

# Digitale Ergonomie 2025

S. Wischniewski

**Forschung  
Projekt F 2313**

S. Wischniewski

## **Digitale Ergonomie 2025**

**Trends und Strategien zur Gestaltung  
gebrauchstauglicher Produkte und sicherer,  
gesunder und wettbewerbsfähiger  
sozio-technischer Arbeitssysteme**

Dortmund/Berlin/Dresden 2013

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Digitale Ergonomie 2025 – Trends und Strategien zur Gestaltung gebrauchstauglicher Produkte und sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger sozio-technischer Arbeitssysteme“ – Projekt F 2313 – der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor.

Autor: Sascha Wischniewski  
Fachgruppe „Human Factors, Ergonomie“  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Titelbild: eckedesign, Berlin

Umschlaggestaltung: Rainer Klemm  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Bonifatius GmbH, Paderborn

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin  
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund  
Telefon 0231 9071-0  
Fax 0231 9071-2454  
poststelle@buaa.bund.de  
www.buaa.de

Berlin:  
Nöldnerstr. 40 – 42, 10317 Berlin  
Telefon 030 51548-0  
Fax 030 51548-4170

Dresden:  
Fabricestr. 8, 01099 Dresden  
Telefon 0351 5639-50  
Fax 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.



[www.buaa.de/dok/4131418](http://www.buaa.de/dok/4131418)

ISBN 978-3-88261-004-8

# Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorwort	5
Kurzreferat	7
Abstract	8
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2 Grundlagen Digitaler Ergonomie</b>	<b>10</b>
<b>3 Delphi-Methode</b>	<b>14</b>
<b>4 Studiendesign</b>	<b>16</b>
4.1 Studienablauf	16
4.2 Zusammenstellung der Expertengruppe	16
4.3 Fragebogengestaltung	17
4.4 Technische Umsetzung	22
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>24</b>
5.1 Übersicht der Expertenbeteiligung	24
5.2 Zwischenergebnisse der 1. Runde	26
5.3 Zwischenergebnisse der 2. Runde	27
5.4 Ergebnisse der Studie	27
<b>6 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>35</b>
Literaturverzeichnis	37
Anhang Ergebnisvergleich der 2. und 3. Runde	39



## Vorwort

Der vorliegende Bericht über die Delphi-Studie „Digitale Ergonomie 2025“ ist eine wichtige Grundlage für die Arbeiten der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin in diesem Feld. Unsere Erwartung, dass Methoden und Ziele Digitaler Ergonomie einen vielversprechenden Weg kommender arbeitswissenschaftlicher Forschung darstellen, ist eindrucksvoll bestätigt und mit differenzierten Argumenten unterfüttert worden. Es zeichnen sich deutliche Chancen der Technologie für die Verbesserung sowohl der Produktergonomie wie auch der betrieblichen Arbeitsgestaltung ab.

Die diesem Abschlussbericht zugrundeliegende Delphi-Studie wurde fachlich durch einen Beirat begleitet. Unser Dank gilt den Mitgliedern dieses Gremiums für ihre Unterstützung: Herrn Norbert Breutmann, Bundesvereinigung der Deutschen Arbeitgeberverbände, Herrn Professor Ralph Bruder, Technische Universität Darmstadt, Herrn Professor Jochen Deuse, Technische Universität Dortmund, Herrn Professor Martin Schmauder, Technische Universität Dresden sowie Herrn Direktor und Professor Armin Windel, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Wir bedanken uns des Weiteren bei allen Expertinnen und Experten für ihre Teilnahme an der Delphi-Studie<sup>1</sup>:

Dr. Thomas Alexander,  
 Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie  
 Dr. Amir Al-Munajjed, AnyBody Technology  
 Markus Blumenthal, Daimler AG  
 Professor Guido Brunnett, Technische Universität Chemnitz  
 Professor Heiner Bubb, Technische Universität München  
 Felix Busch, Technische Universität Dortmund  
 Dr. Eilis Carey, Ford-Werke GmbH  
 Dr. Manfred Dangelmaier, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation  
 Dr. Rolf Ellegast, Institut für Arbeitsschutz der DGUV  
 Dr. Lars Fritzsche, imk automotive GmbH  
 Dr. Hans-Jürgen Gebhardt, Institut ASER e. V.  
 Uwe Gottwald, Airbus Deutschland GmbH  
 Thomas Härtel, Institut für Mechatronik  
 Dr. Christiane Kamusella, Technische Universität Dresden  
 Dr. Gerd Küchmeister, Fachhochschule Kiel  
 Dr. Wolfgang Leidholdt, imk automotive GmbH  
 Professor Stefan Linner, Hochschule München  
 Dr. Jens Mühlstedt, Technische Universität Chemnitz  
 Ralf Nürnberg, Ford-Werke GmbH  
 László Ördögh, Virtual Human Engineering GmbH  
 Dr. Gunther Paul, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia  
 Dr. Steffen Rast, Deutsche MTM-Gesellschaft  
 Dr. Christoph Runde, Virtual Dimension Center Fellbach  
 Julian Schallow, Technische Universität Dortmund

---

<sup>1</sup> Es sind ausschließlich die Mitglieder der Expertengruppe aufgeführt, die einer Veröffentlichung ihrer Daten zugestimmt haben.

Uwe Scholly, Daimler AG  
Alexander Siefert, Wölfel Beratende Ingenieure  
Professor Sascha Stowasser, Institut für angewandte Arbeitswissenschaft  
Andrea Spillner, Volkswagen AG  
Andrea Upmann, Ford-Werke GmbH  
Peer-Oliver Wagner, BMW Group  
Professor Engelbert Westkämper,  
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung  
Dr. Hans-Joachim Wirsching, Human Solutions GmbH  
Professor Gert Zülch, Karlsruher Institut für Technologie

Den Ergebnissen sind wir verpflichtet: Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin wird die Thematik in künftigen Forschungs- und Entwicklungsprojekten weiter vorantreiben.

Dr. Lars Adolph  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin  
Wissenschaftlicher Leiter des Fachbereichs „Produkte und Arbeitssysteme“

# Digitale Ergonomie 2025

## Kurzreferat

Sichere, gesunde und wettbewerbsfähige Arbeit zeichnet sich durch ergonomisch gestaltete sozio-technische Arbeitsprozesse unter Anwendung gebrauchstauglicher Arbeitsmittel aus. Dabei gilt grundsätzlich: Je früher Gestaltungsdefizite erkannt werden, desto kostengünstiger ist eine Behebung. Hier bieten sich insbesondere rechnergestützte Methoden der Ergonomie an. Einen wesentlichen Schwerpunkt bilden in diesem Zusammenhang die digitalen Menschmodelle. In einem weit verbreiteten Einsatz ebendieser sowie weiterer rechnergestützter Modelle und Methoden der Ergonomie ist ein großes Potential zur Gestaltung ergonomischer Produkte und sozio-technischer Arbeitssysteme zu sehen.

Ziel der vorliegenden Studie der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin ist die Vorstellung kurz-, mittel- und langfristiger Trends und Strategien zur Gestaltung gebrauchstauglicher Produkte und sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger sozio-technischer Arbeitssysteme. Hierzu erfolgte eine internetbasierte, dreistufige Befragung von 60 ausgewiesenen Experten<sup>2</sup> entsprechend des Delphi-Ansatzes im Zeitraum November 2011 bis Mai 2012. Dabei wurde die Expertengruppe zunächst um die Beantwortung von neun Leitfragen gebeten. Für die folgenden Befragungsrunden wurden aus den 886 erhaltenen Aussagen des ersten Durchgangs 26 Thesen zur Digitalen Ergonomie erarbeitet und von den Experten hinsichtlich ihrer Bedeutung und des wahrscheinlichsten Eintrittszeitraums in zwei weiteren Befragungen bewertet. In den drei Runden lag die Rückmeldungsquote durchgängig bei ca. 55 %.

Auf Basis der finalen Ergebnisse wurde eine Gruppierung der identifizierten Trends in sieben Kategorien vorgenommen:

- Wichtiger Trend bis 2015,
- wichtige Trends zwischen 2015 und 2020,
- wichtige Trends zwischen 2020 und 2025,
- tendenzielle Trends zwischen 2020 und 2025,
- wichtige Trends nach 2025,
- wichtige Trends mit geringer Realisierungswahrscheinlichkeit sowie
- unwichtige Trends mit geringer Realisierungswahrscheinlichkeit.

Ebenso wurden Vor- und Nachteile sowie Anforderungen kleiner und mittlerer Unternehmen an Werkzeuge der digitalen Ergonomie erfragt und ausgewertet.

Die vorliegenden Ergebnisse der Delphi-Studie stellen somit ein detailliertes, expertenbasiertes Zukunftsradar der Digitalen Ergonomie bis zum Jahr 2025 dar.

## Schlagwörter:

Digitale Ergonomie, Virtuelle Ergonomie, Digitale Menschmodelle, Delphi-Studie, Zukunftsforschung

---

<sup>2</sup> Zur Förderung einer besseren Lesbarkeit wird im Folgenden auf eine geschlechterspezifische Unterscheidung verzichtet.



# Digital Ergonomics 2025

## Abstract

Research on how to support product and production design processes by virtual ergonomic tools is one of the scientific focal points within the interdisciplinary field of ergonomics. Digital human models are an important aspect within this research context. Assuring a widespread use of these and other computer-aided ergonomic tools gives great potential for increasing product usability and designing safe, healthy and competitive work systems: The identification and redesign processes for dangerous or unhealthy product design and work system parameters can be moved into early product and production process design phases.

In order to analyze specific future technological and organizational trends, an expert- and web-based, three-round Delphi survey on Digital Ergonomics was carried out from November 2011 till May 2012. A panel of 60 German experts was asked to give up to five answers to nine lead questions in a first round. 26 statements were then written down resulting from a qualitative data analysis of the received 886 answers. Each statement had to be evaluated according to its impact as well as its most probable date of occurrence in the second round. In the last round the results of the second run were presented to the experts according to the Delphi method and they were asked to assess the statements once again. During the whole Delphi survey the response rate was about 55 %.

Based on the final results a ranking was built and the trends were grouped in seven categories:

- Important and state-of-the-art before 2015
- Important and state-of-the-art between 2015 and 2020
- Important and state-of-the-art between 2020 and 2025
- Fuzzy and state-of-the-art between 2020 and 2025
- Important and state-of-the-art post 2025
- Important but probably never going to happen
- Not important and probably never going to happen

Furthermore, named advantages and disadvantages of as well as requirements of small and medium sized enterprises towards computer-aided ergonomic tools such as digital human modeling are presented.

The results of the Delphi survey provide a detailed, expert-based roadmap on trends in computer-aided ergonomics till the year 2025.

## Key words:

Digital ergonomics, virtual ergonomics, digital human modeling, delphi survey, future study

# 1 Einleitung

Ergonomische Arbeitsprozesse und gebrauchstaugliche Arbeitsmittel bilden die Basis sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeit. Hier können rechnergestützte Tools der Ergonomie einen wesentlichen Beitrag zur Gestaltung ebendieser leisten: Mithilfe einer frühzeitigen virtuellen ergonomischen Absicherung durch eine Evaluation verschiedener Alternativen können Gestaltungsdefizite gezielt vermindert und die Qualität des Planungsergebnisses nachhaltig erhöht werden. Es stellt sich die Frage, welche künftigen bedeutsamen Entwicklungen in diesem Bereich der Arbeitswissenschaft durch neue Konzepte und/oder Technologien zu erwarten sind.

Der vorliegende Bericht dokumentiert Grundlagen, Studiendesign und Ergebnisse einer Expertenbefragung, die als Zukunftsradar mit kurz-, mittel- und langfristigen Entwicklungen im Bereich der Digitalen Ergonomie bis zum Jahr 2025 zu verstehen sind.

Im Folgenden werden zunächst die Grundlagen Digitaler Ergonomie vorgestellt. Hier wird insbesondere die für das Projekt zugrunde gelegte Definition gegeben. Aktuelle Möglichkeiten rechnergestützter Ergonomiewerkzeuge werden mit ihrem Bezug zur Produkt- beziehungsweise Prozessergonomie vorgestellt.

Eine Vorstellung des gewählten Delphi-Ansatzes als Basis für das Studiendesign schließt sich an. Es erfolgt die kurze Darstellung der allgemeinen Grundlagen und der resultierenden Anforderungen an die Befragung.

Aufbauend hierauf wird das ausgearbeitete Design der Studie detailliert vorgestellt. Dabei wird auf den Studienablauf, die Vorgehensweise bei der Zusammenstellung der Expertengruppe und auf die Gestaltung der einzelnen Fragebögen für die drei Runden sowie die technische Umsetzung eingegangen.

In Kapitel fünf erfolgt abschließend die Vorstellung der Ergebnisse der Delphi-Studie. Zunächst werden hierzu teilweise die Einzelergebnisse der ersten und zweiten Runde dargestellt, da diese die Grundlage der Interpretation der finalen Ergebnisse der dritten Runde bilden. Ein unkommentierter Vergleich der Ergebnisse der zweiten und dritten Runde, welcher das sich zu einem Konsens ändernde Antwortverhalten der Experten, wie durch den Delphi-Ansatz angestrebt, vorstellt, ist im Anhang dargestellt.

Abschließend erfolgen die Zusammenstellung der wesentlichen Ergebnisse und ein Ausblick auf künftige Aktivitäten der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin im Themenfeld der Digitalen Ergonomie auf Basis der Studienergebnisse.

## 2 Grundlagen Digitaler Ergonomie

Die Basis der rechnergestützten Ergonomie bilden die Erkenntnisse und Konzepte der klassischen Ergonomie beziehungsweise Arbeitswissenschaft. Eine weltweit akzeptierte Definition der Ergonomie ist in diesem Kontext die der International Ergonomics Association (IEA):

*“Ergonomics (or human factors) is the scientific discipline concerned with the understanding of the interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theoretical principles, data and methods to design in order to optimize human well being and overall system performance.”<sup>3</sup>*

Eine ebenfalls weit verbreitete, ähnliche Definition findet sich in DIN EN ISO 6385:2004. Für die folgende Studie wurde die folgende Definition für die Digitale Ergonomie in Anlehnung an die Definitionen der Digitalen Fabrik (vergleiche VDI Richtlinie 4499, Blatt 1), der virtuellen Produktion sowie der Ergonomie (vergleiche die genannte DIN EN ISO 6385:2004) für die Studie zugrunde gelegt:

*Die Digitale Ergonomie ist ein Oberbegriff für digitale Modelle und Methoden zur Planung, Realisierung und laufenden Verbesserung von Produkten und sozio-technischer Arbeitssysteme. Dabei gilt der Mensch als Hauptfaktor und integraler Bestandteil des gebrauchstauglich bzw. sicher, gesund und wettbewerbsfähig zu gestaltenden Produktes oder Systems.*

Eine weitere, ähnliche Definition liegt dem Ergotyping®, einem Kunstwort aus Ergonomie und Prototyping, eingeführt durch die Professur Arbeitswissenschaft der TU Dresden, zugrunde<sup>4</sup>. Einen wesentlichen Schwerpunkt innerhalb rechnergestützter Tools der Ergonomie bilden sogenannte digitale Menschmodelle. Diese können beschrieben werden als

*„Softwaresysteme [...] die modellhaft Eigenschaften und Fähigkeiten des menschlichen Organismus oder Elemente davon abbilden und zur Nutzung bereitstellen. Durch Anwendung dieser Systeme [...] können Erkenntnisse in den Bereichen Arbeitswissenschaft, Kognition, Medizin, Biometrik und weiteren gewonnen werden“ (Mühlstedt 2012, S. 26).*

In einem weit verbreiteten Einsatz dieser Systeme sowie weiterer rechnergestützter Tools der Ergonomie ist ein großes Potential zur Gestaltung gebrauchstauglicher Arbeitsmittel wie auch sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeitprozesse beispielsweise vor dem Hintergrund des demographischen Wandels zu sehen.

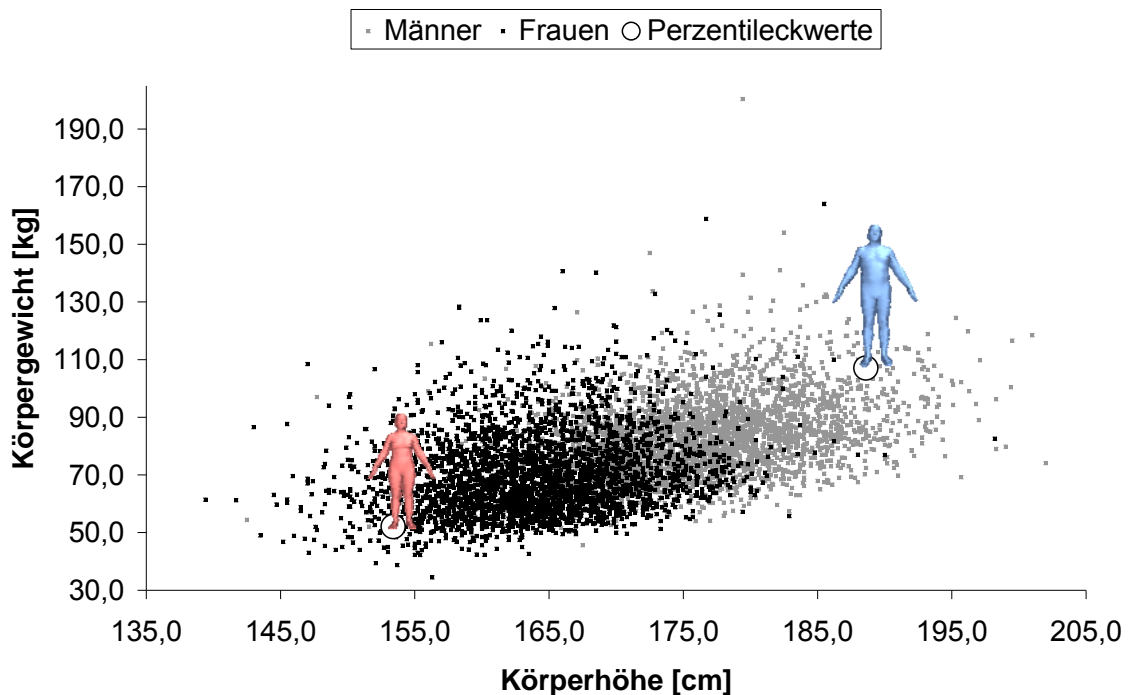
Die Digitale Ergonomie leistet einen wichtigen Beitrag zum präventiven Arbeitsschutz, das heißt zur Erkennung und Lösung gefährlicher beziehungsweise gesund-

<sup>3</sup> [http://www.iea.cc/01\\_what/What%20is%20Ergonomics.html](http://www.iea.cc/01_what/What%20is%20Ergonomics.html), abgerufen am 14.02.2013

<sup>4</sup> <http://www.ergotyping.de>, abgerufen am 14.02.2013

heitsgefährdender Arbeitsmittel und Arbeitsprozesse bereits im Planungsprozess. Sie ermöglicht beispielsweise die virtuelle, gegebenenfalls dreidimensionale Simulation von Mensch-Technik-Interaktionen.

