

## Methodenumsetzung in der digitalen Ergonomie

Christiane KAMUSELLA

*Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme,  
Professur für Arbeitswissenschaft, Technische Universität Dresden  
D-01062 Dresden*

**Kurzfassung:** Seit ca. 2008 werden in Eigenforschung digitale Ergonomietools für das Menschmodell CharAT Ergonomics (<http://www.virtualhumanengineering.com/>) entwickelt (Kamusella & Schmauder 2010; Kamusella & Ördögh 2011; Kamusella 2012), indem die Kernsoftware um solche Tools erweitert wurde. Es existiert eine Schnittstelle zur Kernsoftware, die einen Zugriff auf alle notwendigen kinematischen und anthropometrischen Daten des Menschmodells ermöglicht, worüber die Verbindung zu eigenen Programmentwicklungen hergestellt werden kann. In jüngster Zeit entstand als Pilotlösung ein weiteres Tool zur Bewertung von Lastenhandhabung (Kamusella et. al. 2015). Den Entwicklungen liegt der Gedanke zugrunde, einzelnen Ergonomieaspekten zuordenbare ergonomische Anforderungen in Softwarelösungen umzusetzen. Das Ziel besteht darin, Prinzipien einer Umsetzung und Anpassung von Ergonomiemethoden in Machbarkeitsstudien zu finden und aufzuzeigen. Die Basis für solche Tools bilden Erkenntnisse und Daten der klassischen Ergonomie. Es zeigen sich Umsetzungsdefizite bei deren digitaler Aufbereitung.

**Schlüsselwörter:** digitale Ergonomiewerkzeuge, Menschmodelle, digitale Ergonomietools, physische Belastungen, Sichtbewertung

