und individueller körperlicher Fitness Gleitchung (2) definiert (vgl. Feller und Müller 2014, S. 143, 148 und Müller et al. 2015b, S. 181). Bis zu einem Alter von 30 Jahren steigt die physische Leistungsfähigkeit einer Arbeitsperson von durchschnittlicher Fitness ( $k = 1$ ) als Sättigungsfunktion auf 100 % an (vgl. u. a. Löhr 1976, Bokranz und Landau 1991, Luczak 1993, Bullinger 1994, Schlick et al. 2010). Ab 31 Jahren sinkt die physische Leistungsfähigkeit stetig approximiert als Linearfunktion (s. Abb. 20).

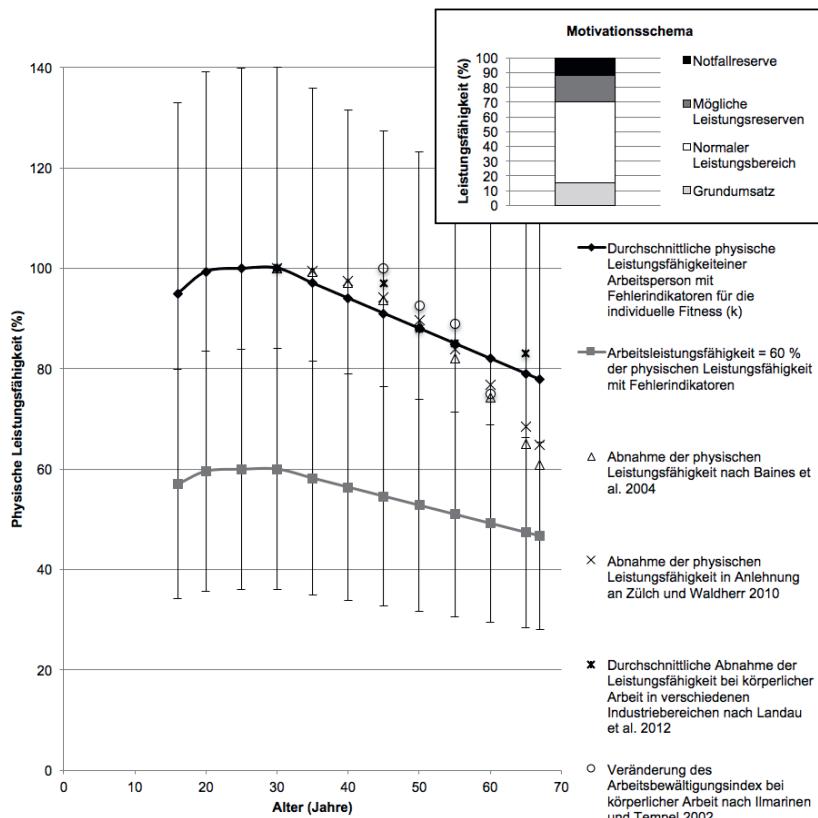
$$PAL = \begin{cases} \left( 5 \left( 1 - e^{-\frac{(Alter-16)}{2}} \right) + 95 \right) k, & 16 \dots 30 \text{ Jahre} \\ (-0,6 * Alter + 118)k, & 31 \dots 67 \text{ Jahre} \end{cases} \quad (2)$$

Dabei bedeuten:

$PAL$  Physische Leistungsfähigkeit in %

$k$  Konstante für individuelle Fitness:  $k < 1$  niedrige Fitness;  $1 \leq k \leq 2$  gute bis sehr gute Fitness

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme



**Abbildung 20:** Zusammenhang zwischen physischer Leistungsfähigkeit (PAL) und Arbeitsleistungsfähigkeit (WAL) einer Arbeitsperson

In Anlehnung an Bullinger (1994, S. 45 ff.) zeigt das Motivationsschema im oberen rechten Bereich von Abbildung 17, wie sich die Leistungsfähigkeit in vier wesentliche Bereiche unterteilt:

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

- Der Grundumsatz setzt sich aus allen lebensnotwendigen Funktionen wie Atmung, Kreislauf und Verdauung zusammen.
- Der normale Leistungsbereich umfasst den Teil der physischen Leistungsfähigkeit, welcher ohne besondere willentliche Anstrengung zur Verfügung steht. „In diesem Bereich sollte die Leistungsanforderung des Arbeitssystems liegen [...]“ (S. 45).
- Mögliche Leistungsreserven können kurzfristig für Höchstleistungen bspw. im Sport willentlich abgerufen werden.
- Notfallreserven können nicht bewusst genutzt werden. Sie stehen dem Körper als Leistungsreserven für Notfall- bzw. Gefahrensituationen zur Verfügung und werden über hormonelle Reaktionen aktiviert.

Darauf aufbauend wird die Arbeitsleistungsfähigkeit einer Person gem. Gleichung (3) mit 60 % der aktuellen physischen Leistungsfähigkeit angenommen (vgl. Feller und Müller 2014, S. 148 und Müller et al. 2015b, S. 181).

$$WAL = 0,6 * PAL \quad (3)$$

Dabei bedeuten:

**WAL** Arbeitsleistungsfähigkeit in %  
(körperliche Arbeit in der industriellen Fertigung)

Die Ausführungen bzw. Empfehlungen von Ilmarinen und Tempel (2002, S. 285) zur Gestaltung physischer Arbeitsanforderungen in Relation zur altersabhängigen physischen Kapazität von Arbeitspersonen bestätigen ergänzend Gleichung (3).

#### *4.1.2 Parametrierung der Basiskomponente Arbeitsplatz*

Die nachfolgend beschriebene Parametrierung von Arbeitsplätzen ermöglicht zum einen ihre Abbildung bzw. Integration als Modellelemente im Simulationssystem, zum anderen stellt sie eine Beurteilung der physischen Belastungen am jeweiligen Arbeitsplatz dar. Hinsichtlich einer guten Usability des Simulationstools WorkDesigner, sowohl was den Einsatz in der betrieblichen Praxis als auch die Anwendung ggf. durch ungeschulte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Fertigung anbelangt, sind vereinfachte Bewertungsschemata entwickelt worden, wonach die jeweiligen Arbeitsplatzparameter bzw. Belastungsfaktoren orientiert am Schulnotensystem von sehr gut (1) bis ungenügend (6) mit geringem Zeitaufwand vereinfacht bewertet werden können.

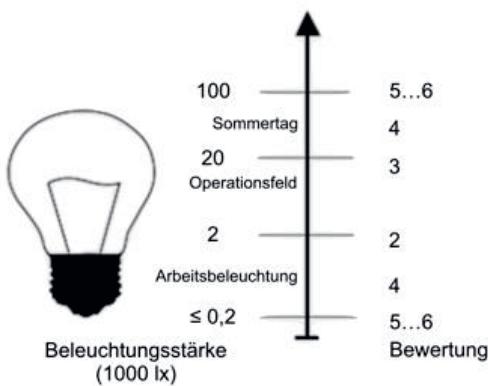
Bei der Bewertung eines Arbeitsplatzes werden fünf Belastungsfaktoren berücksichtigt. Zum einen die drei physikalischen Umweltfaktoren Beleuchtung, Klima und Lärm, welche nach Spath et al. (2012, 1655) in der betrieblichen Praxis die Belastung der Arbeitsperson durch das Arbeitsumfeld hauptsächlich prägen. Zum anderen die zwei Belastungsfaktoren Arbeitsposition (anthropometrisch) und Arbeitsintensität (physiologisch), welche im Wesentlichen die ergonomische Gestaltung von Arbeitssystemen charakterisieren (vgl. bspw. Schlick et al. 2010, S. 949, Bullinger 1994, S. 198, ArbStättV 2017, Anhang 3 Arbeitsbedingungen). Ergänzend muss darauf hingewiesen werden, dass im Rahmen einer ganzheitlichen Bewertung von Arbeitsplätzen nach dem ArbSchG (2015, §5 Abs. 3) ebenfalls psychische Belastungen bei der Arbeit zu berücksichtigen bzw. zu bestimmen sind. In der Regel werden alle physischen und psychischen Belastungen am Arbeitsplatz zunächst separiert betrachtet.

### ***Beleuchtung***

Bedingt durch die Tatsache, dass die Informationsaufnahme des Menschen bzw. einer Arbeitsperson mit bis zu 90 % aller aufgenommenen Reize hauptsächlich visuell erfolgt, bildet die Beleuchtung am Arbeitsplatz einen wesentlichen Belastungsfaktor (vgl. Spath et al. 2012, S. 1655 und Schlick et al. 2010, S. 885). Diverse Untersuchungen wie bspw. von Hartmann oder Gall und Völker (u. a. in Schlick et al. 2010, S. 900-901, Bullinger 1994, S. 98, Löhr 1976, S. 92) zeigen auf, dass sich die Beleuchtungsstärke unmittelbar auf die Arbeitsleistung einer Person auswirkt. Hierbei sind vor allem eine Steigerung der Leistungsfähigkeit (besonders bei schwierigen Arbeiten), eine Abnahme der Ermüdung, eine Steigerung der Qualität bzw. Abnahme von Fehler und eine Reduzierung von Arbeitsunfällen mit zunehmender Beleuchtungsstärke zu nennen (vgl. Bullinger 1994, S. 98, Schlick et al. 2010, S. 900-901 und Spath et al. 2012, S. 1655).

Die Gestaltung und Beurteilung der Beleuchtung am Arbeitsplatz ist maßgeblich durch die DIN EN 12464-1 „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten“ und den konkreten Anforderungen gem. ArbStättV, d. h. den technischen Regeln für Arbeitsstätten/Beleuchtung (ASR A3.4) reguliert. Hierbei stehen die Anforderungen an eine Mindestbeleuchtungsstärke je nach Arbeitsbereich, Aufgabe oder Tätigkeit nach ASR A3.4, welche Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz berücksichtigen, über den Empfehlungen der DIN EN 12464, welche im Wesentlichen eine Planungsgrundlage für Beleuchtungsanlagen bildet (vgl. DIN EN 12464-1:2011, S. 2 und ASR A3.4 2014, S. 2). Bei der Beurteilung der Beleuchtung von Arbeitsplätzen nach ASR A3.4 ist i. d. R. sowohl die Beleuchtungsstärke im Bereich der Sehaufgabe bzw. in der entsprechenden Bezugsebene (überwiegend stehende oder sitzende Tätigkeiten) als auch der Farbwiedergabe Index zu bewerten.

In Anlehnung an arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse und geltenden Gesetze, Normen und Richtlinien ist das in Abbildung 21 dargestellte Schema zur vereinfachten Bewertung der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz entwickelt worden. Da die Beleuchtungsstärke, wie bereits angeführt, bzgl. der Belastung der Arbeitsperson durch die Beleuchtung am Arbeitsplatz dominiert, wird bei der Modellierung von Arbeitsplätzen mit WorkDesigner lediglich die Beleuchtungsstärke betrachtet. Während ASR A3.4 und DIN EN 12464 tätigkeitsbezogen differenzieren bspw. zwischen Metallbearbeitung, Montage oder Bauteilprüfung, zeigt sich in der industriellen Fertigung, dass Tätigkeiten mit unterschiedlichen Anforderungen an die Beleuchtung oft an einem Arbeitsplatz ausgeführt werden; z. B. werden spanend gefertigte Werkstücke zwischen Bearbeitungsgängen auf der Maschine manuell geprüft und Vorrichtungen oder Werkzeuge durch die Werkerin / den Werker eingemessen. Die Skalierung wurde daher bewusst in weiten Stufen ausgeführt, welche ggf. mit bloßem Auge differenziert werden können (vgl. DIN EN 12464-1:2011, S.10) und eine hohe Übertragbarkeit auf diverse Arbeitsplätze in der industriellen Fertigung ermöglichen (vgl. DIN EN 12464-1:2011, S.20).



**Abbildung 21:** Schema zur vereinfachten Bewertung der Beleuchtungsstärke am Arbeitsplatz aus Feller und Müller (2014, S. 144)

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

### ***Klima***

Neben der Beleuchtung ist das Klima ein weiterer signifikanter Belastungsfaktor am Arbeitsplatz, da der Mensch nur in einem schmalen Bereich lebensfähig respektive arbeitsfähig ist. „Um gesundheitliche Schäden zu vermeiden, [muss] die Temperatur des Menschen im Körperkern, darunter versteht man das Gehirn und die inneren Bereiche des Brust- und Bauchraums ständig um 37 °C ( $\pm 0,8$  °C) betragen“ (Bullinger 1994, S. 180) bzw. geregelt werden. Die notwendige Wärme wird hierbei durch die metabolischen Prozesse der inneren Organe und der Muskeltätigkeit produziert, wobei ein kontinuierlicher Wärmeaustausch mit der Umgebung durch Wärmeleitung und Konvektion (Abgabe und Aufnahme durch Luft), Wärmestrahlung (Abgabe und Aufnahme durch Flächen) und Verdunstung (nur Abgabe durch Schweiß und Wasserdampfabgabe über die Lunge) stattfindet (vgl. Schlick et al. 2010, S. 863). Die Wärmebilanz des menschlichen Körpers sollte stets ausgeglichen sein und kann bspw. nach DIN EN ISO 7933:2004 (S. 9) wie folgt aufgestellt werden:

$$M - W = C_{\text{res}} + E_{\text{res}} + K + C + R + E + S \quad (4)$$

Dabei bedeuten:

- $M$  Energieumsatz bzw. metabolische Wärmeproduktion
- $W$  mechanische Leistung bzw. Nutzarbeit
- $C_{\text{res}}$  Konvektion durch Atmung
- $E_{\text{res}}$  Verdunstung
- $K$  Wärmeleitung über die Haut
- $C$  Konvektion
- $R$  Strahlung
- $E$  Schweiß(-verdunstung)
- $S$  Wärmespeicherung

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

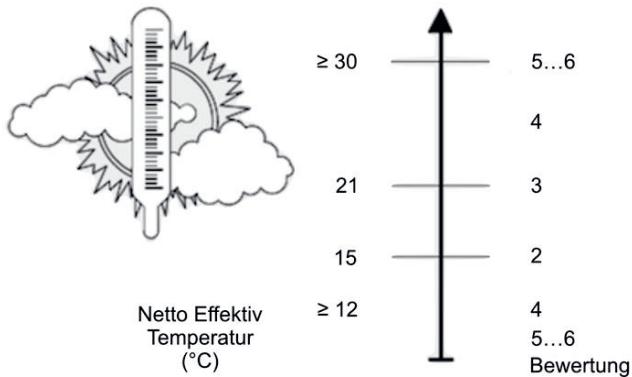
Wie aus Gleichung (4) hervorgeht, ist die Wärmeerzeugung eines Menschen bzw. einer Arbeitsperson unmittelbar abhängig von der Schwere der zu verrichtenden Arbeit. Die Wärmeabgabe ist abhängig von Lufttemperatur, -feuchte, -geschwindigkeit und Wärmestrahlung und wird durch die jeweilige (Arbeits-)Bekleidung beeinflusst (vgl. ASR A3.5 2017, S. 3). Ungünstige klimatische Bedingungen wirken sich vielfältig negativ auf die körperliche und geistige Leistungsfähigkeit, die Gesundheit und das Wohlbefinden der Arbeitsperson aus (s. ergänzend bspw. Schlick et al. 2010, S. 871-872 und Bullinger 1994, S. 180 ff.)

Die Beurteilung und Gestaltung des Klimas am Arbeitsplatz ist im Wesentlichen geregelt durch die ArbStättV bzw. explizit die technischen Regeln für Arbeitsstätten/Raumtemperatur (ASR A3.5). Insbesondere bei Arbeitsplätzen in der industriellen Fertigung ist gem. ASR A3.5 (2017, S. 3) i. d. R. die Lufttemperatur als Bewertungsgrundlage ausreichend. Bei Arbeitsplätzen mit überdurchschnittlich hohen Luftgeschwindigkeiten (Zugluft) und/oder Luftfeuchten sind diese Parameter ergänzend gem. den technischen Regeln für Arbeitsstätten/Lüftung (ASR A3.6) zu beurteilen bzw. muss ein Klimasummenmaß gebildet werden. Ein Klimasummenmaß, z. B. die Nettoeffektivtemperatur, fasst die drei Grundgrößen Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und -geschwindigkeit zu einer gefühlten Temperatur zusammen; dadurch werden unterschiedliche Klimata vergleichbar (vgl. Bullinger 1994, S. 179).

Abbildung 22 zeigt nachfolgend das Schema zur vereinfachten Bewertung des Klimas am Arbeitsplatz. Hinsichtlich einer breiten Anwendbarkeit in der industriellen Fertigung orientiert sich die Skalierung an der Nettoeffektivtemperatur. Wie bereits zuvor beschrieben ist i. d. R. die Lufttemperatur ausreichend und kann mit der Nettoeffektivtemperatur gleichgesetzt werden. Die Skalenschritte wurden in Anlehnung an die Vorgaben der ASR A3.5 (2017, S. 4 ff.) eingeteilt.

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---



**Abbildung 22:** Schema zur vereinfachten Bewertung des Klimas am Arbeitsplatz aus Feller und Müller (2014, S. 144)

## **Lärm**

Von allen physischen Umweltfaktoren wirkt sich der Belastungsfaktor Lärm am stärksten auf den Menschen aus; Lärm ist schädlich für diverse Organ- und Nervensysteme. Unter Lärm sind alle Einwirkungen von Hörschall zu verstehen, die für irgendeine Person auf irgendeine Art Gefahren für Gesundheit und/oder Sicherheit, erhebliche Nachteile bzw. Beeinträchtigungen der Leistungsfähigkeit oder Belästigungen bedeuten (vgl. Löhr 1976, S. 98 und VDI 2058 Bl. 3:2014, S. 4). Bereits geringe Schalldruckpegel  $\leq 50$  dB (bspw. einer Unterhaltung) können in Abhängigkeit von u. a. Persönlichkeitsstruktur, Gesundheit, Wohlbefinden und der jeweiligen Tätigkeit psychische Reaktionen wie Konzentrationsstörungen, Ärger oder Stress hervorrufen. Ab einem Schalldruckpegel  $\geq 65$  dB (bspw. Straßenlärm) sind Reaktionen des vegetativen Nervensystems wie bspw. eine Veränderung der Atemfrequenz oder der Durchblutung zu beobachten. Bei einem Schalldruckpegel  $> 85$  dB kommt es dann in Abhängigkeit von Einwirkdauer und Intensität zu ggf. irreversiblen Hörschäden z. T. mit chronischem Verlauf (vgl. Bullinger 1994, S. 126 ff., Schlick et al. 2010, S. 772 ff. und VDI 2058 Bl. 3:2014). Der dominante Anteil von stets über 30 % an anerkannten Berufskrankheitsfällen von Lärmschwerhörigkeit (BK-Nr. 2301) seit den 1990er Jahren unterstreicht zudem die dargestellte Signifikanz des Belastungsfaktors Lärm (vgl. Schlick et al. 2010, S. 772 und DGUV 2015, S. 62-63).

Die Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibration (LärmVibrationsArbSchV 2017) definiert verbindlich die Ermittlung und Bewertung der Gefährdung, die entsprechenden Messverfahren und -geräte (Abschnitt 2) sowie Auslösewerte und Schutzmaßnahmen bei Lärm (Abschnitt 3). Die DIN EN ISO 9612 zur Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz differenziert drei unterschiedliche Messstrategien zur Bestimmung eines Dauerschallpegeläquivalents bzw. eines Lärmäquivalents bezogen auf einen acht-stündigen Arbeitstag:

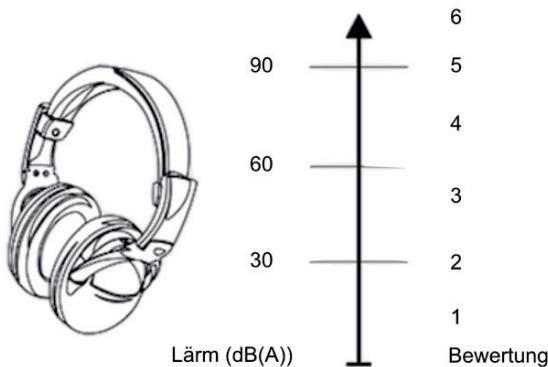
## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

- Die tätigkeitsbezogene Messung, bei welcher ein repräsentativer Arbeitstag in zeitdiskrete Tätigkeiten mit in sich gleichartiger Geräuschimmission untergliedert wird (vgl. TRLV/Lärm/Teil 2 2017, S. 9 und DIN EN ISO 9612:2009, S. 13 ff.).
- Die berufsbildbezogene Messung, ein zeitlich zufälliges Stichprobenverfahren, bei welchem möglichst homogene Gruppen eines bestimmten Berufsbilds mit gleicher Geräuschexposition voneinander differenziert werden (vgl. TRLV/Lärm/Teil 2 2017, S. 9 und DIN EN ISO 9612:2009, S. 17 ff.).
- Die Ganztagsmessung, eine mehrtägige Langzeitmessung jeweils über die Gesamtdauer repräsentativer Arbeitstage (vgl. TRLV/Lärm/Teil 2 2017, S. 9 und DIN EN ISO 9612:2009, S. 19 ff.).

Bezüglich der Modellierung von Arbeitsplätzen wird die tätigkeitsbezogene Messung bzw. Beurteilung angewendet. Abweichend von den Ausführungen der Norm wird kein Lärmäquivalent für einen Tag gebildet, sondern für die Dauer der Simulation eine ganzheitliche Belastung der Arbeitsperson berechnet (s. Unterkapitel 4.3).

Das Schema zur vereinfachten Bewertung von Lärm am Arbeitsplatz ist in Abbildung 23 dargestellt. Bewertungsgrundlage ist der mittels A-Filter frequenzbewertete Schalldruckpegel, welcher der Charakteristik des menschlichen Ohrs nachempfunden ist. Die Skalierung der Bewertung orientiert sich an den verbindlichen Vorgaben und Empfehlungen der LärmVibrationsArbSchV (2016, §§3 und 6), der TRLV/Lärm/Teil 1 (2017, S. 11), der VDI 2058 Bl. 3:2017 (S. 4 ff.), der DIN EN ISO 11690-1:1996 (S. 12) und den aktuellen Unfallverhütungsvorschriften.



**Abbildung 23:** Schema zur vereinfachten Bewertung von Lärm am Arbeitsplatz aus Feller und Müller (2014, S. 144)

### **Arbeitsposition**

Bei der Bewertung der Arbeitsposition kann generell zwischen stehenden, sitzenden, liegenden, knienden und hockenden Körperstellungen, d. h. der Stellung des Körpers zur Arbeitsaufgabe, differenziert werden (vgl. Bullinger 1994, S. 211 und REFA 1991, S. 229). Die häufigsten Körperstellungen am Arbeitsplatz sind Stehen und Sitzen, jeweils mit einer Vielzahl von unterschiedlichen Bewegungsvarianten bzw. Körperhaltungen von entsprechend unterschiedlicher Belastung. Beispielsweise lassen sich allein vierzehn verschiedene Körperhaltungen beim Sitzen differenzieren von z. T. signifikanter Differenz vor allem der muskuloskelettalen und auch der kardio-pulmonalen Belastung (vgl. Feller et al. 2017, S. 98 ff.). Aus physiologischer Perspektive sind sitzende Körperstellungen auf Grund ihrer im Verhältnis zu stehenden Körperstellungen geringeren Belastung zu präferieren (vgl. REFA 1991, S. 229). Nach der Verordnung über Arbeitsstätten (ArbStättV 2017, Anhang 3 Arbeitsbedingungen) „sind [daher] den

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

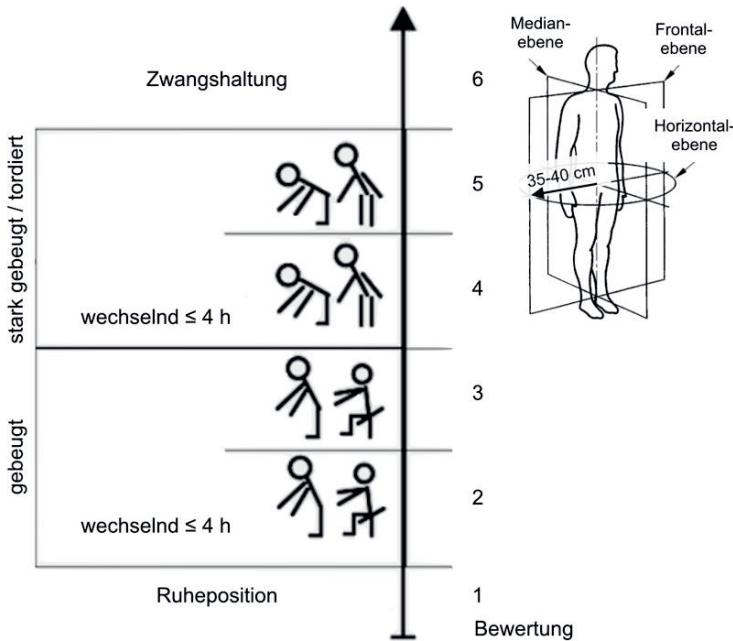
---

Beschäftigten am Arbeitsplatz Sitzgelegenheiten zur Verfügung zu stellen“, sofern „die Arbeit ganz oder teilweise sitzend verrichtet werden [kann] oder es der Arbeitsablauf zulässt.“ Die Arbeitsposition hat unmittelbar Einfluss auf die Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Arbeitsperson und auf die Arbeitssicherheit (vgl. Bullinger 1994, S. 197).

Für die Beurteilung und die Gestaltung der Arbeitsposition steht eine breite Palette an Normen, Richtlinien und Verfahren (heute i. d. R. computerbasiert) zur Verfügung; bspw. die Reihe der DIN EN 1005 sowie die DIN EN ISO 14738 zur Sicherheit von Menschen, die Reihe der DIN 33411 zu Körperkräften von Menschen oder die federführend von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) entwickelte Leitmerkmalmethode (diese inkludiert u. a. auch die Arbeitsintensität).

Für das entwickelte Simulationsmodell wurde das in Abbildung 24 dargestellte Schema zur vereinfachten Bewertung der Arbeitsposition aufgestellt. Im Wesentlichen orientiert an der Reihe der DIN EN 1005, bildet das Bewertungsschema einen für die Simulation hinreichend genauen Kompromiss zwischen Usability (d. h. Anwendung durch ggf. ungeschultes Personal und ein möglichst breites Feld an Arbeitsplätzen bzw. Tätigkeiten in der industriellen Fertigung) und Genauigkeit.

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme



**Abbildung 24:** Schema zur vereinfachten Bewertung der Arbeitsposition aus Feller und Müller (2014, S. 144)

Wie die Darstellung (Abb. 24) zeigt, werden lediglich sechs unterschiedliche Arbeitspositionen differenziert. Hierbei begrenzen Ruheposition (Liegen) und Zwangshaltung (Haltung erzwungen durch Arbeitsaufgabe) die Skalierung von sehr komfortabel (1) bis nicht akzeptabel (6). Mit gut bis befriedigend werden gebeugte stehende und sitzende Positionen bewertet, bei denen die Arbeitsaufgabe innerhalb eines Radius von 35 bis 40 cm (in Median-, Frontal- und/oder Horizontalebene bezogen auf die Körperschwereachse) ausgeführt werden kann und keine Verdrehung in Horizontalebene auftritt. Die hierbei auftretenden muskuloskelettauen Belastungen sind für durchschnitt-

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

liche Arbeitspersonen akzeptabel. Mit ausreichend bis mangelhaft werden stark gebeugte stehende Positionen bewertet, bei denen die Arbeitsaufgabe über den o. g. Radius hinaus bzw. außerhalb ausgeführt wird und ggf. zusätzlich eine Verdrehung um die Körperlängsachse stattfindet. Hierbei auftretende muskuloskelettale Belastungen sind z. T. mehr als doppelt so hoch wie die Belastungen innerhalb des angegebenen Radius. Bedingt durch die starke Beugung des Körpers wird zudem das kardiopulmonale System in seiner Leistungsfähigkeit eingeschränkt, was die Belastung der Arbeitsperson zusätzlich erhöht.

*Starck (1938) beschreibt in ihrer Dissertation „Untersuchung über den Einfluss verschiedener Körperhaltungen auf die Vitalkapazität der Lunge“ den z. T. signifikanten Einfluss der Haltung auf die Form- und Größenänderung des Thorax, die Beeinflussung von Atem- und Bauchmuskulatur, die Durchblutung vor allem der Lunge und die in Summe resultierende Beeinflussung des kardiopulmonalen Systems.*

Die feinere Skalierung innerhalb der Bereiche „gebeugt“ und „stark gebeugt“ bezieht die kumulierte Häufigkeit von Positionswechseln am Arbeitsplatz bezogen auf eine Tagessarbeitszeit von acht Stunden mit ein. Beispielsweise wechselt eine Zerspanungsmechanikerin bzw. ein Zerspanungsmechaniker bei der Bedienung eines Bearbeitungszentrums zwischen „gebeugt, wechselnd“ bei der Interaktion mit der Maschinensteuerung und „stark gebeugt, wechselnd“ beim Wechseln von Werkstücken im Maschinenarbeitsraum. Eine Mitarbeiterin bzw. ein Mitarbeiter am Fließband verbringt hingegen i. d. R. die gesamte Arbeitszeit in „gebeugter“ nicht wechselnder Position.

### **Arbeitsintensität**

Final schließt die Bewertung der Arbeitsintensität die Parametrierung der Basiskomponente Arbeitsplatz ab. Wie bereits zuvor mehrfach erwähnt, wurde bei der Entwicklung des Simulationsmodell hauptsächlich körperliche Arbeit in der industriellen Fertigung fokussiert. Die nachfolgenden Inhalte bzgl. des Belastungsfaktors Arbeitsintensität sind daher aus physiologischer Perspektive ausgeführt bzw. beziehen sich ausschließlich auf energetische Arbeit.

Der integrale Belastungsfaktor Arbeitsintensität fasst zusammen, welche Kraft, für welche Dauer bzw. welchen Weg und wie häufig in einem bestimmten Zeitraum aufgebracht wird (s. ergänzend Bokranz und Landau 1991, S. 13 ff.). Die Arbeitsintensität beschreibt somit unmittelbar die Höhe der Leistung, die von einer Arbeitsperson zur Umsetzung der jeweiligen Arbeitsaufgabe abverlangt wird. Hinsichtlich der Auswirkungen der Arbeitsintensität (bei körperlicher Arbeit) auf die Arbeitsperson muss auf die besondere Problematik hingewiesen werden, dass „hohe Beanspruchungen häufig subjektiv nicht sofort spürbar sind, sondern erst längerfristig in Form von Schädigungen und Erkrankungen wirksam werden (z. B. Muskelerkrankungen, Sehnenscheidenentzündung und Wirbelsäulenschädigungen)“ (Schlick et al. 2010, S. 229). Die aktuellen Statistiken des Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung e.V. (DGUV 2015) unterstreichen diese Problematik; bspw. wurden 2015 über 17 % der durch physikalische Einwirkungen verursachten und anerkannten Berufskrankheiten durch mechanische Einwirkungen verursacht (S. 56-57).

Die Basis für die Beurteilung der Arbeitsintensität bildet die Aktionskraft, d. h. die vom Körper nach außen wirkende Kraft bei der Ausübung einer Tätigkeit (vgl. DIN 33411-1:1982, S. 2). Ähnlich wie für die Beurteilung und Gestaltung der Arbeitsposition, steht auch bei der Beurteilung der Arbeitsintensität respektive der Aktionskraft ein breites

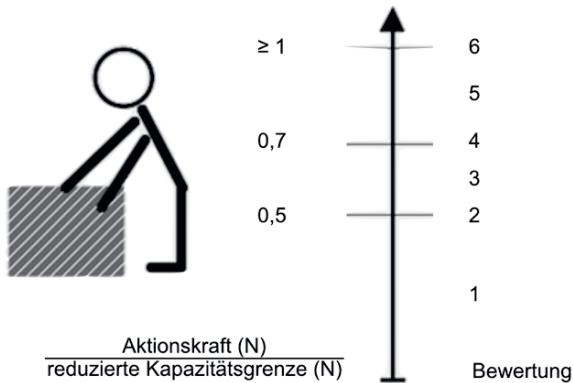
#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Spektrum an Normen, Richtlinien und Verfahren zur Verfügung. Hinsichtlich der Analyse von Aktionskräften weist Schlick et al. (2010) explizit darauf hin, dass „eine alle praktischen Randbedingungen berücksichtigende Einschätzung der menschlichen Körperkräfte [...] aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren [...] nur begrenzt möglich“ (S. 251) ist. Weiter beschreibt Schlick et al. (2010, S. 251 ff.) exemplarisch einige Verfahren, „aus denen die zumutbare Kraftausübung für den Einzelfall abgeleitet werden kann“ (S. 251); u. a. wird auf die DIN EN 1005-3 verwiesen, die im Rahmen der Sicherheit von Maschinen ein Verfahren zur Risikobewertung von Aktionskräften beschreibt.

Abbildung 25 zeigt das Schema zur vereinfachten Bewertung der Arbeitsintensität, welches auf der DIN EN 1005-3 basiert. Die reduzierte Kapazitätsgrenze wird nach DIN EN 1005-3:2009 (S. 10-12) gem. Gleichung (5) berechnet. Die Maximalkraft kann arbeitsplatz- respektive tätigkeitsbezogen entsprechend der jeweiligen Kraftrichtung, Körperstellung bzw. -haltung, Kraftausübungsart und geschlechtsspezifisch bspw. der DIN 33411-5:1999 zu Körperkräfte des Menschen entnommen werden. Die Aktionskraft ist experimentell zu bestimmen bzw. aus der Beobachtung abzuschätzen, zweckmäßig in den Stufen  $\leq 50$ ,  $100$ ,  $150$ ,  $250$ ,  $\geq 300$  (N). Die Skalierung der Bewertung orientiert sich an der Einstufung des Risikos nach DIN EN 1005-3:2009 (S. 12).

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme



**Abbildung 25:** Schema zur vereinfachten Bewertung der Arbeitsintensität aus Feller und Müller (2014, S. 144)

$$F_{Br} = F_B * m_v * m_f * m_d \quad (5)$$

Dabei bedeuten:

- $F_{Br}$  reduzierte Kapazitätsgrenze (N)
- $F_B$  isometrische Maximalkraft (N), bezogen auf männliche Arbeitspersonen  
5. Perzentil
- $m_v$  Korrekturfaktor für die Bewegungsgeschwindigkeit
- $m_f$  Korrekturfaktor für die Betätigungs frequenz in Abhängigkeit der Betätigungszeit
- $m_d$  Korrekturfaktor für die kumulierte Dauer (h) vergleichbarer Tätigkeiten

Die beschriebenen Parameter der Basiskomponente Arbeitsplatz werden u. a. geschlechtsspezifisch gewichtet (s. Unterkapitel 4.2) und zu einer ganzheitlichen Arbeitsbelastung verrechnet (s. Unterkapitel 4.3). Die vorgestellten Bewertungsschemata

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

wurden im Rahmen der Feldstudie zur Validierung des Simulationstools eingesetzt (s. Kapitel 6).

### 4.2 Beschreibung individueller und altersassozierter physischer Veränderungen

„Eine alterss- bzw. alterungsgerechte Arbeitsgestaltung macht es sich zur Aufgabe, in hinreichendem Maße Altersverläufe arbeitsrelevanter Mitarbeiterfähigkeiten und -kompetenzen sowie resultierende Anforderungen bei der Gestaltung von Arbeitssystemelementen zu berücksichtigen.“ (Egbers et al. 2010, S. 13) Die technischen Regeln für Arbeitsstätten weisen bzgl. der Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen (ASR V3, 2017) explizit darauf hin, dass „die Veränderung der Leistungsvoraussetzungen der Beschäftigten im Verlauf der Nutzungsdauer der Arbeitsstätte“ (S. 5) bereits bei der Planung berücksichtigt werden soll.

Wie bspw. von Egbers et al. (2010) oder der ASR V3 gefordert, hat das entwickelte diskrete Simulationsmodell die Fähigkeit bei der Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen, insbesondere bei der Simulation mittlerer und langfristiger Zeiträume, individuelle und altersassoziierte physische Veränderungen der Erwerbstätigen zu berücksichtigen. Zum einen durch die bereits in Unterkapitel 4.1.1 beschriebene alters-, geschlechts- und fitnessabhängige diskrete Bestimmung von physischer Leistungsfähigkeit und Arbeitsleistungsfähigkeit; zum anderen durch die nachfolgend dargestellte mitarbeiterindividuelle Modifizierung bzw. Gewichtung der in Unterkapitel 4.1.2 vorgestellten Belastungsfaktoren für jeden diskreten Simulationszeitpunkt.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Altersassoziierte physische bzw. biologische Veränderungen sind naturgemäß stets Minderungen körperlicher Fähigkeiten (vgl. Zülch et al. 2013, S. 67). Unter Berücksichtigung des Fokus für das Simulationsmodell auf hauptsächlich körperliche Arbeit in der industriellen Fertigung, sind für eine zeitdiskrete mitarbeiterindividuelle Anpassung der Belastungsfaktoren vier Gewichtungsfaktoren definiert worden. Für eine muskuläre und anthropometrische Individualisierung werden die Gewichtungsfaktoren  $k_s$  Geschlecht und  $k_o$  Sauerstoffaufnahme festgelegt. Die Gewichtungsfaktoren  $k_v$  visuelle Fähigkeit und  $k_a$  auditive Fähigkeit werden für eine Wahrnehmungsspezifische und ergonomische Individualisierung bestimmt.