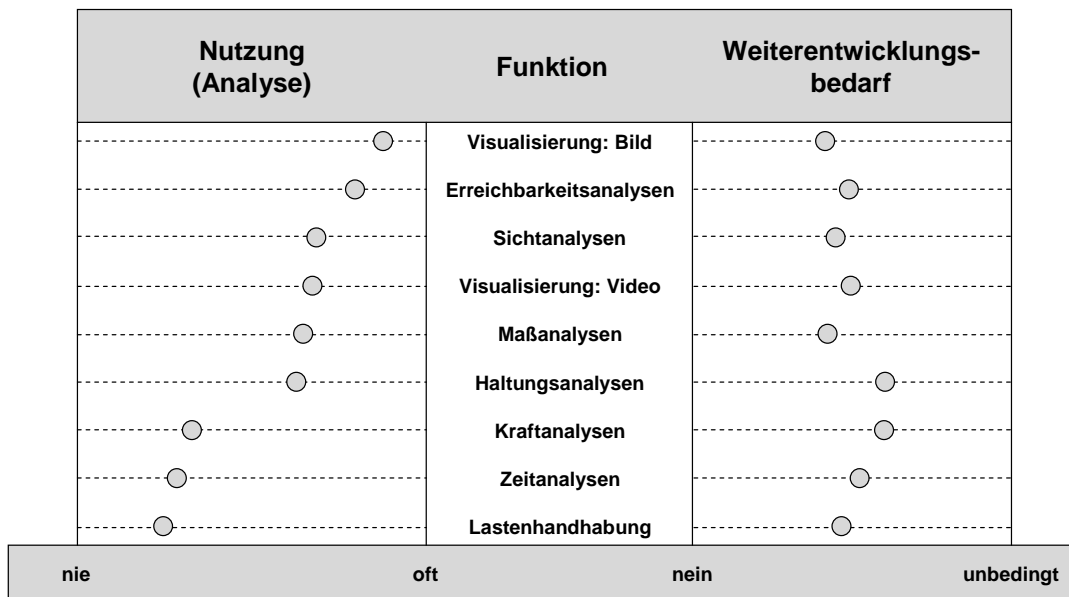
In diesem Zusammenhang erfolgt mittels digitaler Menschmodelle eine virtuelle Abbildung der Varianz von Zielpopulationen im Rahmen der Produkt- und Prozessgestaltung. Abbildung 2.1 zeigt die durch die Varianzvielfalt bedingte Komplexität menschlicher Körpermaße für die deutsche Bevölkerung aus dem Jahr 1998, erhoben durch das Robert Koch Institut (RKI, 1998), anhand der Körperhöhe und des Körpergewichtes sowie die digitalen Repräsentanten des 5. Perzentils Frau (das heißt lediglich 5 % der Frauen sind kleiner) und des 95. Perzentils Mann (das heißt lediglich 5 % der Männer sind größer). Werden Arbeitsmittel und -prozesse mittels dieser Perzentil-Modelle ausgelegt, so ist in der Regel von einer 90-prozentigen Abdeckung der Zielpopulation zum Zeitpunkt der Datenerhebung hinsichtlich der gewählten Maße auszugehen. Die kontextorientierte, multivariate Berücksichtigung menschlicher Körpermaße stellt einen wesentlichen Vorteil digitaler Menschmodelle dar.



**Abb. 2.1** Menschmodelle auf Basis der 5. beziehungsweise 95. Perzentilwerte für Körperhöhe und -gewicht<sup>5</sup> (Wischniewski, 2013)

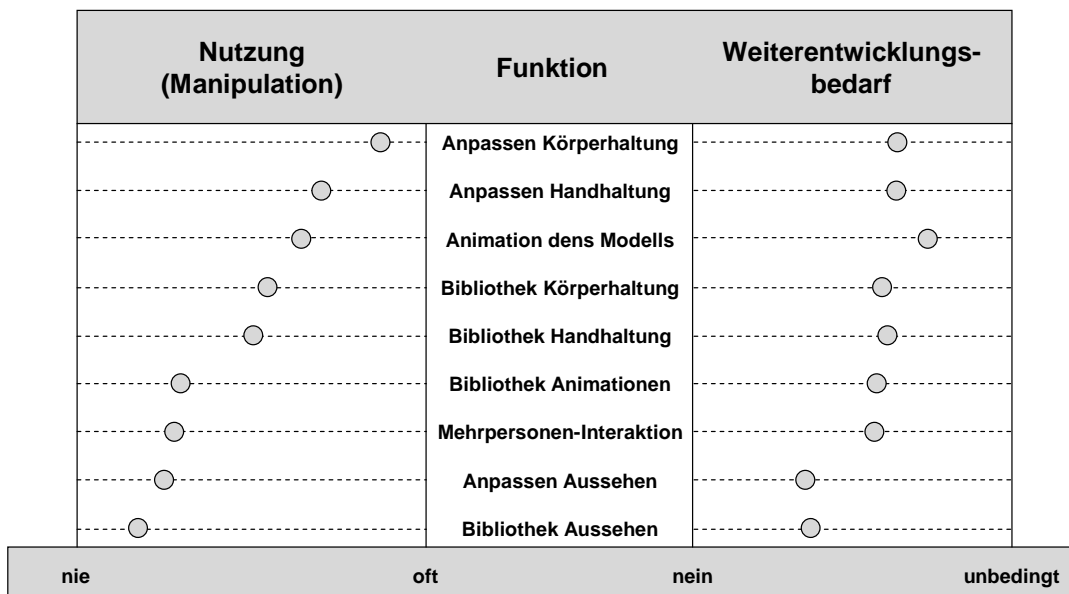
Eine Übersicht der mit digitalen Menschmodellen durchgeführten virtuellen Analysen wurde im Jahr 2009 durch die Professur Arbeitswissenschaft der TU Chemnitz im Rahmen einer empirischen Studie untersucht und veröffentlicht: Dabei erfolgte zunächst die Abfrage aktuell genutzter Analysefunktionen digitaler Menschmodelle und die Erfassung des Interesses an einer Weiterentwicklung ebendieser (vergleiche Abbildung 2.2).

<sup>5</sup> Menschmodelle erzeugt mit [www.bodyvisualizer.com](http://www.bodyvisualizer.com) (vergleiche auch Hirshberg et al., 2011)



**Abb. 2.2** Nutzung der Analysefunktionen digitaler Menschmodelle und Interesse an deren Weiterentwicklung (qualitative Darstellung nach Mühlstedt und Spanner-Ulmer, 2009)

Da zur kontextspezifischen Anwendung der Analysefunktionen spezifische Manipulationsfunktionen innerhalb des Softwaresystems erforderlich sind, erfolgte zugleich die Erhebung aktuell genutzter Manipulationsfunktionen sowie des Bedarfs zur Weiterentwicklung (Abbildung 2.3).



**Abb. 2.3** Nutzung der Manipulationsfunktionen digitaler Menschmodelle und Interesse an deren Weiterentwicklung (qualitative Darstellung nach Mühlstedt und Spanner-Ulmer, 2009)

Die vorliegende Delphi-Studie der BAuA ergänzt diese überwiegend funktionsorientierten Ergebnisse der TU Chemnitz um künftige Einsatzszenarien und -bedingungen für digitale Ergonomietools sowie wahrscheinliche Realisierungshorizonte ebendieser.

Dabei sind hinsichtlich der Anwendung rechnergestützter Ergonomie grundsätzlich zwei verschiedene Einsatzbereiche in Unternehmen zu unterscheiden: Die virtuelle Produktplanung in der Konstruktion („product engineering“) und die virtuelle Prozessplanung („manufacturing engineering“). Zusammengefasst unter dem Begriff der Produktentstehung beziehungsweise -erstellung erfolgt zunächst die Produktplanung, das heißt Entwicklung und Konstruktion, mit den Phasen Konzept, Entwurf und Ausarbeitung (Ehrlenspiel 2009, S. 158). Ziel rechnergestützter Ergonomietools in dieser Planungsphase ist die frühzeitige Berücksichtigung ergonomischer Anforderungen, welche zum Teil aus gesetzlichen Auflagen (beispielsweise Maschinenrichtlinie 2006/42/EG – Anhang I, Abschnitt 1.1.6) und ebenso aus dem Wunsch, ein für die Zielpopulation passendes Produkt zu entwickeln, resultieren. Digitale Menschmodelle können hier helfen, normative Auflagen bereits virtuell zu prüfen (vergleiche beispielsweise Hoske et al., 2010).

Aufbauend auf dem gestalteten, zu fertigenden Produkt erfolgt anschließend die Prozessplanung mit der Fertigungs- und Montagevorbereitung beziehungsweise der Produktionsentwicklung (Ehrlenspiel 2009, S. 158). Innerhalb dieser Phase gilt es analog, gesetzliche Auflagen möglichst frühzeitig bei der Gestaltung der Arbeitssysteme (beispielsweise Arbeitsstättenrichtlinie, Lastenhandhabungsverordnung) zu berücksichtigen. Auch hier können rechnergestützte Tools der Ergonomie helfen, die Berücksichtigung bestehender Anforderungen bereits virtuell zu prüfen.

Trotz unterschiedlicher Unternehmensbereiche, in denen digitale Menschmodelle als ein Beispiel rechnergestützter Ergonomietools zum Einsatz kommen können, sind die genutzten Funktionen ähnlich und unterscheiden sich gegebenenfalls hinsichtlich ihres Anwendungsumfangs: In der Produktentwicklung geht es bei der Humansimulation vorwiegend um die Analyse der antizipierten Nutzung und der daraus resultierenden Interaktion mit der zu konstruierenden Maschine. Bei der Prozessplanung stehen die Arbeitsabläufe im Vordergrund. Diese können die Bedienung mehrerer Maschinen beinhalten. Auch erfolgt hier eine Auslegung anhand konkreter Produktionsszenarien.

Für die Studie wurde daher die Möglichkeit gegeben eine Differenzierung in digitale Produkt- oder Prozessplanung vorzunehmen, sofern dies von den Experten als erforderlich angesehen wurde.

### 3 Delphi-Methode

Ziel dieser Studie ist die Identifikation künftiger Trends der Digitalen Ergonomie und ihrer Bedeutung. Für die vorliegende Form der Zukunftsforschung wurde die Delphi-Methode als eine Methode der Technikvorausschau ausgewählt, da sich diese grundsätzlich gut zur „Ermittlung und Qualifikation der Ansichten einer Experten-Gruppe über einen diffusen Sachverhalt“ eignet und so ein häufig eingesetztes Werkzeug beispielsweise im Rahmen der in Deutschland durchgeführten Zukunftsforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung hinsichtlich wissenschaftlicher und technologischer Entwicklungen darstellt (Häder 2009, S. 33 f.). Weitere Beispiele für Delphi-Studien zur Zukunftsforschung sind

- das Technologie-Delphi Austria (Aichholzer, 2002),
- die BIBB-Studie zur Identifizierung zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsaufgaben in der beruflichen Bildung (Brosi et al., 1999),
- die internationale Delphi-Studie 2030 „Zukunft und Zukunftsfähigkeit der Informations- und Kommunikationstechnologien und Medien“ (Münchner Kreis et al., 2009) oder die
- die Studie „Zukunftsbranche der Logistik-Dienstleistungsbranche in Deutschland 2025“ (Gracht et al., 2008).

Die Delphi-Methode hat ihren historischen Ursprung Mitte des 20. Jahrhunderts. Sie wurde mit dem Ziel entwickelt, möglichst verlässliche Zukunftsprognosen zu erarbeiten. Ziel des Ansatzes ist, in einem relativ stark strukturierten, nach Möglichkeit anonymen Gruppenkommunikationsprozess unvollständiges Wissen durch Experten in mehreren Runden zu bewerten. Dabei handelt es sich vorwiegend um Urteilsprozesse unter Unsicherheit (Häder & Häder 1995, S. 12). Um diese Unsicherheit weitestgehend zu verringern, erfolgt nach jeder Runde eine Rückmeldung der Ergebnisse der vorausgegangenen Runde, das heißt die Experten urteilen anschließend beeinflusst durch die Meinung von Fachkollegen. Dabei hat sich gezeigt, dass nach der zweiten Runde zur Thesenbewertung sich die Ergebnisse nur noch sehr geringfügig verändern (Cuhls 2009, S. 208 f.). Die anzustrebende Anonymität soll verhindern, dass Befragte untereinander normative Einflüsse ausüben (Cuhls 1998, S. 35). Eine heutige Möglichkeit, Effizienz und Anonymität sicherzustellen, sind internetbasierte Erhebungen.

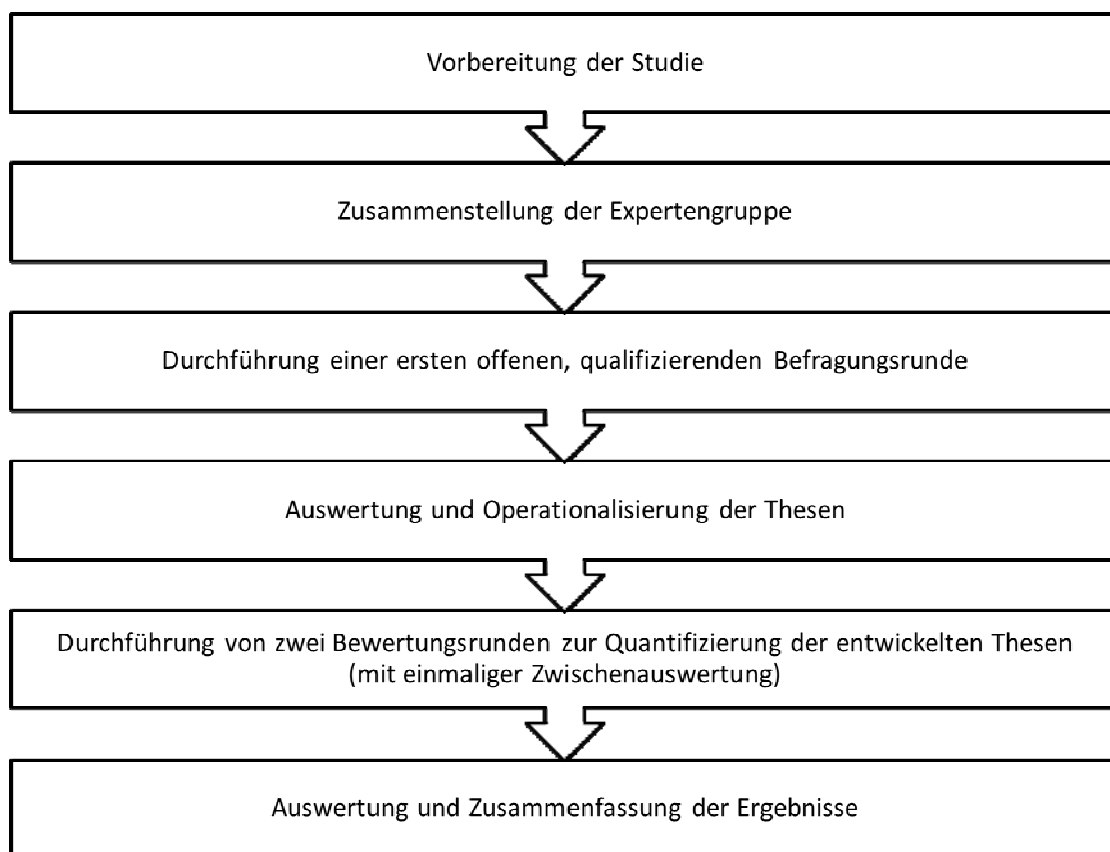
Innerhalb der Delphi-Methode sind grundsätzlich vier Typen zu unterscheiden (Häder 2009, S. 36):

- Typ I verfolgt die ausschließliche Aggregation von Ideen und stellt damit einen rein qualitativen Ansatz dar.
- Typ II hat die Bestimmung eines Sachverhaltes zum Ziel und erweitert damit den genannten Typ I um qualitative Aspekte.
- Typ III verfolgt die Ermittlung von Sachverhalten und umfasst gegenüber Typ II einen höheren quantitativen Anteil.
- Typ IV mit seinem nahezu ausschließlichen quantitativen Fokus zielt auf eine Konsensbildung unter den Experten.

Die vorliegende Studie stellt eine Befragung des Typs III dar, welcher konkret dadurch charakterisiert ist, dass er mit dem Ziel einer Ermittlung und Qualifikation der Ansichten von Experten und damit einer aufbereiteten Gruppenmeinung

- eine Kombination aus qualitativen und quantitativen Vorgehen zulässt,
- die möglichst genaue Festlegung des zu bearbeitenden Sachverhaltes erfordert,
- das Stellen offener und geschlossener Fragen ermöglicht,
- die bewusste Auswahl von Experten vorsieht sowie
- eine qualifizierende Runde zur Operationalisierung der Fragestellungen erlaubt (Häder 2009, S. 36).