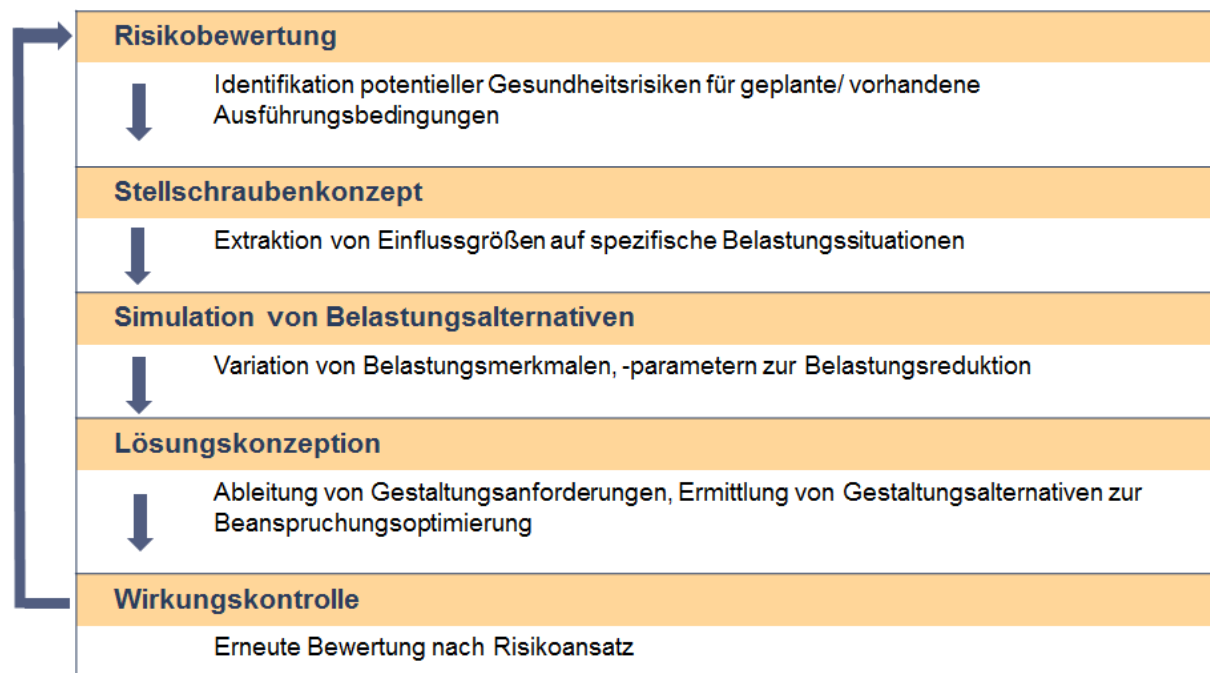
### 1. Einleitung

Die digitale Unterstützung von Ergonomieuntersuchungen in den Bereichen Produkt- und Prozessergonomie im Digital Prototyping dient der ergonomischen Absicherung von Entwurfsprozessen in frühen Planungsstadien. Dafür werden digitale Werkzeuge und Methoden zur Analyse, Bewertung und Gestaltung ergonomischer Aspekte genutzt. Dabei interagieren digitale Menschmodelle und Ergonomietools miteinander. Ein digitales Menschmodell verkörpert ein Modell des Menschen, welches die jeweils im Gestaltungsprozess erforderlichen menschlichen Eigenschaften softwaretechnisch umsetzt und Simulationsalgorithmen beinhaltet. Ein Ergonomietool umfasst die für einen spezifischen Ergonomieaspekt aufbereiteten Analyse- und Bewertungsverfahren einschließlich ihrer Datenquellen (Definitionen s. Kamusella & Schmauder 2009) sowie ([www.ergotyping.net](http://www.ergotyping.net), Startseite und Einordnung). Zu einer ähnlichen Definition von digitaler Ergonomie bzw. zur Beschreibung des Begriffs digitales Menschmodell gelangen darauf aufbauend (Mühlstedt 2012) sowie (Wischniewski 2013).

Wert und Nutzen digitaler Ergonomiewerkzeuge sind in der Fachwelt und in großen Unternehmen nicht infrage gestellt. Durch diese Technologie werden deutliche Chancen zur Verbesserung von Produkt- und Prozessergonomie gesehen und wie digitale Methoden als ein vielversprechender Weg kommender arbeitswissenschaftli-

cher Forschung betrachtet. Mit ihnen lassen sich sehr systematisch Ergonomiebewertungen von Mensch-Maschine-Schnittstellen an virtuellen Prototypen beliebiger zu vergleichender Varianten durchführen. Anthropometrisch verschiedene Nutzer eines virtuellen Testkollektivs können theoretisch zeitgleich agieren, wodurch Wechselwirkungen von Belastungskenngrößen im Szenenbild und in Ergonomiekenngrößen veranschaulicht werden. Die Ergebnisse unterliegen einer gewissen Objektivität, da im Programm hinterlegte Funktionen formalen Regeln folgen, die für alle Situationen gleichermaßen Anwendung finden.

Nach dem Schädigungsrisikoansatz können potentielle Gesundheitsrisiken identifiziert und Maßnahmebedarfe ermittelt werden. Der Stellschraubenansatz ist hierbei ein unterstützendes Instrumentarium (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 1:** Prinzipielle Methodik einer Ergonomieanalyse, -bewertung und -optimierung