Abbildung 26 zeigt die Zuordnung von Belastungs- und Gewichtungsfaktoren. Der Belastungsfaktor Beleuchtung wird mit dem Gewichtungsfaktor  $k_v$  multipliziert, um mit zunehmendem Alter einen steigenden Lichtbedarf und eine sinkende Anpassungsfähigkeit des Auges abzubilden. Durch das Produkt aus dem Belastungsfaktor Klima und den Gewichtungsfaktoren  $k_s$  und  $k_o$  wird eine geschlechtsabhängig und altersspezifische Sauerstoffaufnahmefähigkeit berücksichtigt. Der Belastungsfaktor Lärm wird mit dem Gewichtungsfaktor  $k_a$  multipliziert, zur Simulation einer Abnahme der Hörfähigkeit mit dem Alter (auch unter Berücksichtigung geschlechtsspezifischer Unterschiede, s. Unterkapitel 4.2.4). Bei der Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsposition, werden durch die Faktoren  $k_s$ ,  $k_o$  und  $k_v$  mehrere Aspekte simultan abgedeckt: geschlechtspezifische unterschiedliche Körpermaße, damit verbundene abweichende Sichtfelder und Arbeitsbereiche und ggf. eine entsprechend haltungsbedingte Beeinträchtigung der Sauerstoffaufnahmefähigkeit. Der Belastungsfaktor Arbeitsintensität wird mit den Gewichtungsfaktoren  $k_s$  und  $k_o$  multipliziert, um geschlechts- und altersspezifische Unterschiede der Muskelkraft zu berücksichtigen.

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Belastungsfaktoren $S_i$	Gewichtungsfaktoren $k_i$			
	$k_s$	$k_o$	$k_v$	$k_a$
Beleuchtung			Alter $\geq 20$	
Klima	ja	Alter $\geq 20$		
Lärm	(ja)			Alter $\geq 30$
Arbeitsposition	ja	Alter $\geq 20$	Alter $\geq 20$	
Arbeitsintensität	ja	Alter $\geq 20$		

**Abbildung 26:** Matrix für die Zuordnung von Belastungs- und Gewichtungsfaktoren aus Feller und Müller (2014, S. 145)

Die beschriebene Gewichtung der Belastungsfaktoren ist gem. Gleichung (6) in den Simulator des Simulationstools WorkDesigner eingebunden (s. Abb. 15, vgl. Feller und Müller 2014, S. 145, 148, 149 und Müller et al. 2015b, S. 182). Hierbei ist das Produkt  $S_i^*$  aus Belastungsfaktor  $S_i$  und Gewichtungsfaktoren  $k_i$  logisch begrenzt auf den Wertebereich zwischen 1 (sehr gut, d. h. hervorragend geringe Belastung) und 6 (ungenügend, d. h. inakzeptabel hohe Belastung). Die Implementierung der Übertragungsfunktionen in das Simulationssystem ist in Kapitel 5 „prototypische Umsetzung des Simulationsmodells als Software-Applikation“ ausführlich dargestellt.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

$$S_i^* = \begin{cases} 6, & S_i \prod_{i=1}^n k_i(\text{Geschlecht, Alter}) > 6 \\ S_i \prod_{i=1}^n k_i(\text{Geschlecht, Alter}), & S_i \prod_{i=1}^n k_i(\text{Geschlecht, Alter}) = 1 \dots 6 \\ 1, & S_i \prod_{i=1}^n k_i(\text{Geschlecht, Alter}) < 1 \end{cases} \quad (6)$$

Dabei bedeuten:

- $S_i^*$  gewichteter Belastungsfaktor  
 $S_i$  Belastungsfaktor  
 $k_i$  Gewichtungsfaktor

Die benannten Gewichtungsfaktoren und ihre jeweils explizite Funktion in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter werden in den nachfolgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben.

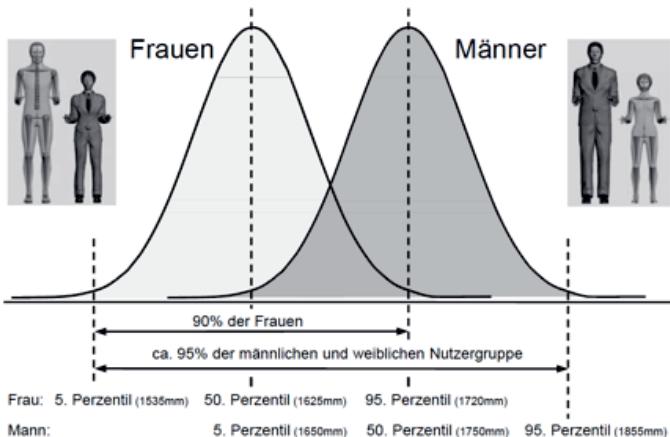
### 4.2.1 Geschlecht

Da die Generierung von Arbeitsplätzen zunächst unabhängig von der Arbeitsperson objektiv erfolgt, bzw. bezogen auf eine fiktive männliche Arbeitsperson, ist bei der Simulation von Arbeitssystemen eine Individualisierung der Arbeitsplatzparameter zwingend erforderlich. Bedingt durch die Fokussierung auf hauptsächlich körperliche Arbeit in der industriellen Fertigung, sind geschlechtsspezifische anatomische und physiologische Unterschiede der Arbeitspersonen, insbesondere des Körperbaus und der Muskelkraft, zu berücksichtigen (s. ergänzend Luczak 1993, S. 34 oder Schlick et al. 2010, S. 91).

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Abbildung 27 visualisiert nachfolgend den Unterschied und die Verteilung der Körpergrößen von Männern und Frauen basierend auf Daten der DIN 33402-2 (aktualisiert 2005). Geschlechtsspezifische Unterschiede des Körperbaus sind besonders bei der personenbezogenen und ergonomischen Bewertung von Arbeitssystemen von großer Relevanz. Unterschiedliche Körpermaße können ggf. zu deutlich abweichenden Körperhaltungen und damit verbundenen Belastungen von Männern und Frauen bei der Ausübung gleicher Tätigkeiten führen. Beispielsweise ändert sich bei einem Scharniergelenk (z. B. Ellbogen) mit der Winkelstellung der Hebelarm des Muskels. Das bedeutet vereinfacht bezogen auf den menschlichen Arm, dass mit zunehmendem Winkel zwischen Ober- und Unterarm (Streckung) das leistbare Drehmoment um den Ellbogen abnimmt (vgl. Brinckmann et al. 2012, S. 196-199). Ebenso ändert sich bspw. mit der Haltung des Oberkörpers (gestreckt oder gebeugt) die Belastung der Lendenwirbelsäule, was besonders beim Heben und Tragen von Lasten von Bedeutung ist. Vereinfacht kann hierbei ausgesagt werden, dass je weiter die Last vom Körper entfernt ist und je stärker der Oberkörper gebeugt ist, umso höher die Belastung der Lendenwirbelsäule ist (vgl. Brinckmann et al. 2012, S. 319-322). Der Einfluss von Körpermaßen auf die Arbeitsposition wird im weiteren Verlauf des Unterkapitels noch an einem Anwendungsbeispiel konkretisiert.



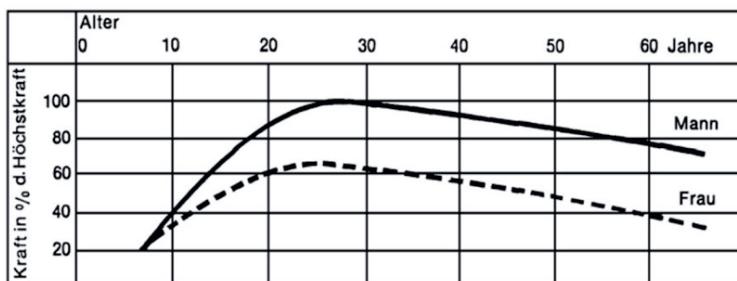
**Abbildung 27:** Einteilung der Körperhöhen in Größenklassen nach DIN 33402-2 aus Schlick et al. (2010, S. 94)

Abbildung 28 stellt die Abhängigkeit der Muskelkraft von Lebensalter und Geschlecht dar. Neben Alter und Geschlecht ist die Größe der maximal erzeugbaren Muskelkraft von weiteren individuellen Einflussfaktoren wie Konstitution (Menschentyp, Körperbau), Kondition (Trainings-, Ermüdungs- und Gesundheitszustand) und Körpersymmetrie abhängig (vgl. Löhr 1976, S. 69). Konkreter bedeutet dies, dass „neben der Kapazität der Lunge und der Diffusion“ (d. h. dem Gasaustausch in den Lungen und im Gewebe) „die Funktionsfähigkeit des Herzens, des Blutes und der Gefäße ausschlaggebend für die spätere Abgabe mechanischer und thermischer Energie im Muskel“ ist (Bokrancz und Landau 1991, S. 214). Wie in Abbildung 28 deutlich erkennbar, wird die maximale Muskelkraft unmittelbar mit bzw. nach Abschluss der Pubertät (etwa 13. bis 20. Lebensjahr) erreicht, d. h. nach Abschluss von Wachstum und Reifung u. a. des Skeletts, der Muskulatur und des Herzkreislaufsystems. Auch ist ersichtlich, wie sich vor allem während der Pubertät mit dem Wandel von Körperproportion, Körper-

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

zusammensetzung und sexueller Reifung die jährliche Leistungszuwachsrate von Jungen und Mädchen bzw. Männern und Frauen unterschiedlich entwickelt. Letztlich erreichen Frauen ihre maximale Muskelkraft etwa 4 bis 6 Jahre früher als Männer. Im Wesentlichen bedingt durch die unterschiedliche Körperkomposition (Körperfettanteil und Muskelmasse) und die unterschiedliche Sauerstoffaufnahmefähigkeit von Männern und Frauen ist deren Muskelkraft entsprechend anders gestaltet (vgl. Grupe et al. 2005, S. 271 ff. und Schlick et al. 2010, S. 91-95, 118-119).



**Abbildung 28:** Abhängigkeit der Muskelkraft von Lebensalter und Geschlecht aus Schlick et al. (2010, S. 93), u. a. auch in Bokrancz und Landau (1991, S. 124) und Löhr (1976, S. 70)

Auf Grundlage der dargestellten biologischen Unterschiede von Männern und Frauen wurde der Gewichtungsfaktor Geschlecht wie folgt definiert:

$$k_s = \begin{cases} 1, & \text{Mann} \\ 2, & \text{Frau} \end{cases} \quad (7)$$

Dabei bedeutet:

$k_s$       Gewichtungsfaktor Geschlecht

*Wakula et al. 2009 haben Untersuchungen mit Probanden zu maximalen statischen Ganzkörperkräften bei Montagetätigkeiten in stehenden, sitzenden und knienden Körperpositionen durchgeführt und in einem montagespezifischen Kraftatlas zusammengefasst. Die angegebenen Kraftwerte sind für Frauen mit einem Korrekturfaktor von 0,5 zu multiplizieren.*

Der Einfluss des Gewichtungsfaktors  $k_s$  auf die einzelnen Belastungsfaktoren (s. ergänzend Abb. 26) ist nachfolgend für jeden einzelnen Belastungsfaktor detailliert und z. T. anhand eines Beispiels beschrieben.

#### **Geschlechtsspezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Klima**

Wie bereits in Unterkapitel 4.1.2 zum Belastungsfaktor Klima beschrieben, strebt die Thermoregulation des Menschen nach einer ausgeglichenen Wärmebilanz zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur. Dies geschieht u. a. durch Verdunstung auf der Hautoberfläche und in den Lungen und Konvektion über die Haut. Zur Veranschaulichung geschlechtsspezifischer Unterschiede bei der Gewichtung des Belastungsfaktors Klima, werden nachfolgend Wärmeleitung und Konvektion an die umhüllende Luft (Gleichung (8); Schlick et al. 2010, S. 863) und die Wärmeleitung durch Schweißsekretion und Wasserdampfabgabe über die Lunge (Gleichung (9); Schlick et al. 2010, S. 864) genauer betrachtet.

$$Q_L = \alpha(t_0 - t_L)A_L \quad (8)$$

Dabei bedeuten:

- $Q_L$  Wärmeleitung und Konvektion an die umhüllende Luft  
 $\alpha$  Wärmeübergangskoeffizient (hier abhängig von der Luftgeschwindigkeit)  
 $t_0$  Oberflächentemperatur des Körpers

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

$t_L$  Temperatur der umgebenden Luft

$A_L$  Fläche des Körpers

Aus Gleichung (8) geht hervor, dass das Delta zwischen der Oberflächentemperatur des Körpers und der Luft sowie die Fläche des Körpers, die Wärmeleitung und Konvektion an die umhüllende Luft maßgeblich beeinflussen. Nach Kingma und van Marken Lichtenbelt (2015, S. 1054) haben Frauen und Männer unterschiedliche Hauttemperaturen bzw. abweichende Körperoberflächentemperaturen: Männer 32,8 °C bis 33,8 °C, Frauen 32,4 °C bis 33,6 °C. Grund hierfür ist u. a. der unterschiedliche Körperfettanteil von Männern und Frauen. Weiter ist ersichtlich, dass sich der bereits beschriebene Größenunterschied von Männern und Frauen ebenfalls auf die Wärmeleitung und Konvektion auswirkt. In Übereinstimmung mit Kingma und van Marken Lichtenbelt (2015) bedeutet dies zusammengefasst, dass Frauen in Relation zu Männern eine geringere Wärmeleitung und Konvektion an die umhüllende Luft haben.

$$Q_V = \beta(P_0 - P_L)A_V \quad (9)$$

Dabei bedeuten:

$Q_V$  Wärmeleitung durch Schweißsekretion und Wasserdampfabgabe über die Lunge

$\beta$  Verdunstungszahl

$P_0$  Dampfdruck, Körperoberfläche

$P_L$  Dampfdruck, umgebende Luft

$A_V$  (Körper-)Oberfläche

Wie Gleichung (9) zeigt, spielt der Größenunterschied von Männern und Frauen auch eine wesentliche Rolle hinsichtlich der Wärmeleitung durch die Verdunstung von

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Schweiß auf der Haut und die Wasserdampfabgabe über die Lunge. Hierbei ist supplementär anzumerken, dass Frauen eine etwa 10 % geringere Lungenvitalkapazität als Männer haben (s. ergänzend Unterkapitel 4.2.2 Sauerstoffaufnahme).

Abschließend muss darauf hingewiesen werden, dass Frauen, bedingt durch eine andere Körperkomposition als Männer, einen in Relation 5 % bis 10 % niedrigeren Energie-(grund)umsatz und analog eine unterschiedliche Wärmebilanz haben (vgl. Löhr 1976, S. 24 und Kingma und van Marken Lichtenbelt 2015) Weiter ist kritisch anzumerken, dass die Anpassung des Belastungsfaktors Klima an weibliche Erwerbstätige durch Multiplikation mit dem Gewichtungsfaktor  $k_s = 2$  den akzeptablen Temperaturbereich für körperliche Arbeit theoretisch auf  $> 12^\circ\text{C}$  bis  $< 21^\circ\text{C}$  einschränkt. Die geschlechtsspezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Klima verhält sich somit kontrovers zu den Ergebnissen von Kingma und van Marken Lichtenberg (2015). Diese haben in ihrer Studie zur komfortablen Gestaltung des Raumklimas bei leichter Bürotätigkeit für Männer und Frauen abweichende Temperaturkomfortzonen identifiziert. Der tatsächliche Energieumsatz von Frauen ist nach Kingma und van Marken Lichtenberg (2015) in Relation zu den üblichen Ergonomie-Standartwerten ca. 20 % bis 30 % geringer (S. 1055), was u. a. unter Berücksichtigung der zuvor skizzierten geschlechtsspezifischen Unterschiede bei der Wärmeübertragung zu höheren Wohlfühltemperaturen am Arbeitsplatz führt. Letztlich besteht ein Forschungsdesiderat bzgl. geschlechtsspezifischer Temperaturkomfortzonen bei körperlicher Arbeit in der industriellen Fertigung.

### **Geschlechtsspezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Lärm**

Die geschlechtsspezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Lärm erfolgt im Gegensatz zu den übrigen relevanten Belastungsfaktoren nicht durch den der muskulären

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

und anthropometrischen Individualisierung zugeordneten Gewichtungsfaktor  $k_s$ , sondern ausschließlich durch den wahrnehmungsspezifischen bzw. ergonomischen Gewichtungsfaktor  $k_a$ . Die Abbildung von alters- und geschlechtsspezifischen auditiven Veränderungen ist detailliert nachfolgend im Unterkapitel 4.2.4 beschrieben.

### ***Geschlechtsspezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsposition***

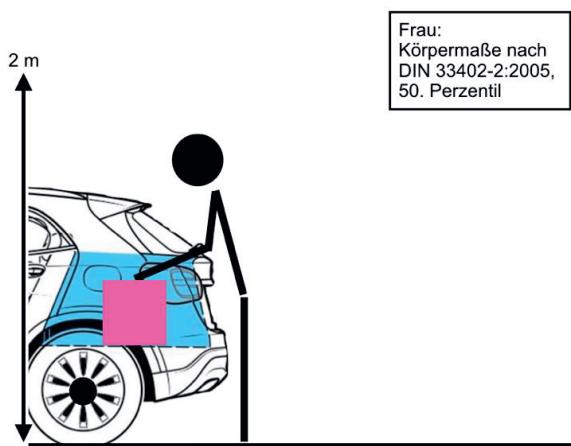
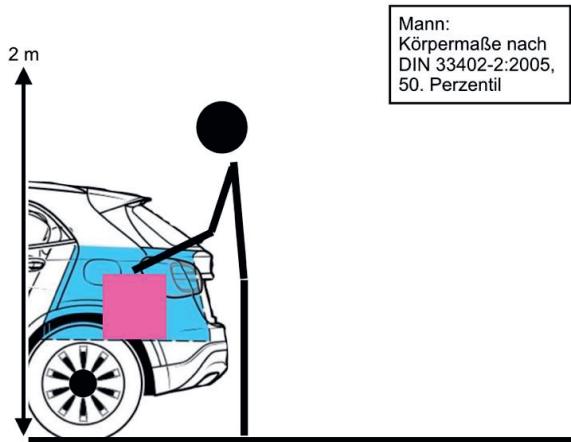
Der Einfluss unterschiedlicher Körpermaße von erwachsenen Männern und Frauen soll nachfolgend an einem einfachen alltäglichen Beispiel dargestellt werden.

#### ***Beispiel Körpermaße***

Ein Sechserträger Mineralwasser (ca. 100 N) wird von einer männlichen und einer weiblichen erwachsenen Person einhändig in den Kofferraum eines Kompaktklasse-Pkw gehoben (s. Abb. 29). Abbildung 29 zeigt, wie die Frau in Relation zum Mann, bedingt durch ihre geringeren Körpermaße bspw. von Körper-, Schulter-, Schritthöhe und Reichweite der Arme, eine deutlich stärker gebeugte Körperhaltung beim Heben der Last einnimmt. Um unkomfortabel hohe Kräfte und Momente vor allem im Oberarm, der Schulter und des Rückens zu reduzieren, folgt der Oberkörper regulierend der Last, wodurch sich der Kraftangriffspunkt belastungsreduzierend verlagert, d. h. Armreichweite und Höhenwinkel werden reduziert bzw. optimiert.

4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

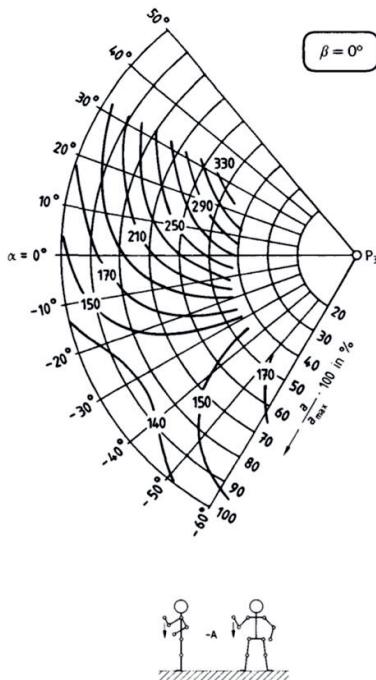
---



**Abbildung 29:** Qualitativer Vergleich der Körperhaltung von einem mittelgroßen Mann (oben) und einer mittelgroßen Frau (unten) beim einhändigen Heben eines Sechserträgers Mineralwasser (pink) in den Kofferraum (blau) eines Kompaktklasse-Pkw

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

Eine ergänzende Betrachtung der maximalen statischen Aktionskräfte in Abhängigkeit von relativer Armreichweite und Höhenwinkel bspw. nach DIN 33411-4 (s. Abb. 30) veranschaulicht, dass eine Frau, bedingt durch ihre in Relation zum Mann etwa um die Hälfte geringere Muskelkraft, die Tätigkeit in einer vergleichsweise stärker gebeugten Körperhaltung ausführt.



**Abbildung 30:** Kraftisodyne für Männer, Kraftrichtung senkrecht nach unten, einhändig, Darstellung entnommen aus DIN 33411-4 (1987, S. 8), die entsprechende Kraftisodyne für Frauen ist in der DIN 33411-4 nicht beschrieben

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Die Bewertung der Körperhaltungen für das Anwendungsbeispiel (Abb. 29) gem. des in Unterkapitel 4.1.2 vorgestellten Schemas zur vereinfachten Bewertung der Arbeitsposition (Abb. 24) ergibt für den Mann einen Belastungswert von 2, für die Frau einen Belastungswert von 4. Aus dem Beispiel wird ersichtlich, dass der Belastungsfaktor Arbeitsposition für Frauen bzw. weibliche Erwerbstätige mit dem Gewichtungsfaktor  $k_s = 2$  zu korrigieren ist.

Der Gewichtungsfaktor Geschlecht kann mit  $k_s = 2$  bzgl. der Körpergröße für die Mehrheit der erwachsenen Erwerbstätigen angenommen werden. Die relative Differenz der Körpermaße von Männern und Frauen ist für kleine, mittelgroße und große Erwachsene jeweils in etwa gleich und hat je nach Körpermaß – bspw. Körperhöhe, Reichweite der Arme oder Oberarmlänge – ein Delta von ca. 10 % (s. Abb. 27 und Körpermaße nach DIN 33402-2:2005, 50. Perzentil).

### **Geschlechtsspezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsintensität**

Der Einfluss unterschiedlicher Körperkräfte von erwachsenen Männern und Frauen soll nachfolgend an dem bereits bekannten Beispiel „Heben eines Sechserträgers Mineralwasser“ verdeutlicht werden.

### **Beispiel Körperkräfte**

Ein Sechserträger Mineralwasser (ca. 100 N) wird jeweils von einer männlichen und einer weiblichen erwachsenen Person einhändig vom Boden gehoben.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Maximale Körperkräfte nach DIN 33411-5:

$F_{Bw}$  271 N (Tab. 6 einhändige Kraftausübung, 5. Perzentil Frauen)

$F_{Bm}$  560 N (Tab. 6 einhändige Kraftausübung, 5. Perzentil Männer)

Berücksichtigung von Geschwindigkeit, Häufigkeit und Dauer der Tätigkeit nach DIN EN 1005-3:

$m_v$  0,8 (Bewegung eindeutig feststellbar)

$m_f$  0,4 (Betätigungszeit > 3 s, Betätigungs frequenz > (0,2...2) min<sup>-1</sup>

$m_d$  1,0 (Dauer kumulierter Tätigkeiten ≤ 1 h)

Nach DIN EN 1005-3 berechnet sich die reduzierte Kapazitätsgrenze für die Frau  $F_{Brw}$  nach Gleichung (10) und analog für den Mann  $F_{Brm}$  nach Gleichung (11):

$$F_{Brw} = F_{Bw} * m_v * m_f * m_d = 271 \text{ N} * 0,8 * 0,4 * 1,0 = 86,72 \text{ (N)} \quad (10)$$

$$F_{Brm} = F_{Bm} * m_v * m_f * m_d = 560 \text{ N} * 0,8 * 0,4 * 1,0 = 179,2 \text{ (N)} \quad (11)$$

Für die Bewertung der Arbeitsintensität folgt daraus gem. dem Schema zur vereinfachten Bewertung der Arbeitsintensität (Abb. 25) für die Frau:

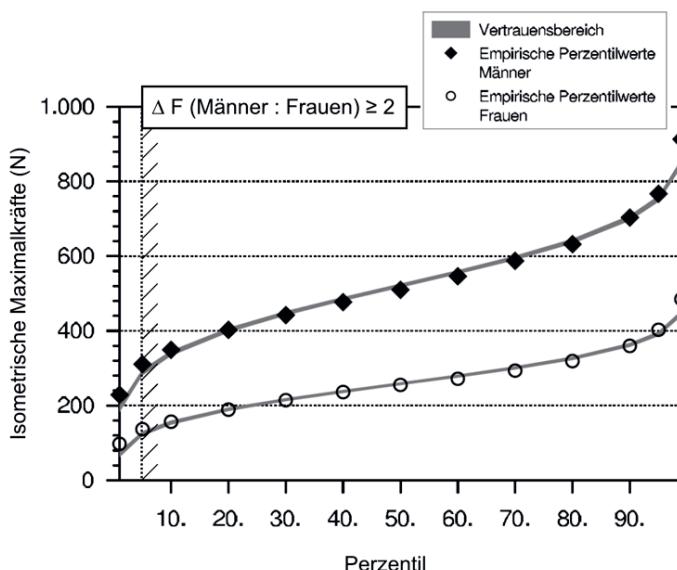
$$\frac{100 \text{ N}}{86,72 \text{ N}} = 1,15 \Rightarrow S_{\text{Arbeitsintensität}} = 6 \quad (12)$$

und entsprechend für den Mann:

$$\frac{100 \text{ N}}{179,2 \text{ N}} = 0,56 \Rightarrow S_{\text{Arbeitsintensität}} = 3 \quad (13)$$

Das Beispiel verdeutlicht, dass der Belastungsfaktor Arbeitsintensität für Frauen bzw. weibliche Erwerbstätige mit dem Gewichtungsfaktor  $k_s = 2$  zu korrigieren ist.

Abbildung 31 zeigt auf, dass die Differenz der Maximalkräfte von Männern und Frauen mit Erweiterung des Perzentils ebenfalls auf mehr als das Doppelte ansteigt. Schlick et al. (2010) weist zudem mit Bezug auf Resch (2007) darauf hin, „dass zahlreiche bisher als gesichert geltende geschlechtsspezifische Unterschiede starken Schwankungen unterworfen sind bzw. sogar als überholt gelten sollten.“ (S. 91) Letztlich ist Abbildung 31 eindeutig zu entnehmen, dass für bis zu 95 % der erwachsenen Männer und Frauen die jeweilige Höhe der isometrischen Maximalkräfte, je nach Perzentil, um etwa den Faktor 2 voneinander abweicht. Der Gewichtungsfaktor Geschlecht kann somit sicher mit  $k_s = 2$  angenommen werden.



**Abbildung 31:** Differenz der Perzentilwerte für Männer und Frauen in Bezug auf isometrische Maximalkräfte; Abbildung angepasst aus Schlick et al. (2010, S. 91)

#### 4.2.2 Sauerstoffaufnahme

Über die Atemwege und die Lunge tauscht der Mensch Luft mit seiner Umgebung aus. Der lebensnotwendige Sauerstoff O<sub>2</sub> wird der Luft entnommen und das Stoffwechselendprodukt Kohlendioxid CO<sub>2</sub> wird an die Umgebung abgegeben. Dieser Gasaustausch erfolgt über die Lunge bzw. durch Diffusion durch die Lungenbläschen (Alveolen). „[...] die Alveolen in der Lunge sind winzig (0,2 bis 0,3 mm) und zahlreich (ca. 300 Mio.)“ (Müller und Frings 2009, S. 189) und ermöglichen so einen Gasaustausch auf einer Fläche von 50 bis 140 m<sup>2</sup> (vgl. Müller und Frings 2009, S. 194). Das Blut transportiert die Atemgase durch den Körper, gibt O<sub>2</sub> an das Gewebe ab bzw. nimmt CO<sub>2</sub> aus dem Gewebe auf (vgl. Clauss und Clauss 2009, S. 276, s. ergänzend Müller und Frings 2009, S. 189 ff.).

Bezogen auf die Sauerstoffaufnahmefähigkeit und die im weiteren Verlauf dieses Unterkapitels besprochene altersbedingte Abnahme ist es wichtig festzuhalten, dass die Sauerstoffaufnahmefähigkeit in unmittelbarer Abhängigkeit steht von der Funktion der Atemwege, von der Funktion und dem Volumen der Lunge, von der Zusammensetzung des Bluts, vom Herz-Kreislauf-System und vom Stoffwechsel (s. ergänzend Bokranz und Landau 1991, S. 124). Die Abnahme der Sauerstoffaufnahmefähigkeit mit dem Alter ist ein Resultat multifaktoriellen Alterns. Fortschritt und Verlauf des menschlichen Alterns sind von der „[...] Interaktion der genetischen Ausstattung mit sozio-kulturellen Faktoren und individuellen Lebensstilen [...]“ (Ferring 2014, S. 228-229) abhängig. Beispielsweise können durch die oft schlechte Qualität der Luft in Großstädten Atemwegserkrankungen, chronische Schäden der Atemorgane und ggf. des Herz-Kreislauf-Systems verursacht werden (vgl. Ahrens 2017, s. ergänzend Müller und Frings 2009, S. 198).

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

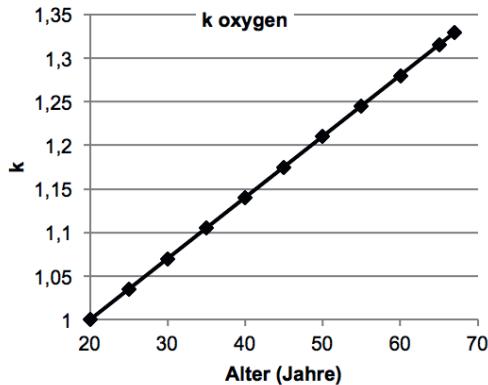
---

Im Rahmen dieser ingenieurwissenschaftlichen bzw. arbeitswissenschaftlichen Arbeit können die einzelnen körperlichen Veränderungen, welche in ihrer Gesamtheit die altersabhängige Abnahme der Sauerstoffaufnahmefähigkeit verursachen, nicht humanbiologisch tiefer ausgeführt werden. Ergänzend sei auf Thieme (2008) verwiesen, der in seiner „soziologischen Einführung in die Wissenschaft vom Alter(n)“ u. a. aus naturwissenschaftlicher Sicht rekapituliert „warum wir altern [...]“ (S. 207 ff.) und konkludiert, dass „die Suche nach den Ursachen des Alterns noch längst nicht abgeschlossen ist“ (S. 225).

Auf Grundlage von Studienergebnissen zur maximalen Sauerstoffaufnahme in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht nach Hollmann (1963; in Schlick et al. 2010, S. 119) wurde der in Abbildung 32 visualisierte Gewichtungsfaktor  $k_o$  zur Abbildung einer altersabhängigen Sauerstoffaufnahmefähigkeit im Rahmen der Simulation definiert. Eine weitere Studie zur physischen Fitness (inkl. maximale Sauerstoffaufnahmefähigkeit) von Seliger und Bartunek (1976; in Luczak 1993, S. 98) zeigt einen vergleichbaren respektive quasi gleichen linear abnehmenden Verlauf. Nach den Ergebnissen von Hollmann (1963) und von Seliger und Bartunek (1976) nimmt die Sauerstoffaufnahmefähigkeit von Männern und Frauen etwa ab dem 20. Lebensjahr kontinuierlich und annähernd linear ab; mit ca. 60 Jahren ist die maximale Sauerstoffaufnahmefähigkeit von Männern und Frauen um etwa 30 % reduziert.

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---



**Abbildung 32:** Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors  $k_o$  (Sauerstoffaufnahme) vom Alter aus Feller und Müller (2014, S. 146)

Der Gewichtungsfaktor  $k_o$  in Abhängigkeit vom Alter wurde für die Integration in das Simulationstool WorkDesigner mit Gleichung (14) beschrieben.

$$k_o = \begin{cases} 2 - (-0,007 * \text{Alter} + 1,14), & \text{Alter} \geq 20 \text{ Jahre} \\ 1, & \text{Alter} < 20 \text{ Jahre} \end{cases} \quad (14)$$

Dabei bedeuten:

$k_o$  Gewichtungsfaktor Sauerstoffaufnahme

Der Einfluss des Gewichtungsfaktors  $k_o$  auf die einzelnen Belastungsfaktoren (s. ergänzend Abb. 26) ist nachfolgend für jeden einzelnen Belastungsfaktor detailliert beschrieben.

### ***Sauerstoffaufnahmespezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Klima***

Wie bereits in Unterkapitel 4.1.2 beschrieben, wirken sich ungünstige thermische Bedingungen unmittelbar auf die physische und mentale Leistungsfähigkeit aus.

Sowohl bei Kälte und auch bei Hitze reagiert das Herz-Kreislauf-System mit kurzfristigen Regulationsmechanismen. Bei Kälte „[...] reagiert das Herz-Kreislauf-System mit einer Kontraktion der peripheren Gefäße [...]“ (Schlick et al. 2010, S. 879) um ein Absinken der Körperkerntemperatur zu verhindern. Die Folge ist ein Blutdruckanstieg. Bei Hitze reguliert ebenfalls maßgeblich das Herz-Kreislauf-System die Aufrechterhaltung der Körperkerntemperatur, „[...] indem [...] durch erhöhte Blutzirkulation (Blutdruckanstieg, Anstieg der Herzschlagfrequenz) und Weitstellung der Gefäße [der] Wärmetransport zur Körperoberfläche erhöht“ (Schlick et al. 2010, S. 879) wird. Die Reaktionsmechanismen stellen stets einen erhöhten Energiebedarf respektive einen erhöhten O<sub>2</sub>-Bedarf dar. Zudem ist die lebensnotwendige Versorgung von Gewebe (Organen, Muskulatur) mit „frischem“ Sauerstoff O<sub>2</sub> und der Abtransport des in den Körperzellen anfallenden Stoffwechselendprodukts Kohlendioxid CO<sub>2</sub> u. a. auch temperaturabhängig. So wird bspw. durch Temperaturerhöhung die Abgabe von O<sub>2</sub> in das Gewebe begünstigt, andererseits wird jedoch auch die CO<sub>2</sub>-Löslichkeit im Blut und somit der Abtransport verschlechtert (vgl. Müller und Frings 2009 S. 201 und Clauss und Clauss 2009, S. 276, 290).

Zusätzlich zu der beschriebenen Belastung des Herz-Kreislauf-Systems wirken sich ungünstige klimatische Bedingungen ebenfalls gesundheits- bzw. leistungsmindernd auf die oberen Atemwege aus (vgl. Bullinger 1994, S. 181 mit Verweis auf Radl).

Da die Sauerstoffaufnahmefähigkeit mit dem Alter abnimmt, wirken sich klimatische Belastungen stärker auf ältere als auf jüngere Menschen bzw. Arbeitspersonen aus. Durch den Gewichtungsfaktor  $k_o$  wird dies im Rahmen der Simulation mit WorkDesigner berücksichtigt.

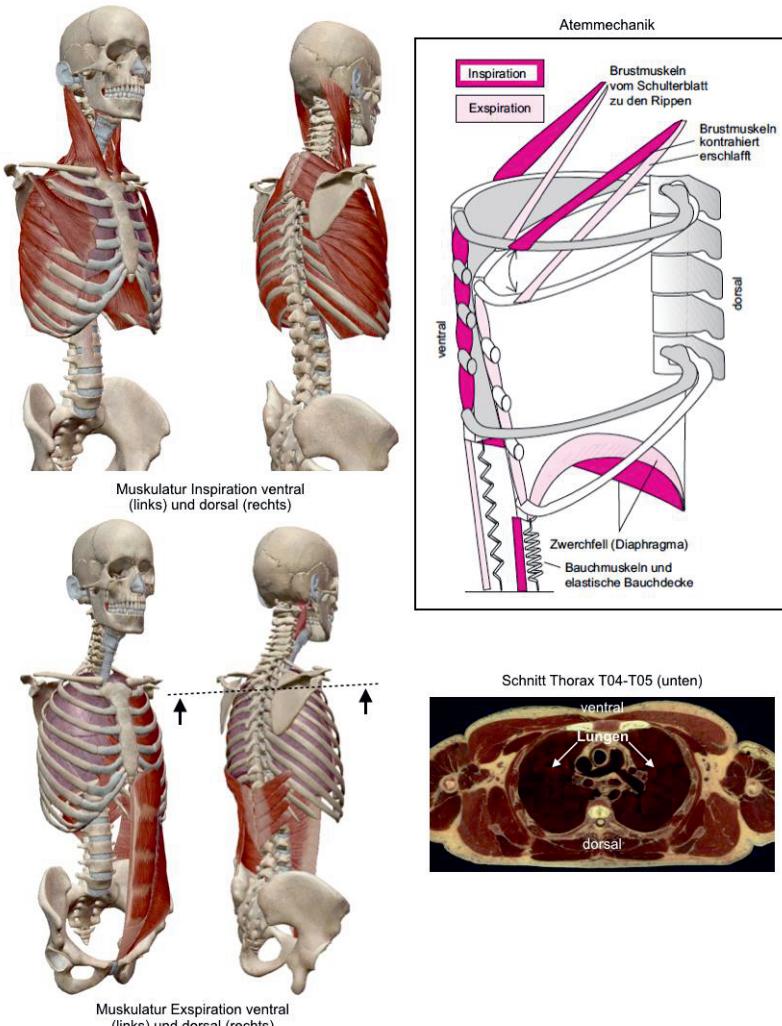
## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

### ***Sauerstoffaufnahmespezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsposition***

Abbildung 33 zeigt die beteiligten Muskeln beim Einatmen (Inspiration, oben links) und Ausatmen (Exspiration, unten links), d. h. bei der Ventilation der Lungen. Ebenfalls dargestellt ist ein Schnitt durch den Oberkörper zwischen vierten und fünften Brustwirbel zur Visualisierung der Lage der Lungen im Brustraum (Thorax). Auch veranschaulicht Abbildung 33 schematisch im oberen rechten Teil die Atemmechanik. Durch „Veränderungen im Anstellwinkel der Rippen und abwechselndes Spannen (Abflachen) und Entspannen (Hochwölben) des Zwerchfells [...]“ (Müller und Frings 2009, S. 204) wird der Brustraum periodisch erweitert beim Einatmen und verengt beim Ausatmen.