Zur konkreten Ausarbeitung der Studie sind dafür die in Abbildung 3.1 aufgezeigten Arbeitsschritte sequentiell durchzuführen: Dabei erfolgt die Ausgestaltung der Studie als internetbasierte Befragung mit einer qualifizierenden und zwei bewertenden Befragungsrunden. Dies stellt zum einen die Anonymität der Experten untereinander und zum anderen die Effizienz der Befragung hinsichtlich Datenerhebung und Datenqualität als Ergebnis der Anzahl der Befragungsrunden sicher.



**Abb. 3.1** Vorgehensweise zur Durchführung der Delphi-Studie

Für eine umfangreiche Beschreibung zur Gestaltung von Delphi-Befragungen, wissenschaftstheoretischen Grundlagen sowie Abgrenzung zu weiteren Ansätzen der Technikvorausschau sei an dieser Stelle auf Häder (2009) und Cuhls (1998) verwiesen.



## 4 Studiendesign

Im Folgenden werden der Studienablauf, die Vorgehensweise bei der Zusammenstellung der Expertengruppe, die Fragebogengestaltung sowie die technische Umsetzung als Internetbefragung vorgestellt.

### 4.1 Studienablauf

Für den Ablauf der Delphi-Studie wurde ein dreistufiger Befragungsansatz gewählt: Zunächst wurden in einer ersten Runde leitfragengestützt Erwartungen der Experten erhoben. Hieraus aufbauend wurden Thesen gebildet, die in einer zweiten Befragungsrunde hinsichtlich ihrer Bedeutung und ihres wahrscheinlichen Eintrittszeitraums zu bewerten waren. In einer dritten und abschließenden Befragung wurde eine erneute Einschätzung erbeten, diesmal mit den visualisierten Ergebnissen der zweiten Runde als begleitende Information.

Für die Befragung wurden jeweils vierwöchige Zeiträume gewählt, die zum einen möglichst nicht zeitlich mit den Schulferien kollidierten und zum anderen hinreichenden Abstand zueinander aufwiesen, um eine Auswertung und Ergebnisaufbereitung für die nächste Runde zu ermöglichen. Die Befragung erfolgt in den folgenden drei Zeiträumen:

- 1. Befragung vom 22.11.2011 bis 18.12.2011
- 2. Befragung vom 20.02.2012 bis 18.03.2012
- 3. Befragung vom 16.04.2012 bis 13.05.2012

Auf Wunsch bestand für die Experten die Möglichkeit, losgelöst vom webbasierten Fragebogen (vergleiche Kapitel 4.4) an der Befragung offline mittels elektronischen Dokumenten teilzunehmen. Vereinzelt erfolgte auf diesem Weg eine Übermittlung außerhalb des Befragungszeitraums, aber mit großer zeitlicher Nähe zu diesem, so dass diese Angaben dennoch berücksichtigt werden konnten.

### 4.2 Zusammenstellung der Expertengruppe

Die Zusammenstellung der deutschsprachigen Expertengruppe erfolgte initial unterstützt durch die Vermittlung von Kontakten durch den Projektbeirat sowie durch eine gezielte Internetrecherche. Die Experten, die für eine Teilnahme gewonnen werden konnten, hatten in der Folge die Möglichkeit, Empfehlungen für weitere Fachpersonen auszusprechen. Durch diese Vorgehensweise konnte eine heterogene Expertengruppe mit Teilnehmern aus der Wissenschaft, der Wirtschaft (unterschieden in Anwender und Anbieter) sowie Verbänden und sonstigen Institutionen zusammengestellt werden (vergleiche Tabelle 4.1), um auch gegebenenfalls differierende Interessen zu erfassen. Bezüglich der Teilnehmer der Wirtschaft aus kleinen und mittleren (kmU) sowie Großunternehmen zeigte sich, dass auf Anwenderseite vorwiegend Experten bei Großunternehmen zu finden waren, auf Anbieterseite aber Experten aus beiden Unternehmensgrößen präsent waren.

**Tab. 4.1** Expertengruppe der Delphi-Studie

Wissenschaft	18
Wirtschaft (Anwender)	24
Wirtschaft (Anbieter)	12
Verbände und weitere Institutionen	6

### 4.3 Fragebogengestaltung

Für die Delphi-Befragung wurden drei Fragebögen gestaltet, welche im Folgenden detailliert vorgestellt werden.

#### 4.3.1 Fragebogen der ersten Runde

Zu Beginn der ersten Runde erfolgte die Erhebung verschiedener personenbezogener Daten der Mitglieder der Expertengruppe zu ihrem Tätigkeitsbereich (Softwareanwender/-entwickler, Verbandsmitglied etc.), zur Unternehmensgröße (kmU/Großunternehmen), zur Selbsteinschätzung ihres Fachwissens im Bereich der rechnergestützten Produkt- bzw. Prozessergonomie sowie zur Berufserfahrung in diesem Themenfeld. Die Angaben wurden auf freiwilliger Basis erhoben.

Im zweiten Teil des Fragebogens erfolgte die Erfassung von Antworten auf neun Leitfragen. Dafür wurden politisch, ökonomisch, sozial wie auch technisch orientierte Fragestellungen ausgearbeitet. Für jede Frage bestand die Möglichkeit, bis zu fünf Antworten zu verfassen. Dabei wurde erbeten, diese so allgemein wie möglich, aber auch so konkret wie nötig zu halten und soweit erforderlich in kmU/Großunternehmen (Fragen 4 bis 8) sowie in Produkt- und Prozessergonomiebezug zu differenzieren (Fragen 2 bis 6 sowie Frage 8). Es bestand keine Antwortpflicht. Im Einzelnen wurden die folgenden Fragen gestellt:

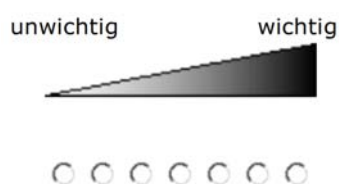
1. *Welche gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und politischen Einflüsse erwarten Sie, die Anforderungen an digitale Ergonomiemodelle, -methoden und -werkzeuge stellen werden?*
2. *Wie werden sich digitale Ergonomiemodelle, -methoden und -werkzeuge bezüglich ihrer Funktionen bzw. Analysemöglichkeiten weiterentwickeln?*
3. *Welche neuen technologischen Entwicklungen erwarten Sie bezüglich der Nutzung bzw. Bedienung digitaler Ergonomiemodelle, -methoden und -werkzeuge?*
4. *Worin sehen Sie die wesentlichen Vorteile digitaler Ergonomiemodelle, -methoden und -werkzeuge?*
5. *Was sind zentrale Hemmnisse beim Einsatz bzw. Defizite digitaler Ergonomiemodelle, -methoden und -werkzeuge?*

6. *Welche unternehmensbezogenen Veränderungen erwarten Sie bei der Produkt- bzw. Prozessplanung durch einen verstärkten Einsatz digitaler Ergonomiemodelle, -methoden und -werkzeuge?*
7. *Welche Maßnahmen sind erforderlich, um eine weite Verbreitung digitaler Ergonomiemodelle, -methoden und -werkzeuge zur Gestaltung ergonomischer Arbeitssysteme bis 2025 zu erreichen?*
8. *Wie beurteilen Sie die Situation hinsichtlich des Einsatzes und der Entwicklung digitaler Ergonomiemodelle, -methoden und -werkzeuge in Deutschland im internationalen Vergleich?*
9. *Haben Sie Thesen, die Sie keiner der Leitfragen zuordnen konnten?*

#### 4.3.2 Fragebogen der zweiten Runde

Zu Beginn der zweiten Runde erfolgte zunächst erneut die freiwillige Erhebung der personenbezogenen Daten analog zur ersten Runde. Dabei bestand für die Teilnehmer die Möglichkeit darauf hinzuweisen, dass Sie bereits in der ersten Runde ihre Daten angegeben hatten und auf diese Angaben für die weitere Auswertung zurückgegriffen werden sollte.

Anschließend wurden die Experten gebeten, die Thesen hinsichtlich ihrer Bedeutung und des wahrscheinlichsten Eintrittszeitraums zu bewerten. Diese Thesen wurden auf Basis der Antworten der ersten Befragungsrunde gebildet. Die Bewertung der Bedeutung sollte jeweils auf Basis der in Abbildung 4.1 dargestellten, siebenstufigen, lediglich an den Extrema beschrifteten linearen Skala erfolgen:



**Abb. 4.1** Skala zur Bewertung der Bedeutung

Die Auswahl des wahrscheinlichsten Eintrittszeitraums sollte mithilfe der folgenden Skala bewertet werden:

- bis 2015
- zwischen 2015 und 2020
- zwischen 2020 und 2025
- nach 2025
- Eintreten unwahrscheinlich

Die folgenden Thesen, welche basierend aus den Ergebnissen der ersten Befragungsrunde (vergleiche Kapitel 4.3.1) generiert wurden, waren durch die Experten zu beantworten:

1. *Digitale Ergonomietools ermöglichen die Berücksichtigung anthropometrischer und biomechanischer Varianzen insbesondere vor dem Hintergrund des demographischen Wandels und der sich ändernden Gesellschaft.*
2. *Digitale Ergonomietools ermöglichen eine Simulation der kognitiven Prozesse des Menschen in den zunehmend komplexen sozio-technischen Arbeitssystemen.*
3. *Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit führen Unternehmen nur in Ausnahmesituationen noch Realversuche durch. Alle übrigen Untersuchungen erfolgen mittels digitaler Ergonomietools.*
4. *Die Globalisierung erfordert angepasste Produkte und Produktionsprozesse für die verschiedenen Regionen der Welt. Die prospektive Planung und Validierung ebendieser erfolgt nahezu ausschließlich mit digitalen Tools.*
5. *Die digitale ergonomische Produkt- und Prozessabsicherung stellt einen zentralen Wettbewerbsvorteil dar. Ohne diesen Nachweis ist ein Agieren am Markt nur eingeschränkt möglich.*
6. *Der Staat regelt durch Gesetze und Verordnungen, dass umfassend sowohl für Produkte wie auch Produktionsprozesse digitale Simulationen als Nachweis ihrer Sicherheit erbracht werden müssen.*
7. *Es existieren Datenstandards/Schnittstellen zur Gewährleistung eines Informationsaustausches zwischen verschiedenen digitalen Ergonomietools mit jeweils unterschiedlichen Analyseschwerpunkten sowie mit weiteren Tools der Digitalen Fabrik.*
8. *Es existieren allgemein anerkannte Konzepte zur Validierung, um die Genauigkeit digitaler Ergonomiesimulationen zu klassifizieren.*
9. *Eine verbesserte Gebrauchstauglichkeit digitaler Ergonomietools ermöglicht ihre eingeschränkte Anwendung auch als „Laie“. Detaillierte Analysen erfolgen weiterhin durch Expertinnen und Experten.*

10. *Es sind ganzheitliche Tools verfügbar, welche eine anthropometrische, biomechanische und kognitive Analyse von Produkten und Prozessen ermöglichen.*
11. *Die Integration von „Muskelmodellen“ ermöglicht die virtuelle Ermittlung valider physischer Belastungen. Digitale Ergonomietools ermöglichen somit die Erstellung von Analysen, welche über derzeitige „Screening“-Methoden deutlich hinausgehen.*
12. *Die Dateneingabe bzw. Programmsteuerung erfolgt statt mit klassischen Eingabegeräten im Allgemeinen durch Gesteninteraktion oder weitere Eingabegeräte wie beispielsweise Datenhandschuhe.*
13. *Die digitale Erfassung und Nutzung menschlicher Bewegungsabläufe („Motion Capturing“) stellt ein zentrales Element digitaler Ergonomietools dar.*
14. *Digitale Tools nutzen in großem Umfang die Darstellungsmöglichkeiten der „Augmented oder Virtual Reality“.*
15. *Anstatt, wie heute üblich, Bewegungsabläufe zu definieren, erfolgt lediglich eine Definition der durchzuführenden Aufgabe; hierauf aufbauend erfolgt die automatische Berechnung der Bewegungsabläufe und ihre ergonomische Bewertung.*
16. *Zahlreiche digitale Ergonomietools sind mittels mobiler Endgeräte wie beispielsweise Smartphones nutzbar. Rechnerintensive Simulationen erfolgen zentral und losgelöst von diesen („Cloud Computing“).*
17. *Die Darstellungsqualität virtueller menschlicher Modelle und ihrer Bewegungsabläufe entspricht nahezu der Realität.*
18. *Es existieren valide Abschätzungen, die eine Gegenüberstellung von Kosten (Software, Schulung und Personal) und Nutzen (ergonomische Produkte und Prozesse) und damit eine Wirtschaftlichkeitsrechnung stützen können.*
19. *In der universitären Lehre ist in den relevanten Studienfächern die Digitale Ergonomie fest verankert. Ausgebildete Experten stehen daher ausreichend zur Verfügung und decken den Bedarf.*
20. *Produkt- und Prozessergonomie haben in Unternehmen nahezu den gleichen Stellenwert wie Kosten, Qualität und Liefertreue.*

21. *Mittelständische wie Großunternehmen haben Prozesse zur digitalen Ergonomieabsicherung fest in ihren Ablaufstrukturen verankert und Nutzen diese regelmäßig.*
22. *Die Durchführung digitaler ergonomischer Produkt- oder Prozessanalysen ist überwiegend ausgelagert und erfolgt durch externe Dienstleister.*
23. *In großen wie auch kleinen und mittelständischen Unternehmen werden ergonomische Produkte und Prozesse hoch priorisiert. Es erfolgt eine ausreichende Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen (Budget und Personal).*
24. *Durch regelmäßige nationale und internationale Fachveranstaltungen wird der Übergang von Forschungsergebnissen in marktgängige Softwaresysteme gezielt gefördert.*
25. *Die Modularisierung der digitalen Ergonomietools ermöglicht Unternehmen, für ihren konkreten Anwendungsfall das erforderliche Werkzeug mit dem jeweils relevanten Funktionsumfang zu vertretbaren Kosten auszuwählen und einzusetzen.*
26. *Die Verfügbarkeit anerkannter internationaler Standards für digitale Menschmodelle stellt eine weit verbreitete Akzeptanz sicher.*

Abschließend wurde von der Expertengruppe eine Vervollständigung der folgenden Aussage zur Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in Themenfeld der digitalen Ergonomie erbeten:

*27. Deutschland wird seine mitführende Rolle bei der Entwicklung/Anwendung digitaler Ergonomietools im internationalen Vergleich bis mindestens 2025...*

*... weiter ausbauen.*

*... halten.*

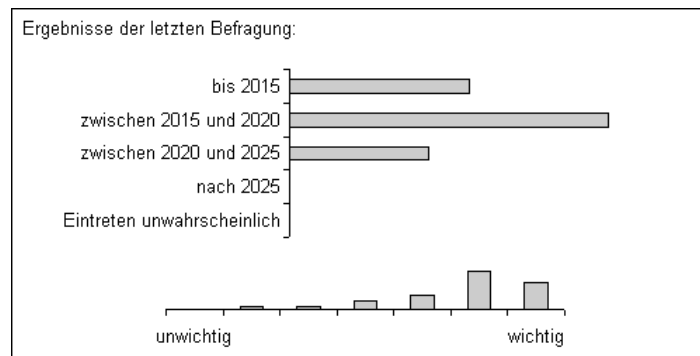
*... abgeben müssen und durch andere Nationen überholt werden.*

Die Angabe einer Einschätzung der jeweiligen These hinsichtlich ihrer Bedeutung und ihres Eintrittszeitraums war zwingend erforderlich, um die nächste Aussage zur Bewertung angezeigt zu bekommen und den Fragebogen letztlich abzuschließen.

#### **4.3.3 Fragebogen der dritten Runde**

Zu Beginn der dritten Runde erfolgte analog zur ersten und zweiten Runde die freiwillige Erhebung der personenbezogenen Daten. Dabei bestand für die Teilnehmer erneut die Möglichkeit darauf hinzuweisen, dass Sie bereits in der ersten bzw. zweiten Runde ihre Daten angegeben hatten und auf diese Angaben für die weitere Auswertung zurückgegriffen werden sollte.

Anschließend wurden die Experten gebeten, die 26 Thesen der zweiten Runde erneut hinsichtlich ihrer Bedeutung und eines wahrscheinlichen Eintrittszeitraums anhand derselben Skalen zu bewerten. Des Weiteren sollte auch die Einschätzung der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands erneut beurteilt werden. In dieser Runde erhielten die Experten gemäß dem Delphi-Ansatz (vergleiche Kapitel 3) eine Visualisierung der Ergebnisse der zweiten Runde zur Unterstützung ihrer erneuten Einschätzung (vergleiche Abbildung 4.2).



**Abb. 4.2** Ergebnisvisualisierung (2. Runde, These 1) im Fragebogen der dritten Runde

Abschließend wurde den Experten die folgende Frage mit der Möglichkeit zur Freitextantwort (Begrenzung auf fünf Antworten) gestellt:

*Haben Sie abschließend noch Anmerkungen zum Einsatz, Weiterentwicklungs- und -verbreitungsbedarf von digitalen Tools für kleine und mittelständische Unternehmen?*

#### 4.4 Technische Umsetzung

Die technische Umsetzung erfolgt mittels der webbasierten Befragungsplattform SoSci Survey. Mithilfe des sogenannten „oFb – der onlineFragebogen“ wurden die drei Befragungsrunden durchgeführt. Dabei kam die Plattform aus den folgenden Gründen zur Anwendung:

- Zahlreiche Fragtypen,
- Einbindung von Bilddateien,
- Zugriffskontrolle für die Durchführung einer mehrstufigen Befragung mittels ausgewählter Experten,
- Freie Gestaltung des Layouts des Fragebogens,
- Freie Programmierung von Filtern,
- Datenexport in gängige Tabellenkalkulations- und Statistikprogramme sowie
- SSL-verschlüsselte Datenübertragung.

Abbildung 4.3 zeigt eine webbasierte Seite des Fragebogens zur Bewertung einer These in der dritten Runde.