4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme



**Abbildung 33:** Beteiligte Muskeln beim Ein- und Ausatmen (Ansicht zeigt nur linke Körperhälfte) und Funktionsprinzip der Ventilation der Lungen (schematische Darstellung der Atemmechanik entnommen aus Müller und Frings 2009, S. 204; 3D-Ansichten

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

*des Atemsystems und Querschnitt (Kadaver) Thorax (axial) erstellt mit © Argosy Publishing, Inc., Atlas der menschlichen Anatomie, Version 2017.2.12)*

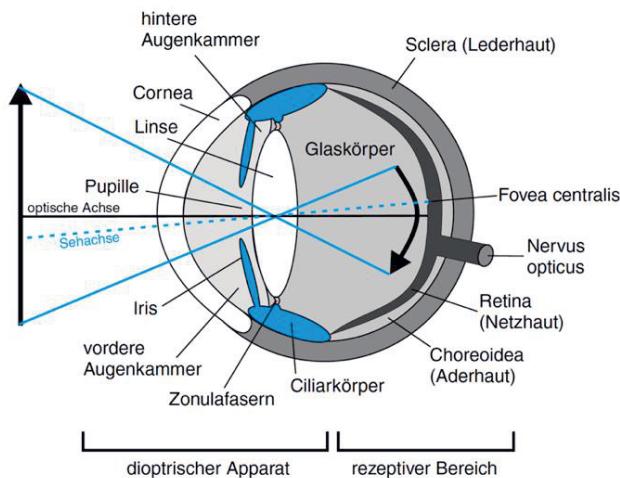
Aus der Anschauung (Abb. 33) ist leicht nachvollziehbar, dass die Arbeitsposition, bspw. starke Beugung des Oberkörpers beim Heben einer Last, einen signifikanten Einfluss auf die Bewegungsfähigkeit der beteiligten Muskeln, auf die Beweglichkeit des Thorax, somit auf die Ventilation der Lungen und final auf die Sauerstoffaufnahme hat (s. ergänzend Unterkapitel 4.1.2 Arbeitsposition, Brinckmann et al. 2012, S. 317 ff. und Luczak 1993, S. 98). Durch die Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsposition mit dem Faktor  $k_o$  wird die Superposition von altersbedingter und positionsbedingter Sauerstoffaufnahmefähigkeit bei der Simulation berücksichtigt.

### ***Sauerstoffaufnahmespezifische Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsintensität***

Wie bereits zuvor mehrfach angesprochen, sind die Sauerstoffaufnahmefähigkeit und die Funktionsfähigkeit des Herz-Kreislauf-Systems maßgeblich „[...] ausschlaggebend für die [...] Abgabe mechanischer und thermischer Energie im Muskel“ (Bokranz und Landau 1991, S. 124). Der Belastungsfaktor Arbeitsintensität ist somit unmittelbar verbunden mit der Sauerstoffaufnahmefähigkeit. Der Verlauf der physischen Leistungsfähigkeit mit dem Alter (s. ergänzend Abb. 20) bzw. die Abhängigkeit der Muskelkraft von Lebensalter und Geschlecht (s. ergänzend Abb. 28) korreliert jeweils mit dem Verlauf der Sauerstoffaufnahmefähigkeit in Abhängigkeit von Alter und Geschlecht (s. ergänzend Schlick et al. 2010, S. 119 und Luczak 1993, S. 98). Durch die Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsintensität mit dem Faktor  $k_o$  wird der Einfluss einer mit dem Alter abnehmenden Sauerstoffaufnahmefähigkeit während der Simulation berücksichtigt.

#### 4.2.3 Visuelle Veränderungen

Zu Beginn des Unterkapitels soll zunächst kurz auf den Aufbau und die Funktion der Augen eingegangen werden. Wie in Abbildung 34 dargestellt, besitzt der Mensch ein Linsenauge, welches aus einem vorderen physikalisch-optischen Teil besteht, dem dioptrischen Apparat, und einem hinteren Teil zur Aufnahme von Licht und dessen Übersetzung in visuelle Reize bzw. Informationen an das Nervensystem, dem rezeptiven Bereich (vgl. Clauss und Clauss 2009, S. 175-176).



**Abbildung 34:** Aufbau des menschlichen Auges entnommen aus Clauss und Clauss (2009, S. 176)

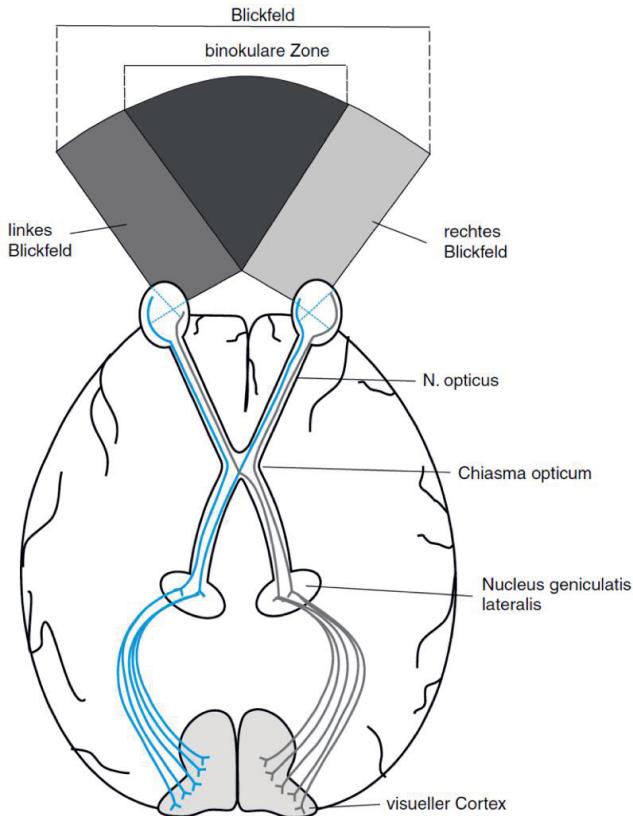
Der dioptrische Apparat bildet auf der Retina ein um 180° gedrehtes und verkleinertes Bild ab; in Abb. 34 verdeutlicht durch den nach oben gerichteten Pfeil außerhalb des Auges und den nach unten gerichteten, deutlich kleineren und leicht gekrümmten Pfeil

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

im Bereich des Rezeptorteils des Auges. Um eine scharfe Abbildung zu erreichen, müssen alle Teilkörper und Medien des dioptrischen Apparats entlang der optischen Achse aufeinander abgestimmt werden. Hierbei reguliert die Pupille bildende Iris durch öffnen und schließend die Lichtmenge. Durch Kontraktion des ringförmigen Ciliarmuskels wird die Linsenkrümmung und somit die Brechkraft der Linse auf den jeweiligen Sehbereich von fern bis nah angepasst (= Akkommodation). Die Akkommodation reguliert sowohl Sehschärfe als auch Schärfentiefe (vgl. Clauss und Clauss 2009, S. 175-177).

Stark vereinfacht beschrieben, besteht die Retina aus mehreren Millionen Photorezeptoren, welche die einfallenden Lichtstrahlen analysieren und in ihrer Gesamtheit als farbliche Bildinformationen an den Sehnerv (Nervus opticus) übergeben (vgl. Müller und Frings 2009, S. 510-512 und s. Clauss und Clauss 2009, S. 177-180). Abbildung 35 zeigt die Funktion der Augen bzw. die optische Signalverarbeitung. Die sich überlagernden beiden Blickfelder des linken und des rechten Auges werden final im visuellen Cortex des Gehirns zu einem dreidimensionalen Bild zusammengesetzt (vgl. Clauss und Clauss 2009, S. 180). Lichtstrahlen innerhalb der binokularen Zone werden bildhaft wahrgenommen, darüber hinaus im restlichen Blickfeld lediglich als visuelle Lichtimpulse.



**Abbildung 35:** Funktion der Augen – optische Signalverarbeitung entnommen aus Clauss und Clauss (2009, S. 181)

Durch die natürliche Alterung bedingte biologische Veränderungen der Augen äußern sich durch unterschiedliche Einschränkungen des Sehvermögens. Nachfolgend werden die wesentlichsten Veränderungen im Bereich des Erwerbsalters beschrieben (s.

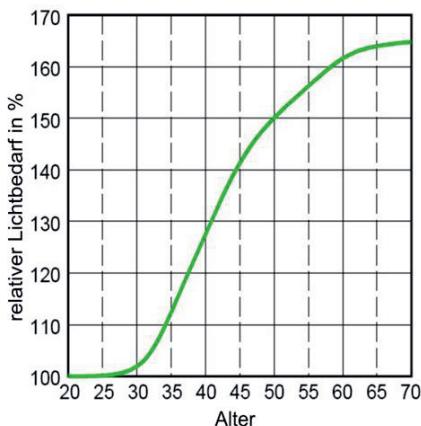
## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

ergänzend VDI 6008 Bl. 1:2012, S. 11-16, Schlick et al. 2010, S. 123-125, Bullinger 1994, S. 65 und 67, Bokranz und Landau 1991, S. 137-144, Löhr 1976, S. 30-32):

- Akkommodation: Mit zunehmendem Alter nimmt die Fähigkeit des Auges die Brechkraft der Linse an den jeweiligen Sehbereich bzw. eine Gegenstandsweite anzupassen stark ab; auch nimmt der Zeitbedarf zur Akkommodation deutlich zu. „[...] Objekte, die sich schnell annähern oder entfernen, [können] nur verschwommen wahrgenommen werden.“ (VDI 6008 Bl. 1:2012, S. 11) Die Änderung der durchschnittlichen Akkomodationsfähigkeit mit dem Alter ist einer breiten Streuung unterworfen, wobei die Streubreite erheblich mit dem Alter zunimmt (s. bspw. Löhr 1976, S. 31).
- Abnahme der Lichtempfindlichkeit: Bedingt durch die natürliche Verkleinerung der Pupille mit dem Alter auf eine Fläche von nur noch etwa 25 % (im Alter von 80 Jahren) steigt der relative Lichtbedarf von 100 % bei 20 Jahren auf ca. 165 % bei 70 Jahren an. Der Anstieg gleicht dem charakteristischen Verlauf eines proportionalen Übertragungsgliedes mit Verzögerung (PT1-Glied; vgl. VDI 6008 Bl. 1:2012, S. 12).
- Verringerung von Gesichts- und Blickfeld: „Das Gesichts- und das Blickfeld verkleinern sich ab dem 55. Lebensjahr“ (VDI 6008 Bl. 1:2012, S. 12), auch nimmt diesbezüglich verstärkend die Fähigkeit zur Aufwärtsbewegung der Augen signifikant ab (vgl. VDI 6008 Bl. 1:2012, S. 12).
- Zunahme der Blendempfindlichkeit: Altersbedingte Eiweißverklumpungen vor allem im Bereich des dioptrischen Apparats rufen eine unerwünschte Streulichtbildung hervor. Die relative Erhöhung der Blendempfindlichkeit steigt etwa ab dem 35. Lebensjahr exponentiell an und beträgt beim aktuellen Renteneintrittsalter von 67 Jahren ca. 80 %. Bei der Gestaltung altersgerechter Arbeitsplätze sind daher Blendungen, Reflexionen und Spiegelungen zu vermeiden (vgl. VDI 6008 Bl. 1:2012, S. 13-14).

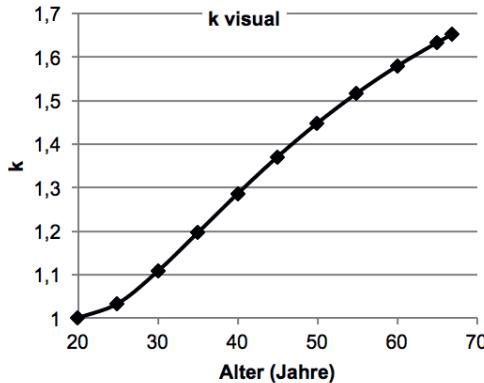
Die angeführten altersbedingten Veränderungen der visuellen Fähigkeiten sind offensichtlich besonders bzgl. einer adäquaten Beleuchtung am Arbeitsplatz und der Position der Arbeitsperson zur Arbeitsaufgabe von signifikanter Bedeutung respektive steigt die Belastung der Arbeitsperson ggf. mit Abnahme der Sehfähigkeit deutlich an. Durch den Gewichtungsfaktor  $k_v$  werden die zuvor beschriebenen altersassoziierten visuellen Veränderungen bei der Simulation berücksichtigt. Da besonders die beleuchtungsspezifischen Veränderungen problematisch sind (erhöhter Lichtbedarf versus Blendempfindlichkeit), wurde bei der Definition von  $k_v$  der Verlauf der Zunahme des relativen Lichtbedarfs mit dem Alter (s. Abb. 36) als Basis verwendet. Abbildung 37 zeigt die Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors  $k_v$  vom Alter; Datengrundlage bildet eine Broschüre der Firma TRILUX (2007) u. a. zum Thema Sehen im Alter – die hier angegebenen Informationen korrelieren mit der VDI 6008 Bl. 1. Für die Integration in das Simulationsmodell wurde  $k_v$  mit Gleichung (15) beschrieben als proportionales Übertragungsglied mit Verzögerung.



**Abbildung 36:** Zunahme des relativen Lichtbedarfs mit dem Alter nach Waldmann (2012, Firmenbroschüre „Licht macht Mitarbeiter munter“) entnommen aus VDI 6008 Bl. 1:2012 (S. 12)

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---



**Abbildung 37:** Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors  $k_v$  (visuelle Fähigkeit) vom Alter aus Feller und Müller (2014, S. 146)

$$k_v = \begin{cases} 2 - \left( -0,286 * e^{-\left(\frac{\text{Alter}-20}{8}\right)} \right) + \left( -1,286 * e^{-\left(\frac{\text{Alter}-20}{36}\right)} \right), & \text{Alter} \geq 20 \text{ Jahre} \\ 1, & \text{Alter} < 20 \text{ Jahre} \end{cases} \quad (15)$$

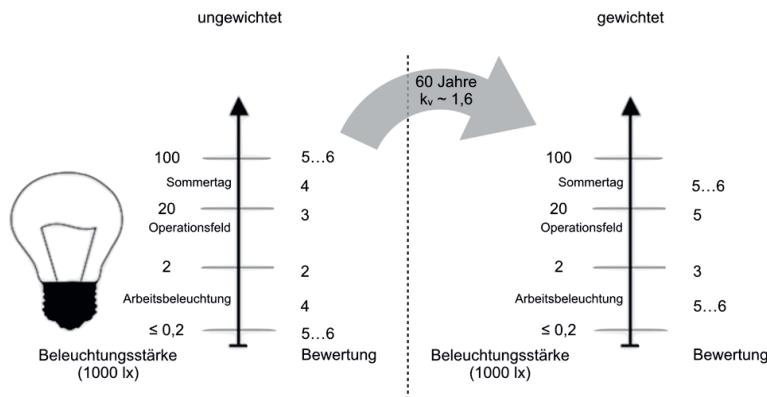
Dabei bedeuten:

$k_v$  Gewichtungsfaktor visuelle Fähigkeit

Der Einfluss des Gewichtungsfaktors  $k_v$  auf die Belastungsfaktoren Beleuchtung und Arbeitsposition ist nachfolgend detailliert beschrieben.

### Visuelle Gewichtung des Belastungsfaktors Beleuchtung

Wie bereits zuvor ausgeführt, führen altersbedingte Veränderungen der visuellen Fähigkeiten insbesondere zu einem erhöhten Lichtbedarf; jedoch steigt ebenfalls die Blendempfindlichkeit mit dem Alter drastisch. Abbildung 38 visualisiert exemplarisch für eine 60 Jahre alte Arbeitsperson den Einfluss des Gewichtungsfaktors  $k_v$  auf den Belastungsfaktor Beleuchtung. Der Vergleich des ungewichteten mit dem gewichteten Bewertungsbereich zeigt auf, dass durch den Faktor  $k_v$  sowohl die Spannweite zwischen starker und schwacher Beleuchtung reduziert wird (Blendung auf Grund größerer Helligkeitsunterschiede) und auch der Bereich der guten Arbeitsbeleuchtung auf der Skala nach oben verschoben wird (Anstieg des Lichtbedarfs). Bspw. sind gem. DIN EN 12464-1:2011 für die meisten Tätigkeiten in der industriellen Fertigung Beleuchtungsstärken von 500 lx (ausreichend) bis 2000 lx (gut) angemessen. Unter Beachtung der VDI 6008 Bl. 1:2012 (s. Abb. 36) verschiebt sich dieser Bereich auf etwa 800 lx (ausreichend) bis 3200 lx (gut).

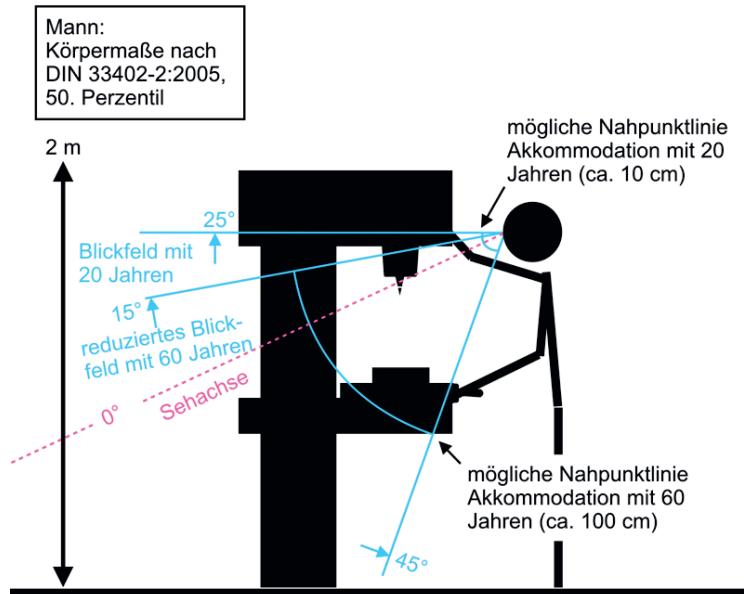


**Abbildung 38:** Exemplarische Gewichtung des Belastungsfaktors Beleuchtung über den gesamten Bewertungsbereich für eine 60 Jahre alte Arbeitsperson

### ***Visuelle Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsposition***

Die Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsposition bzgl. altersbedingt abnehmender visueller Fähigkeiten soll nachfolgend an einem einfachen Beispiel veranschaulicht werden. Abbildung 39 stellt schematisch einen mittelgroßen Mann bei der Bedienung einer Standbohrmaschine dar. Gemäß dem in Unterkapitel 4.1.2 vorgestellten vereinfachten Schema zur Bewertung der Arbeitsposition (s. Abb. 24) ist die gezeigte Bedienung der Standbohrmaschine mit 2 zu bewerten. Wie der Darstellung zu entnehmen ist, liegt bei einer 20 Jahre alten Arbeitsperson der ges. Arbeitsraum im Blickfeld bzw. im Bereich der Schärfeeinstellungsfähigkeit der Augen (Akkommodation). Auch zeigt die Abbildung 39 das altersgewandelte Blickfeld für eine 60-jährige Arbeitsperson. Vor allem durch die altersbedingte Abnahme der Akkomodationsfähigkeit liegt der Arbeitsraum nicht mehr im möglichen Bereich des Scharfsehens. Eine einfache Gegenmaßnahme ist bspw. eine Sehhilfe. „Sehhilfen führen [jedoch] zu häufigem Akkomodieren während eines Arbeitsvorgangs. Auch mehrfach geschliffene Gläser vermindern kaum die erhöhte Beanspruchung.“ (Schlick et al. 2010, S. 125)

In der Regel wird in der Praxis die ursprünglich ergonomisch günstige Arbeitsposition zugunsten einer Kompensation eingeschränkter Fähigkeiten aufgegeben. Bezogen auf das dargestellte Beispiel (Abb. 39) ist offensichtlich, dass jede Form der Adaption der Arbeitsposition an die altersbedingt gewandelten visuellen Fähigkeiten zwangsläufig vor allem eine ergonomisch ungünstige Veränderung der Armwinkel und der Beugung der Wirbelsäule bedingt (s. ergänzend Unterkapitel 4.2.1). Durch die Gewichtung des Belastungsfaktors Arbeitsposition mit dem Faktor  $k_v$  wird der beschriebene Einfluss individueller und altersassozierter visueller Fähigkeiten auf die Arbeitsposition im Rahmen der Simulation berücksichtigt. Bei dem hier gezeigten Beispiel steigt der Belastungsfaktor Arbeitsposition für eine 60 Jahre alte Arbeitsperson ( $k_v \sim 1,6$ ) auf 3 an.



**Abbildung 39:** Durchschnittliche visuelle Fähigkeiten eines mittelgroßen 20 und 60 Jahre alten Mannes in Bezug zur Arbeitsposition bei der Arbeit an einer Standbohrmaschine (basierend auf Angaben und Werten aus VDI 6008 Bl. 1:2012, S. 11-12, Bokranz und Landau 1991, S. 137-144 und Löhr 1976, S. 31)

#### 4.2.4 Auditive Veränderungen

Einleitend soll zunächst kurz auf den Aufbau und die Funktion des menschlichen Gehörs eingegangen werden; nachfolgend dargestellt in Abbildung 40. Grob lässt sich das Gehörorgan in drei Bereiche unterteilen:

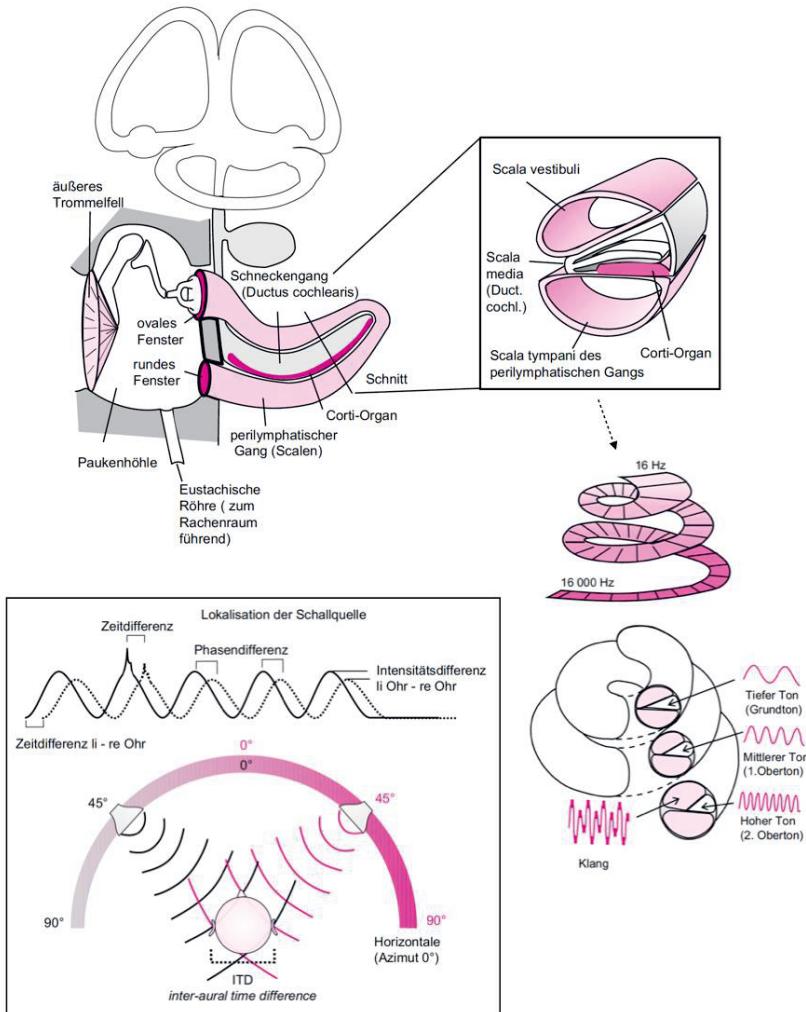
## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

- Das äußere Ohr bestehend aus Ohrmuschel, Gehörgang und Trommelfell (in Abb. 40 nur z. T. dargestellt). Hierbei dient die Ohrmuschel als eine Art Richtantenne zum Einfangen von Schallwellen, welche im Gehörgang gebündelt werden und vom Trommelfell, einer Art trichterförmigen Lautsprechermembran mit hervorragenden akustischen Eigenschaften, aufgefangen werden (vgl. Müller und Frings 2009, S. 450).
- Das Mittelohr bestehend aus Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss und Steigbügel), Paukenhöhle, ovalem und rundem Fenster und der Verbindung zum Rachenraum (in Abb. 40 grau hinterlegt). Die luftgefüllte Paukenhöhle wird durch die Gehörknöchelchen und die entsprechende Muskulatur überbrückt, d. h. die vom Trommelfell aufgefangenen Schallwellen werden mechanisch auf das ovale Fenster übertragen und als Schwingungen in das mit Flüssigkeit gefüllte Innenohr eingeleitet. In seiner Gesamtheit fungiert das Mittelohr als Lautstärkeregler und Frequenzfilter (vgl. Müller und Frings 2009, S. 450-452).
- Das Innenohr besteht im Wesentlichen aus Schnecke, Corti-Organ und Hörnerv (in Abb. 40 meist rosa eingefärbt bzw. in Detailansichten dargestellt). In der Schnecke werden die Schwingungen analysiert und durch das Corti-Organ in Informationen an das Nervensystem übersetzt (vgl. Müller und Frings 2009, S. 452).

Neben der beschriebenen auditorischen Mustererkennung (Sprach- und Geräuschidentifikation) „[...] ist die akustische Raumorientierung, die durch binaurales (beidohriges) Hören zustande kommt“ (Bokranz und Landau 1991, S. 146) eine weitere elementare Grundfunktion des Gehörorgans bzw. der Gehörorgane. Wie ebenfalls in Abbildung 37 dargestellt (unten links), kann der Mensch auf Basis interauraler Zeitdifferenz (ITD) unterschiedliche Schallquellen im Raum lokalisieren. (S. ergänzend Müller und Frings 2009, S. 462-464)

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme



**Abbildung 40:** Aufbau und Funktion des menschlichen Gehörs. Oben: Gehörgang (Cochlea, Schneckengang) mit Detailschnitt durch den Schneckengang; Mitte rechts: Klanganalyse entlang der Schnecke; Fenster unten links: Ortung einer Schallquelle

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

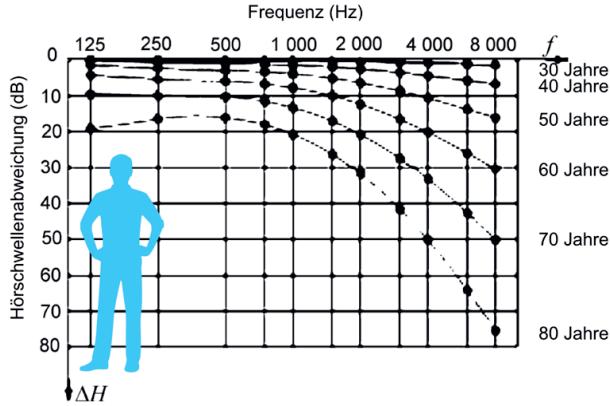
---

*auf Basis interauraler Zeitdifferenz, d. h. Wahrnehmung von Zeit- und auch Intensitätsdifferenz zwischen linkem und rechtem Ohr. Darstellung zusammengestellt basierend auf Abbildungen entnommen aus Müller und Frings (2009, S. 451, 460 und 463)*

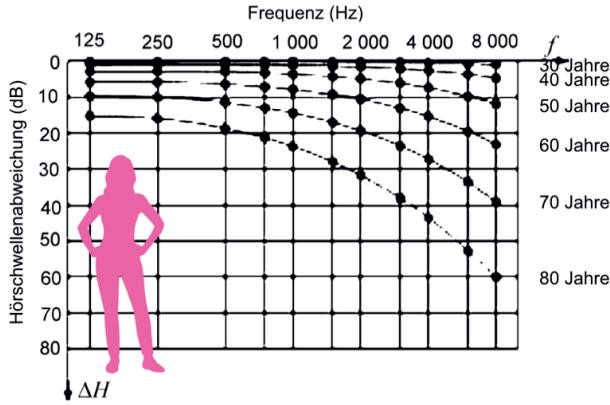
Neben möglichen temporären Beeinträchtigungen oder ggf. dauerhaften Schäden des Gehörs durch Lärm (s. Unterkapitel 4.1.2), werden die auditiven Fähigkeiten des Menschen bzw. der Arbeitsperson vor allem durch altersassoziierte Veränderungen beeinflusst. Bereits bei Personen, die älter sind als 18 Jahre, können Hörverluste ggf. mit dem Alter zusammenhängen (vgl. DIN EN ISO 7029:2017, S. 4). Zwischen 30 und 40 Jahren können dann bereits erste Erscheinungen verminderter auditiver Fähigkeiten in Folge von Altersschwerhörigkeit auftreten. Etwa zwischen Mitte der 40er und 50er Lebensjahre leiden 20 % der Menschen an Altersschwerhörigkeit; bei der Gruppe der über 70-jährigen Menschen sind es rund drei Viertel (vgl. Schlick et al. 2010, S. 125). Die Altersschwerhörigkeit betrifft logischerweise auch die Lokalisierung von Schallquellen bzw. -ereignissen im Raum.

Abbildung 41 und 42 zeigen jeweils getrennt für Männer und Frauen von 30 bis 80 Jahren Medianwerte der zu erwartenden Hörschwellenabweichung für Frequenzen von 125 bis 8000 Hz. Typisch für die Altersschwerhörigkeit ist vor allem der Hörverlust bei hohen Frequenzen. „Die Hörverluste durch Altersschwerhörigkeit verlaufen [zudem] stetig über den Frequenzgang. Davon unterscheiden sich die Hörverluste durch Lärmschäden, die bei etwa 4000 Hz ein Maximum erreichen.“ (Bokranz und Landau 1991, S. 146-147) Dies ist bspw. bei akustischen Signalen und Warntönen von besonderer Bedeutung – hierbei kann es zu Schreckreaktionen und Fehlverhalten kommen. Es ist offensichtlich, dass die leistungsgewandelten auditiven Fähigkeiten älterer Arbeitspersonen die Interaktion mit Kolleginnen und Kollegen sowie mit Maschinen und Anlagen insbesondere in der industriellen Fertigung erschweren. (S. ergänzend DIN EN ISO 7731 und DIN EN ISO 9921) Das heißt, die Belastung einer Arbeitsperson durch Lärm am Arbeitsplatz nimmt zu.

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme



**Abbildung 41:** Medianwerte der zu erwartenden altersabhängigen Hörschwellenabweichungen für Männer von 30 bis 80 Jahren, entnommen aus DIN EN ISO 7029:2017 (S. 13) und graphisch überarbeitet

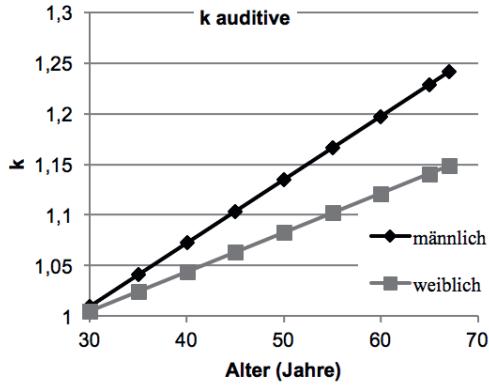


**Abbildung 42:** Medianwerte der zu erwartenden altersabhängigen Hörschwellenabweichungen für Frauen von 30 bis 80 Jahren, entnommen aus DIN EN ISO 7029:2017 (S. 13) und graphisch überarbeitet

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Basierend auf den Daten der DIN EN ISO 7029 zur altersbedingten Hörschwellenabweichung von Männern und Frauen im Sprachbereich (250 bis 4000 Hz; s. ergänzend Schlick et al. 2010, S. 776 oder Bullinger 1994, S. 135), wurde die in Abbildung 43 dargestellte Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors  $k_a$  von Geschlecht und Alter entwickelt. Hierbei steigt  $k_a$  mit dem Alter ( $\geq 30$  Jahre) und in Abhängigkeit vom Geschlecht proportional zur für den Sprachbereich gemittelten geschlechtsspezifischen Hörschwellenabweichung an. (S. ergänzend bspw. Schlick et al. 2010, S. 125-126, Bullinger 1994, S. 66, Bokranz und Landau 1991, S. 146 oder Löhr 1976, S. 105.)



**Abbildung 43:** Abhängigkeit des Gewichtungsfaktors  $k_a$  (auditive Fähigkeit) von Geschlecht und Alter aus Feller und Müller (2014, S. 146)

Für die Integration des Gewichtungsfaktors  $k_a$  bzw. die Implementierung in den Simulator wird die beschriebene respektive visualisierte Abhängigkeit durch Gleichung (16) ausgedrückt.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

$$k_a = \begin{cases} 0,00625 * \text{Alter} + 0,8225, & (\text{männlich}) \text{Alter} \geq 30 \text{ Jahre} \\ 0,00388 * \text{Alter} + 0,8886, & (\text{weiblich}) \text{Alter} \geq 30 \text{ Jahre} \\ 1, & \text{Alter} < 30 \text{ Jahre} \end{cases} \quad (16)$$

Dabei bedeuten:

$k_a$  Gewichtungsfaktor auditive Fähigkeit

Wie einleitend zu Unterkapitel 4.2. dargestellt (s. Abb. 26), ist  $k_a$  lediglich für die auditive Gewichtung des Belastungsfaktors Lärm von Relevanz. Auch sei nochmals darauf hingewiesen, dass die geschlechtsspezifische Individualisierung des Belastungsfaktors Lärm ausschließlich durch den Gewichtungsfaktor  $k_a$  erfolgt.

Abschließend muss zudem angemerkt werden, dass der Gewichtungsfaktor  $k_a$  basierend auf den Daten der EN ISO 7029:2000 bereits 2014 entwickelt und publiziert wurde. Im Juni 2017 und somit gegen Ende der Feldstudie zur Validierung des Simulationstool WorkDesigner (s. Kapitel 6) ist die aktuelle DIN EN ISO 7029:2017 basierend auf Messdaten der jüngsten Vergangenheit herausgegeben worden. Auf Grund des zu erwartenden sehr geringen Einflusses auf die mittelwertbezogene Bestimmung von  $k_a$  (Gl. 16) kann die Aktualisierung jedoch zunächst vernachlässigt werden.

### 4.3 Berechnungsansatz zur Bestimmung einer ganzheitlichen Arbeitsbelastung

„Ausgehend von der Tatsache, dass die Arbeitsumgebungsfaktoren praktisch nie isoliert auftreten, sondern stets eine Kombination vorliegen dürfte, ist an sich auch eine Wirkungsbetrachtung nur für die Gesamtheit aller einwirkenden Umgebungsfaktoren

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

in Verbindung mit den arbeitsspezifischen Belastungsarten zulässig. Diese Wirkungszusammenhänge sind jedoch bislang noch weitgehend unerforscht [...].“ (Luczak 1993, S. 244; auch in Schlick et al. 2010, S. 935) Ebenso konkludiert Zülch (2013) 20 Jahre später im Beitrag zur „ergonomischen Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik“ explizit, dass „[...] insbesondere die Bewertung und Beurteilung sukzessiver Belastungsverläufe [vor allem] bei [...] mehreren simultan wirkenden Belastungsarten [...]“ (S. 59-60) weitere Entwicklungsarbeiten bzw. ergonomische Grundlagenforschung erfordern. In diesem Kontext ist auch die aktuelle Richtlinie VDI 4499 Bl. 4 zur „ergonomische[n] Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik“ anzuführen. Hier wird einleitend darauf hingewiesen, dass „[...] nicht für alle Belastungsarten [...] rechtliche Regelungen oder arbeitswissenschaftlich gesicherte Erkenntnisse [...]“ (2015, S. 8) vorliegen, und zudem „[...] ihre Wirkungen in sequenzieller Abfolge oder Überlagerung vielfach noch nicht erforscht [sind].“ (S. 8)

Der nachfolgend detailliert beschriebene Berechnungsansatz zur Bestimmung einer ganzheitlichen Arbeitsbelastung liefert bzgl. hauptsächlich körperlicher Arbeit in der industriellen Fertigung einen Beitrag zur Erschließung des skizzierten Forschungsdesiderats.

### 4.3.1 Ganzheitliche Arbeitsbelastung

Das gleichzeitige Zusammenwirken mehrerer Arbeitsumgebungsfaktoren und verschiedener arbeitsspezifischer Belastungsarten, d. h. eine Mischform unterschiedlicher Belastungen, wird als Superposition bezeichnet. Bei der Superposition von Belastungen am Arbeitsplatz werden drei Effekte differenziert (vgl. Luczak 1993, S. 244 ff., Bokranz und Landau 1991, S. 241 ff. und Schlick et al. 2010, S. 935 ff.):

- Der Kompensationseffekt, welcher beschreibt, dass sich die Wirkungen unterschiedlicher Belastungen derart überlagern können, dass es zu einer insgesamt geringeren Beanspruchung führt. Luczak (1993, S. 244; auch in Schlick et al. 2010, S. 935-936) verdeutlicht diese Wirkungsabschwächung am Beispiel der Überlagerung der beiden Belastungen „kaltes Klima“ und „dynamische Arbeit“. Es ist offensichtlich, dass die durch die Arbeit als Nebenprodukt mit produzierte Wärme zum Ausgleich der Belastung durch Kälte bzw. zur Regulation der körperlichen Wärmebilanz dient (s. ergänzend Unterkapitel 4.1.2).
- Der Indifferenzeffekt, der darauf basiert, dass unterschiedliche Belastungen keinen wechselseitigen Einfluss auf die Beanspruchung haben müssen, solange keine der Einzelbelastungen für sich zu einer Überbeanspruchung führt und unterschiedliche Organsysteme der Arbeitsperson angesprochen werden. Bokranz und Landau (1991) konstruieren hierzu das Beispiel, dass „bei lokaler Muskelbeanspruchung aus einseitig dynamischer Muskelarbeit und Hörschwelleverschiebung aus sensorischer Arbeit mit auditiver Informationsaufnahme beide Belastungen isoliert [voneinander zu] analysieren [wären] und die höhere Erholungszeit [zu] verwenden [wäre].“ (S. 241)
- Der Kumulationseffekt, welcher aussagt, dass die resultierende Beanspruchung mehrerer Belastungen bzw. Belastungsarten höher sein kann, als die Beanspruchung der Arbeitsperson bei isolierter Bewertung einzelner Belastungen. Bezuglich dieser Wirkungsverstärkung verweisen Bokranz und Landau (1991, S. 243) u. a. auf empirische Arbeiten von Rohmert und Landau (z. T. gemeinsam publiziert) zu superponierten Belastungen bei schwerer dynamischer Muskelarbeit und Wärmeklima. Hierbei wird die Arbeitsperson nicht nur durch jede Belastung für sich beansprucht. Die „Abfallwärme“ der schweren dynamischen Muskelarbeit wirkt zusätzlich zum Wärmeklima belastend auf die Arbeitsperson ein. (Beispielsweise auch bei Luczak 1993, S. 245 und Schlick et al. 2010, S. 936)

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Für die Beurteilung superponierter Belastungen empfiehlt Luczak (1993, S. 244) ein kaskadiertes Vorgehen: Betrachtung jeder arbeitsspezifischen Einzelbelastung, Betrachtung der jeweiligen Arbeitsumgebungsfaktoren, Identifikation der Belasteten organismischen Systeme und abschließend eine Engpassanalyse bei mehrfacher Inanspruchnahme gleicher Systeme. Für die Simulation bzw. die Implementierung in eine Software ist ein solches Vorgehen auf Grund sich beliebig ergebender, nicht final definierbarer Fallunterscheidungen jedoch ungeeignet.

Zur Bestimmung der ganzheitlichen Belastung am Arbeitsplatz wird der nachfolgende Berechnungsansatz (Gl. 17) von Feller und Müller (2014, S. 149) verwendet.

$$OS = \left( S_{i,max}^* + \frac{\sum_{i=1}^n S_i^*}{n-1} * \frac{6 - S_{i,max}^*}{6} \right) \frac{\ln 100}{(6 * 8)} * 100 \% \quad (17)$$

Dabei bedeuten:

OS Ganzheitliche Belastung in %

$S_{i,max}^*$  Maximaler gewichteter Belastungsfaktor

$S_i^*$  Gewichteter Belastungsfaktor

$n$  Anzahl der Belastungsfaktoren

Die ganzheitliche Belastung OS wird maßgeblich vom maximalen gewichteten Belastungsfaktor  $S_{i,max}^*$  geprägt. Die übrigen gewichteten Belastungsfaktoren  $S_i^*$  werden als gewogener Mittelwert aufsummiert; der Einfluss der gemittelten Belastungsfaktoren nimmt dadurch mit steigender Dominanz eines Faktors ab. Durch die Multiplikation des in Klammern stehenden Terms mit dem Quotienten (Gl. 18) wird OS in Analogie zur Definition der Dauerleistungsgrenze (DLG) dimensioniert.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

„[DLG =] Arbeitsbelastung, die maximale Arbeit ohne zusätzliche Erholungspausen über einen Zeitraum von 8 Stunden ohne Leistungsabfall zulässt.“ (Bullinger 1994, S. 47)

$$\frac{\ln 100}{(6 * 8)} = \frac{\text{maximale Arbeitsleistungsfähigkeit}}{\text{maximale Belastungshöhe} * \text{reguläre Arbeitsdauer Vollzeit}} \quad (18)$$

Hierbei wurde definiert, „[...] dass nach acht Stunden Arbeit in einem maximal-schlecht bewerteten Arbeitssystem eine hundertprozentige Auslastung der Arbeitsleistungsfähigkeit (WAL) eines 30-jährigen, männlichen Mitarbeiters durchschnittlicher Fitness ( $k = 1,0$ ;  $PAL = 100\%$ ) erreicht wird.“ (Müller et al. 2015b, S. 182)

Für den Idealfall, dass alle Belastungsfaktoren mit sehr gut (1) bewertet werden, beträgt OS aufgerundet ca. 20 % (19,6 %); für das schlechteste Szenario, dass alle Belastungsfaktoren mit ungenügend bzw. nicht akzeptabel (6) bewertet werden, beträgt OS aufgerundet knapp 60 % (57,6 %). Die ganzheitliche Arbeitsbelastung ist somit folgerichtig definiert mit: „unwillkürlich automatisierte Leistungen“ < OS < „Grenze der physiologischen Leistungsbereitschaft“. (s. ergänzend Bullinger 1994, S. 46 und Löhr 1976, S. 24-25, 55-56)

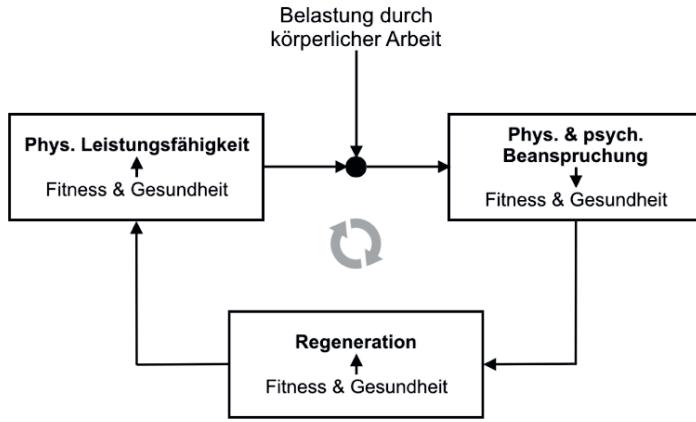
### 4.3.2 Beanspruchung

Wie bereits zu Beginn des Unterkapitels 4.1.1 mit Verweis auf Bullinger (1994, S. 30) beschrieben, resultiert die Beanspruchung aus dem Einwirken der Belastungen (hier OS) auf die Arbeitsperson und der zur Verfügung stehenden individuellen Leistungsfähigkeit der Arbeitsperson (hier WAL).

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Die nachfolgende Abbildung 44 zeigt den Wirkkreis von physischer Leistungsfähigkeit, physischer und psychischer Beanspruchung und Regeneration bei Belastung durch körperliche Arbeit. Die individuelle physische Leistungsfähigkeit wurde bereits in Unterkapitel 4.1.1 umfassend behandelt. Die Belastung durch körperliche Arbeit wurde zuvor in Unterkapitel 4.1.2 und 4.3.1 ausführlich beschrieben. „Jede Tätigkeit – auch eine vorwiegend körperliche – ist psychisch belastend. [...] Psychische Belastung kann sowohl positive als auch negative Auswirkungen haben.“ (DIN EN ISO 10075-1:2018, S. 10) Das heißt, auch hauptsächlich körperliche Arbeit beansprucht die Arbeitsperson sowohl physisch als auch psychisch.



**Abbildung 44:** Wirkkreis physische Leistungsfähigkeit, physische und psychische Beanspruchung und Regeneration bei Belastung durch körperliche Arbeit (s. ergänzend „Belastungs-Beanspruchungs-Konzept“ DIN EN ISO 26800:2011, S. 13-15)

Durch die jeweiligen individuellen körperlichen und mentalen Voraussetzungen (z. B. Coping Strategies bzw. Stressbewältigungsmechanismen, s. ergänzend bspw. Carver et al. 1989) resultiert aus einer (ganzheitlichen) Belastung für jede Arbeitsperson ein

individuelles Beanspruchungsprofil. Wie in Abbildung 44 ebenfalls dargestellt, wirkt sich die Beanspruchung in Abhängigkeit von Höhe und Dauer unmittelbar auf die Fitness und Gesundheit der Arbeitsperson aus und somit letztlich auch auf die individuelle Regeneration. In der Regel sollte sich der dargestellte Wirkkreis im Gleichgewicht befinden. Das heißt, es wird durch die Arbeitsbelastung im gleichen Umfang Leistung verbraucht, wie durch Erholungsphasen und Pausen regeneriert werden kann. Reizt die Arbeitsbelastung die individuelle Arbeitsleistungsfähigkeit in zu hohem Maße aus bzw. überschreitet diese und greift auf die vorrätigen Reserven zu, so steigt trotz konstanter Belastung die Höhe der Beanspruchung (= Ermüdung). „Ermüdung ist immer mit einem Verlust an Funktions- und Leistungsfähigkeit bzw. Leistungsbereitschaft verbunden.“ (Löhr 1976, S. 53) Ein solches Ungleichgewicht wird oft als Abwärtsspirale bis hin zum Burn-out dargestellt. (S. ergänzend Schlick et al. 2010, S. 194 ff., Löhr 1976, S. 52-54 und DIN EN ISO 10075-1:2018, S. 12-14) Die Regeneration wird im nachfolgenden Unterkapitel 4.3.3 behandelt.

In der Arbeitswissenschaft ist die nachfolgende Gleichung (19) zur Beschreibung der Ermüdung etabliert (hier entnommen aus Schlick et al. 2010, S. 202, in ähnlicher Form auch bspw. auch bei Bokranz und Landau 1991, S. 228-229 oder Luczak 1993, S. 120). Sie geht auf empirische Arbeiten zum Verhalten von Ermüdung und Erholung von Rohmert in den 1960er Jahren zurück, der für globale Beanspruchung die Ermüdung als Potenzfunktion in Abhängigkeit von Belastungsdauer und Belastungshöhe beschrieben hat (s. Gl. 19; vgl. Bokranz und Landau 1991, S. 228 und Luczak 1993, S. 120).

$$A = a * (t_{arb})^m \left( \frac{N_{eff}}{N_{DLG}} \right)^p \quad \text{für } \frac{N_{eff}}{N_{DLG}} > 1,2 \quad (19)$$

Dabei bedeuten:

- A Zustand der Ermüdung zum Zeitpunkt  $t_{arb}$   
 $t_{arb}$  Arbeitsdauer ( $t_{arb} \geq 0$ )

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

$N_{\text{eff}}$  Erbrachte Leistung bzw. Effektivbelastung

$N_{\text{DLG}}$  Dauerleistungsgrenze

$a, m, p$  Konstanten, die den Ermüdungsverlauf charakterisieren

Für das Simulationsmodell ist in Analogie zur zuvor vorgestellten Ermüdungsfunktion (Gl. 19) die nachfolgende Funktion (Gl. 20) von Feller und Müller (2014, S. 148) zur Beschreibung der Ermüdung während der Arbeit definiert worden.

$$s = s_i + e^{t_w \left( \frac{OS}{WAL} \right)} \quad (20)$$

Dabei bedeuten:

$s$  Beanspruchung in %

$s_i$  Beanspruchung zu einem diskreten Zeitpunkt  $i$

$t_w$  Dauer Arbeitsprozess in h

$OS$  ganzheitliche Belastung in %

$WAL$  Arbeitsleistungsfähigkeit in %

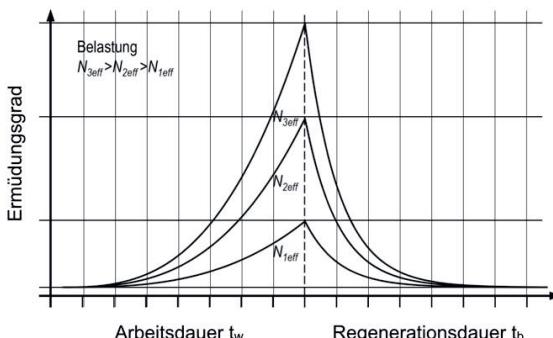
Hierbei wird die individuelle Ermüdung  $s$  beschrieben durch eine natürliche Wachstumsfunktion in Abhängigkeit der Belastungsdauer  $t_w$ , wobei die Wachstumsrate abgebildet ist durch das Verhältnis der individuell gewichteten ganzheitlichen Belastung  $OS$  zu personenspezifischer Arbeitsleistungsfähigkeit  $WAL$ . Wie von Schlick et al. (2010) bzgl. der auf Rohmert zurückzuführenden Ermüdungsfunktion (Gl. 19) gedeutet, „[...] [schreitet] somit [auch hierbei] die Ermüdung bei konstanter Belastung immer schneller [fort].“ (S. 202)

Abschließend muss darauf hingewiesen werden, dass der vorgestellte Ansatz (Gl. 20) den zu Beginn des Unterkapitels beschriebenen Anteil psychischer Beanspruchung infolge körperlicher Arbeitsbelastung und dadurch ggf. hervorgerufene Wechselwir-

kungen nicht berücksichtigt. Bis zu einer Beanspruchung in Höhe von 100 % der Arbeitsleistungsfähigkeit wird jedoch angenommen, dass bei Belastung durch hauptsächlich körperliche Arbeit, der psychische Anteil im Rahmen einer Simulation zunächst vernachlässigt werden kann. Bei länger andauernder Höchstbeanspruchung oder Überbeanspruchung ist hingegen davon auszugehen, dass der psychische Anteil der Beanspruchung dominiert und die Funktions- und Leistungsfähigkeit der Arbeitsperson maßgeblich beeinflusst.

#### 4.3.3 Regeneration

Abbildung 45 zeigt den Ermüdungsgrad in Abhängigkeit von Arbeitsdauer und Regenerationsdauer für verschiedene Effektivbelastungshöhen. Hierdurch wird zum einen der Verlauf der Ermüdung visualisiert, welcher mit zunehmender Arbeitsdauer stetig stärker ansteigt (s. ergänzend Unterkapitel 4.3.2). Zum anderen wird der Verlauf der Regeneration dargestellt, welcher einer Exponentialfunktion gehorcht (vgl. Schlick et al. 2010, S. 203).



**Abbildung 45:** Ermüdungsgrad in Abhängigkeit von Arbeitsdauer  $t_w$  und Regenerationsdauer  $t_b$  bei verschiedenen Effektivbelastungshöhen  $N_{1eff}$ ,  $N_{2eff}$  und  $N_{3eff}$  (keine

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

*ganzheitliche Belastung; Abbildung entnommen aus Schlick et al. 2010, S. 203 und modifiziert)*

Bereits Ende der 1920er Jahre hat Simonson eine Formel für den allgemeinen Erholungsverlauf  $y$  (Gl. 21) aufgestellt (nachfolgend entnommen aus Bokranz und Landau 1991, S. 228).

$$y = a * e^{-RK*t} \quad (21)$$

Dabei bedeuten:

$a$  Ermüdung

$RK$  Erholungsgeschwindigkeit beschreibende Restitutionskonstante

$t$  Erholungszeit

Mit den Arbeiten von Rohmert und Rutenfranz hat sich diese Erholungsfunktion (Gl. 21) ab etwa Beginn der 80er Jahren in der Arbeitswissenschaft final etabliert. (S. ergänzend Luczak 1993, S. 120 und Schlick et al. 2010, S. 202) Die nachfolgenden Erkenntnisse sind bzgl. der Regeneration festzuhalten:

- „Erholungspausen sind [...] grundsätzlich zum Ausgleich von Ermüdungserscheinungen erforderlich.“ (Schlick et al. 2010, S. 202)
- Die Erholungszeit steigt in Abhängigkeit der Belastungsdauer (vgl. Bokranz und Landau 1991, S. 233; s. ergänzend Abb. 45).
- Die Verfassung einer Arbeitsperson wirkt sich sowohl auf den Ermüdungs- als auch auf den Erholungsverlauf aus (vgl. Bokranz und Landau 1991, S. 231-234). Simonson (1926) schreibt diesbezüglich, dass „[...] für das individuelle Erholungsvermögen, [...] die Funktionstüchtigkeit eines jeden Organes, welches bei der Sauerstoffversorgung des Körpers beteiligt ist“ wesentlich ist. Weiter führt Simonson (1926) aus, dass „von der Beschaffenheit der Atmungsorgane, des Kreislaufs, der Zusammensetzung des Blutes und dem Anteil der Muskulatur am Körperegewicht [...] das Erholungsvermögen und damit die Schnelligkeit

der Ermüdung und Erholung bei Ausführung einer bestimmten Arbeit abhängt“; in Gleichung (21) berücksichtigt durch die Restitutionskonstante.

- Zu Beginn einer Pause ist die Regeneration wesentlich größer als im weiteren Verlauf der Pause (vgl. Schlick et al. 2010, S. 203; s. ergänzend Abb. 45).
- Führt die Ermüdung durch eine Belastung zur Überbeanspruchung, „[...] dann verlängert sich die Erholungszeit überproportional“ (Löhr 1976, S. 53).
- Ermüdungs- und Erholungsreaktionen, bedingt durch die Umgebungsbedingungen, zeigen ähnliche Tendenzen wie Ermüdung und Regeneration bei körperlicher Arbeit (vgl. Schlick et al. 2010, S. 204).

Für das Simulationsmodell ist in Analogie zur etablierten Erholungsfunktion (Gl. 21) die nachfolgende Funktion (Gl. 22) von Feller und Müller (2014, S. 148) zur zeitdiskreten Beschreibung der Regeneration definiert worden.

$$s = s_i * e^{-t_b * k} \quad (22)$$

Dabei bedeuten:

$s$  Beanspruchung in %

$s_i$  Beanspruchung zu einem diskreten Zeitpunkt  $i$

$t_b$  Dauer Pause in h

$k$  Konstante für individuelle Fitness

Wie bei der ursprünglichen Erholungsfunktion (Gl. 21), wird auch hier die Regeneration durch eine Abklingfunktion in Abhängigkeit der Erholungsdauer  $t_b$  beschrieben. Zerfallskonstante ist die Konstante für individuelle Fitness  $k$ . Dies steht keinesfalls im Widerspruch zu den bisher angeführten Quellen. Ganz im Gegenteil fasst die Konstante für individuelle Fitness  $k$ , die von Simonson (1926) beschriebene „Funktionstüchtigkeit“ des Körpers, welche für das individuelle Erholungsvermögen verantwortlich ist, an Stelle der Restitutionskonstanten zusammen (s. o.). Simonson (1926) weist zudem

darauf hin, dass eine natürliche Steigerung der Arbeitsleistung und des Erholungsvermögens durch „Übung“, d. h. vor allem durch eine Verbesserung der Ausdauer (= Fitness), erzielt werden kann. (S. ergänzend Unterkapitel 4.1.1 individuelle körperliche Fitness.)

#### **4.4 Ansatz zur Berücksichtigung außerberuflicher Aktivitäten**

Hauptsächlich motiviert durch den demographischen Wandel und den damit verbundenen drohenden Verlust von Arbeitskräften respektive Arbeitsleistung fokussierten etwa zu Beginn der 2000er Jahre arbeitswissenschaftliche und vor allem produktions-technische Simulationsuntersuchungen in der Mehrheit den Erhalt und die Steigerung der Produktivität unter besonderer Berücksichtigung alternder Belegschaften. Explizit betrachtet wurde bspw. die Leistungsfähigkeit altersheterogener Teams oder die Auswirkungen von Job-Rotation-Modellen auf die Produktivität; bspw. in Zülch und Stock „Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal“ (2010) oder in Schlick et al. „Age-Differentiated Work Systems“ (2013).

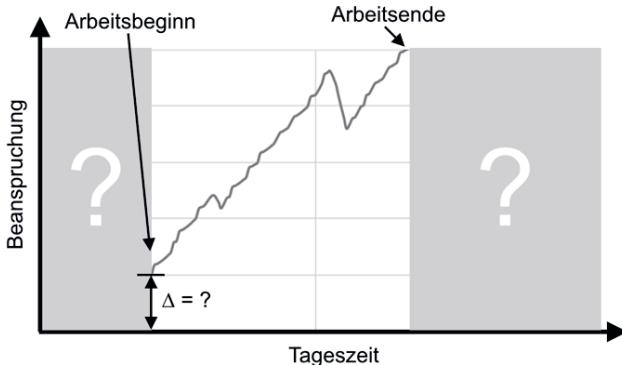
Aktuelle Fragestellungen, beeinflusst von gegenwärtigen Megatrends wie u. a. „New Work“, Gesundheit und Individualisierung (vgl. Zukunftsinstitut 2017), zielen u. a. darauf ab, die Arbeitsperson bei der Ausübung von Tätigkeiten ergonomisch und individuell zu coachen; bspw. der am IAW der RWTH Aachen entwickelte „Ergonomie-Navigator“ (s. Brandl und Hellig 2016 und Brandl et al. 2016). Auch befassen sie sich mit der personalisierten Gestaltung fitnesserhaltender Arbeitsprozesse hinsichtlich der Digitalisierung von Lebens- und Arbeitswelten. Hier ist bspw. das am Fraunhofer IAO in Stuttgart entwickelte „Ergonomic Evaluation Tool EMMA-CC“ zu nennen (s. Dangelmaier und Theissen 2017).

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Die bisher klare Abgrenzung von Beruf und Privatleben weicht stetig auf. „In [...] Zukunft wird Arbeit im Leben der Menschen einen neuen Stellenwert einnehmen, Arbeit und Freizeit fließen ineinander.“ (Zukunftsinstut 2017, s. ergänzend Kapitel 2 „wirtschaftliche, technologische und soziale Herausforderungen für kleine und mittlere Unternehmen“ und Kapitel 3 „Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung“)

Nicht nur der skizzierte Entwicklungstrend, sondern vor allem die intendierte Simulation von mittel und langfristigen Beanspruchungsverläufen, insbesondere unter Berücksichtigung individueller und altersdifferenzierter Veränderungen, verlangt eine detaillierte und umfassende Betrachtung des Simulationszeitraums. Abbildung 46 veranschaulicht diesen Bedarf. Es ist zu erkennen, dass der Beanspruchungsverlauf während der Arbeitszeit eingerahmt ist von zunächst nicht spezifizierten Bereichen vor Arbeitsbeginn und nach Arbeitsende (grau eingefärbt). Aktivitäten außerhalb der Arbeitszeit wie z. B. Haushaltsführung, Familie, Sport, die Pflege von Angehörigen oder ggf. eine Nebentätigkeit belasten jedoch die (Arbeits-)Person zusätzlich. (S. ergänzend BAuA 2016, Domsch und Ladwig 2007, Klös und Seyda 2007, Resch 2007, Schneider 2007) In der Regel sollte ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Arbeit und Privatleben bestehen (sog. Work Life Balance) und eine vollständige Regeneration der Beanspruchung bis zum nächsten Arbeitstag bzw. innerhalb einer absehbaren Arbeitsperiode möglich sein. Resch (2007, S. 105 ff.) weist jedoch zurecht darauf hin, dass es sich bzgl. der Work Life Balance um ein idealisiertes Bild handelt und die Bereiche Arbeit und Privatleben nicht losgelöst voneinander betrachtet werden können. Für die Simulation ergibt sich hieraus ein Startwertproblem. Aus einem ggf. nicht ausbalancierten Verhältnis von Belastungs- und Regenerationsphasen kann sich eine ungesunde und möglicherweise kontinuierlich wachsende Grundbeanspruchung („ $\Delta = ?$ “, s. Abb. 46) der Arbeitsperson aufbauen; s. ergänzend Froböse (2016, S. 40-43, 52, 102).



**Abbildung 46:** Exemplarischer Verlauf der Beanspruchung über einen Arbeitstag im 1-Schicht-Betrieb inkl. schematischer Darstellung von Startwertproblematik und nicht spezifiziertem Verlauf der Beanspruchung außerhalb der Arbeitszeit

Im Sinne der ganzheitlichen Betrachtung der Beanspruchung mit WorkDesigner werden konsequenterweise Freizeit- und Ruhephasen außerhalb der Arbeitszeit bei der Simulation berücksichtigt. Die entsprechenden Ansätze zur Abbildung im Simulations- tool werden in den nachfolgenden beiden Unterkapiteln ausführlich beschrieben.

#### 4.4.1 Arbeitszeit und Schichtarbeit

Um die zuvor beschriebenen „grauen Bereiche“ bzw. Freizeit und Ruhephasen in das Simulationstool zu integrieren, wird nachfolgend auf Basis des gesetzlichen Rahmens und wissenschaftlichen Erkenntnissen eine repräsentative Zeiteinteilung einer Arbeits- person an einem beliebigen Arbeitstag modelliert. Eine detaillierte Simulation außer-

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

beruflicher Aktivitäten, vergleichbar mit der zeitdiskreten Simulation von Arbeitssystemen, ist sowohl hinsichtlich Umfang und Machbarkeit der Datenaufnahme als auch bzgl. des Schutzes der Privatsphäre nicht praktikabel.

### **Arbeitszeitgesetz**

Zur Gewährleistung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes von Arbeitnehmern regelt das Arbeitszeitgesetz (ArbZG) im Wesentlichen die Arbeitszeiten, die Arbeitsdauer, Ruhepausen und Ruhezeiten (vgl. ArbZG 2016, §1). Die Arbeitszeit sollte i. d. R. zwischen 06:00 Uhr und 23:00 Uhr liegen; außerhalb dieses Zeitrahmens handelt es sich um Nacharbeit (vgl. ArbZG 2016, §§ 2 und 6). Aufgrund der deutlichen zeitlichen Verschiebung der Nacharbeit zum sonnenlichtorientierten Biorhythmus des Menschen und hinsichtlich der familiären und sozialen Verträglichkeit, wird diese im ArbZG gesondert behandelt (vgl. ArbZG 2016, § 6 und Schlick et al. 2010, S. 597 ff.). Die tägliche Arbeitsdauer exkl. Pausen darf in Summe (ggf. Haupt- und Nebentätigkeit kumuliert) nicht mehr als acht Stunden betragen. In Ausnahmefällen darf die Arbeitszeit auf maximal zehn Stunden exkl. Pausen erhöht werden – hierbei ist durch den Arbeitsgeber ein adäquater und zeitnäher Ausgleich sicherzustellen (vgl. ArbZG 2016, §§ 3 und 7). Bei einer Arbeitsdauer  $> 6$  h und  $\leq 9$  h ist eine mindestens 30-minütige Pause einzuhalten; überschreitet die Arbeitsdauer 9 h, ist eine mindestens 45-minütige Pause vorgeschrieben (vgl. ArbZG 2016, § 3). Das ArbZG (2016) schreibt zudem vor, dass nach Beendigung der täglichen Arbeitszeit, bis zur Wiederaufnahme der Arbeit, eine ununterbrochene Ruhezeit von mindestens elf Stunden zur Regeneration einzuhalten ist (vgl. §5).

Die Wochenarbeitszeit variiert je nach Branche und Tarifvertrag i. d. R. zwischen 35 bis 40 h für Vollzeitbeschäftigte.

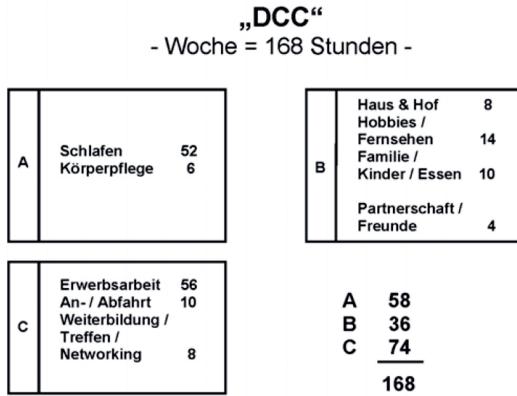
### ***Arbeitszeitmodell Schichtarbeit***

Zunächst definiert ein Arbeitszeitmodell alle „Arbeitszeitregeln wie bspw. Lage und Dauer der Arbeitszeit, Ruhepausen [und] Urlaubsanspruch für einen vorbestimmten oder andauernden Arbeitszeitabschnitt“ (Schlick et al. 2010, S. 592). In Abhängigkeit der Branche, vor allem aber der betrieblichen Organisationseinheit, werden unterschiedliche Arbeitszeitmodelle angewendet; z. B. Gleitzeit in der Verwaltung oder im Einkauf, Vertrauensarbeitszeit im Management oder in der Forschung und Entwicklung. Das gängige Arbeitszeitmodell in der industriellen Fertigung ist die Schichtarbeit. Kennzeichnend für die Schichtarbeit ist, dass die betriebliche Arbeitszeit aus produktionstechnischen und/oder ökonomischen Gründen in meist mehrere Zeitsegmente (Schichten) von unterschiedlicher Dauer und Lage unterteilt ist. Die Produktion kann auf diese Weise mit verschiedenen Arbeitnehmern je Arbeitsplatz im Maximum an 24 Stunden pro Tag und an 7 Tagen der Woche (sog. 24/7) betrieben werden (vgl. Schlick et al. 2010, S. 596). Vor allem bei Konzernen bspw. in der Automobil-, Chemie- oder Pharmaindustrie dominieren 3-Schicht-Modelle. Hierbei arbeiten die Belegschaften aufgeteilt und i. d. R. im rollierenden Wechsel in Frühschicht (ca. 06:00 bis 13:00 Uhr), Spätschicht (ca. 13:30 bis 21:30 Uhr) und Nachschicht (ca. 21:30 bis 06:00 Uhr). Es ist offensichtlich, dass sich Schichtarbeit bedingt durch wechselnde Arbeitszeiten, Nachtarbeit und der Arbeit an Wochenenden und Feiertagen nachteilig körperlich, mental und sozial auf die Erwerbstätigen auswirkt (vgl. Schlick et al. 2010, S. 597 ff.). Das Simulationstool WorkDesigner ist zunächst begrenzt auf 1-Schicht-Modelle. Hierfür werden zwei Gründe angeführt. Zum einen wird so der Störeinfluss durch zusätzliche arbeitszeitmodellbedingte physische und vor allem psychische Belastungen minimiert. Zum anderen sind 1-Schicht-Modelle in dem mit WorkDesigner anvisierten Marktsegment kleiner und mittelgroßer Unternehmen in der industriellen Fertigung durchaus verbreitet; im Gegensatz zum 3-Schicht-Modell oft mit späterem Schichtbeginn (ca. 07:00 Uhr).

### ***Zeiteinteilung für einen Arbeitstag im 1-Schicht-Betrieb***

Nachdem bereits die grobe Zeitstruktur eines (Arbeits-)Tags beschrieben wurde, werden final die außerberuflichen Aktivitäten kategorisiert in Beanspruchung und Erholung und eine repräsentative Zeiteinteilung einer Arbeitsperson an einem beliebigen Arbeitstag im 1-Schicht-Betrieb wird modelliert.

Zeitverwendungsstudien differenzieren neben der Erwerbstätigkeit eine Vielzahl weiterer Hauptätigkeitskategorien wie bspw. Haushaltsführung und Familie, Sozialleben, Hobbys etc., welche wiederum hoch detailliert unterteilt sind in mehrere spezifische Aktivitäten wie z. B. Spielen und Sport mit Kindern oder Fahrzeugreparatur und -pflege (bspw. Statistisches Bundesamt 2015a oder Bureau of Labor Statistics 2015). Im Rahmen der Zeitverwendungserhebung des Statistischen Bundesamtes (2015, S. 4) werden deutlich mehr als hundert verschiedene Aktivitäten unterschieden. Hinsichtlich der Abbildung von Freizeit und Ruhephasen im Rahmen der Simulation bzw. hinsichtlich der Kategorisierung in Beanspruchung und Erholung ist zunächst eine deutlich größere Betrachtung zweckmäßig. Beispielsweise differenzieren Domsch und Ladwig (2007) in ihrer Arbeit drei verschiedene übergeordnete Lebensbereiche: A Regeneration, B Privatleben und C Beruf. Abbildung 47 zeigt exemplarisch diese makroperspektivische Aufteilung.



**Abbildung 47:** „Aufteilung des wöchentlichen Zeitbudgets von Doppelkarrierepaaren [DCC = Dual Career Couples] auf die verschiedenen Lebensbereiche (...)“ aus Domsch und Ladwig (2007, S. 77)

Wie Abbildung 48 zu entnehmen ist, wurden für die ganzheitliche Abbildung von (Arbeits-)Tagen mit WorkDesigner drei Bereiche definiert. Datenbasis ist die Zeitverwendungserhebung des Statistischen Bundesamtes (2015) mit Fokus auf Erwerbstätige (S. 115 ff.):

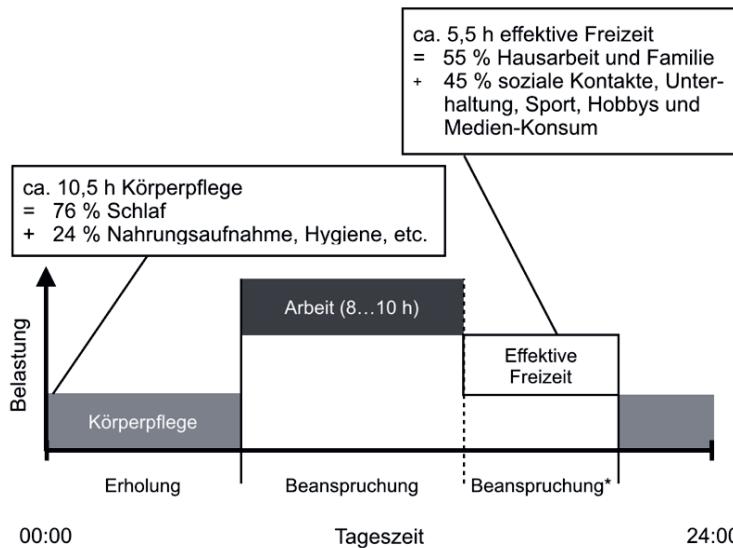
- Körperpflege (PCA, Eng. Personal Care Activities): Der Bereich Körperpflege nimmt mit ca. 10,5 h, d. h. etwa 44 % eines (Arbeits-)Tages ein. Drei Viertel dieser Zeit schläft eine durchschnittliche erwerbstätige Person. Die restliche Zeit wird u. a. für Nahrungsaufnahme und Hygiene aufgewendet. In der Simulation wird dieser Zeitbereich als Regenerationsphase bzw. Erholung abgebildet.
- Arbeit: Der Bereich Arbeit dominiert den Tagesablauf. Mit 8 bis 10 h zzgl. Pausen nimmt er etwa zwischen einem Drittel und bis zu knapp der Hälfte des (Arbeits-)Tages ein. Der Bereich Arbeit wird wie in den Unterkapiteln zuvor beschrieben detailliert simuliert; primär als Beanspruchung.

#### 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

- Effektive Freizeit (ELT, Eng. Effective Leisure Time): Die Effektive Freizeit nimmt in Relation zu den beiden anderen Lebensbereichen mit nur ca. 23 % den geringsten Anteil der Tageszeit ein. Hiervon verwendet eine durchschnittliche erwerbstätige Person etwas mehr als die Hälfte für Haushaltsführung und Familie, der restliche Zeitanteil wird u. a. für soziale Kontakte, Sport, Hobbys etc. genutzt. Die effektive Freizeit wird in der Simulation pauschal als Beanspruchung\* abgebildet.

(Vgl. Gust et al. 2016, S. 7)

Die zugehörigen Übertragungsfunktionen werden in Unterkapitel 4.4.2 beschrieben.