21% ausgefüllt

**baua:**  
Bundesanstalt für Arbeitsschutz  
und Arbeitsmedizin

**Digitale Ergonomietools ermöglichen eine Simulation der kognitiven Prozesse des Menschen in den zunehmend komplexen sozio-technischen Arbeitssystemen.**

Ergebnisse der letzten Befragung:

Zeitraum	Wichtigkeit (geschätzt)
bis 2015	1
zwischen 2015 und 2020	4
zwischen 2020 und 2025	5
nach 2025	3
Eintreten unwahrscheinlich	2

Bitte beurteilen Sie den Zeitraum, innerhalb dessen Sie den Eintritt des genannten Sachverhaltes für wahrscheinlich halten:

bis 2015  
 zwischen 2015 und 2020  
 zwischen 2020 und 2025  
 nach 2025  
 Eintreten unwahrscheinlich

unwichtig  wichtig

Bitte beurteilen Sie, wie wichtig das Eintreten des beschriebenen Sachverhaltes ist:

Zurück Weiter

Dr. Sascha Wischniewski, BAuA - 2012

**Abb. 4.3** Webseite des Internetfragebogens der dritten Befragungsrunde (erstellt und durchgeführt mittels <http://www.soscisurvey.de>)

Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte losgelöst von der Internetplattform nach dem Export der Daten mittels eines Programms zur Tabellenkalkulation.

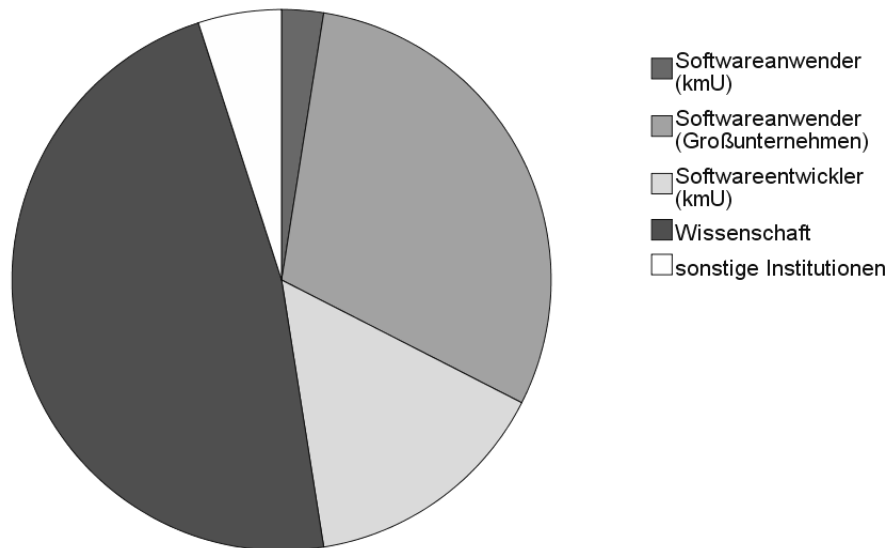


## 5 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der persönlichen Angaben der Experten sowie der einzelnen Rundenergebnisse der durchgeführten Delphi-Befragung vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Ergebnissen der dritten und finalen Runde als zentrales Studienergebnis.

### 5.1 Übersicht der Expertenbeteiligung

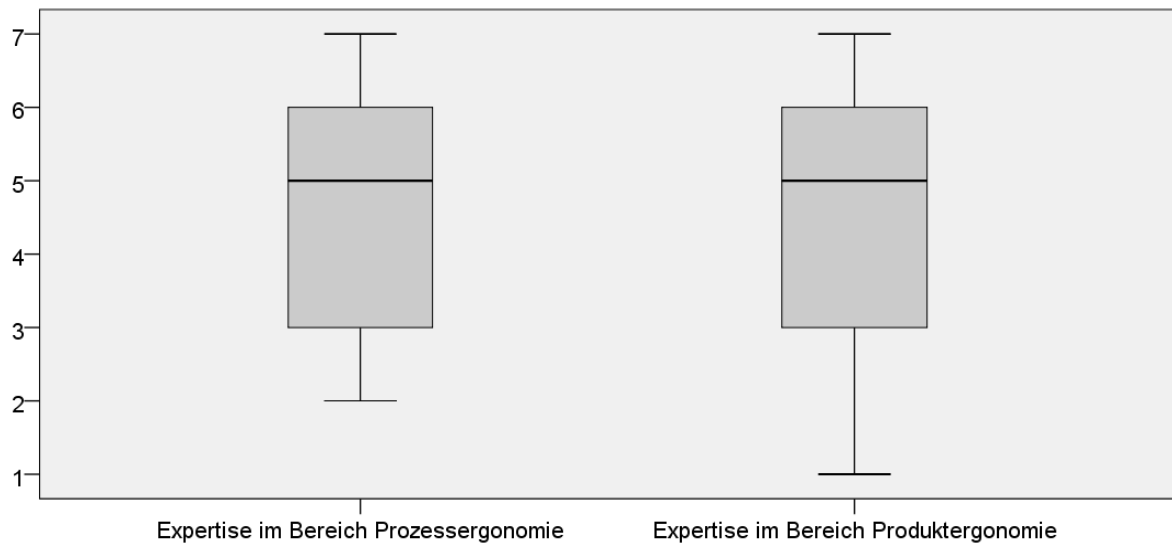
Insgesamt nahmen 44 der einbezogenen 60 Experten an der Befragung teil, davon machten 40 Angaben zu ihrer Person. Abbildung 5.1 stellt die Tätigkeitsbereiche der Experten dar.



**Abb. 5.1** Tätigkeitsbereiche der Experten (n=40)

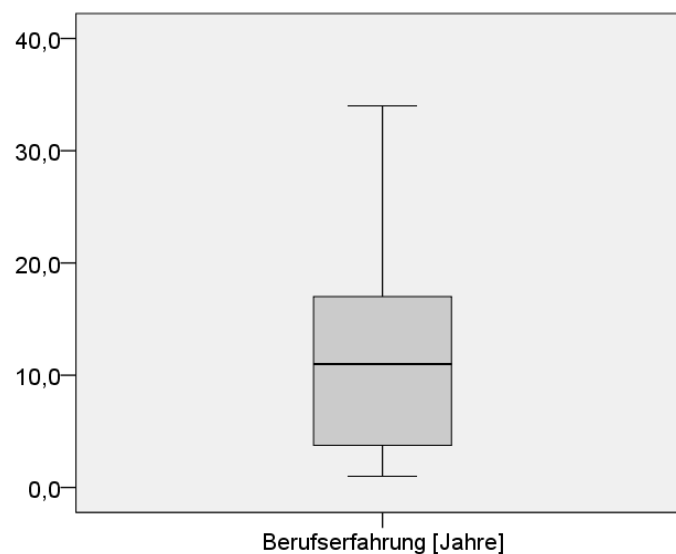
Bei der Betrachtung wird zum einen deutlich, dass sich sowohl Anwender, Anbieter und Teilnehmer aus der Wissenschaft im Rahmen der Studie beteiligt haben. Zum anderen fällt auf, dass der Anwendermarkt von Großunternehmen, der Anbieter von eher kleinen Anbietern neben den bekannten Marktführern in diesem Bereich geprägt ist.

Ergänzend zur Vorstellung der Tätigkeitsbereiche stellt Abbildung 5.2 die Ergebnisse der Selbsteinschätzung der Expertise in den Themenfeldern Produkt- beziehungsweise Prozessergonomie dar. Dabei entspricht der Wert 1 der Einschätzung „gering“ und der Wert 7 der Einschätzung „hoch“. Der Boxplot stellt den Median, das mittlere 50. Perzentil (begrenzt durch das obere beziehungsweise untere Quartil) sowie die jeweiligen Extremwerte der gegebenen Antworten dar.



**Abb. 5.2** Selbsteinschätzung der Expertise durch die Teilnehmer (n=40)

Hier wird deutlich, dass eine Expertengruppe mit umfangreichen Kenntnissen in der Thematik für die Studie gewonnen werden konnte. Dies spiegelt sich des Weiteren in der erhobenen Anzahl der Berufsjahre, in denen sich die Experten mit dem Thema der rechnergestützten Ergonomie befassen, wider (vergleiche Abbildung 5.3).



**Abb. 5.3** Berufserfahrung der Experten im Themengebiet der rechnergestützten Ergonomie (n=40)

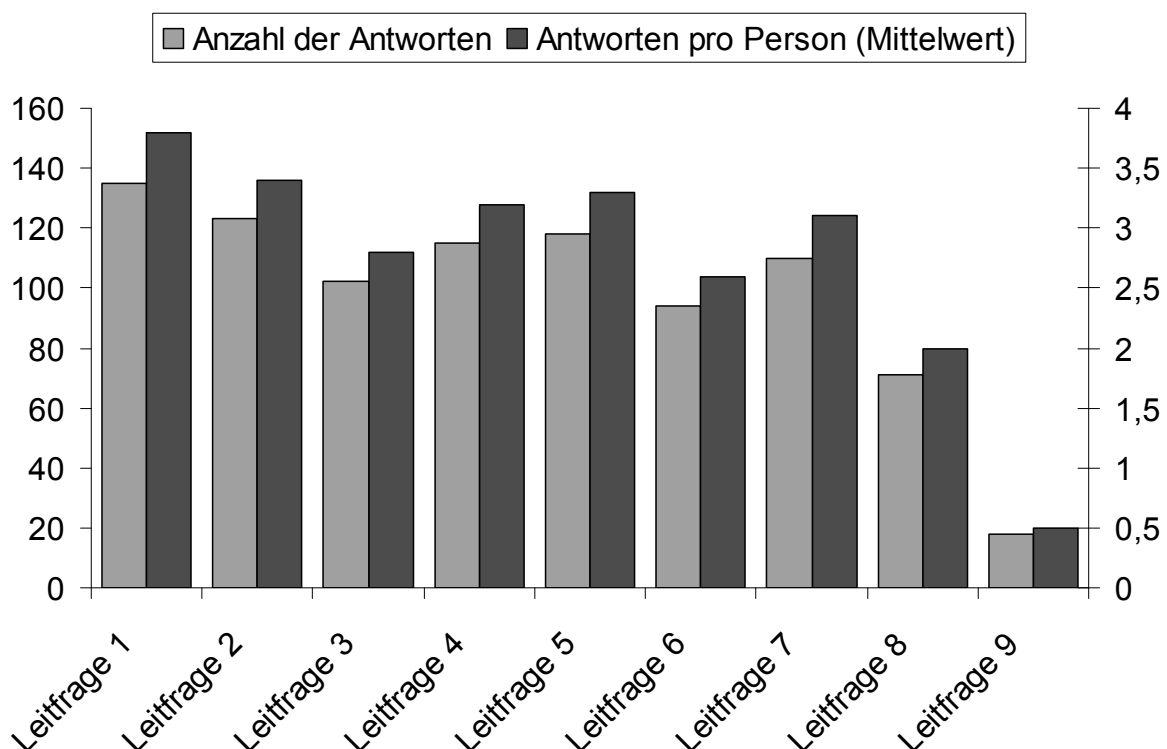
Abschließend zu dieser Charakterisierung der Experten zeigt Tabelle 5.1 das rundenspezifische Teilnahmeverhalten.

**Tab. 5.1** Rundenspezifisches Teilnahmeverhalten der 44 Experten

Rundenteilnahme	Anzahl der Experten
1., 2. & 3. Runde	23
1. & 2. Runde	2
1. & 3. Runde	3
2. & 3. Runde	5
1. Runde	7
2. Runde	2
3. Runde	2

## 5.2 Zwischenergebnisse der 1. Runde

Als Ergebnis der ersten qualifizierenden Befragungsrunde waren 35 zum Teil partiell ausgefüllte Fragebögen zur Auswertung verfügbar. Hieraus konnten nach der Datenbereinigung 886 Antworten für die weitere Studie verwendet werden. Abbildung 5.5 zeigt die Verteilung der Antworten auf die einzelnen Leitfragen sowie das Antwortverhalten der Experten im Durchschnitt.



**Abb. 5.4** Anzahl der Gesamtantworten und der durchschnittlichen Anzahl der Antworten pro Experten je Leitfrage

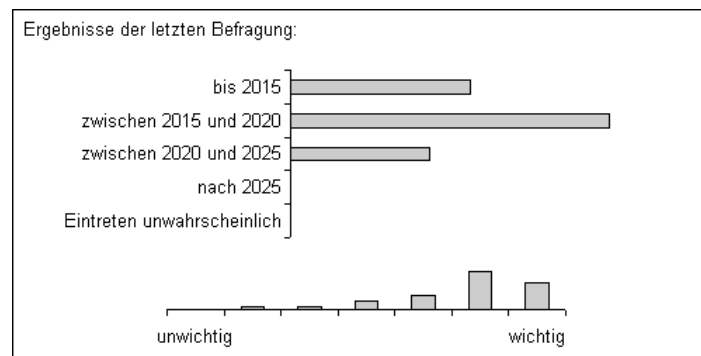
Die Darstellung zeigt eine weitestgehend gleichmäßige Verteilung der Antworten auf die Leitfragen eins bis acht und eine deutlich geringere Antwortanzahl bei Leitfrage

neun. Mit dieser letzten Frage erfolgt die Erhebung von Antworten durch die Experten, die diese nicht durch die anderen acht Leitfragen adressiert sahen. Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die ersten acht Leitfragen den Untersuchungsraum weitestgehend abdeckten und somit davon auszugehen ist, dass sich aus den Antworten der Experten ein möglichst vollständiges Bild künftiger Entwicklungen der Digitalen Ergonomie zeichnen lässt. Diese wurden aufbauend auf den Rückmeldungen dieser Runde in Form von 26 Thesen formuliert. Zusätzlich wurde eine Frage zur künftigen Wettbewerbsfähigkeit ergänzt (vergleiche Kapitel 4.3.1 für die Liste der Fragen).

Im Rahmen der 4. und 5. Leitfrage wurden durch die Experten zahlreiche Vor- und Nachteile digitaler Ergonomietools genannt. Diese sind in Kapitel 5.4 bei den Endergebnissen der Studie aufgeführt.

### 5.3 Zwischenergebnisse der 2. Runde

Für die Auswertung der 2. Befragungsrunde standen 32 vollständig ausgefüllte Fragebögen zur Verfügung. Als Grundlage für die 3. Befragungsrunde wurden die Antworten, wie in Abbildung 5.5 dargestellt, graphisch visualisiert.



**Abb. 5.5** Ergebnisvisualisierung (2. Runde, These 1) im Fragebogen der dritten Runde

Da die Ergebnisse hinsichtlich wahrscheinlichem Eintrittszeitraum und Wichtigkeit lediglich ein Zwischenergebnis darstellen, wird auf eine vollständige Abbildung an dieser Stelle verzichtet. Die gesamten Ergebnisse der 2. Runde sind in Anhang in direkter Gegenüberstellung mit den Ergebnissen der 3. Runde dokumentiert.

### 5.4 Ergebnisse der Studie

Neben den Vor- und Nachteilen digitaler Ergonomietools werden im Folgenden die mit der Delphi-Studie identifizierten künftigen Entwicklungstrends vorgestellt. Grundsätzlich wurde durch die Durchführung der 3. Befragungsrunde der Konsens bei verschiedenen Thesen, wie mit der Delphi-Methode intendiert, gezielt erhöht (siehe Ergebnisvergleich im Anhang).

### 5.4.1 Vorteile digitaler Ergonomietools

Im Rahmen der vierten Leitfrage der ersten Befragungsrunde erfolgt die Erhebung wesentlicher Vorteile digitaler Ergonomietools. Für die folgende Auswertung standen 115 Antworten zur Verfügung. Dabei erfolgt eine Nennung der Antwortschwerpunkte in der Reihenfolge absteigend bezüglich der Anzahl der jeweiligen Nennungen:

Digitale Ergonomietools ermöglichen

- die Realisierung kürzerer Entwicklungs-/beziehungsweise Planungszeiten (beispielsweise durch die Einsparung von erforderlichen Prototypen),
- grundsätzlich eine Erhöhung der Transparenz im Planungsprozess,
- eine frühzeitige Absicherung der Gestaltungslösung (beispielsweise durch eine Humansimulation),
- das Bewerten verschiedener Gestaltungsalternativen,
- die Einsparung von Kosten sowie
- eine gezielte Visualisierung im Planungsprozess.

Zusätzlich wurden vereinzelt die Erhöhung der Probandensicherheit durch das Entfallen von kritischen Untersuchungen sowie die Datenbankfähigkeit der Softwaresysteme und die damit beispielsweise verbundene einfache Generierung von Menschmodellen genannt.

### 5.4.2 Aktuelle Defizite digitaler Ergonomietools

Zur Beantwortung der fünften Leitfrage sollten durch die Experten zentrale Hemmnisse beim Einsatz beziehungsweise Defizite digitaler Ergonomietools genannt werden. Für die folgenden Ergebnisse wurden 118 Antworten ausgewertet. Dabei erfolgt eine Nennung der Antwortschwerpunkte in der Reihenfolge absteigend bezüglich der Anzahl der Nennungen:

Hemmnisse bei der Anwendung und damit Defizite digitaler Ergonomietools resultieren aus

- der hohen Komplexität der Softwaresysteme,
- der zum Teil unklaren Validität,
- dem Fehlen von Standards für digitale Ergonomietools im Allgemeinen sowie für den Datenaustausch im Speziellen,
- den hohen Anschaffungskosten,
- dem hohen Zeitaufwand für die Durchführung virtueller Simulationen sowie
- den hohen Betriebskosten, insbesondere für das erforderliche geschulte Personal.

Vereinzelt wurden des Weiteren die fehlende Möglichkeit zur Integration in die bestehende Softwarelandschaft in Unternehmen sowie die fehlende Akzeptanz dieser Softwaresysteme innerhalb der Unternehmen genannt.

### 5.4.3 Künftige Entwicklungstrends

Im Folgenden sind die einzelnen Thesen zu künftigen Trends der Digitalen Ergonomie bezüglich ihrer Bedeutung und ihres als wahrscheinlich eingestuften Eintrittszeitraumes in sieben Kategorien eingeordnet:

- Wichtiger Trend bis 2015,
- wichtige Trends zwischen 2015 und 2020,
- wichtige Trends zwischen 2020 und 2025,
- tendenzielle Trends zwischen 2020 und 2025,
- wichtige Trends nach 2025,
- wichtige Trends mit geringer Realisierungswahrscheinlichkeit sowie
- unwichtige Trends mit geringer Realisierungswahrscheinlichkeit.

Dafür wird ein Trend als wichtig eingestuft, wenn der Median aller für diesen Trend gegebenen Bewertungen der dritten Runde größer dem Wert 4 ist. Für einen Median gleich dem Wert 4 wird von einem tendenziellen Trend gesprochen und Thesen mit einem Median kleiner 4 werden als unwichtig eingestuft. Die siebenstufige Skala reichte von unwichtig bis wichtig (vergleiche Abbildung 4.1).

Für die Zuordnung des Eintrittszeitraumes wurde ebenfalls der Median herangezogen, auch hier, um den Einfluss von Ausreißern zu verringern. Für die Auswertung standen 31 vollständige und 2 partielle Datensätze zur Verfügung.

Die Reihung der Thesen innerhalb einer Kategorie erfolgt entsprechend der Nummerierung im Fragebogen und beinhaltet hier keine Aussage zu ihrer Bedeutung untereinander.

#### 5.4.3.1 Wichtiger Trend bis 2015

Als einziger bedeutsamer Trend mit zeitnahe Realisierungshorizont wird durch die Expertengruppe die Existenz regelmäßiger nationaler und internationaler Fachveranstaltungen zur Förderung des Übergangs von Forschungsergebnissen in marktgängige Softwaresysteme der Digitalen Ergonomie genannt. In diesem Zusammenhang sind beispielsweise die Symposiumsreihe „Digital Human Modeling“ der International Ergonomic Association, die „International Conference on Applied Digital Human Modeling“, das BAuA-Symposium „Digitale Ergonomie“ oder die Frühjahrskongresse der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft aus dem Zeitraum 2011-2013 zu nennen.

*These 24*

#### 5.4.3.2 Wichtige Trends zwischen 2015 und 2020

Als eine zentrale Entwicklungsrichtung wird die stärkere Berücksichtigung anthropometrischer und biomechanischer Varianz des Menschen gesehen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund des demographischen Wandels und der damit einhergehenden sich ändernden Zusammensetzung der Gesellschaft. Dabei ist zu bemerken, dass eine Berücksichtigung anthropometrischer Varianz bereits mit heutigen Tools möglich ist, jedoch Nachholbedarf bezüglich einer gruppenbezogenen oder gegebenenfalls auch individuumsbezogenen biomechanischen Parametrierung besteht.

*These 1*

Neben der besseren Abdeckung menschlicher Varianz ist gemäß Expertenurteil künftig innerhalb dieses Zeitraumes zu erwarten, dass sich die digitale ergonomische Produkt- und Prozessabsicherung als zentrale Wettbewerbsvorteile entwickeln, ohne die ein Agieren am Markt nur eingeschränkt möglich ist. So ist denkbar, dass Anbieter von technischen Komponenten und/oder sozio-technischen Arbeitssystemen im Rahmen von Bieterwettbewerben sich durch beigefügte, valide virtuelle Absicherungen gegenüber Konkurrenten abgrenzen können.

*These 5*

Dabei wird das Thema der Validität ergonomischer Untersuchungen durch die Experten als eine zwischen 2015 und 2020 zu lösende Aufgabe wahrgenommen. Hier gilt es allgemein anerkannte Konzepte zu entwickeln, welche eine Klassifizierung der Genauigkeit digitaler Ergonomiesimulationen ermöglichen. Somit wird dem Anwender deutlich, welche Zuverlässigkeit die Ergebnisse von Humansimulationen im Zusammenhang mit dem Analyseaufwand beinhalten.

*These 8*

Um den Analyseaufwand künftig zu verringern, sehen die Experten den klaren Bedarf zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit digitaler Ergonomietools, so dass eine eingeschränkte Anwendung auch als „Laie“ möglich wird. Detaillierte Analysen erfolgen weiterhin durch Experten. Dabei beschreibt das Konzept der Gebrauchstauglichkeit (Usability) eine effektive, effiziente und zufriedenstellende Nutzung.

*These 9*

Ein Element, um die Gebrauchstauglichkeit bei der Eingabe/Definition menschlicher Bewegungen gezielt zu erhöhen, ist die digitale Erfassung und anschließende Nutzung menschlicher Bewegungsabläufe („Motion Capturing“). Eine stärkere Anbindung dieser Möglichkeit an bestehende Softwaresysteme wird durch die Experten ebenfalls innerhalb dieses Zeitraumes gesehen.

*These 13*

Als weitere wichtige Elemente für die Interaktion mit digitalen Ergonomietools werden sich die Darstellungsmöglichkeiten der überlagerten beziehungsweise virtuellen Realität gemäß Expertenurteil entwickeln.

*These 14*

Neben der Dateneingabe und der Ergebnisdarstellung digitaler Ergonomietools ist eine bedeutende Entwicklung innerhalb dieses Zeitraums die Verfügbarkeit valider Abschätzungen, die eine Gegenüberstellung von Kosten (Software, Schulung und Personal) und Nutzen (ergonomische Produkte und Prozesse) ermöglichen und damit eine Wirtschaftlichkeitsrechnung stützen können.

*These 18*

Durch die feste Verankerung des Themenkomplexes Digitale Ergonomie in der universitären Lehre in den relevanten Studienfächern ist die Verfügbarkeit ausgebildeter Experten sichergestellt und der erforderliche Bedarf kann gedeckt werden.

*These 19*

Die Modularisierung der am Markt verfügbaren digitalen Ergonomietools ermöglicht Unternehmen, für ihren konkreten Anwendungsfall das erforderliche Werkzeug mit dem jeweils relevanten Funktionsumfang zu vertretbaren Kosten auszuwählen und einzusetzen: „pay per use“.

*These 25*

#### 5.4.3.3 Wichtige Trends zwischen 2020 und 2025

In einem späteren Zeitraum rechnen die Experten mit der Verfügbarkeit digitaler Ergonomietools zur Simulation kognitiver Prozesse des Menschen, um auch hier prospektiv Aussagen über die immer komplexer werdenden sozio-technischen Arbeitssysteme zu treffen.

*These 2*

Aufgrund des geringeren Aufwandes und der damit verbundenen gezielten Sicherung/Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit führen Unternehmen nur in Ausnahmesituationen noch Realversuche durch. Alle übrigen Untersuchungen erfolgen mittels digitaler Ergonomietools.

*These 3*

Aufgrund der globalen Wertschöpfungsketten sind regional angepasste Arbeitsmittel und Arbeitsprozesse für die verschiedenen Regionen der Welt erforderlich. Die prospektive Planung und Validierung ebendieser erfolgt nahezu ausschließlich aufwandsarm mit digitalen Tools.

*These 4*

Als ein weiterer Aspekt globaler Verbreitung digitaler Ergonomietools existieren Datenstandards/Schnittstellen zur Gewährleistung eines verlustarmen Informationsaustausches zwischen verschiedenen Produkten der Digitalen Ergonomie mit ihren jeweils unterschiedlichen Analyseschwerpunkten sowie mit weiteren Tools der Digitalen Fabrik.

*These 7*

Auch werden gemäß Experteneinschätzung Softwaresysteme entwickelt sein, die durch die Integration von „Muskelmodellen“ die virtuelle Ermittlung valider physischer Belastungen ermöglichen. Digitale Ergonomietools ermöglichen somit die Erstellung von Analysen und Ergebnisberichten, welche über derzeitige „Screening“-Methoden deutlich hinausgehen.

*These 11*



Dabei werden innerhalb der Systeme anstatt Bewegungsabläufe wie heute üblich, lediglich eine Definition der durchzuführenden Aufgabe vorgegeben; hierauf aufbauend erfolgen die weitestgehend automatische Berechnung der Bewegungsabläufe und ihre anschließende ergonomische Bewertung, um aufwandsarm Alternativenvergleiche durchzuführen.

*These 15*

Auch wird bis 2025 die Darstellungsqualität virtueller ergonomischer menschlicher Modelle und ihrer Bewegungsabläufe nahezu der Realität entsprechen und auch hierdurch zur Akzeptanz und Verbreitung beitragen.

*These 17*

Um die Möglichkeiten der verfügbaren Softwaresysteme zu nutzen, haben mittelständische sowie Großunternehmen Prozesse zur digitalen Ergonomieabsicherung fest in ihren Ablaufstrukturen verankert und Nutzen diese in der Folge regelmäßig im Rahmen ihrer Produkt- und Prozessentwicklung.

*These 21*

Neben der verbesserten Validität, der verfügbaren Kosten-/Nutzenrechnungen und der verbesserten Darstellungsqualität erhöht die Verfügbarkeit anerkannter internationaler Standards für digitale Menschmodelle weiter ihre Akzeptanz und ihren Verbreitungsgrad.

*These 26*

#### 5.4.3.4 Tendenzielle Trends zwischen 2020 und 2025

Als weniger wichtig, aber immer noch tendenzieller Trend, sehen die Experten innerhalb diese Zeitraums die Dateneingabe beziehungsweise die Programmsteuerung statt mit klassischen Eingabegeräten im Allgemeinen mittels Gesteninteraktion oder weiteren Eingabegeräten, wie beispielsweise Datenhandschuhen.

*These 12*

Auch lediglich tendenziell hinsichtlich der Bedeutung wird die Nutzung zahlreicher digitaler Ergonomietools mittels mobiler Endgeräte, wie beispielsweise „Smartphones“ unter Nutzung rechnerintensiver Simulationen mittels des „Cloud Computing“ angesehen.

*These 16*

#### 5.4.3.5 Wichtige Trends nach 2025

Als visionären und wichtigen Trend stellen die Experten die Entwicklung ganzheitlicher Tools heraus, welche die virtuelle anthropometrische, biomechanische und kognitive Analyse von Arbeitsmitteln und Arbeitprozessen ermöglichen.

*These 10*

#### 5.4.3.6 Wichtige Trends mit geringer Realisierungswahrscheinlichkeit

Ein wichtiger Trend, dem eine geringe Realisierungswahrscheinlichkeit zugeordnet wird, ist die Aufwertung des Stellenwertes der Ergonomie in Unternehmen, so dass Produkt- und Prozessergonomie nahezu den gleichen Stellenwert wie Kosten, Qualität und Liefertreue innehaben.

*These 20*

Als ebenso wichtig, aber genauso unwahrscheinlich, wird angesehen, dass in großen wie auch kleinen und mittelständischen Unternehmen die Gestaltung ergonomischer Produkte und Prozesse hoch priorisiert wird und die erforderlichen Ressourcen (Budget und Personal) bereitgestellt werden.

*These 23*

#### 5.4.3.7 Unwichtige Trends mit geringer Realisierungswahrscheinlichkeit

Als unwichtig und unwahrscheinlich schätzen die Experten die These ein, dass der Staat durch Gesetze und Verordnungen regeln wird, dass umfassend sowohl für Produkte als auch für Produktionsprozesse digitale Simulationen als Nachweis ihrer Sicherheit erbracht werden müssen.

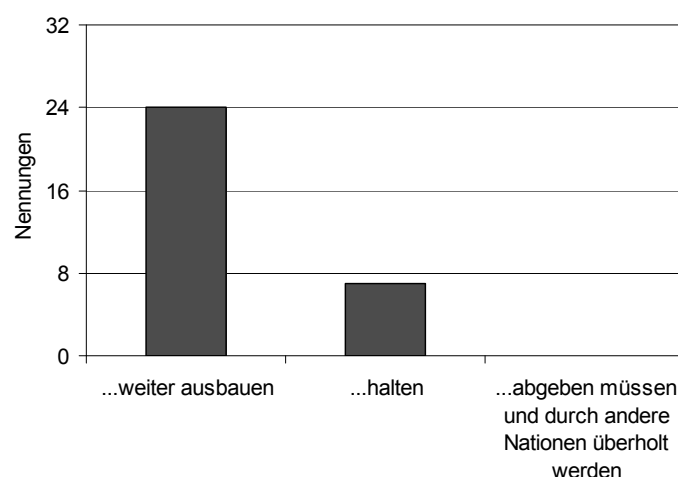
*These 6*

Gleiches gilt für den Trend, dass Unternehmen digitale ergonomische Produkt- oder Prozessanalysen zunehmend an Dienstleister vergeben beziehungsweise auslagern.

*These 22*

### 5.4.4 Wettbewerb

Zusätzlich zur Einschätzung der kommenden Entwicklungen im Bereich der Digitalen Ergonomie wurden die Experten um eine Einschätzung der künftigen Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in diesem Themenfeld gebeten. Abbildung 5.6 zeigt hier die Ergebnisse nach der 3. Befragungsrunde.



**Abb. 5.6** Wettbewerbsposition Deutschlands bei der Anwendung/Weiterentwicklung digitaler Ergonomietools (n=31)

Die Ergebnisse zeigen ein deutliches Bild: Die Experten sehen Deutschland auch in den kommenden Jahren bis 2025 mitführend bei der Anwendung und Entwicklung digitaler Ergonomietools im internationalen Vergleich.

#### **5.4.5 Anpassungsbedarf für kleine und mittlere Unternehmen**

Abschließend konnten die Experten in der letzten Befragungsrunde Angaben zu spezifischen Anpassungsbedarfen für kleine und mittlere Unternehmen machen. Hier lagen 25 Antworten zur Auswertung vor. Diese zeigen zum einen ein sehr heterogenes Bild und wiederholen in Teilen bereits genannte Verbreitungshemmnisse aus Kapitel 5.4.2. Die folgenden Antworten stellen daher überwiegend Einzelmeinungen dar:

- Gezielte Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit,
- Modularisierung/Entwicklung angepasster „einfacher“ Modelle zur Erhöhung der Akzeptanz und Nutzungsbereitschaft,
- Verringerung der Kosten für die Anschaffung/den Betrieb sowie
- Erhöhung des Know-How-Transfers von Großunternehmen und Forschungsinstitutionen hin zu kmU.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorliegenden Delphi-Studie konnte ein Zukunftsradar kurz-, mittel- und langfristiger Trends und Strategien im Themenfeld der Digitalen Ergonomie in Zusammenarbeit mit 60 ausgewiesenen Experten erstellt werden. In einem dreistufigen internetbasierten Fragebogen konnten zunächst mittels Leitfragen 886 Antworten zu künftigen Entwicklungen erarbeitet und diese dann in 26 Thesen, das heißt mögliche Szenarien überführt werden. Diese wurden durch die Experten hinsichtlich ihrer Bedeutung und ihres wahrscheinlichen Eintrittszeitraums bewertet. Zusätzlich erfolgte eine Abfrage der Einschätzung zur Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands im Feld Digitaler Ergonomie sowie die Ermittlung von Ideen zur Förderung der Verbreitung rechnergestützter Tools der Ergonomie.

Aus der Befragung ergaben sich zwei Schwerpunkte: Wichtige Entwicklungen zwischen 2015 und 2020 sowie zwischen 2020 und 2025. Hier wurden jeweils neun Szenarien identifiziert.

Für den ersten Zeitraum (2015-2020) werden Themen wie

- ein Ausbau der Möglichkeiten zur Berücksichtigung anthropometrischer und biomechanischer Varianz,
- die Wettbewerbsvorteile durch den Einsatz digitaler Ergonomietools,
- die Validität und die Gebrauchstauglichkeit der Softwaresysteme,
- die stärkere Nutzung von „Motion Capturing“,
- die Einbindung in Systeme der erweiterten und/oder virtuellen Realität,
- die Verfügbarkeit von Kosten-/Nutzenrechnungen,
- die stärkere Einbindung in die universitäre Lehre sowie
- eine stärkere Modularisierung der Tools

durch die Experten genannt. Innerhalb des zweiten Zeitraums (2020-2025) sehen die Experten Aspekte wie

- die Verfügbarkeit digitaler mentaler Modelle,
- die Substitution von Realversuchen durch virtuelle Simulationen,
- die umfassende virtuelle Gestaltung auf Regionen der Welt angepasster Arbeitssysteme,
- die Möglichkeiten eines verlustarmen Datenaustausches zwischen den Softwaresystemen,
- die Integration muskulärer Analysefunktionen,
- die automatische virtuelle Ableitung von Bewegungsabläufen aus Aufgabenbeschreibungen,
- die Qualität der graphischen Darstellung,
- die organisatorische Verankerung in Ablaufstrukturen der Unternehmen sowie
- die Standardisierung digitaler Menschmodelle.

Zusätzlich zu diesen Hauptsträngen wird die Förderung nationaler und internationaler Vernetzung als bereits stattfindendes, wichtiges Szenario durch die Experten identifi-

ziert, was mit Blick auf fachrelevante Veranstaltungen unmittelbar bestätigt werden kann.

Als wichtig und zugleich Visionär sieht die Expertengruppe die Weiterentwicklung hin zu ganzheitlichen Modellen, welche neben anthropometrischen und biomechanischen auch weitere Facetten wie die Kognition des Menschen abbilden und entsprechende umfangreiche Simulationen erlauben.

Bedeutsam ist des Weiteren die Einschätzung, dass auch in Zukunft die Ergonomie flächendeckend nicht den gleichen Stellenwert wie Qualität, Kosten und Zeit in Unternehmen einnehmen wird, und entsprechende erforderliche Ressourcen nicht ausreichend zur Verfügung stehen werden. Dennoch sehen die Experten die derzeit als mitführend eingeschätzte Rolle Deutschlands bei der Anwendung und Entwicklung rechnergestützter Tools der Ergonomie bis 2025 als nicht gefährdet, sondern vielmehr eine weitere positive Entwicklung.