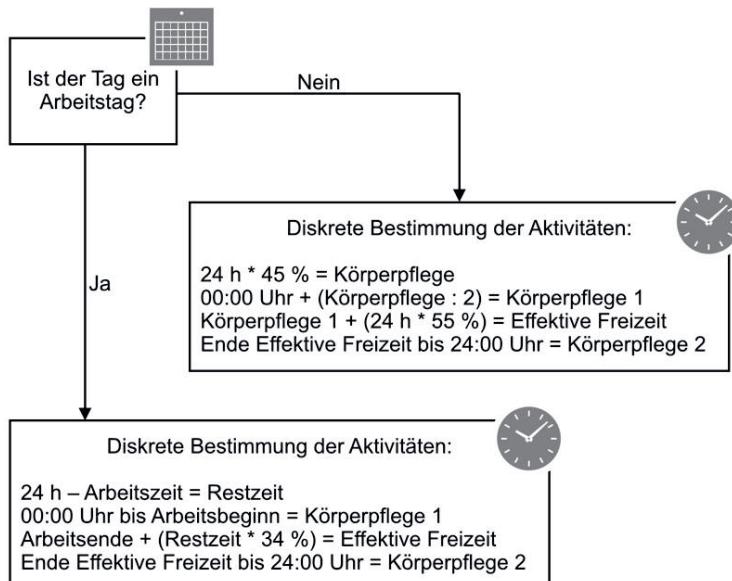


**Abbildung 48:** Repräsentative Zeiteinteilung und Belastung einer Arbeitsperson an einem beliebigen Arbeitstag im 1-Schicht-Betrieb aus Gust et al. (2016, S. 7)

#### 4.4.2 Freizeit und Ruhephasen

Wie bereits in Unterkapitel 4.3 ausgeführt, sind Belastung und Erholung durch zeitabhängige Funktionen (Wachstum und Zerfall) beschrieben. Auch wurde darauf eingegangen, dass neben der Dauer einzelner Aktivitäten ebenfalls ihre Reihenfolge hinsichtlich der resultierenden Beanspruchung von Relevanz ist.

Abbildung 49 zeigt dementsprechend die notwendige Fallunterscheidung zur Bestimmung von Dauer und zeitlicher Lage der Bereiche Körperpflege und effektive Freizeit.



**Abbildung 49:** Fallunterscheidung zwischen Arbeitstag und Ruhetag und diskrete Bestimmung der Aktivitäten Körperpflege und effektive Freizeit

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, wird zunächst differenziert zwischen Arbeits- und Ruhetagen, d. h. zwischen Tagen mit und ohne Arbeitsplan bzw. Tätigkeitsprofil. An Arbeitstagen wird in Abhängigkeit der Arbeitszeit die verbleibende Resttageszeit bestimmt und gem. der zuvor definierten repräsentativen Zeiteinteilung (s. Abb. 48) proportional aufgeteilt. Hierbei wird die Körperpflege in zwei Bereiche unterteilt: von 00:00 Uhr bis Arbeitsbeginn und von Ende der Effektiven Freizeit bis 24:00 Uhr. Die Effektive Freizeit beginnt unmittelbar nach Arbeitsende. Ruhetage (Wochenenden und Urlaube) werden zeitlich unterteilt in 45 % Körperpflege und 55 % Effektive Freizeit; zwei gleichlange Zeitanteile Körperpflege rahmen den Bereich Effektive Freizeit ein.

### ***Berechnung der Belastung während der Effektiven Freizeit***

Die Berechnung der Beanspruchung während der effektiven Freizeit an Arbeitstagen (Beanspruchung\*; s. Gl. 23) basiert auf der unter 4.3 vorgestellten Beanspruchungsformel (s. Gl. 20). Beispielsweise Schlick et al. (2010, S. 268-269), Bullinger (1994, S. 49-50), Bokranz und Landau (1991, S. 126-129) oder Löhr (1976, S. 24-25) beschreiben vergleichbar, dass ein Mensch bereit ist etwa ein Drittel seiner Leistungsfähigkeit in Freizeitaktivitäten zu investieren. Dementsprechend wird in Gleichung (23) für die ganzheitliche Belastung 33 % der physischen Leistungsfähigkeit eingesetzt. Unter ergänzender Berücksichtigung der Annahme, dass die Arbeitsleistungsfähigkeit 60 % der physischen Leistungsfähigkeit entspricht (s. Unterkapitel 4.1.1, Gl. 3), ergibt sich für die Berechnung der Beanspruchung\* der nachfolgende und ausschließlich von der Dauer der effektiven Freizeit  $t_{eff}$  abhängige Ausdruck (vgl. Gust et al. 2016, S. 7-9).

$$s = s_i + e^{t_{eff} \left( \frac{0,33 \cdot PAL}{WAL} \right)} \Rightarrow s_i + e^{t_{eff} 0,55}, \quad \text{Beanspruchung* an Arbeitstagen} \quad (23)$$

Dabei bedeuten:

$s$  Beanspruchung in %

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

$s_i$  Beanspruchung zu einem diskreten Zeitpunkt

$t_{eff}$  Dauer der Effektiven Freizeit in h

$PAL$  Physische Leistungsfähigkeit in %

$WAL$  Arbeitsleistungsfähigkeit in %

Die Berechnung der Beanspruchung\* an Ruhetagen unterliegt der Annahme, dass ein Mensch an Ruhetagen während der Freizeit ein gesundes Gleichgewicht zwischen belastenden Tätigkeiten und Erholungspausen einhält. Das heißt, am Ende der Effektiven Freizeit an Ruhetagen ist die Beanspruchung neutral (s. Gl. 24; vgl. Gust et al. 2016, S. 7-9).

$$s = s_i + 0, \quad \text{Beanspruchung* an Ruhetagen} \quad (24)$$

Die Berechnung der Erholung während der Körperpflegephasen sowohl an Arbeitstagen als auch an Ruhetagen erfolgt analog der unter 4.3 beschriebenen Regenerationsformel (s. Gl. 22) unter Verwendung der jeweiligen Dauer: für Pausen  $t_b$ , für effektive Freizeit  $t_{eff}$  und für Körperpflege  $t_{pca}$ .

### 4.5 SWOT-Analyse des Simulationsmodells

Im Rahmen der nachfolgenden SWOT-Analyse werden die Stärken (Strength), Schwächen (Weak), Chancen (Opportunities) und Risiken (Threats) des präsentierten alters- und belastungsorientierte Simulationsmodells WorkDesigner konkludiert.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

### **Stärken**

Eine große Stärke des in diesem Kapitel detailliert beschriebenen alters- und belastungsorientierten Simulationsmodells ist die individuelle Beschreibung von Erwerbstägigen und die einfache Parametrierung von Arbeitsplätzen als Modellelemente. Diesbezüglich ist zum einen die diskrete Bestimmung der individuellen physischen Leistungsfähigkeit (*PAL*) respektive körperliche Arbeitsleistungsfähigkeit (*WAL*) basierend auf Alter, Geschlecht und Fitness einer Arbeitsperson zu nennen (s. Unterkapitel 4.1.1). Zum anderen ist die entwickelte vereinfachte Bewertung von Belastungen am Arbeitsplatz hervorzuheben (s. Unterkapitel 4.1.2). Vor allem KMU kommen den durch das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG 2015) geregelten und durch die Arbeitsstättenverordnung (ArbStättV 2017) insbesondere durch die diversen Technischen Regeln für Arbeitsstätten (ASR) definierten Vorgaben zur Beurteilung von Arbeitsplätzen aufgrund mangelnder Ressourcen (Geld, Zeit, Qualifikation, Equipment) i. d. R. nur äußerst rudimentär nach. Mit dem Einsatz der Software WorkDesigner kann hier einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung geleistet werden. Das Simulationstool deckt die wesentlichen umgebungsspezifischen und tätigkeitsspezifischen physischen Belastungsfaktoren bei hauptsächlich körperlicher Arbeit in der industriellen Fertigung ab und ist dabei verständlich und anwenderorientiert (s. Unterkapitel 4.1.2 und ergänzend ASR V3 2017).

Eine weitere Stärke ist die Abbildung individueller und altersassozierter physischer Veränderungen (d. h. Altern) während der Simulation bzw. bei der Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung. Wie zu Beginn des Unterkapitels 4.2 beschrieben, erfüllt das vorgestellte Simulationsmodell WorkDesigner diesbezüglich das aktuelle wissenschaftlich-technische Anforderungsprofil; insbesondere bzgl. einer prospektiven Betrachtung beim Einrichten von Arbeitsstätten wie sie die ASR V3 (2017, S. 5) empfiehlt.

## 4 Alters- und belastungsorientiertes Simulationsmodell für die Entwicklung neuer und die Bewertung bestehender Arbeitssysteme

---

Die wesentliche Stärke des präsentierten Simulationsmodells WorkDesigner ist die Simulation ganzheitlicher Arbeitsbelastungen. Wie einleitend in Unterkapitel 4.3 ausgeführt, treten in der industriellen Praxis tätigkeitsspezifische und umgebungsspezifische Belastungsfaktoren nie einzeln isoliert auf; konsequenterweise sind bei der Beurteilung von Arbeitssystemen die Wechselwirkungen unterschiedlicher Belastungen respektive Belastungsarten und die resultierende Gesamtbelastung zu betrachten (s. ergänzend ASR V3 2017, S. 10). Wie ebenfalls in Unterkapitel 4.3, insbesondere Unterkapitel 4.3.1, dargestellt, liefert das Simulationsmodell mit einem ganzheitlichen Berechnungsansatz diesbezüglich einen Beitrag zum identifizierten und beschriebenen Handlungsdesiderat bzgl. der Superposition von Belastungen am Arbeitsplatz.

### **Schwächen**

Als signifikante Schwachstelle des simulationsbasierten Softwaretools WorkDesigner muss die Abbildung von Freizeit und Ruhephasen genannt werden. Zwar ist einerseits wie in Unterkapitel 4.4 beschrieben, die Einbeziehung von Zeiträumen außerhalb der Arbeitszeit hinsichtlich der Simulation von Beanspruchungsverläufen über mehrere Tage, Wochen, Monate oder ggf. Jahre notwendig. Auf der anderen Seite beherbergen Freizeit und Ruhephasen ein nicht abschätzbares Fehlerpotential. Beispielsweise Zweitjobs bzw. Nebentätigkeiten oder das Pflegen von Angehörigen belasten Personen ggf. sogar stärker als die primäre Berufstätigkeit; u. a. mangelnde Bewegung bzw. Sport oder der erhöhte Konsum von Alkohol verzögern gravierend die geistige und körperliche Regeneration.

Eine weitere Schwäche stellt die Fokussierung von WorkDesigner auf ausschließlich physische Belastungen dar. Die Verordnung über Arbeitsstätten (ArbStättV 2017, §3 Gefährdungsbeurteilung) und das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG 2015, §5 Beurtei-

lung der Arbeitsbedingungen) geben in ihrer aktuellen Fassung jeweils explizit die Beurteilung sowohl von physischen als auch von psychischen Belastungen am Arbeitsplatz vor. Zwar entspricht eine zunächst separierte Beurteilung unterschiedlicher Belastungsarten dem aktuellen Stand der Technik respektive der gängigen industriellen Praxis (s. ergänzend Unterkapitel 4.3.1), jedoch ist hinsichtlich einer ganzheitlichen Beurteilung der Arbeitsbelastung (physisch und psychisch) ein erweiterter integraler Ansatz wünschenswert (s. ergänzend Unterkapitel 4.3.2).

### ***Chancen***

Der in Unterkapitel 4.3 vorgestellte Berechnungsansatz zur Bestimmung einer ganzheitlichen Arbeitsbelastung beinhaltet großes Potential. Wie jeweils einleitend in Unterkapitel 4.3 und 4.3.1 ausgeführt, ermöglicht der neuartige Berechnungsansatz erstmals die Beurteilung einer ganzheitlichen Arbeitsbelastung bzw. superponierter Belastungen am Arbeitsplatz. Vor allem aber ist der präsentierte Berechnungsansatz bzgl. der Anzahl an Belastungsfaktoren in der Theorie beliebig erweiterbar. Nach einer erfolgreichen Validierung könnten aufbauende Arbeiten die Systemintegration psychischer Belastungsfaktoren untersuchen. Die Verknüpfung mit Wearables und Big Data Applications könnte hierbei einen entscheidenden Beitrag leisten.

Eine weitere große Chance eröffnet das alters- und belastungsorientierte Tool Work-Designer durch die Simulation von mitarbeiterindividuellen Beanspruchungsverläufen über mittel und langfristige Zeiträume. Hierdurch können Arbeitssysteme prospektiv bzw. individuell und zukunftsorientiert gestaltet und bewertet werden. (S. ergänzend Unterkapitel 4.3.2 und 4.3.3)

### ***Risiken***

Wie in Unterkapitel 4.2 jeweils im Kontext altersassozierter Veränderungen einzelner körperlicher Fähigkeiten beschrieben, ist Altern ein hoch individueller und multifaktorieller Prozess, welcher bis heute nicht vollständig erforscht ist. Während im Bereich der Produktentwicklung oder der Gestaltung von Lebensräumen gezielt auf ältere und alternde Anwendergruppen eingegangen wird und Gestaltungsempfehlungen explizit in Normen und Richtlinien verankert sind, bspw. die Zunahme des relativen Lichtbedarfs mit dem Alter (VDI 6008 Bl. 1) oder die altersabhängige Hörschwellenverschiebung (DIN EN ISO 7029), werden aktuelle Forschungsergebnisse zu altersdifferenzierten Arbeitssystemen in der industriellen Praxis immer noch nur bedingt berücksichtigt. Zwar wurden in den letzten Jahren u. a. motiviert durch den Megatrend „Demographischer Wandel“ Gesetze, Verordnungen und Normen zur Gestaltung von Arbeitssystemen aktualisiert, jedoch besteht hier weiterhin Optimierungspotential. Bezüglich des neu entwickelten Systems WorkDesigner gestaltet sich hieraus besonders die Systemvalidierung als herausfordernd. Eine rein wissenschaftlich theoretische Prüfung des Simulationsmodells ist daher nur bedingt zielführend, letztlich muss das System empirisch validiert werden.

Insbesondere der in Unterkapitel 4.3 vorgestellte Berechnungsansatz zur Bestimmung einer ganzheitlichen Arbeitsbelastung stellt hinsichtlich der Prognose der Beanspruchung und des Verlaufs kombinierter Belastungen ein hohes Risikopotential bzgl. einer Validierung dar. Wie einleitend zu Unterkapitel 4.3 beschrieben besteht in diesem arbeitswissenschaftlichen Themengebiet seit vielen Jahren ein anhaltendes Forschungsdesiderat, welches nur durch empirische Untersuchungen sukzessive abgebaut werden kann.

Abschließend muss das ethische Problem angeführt werden, dass das simulationsbasierte Softwaretool WorkDesigner für die Bewertung und Entwicklung von Arbeitssystemen sowohl mit dem Impetus zur Erhaltung und Steigerung von Wohlbefinden und Gesundheit von Arbeitspersonen genutzt werden kann als auch mit dem Bestreben nach ausschließlich wirtschaftlicher Optimierung der Produktivität der Fertigung. Verantwortungsbewusste und menschengerechte Gestaltung von Arbeit bedingt immer „[...], dass die Arbeitenden nicht über- oder unterfordert werden“ (REFA 1991, S. 225).

## 5 Prototypische Umsetzung des Simulationsmodells als Software-Applikation

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Realisierung des zuvor detailliert beschriebenen alters- und belastungsorientierten Simulationsmodells dargestellt. Hierzu wird einleitend die System- bzw. Softwareidee WorkDesigner charakterisiert. Im Anschluss wird die Struktur der Software vorgestellt und die Implementierung des Simulators in der Apple-Programmiersprache SWIFT präsentiert. Das Kapitel schließt ab mit einer Reflektion über den mehrjährigen und iterativen Software-Realisierungsprozess.

### 5.1 Systemidee WorkDesigner

Nachfolgend sind die wesentlichen Erkenntnisse und Ergebnisse der vorherigen Kapitel als Systemidee zusammengefasst.

## 5 Prototypische Umsetzung des Simulationsmodells als Software-Applikation

---

Die Software-Applikation WorkDesigner liefert gleichermaßen ungeschulten Arbeitskräften und fachkundigen Anwenderinnen und Anwendern in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen (KMU) eine Informationsgrundlage für die alters- und belastungsorientierte Beurteilung von Arbeitssystemen. Der Fokus liegt hierbei auf hauptsächlich körperlicher Arbeit. Die Beurteilungsgrundlage bildet die Bewertung der relativen Beanspruchung über eine beliebige Arbeitsperiode.

Gängige Softwarelösungen zur Simulation respektive Bewertung von Arbeitssystemen sind i. d. R. mit Anschaffungs-, Wartung- und Schulungskosten von mehreren tausend Euro verbunden. Hinsichtlich einer breiten Anwendung des Softwaretools WorkDesigner, vor allem bei KMU, wurde das System als Software-Applikation für mobile Endgeräte realisiert. WorkDesigner soll dadurch für jede Mitarbeiterin und jeden Mitarbeiter im Betrieb zur Verfügung stehen. Einfache Bewertungsschemata ermöglichen die Bewertung von Arbeitssystemen ggf. auch ohne den Einsatz aufwendiger und kostspieliger Messtechnik.

Die wesentlichen Eigenschaften bzw. Leistungsmerkmale von WorkDesigner sind:

- individuelle Berücksichtigung körperlicher Fähigkeiten (Alter, Geschlecht und körperliche Fitness),
- Abbildung von Alterungsprozessen der Erwerbstätigen,
- anwendungs- und nutzerorientierte Schemata zur Bewertung von Arbeitsplätzen,
- ganzheitliche, d.h. kombinierte tätigkeits- und umgebungsspezifische Betrachtung von Belastungen und Belastungsverläufen bei hauptsächlich körperlicher Arbeit,
- Prognose von Beanspruchungsverläufen für mittlere (Tage, Wochen) und langfristige (Monate, Jahre) Zeiträume.

Im Gegensatz zu den üblichen Expertensystemen (vgl. Kapitel 3) setzt WorkDesigner kein spezifisches Fachwissen zu Simulation und/oder der Gestaltung von Arbeitssystemen voraus.

Zukünftige Versionen von WorkDesigner können zusätzlich ortsspezifische Daten wie Positionskoordinaten, Klimakennwerte, Lautstärke und Helligkeit über mobile Endgeräte mit einbeziehen; auch können personenspezifische Daten wie Herzfrequenz, Schlafrhythmus und Bewegungsprofil die Individualisierung von WorkDesigner signifikant steigern.

### 5.2 Ablaufstruktur

Abbildung 50 zeigt das Aktivitätsdiagramm des Simulationstools WorkDesigner. Die Aktivitäten „Arbeitsplan anlegen“, „Arbeitsplatz anlegen“ und „Erwerbstätigen anlegen“ ermöglichen mit bzw. nach ihrer Synchronisation (s. Abb. 50 waagerechter schwarzer Balken) die Modellierung beliebiger Simulationsszenarien (vgl. Abb. 15 „Generator“). Die drei Aktivitäten sind als Eingabemasken realisiert. Die Aktivität „Erwerbstätigen anlegen“ dient der Aufnahme der relevanten Attribute zur individuellen Beschreibung von Erwerbstätigen (vgl. Unterkapitel 4.1.1) und der Verwaltung der Modellelemente, d. h. benennen, speichern, löschen. Analog leistet die Aktivität „Arbeitsplatz anlegen“ die Parametrierung der Basiskomponente Arbeitsplatz (vgl. Unterkapitel 4.1.2) und ebenfalls die entsprechende Verwaltung der Modellelemente. Die Aktivität „Arbeitsplan anlegen“ ermöglicht das Erstellen und Verwalten (benennen, speichern, löschen) von Tätigkeitsprofilen in tabellarischer Form und ähnlich zu im Personalwesen üblichen Tätigkeits- bzw. Stellenbeschreibungen. Ein Arbeitsplan setzt sich zusammen aus:

- Wochearbeitszeit (h),
- Anteil Arbeitstage mit Überstunden im gesetzlichen Rahmen pro

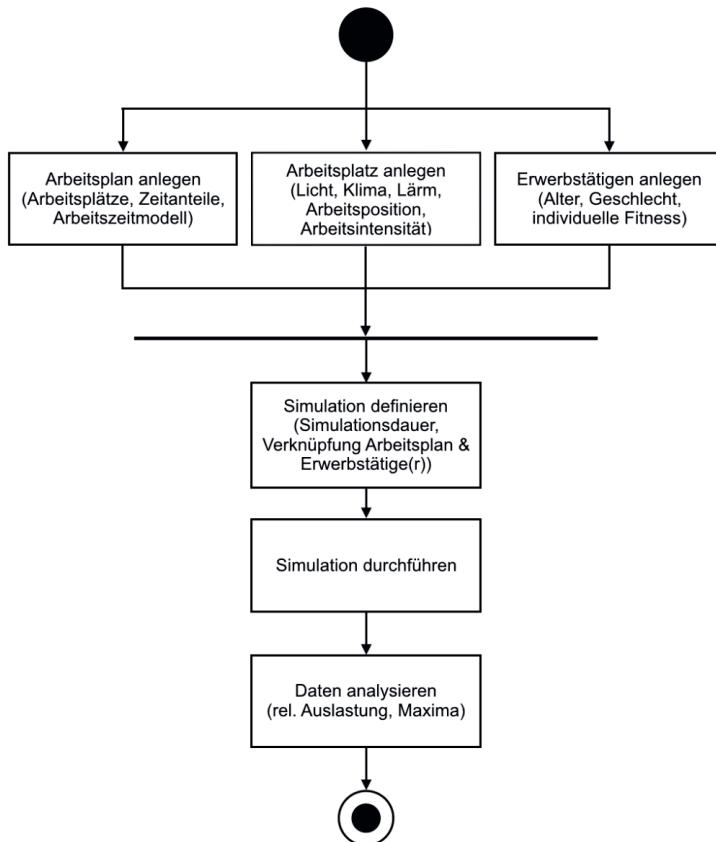
- Woche (%),
- Arbeitszeit (hh:mm),
- Pausenzeiten (hh:mm),
- Tätigkeit(en) aus der Menge an Arbeitsplatz-Modellelementen,
- Anteil jeder Tätigkeit an der Wochenarbeitszeit (%),
- Maximale kontinuierliche Ausführungsduer jeder Tätigkeit (min).

Die an die Generator-Aktivitäten anschließenden, aufeinanderfolgenden beiden Aktivitäten „Simulation definieren“ und „Simulation durchführen“ bilden den Kern bzw. den sog. Simulator der Software-Applikation WorkDesigner. Zu Beginn einer Simulationsuntersuchung werden eine Erwerbstätige bzw. ein Erwerbstätiger mit einem Arbeitsplan verknüpft und die Simulationsdauer wird in Wochen vorgegeben; auch können Urlaubstage als einzelne Kalendertage im Jahr definiert werden. Die Anzahl der Simulationsläufe und die Benennung des Simulationsszenarios werden ebenfalls in der Aktivität „Simulation definieren“ mit festgelegt.

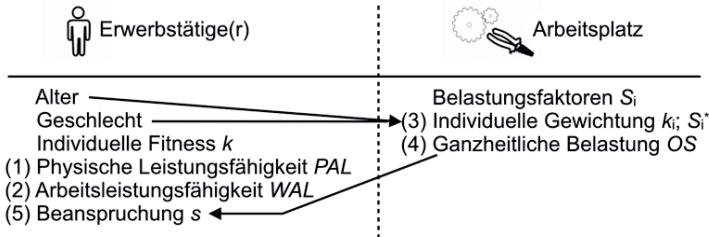
Für die Aktivität „Simulation durchführen“ zeigt Abbildung 51 ergänzend die Ablaufstruktur der Modellelemente „Erwerbstätige“ und „Arbeitsplätze“, die logischen Verknüpfungen und die entsprechende Zuordnung der Variablen bzw. Attribute; die vorangestellte Nummerierung kennzeichnet die interne Reihenfolge der Abarbeitung an einem diskreten Simulationszeitpunkt während der Arbeitszeit (vgl. Müller et al. 2015b, S. 180-181). Im ersten Schritt wird in Abhängigkeit von Alter, Geschlecht und der individuellen Fitness die physische Leistungsfähigkeit *PAL* berechnet und direkt im Anschluss die entsprechende Arbeitsleistungsfähigkeit *WAL* bestimmt (vgl. Unterkapitel 4.1.1). Als drittes werden die arbeitsplatzspezifischen Belastungsfaktoren individuell gewichtet (vgl. Unterkapitel 4.2). Die ganzheitliche Belastung *OS* wird als gewichteter Mittelwert der individualisierten Belastungsfaktoren im vierten Schritt ermittelt (vgl. Unterkapitel 4.3.1). Abschließend wird die Beanspruchung *s* in Abhängigkeit von Tätigkeit

## 5 Prototypische Umsetzung des Simulationsmodells als Software-Applikation

und Dauer berechnet (vgl. Unterkapitel 4.3.2 und 4.3.3). Funktionalität und Implementierung des Simulators sind in den nachfolgenden Unterkapiteln noch detaillierter beschrieben.



**Abbildung 50:** Aktivitätsdiagramm WorkDesigner, orientiert an der Unified Modeling Language (UML)



**Abbildung 51:** Ablaufstruktur Erwerbstätige(r) und Arbeitsplatz während der Arbeitszeit für die Aktivität „Simulation durchführen“, entnommen aus Müller et al. (2015b, S. 181)

Die finale Aktivität „Daten analysieren“ (s. Abb. 50) bereitet die anfallenden Simulationsdaten für eine Beurteilung durch den Anwender vor und speichert sie in einer CSV-Datei. Das heißt, zum einen wird die individuelle Auslastung des bzw. der Erwerbstätigen zu jedem diskreten Zeitpunkt gem. Gleichung (25) berechnet und in einer Datei gespeichert.

$$Util_i = \frac{S_i}{WAL_i} \quad (25)$$

Dabei bedeuten:

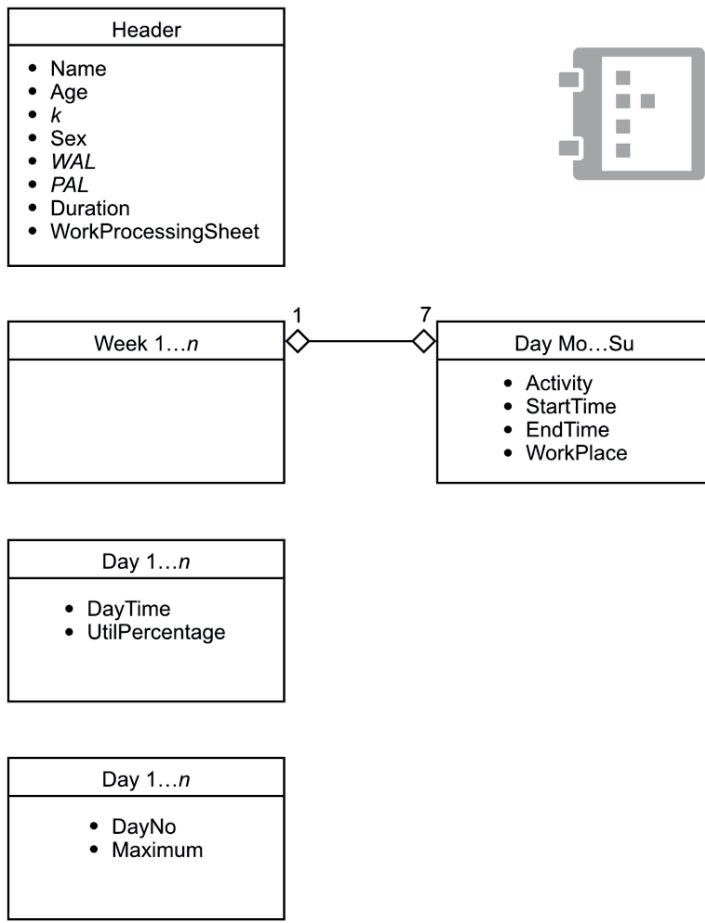
$Util_i$  Auslastung zu einem diskreten Zeitpunkt  $i$  (%)

$S_i$  Beanspruchung zu einem diskreten Zeitpunkt  $i$

$WAL_i$  Arbeitsleistungsfähigkeit zu einem diskreten Zeitpunkt  $i$

Zum anderen wird für jeden simulierten Arbeitstag (24 h) der Maximalwert der Auslastung nochmals gesondert in derselben Datei gespeichert. Eine Ergebnisdatei gliedert sich wie in Abbildung 52 dargestellt in vier Daten- bzw. Informationsblöcke. Der Datei-Header beinhaltet alle relevanten Informationen zum jeweiligen Simulationslauf; Alter,

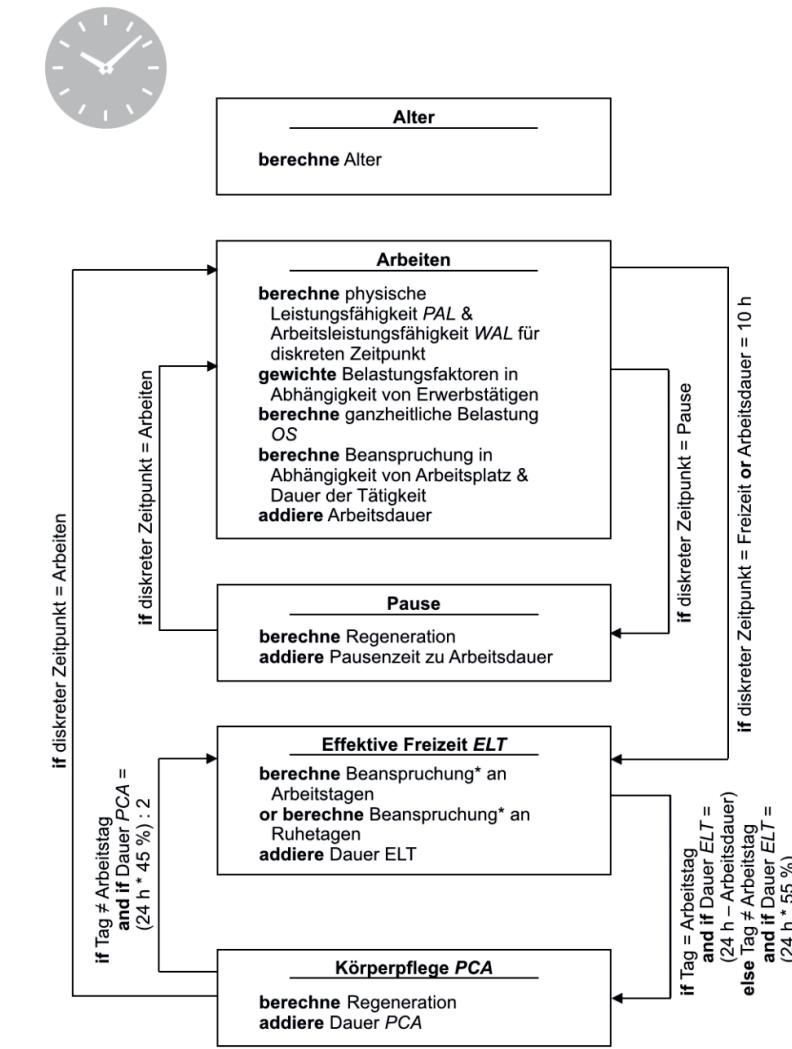
Arbeitsleistungsfähigkeit und physische Leistungsfähigkeit sind bezogen auf den Startzeitpunkt der Simulation. Im folgenden Block wird wochenweise für den Simulationszeitraum, jeweils für jeden Tag der Woche, das genaue Tätigkeitsprofil inkl. Pausen und außerberuflicher Aktivitäten aufgelistet. Im dritten Block ist über den gesamten Simulationszeitraum jeweils pro Tag (24 h) die Auslastung chronologisch aufgelistet. Im letzten Datenblock der Ergebnisdatei werden wie bereits angesprochen die Tagesmaximalwerte für jeden Tag des Simulationslaufs in zeitlicher Reihenfolge abgelegt. Die beschriebene Kollektion an Ergebnisdaten ermöglicht makro- und mikroperspektivische Analysen; entsprechende Analysen bzw. Ergebnisdarstellungen werden nachfolgend in Kapitel 6 im Rahmen der Validierung des Softwaretools WorkDesigner präsentiert.



**Abbildung 52:** Aufbau einer CSV-Ergebnisdatei

### 5.3 Erwerbstätige als zentrales Simulationselement

Erwerbstätige sind das zentrale Simulationselement der Software-Applikation Work-Designer. Sie durchlaufen während der Simulation bzw. während der Aktivität „Simulation durchführen“ tages- und zeitabhängig fünf verschiedene Zustände, wie in Abbildung 53 dargestellt ist: Alter, Arbeiten, Pause, effektive Freizeit (*ELT*) und Körperpflege (*PCA*). Zu Beginn eines jeden Tages wird das Erwerbstägenalter berechnet bzw. aktualisiert. Die Zustände „effektive Freizeit *ELT*“ und „Körperpflege *PCA*“ und die entsprechenden Entscheidungsregeln differenzieren, gem. der bereits zuvor beschriebenen Abbildung von Freizeit und Ruhephasen während der Simulation (vgl. Unterkapitel 4.4.2), zwischen Arbeitstagen (Beanspruchung\* an Arbeitstagen) und arbeitsfreien Tagen (Beanspruchung\* an Ruhetagen).



**Abbildung 53:** State Machine Erwerbstätige(r) inkl. Stimuli für Zustandsänderungen und Beschreibung zustandsspezifischer Aktionen in Pseudocode, orientiert an UML

## 5.4 Implementierung des Simulators in SWIFT

Die Aktivität „Simulation durchführen“ bildet das Herz des simulationsbasierten Softwaretools WorkDesigner (s. ergänzend Abb. 50). Wie in Unterkapitel 5.3 beschrieben, wird für jeden diskreten Simulationszeitpunkt der Zustand des bzw. der Erwerbstätigen ermittelt und die entsprechende Tätigkeit bzw. außerberufliche Aktivität simuliert (s. Abb. 53). Der eigentliche Simulator von WorkDesigner untergliedert sich in zwei wesentliche Funktionen respektive Funktionsblöcke: der zufälligen Generierung von Arbeitstagen (vgl. Unterkapitel 5.4.1) und der diskreten Simulation von Tätigkeiten bzw. Aktivitäten (vgl. Unterkapitel 5.4.2).

### 5.4.1 Zufällige Generierung von Arbeitstagen – *WorkProcessingSheet*

Die Basis für alle nachfolgend beschriebenen Zufallsaktivitäten bildet die SWIFT-Funktion **arc4random\_uniform()** zur Generierung gleichverteilter und pseudo-zufälliger Zahlen, welche wiederum auf dem Stream Cipher RC4 basiert. RC4 wurde in den 1980er Jahren als Chiffre für Datenströme entwickelt, 1994 anonym online veröffentlicht und ist bis heute eine der einfachsten und am weitesten verbreiteten Cipher weltweit. Unter anderem basieren viele Verschlüsselungen im Bereich von Software- und Internet-Anwendungen auf der RC4-Chiffre, wie bspw. WEP (Wired Equivalent Privacy), WAP (Wi-Fi Protected Access) und TSL (Transport Layer Security)/SSL (Secure Socket Layer); RC4 ermöglicht in etwa  $2^{170}$  vollkommen unabhängige und verschiedene Möglichkeiten bzw. Variationen (vgl. Jindal und Singh 2015).

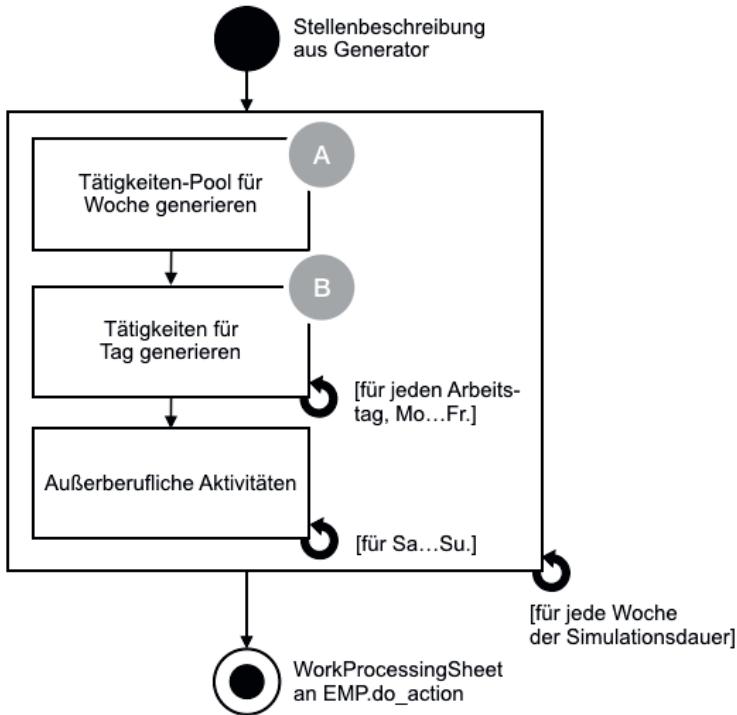
Die Funktion **arc4random\_uniform()** initialisiert sich selbst automatisch neu bei jedem Aufruf, d. h. es wird für jede Generierung von Zufallszahlen zunächst ein zufälliger Startwert bestimmt; dies garantiert nachfolgend die Unabhängigkeit der Zufallszahlen

voneinander. Im nächsten Schritt werden pseudo-zufällig, d. h. basierend auf einem Algorithmus (RC4), „unsigned integer“-Zahlen zwischen 0 und einer variabel definierbaren Obergrenze  $\leq (2^{32}) - 1$  bestimmt (vgl. Jindal und Singh 2015, S. 700 und Apple Developer 2018).