Schwerpunkte der wenigen Antworten zur Förderungen digitaler Modelle der Verbreitung insbesondere bei kleinen und mittleren Unternehmen liegen in

- Erwartungen zur Verbesserung der Gebrauchstauglichkeit der Software,
- der Modularisierung zur besseren Passung von Bedarf und Budget wie auch
- in einem zu fördernden Wissenstransfer von erfahrenen Großunternehmen beziehungsweise wissenschaftlichen Institutionen zu kleinen und mittleren Unternehmen.

Als Ausblick auf künftige Arbeiten der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin im Themenfeld der Digitalen Ergonomie, abgeleitet aus den Ergebnissen dieser Studie, sind beispielsweise die Unterstützung bei der Weiterentwicklung von Standards (Paul & Wischniewski 2012), die Durchführung von Vernetzungsveranstaltungen (vergleiche BAuA 2013) wie auch bei der anthropometrischen und biomechanischen Datenanalyse (vergleiche Wischniewski 2013) zu nennen. Zielstellung ist dabei immer eine Förderung der möglichst präventiven Gestaltung sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger Arbeit.

## Literaturverzeichnis

Aichholzer, G.: Das ExpertInnen-Delphi: Methodische Grundlagen und Anwendungsfeld „Technology Foresight“. ISSN 1681-9187, 2002.

Brosi, W.; Krekel, E. M.; Ulrich, J. G.: Delphi als Planungsinstrument der Berufsbildungsforschung? Erste Ergebnisse einer BIBB-Studie. BWP6/1999, S. 11-16.

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Tagungsband zum Symposium „Digitale Ergonomie – Trends und Strategien für den Einsatz digitaler Menschmodelle“ am 20. November 2012. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2013.

Cuhls, K.: Technikvorausschau in Japan: Ein Rückblick auf 30 Jahre Delphi. Heidelberg: Physica Verlag, 1998.

Cuhls, K.: Delphi-Befragungen in der Zukunftsforschung. In: Popp, R.; Schüll, E. (Hrsg.): Zukunftsforschung und Zukunftsgestaltung. Beiträge aus Wissenschaft und Praxis. Berlin und Heidelberg: Springer Verlag, 2009, S. 207-222.

DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin: Beuth, 2004.

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. München und Wien: Carl Hanser Verlag, 2009.

Häder, M. & Häder, S.: Delphi und Kognitionspsychologie: Ein Zugang zur theoretischen Fundierung der Delphi-Methode. ZUMA-Arbeitsbericht, 95/05, Mannheim, 1995.

Häder, M.: Delphi-Befragungen. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009.

Hirshberg, D. A.; Loper, M.; Rachlin, E.; Tsoli, A.; Weiss, A.; Corner, B. und Black, M. J.: Evaluating the Automated Alignment of 3D Human Body Scans. In: Proceedings of the 2nd International Conference on 3D Body Scanning Technologies, Hometrica Consulting, 2011, S. 76-86.

Hoske, P.; Gubsch, I.; Kunze, G.; Bürkle, K.; Kamusella, C.; Schmauder, M.: Prognose und Bewertung der Sicht für mobile Arbeitsmaschinen. In: BauPortal 122 (2010) 10, S. 607-612.

Mühlstedt, J.: Entwicklung eines Modells dynamisch-muskulärer Arbeitsbeanspruchungen auf Basis digitaler Menschmodelle. Dissertation, TU Chemnitz, 2012.

Mühlstedt, J.; Spanner-Ulmer, B.: Homo Sapiens Digitalis: über den Praxiseinsatz digitaler Menschmodelle. In: A. Lichtenstein; C. Stößel; C. Clemens (Hrsg.): 8. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme. Düsseldorf: VDI Verlag, 2009.

Münchener Kreis e. V., Eict GmbH, Deutsche Telekom AG, TNS Infratest GmbH: Executive Summary und Methodik: Zukunft und Zukunftsfähigkeit der Informations- und Kommunikationstechnologien und Medien. ISBN 978-3-00-028801-2, 2009.

Paul, G. & Wischniewski, S.: Standardization of Digital Human Models. In: Ergonomics 55 (2012) 9, S. 1115-1118.

Robert Koch Institut 2000, Bundesgesundheitsurvey 1998, Public Use File BGS98, Berlin.

VDI Richtlinie 4499, Blatt 1: Digitale Fabrik, Grundlagen. Berlin: Beuth, 2008.

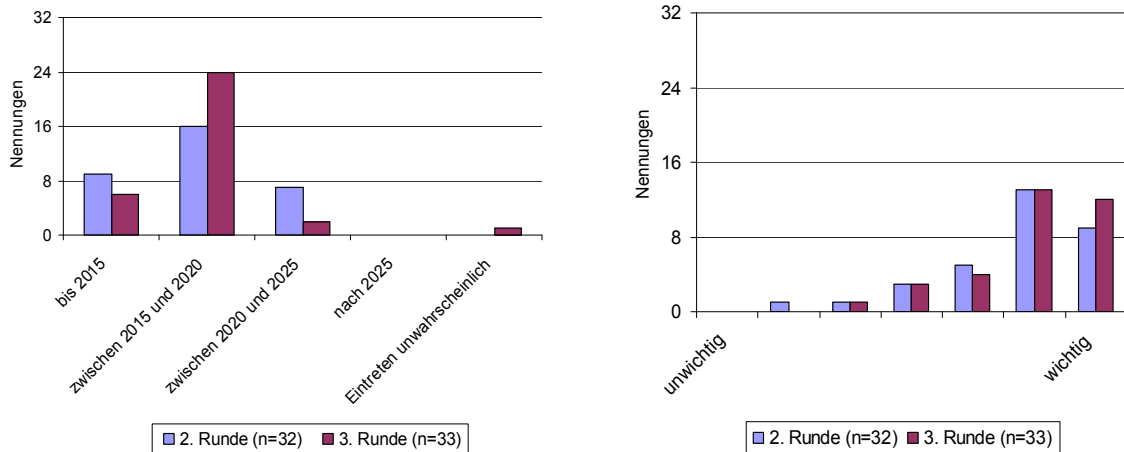
von der Gracht, H.; Däneke, E.; Mičić, P.; Darkow, I.-L.; Jahns, C.: Zukunft der Logistik-Dienstleistungsbranche in Deutschland 2025. ISBN 978-3-87154-378-4, 2008.

Wischniewski, S.: Bivariate Parametrierung digitaler Menschmodelle mittels Körperhöhe und Körpergewicht. In: Bericht zum 59. Arbeitswissenschaftlichen Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft vom 27. Februar bis 1. März 2013 an der Hochschule Niederrhein, Krefeld, S. 363-366.

## Anhang Ergebnisvergleich der 2. und 3. Runde

These 1:

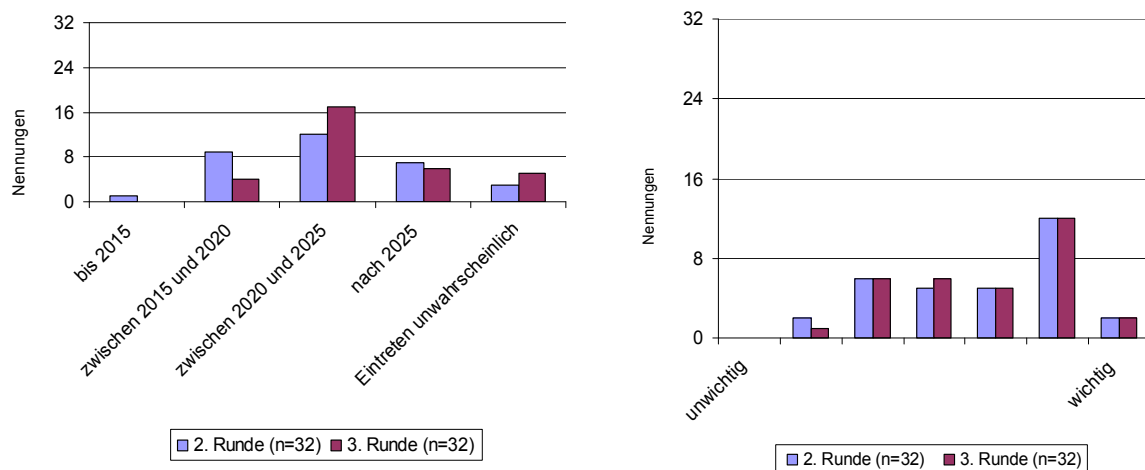
Digitale Ergonomietools ermöglichen die Berücksichtigung anthropometrischer und biomechanischer Varianzen insbesondere vor dem Hintergrund des demographischen Wandels und der sich ändernden Gesellschaft.



**Anh., Abb. 1** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 1. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 2:

Digitale Ergonomietools ermöglichen eine Simulation der kognitiven Prozesse des Menschen in den zunehmend komplexen sozio-technischen Arbeitssystemen.

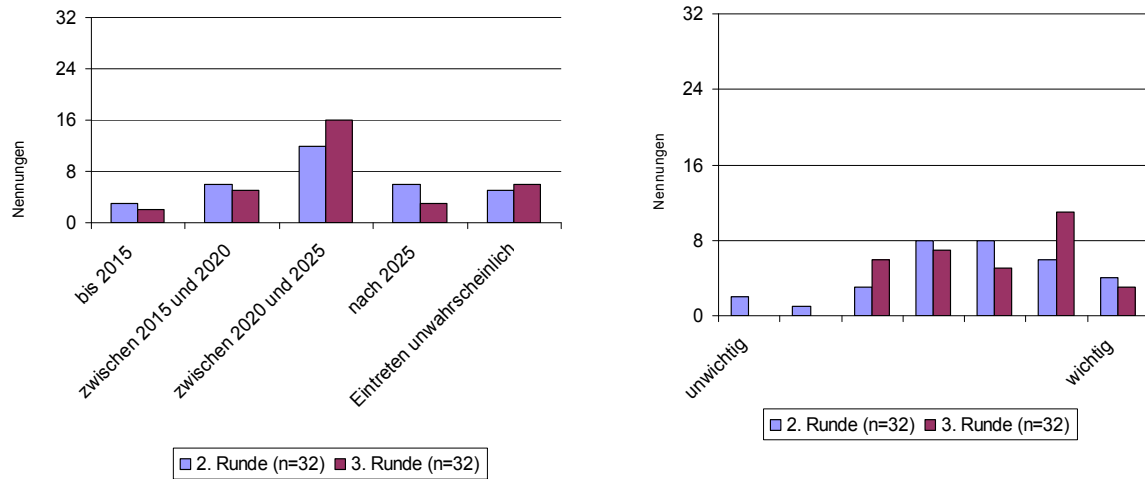


**Anh., Abb. 2** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 2. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)



## These 3:

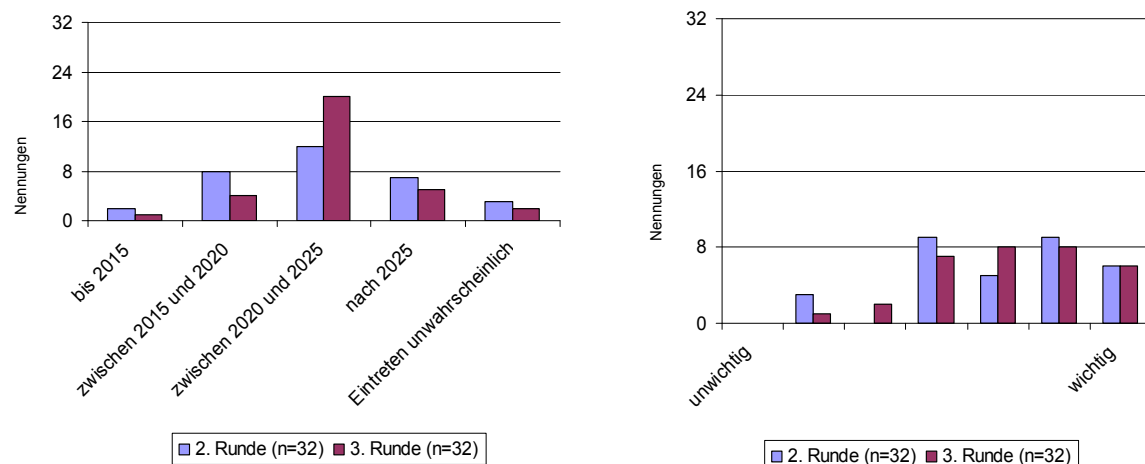
Zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit führen Unternehmen nur in Ausnahmesituationen noch Realversuche durch. Alle übrigen Untersuchungen erfolgen mittels digitaler Ergonomietools.



**Anh., Abb. 3** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 3. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

## These 4:

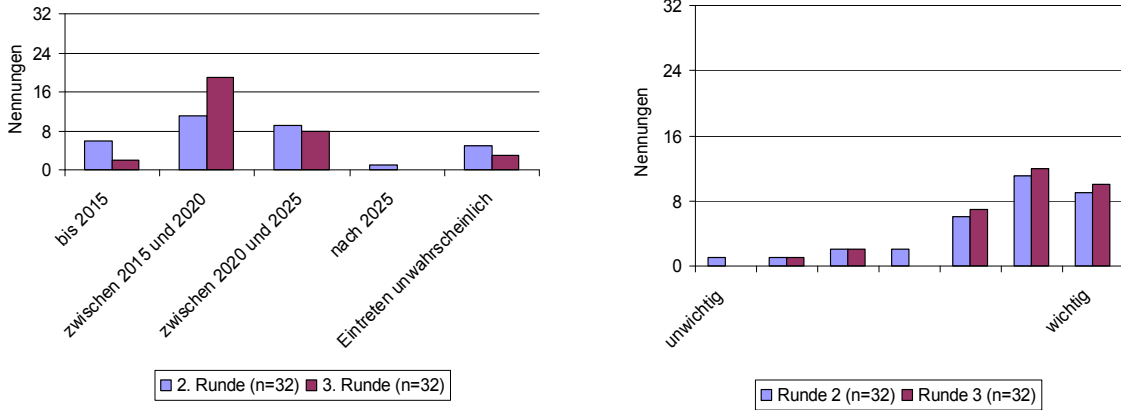
Die Globalisierung erfordert angepasste Produkte und Produktionsprozesse für die verschiedenen Regionen der Welt. Die prospektive Planung und Validierung ebendieser erfolgt nahezu ausschließlich mit digitalen Tools.



**Anh., Abb. 4** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 4. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 5:

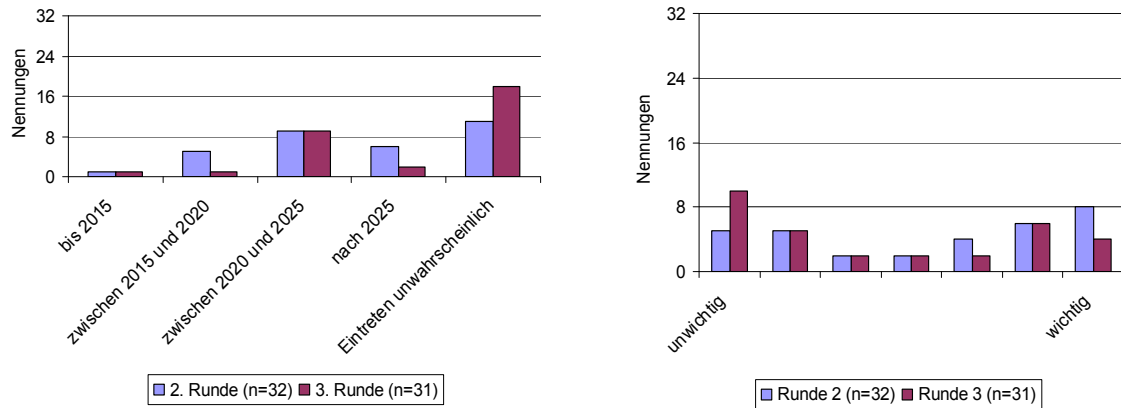
Die digitale ergonomische Produkt- und Prozessabsicherung stellt einen zentralen Wettbewerbsvorteil dar. Ohne diesen Nachweis ist ein Agieren am Markt nur eingeschränkt möglich.



**Anh., Abb. 5** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 5. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 6:

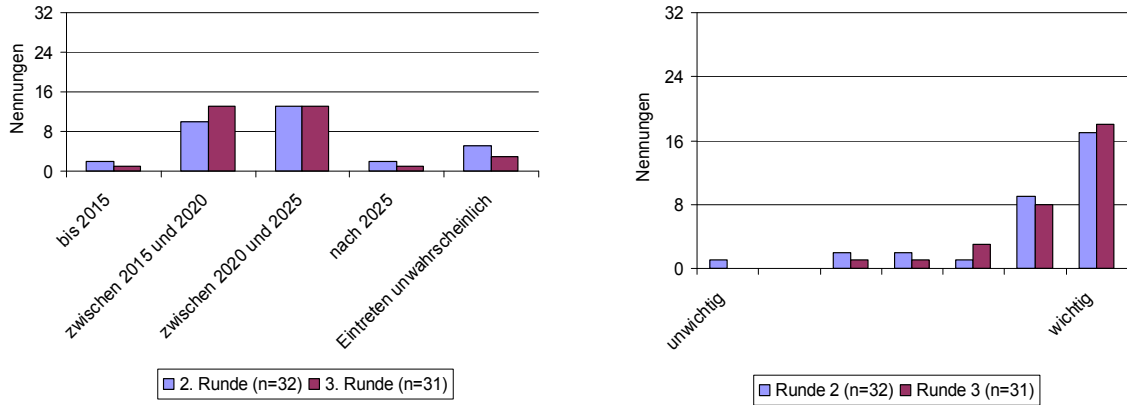
Der Staat regelt durch Gesetze und Verordnungen, dass umfassend sowohl für Produkte wie auch Produktionsprozesse digitale Simulationen als Nachweis ihrer Sicherheit erbracht werden müssen.