Abbildung 54 zeigt nachfolgend das Aktivitätsdiagramm „Zufallsgenerator WorkProcessingSheet“. Auf Grundlage der Tätigkeits- bzw. Stellenbeschreibung (vgl. Unterkapitel 5.2) wird für jede Woche der Simulationsdauer zunächst ein Tätigkeiten-Pool generiert und konsekutiv die Aktivitäten für jeden Tag der Woche erzeugt. Die beiden integralen Aktivitäten sind in der Darstellung mit grau hinterlegten Großbuchstaben gekennzeichnet und im weiteren Verlauf graphisch und textuell detailliert beschrieben: (A) „Tätigkeiten-Pool für Woche generieren“ und (B) „Tätigkeiten für Tag generieren“.

### ***Aktivitäten-Pool für Woche generieren***

Abbildung 55 visualisiert das Aktivitätsdiagramm „Aktivitäten-Pool für Woche generieren“. Output der Aktivität ist ein zufälliges, quantitatives Mengengerüst an Arbeitsaktivitäten für eine Woche. Hierzu wird zu Beginn zufällig entschieden, ob der jeweilige Tag ein Arbeitstag mit oder ohne Mehrarbeit ist. Für den Fall, dass es sich um einen Tag mit Überstunden handelt, wird nachfolgend im Rahmen des definierten Anteils der Arbeitstage mit Überstunden pro Woche und des geltenden regulatorischen Rahmens (vgl. Unterkapitel 5.2) die Dauer der Mehrarbeit zufällig bestimmt. Im Anschluss wird die Gesamtwochenarbeitszeit berechnet. Abschließend wird gem. der im Vorfeld definierten Tätigkeitsanteile an einer Arbeitswoche (vgl. Unterkapitel 5.2) ein konkretes Zeitkontingent für jede Tätigkeit (Aktivitäten-Pool) quantifiziert. Auf diese Weise werden möglichst realitätsnah, für jeden Simulationslauf beliebige Abfolgen von Tagesarbeitszeiten und Wochenarbeitszeiten abgebildet.



**Abbildung 54:** Aktivitätsdiagramm „Zufallsgenerator WorkProcessingSheet“, orientiert an UML

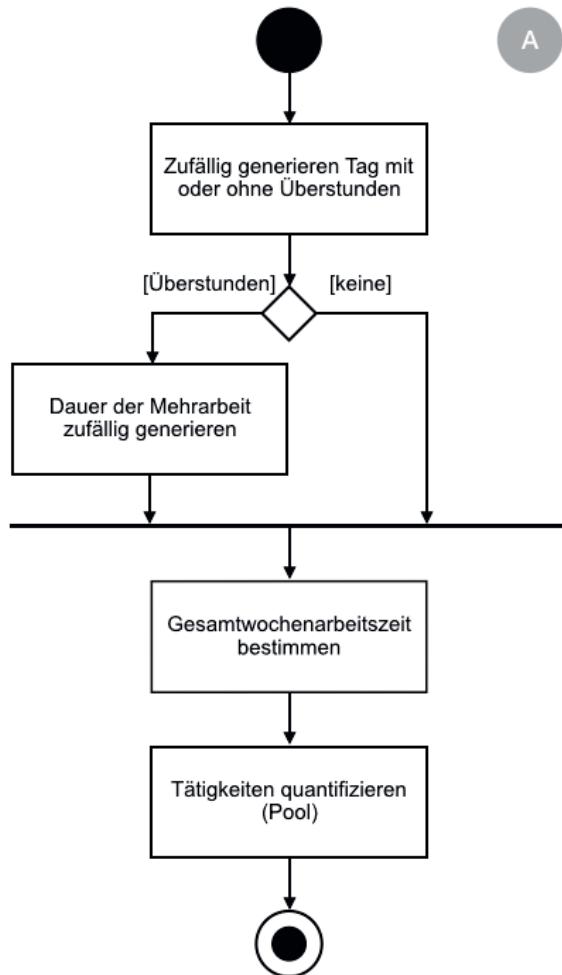
### **Tätigkeiten für Tag generieren**

Abbildung 56 stellt das Aktivitätsdiagramm „Tätigkeiten für Tag generieren“ dar. Output der Aktivität ist ein Arbeitsplan bzw. WorkProcessingSheet, welcher für jeden Tag ei-

ner Woche eine beliebige Abfolge von Arbeitstätigkeiten von zufälliger Dauer bereitstellt. Auf diese Weise wird berücksichtigt, dass die Abfolge von Arbeitsbelastungen sich unmittelbar auf den Verlauf der Beanspruchung auswirkt.

*„Da der Ermüdungsverlauf einem Potenzgesetz zu gehorchen scheint, verursacht eine erbrachte Arbeitseinheit zu Beginn der Arbeit eine wesentliche geringere Zunahme der Ermüdung als im weiteren Verlauf [...]“ (Schlick et al. 2010, S. 203, vgl. Unterkapitel 4.3.2 Beanspruchung). „Da der Erholungsverlauf einer Exponentialfunktion folgt, ist der Erholungswert zu Beginn einer Pause wesentlich größer als im weiteren Verlauf der Pause [...]“ (Schlick et al. 2010, S. 203, vgl. Unterkapitel 4.3.3 Regeneration). „Je länger [...] einzeln[e] Arbeitsabschnitte dauern, desto höher steigt die [Ermüdung] [...] bis zum Ende des Abschnittes an, dementsprechend sind im Verhältnis dazu längere Erholungspausen notwendig“ (Schlick et al. 2010, S. 204); s. ergänzend Löhr (1976, S. 52-54) und Bokranz und Landau (1991, S. 228 ff.).*

Wie Abbildung 56 zu entnehmen ist, wird zu Beginn eine beliebige Tätigkeit aus dem zuvor generierten Pool ausgewählt. Im Anschluss wird die Dauer dieser Tätigkeit zufällig bestimmt. Für den Fall, dass die Dauer der Tätigkeit zwar im Rahmen der maximalen kontinuierlichen Ausführungsdauer liegt (vgl. Unterkapitel 5.2), jedoch das Zeitkontingent bereits erschöpft ist, wird erneut eine Tätigkeit und ihre zugehörige Dauer jeweils zufällig ermittelt. Für den Fall, dass die Dauer der Tätigkeit im Rahmen der maximalen kontinuierlichen Ausführungsdauer liegt und lediglich über die noch im Pool vorhandene Dauer der jeweiligen Tätigkeit hinausgeht, wird die Dauer der Tätigkeit mit der Restarbeitsdauer gleichgesetzt. Zuletzt wird die für die jeweilige Tätigkeit verbleibende Tages-Restarbeitsdauer berechnet. Dieser Ablauf wird solange wiederholt, bis die jeweilige Tagesarbeitsdauer aufgebraucht ist.



**Abbildung 55:** Aktivitätsdiagramm „Tätigkeiten-Pool für Woche generieren“, orientiert an UML

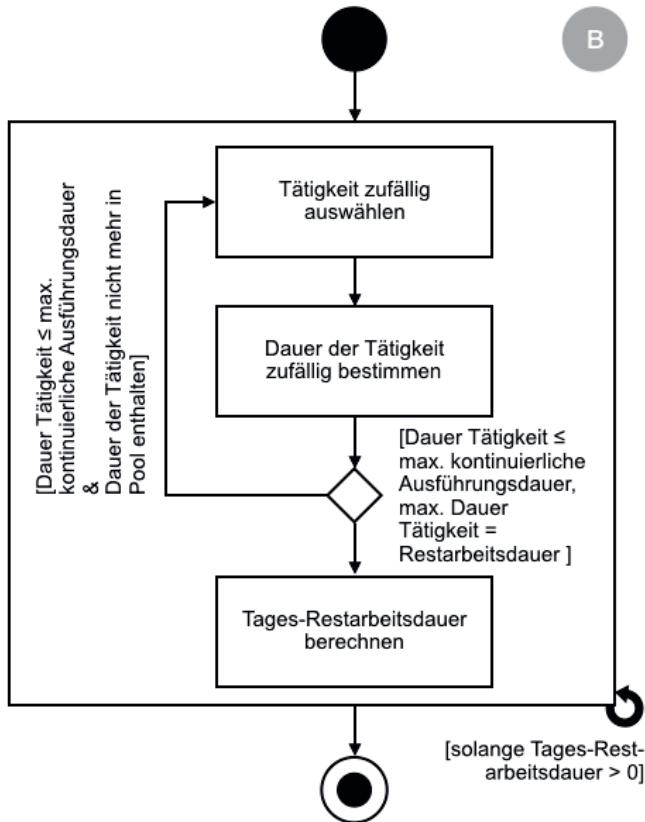


Abbildung 56: Aktivitätsdiagramm „Tätigkeiten für Tag generieren“, orientiert an UML

### 5.4.2 Diskrete Simulation von Tätigkeiten bzw. außerberuflichen Aktivitäten – *doSimulation*

Algorithmus (1) beschreibt die Implementierung des Simulationskerns in der Apple-Programmiersprache SWIFT. Die Funktion „doSimulation“ realisiert durch drei geschachtelte for-Schleifen die inkrementelle Simulation aller Modellelemente; an die Funktion übergeben wird die Anzahl zu simulierender Tage (days), die Auflösung der Zeitschritte in Sekunden (time\_step) und eine Liste mit Erwerbstägenobjekten (EMP\_List). Die EMP\_List beinhaltet eine erwerbstägen- und simulationslaufspezifische Beschreibung der Arbeitstage (WorkProcessingSheet) und eine Auflistung aller beteiligten Arbeitsplätze. Die äußere Schleife zählt die Simulationstage, die mittlere Schleife diskretisiert die Tageszeit in Zeitschritte bzw. -inkremente und die innere Schleife führt zu jedem diskreten Zeitpunkt die Funktion „EMP.do\_action“ für das jeweilige Modellelement Erwerbstäige aus. EMP.do\_action aktualisiert anhand von Simulationstag, Tageszeit und Zeitinkrement die State Machine Erwerbstäige(r) (Alter, Arbeiten, Pause, Freizeit, s. ergänzend Abb. 50) und somit die jeweiligen Erwerbstätigengenattribute (Alter, physische Leistungsfähigkeit, Arbeitsleistungsfähigkeit, Beanspruchung; vgl. Müller et al. 2015b, S. 184).

#### **Algorithmus 1: Implementierung Simulationskern**

```
func doSimulation(days:Int,time_step:Int,EMP_List: EmployeeList) {
    var Abs_Steps: Int = 86400 / time_step
    var DayTime: Int = 0
    for (var d: Int = 0; d < days; d++) {
        DayTime = 0
        for (var step: Int = 0; step < Abs_Steps; step++) {
            DayTime = DayTime + time_step
            for (var emp: Employee in EMP_List) {
                emp.doAction(DayTime)
            }
        }
    }
}
```

```
for Emp in EMP_List{  
    Emp.do_action(DayTime, inkr:time_step, Day:d)  
}  
}  
}  
}
```

---

### 5.5 Reflektion des Software-Realisierungsprozesses

In Tabelle 1 ist der Realisierungsprozess der Software-Applikation WorkDesigner als tabellarischer Lebenslauf chronologisch dargestellt. Zum Teil wurden erzielte Entwicklungsergebnisse und Erkenntnisse im Rahmen internationaler und nationaler Publikationen (peer-reviewed) veröffentlicht. Aus dem Lebenslauf geht hervor, wie vor allem die Anwendung der Software den Realisierungsprozess immer wieder maßgeblich beeinflusst hat.

*„Software wird nie ganz fertig. Es bleibt immer noch etwas zu ändern, zu verbessern. Und wenn Änderungen nicht zwingend notwendig sind, bleiben sie oft trotzdem wünschenswert – so lange, bis das Programm wieder aus dem Verkehr gezogen wird.“* (Oestreich und Scheithauer 2013, S. 3)

**Tabelle 1: Lebenslauf WorkDesigner**

Meilenstein	Publikation, Entwicklung,	Beschreibung
2014	Feller und Müller <i>Development and Assessment of Work</i>	Das Grundkonzept ist definiert inklusive Systemstruktur, Charakterisierung der Modellelemente und Beschreibung der Übertragungs-
2015	Müller et al. <i>WorkDesigner: Consulting Application Software for the Strain-Based Staffing and Design of Work Processes</i>  Müller et al. <i>Simulationstool zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung</i>	Eine erste Testversion WorkDesigner ist als iPad App realisiert. Wesentliches Ergebnis ist die Implementierung des Simulationskerns in SWIFT. Die generelle Funktionalität des Simulators ist an einfachen Beispielen nachgewiesen worden.  Auch ist der Simulator u. a. für die simultane Simulation mehrerer Erwerbstätiger vorbereitet worden, inkl. Berücksichtigung der Kapazität von Ressourcen bzw. der Auslastung von Fertigungsmitteln. Im Wesentlichen durch die Vorbereitung einer ersten Feldstudie in der industriellen Fertigung und damit verbundenen Gesprächen mit Industriepartnern ist deutlich geworden, dass sich das Simulationstool WorkDesigner durch die erweiterte Funktionalität hin entwickelt zu einem „klassischen“ Simulationswerkzeug und entfernt von der ursprünglichen Systemidee. Die Entwicklung in diese Richtung ist daher nicht weiterverfolgt worden.
2016	Gust et al.	Eine Methodik zur Validierung des Simulationstools WorkDesigner im Rahmen einer Feldstudie in der industriellen Fertigung eines KMU ist

## 5 Prototypische Umsetzung des Simulationsmodells als Software-Applikation

	<i>Field Study on the Application of a Simulation-Based Software Tool for the Strain-Based Staffing in Industrial Manufacturing</i>	konzipiert. Außerberufliche Aktivitäten müssen hierbei berücksichtigt werden. Die Software ist daher um Funktionen zur Abbildung unterschiedlicher außerberuflicher Aktivitäten erweitert worden.
2016 bis 2017	Feldstudie Unternehmen A (detailliert beschrieben in Kapitel 6)	Der Einsatz der Software WorkDesigner in einer ersten Feldstudie hat Schwachstellen bzgl. Performance und Usability der Applikation aufgezeigt. Zum einen ist die Rechenkapazität mobiler Endgeräte für eine detaillierte Simulation längerer Arbeitsperioden zu gering. Die Software ist daher zu einer serverbasierten Web-Applikation umgestaltet worden. Zum anderen ist die Beschreibung jedes einzelnen Arbeitstags durch den Anwender für mittel- und langfristige Simulationszeiträume nicht zumutbar. WorkDesigner ist daher um einen Zufallsgenerator für die automatische Generierung einzelner Arbeitstage erweitert worden.
2017 bis 2018	Feldstudie Unternehmen B (detailliert beschrieben in Kapitel 6)	Das Simulationstool Work-Designer ist erfolgreich in einem zweiten KMU der industriellen Fertigung eingesetzt worden.

## **6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen**

Der Einsatz des Simulationstools in der industriellen Praxis wird nachfolgend detailliert beschrieben; dieser orientierte sich an der „Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie“ nach VDI 3633 (2012, S.19). Zunächst werden unter Berücksichtigung des ergonomischen Ansatzes bzw. des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts (vgl. DIN EN ISO 26800:2011, S. 7-8 und 13-15) die Zielsetzung und Methodik der Studie definiert. Nachfolgend werden die Generierung der Datenbasis und Simulationsexperimente und Analysen umfassend dargestellt. Das Kapitel schließt ab mit einer Reflektion der erzielten Ergebnisse.

Bereits 2016 wurde von Gust et al. ein Konzept zur Validierung der simulationsbasierten Software-Applikation WorkDesigner im Rahmen einer Feldstudie in der industriellen Fertigung eines KMU publiziert. Jedoch mussten bei der praktischen Umsetzung u. a. Anpassungen an der Methodik vorgenommen werden; auch wurde die Studie auf ein zweites Unternehmen erweitert. Die nachfolgenden Ausführungen bilden den finalen Stand der 2016 bis 2018 erfolgreich durchgeföhrten Feldstudie ab.

### **6.1 Zielsetzung und Methodik der Simulationsstudie**

Ziel der Feldstudie ist die Validierung des Simulationsmodells WorkDesigner bzw. der Nachweis über die generelle Anwendbarkeit der simulationsbasierten Software-Applikation WorkDesigner für Prognosen über die Beanspruchung von Erwerbstätigen in

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

der industriellen Fertigung. Die Fragestellung dahinter lautet: lässt sich mit dem entwickelten Simulationsmodell zuverlässig eine orientierende respektive qualitative Aussage über das Niveau der Beanspruchung von Arbeitspersonen zu einem diskreten Zeitpunkt tätigen?

Hierbei sind zwei Aspekte besonders herausfordernd. Zum einen basiert WorkDesigner auf einem Konzept, welches erstmals die Arbeitsbelastung ganzheitlich (d. h. Zusammenwirken von Arbeitsaufgabe und -umgebung, vgl. Unterkapitel 4.3) abbildet. Wie bereits in Kapitel 3 dargestellt und einleitend zu Unterkapitel 4.3 und detailliert unter Unterkapitel 4.3.1 beschrieben, existieren in der Arbeitswissenschaft nur vereinzelt Ansätze zur Superposition von Arbeitsbelastungen, sodass die Simulationsstudie nicht auf den Vergleich wissenschaftlich anerkannter Daten und/oder (Berechnungs-)Modelle gestützt werden kann. Wie bei der Mehrheit aller etablierten arbeitswissenschaftlichen Methoden und Verfahren ist letztlich die Prüfung der Validität des neu entwickelten Ansatzes zur Bewertung superponierter Arbeitsbelastungen daher ebenfalls nur empirisch möglich. Die andere Herausforderung resultiert aus der Funktionalität von WorkDesigner, die Beanspruchung von Erwerbstägigen bei hauptsächlich körperlicher Arbeit über mittel- und langfristige Zeiträume prognostizieren zu können. Zwar haben sich bereits vereinzelt Arbeiten mit dem Thema befasst, bspw. simuliert Gebhardt (1994) Profile physischer Beanspruchung ganzschichtiger Arbeitsabläufe in der industriellen Fertigung für unterschiedliche Leistungsfähigkeitsgruppen, jedoch gibt es bis heute in der Arbeitswissenschaft keinen Konsens über ganzheitliche und Mitarbeiterindividuelle Beanspruchungsprognosen; vor allem nicht über längere Zeiträume von mehreren Tagen, Wochen oder gar Jahren. Somit kann auch diese neuartige Funktionalität von WorkDesigner lediglich empirisch validiert werden.

Um eine hohe wissenschaftliche Aussagekraft der Feldstudie zur Validierung des Simulationstools WorkDesigner zu gewährleisten, orientiert sich die grundlegende Me-

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

thodik der Studie streng am wissenschaftlich international anerkannten ergonomischen Ansatz (vgl. Kapitel) bzw. dem Belastungs-Beanspruchungs-Konzept (vgl. Unterkapitel 4.3.2) gem. DIN EN ISO 26800. Wie in Abbildung 57 dargestellt, ist ein Arbeitssystem geprägt von den Wechselwirkungen zwischen Person, Arbeitsaufgabe und Arbeitsumgebung. Die Tätigkeit der Person, als „Resultat“ aus den individuellen Eigenschaften der Person (Arbeitsleistungsfähigkeit, vgl. Unterkapitel 4.1.1) und den Eigenschaften von Arbeitsaufgabe und -umgebung (Belastungsfaktoren, vgl. Unterkapitel 4.1.2 und 4.2), wirkt sich wiederum unmittelbar auf die Person selbst (Beanspruchung, vgl. Unterkapitel 4.3) und auf das Arbeitsergebnis aus (vgl. DIN EN ISO 26800:2011, S. 7-8 und 13-15, s. ergänzend DIN EN 16710-2:2016 und Schlick et al. 2010, S. 194 ff.).

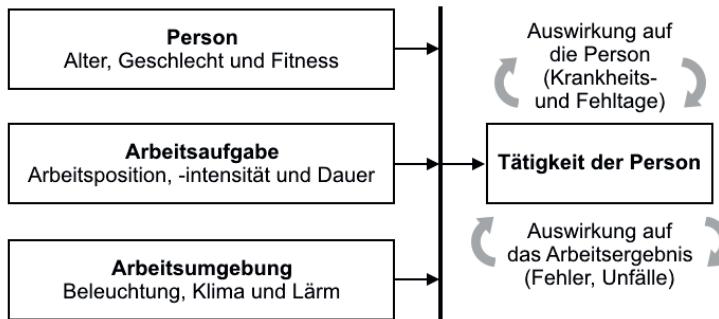
Entsprechend sind für die Feldstudie zwei hinreichende Bedingungen bzw. Indikatoren für die Einordnung der simulierten Beanspruchung einer Person definiert. Eine Auslastung der Arbeitsleistungsfähigkeit  $> 100\%$  zu einem beliebigen diskreten Simulationszeitpunkt ist dann als Überbeanspruchung zu beurteilen, wenn

- sich in einem Zeifenster um diesen Zeitpunkt herum eine auffällige Anzahl an Krankheits- und/oder Fehltagen der betrachteten Person häuft und
- in demselben Zeitfenster um diesen Zeitpunkt herum vermehrt Fehler und/oder Unfälle der betrachteten Person zuzuordnen sind.

Vice versa ist lediglich ein Indikator alleine, personen- oder ergebnisbezogen, nicht notwendigerweise ein Indiz für eine Überbeanspruchung der Arbeitsperson, auch wenn die Tätigkeit der Person und die Person selbst davon unmittelbar beeinflusst werden.

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---



**Abbildung 57:** Methodik der Feldstudie orientiert am ergonomischen Ansatz bzw. am Belastungs-Beanspruchungs-Konzept gem. DIN EN ISO 26800; modifizierte Darstellung basierend auf Abbildung aus DIN EN ISO 26800 (2011, S. 8)

Um im Rahmen der Feldstudie zur Validierung von WorkDesigner simulierte Beanspruchungsprofile von Probanden, wie zuvor beschrieben, anhand von Auswirkungen auf die jeweilige Testperson und auf das entsprechende Arbeitsergebnis beurteilen zu können, wurden ausschließlich Simulationsexperimente für bereits abgeschlossene bzw. vergangene Zeiträume durchgeführt.

### 6.2 Generierung der Datenbasis

Die Feldstudie zur Validierung von WorkDesigner wurde in zwei KMU der industriellen Fertigung zwischen 2016 und 2018 durchgeführt. Alle im Rahmen der Studie erhobenen und generierten Daten sind anonymisiert und werden ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken verwendet.

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

Unternehmen A im Münsterland (NRW, Deutschland) ist ein mittelgroßer Lohn- und Einzelfertiger im Bereich Maschinenbau. Das Unternehmen beschäftigt 120 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Entwicklung, Produktion und Verwaltung; entsprechend der Unternehmensgröße ist ein eigener Betriebsrat gewählt. Im Vorfeld der Simulationsstudie wurde in enger Zusammenarbeit mit der Geschäftsführung und dem Betriebsrat die gesamte Belegschaft zunächst umfassend schriftlich informiert. Fünf männliche Mitarbeiter zwischen 25 und 44 Jahren aus unterschiedlichen Abteilungen haben sich an der Studie freiwillig und unentgeltlich über ihre reguläre Arbeitszeit hinaus beteiligt. Die Probanden wurden zu Beginn der Feldstudie nochmals im persönlichen Gespräch detailliert über das Softwaretool WorkDesigner, die Zielstellung und Durchführung der Studie und den Umgang mit persönlichen Daten informiert.

Unternehmen B bei Remscheid (NRW, Deutschland) ist ein Kleinunternehmen, welches Schneidwerkzeuge für Nahrungsmittelmaschinen produziert. Neben Geschäftsführung, technischer Leitung und Vertrieb beschäftigt das Unternehmen 13 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in der Produktion. Ein Betriebsrat ist nicht gewählt. Die gesamte Belegschaft wurde vor Beginn der Feldstudie in enger Kooperation mit der Geschäftsführung und der technischen Leitung detailliert über die simulationsbasierte Software Applikation WorkDesigner informiert und über die Zielsetzung und Durchführung der Feldstudie unterrichtet. Sieben männliche Mitarbeiter zwischen 22 und 47 Jahren haben sich freiwillig, unentgeltlich und während ihrer regulären Arbeitszeit an der Studie beteiligt. Auch mit den Probanden dieser zweiten Gruppe bzw. dieses zweiten Unternehmens wurden zu Beginn der Feldstudie nochmals alle relevanten Details zu Software, Studie und Daten persönlich besprochen.

Von den insgesamt 12 Probanden konnten auf Grund zu geringer Betriebszugehörigkeit (keine ausreichende Datenhistorie vorhanden) oder eines zu hohen Anteils reiner Bürotätigkeiten letztlich nur 6 Probanden bei den nachfolgend beschriebenen Simula-

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

tionsexperimenten berücksichtigt werden. Die im weiteren Verlauf dieses Kapitels präsentierten Ergebnisse wurden nach Abschluss der Feldstudie mit allen Beteiligten besprochen, z. T. wurden Verbesserungsmaßnahmen angestoßen.

### 6.2.1 Probanden

Tabelle 2 zeigt eine Auflistung aller im Rahmen der Feldstudie simulierten Probanden. Alle personenrelevanten Daten wurden im persönlichen Gespräch erhoben. Keiner der Probanden war durch einen vorherigen (Arbeits-)Unfall und/oder durch eine Erkrankung bei der Ausübung seiner Arbeit innerhalb des betrachteten Simulationszeitraums eingeschränkt. Es stand den Probanden frei, Fragen zu ihrer Freizeitgestaltung (z. B. Sport), körperlichen Verfassung bzw. Erkrankungen und einer subjektiven Einschätzung ihrer Arbeitsbeanspruchung zu beantworten. Die in Tabelle 2 u. a. präsentierten „ergänzenden Angaben“ wurden hinsichtlich der Wahrung einer größtmöglichen Anonymität der Probanden auf die für die Feldstudie wesentlichsten Informationen beschränkt. Auch durften die Probanden natürlich wählen, ob und wie (fragenbasiert oder experimentell, vgl. Unterkapitel 4.1.1) ihre individuelle Fitness bestimmt wurde. Diesbezüglich muss erwähnt werden, dass ein sehr sportlicher Proband bei experimenteller Bestimmung der individuellen Fitness deutlich den definierten Wertebereich übertragen hat. Die experimentell ermittelte Fitnesskonstante wurde auf  $k = 1,4$  nach unten korrigiert. Auch wurde bei einem Probanden der ermittelte Wert  $k$  für die individuelle Fitness – zu Gunsten der experimentellen Bestimmung gegenüber der fragenbasierten – um 0,1 nach unten verschoben.

6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen  
Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

**Tabelle 2:** Auflistung aller im Rahmen der Feldstudie simulierten Probanden

Pro- band	Alter (Jahren)	Ge- schlecht	Fitness (k)	Ergänzende Angaben aus Interview
A	25	männlich	0,8	Treibt nur gelegentlich Sport in der Freizeit und stuft sein Stress-Level während der Arbeit hoch ein.
B	33	männlich	1,4	Treibt mehrmals wöchentlich Sport und stuft sein Stress-Level während der Arbeit hoch ein.
C	47	männlich	0,6	Treibt nie Sport, fühlt sich für Freizeitaktivitäten zu erschöpft, klagt über Schlafprobleme und stuft sein Stress-Level während der Arbeit sehr hoch ein.
D	29	männlich	1,1	Treibt regelmäßig Sport in der Freizeit; keine weiteren Angaben.
E	42	männlich	0,9	Treibt keinen Sport in der Freizeit; keine weiteren Angaben.
F	40	männlich	1,4	Treibt mehrmals wöchentlich viel Sport und führt seine Arbeit sehr gerne aus (kein Stress).

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

### 6.2.2 Arbeitsplätze

Die in der nachfolgenden Tabelle 3 aufgelisteten Arbeitsplätze wurden in den beiden an der Feldstudie beteiligten Unternehmen entsprechend den in Unterkapitel 4.1.2 detailliert beschriebenen Bewertungsschemata parametrisiert. Die Belastungsfaktoren Beleuchtung, Klima und Lärm wurden jeweils während der Arbeitszeit bzw. während des laufenden Fertigungsbetriebs und unter Berücksichtigung des diesbezüglich geltenden technischen Regelwerks messtechnisch erfasst. Für die Bewertung der Belastungsfaktoren Arbeitsposition und -intensität wurden die Probanden an den unterschiedlichen Arbeitsplätzen und während ihrer Arbeit intensiv beobachtet (vgl. Unterkapitel 4.1.2).

Generell kann ergänzt werden, dass bei beiden beteiligten Unternehmen über mehrere Jahre hinweg aus diversen Industrie- und Forschungskooperationen die Gegebenheiten vor Ort, d. h. Fertigungsmittel und -abläufe, Personal, betriebliche Veränderungen etc., sehr gut bekannt sind.

**Tabelle 3: Auflistung simulierter Arbeitsplätze, Bewertung nach Schulnotensystem gem. vereinfachter Bewertungsschemata**

Arbeitsplatz	Beleuchtung	Klima	Lärm	Arbeitsposition	Arbeitsintensität
Stahlbau (Baustellenfertigung)	5	2	5	4	5
Lager / Intralogistik	5	2	3	3	3

6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen  
Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

BAZ 1 (Bohren, Fräsen)	3	2	5	4	4
BAZ 2 (Bohren, Fräsen)	3	2	5	4	4
BAZ 3 (Bohren, Fräsen)	3	2	4	4	3
BAZ 4 (Bohren, Fräsen)	3	2	4	4	3
BAZ 5 (Bohren, Fräsen)	3	2	4	4	3
BAZ 6 (Bohren, Fräsen)	3	2	4	4	3
CNC-Bohrmaschine 1	4	2	4	4	2
CNC-Bohrmaschine 2	3	2	4	4	2
CNC-Bohrmaschine 3	3	2	4	4	2
CNC-Bohrmaschine 4	5	2	4	4	2
Nachbearbeitung (manuell)	3	2	4	2	2
Intralogistik Fertigung	3	3	4	3	3

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

Organisation Fertigung	3	2	4	2	1
Schleifmaschine (manuell)	2	3	5	5	5

### 6.2.3 Tätigkeitsprofile

Aus Beobachtungen, Betriebsdaten und Interviews mit den Belegschaften bzw. Probanden und den Geschäftsführungen wurden die in Tabelle 4 aufgelisteten Tätigkeitsprofile für die an der Feldstudie beteiligten Probanden erstellt. Tabelle 4 zeigt für jeden Probanden (s. Tab. 2) die vertragliche Netto-Wochenarbeitszeit inkl. des Anteils an Tagen mit Mehrarbeit pro Woche, die geregelten Pausen und die Zuordnung von Arbeitsplätzen (s. Tab. 3) inkl. der jeweiligen Anteile an der Gesamtarbeitszeit und der maximalen kontinuierlichen Ausführungsduauer.

**Tabelle 4:** Auflistung simulierter Tätigkeitsprofile und Zuordnung der Probanden

Proband	Netto-Wochenarbeitszeit und Anteil Tage mit Mehrarbeit pro Woche	Pausen	Arbeitsplatz, Anteil an ges. Arbeitszeit und max. Ausführungsduauer
A	35 h + 20 %	30 min Mittag	Stahlbau, 74 %, 30 min; Lager / Intralogistik, 26 %, 30 min

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

B	35 h + 20 %	30 min Mittag	Stahlbau, 74 %, 30 min; Lager / Intralogistik, 26 %, 30 min
C	40 h + 25 %	15 min Frühstück & 30 min Mittag	BAZ 1, 50 %, 30 min; BAZ 2, 50 %, 30 min
D	40 h + 50 %	15 min Frühstück & 30 min Mittag	BAZ 3, 4, 5, 6, 4 * 25 %, 4 * 30 min
E	40 h + 20 %	15 min Frühstück & 30 min Mittag	CNC-Bohrmaschine 1, 2, 3, 4, 4 * 16 %, 4 * 30 min; Nachbearbeitung, 25 %, 30 min; Intralogistik Fertigung, 6 %, 30 min; Organisation, 5 %, 30 min
F	35 h + 40 %	15 min Frühstück & 30 min Mittag	Schleifmaschine, 100 %, 40 min

Die Ausführungsduern wurden aus Beobachtungen, Informationen und Daten abgeschätzt. Die einzige Ausnahme bildet der Arbeitsplatz Schleifmaschine: Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind hier auf Grund der hohen körperlichen Belastung bzw. zum Schutz der Gesundheit verpflichtet, nach einer maximalen Dauer von 40 Minuten ihre Arbeit für eine kurze Pause zu unterbrechen.

## 6.3 Simulationsexperimente und Analysen

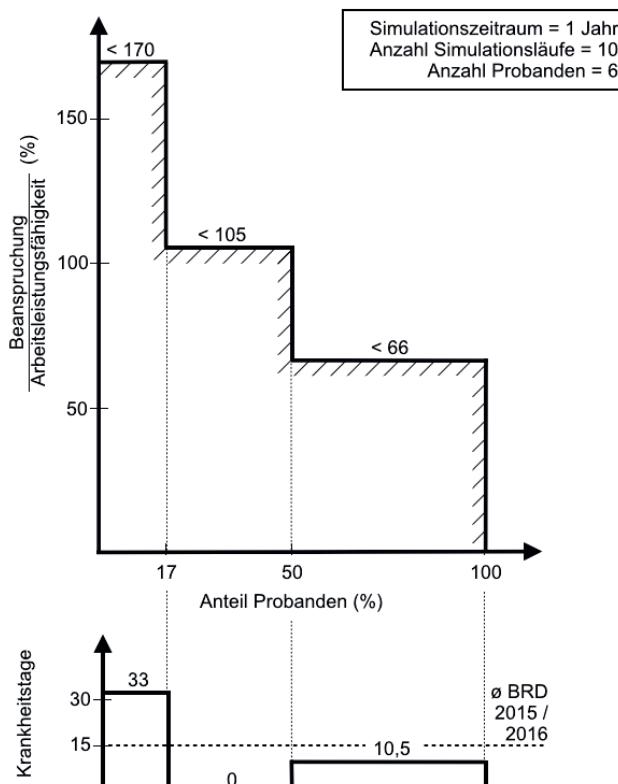
Für alle Konfigurationen von Probanden und Tätigkeitsprofilen aus der zuvor präsentierten Tabelle 4 wurde im Rahmen der Feldstudie jeweils ein Zeitraum von einem Kalenderjahr simuliert. Es wurden für jede der Konfigurationen eine Anzahl von 10 Simulationsläufen durchgeführt; entsprechende Analysen zu spezifischen Fragestellungen hinsichtlich der in Unterkapitel 6.1 vorgestellten Zielstellung bzw. der beiden formulierten hinreichenden Bedingungen werden in den nachfolgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben. Bei den Simulationsläufen wurden Urlaubs- und ggf. Krankheitstage als außerberufliche Aktivitäten berücksichtigt.

### 6.3.1 Beanspruchung und Auswirkung auf die Testpersonen für ein Jahr betrachtet

Entsprechend der in Unterkapitel 6.1 formulierten hinreichenden Bedingungen für die Identifikation einer Überbeanspruchung eines Probanden zu einem beliebigen diskreten Simulationszeitpunkt, wurden zunächst die simulierten Beanspruchungen und die Auswirkungen (Krankheitstage) auf die Testpersonen miteinander in Relation gesetzt. Hierzu wurden jeweils über die Dauer von einem Jahr (in der Vergangenheit) für jeden Probanden 10 Simulationsläufe durchgeführt und die Tagesmaximalwerte der Auslastung aller Probanden respektive aller Simulationsexperimente in einem 3-stufigen Kollektiv zusammengefasst (s. Abb. 58). Abbildung 58 zeigt neben dem Kollektiv zur Auslastung der Probanden zudem die Zuordnung der tatsächlichen Krankheitstage innerhalb des Zeitraums sowie eine Einordnung hinsichtlich der durchschnittlichen Krankheitstage in Deutschland (vgl. TK 2018, S. 3). Besonders hervor sticht die erste bzw. höchste Stufe des Kollektivs mit einer Probandenauslastung von knapp 170 % und zuzuordnenden 33 Krankheitstagen; mehr als doppelt so viele Krankheitstage wie der

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

Bundesdurchschnitt. Die zweite bzw. mittlere Stufe mit einer Probandenauslastung von rund 100 % weist hingegen gar keinen Krankheitstag im betrachteten Simulationszeitraum auf. Für die dritte, und relativ am stärksten vertretene Stufe mit einer Probandenauslastung von unter 66 % und einem Anteil von 50 % der Testpersonen sind wiederum durchschnittlich 10,5 Krankheitstage – etwa ein Drittel weniger als der Bundesdurchschnitt – während des Simulationszeitraums auszuweisen.



**Abbildung 58:** 3-stufiges Kollektiv zur Auslastung der Probanden über einen einjährigen Simulationszeitraum (oben), mit Zuordnung der tatsächlichen Krankheitstage in-

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

*nerhalb des Zeitraums und entsprechender Einordnung hinsichtlich der durchschnittlichen Krankheitstage einer/eines Erwerbstätigen in der Bundesrepublik Deutschland (unten)*

Die Analyse der Simulationsergebnisse erfüllt somit die Erwartung bzw. die erste hinreichende Bedingung, dass die Überbeanspruchung von Arbeitspersonen mit einer auffälligen Anzahl an Fehl- und/oder Krankheitstagen einhergeht. Vor allem hinsichtlich der Krankheitstage (s. Abb. 58) ist zudem erwähnenswert, dass die Probanden der mittleren Kollektivstufe eine geringfügig unterdurchschnittliche Fitness ( $k < 1$ ) aufweisen, die Probanden der dritten und niedrigsten Stufe eine überdurchschnittliche Fitness ( $k > 1$ ). Hierin scheint sich der in der populärwissenschaftlichen Literatur weit verbreitete Zusammenhang zwischen wirtschaftlicher Konjunktur und Fehltagen zu spiegeln, nämlich dass Erwerbstätige in einem sicheren, komfortablen Arbeitsverhältnis – in Relation zu ihren Kolleginnen und Kollegen – deutlich „sensibler“ auf ihren Körper eingehen; d. h., sie melden sich früher und häufiger krank.