**Anh., Abb. 6** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 6. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 7:

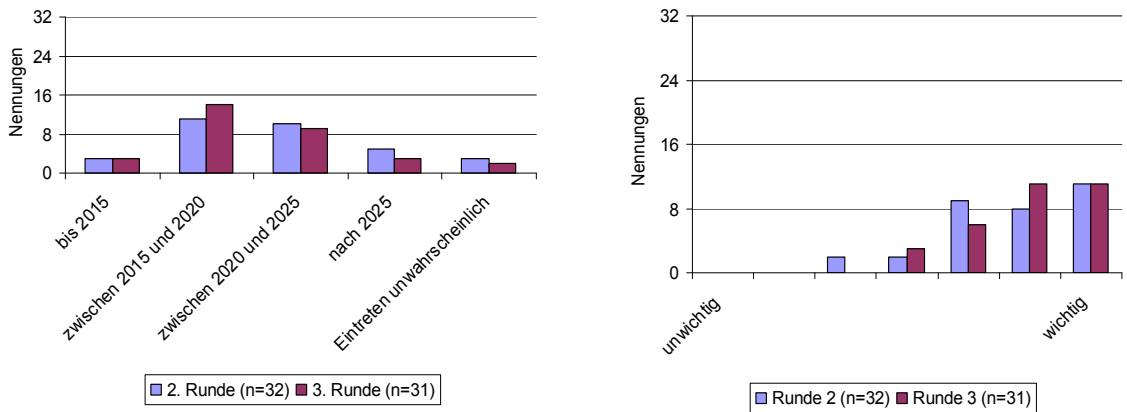
Es existieren Datenstandards/Schnittstellen zur Gewährleistung eines Informationsaustausches zwischen verschiedenen digitalen Ergonomietools mit jeweils unterschiedlichen Analyseschwerpunkten sowie mit weiteren Tools der Digitalen Fabrik.



**Anh., Abb. 7** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 7. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 8:

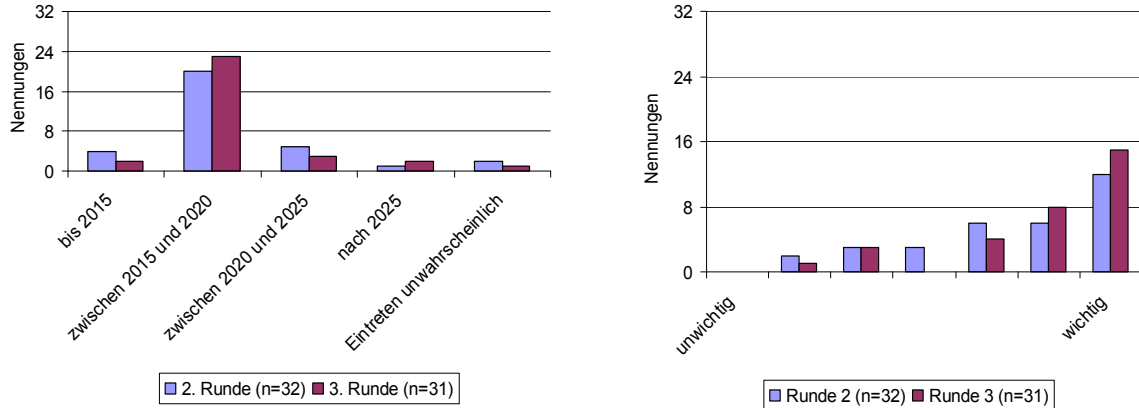
Es existieren allgemein anerkannte Konzepte zur Validierung, um die Genauigkeit digitaler Ergonomiesimulationen zu klassifizieren.



**Anh., Abb. 8** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 8. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 9:

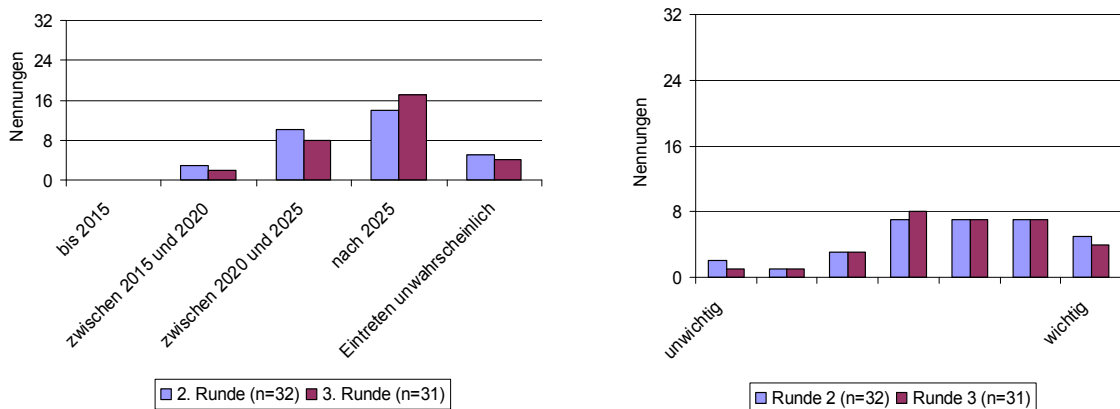
Eine verbesserte Gebrauchstauglichkeit digitaler Ergonomietools ermöglicht ihre eingeschränkte Anwendung auch als „Laie“. Detaillierte Analysen erfolgen weiterhin durch Expertinnen und Experten.



**Anh., Abb. 9** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 9. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 10:

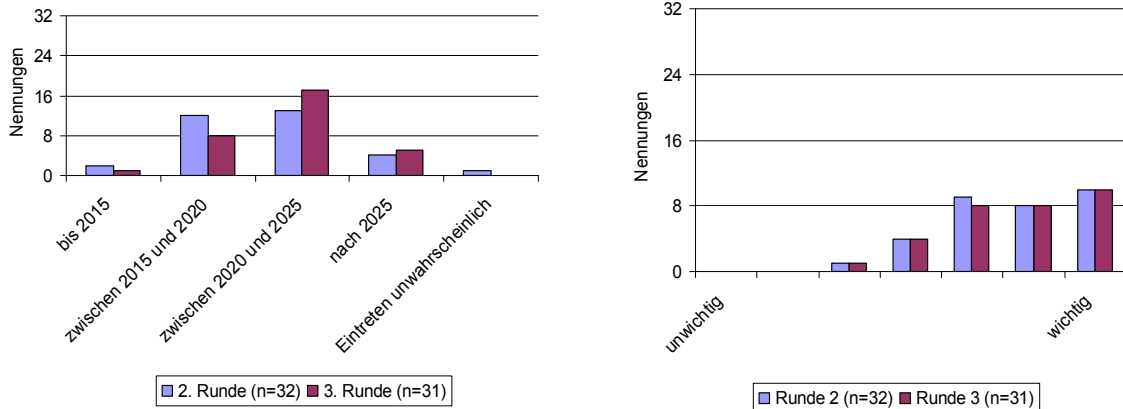
Es sind ganzheitliche Tools verfügbar, welche eine anthropometrische, biomechanische und kognitive Analyse von Produkten und Prozessen ermöglichen.



**Anh., Abb. 10** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 10. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 11:

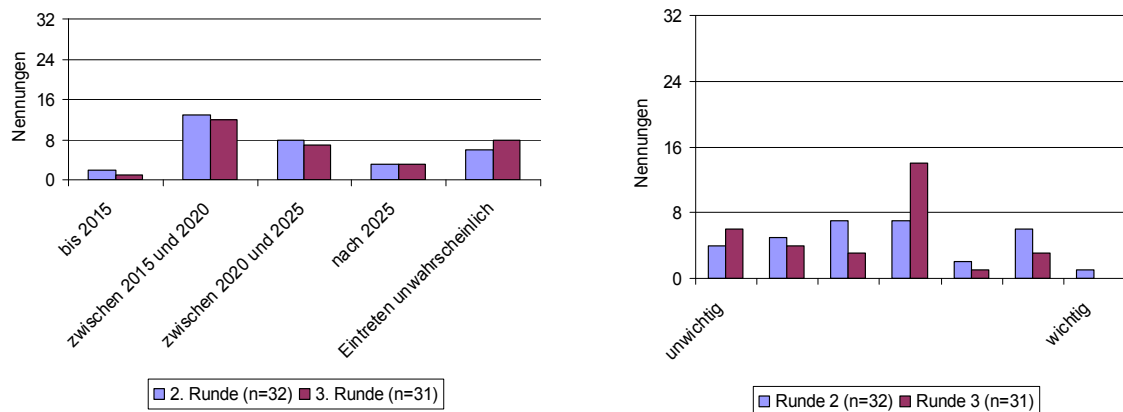
Die Integration von „Muskelmodellen“ ermöglicht die virtuelle Ermittlung valider physischer Belastungen. Digitale Ergonomietools ermöglichen somit die Erstellung von Analysen, welche über derzeitige „Screening“-Methoden deutlich hinausgehen.



**Anh., Abb. 11** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 11. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 12:

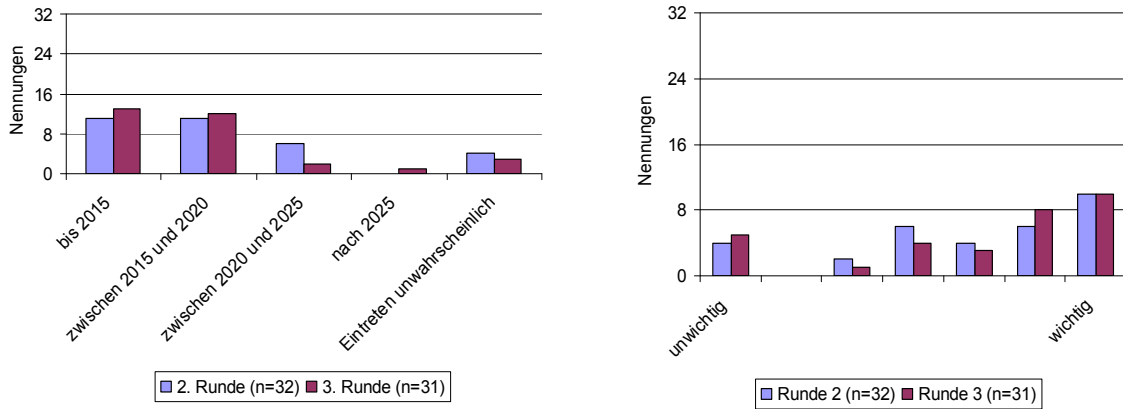
Die Dateneingabe bzw. Programmsteuerung erfolgt statt mit klassischen Eingabegeräten im Allgemeinen durch Gesteninteraktion oder weitere Eingabegeräte wie beispielsweise Datenhandschuhe.



**Anh., Abb. 12** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 12. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 13:

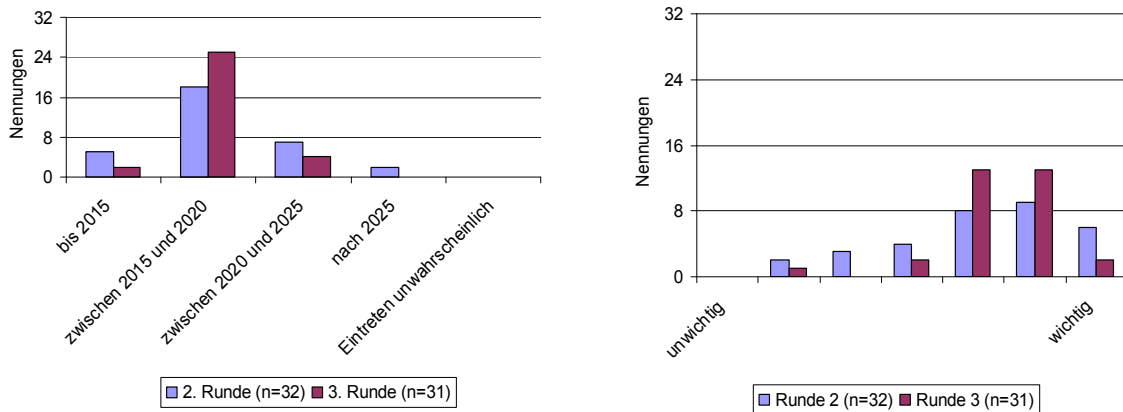
Die digitale Erfassung und Nutzung menschlicher Bewegungsabläufe („Motion Capturing“) stellt ein zentrales Element digitaler Ergonomietools dar.



**Anh., Abb. 13** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 13. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 14:

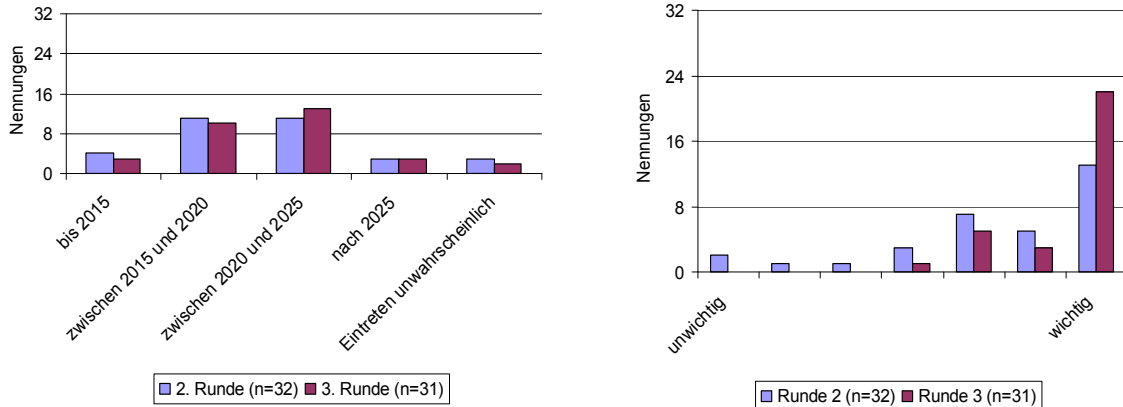
Digitale Tools nutzen in großem Umfang die Darstellungsmöglichkeiten der „Augmented oder Virtual Reality“.



**Anh., Abb. 14** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 14. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 15:

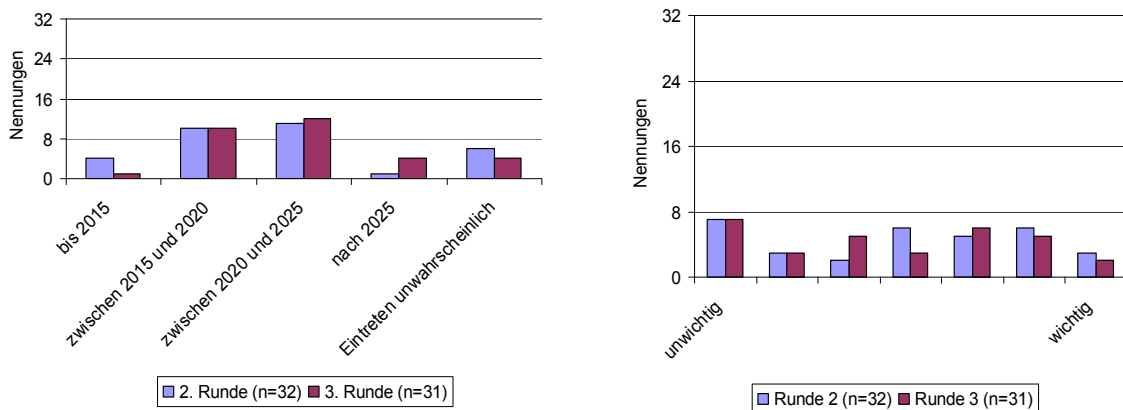
Anstatt, wie heute üblich, Bewegungsabläufe zu definieren, erfolgt lediglich eine Definition der durchzuführenden Aufgabe; hierauf aufbauend erfolgt die automatische Berechnung der Bewegungsabläufe und ihre ergonomische Bewertung.



**Anh., Abb. 15** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 15. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 16:

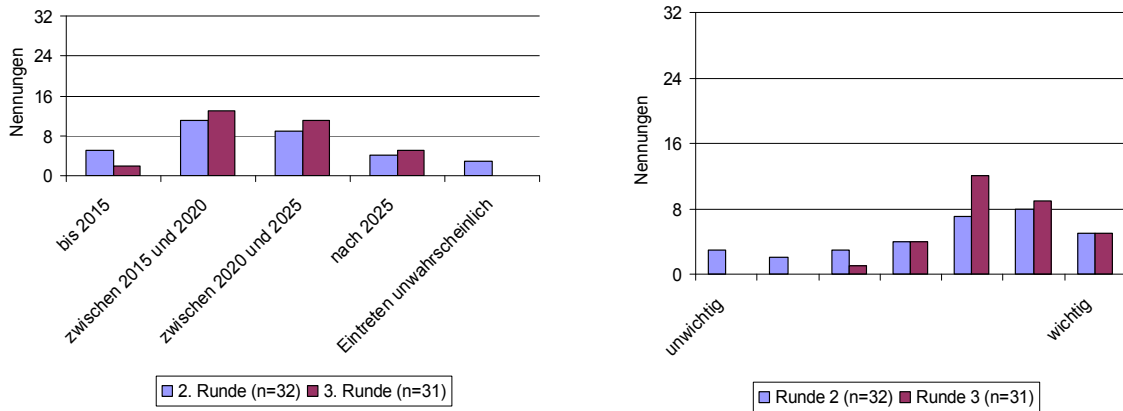
Zahlreiche digitale Ergonomietools sind mittels mobiler Endgeräte wie beispielsweise Smartphones nutzbar. Rechnerintensive Simulationen erfolgen zentral und losgelöst von diesen („Cloud Computing“).