Entsprechend der in Unterkapitel 6.1 aufgestellten hinreichenden Bedingungen wird aufbauend auf den präsentierten Ergebnissen die Beanspruchung ausgewählter Testpersonen und die Auswirkungen auf das Arbeitsergebnis im nachfolgenden Unterkapitel ergänzend analysiert.

### 6.3.2 Beanspruchung und Auswirkung auf das Arbeitsergebnis für ein Jahr betrachtet

Abbildung 59 zeigt die Überlagerung des Auslastungsprofils eines überbeanspruchten Probanden, der entsprechenden Krankheitstage und zuzuordnenden Auswirkungen auf das Arbeitsergebnis über den gesamten Simulationszeitraum von einem Jahr. Es

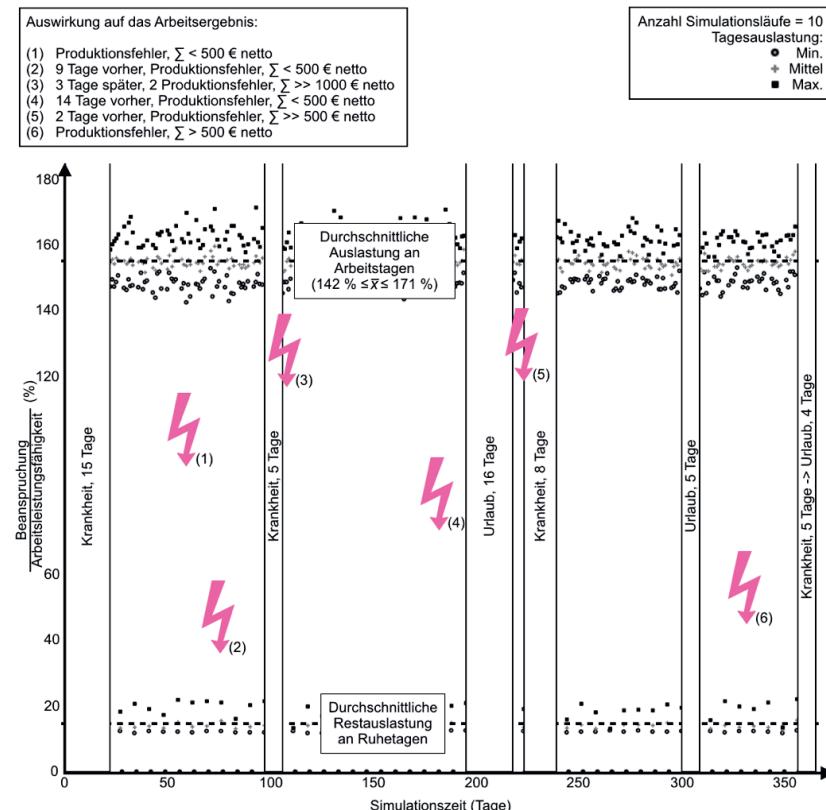
## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

wurden hierbei dieselben Simulationsergebnisdaten verwendet wie bei der zuvor beschriebenen Analyse.

Horizontal verlaufende Punktwolken sowohl im oberen als auch im unteren Bereich der Darstellung repräsentieren für die 10 Simulationsläufe jeweils die minimale, mittlere und maximale Tageauslastung. Neben der sehr hohen durchschnittlichen Auslastung an Arbeitstagen von etwa 140 % bis 170 % ist hierbei auch die hohe durchschnittliche Restauslastung von knapp unter 20 % an Ruhetagen besonders auffällig; im Idealfall sollte die maximale Tagesauslastung 100 % nicht überschreiten, auch sollte die Tagesauslastung innerhalb der nächsten Regenerationsphase möglichst komplett abgebaut und nicht in Folgetage verschleppt werden. Der Aspekt einer hohen Grundbeanspruchung infolge eines nicht ausbalancierten Verhältnisses zwischen Belastung und Regeneration wurde bereits u. a. in Unterkapitel 4.4 angesprochen; im nachfolgenden Unterkapitel wird hierauf nochmals vertiefend eingegangen. Die senkrechten Zäsuren kennzeichnen Krankheits- und Urlaubstage und „zerhacken“ den einjährigen Simulationszeitraum in Quartale. Besonders die sechs Blitze stechen hervor, welche jeweils dokumentierte und dem Probanden zuzuordnende Produktionsfehler visualisieren bzw. zeitlich einordnen. Ganzheitlich betrachtet besteht ein eindeutiger kausaler und zeitlicher Zusammenhang zwischen der (simulierten) Auslastung, den (realen) Krankheitstagen und Produktionsfehlern.

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen



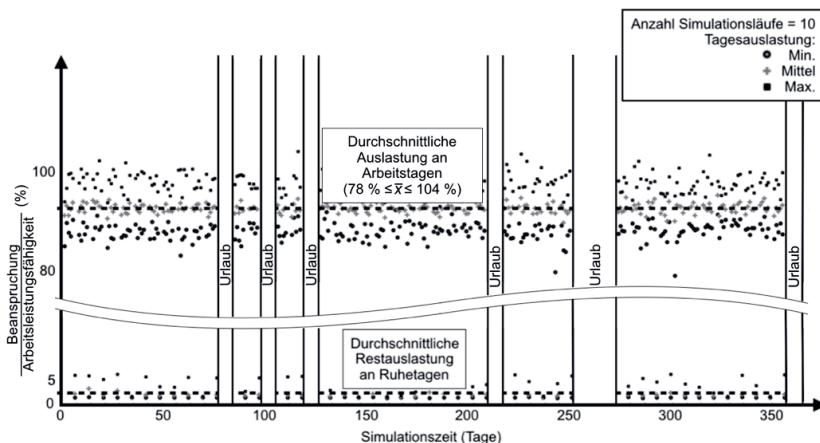
**Abbildung 59:** Auslastung (hier Überbeanspruchung) eines 47-jährigen, männlichen Probanden (C) mit deutlich unterdurchschnittlicher Fitness ( $k = 0,6$ ), über einen Simulationszeitraum von einem Jahr inkl. Krankheits- und Urlaubstagen und der Auswirkung auf das Arbeitsergebnis

Im Gegensatz hierzu – quasi als Gegenprobe – sind durch die Gruppe aller übrigen Probanden im gleichen Simulationszeitraum lediglich zwei weitere dokumentierte Produktionsfehler ( $\Sigma < 3500$  €) verursacht worden; der durchschnittliche Arbeitszeitanteil

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

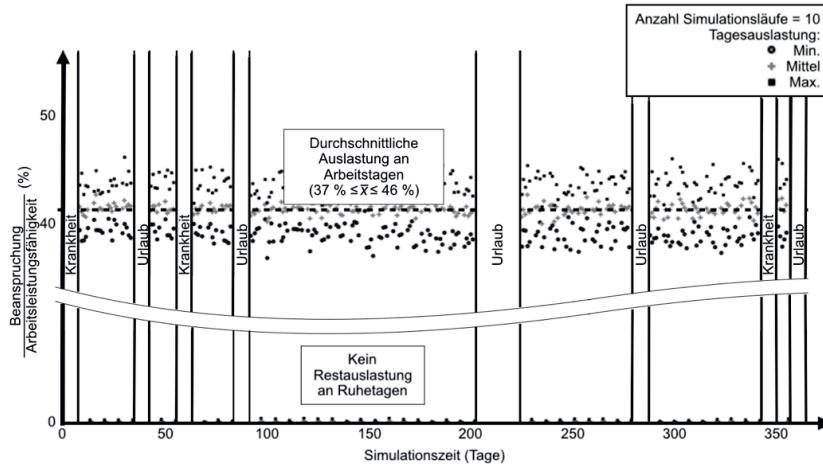
für die Nacharbeit kleinerer dokumentierter Produktionsfehler liegt bei unter einem Prozent bezogen auf die Gesamtarbeitszeit (inkl. Pausen). Es ist keine weitere Korrelation zwischen Auslastung, Arbeitsergebnissen und Krankheits- und/oder Fehltagen zu identifizieren.

Die nachfolgenden Abbildungen 60 und 61 zeigen ergänzend – in Analogie zu Abbildung 59 – Auslastungsprofile von zwei ausgewählten Probanden aus der mittleren (Abb. 60) und der niedrigsten Stufe (Abb. 61) des Auslastungskollektivs (vgl. Abb. 58). Hierbei ist besonders interessant zu beobachten, dass obwohl beide Probanden vergleichbare und körperlich herausfordernde Tätigkeiten ausüben, ihre jeweiligen Auslastungsprofile deutlich voneinander abweichen.



**Abbildung 60:** Auslastung eines 25-jährigen, männlichen Probanden (A) mit unterdurchschnittlicher Fitness ( $k = 0,8$ ), über einen Simulationszeitraum von einem Jahr inkl. Krankheits- und Urlaubstagen; Auswirkungen auf das Arbeitsergebnis liegen nicht vor

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen



**Abbildung 61:** Auslastung eines 40-jährigen, männlichen Probanden (F) mit deutlich überdurchschnittlicher Fitness ( $k = 1,4$ ), über einen Simulationszeitraum von einem Jahr inkl. Krankheits- und Urlaubstagen; Auswirkungen auf das Arbeitsergebnis liegen nicht vor

Obwohl Proband A 15 Jahre jünger ist als Proband F, zeigen sich bereits Auswirkungen seiner unterdurchschnittlichen Fitness in Form einer geringen durchschnittlichen Restauslastung (<< 5 %) an Ruhetagen; auch fühlt sich der Proband bereits während der Arbeit gestresst (s. Tab. 2). Im Gegensatz dazu ermöglicht die deutlich überdurchschnittliche Fitness von Proband F einen sehr ausgeglichenen Arbeitsalltag (s. ergänzend Tab. 2).

Die zuvor in Unterkapitel 6.1 formulierten beiden hinreichenden Bedingungen scheinen letztlich zunächst für eine orientierende bzw. qualitative Aussage über das Niveau der Beanspruchung von Arbeitspersonen erfüllt. Die im nachfolgenden Unterkapitel

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

beschriebene mikroperspektivische Betrachtung von Beanspruchungsverläufen wird hierzu ergänzend detaillierte Aussagen zum Zeitverhalten liefern.

### *6.3.3 Mikroperspektivische Betrachtung von Beanspruchungs-verläufen über eine Woche*

Korrespondierend mit der im Unterkapitel zuvor präsentierten Analyse zur Beanspruchung und Auswirkung auf das Arbeitsergebnis (vgl. Abb. 59), zeigt die nachfolgende Abbildung 62 für dieselbe Testperson und auf Basis derselben Simulationsdaten eine mikroperspektivische Analyse einer Arbeitswoche. Bewusst wurde die Woche von Simulationstag 218 bis 224 gewählt. Wie in Abbildung 59 gut ersichtlich, liegt die detailliert betrachtete Arbeitsperiode zwischen einem längeren Urlaub (16 Tage) und einer mehr als einwöchigen Krankheit (8 Tage); unmittelbar vor der Erkrankung wurde ein gravierender Produktionsfehler, verursacht durch die betrachtete Testperson, dokumentiert. Der Zeitraum ist somit prototypisch für die Fragestellung der Feldstudie. Der (Sommer-)Urlaub im Vorfeld der betrachteten Woche erlaubt zudem die Annahme, dass der Proband zu Beginn der Arbeitswoche nicht ausgelastet war (Beanspruchung dividiert durch Arbeitsleistungsfähigkeit = 0 %).

Abbildung 62 zeigt für jeden Tag der Woche (inkl. Wochenende) den Verlauf der Auslastung (Beanspruchung dividiert durch Arbeitsleistungsfähigkeit) über der Tageszeit jeweils für jeden der insgesamt 10 durchgeführten Simulationsläufe. Generell ist zunächst festzuhalten, dass die Auslastungsprofile den Erwartungen entsprechen und mit vergleichbaren Forschungsarbeiten korrespondieren (vgl. bspw. Gebhardt 1994, S. 112-126, Löhr 1976, S. 52-54 oder Bokranz und Landau 1991, S. 231-244). „Mit steigender Belastung und mit längerer Arbeitsdauer wächst die Ermüdung nach einer

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

Exponentialfunktion. In der Erholungsphase klingt sie entlang einer ähnlichen Funktion wieder ab“ (Löhr 1976, S. 53).

Gut zu erkennen an den Werktagen sind der Arbeitsbeginn um 06:00 Uhr, Frühstücks- und Mittagspause jeweils um 09:00 Uhr und um 12:30 Uhr und das Arbeitsende etwa um 15:00 Uhr (ggf. Mehrarbeit). Ebenfalls gut ersichtlich ist werktags das Auffächern der Kurvenschar der einzelnen Simulationsläufe mit zunehmender Tageszeit. Hierin spiegelt sich der Einfluss unterschiedlicher Belastungshistorien je Simulationslauf wieder, nämlich dass unterschiedliche Belastungswechsel bei gesamt betrachtet gleicher Intensität und Dauer aber variierender Abfolge zu unterschiedlichen Auslastungen führen (vgl. Gebhardt 1994, S. 124).

Weiter ist Abbildung 62 zu entnehmen, dass sich von Montag bis Samstag eine Restauslastung als Startwert in den Folgetag überträgt bzw. verschleppt (vgl. Unterkapitel 4.4). Dieser Auslastungsanteil variiert je nach Simulationslauf und Belastungshistorie zu Arbeitsbeginn zwischen  $> 0,5\%$  und  $< 1,0\%$ , baut sich von Montag auf Dienstag auf, hält sich etwa gleichbleibend „hoch“ von Dienstag bis Freitag und baut sich erst wieder in der Regenerationsphase von Freitagabend bis Samstagmorgen (etwa 08:00 Uhr) ab. Auch dieser Aspekt entspricht der Erwartung, in der Form, dass eine Überbeanspruchung zu einer ggf. überproportional langen Erholungszeit führt (vgl. Löhr 1976, S. 53 und Gebhardt 1994, S. 124). Entsprechend der Annahme, dass ein Mensch an Ruhetagen während der Freizeit ein gesundes Gleichgewicht zwischen belastenden Tätigkeiten und Erholungspausen einhält und am Ende der Effektiven Freizeit an Ruhetagen die Beanspruchung neutral ist (vgl. Unterkapitel 4.4.2), ist die simulierte Auslastung des Probanden über den restlichen Samstag und gesamten Sonntag somit gleich null Prozent.

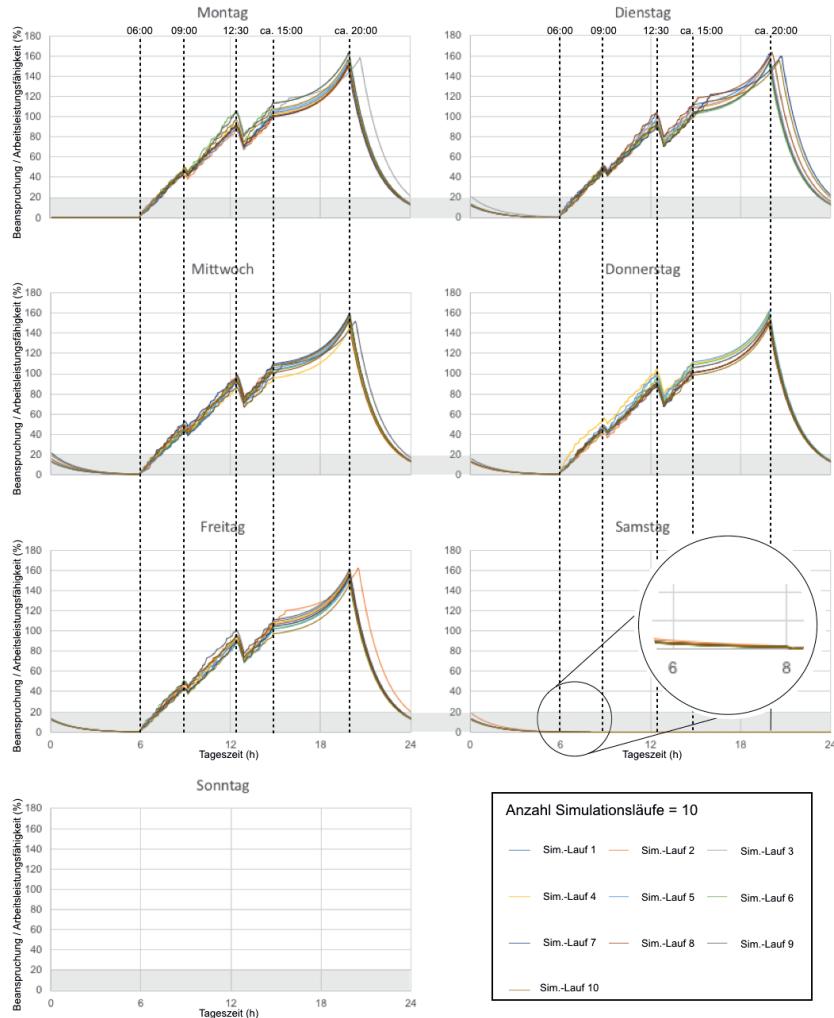
## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

Für die Gesamtheit der Probanden verteilt sich die Restauslastung zu Arbeitsbeginn proportional zur Auslastung (3-stufiges Kollektiv, s. Abb. 58). Bei Probanden der mittleren Auslastungsstufe (ca. 100 %) ist die Restauslastung bei Arbeitsbeginn < 0,1 %, bei Probanden der dritten und niedrigsten Auslastungsstufe (< 66 %) ist zu Arbeitsbeginn keine Restauslastung mehr vorhanden (<< 0,00 %) bzw. die Auslastung vom vorherigen Arbeitstag wurde innerhalb der Regenerationsphase bis zum nächsten Arbeitsbeginn vollständig abgebaut. Neben der Höhe der Auslastung spielt hierbei auch die Fitness eine wesentliche Rolle (vgl. Unterkapitel 6.3.1). Wie bereits in den Unterkapiteln 4.3.2 und 4.3.3 detailliert beschrieben, wirkt sich die Fitness unmittelbar sowohl auf das Wachstum als auch auf das Abklingen der Auslastung aus. Dieser Aspekt wurde bereits auch schon in dem in Unterkapitel 6.3.2 dargestellten Vergleich der Probanden A und F (s. Abb. 60 und Abb. 61) aufgezeigt.

Konkludierend ist festzustellen, dass sich konsequenterweise auch die mikroperspektivische Betrachtung von Beanspruchungsverläufen in den wissenschaftlichen Kontext beider hinreichender Bedingungen für die Validität des Simulationstools WorkDesigner einordnet; wie zuvor erläutert, werden sogar noch einige wesentliche Aspekte ergänzt. Vor allem die von Tag zu Tag übertragene respektive verschleppte Restauslastung ist ein weiterer deutlicher Indikator für das (hohe) Beanspruchungsniveau. Eine konkrete Aussage bzgl. des Zeitverhaltens, d. h. eine wochen- oder gar tagesgenaue Vorhersage der Beanspruchung bzw. Überbeanspruchung, scheint jedoch nicht möglich. Denkbar sind diesbezüglich Spitzen der Auslastung und/oder Restauslastung zu diskreten Zeitpunkten bspw. in Korrelation mit Krankheitstagen und Produktionsfehlern gewesen. Wie sehr gut in Abbildung 62 zu erkennen ist, puffern die pauschal simulierten außerberuflichen Aktivitäten (vgl. Unterkapitel 4.4.2) – besonders an Wochenenden – den Verlauf der Auslastung hierfür jedoch zu stark ab.

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen



**Abbildung 62:** Detailanalyse der Auslastung eines 47-jährigen, männlichen Probanden mit deutlich unterdurchschnittlicher Fitness ( $k = 0,6$ ), über einen Simulationszeitraum von einer Woche (Tag 218-224, nach Urlaub und vor Krankheit, s. Abb. 59)

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

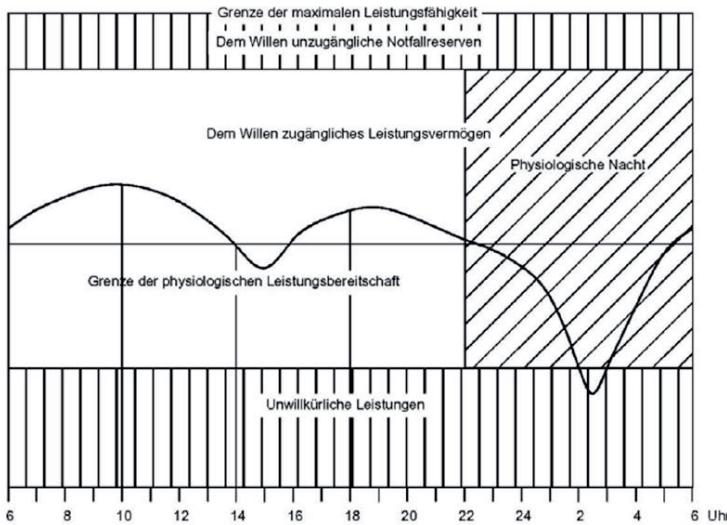
Auch haben signifikante Unterschiede der Auslastung und/oder Restauslastung in Relation zu Verteilung und Ausmaß der Auswirkungen auf die Arbeitsperson und auf das Arbeitsergebnis ggf. quantitative Aussagen über das Niveau der Beanspruchung erlaubt.

### *6.3.4 Biorhythmus, Schlafphasen, Resilienz und Stress*

Ergänzend soll an dieser Stelle noch kurz der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Feldstudie, Biorhythmus, Schlafphasen, Resilienz und Stress angesprochen werden. Auch wenn die im Unterkapitel zuvor präsentierten mikroperspektivischen Betrachtungen zunächst nur einen bedingten Mehrwert zu liefern scheinen, zeigen sie doch hoch relevante und wissenschaftlich belastbare Tendenzen auf.

Abbildung 63 zeigt den Verlauf der physiologischen Arbeitskurve über 24 Stunden bzw. „[...] die Schwankungen der Leistung [einer erwachsenen Arbeitsperson] über den Tagesverlauf [...]“ (Schlick et al. 2010, S. 168). Deutlich zu erkennen sind die Maxima am Vormittag und Nachmittag. „Das Arbeiten nach diesem Rhythmus [bspw. ein typischer Arbeitstag im 1-Schicht-Modell] wird subjektiv als besonders natürlich empfunden“ (Schlick et al. 2010, S. 168). Wie der Abbildung deutlich zu entnehmen, ist der Tag-Nacht-Rhythmus bzw. der Hell-Dunkel-Wechsel maßgeblich für diese sog. Zirkadiane Rhythmis verantwortlich (vgl. Schlick et al. 2010, S. 166).

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen



**Abbildung 63:** Verlauf der physiologischen Arbeitskurve über 24 Stunden, entnommen aus Schlick et al. (2010, S. 169)

Wie bereits aus mehreren (Unter-)Kapiteln zuvor ersichtlich, findet der wesentlichste Anteil der Regeneration während des Schlafens statt; genau genommen in den Tiefschlafphasen. Die erste Tiefschlafphase wird etwa nach vier Stunden Schlaf erreicht, weitere können in Abständen von 90 bis 120 Minuten je nach individuellem Schlafzyklus folgen (vgl. Froböse 2016, S. 78 ff.). Im Idealfall harmonieren Schlafzyklus und zirkadiane Rhythmus derart miteinander, dass Tiefschlafphase und Leistungsminimum im gleichen Zeitfenster liegen (s. ergänzend Abb. 63). Die gesamte Leistung des Menschen wird für die physische und vor allem auch psychische Regeneration verwendet. Im Interview mit Marika Schaertl definiert der ehemalige Generalstabsoffizier und Unternehmensberater Uwe Kapfer die Fähigkeit der Stressbewältigung wie folgt: „Resilienz beschreibt die Fähigkeit mit Stress umzugehen. [...] Wer resilient ist, gerät nicht

so leicht in eine Stresssituation ist widerstandsfähiger gegen Burnout oder einen seelischen Erschöpfungszustand.“ (Schaertl 2018) Wie bereits in Kapitel 4 u. a. im Kontext individuelle Fitness und Regeneration angesprochen, sind Schlaf, Ernährung und Sport wichtige Faktoren für eine stark ausgeprägte Resilienz.

Vor diesem skizzierten Hintergrund ist als zusätzliche Erkenntnis der Feldstudie anzugeben, dass Probanden, bei denen die Auswertung der Simulationsdaten eine tagesüberdauernde Restauslastung aufzeigt, in den Gesprächen zur Generierung der Datenbasis über Schlafstörungen und subjektiv empfundenen Stress geklagt haben; quasi eine Kollision von Auslastung und physiologischer Leistungsfähigkeit (s. ergänzend Abb. 62, Abb. 60 und Tab. 2). Der Zusammenhang zwischen Beanspruchungsprofilen, individueller zirkadianer Rhythmik, Resilienz und Stress bietet aktuell noch viel Potential für interdisziplinäre Feldforschung.

## 6.4 Fazit der Feldstudie

Im Rahmen der Feldstudie wurde erfolgreich aufgezeigt, dass die mit WorkDesigner simulierte Beanspruchung von Probanden mit der zugehörigen Auswirkung auf die jeweilige Testperson korreliert. Wie auf der Grundlage aktueller arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse zu erwarten ist, manifestiert sich eine deutliche Überbeanspruchung von Arbeitspersonen in einer auffällig hohen Anzahl an Krankheits- und/oder Fehltagen (vgl. Unterkapitel 6.3.1). Auch konnte im Rahmen der Feldstudie deutlich dargestellt werden, dass die simulierte Beanspruchung ebenfalls mit der Auswirkung auf das Arbeitsergebnis der Probanden unmittelbar in Verbindung steht; dieser Zusammenhang entspricht den Erwartungen aktueller wissenschaftlicher Erkenntnisse (vgl. Unterkapitel 6.3.2). *Ipso facto* wurde auf Basis der in Unterkapitel 6.1 formulierten beiden

## 6 Validierung des Simulationstools durch eine Feldstudie in der industriellen Fertigung von kleinen und mittelgroßen Unternehmen

---

hinreichenden Bedingungen die generelle Machbarkeit bzw. Anwendbarkeit des Simulationstools WorkDesigner erfolgreich gezeigt.

Eine wochen- oder sogar tagesgenaue quantitative Prognose der Beanspruchung ist jedoch zum aktuellen Entwicklungsstand nicht möglich. Auch erlaubt WorkDesigner zunächst nur eine orientierende bzw. qualitative Aussage über das Niveau der individuellen Erwerbstätigengauslastung (vgl. Unterkapitel 6.3.3).

Letztlich hat die Feldstudie gem. der am aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik abgeleiteten hinreichenden Bedingungen (vgl. Unterkapitel 6.1) die generelle Machbarkeit bzw. Anwendbarkeit der simulationsbasierten Software-Applikation WorkDesigner für eine individuelle, alters- und belastungsorientierte sowie ganzheitliche Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung aufgezeigt. Aus den präsentierten Studienergebnissen kann zudem zweifelsohne abgeleitet werden, dass mit WorkDesigner erzielte Simulationsergebnisse wertvolle orientierende Impulse für eine prospektive Entwicklung respektive Gestaltung neuer Arbeitssysteme (hauptsächlich körperliche Arbeit) geben können.

Darüber hinaus hat die Feldstudie aufgezeigt, dass bzgl. einer genauen Prognose von zusammengesetzten Beanspruchungen noch weiterer Forschungsbedarf – explizit an Feldforschung – besteht. Wünschenswert ist vor allem auch die Teilnahme weiblicher Probanden an zukünftigen bzw. weiterführenden Feldstudien.

An dieser Stelle ist zudem die nachfolgend kurz skizzierte Beobachtung, quasi als Derivat der Feldstudie, anzuführen. Es zeigt sich die Tendenz, dass die Zusammenstellung des Tätigkeitsprofils einen merklichen Einfluss auf die Streubreite der jeweiligen simulierten Probandenauslastung an Arbeitstagen hat (s. ergänzend Abb. 59, 60 und 61 und Tab. 4); je vielfältiger das Tätigkeits- und Belastungsspektrum, umso breiter die Streuung der Simulation. Hierin spiegelt sich erwartungsgemäß das vor allem in

der Produktion und Logistik weit verbreitete und arbeitswissenschaftlich anerkannte Prinzip „Job Rotation“ wieder, wonach ein Belastungsausgleich über eine kurze Arbeitsperiode bzw. einen Arbeitstag durch die Variation der Abfolge möglichst unterschiedlicher Tätigkeiten angestrebt wird. In nachfolgenden Entwicklungsstufen von WorkDesigner kann dieser Aspekt für eine softwarebasierte Optimierung von Tätigkeitsprofilen über Grenzwertbetrachtungen weiterverfolgt werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird erfolgreich das Simulationsmodell WorkDesigner für die alters- und belastungsorientierte Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung konzipiert, prototypisch implementiert und eine generelle Anwendbarkeit des Modells empirisch nachgewiesen. Nachfolgend sind die essentiellen Ergebnisse und Erkenntnisse konkludiert. Die Reflektion untergliedert sich parallel zu den durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in: Simulationsmodell, Software-Applikation, Feldstudie und Ausblick.

### ***Simulationsmodell***

Die Konzeption des Simulationsmodells WorkDesigner wurde detailliert in Kapitel 4 beschrieben. In den nachfolgenden Absätzen ist der Mehrwert respektive der Erkenntnisgewinn final zusammengefasst; der Aufbau der Textpassage folgt dabei der inneren Struktur von Kapitel 4: Modellierung der Simulationselemente, Abbildung physischer Veränderungen und Berechnungsmodell für Belastungs- und Beanspruchungsverläufe.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

---

Das maßgeblich auf der Grundlage gesicherter arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse erarbeitete Konzept zur erwerbstätigenindividuellen Beschreibung der physischen Arbeitsleistungsfähigkeit bildet eine zentrale Grundlage für die alters- und belastungsorientierte Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen und vor allem für die Prognose von Beanspruchungen (vgl. Unterkapitel 4.1.1). Während vorherige Arbeiten (bspw. Gebhardt 1994) lediglich Gruppen von Arbeitspersonen differenzieren in Altersklassen, Fitnessklassen und Geschlecht, ermöglicht WorkDesigner eine individualisierte Abbildung realer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Simulationssystem. Vor allem wird durch die diskrete mathematische Modellierung der individuellen Arbeitsleistungsfähigkeit die Möglichkeit zur Simulation altersassozierter physischer Leistungsveränderungen bei mittel und langfristigen Simulationsläufen geschaffen.

Wie bereits in der Einleitung und vor allem nachfolgend detailliert in Kapitel 3 herausgearbeitet wurde, besteht bzgl. der Bewertung von Arbeitssystemen eine Diskrepanz zwischen (digitalen) Werkzeugen, Methoden und Verfahren, gesetzlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen und der betrieblichen Praxis. Mit den in Unterkapitel 4.1.2 präsentierten Bewertungsschemata wurden vereinfachte Bewertungskonzepte nach dem Schulnotensystem erarbeitet – nicht nur für den sachkundigen Anwender, sondern für jedermann. Hierbei liegt die Innovationsleistung in der neuartigen Anwendung bzw. Zusammenstellung anerkannter wissenschaftlicher Erkenntnisse und etablierter Methoden und Verfahren. Die vereinfachten Schemata zur zweckmäßigen Bewertung der Belastungsfaktoren Beleuchtung, Klima, Lärm, Arbeitsposition und -intensität sind eine Schlüsselkomponente hinsichtlich der Usability des Simulationstools WorkDesigner – Einfachheit als Alleinstellungsmerkmal.

Durch die Gewichtung der einzelnen Belastungsfaktoren in Abhängigkeit von Geschlecht und Alter der Erwerbstätigen wurden sowohl eine Individualisierung realisiert als auch Alterungsprozesse im Rahmen mittel- und langfristiger Simulationen abgebil-

det. Wie detailliert in Unterkapitel 4.2 beschrieben worden ist, wurden hierfür anerkannte wissenschaftliche Erkenntnisse aus unterschiedlichen Disziplinen wie bspw. den Ingenieurwissenschaften, der Arbeitswissenschaft, der Humanphysiologie und den Sozialwissenschaften innovativ zusammengeführt und durch die Transformation in mathematische Funktionen in das Simulationsmodell integriert.

Der in Unterkapitel 4.3 umfassend vorgestellte neuartige Ansatz zur Berechnung ganzheitlicher bzw. zusammengesetzter Belastungen eröffnet die Möglichkeit der Simulation von sukzessiven Belastungsverläufen und Beanspruchungsprognosen; durch die Berücksichtigung außerberuflicher Aktivitäten auch über die Arbeitszeit hinaus (vgl. Unterkapitel 4.4). Wie sowohl in Kapitel 3 als auch in Kapitel 4 an mehreren Stellen dargestellt wurde, besteht bzgl. der Bewertung superponierter Belastungen und der Prognose von Beanspruchungen dringender Handlungsbedarf. Die vorliegende Arbeit hat vor allem hierzu einen innovativen wissenschaftlichen Beitrag geleistet.

### **Software-Applikation**

Wie in Kapitel 5 präsentiert, wurde das simulationsbasierte Tool WorkDesigner als prototypische Software-Applikation implementiert. Hierbei besonders hervorzuheben ist der kontinuierliche Dialog mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern im Rahmen nationaler und internationaler Fachtagungen und mit Usern und Entwicklern (vgl. Unterkapitel 5.5). Dieser Austausch gab wichtige Impulse für die durchgeführten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, bspw. hinsichtlich der Abbildung von außerberuflichen Aktivitäten oder der Methodik zur Validierung von WorkDesigner in der industriellen Fertigung. Ein interessanter Nebenaspekt ist das unmittelbare Erleben des sog. „Clockspeed-Dilemma“ (vgl. KPMG 2015), welches die Diskrepanz zwischen Entwicklungszyklen von Informations- und Kommunikationstechnologien und anderen technischen bzw. wissenschaftlichen Disziplinen beschreibt. Während sich die Forschungs-

und Entwicklungsarbeiten an WorkDesigner über rund fünf Jahre erstreckten, haben sich hingegen die Möglichkeiten mobiler Endgeräte und Software-Applikationen verändert. Hier ist bspw. auf den Siegeszug der Smartwatch bzw. von Wearables hinzuweisen, der 2014 durch die Ankündigung der Apple Watch maßgeblich eingeleitet wurde und der u. a. zu völlig neuen Healthcare- und Fitness-Applikationen geführt hat. Mögliche Potentiale der Weiterentwicklung von WorkDesigner in Verbindung mit Wearables, z. B. durch die Erfassung von Umgebungs- und Vitaldaten, wurden kurz in der in Unterkapitel 4.5 dargestellten SWOT-Analyse angesprochen. Der Wesenskern des „Clockspeed-Dilemmas“ spiegelt sich bedingt auch im aufgezeigten Wandel von Forschungsfragen im Bereich der Gestaltung von Arbeitssystemen innerhalb der letzten Jahre wider (vgl. Unterkapitel 3.1). Während Fragestellungen motiviert durch den Megatrend Demographischer Wandel z. T. aktuell noch nicht hinreichend beantwortet und Erkenntnisse entsprechend im Stand der Wissenschaft und Technik nur bedingt verankert sind, prägen die Megatrends New Work und Digitalisierung heute die Forschungs- und Entwicklungslandschaft. Dieser Wandel beeinflusste auch die Entwicklung der Software-Applikation WorkDesigner, wie dem tabellarischen (Software-)Lebenslauf zu WorkDesigner entnommen werden kann (vgl. Unterkapitel 5.5).

### **Feldstudie**

Ganz im Sinne eines konsequenten wissenschaftlichen Vorgehens wurde das neu entwickelte Simulationsmodell WorkDesigner mit Probanden in zwei Unternehmen der industriellen Fertigung eingesetzt (vgl. Kapitel 6). Ziel dieser Feldstudie ist die Validierung der generellen Anwendbarkeit des Simulationsmodells WorkDesigner für orientierende bzw. qualitative Aussagen über das Niveau der Beanspruchung von Arbeitspersonen und die Auslastung von Arbeitspersonen zu diskreten Zeitpunkten gewesen. Wie im Fazit der Feldstudie resümiert (vgl. Unterkapitel 6.4), konnte die Anwendbarkeit

von WorkDesigner für eine individuelle, alters- und belastungsorientierte und ganzheitliche Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung gezeigt werden; auch kann das simulationsbasierte Softwaretool zweifelsohne wertvolle Impulse für die prospektive Gestaltung neuer Arbeitssysteme liefern.

Weiterhin kann festgehalten werden, dass bzgl. genauer (zeitlicher und quantitativer) Prognosen von zusammengesetzten Beanspruchungen – aufbauend auf der vorliegenden Forschungsarbeit – weiterführende Feldforschung betrieben werden kann.

### **Ausblick**

Die vorliegende Forschungsarbeit leistet einen dringend benötigten wissenschaftlichen Beitrag zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen im aktuellen Spannungsfeld zwischen kontinuierlich steigender Lebensarbeitszeit, Fachkräftemangel und disruptivem Wandel von Arbeit, bedingt durch die Megatrends Demographischer Wandel und Digitalisierung. Auf dem Gebiet der Beanspruchung von Erwerbstägigen, insbesondere bzgl. der Prognose zusammengesetzter Beanspruchungen, sollte weitere Feldforschung betrieben werden, die auf den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen aufbaut.

Wünschenswert sind größere und vor allem gemischt-geschlechtliche Probandengruppen. Auch besteht bei Feldstudien in der industriellen Fertigung stets das Problem, dass tendenziell deutlich mehr Probanden von hoher Fitness und einer positiven Einstellung zur eigenen Arbeit und zum jeweiligen Arbeitgeber freiwillig teilnehmen als „durchschnittliche“ Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter; aber eben diese „durchschnittlichen“ Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind im Rahmen weiterführender Forschungs-

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

---

arbeit sicherlich aufschlussreicher. Zukünftige empirische Arbeiten sollten zudem außerberufliche Aktivitäten detailliert abbilden. Diesbezüglich kann die Verbindung von WorkDesigner mit Wearables zweifelsohne einen aufschlussreichen Beitrag leisten, jedoch ist hier der Eingriff in die Privatsphäre der Probanden erheblich. Zwar werden Informationen über Sport, Schlaf, Ernährung oder das Sozialleben eine dynamische Adaption bspw. der Fitnesskonstanten, somit der Verläufe von Beanspruchung und Regeneration und letztlich eine Steigerung der Aussagekraft ermöglichen, jedoch wird sicherlich auch schnell die hoch-brisante Frage aufgeworfen, ob die Mitarbeiterin bzw. der Mitarbeiter sein Leben im Interesse des Arbeitsgebers gestaltet.

## Literatur

Ahrens, R. H.: Eine Frage des Standorts – Luftqualität: Der Stickstoffoxidgehalt sinkt, bleibt aber in Straßenschluchten zu hoch. *VDI nachrichten* 46 (2017), S. 16.

Apple Developer: ARC4RANDOM Library Functions Manual. [https://developer.apple.com/legacy/library/documentation/Darwin/Reference/ManPages/man3/arc4random.3.html#/apple\\_ref/doc/man/3/arc4random](https://developer.apple.com/legacy/library/documentation/Darwin/Reference/ManPages/man3/arc4random.3.html#/apple_ref/doc/man/3/arc4random) 29.03.2018.

ArbSchG. Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.). 2015.

ArbStättV. Verordnung über Arbeitsstätten (Arbeitsstättenverordnung – ArbStättV). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.). 2017.

ArbZG. Arbeitszeitgesetz (ArbZG). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.). 2016.

ASER e.V.: Produktflyer. [http://www.gewiteb.de/pdf\\_files/BAB-BDS-Broschuere-Web-Version.pdf](http://www.gewiteb.de/pdf_files/BAB-BDS-Broschuere-Web-Version.pdf) 02.03.2018.

ASR V3. Ausschuss für Arbeitsstätten: Technische Regeln für Arbeitsstätten – Gefährdungsbeurteilung. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.). 2017.

ASR A3.4. Ausschuss für Arbeitsstätten: Technische Regeln für Arbeitsstätten – Beleuchtung. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.). 2014.

ASR A3.5. Ausschuss für Arbeitsstätten: Technische Regeln für Arbeitsstätten – Raumtemperatur. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.). 2017.

ASR A3.6. Ausschuss für Arbeitsstätten: Technische Regeln für Arbeitsstätten – Lüftung. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.). 2017.

TRLV Lärm. Ausschuss für Arbeitsstätten; Ausschuss für Arbeitsmedizin: Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – Teil 2: Messung von Lärm. Bundesministerium für Arbeit und Soziales (Hrsg.). 2017.

## Literatur

---

- Baines, T.; Mason, S.; Siebers, P.-O.; Ladbrook, J.: Humans: the missing link in manufacturing simulation?. In: *Simulation modelling practice and theory*, Vol. 12, No. 7-8, 11.2004, S. 515-526.
- BAuA (2018a): Gefährdungsbeurteilung mit Leitmerkmalmethode.  
[https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Leitmerkmalmethode/Leitmerkmalmethode\\_node.html](https://www.baua.de/DE/Themen/Arbeitsgestaltung-im-Betrieb/Physische-Belastung/Leitmerkmalmethode/Leitmerkmalmethode_node.html) 02.03.2018.
- BAuA (2018b): MEGAPHYS – Mehrstufige Gefährdungsanalyse physischer Belastungen am Arbeitsplatz. <https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Forschung/Forschungsprojekte/f2333.html> 02.03.2018.
- BAuA (2018c): Interaktive Handlungsanleitung zur Messung ausgewählter physikalischer Faktoren im Rahmen von Gefährdungsbeurteilungen.  
<https://www.baua.de/DE/Aufgaben/Forschung/Forschungsprojekte/f2391.html> 02.03.2018.
- BAuA: Arbeitszeitreport Deutschland 2016. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2016.
- BAuA: Leitmerkmalmethode zur Beurteilung von Heben, Halten, Tragen. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin und Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik 2001.
- BMAS (2016a): Werkheft 01 – Digitalisierung der Arbeitswelt. Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2016.
- BMAS (2016b): Werkheft 02 – Wie wir arbeiten (wollen). Bundesministerium für Arbeit und Soziales 2016.
- BMWI: Aktionsprogramm Zukunft Mittelstand. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016.
- BMWI: Dossier. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/politik-fuer-den-mittelstand.html> 15.05.2018.
- Bokranz, R.; Landau, K.: Einführung in die Arbeitswissenschaft – Analyse und Gestaltung von Arbeitssystemen. Stuttgart: Eugen Ulmer 1991.

- Boot, W. R.; Nichols, T. A.; Rogers, W. A.; Fisk, A. D.: Design for Aging. In: Salvendy, G. (Hrsg.): *Handbook of human factors and ergonomics*. Hoboken, NJ: Wiley 2012, S. 1442-1465.
- Börner, K.; Scherf, C.; Leitner-Mai, B.; Spanner-Ulmer, B.: Field Study of Age-Critical Assembly Processes in the Automotive Industry. In: Schlick, C.; Frieling, E.; Wegge, J. (Hrsg.): *Age-Differentiated Work Systems*. Berlin Heidelberg: Springer 2013, S. 253-277.
- Brandl, C.; Bonin, D.; Mertens, A.; Wischniewski, S.; Schlick, C.: Digitalisierungsansätze ergonomischer Analysen und Interventionen am Beispiel der markerlosen Erfassung von Körperhaltungen bei Arbeitstätigkeiten in der Produktion. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften* 70 (2016), S. 89-98.
- Brandl, C.; Hellig, T.: Ergonomie-Navigator für die alters- und altersgerechte Produktion. *IAW SPECTRUM* (2016), S. 4-5.
- Brinckmann, P.; Frobin, W.; Leivseth, G.; Drerup, B.: *Orthopädische Biomechanik*. Münster: MV-Verlag 2010.
- Bullinger, H.-J.: *Ergonomie – Produkt- und Arbeitsplatzgestaltung*. Stuttgart: Teubner 1994.
- Bureau of Labor Statistics: *American Time Use Survey – 2014 Results*. U. S. Department of Labor (Hrsg.). 2015.
- Caffier, G.; Steinberg, U.; Liebers, F.: Praxisorientiertes Methodeninventar zur Belastungs- und Beanspruchungsbeurteilung im Zusammenhang mit arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen. In: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA; Hrsg.): *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – Forschung – Fb 850*. Dortmund Berlin: BAuA 1999.
- Carver, C. S.; Scheier, M. F.; Weintraub, J. K.: Assessing Coping Strategies: A Theoretically Based Approach. *Journal of Personality and Social Psychology* 56 (1989), S. 267-283.
- Clauss, W.; Clauss, C.: *Humanbiologie kompakt*. Heidelberg: Spektrum 2009.
- Dangelmaier, M.; Theissen, P.: Development of an Ergonomic Evaluation Tool for Health-Promoting Physical Workplaces. In: Goonetilleke, R. S.; Karwowski, W.

## Literatur

---

- (Hrsg.): Advances in Physical Ergonomics and Human Factors. Springer International Publishing AG 2017.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV): DGUV-Statistiken für die Praxis 2015. Paderborn: Bonifatius 2015.
- Dibrani, B.; Gatzke, M.; Politycki, B.: Geht uns die Arbeit aus? – Beschäftigungseffekte der Digitalisierung in Deutschland und NRW. Wuppertal: CPS.HUB/NRW 2018.
- DIN EN 614-1:2009. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 1: Begriffe und allgemeine Leitsätze. Berlin: Beuth 2009.
- DIN EN 614-2:2008. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Gestaltungsgrundsätze – Teil 2: Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung von Maschinen und den Arbeitsaufgaben. Berlin: Beuth 2008.
- DIN EN 12464-1:2011. DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL): Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten – Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen. Berlin: Beuth 2011.
- DIN EN ISO 7933:2004. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der Wärmebelastung durch Berechnung der vorhergesagten Wärmebeanspruchung. Berlin: Beuth 2004.
- DIN EN ISO 9612:2009. Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungsstechnik (NALS) im DIN und VDI: Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren). Berlin: Beuth 2009.
- DIN EN ISO 11690-1:1996. Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungsstechnik (NALS) im DIN und VDI: Akustik – Richtlinien für die Gestaltung lärmärmer maschinenbestückter Arbeitsstätten – Teil 1: Allgemeine Grundlagen. Berlin: Beuth 1996.
- DIN EN 1005-1:2009. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 1: Begriffe. Berlin: Beuth 2009.

- DIN EN 1005-2:2009. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 2: Manuelle Handhabung von Gegenständen in Verbindung mit Maschinen und Maschinenteilen. Berlin: Beuth 2009.
- DIN EN 1005-3:2009. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 3: Empfohlene Kraftgrenzen bei Maschinenbetätigung. Berlin: Beuth 2009.
- DIN EN 1005-4:2009. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 4: Bewertung von Körperhaltungen und Bewegungen bei der Arbeit an Maschinen. Berlin: Beuth 2009.
- DIN EN 1005-5:2007. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Sicherheit von Maschinen – Menschliche körperliche Leistung – Teil 5: Risikobeurteilung für kurzyklische Tätigkeiten bei hohen Handhabungsfrequenzen. Berlin: Beuth 2007.
- DIN EN ISO 6385:2016. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin: Beuth 2016.
- DIN EN ISO 7029:2017. DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE: Akustik – Statistische Verteilung von Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht. Berlin: Beuth 2017.
- EN ISO 7029:2000. CEN/TC 211 Acoustics. Acoustics – Statistical distribution of hearing thresholds as a function of age. CEN European Committee for Standardization 2000.
- DIN EN ISO 7731:2008. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Ergonomie – Gefahrensignale für öffentliche Bereiche und Arbeitsstätten – Akustische Gefahrensignale. Berlin: Beuth 2008.
- DIN EN ISO 9921:2004. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Ergonomie – Beurteilung der Sprachkommunikation. Berlin: Beuth 2004.
- DIN EN ISO 10075-1:2018. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe. Berlin: Beuth 2018.

## Literatur

---

- DIN EN ISO 10075-2:2000. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 2: Gestaltungsgrundsätze. Berlin: Beuth 2000.
- DIN EN ISO 10075-3:2004. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung – Teil 3: Grundsätze und Anforderungen an Verfahren zur Messung und Erfassung psychischer Arbeitsbelastung. Berlin: Beuth 2004.
- DIN EN ISO 12100:2011. DIN-Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG): Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung. Berlin: Beuth 2011.
- DIN EN ISO 14738:2009. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Sicherheit von Maschinen – Anthropometrische Anforderungen an die Gestaltung von Maschinenarbeitsplätzen. Berlin: Beuth 2009.
- DIN EN 16710-2:2016. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Verfahren der Ergonomie – Teil 2: Eine Methode für die Arbeitsanalyse zur Unterstützung von Entwicklung und Design. Berlin: Beuth 2016.
- DIN EN ISO 26800:2011. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Ergonomie – Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte. Berlin: Beuth 2011.
- DIN 33402-2:2005. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Ergonomie – Körpermaße des Menschen – Teil 2: Werte. Berlin: Beuth 2005.
- DIN 33411-1:1982. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Körperkräfte des Menschen - Begriffe, Zusammenhänge, Bestimmungsgrößen. Berlin: Beuth 1982.
- DIN 33411-3:1986. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Körperkräfte des Menschen – Teil 3: Maximal erreichbare statische Aktionsmomente männlicher Arbeitspersonen an Handrädem. Berlin: Beuth 1986.
- DIN 33411-4:1987. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Körperkräfte des Menschen – Teil 4: Maximale statische Aktionskräfte (Isodynen). Berlin: Beuth 1987.
- DIN 33411-5:1999. DIN-Normenausschuss Ergonomie (NAErg): Körperkräfte des Menschen – Teil 5: Maximale statische Aktionskräfte, Werte. Berlin: Beuth 1999.

- Domsch, M. E.; Ladwig, D. H.: Doppelkarrierepaare – Eine Herausforderung für die betriebliche Familienpolitik. In: Dilger, A.; Gerlach, I.; Schneider, H. (Hrsg.): Betriebliche Familienpolitik – Potenziale und Instrumente aus multidisziplinärer Sicht. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2007, S. 75-85.
- Egbers, J.; Neuberger, M.; Spillner, R.; Walch, D.; Williger, B.: Definition einer altersgerechten Arbeitsgestaltung. In: Gerhäuser, H.; Günthner, W. A.; Lang, F. R.; Reinhardt, G.; Schilling, K. (Hrsg.): Alternsgerechte Arbeitsplatzgestaltung in Produktion und Logistik. Erlangen: bayme vbm 2010, S. 11-14.
- EMMA-CC. <https://www.emma-cc.com> 01.03.2018.
- Feller, N.; Müller, U.: Development and Assessment of Work Systems for Elder Employees in Industrial Manufacturing. In: Trzcielinski, S.; Karwowski, W. (Hrsg.): Advances in the Ergonomics in Manufacturing – Managing the Enterprise of the Future. USA: AHFE Conference © 2014, S. 140-151.
- Feller, N.; Müller, U.; Huynh, K.-H.; Potthast, W.; Dupré, T.; Funck, J.: Prospective Design of Seating Systems for Digitalized Working Worlds. In: Goonetilleke, R. S.; Karwowski, W. (Hrsg.): Advances in Physical Ergonomics and Human Factors. Los Angeles: Springer 2017.
- Ferring, D. Altern und Lebensspannenentwicklung. In: Ferring, D.; Steffgen, G.; Michaux, G. (Hrsg.): Psychologie in Luxemburg – Ein Handbuch. University of Luxembourg, Société Luxembourgeoise de Psychologie A.s.b.l. 2014.
- Froböse, I.: Bewegungspyramide.  
<http://www.ingo-froboese.de/wp-content/uploads/2017/01/Bewegungspyramide-Ingo-Froboese.png> 10.08.2017.
- Froböse, I.: Power durch Pause – Stress stoppen, richtig abschalten, kraftvoll neu starten. München: Gräfe und Unzer Verlag 2016.
- Gangl, P.: Simulation – eine Schlüsseltechnologie der 90er Jahre: Hoher Nutzen aber geringer Kenntnisstand in der Industrie. In: Biethahn, J.; Hummeltenberg, W.; Schmidt, B.; Witte, T. (Hrsg.): Fortschritte in der Simulationstechnik – Simulation als betriebliche Entscheidungshilfe. Braunschweig Wiesbaden: Vieweg 1994, S. 1-10.

- Gebhardt, H.: Grundlagen eines rechnergestützten arbeitswissenschaftlichen Prognose- und Informationssystems. In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 134. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994.
- Grupe, G.; Christiansen, K.; Schröder, I.; Wittwer-Backofen, U.: Anthropologie – Ein einführendes Lehrbuch. Berlin Heidelberg New York: Springer 2005.
- Gust, P.; Müller, U.; Feller, N.; Schiffmann, M.: Field Study on the Application of a Simulation-Based Software Tool for the Strain-Based Staffing in Industrial Manufacturing. In: Duffy, V. G. (Hrsg.): Advances in Applied Digital Human Modeling and Simulation. Springer International Publishing Switzerland 2016, S. 3-12.
- Hackl, B.; Wagner, M.; Attmer, L.; Baumann, D.: New Work: Auf dem Weg zur neuen Arbeitswelt. Wiesbaden: Springer Gabler 2017.
- Hollmann, W.: Höchst- und Dauerleistungsfähigkeit des Sportlers. München: Barth 1963.
- IFM – Institut für Mittelstandsforschung Bonn: KMU insgesamt nach KMU-Definition der EU-Kommission.  
<https://www.ifm-bonn.org/statistiken/unternehmensbestand/> 15.05.2018.
- Ilmarinen, J.; Tempel, J.: Arbeitsfähigkeit 2010 – Was können wir tun, damit Sie gesund bleiben?. Hamburg: VSA-Verlag 2002.
- Jindal, P.; Singh, B.: RC4 Encryption – A Literature Survey. Procedia Computer Science 46 (2015), S. 697-705.
- Jochems, N.: Abschlussbericht – Förderpreis „Alter und Arbeit“ der Marie-Luise und Ernst Becker Stiftung – Altersdifferenzierte Arbeitsplatzgestaltung auf Basis digitaler Menschmodelle – Integration altersassozierter physiologischer Leistungsparameter in das AnyBody Menschmodell. [http://www.becker-stiftung.de/wp-content/uploads/2012/02/2010\\_Abschlussbericht.pdf](http://www.becker-stiftung.de/wp-content/uploads/2012/02/2010_Abschlussbericht.pdf) 09.02.2018.
- Kingma, B.; van Marken Lichtenbelt, W.: Energy consumption in buildings and female thermal demand. Nature Climate Change 5 (2015), S. 1054-1056.
- Klös, H.-P.; Seyda, S.: Die Auswirkungen des demographischen Wandels auf das Beschäftigungs- und Bildungssystem. In: Dilger, A.; Gerlach, I.; Schneider, H. (Hrsg.):

- Betriebliche Familienpolitik – Potenziale und Instrumente aus multidisziplinärer Sicht. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2007, S. 29-44.
- Köhler, H.: Einführung. In: Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.): Bürgerliches Gesetzbuch (BGB). München: C. H. Beck 2011, S. IX-XXXI.
- Korn Ferry: Future of Work – The Global Talent Crunch. Korn Ferry 2018.
- KPMG: Blechbieger oder Grid Master? – Die Automobilindustrie an der Weggabelung in ein hochdigitalisiertes Zeitalter. KPMG Trendanalyse 2015.
- Landau, K.; Weißert-Horn, M.; Presl, A.; Brauchler, R.: Active Age Management. Zeitschrift für Arbeitswissenschaften 66 (2012), S. 75-91.
- LärmVibrationsArbSchV. Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung – LärmVibrationsArbSchV). Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (Hrsg.). 2017.
- Lorenz, P.; Dorwarth, H.; Ehrhardt I.; Gebhardt, H.; Herper, H.; Holzki, B.; Kuhn, A.; Müller, B. H.; Vornholt, C.: Entwicklung eines Modells zur Beschreibung der Belastung des Menschen und des Einflusses manueller Tätigkeiten im innerbetrieblichen Materialfluß. Magdeburg: Institut für Simulation und Graphik ISG 1996.
- Löhr, R.: Ergonomie kurz und bündig – Grundlagen der Wechselbeziehungen zwischen Mensch, Technik und Umwelt. Würzburg: Vogel-Verlag 1976.
- Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Berlin Heidelberg: Springer 1993.
- Luczak, H.; Schlick, C.; Jochems, N.; Vetter, S.; Kausch, B.: Touch Screens for the Elderly: Some Models and Methods, Prototypical Development and Experimental Evaluation of Human-Computer Interaction Concepts for the Elderly. In: Haftor, D.; Mirijamdotter, A. (Hrsg.): Information and Communication Technologies, Society and Human Beings: Theory and Framework (Festschrift in honor of Gunilla Bradley). Hershey, PA: IGI Global 2010, S. 116-135.
- Mühlstedt, J. (2016a): Digitale Menschmodelle. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016, S. 73-182.

## Literatur

---

- Mühlstedt, J. (2016b): Virtuelle Ergonomie. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): *Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016, S. 183-225.
- Mühlstedt, J. (2016c): Grundlagen virtueller Ergonomie. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): *Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016, S. 7-39.
- Mühlstedt, J.; Kaußler, H.; Spanner-Ulmer, B.: Programme in Menschengestalt: digitale Menschmodelle für CAx- und PLM-Systeme.  
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-200901200> 09.02.2018.
- Müller, U.; Gust, P.; Feller, N.; Schiffmann, M. (2015a): WorkDesigner: Consulting application software for the strain-based staffing and design of work processes. *Procedia Manufacturing* 3 (2015), S. 379-386.
- Müller, U.; Gust, P.; Feller, N.; Schiffmann, M. (2015b): Simulationstool zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung. In: Rabe, M.; Clausen, U. (Hrsg.): *Simulation in Production and Logistics 2015*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2015, S. 177-188.
- Müller, W.; Frings, S.: *Tier- und Humanphysiologie – Eine Einführung*. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer 2009.
- Müller, B.; Hettinger, T.: Interpretations- und Bewertungsverfahren arbeitswissenschaftlich-ergonomischer Felddaten. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften* 35 (1981), S. 82-86.
- Oestreich, B.; Scheithauer, A.: *Analyse und Design mit der UML 2.5 – Objektorientierte Softwareentwicklung*. München: Oldenbourg Verlag 2013.
- Pieper, R.; Gebhardt, H.: „Smart Factory“ – Menschengerechte Produkt- und Arbeitsgestaltung auf dem Weg zur „Industrie 4.0“?. In: Pieper, R.; Lang, K.-H. (Hrsg.): *Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium 2014-2015*. Wuppertal: Institut ASER e.V. 2016, S. 124-127.
- PWC – PricewaterhouseCoopers Aktiengesellschaft: Der Einfluss der Digitalisierung auf die Arbeitskräftesituation in Deutschland – Berufs- und branchenspezifische Analyse bis zum Jahr 2030. PWC 2016.

- REFA – Verb. Für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.: Methoden der Betriebsorganisation – Grundlagen der Arbeitsgestaltung. München: Hanser 1991.
- Resch, M.: Familienfreundlichkeit von Unternehmen aus arbeitspsychologischer Sicht. In: Dilger, A.; Gerlach, I.; Schneider, H. (Hrsg.): Betriebliche Familienpolitik – Potenziale und Instrumente aus multidisziplinärer Sicht. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2007, S. 103-124.
- Schaertl, M.: Entspannt zum Erfolg. Focus-Business 1 (2018), S. 55.
- Schlick, C.; Frieling, E.; Wegge, J. (Hrsg.; 2013a): Age-Differentiated Work Systems. Heidelberg New York Dordrecht London: Springer 2013.
- Schlick, C.; Frieling, E.; Wegge, J. (2013b): Age-Differentiated Work Systems: Introduction and Overview to a Six-Year Research Program in Germany. In: Schlick, C.; Frieling, E.; Wegge, J. (Hrsg.): Age-Differentiated Work Systems. Heidelberg New York Dordrecht London: Springer 2013, S. 1-24.
- Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Berlin: Springer 2010.
- Schneider, N. F.: Work-Life-Balance – Neue Herausforderungen für eine zukunftsorientierte Personalpolitik aus soziologischer Perspektive. In: Dilger, A.; Gerlach, I.; Schneider, H. (Hrsg.): Betriebliche Familienpolitik – Potenziale und Instrumente aus multidisziplinärer Sicht. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2007, S. 64-74.
- Seliger, V.; Bartunek, Z.: Mean Values of Various Indices of Physical Fitness in the Investigation of Czechoslovak Population Aged 12-55 Years. Czechoslovak Association of Physical Culture. Praha: CSTV 1976.
- Simonson, E.: Ermüdung und Erholung nach körperlicher Arbeit. Klinische Wochenschrift 50 (1926).
- Spath, D.; Braun, M.; Meinken, K.: HUMAN FACTORS IN MANUFACTURING. In: Salvendy, G. (Hrsg.): Handbook of human factors and ergonomics. Hoboken, NJ: Wiley 2012, S. 1643-1665.
- Spanner-Ulmer, B.; Mühlstedt, J.: Digitale Menschmodelle als Werkzeuge virtueller Ergonomie – Ergebnisse einer empirischen Studie. Industrie Management 26 (2010), S. 69-72.

## Literatur

---

- Spitzhirn, M.; Bullinger, A. C.: Integration von Altersfaktoren in digitale Menschmodelle zur altersgerechten Arbeitsprozessgestaltung.  
<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-223252> 09.02.2018.
- Spitzhirn, M.; Bullinger-Hoffmann, A. C.: Eine Anforderungsermittlung zu digitalen Menschmodellen als Instrument zur ergonomischen Arbeitsprozessgestaltung – Anforderungen und Bedarf aus Praxissicht. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): *Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016, S. 229-245.
- Starck, U.: Untersuchungen über den Einfluß verschiedener Körperhaltung auf die Vitalkapazität der Lunge. Dissertation. Hamburg: Hansische Universität 1938.
- Statistisches Bundesamt (2015a): Zeitverwendungserhebung – Aktivitäten in Stunden und Minuten für ausgewählte Personengruppen – Zeitverwendung 2012/2013. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt 2015.
- Statistisches Bundesamt (2015b): Bevölkerung Deutschlands bis 2060 – 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden, Statistisches Bundesamt 2015.
- Stowasser, S.: Arbeitswissenschaftliche Entwicklungsziele und Erfordernisse in Verbindung mit der Hightech-Strategie Industrie 4.0. In: Pieper, R.; Lang, K.-H. (Hrsg.): *Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium 2014-2015 – Schriftenreihe des Instituts für Arbeitsmedizin, Sicherheitstechnik und Ergonomie e.V. (ASER) – Forschungsbericht-Nr. 32*. Wuppertal: Institut ASER e.V. 2016, S. 97-112.
- Thieme, F.: Alter(n) in der alternden Gesellschaft – Eine soziologische Einführung in die Wissenschaft vom Alter(n). Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften 2008.
- TK – Techniker Krankenkasse: Gesundheitsreport 2018 – Kurzübersicht Fehlzeiten. Techniker Krankenkasse 2018.
- Toussaint, A.: Integration des Workers in die Fertigungssimulation. In: Kampe, G.; Zeitz, M. (Hrsg.): *Fortschritte in der Simulationstechnik*. Braunschweig Wiesbaden: Vieweg 1994, S. 553-556.

- TRILUX GmbH & Co. KG: Beleuchtungspraxis – Innenbeleuchtung. Arnsberg: TRILUX GmbH & Co. KG 2007.
- VDI 2058 Bl. 3:2014. Normenausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungs-technik (NALS) im DIN und VDI: Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Be-rücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten. Berlin: Beuth 2014.
- VDI 3633 Bl. 1:2014. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Simulation von Logis-tik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Grundlagen. Berlin: Beuth 2014.
- VDI 3633 Bl. 6:2001. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Simulation von Logis-tik-, Materialfluss- und Produktionssystemen – Abbildung des Personals in Simula-tionsmodellen. Berlin: Beuth 2001.
- VDI 4499 Bl. 1:2008. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Digitale Fabrik – Grundlagen. Berlin: Beuth 2008.
- VDI 4499 Bl. 2:2011. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Digitale Fabrik – Digi-taler Fabrikbetrieb. Berlin: Beuth 2011.
- VDI 4499 Bl. 3:2016. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Digitale Fabrik – Da-tenmanagement und Systemarchitekturen. Berlin: Beuth 2016.
- VDI 4499 Bl. 4:2015. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik: Digitale Fabrik – Er-gonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik. Berlin: Beuth 2015.
- VDI 6008 Bl. 1:2012. VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik: Barrierefreie Le-bensräume – Allgemeine Anforderungen und Planungsgrundlagen. Berlin: Beuth 2012.
- Wakula, J.; Berg, K.; Schaub, K.; Bruder, R.; Glitsch, U.; Ellegast, R.: Der montage-spezifische Kraftatlas. In: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (Hrsg.): BGIA-Report 3/2009. Berlin: DGUV 2009.
- Walch, D.; Günthner, W. A.: Die demographische Entwicklung in Gesellschaft und Ar-bitswelt. In: Gerhäuser, H.; Günthner, W. A.; Lang, F. R.; Reinhart, G.; Schilling, K. (Hrsg.): Alternsgerechte Arbeitsplatzgestaltung in Produktion und Logistik. Erlan-gen: bayme vbm 2010, S. 7-10.
- Wissenschaftsjahr 2018. <https://www.wissenschaftsjahr.de/2018/> 05.05.2018.

- World Health Organization WHO: Global Recommendations on Physical Activity for Health. Geneva: WHO Press 2010.
- Zülch, G.: Normen und Richtlinien zur digitalen Ergonomie – Auf dem Weg zur Standardisierung ergonomischer Prognosen in der Digitalen Fabrik. In: Bullinger-Hoffmann, A. C.; Mühlstedt, J. (Hrsg.): *Homo Sapiens Digitalis – Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2016, S. 247-254.
- Zülch, G.: Ergonomische Abbildung des Menschen in der Digitalen Fabrik – Die neue VDI-Richtlinie 4499-4. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013*. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe 2013.
- Zülch, G.: Stand und Entwicklungstendenzen der personalorientierten Simulation. In: Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing 2010, S. 1-19.
- Zülch, G.; Stock, P. (Hrsg.): *Integrationsaspekte der Simulation: Technik, Organisation und Personal*. Karlsruhe, KIT Scientific Publishing 2010.
- Zülch, G.; Waldherr, M.; Becker, M.: Effects of an Ageing Workforce on the Performance of Assembly Systems. In: Schlick, C.; Frieling, E.; Wegge, J. (Hrsg.): *Age-Differentiated Work Systems*. Berlin Heidelberg: Springer 2013, S. 65-87.
- Zülch, G.; Waldherr, M.: Simulationsunterstützte Leistungsabstimmung von Montagesystemen unter dem Aspekt einer alternden Belegschaft. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften* 64 (2010), S. 217-228.
- Zülch, G.; Heel, J.: Personalorientierte Simulation – Grundsätze und Anwendungaspekte. In: Kuhn, A.; Wenzel, S. (Hrsg.): *Simulationstechnik*. Braunschweig Wiesbaden: Vieweg 1997, S. 57-66.
- Zukunftsinstut: Megatrends Übersicht. <http://www.zukunftsinstut.de/dossier/megatrends/> 16.12.2017.
- Zukunftsinstut (2018a): Megatrend New Work. <https://www.zukunftsinstut.de/dossier/megatrend-new-work/> 01.03.2018.
- Zukunftsinstut (2018b): Megatrend Silver Society. <https://www.zukunftsinstut.de/dossier/megatrend-silver-society/> 01.03.2018.

# Lebenslauf

**Nachname, Vorname:** Feller, Nico  
**Jahrgang:** 1983

## Berufserfahrung:

04/2020 - heute	Digital Engineering Center Detecon International GmbH (100% Tochter der Telekom) Position: <b>Senior Consultant, IoT Expert, Enterprise Architect</b>
09/2018 - 03/2020	Digital Engineering Center Detecon International GmbH (100% Tochter der Telekom) Position: <b>Consultant, IoT Expert, Enterprise Architect</b>
10/2010 - 07/2018	Labor für Fertigungssysteme Köln (Ifk) Technische Hochschule Köln Position: <b>Projektmanager</b>

## Lehrerfahrung:

SoSe 2017 & SoSe 2016	Hochschule Ruhr West Institut Maschinenbau <b>Produktionsplanung und -steuerung in der produktions-technischen Praxis</b> Studiengang: Produktionsmanagement (Master)
WiSe 2015/2016 & WiSe 2014/2015	Technische Hochschule Köln Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme <b>Produktgestaltung und Fertigung 1 &amp; 3</b> Studiengang: Maschinenbau (Bachelor)
SoSe 2015	Technische Hochschule Köln Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme <b>Produktgestaltung und Fertigung 2</b> Studiengang: Maschinenbau (Bachelor)
SoSe 2014	Technische Hochschule Köln Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme <b>Fertigungstechnik 1</b> Studiengang: Maschinenbau (Diplom)

Mobil: 0157 861 766 64

Mail: nfeller83@gmail.com

WiSe 2013/2014      Technische Hochschule Köln  
Fakultät für Anlagen, Energie- und Maschinensysteme  
**Fertigungsmittel, Messtechnik**  
Studiengang: Maschinenbau (Diplom)

**Werdegang:**

---

07/2020	Bergische Universität Wuppertal <b>Doktor Ingenieurwissenschaften</b> (cum laude) Konzept zur alters- und leistungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung
02/2012	Technische Hochschule Köln <b>Master of Engineering</b> (sehr gut) Untersuchung und Optimierung des Fertigungsprozesses von Lochscheiben für Nahrungsmittelmaschinen
09/2010	Technische Hochschule Köln <b>Diplomingenieur</b> (FH; sehr gut) Optimierung des Fertigungsprozesses durch den Einsatz von RFID-Technologie in der spanenden Fertigung von KMU
06/2002	Freiherr-vom-Stein-Gymnasium Leverkusen <b>Abitur</b>

**Publikationen:**

---

01/2019	EP000003421964A1 Method and Device for Assessing the Connection Quality of Anchor Devices.
11/2018	Gust, P., Kampa, S. P., <b>Feller, N.</b> , vom Stein, M., Haase, I., & Virzi, V. (2018) Intelligent Seating System with Haptic Feedback for Active Health Support. Future Technologies Conference FTC 2018.
07/2017	<b>Feller, N.</b> , Müller, U., Huynh, K.-H., Potthast, W., Dupré, T., & Funck, J. (2017) Prospective Design of Seating Systems for Digitized Working Worlds. ISBN 978-3-319-60824-2.
07/2016	<b>Feller, N.</b> , Amann, A., Müller, U., Schiffmann, M., Kurscheid, O., & Gorzellik, M. (2016) Application of a Simulation-Based Software Tool for the Prospective Design of IT Work Places. ISBN 978-3-319-41690-8.
07/2016	Gust, P., Müller, U., <b>Feller, N.</b> , & Schiffmann, M. (2016) Field Study on the Application of a Simulation-Based Software Tool for the Strain-Based Staffing in Industrial Manufacturing. ISBN 978-3-319-41626-7.

- 09/2015 Müller, U., Gust, P., **Feller, N.**, & Schiffmann, M. (2015) Simulationstool zur alters- und belastungsorientierten Entwicklung und Bewertung von Arbeitssystemen in der industriellen Fertigung. ISBN 978-3-8396-0936-1.
- 07/2015 Müller, U., Gust, P., Spitz, T., **Feller, N.**, & Kamp, S. (2015) Light Weight Gloves with Self-Sensing Smart Actuators for Work Stress Reduction. ISBN 978-1-4951-6042-4.
- 07/2015 Müller, U., Huynh, K., **Feller, N.**, Schiffmann, M., & Kamp, S. (2015) Automated Decompression Table for the Individual and Targeted Treatment of Disc Herniation. ISBN 978-1-4951-6042-4.
- 03/2015 Müller, U., Trampnau, S., **Feller, N.**, Stürznickel, J., & Lusztyk, F. (2015) RFID-Based Chain Drag Measurement System (CDMS) for the Stress-Based Control of Industrial Chain Drives. ISBN 978-3-86359-296-7.
- 06/2014 **Feller, N.**, & Müller, U. (2014) Development and Assessment of Work Systems for Elder Employees in Industrial Manufacturing. ISBN 978-1-4951-2103-6.
- 06/2014 Kamp, S., Spitz, T., Müller, U., & **Feller, N.** (2014) Ergonomic Engineering of a Mobile Walker. ISBN 978-1-4951-2107-4.





**INGENIEUR.de**  
TECHNIK - KARRIERE - NEWS

powered by VDI Verlag

Starten Sie durch –  
auf INGENIEUR.de!

**Das TechnikKarriereNews-Portal für  
Ingenieure und IT-Ingenieure.**

Was immer Sie für Ihre Karriere brauchen – Sie finden es auf ingenieur.de:  
Auf Sie zugeschnittene Infos und Services, Stellenangebote in der Jobbörse,  
Firmenprofile, Fachartikel, Gehaltstest, Bewerbungstipps, Newsletter und alles  
zu den VDI Nachrichten Recruiting Tagen.

## Die Reihen der Fortschritt-Berichte VDI:

- 1 Konstruktionstechnik/Maschinenelemente
- 2 Fertigungstechnik
- 3 Verfahrenstechnik
- 4 Bauingenieurwesen
- 5 Grund- und Werkstoffe/Kunststoffe
- 6 Energietechnik
- 7 Strömungstechnik
- 8 Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
- 9 Elektronik/Mikro- und Nanotechnik
- 10 Informatik/Kommunikation
- 11 Schwingungstechnik
- 12 Verkehrstechnik/Fahrzeugtechnik
- 13 Fördertechnik/Logistik
- 14 Landtechnik/Lebensmitteltechnik
- 15 Umwelttechnik
- 16 Technik und Wirtschaft
- 17 Biotechnik/Medizintechnik
- 18 Mechanik/Bruchmechanik
- 19 Wärmetechnik/Kältetechnik
- 20 Rechnerunterstützte Verfahren (CAD, CAM, CAE CAQ, CIM ...)
- 21 Elektrotechnik
- 22 Mensch-Maschine-Systeme
- 23 Technische Gebäudeausrüstung

ISBN 978-3-18-345101-2