**Anh., Abb. 16** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 16. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 17:

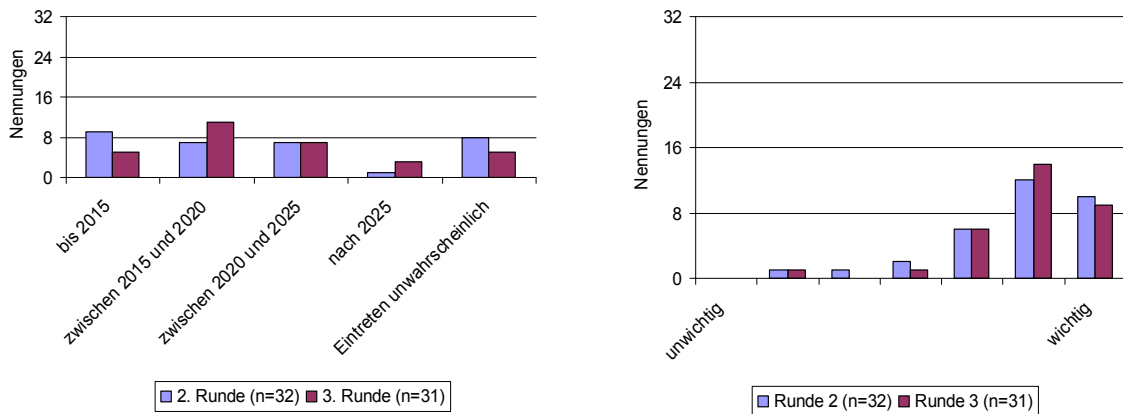
Die Darstellungsqualität virtueller menschlicher Modelle und ihrer Bewegungsabläufe entspricht nahezu der Realität.



**Anh., Abb. 17** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 17. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 18:

Es existieren valide Abschätzungen, die eine Gegenüberstellung von Kosten (Software, Schulung und Personal) und Nutzen (ergonomische Produkte und Prozesse) und damit eine Wirtschaftlichkeitsrechnung stützen können.

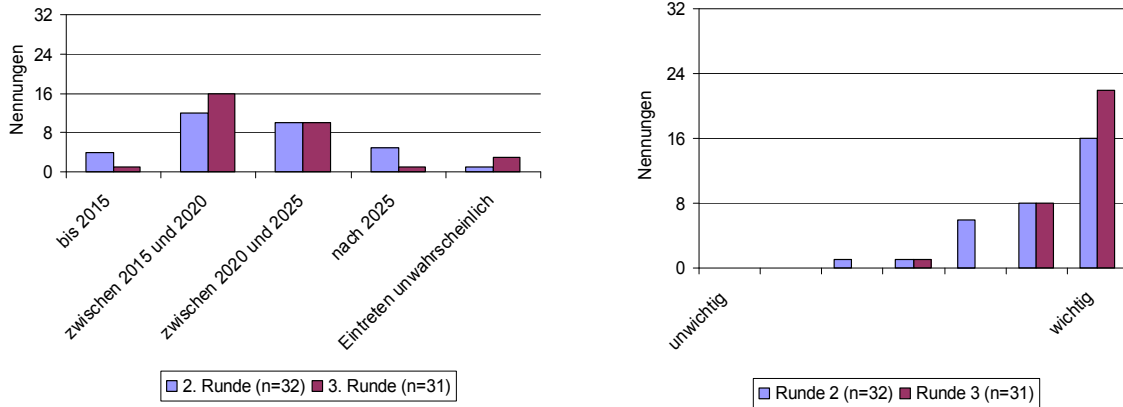


**Anh., Abb. 18** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 18. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)



These 19:

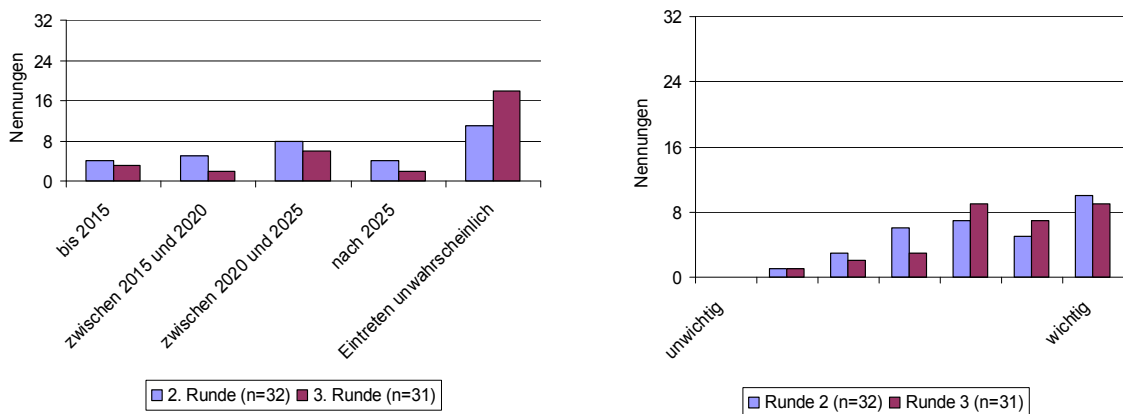
In der universitären Lehre ist in den relevanten Studienfächern die Digitale Ergonomie fest verankert. Ausgebildete Experten stehen daher ausreichend zur Verfügung und decken den Bedarf.



**Anh., Abb. 19** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 19. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 20:

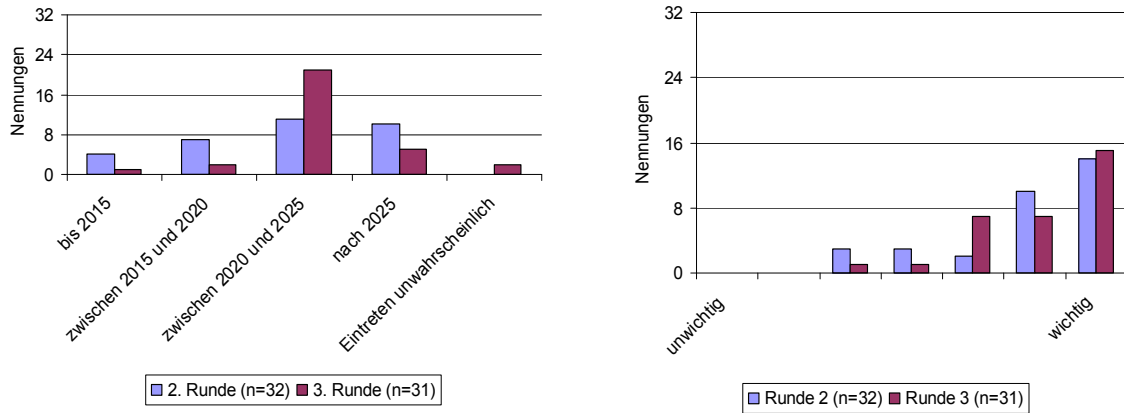
Produkt- und Prozessergonomie haben in Unternehmen nahezu den gleichen Stellenwert wie Kosten, Qualität und Liefertreue.



**Anh., Abb. 20** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 20. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 21:

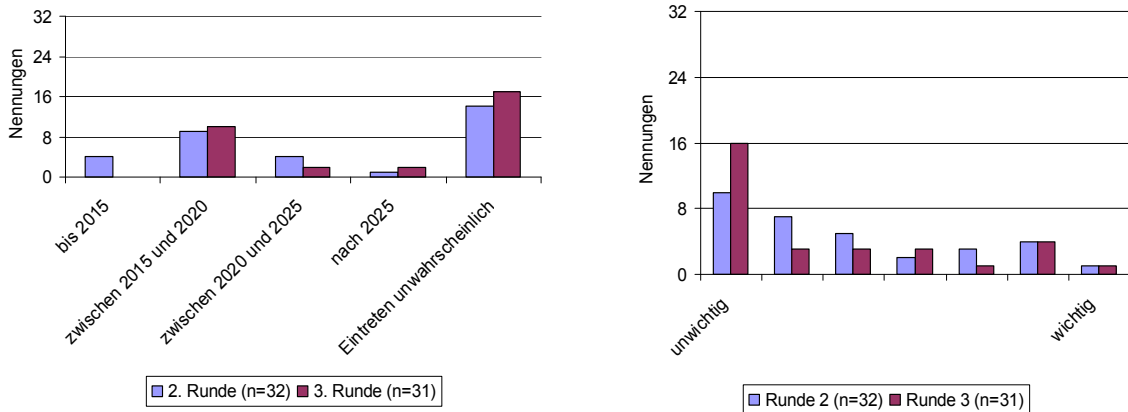
Mittelständische wie Großunternehmen haben Prozesse zur digitalen Ergonomieabsicherung fest in ihren Ablaufstrukturen verankert und Nutzen diese regelmäßig.



**Anh., Abb. 21** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 21. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 22:

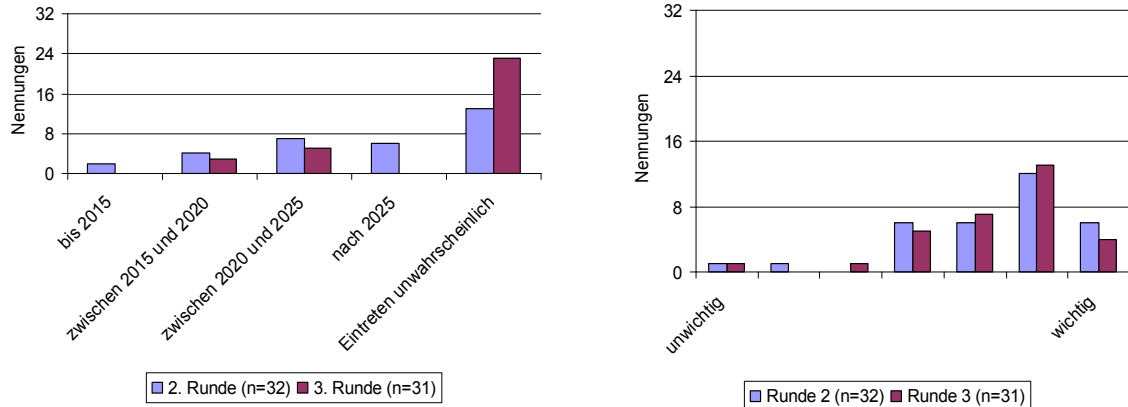
Die Durchführung digitaler ergonomischer Produkt- oder Prozessanalysen ist überwiegend ausgelagert und erfolgt durch externe Dienstleister.



**Anh., Abb. 22** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 22. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 23:

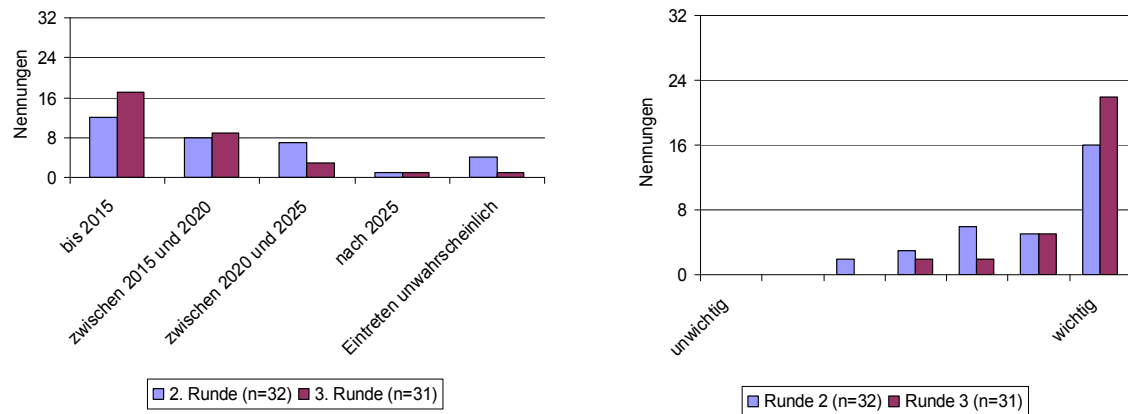
In großen wie auch kleinen und mittelständischen Unternehmen werden ergonomische Produkte und Prozesse hoch priorisiert. Es erfolgt eine ausreichende Bereitstellung der erforderlichen Ressourcen (Budget und Personal).



**Anh., Abb. 23** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 23. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 24:

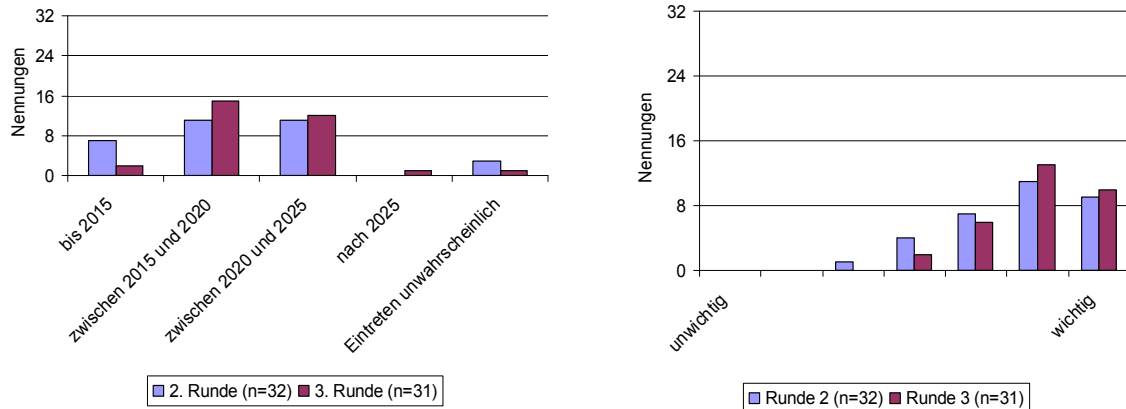
Durch regelmäßige nationale und internationale Fachveranstaltungen wird der Übergang von Forschungsergebnissen in marktgängige Softwaresysteme gezielt gefördert.



**Anh., Abb. 24** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 24. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 25:

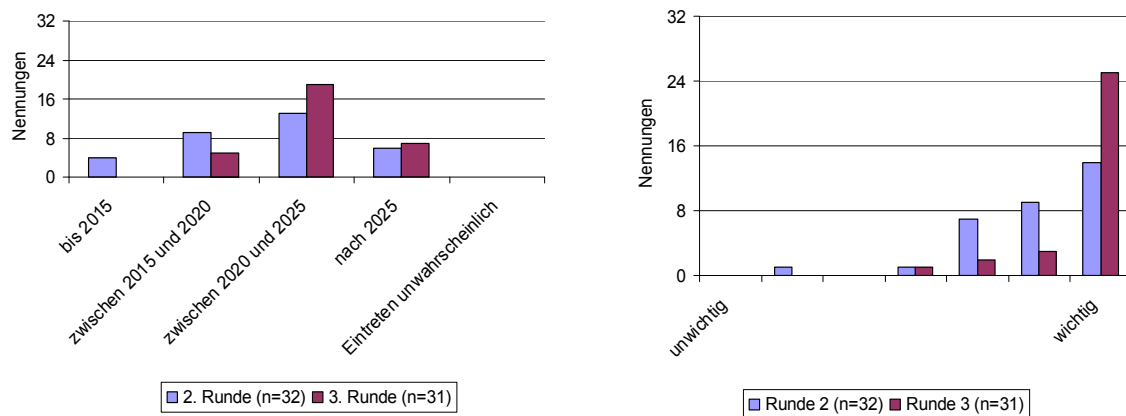
Die Modularisierung der digitalen Ergonomietools ermöglicht Unternehmen, für ihren konkreten Anwendungsfall das erforderliche Werkzeug mit dem jeweils relevanten Funktionsumfang zu vertretbaren Kosten auszuwählen und einzusetzen.



**Anh., Abb. 25** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 25. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 26:

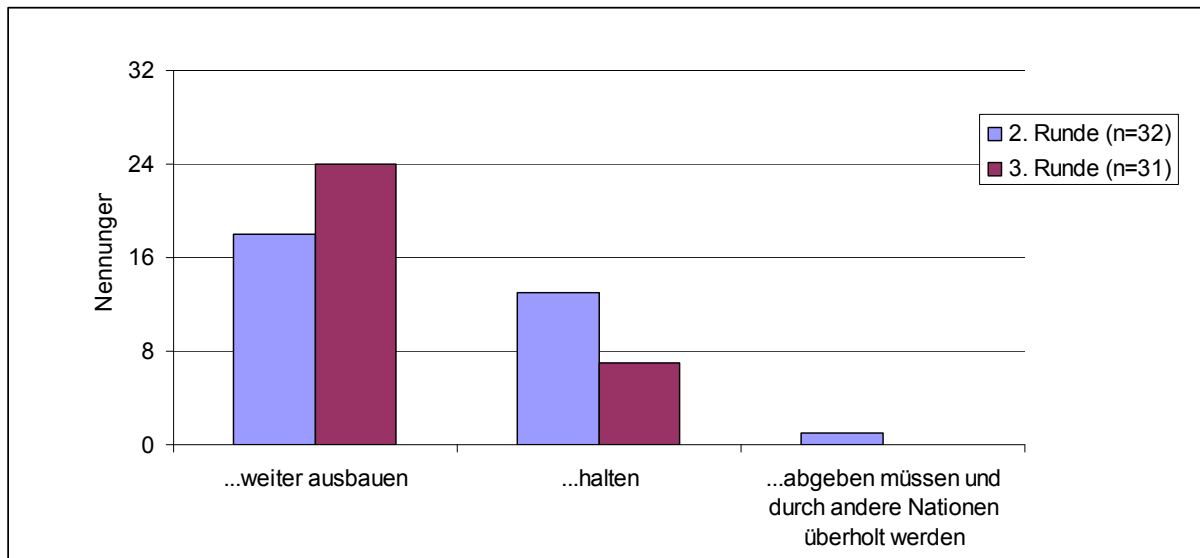
Die Verfügbarkeit anerkannter internationaler Standards für digitale Menschmodelle stellt eine weit verbreitete Akzeptanz sicher.



**Anh., Abb. 26** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 26. These für die 2. und 3. Befragungsrunde (Eintrittszeitraum und Bedeutung)

These 27:

Deutschland wird seine mitführende Rolle bei der Entwicklung/Anwendung digitaler Ergonomietools im internationalen Vergleich bis mindestens 2025.



**Anh., Abb. 27** Ergebnisvergleich für die Bewertung der 27. These für die 2. und 3. Befragungsrunde