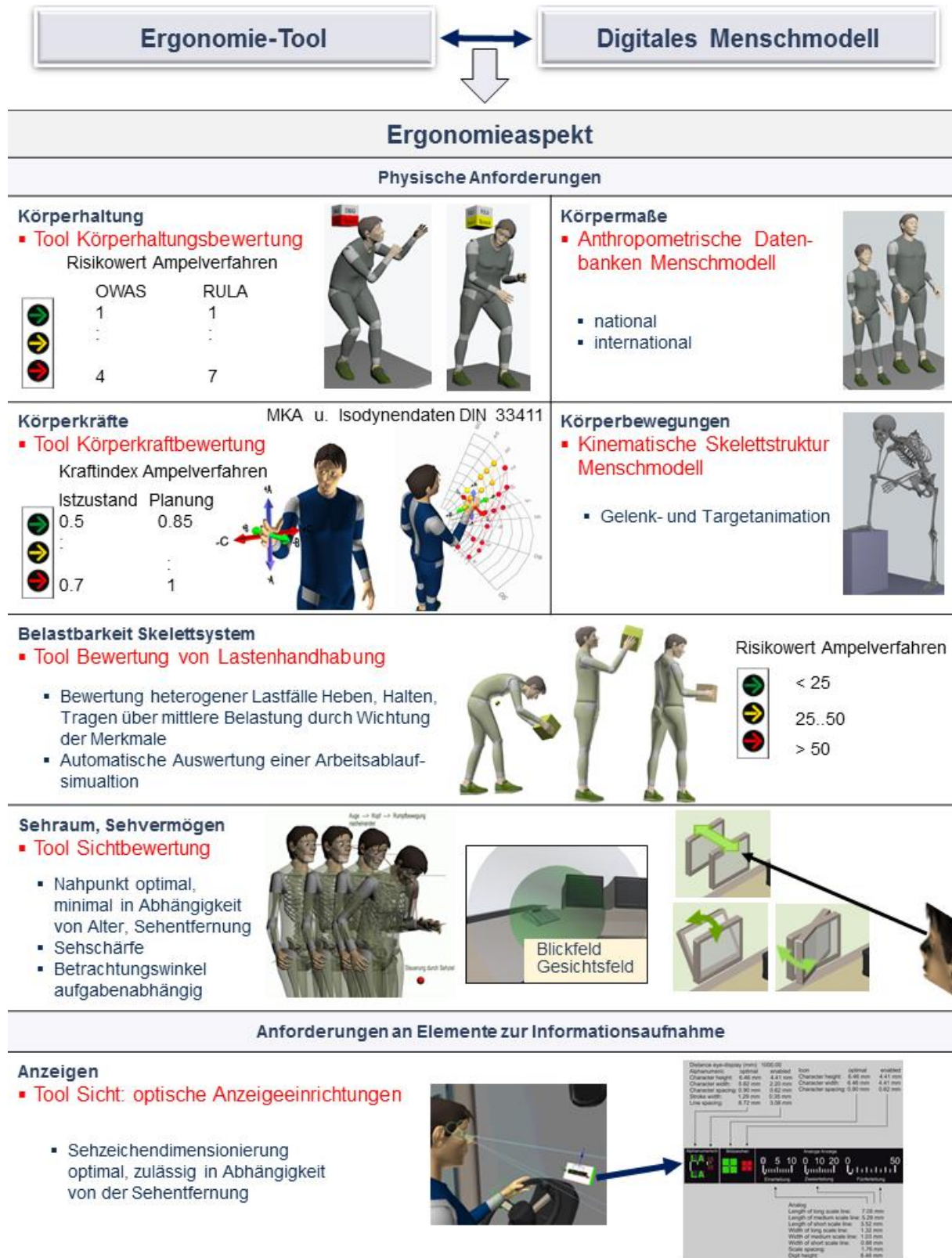
Durch systematische Auswahl zu betrachtender Kriterien und der Kombination von Variablen in vorgedachten Lösungen spiegelt sich im Nutzungsgrad der Stellschrauben ein Gestaltungspotenzial wieder. Dieser oft in Iterationen ablaufende sehr aufwändige Prozess kann über Anwendung digitaler Ergonomiewerkzeuge verbessert und vereinfacht werden.

Die bisher entwickelten Ergonomietools und deren Zuordnung zu Ergonomieaspekten kann Abbildung 2 entnommen werden.

Vorrangige Anwendungsfelder sind in einer Identifizierung von Ergonomiepotenzialen in frühen Phasen des Produktentstehungsprozesses für Produkt- oder Prozessvariantenentwürfe zu sehen, bei denen detaillierte Takt- oder Nutzungszeiten untergeordnet zu betrachten sind.

Bisher konnten Erfahrungen zur Methodenumsetzung während der Entwicklung von Softwarelösungen und bei Anwendung der Tools in Industrieprojekten gewonnen werden (Simulation von Verpackungstätigkeiten Firma ErgoPack GmbH; Cockpitergonomie für ein motorisiertes ultraleichtes Dreiachser-Flugzeug „Just Fly“; Ableitung von Matratzenzonen im AIF-Projekt Aktives Schlafsystem; Ergonomieuntersuchungen von Verpackungsmaschinen für die Krones AG; Präventionsergonomie zur Rumpffertigung für die Airbus Operations GmbH; Rechnerunterstützte Ergonomieun-

tersuchungen von Logistiktätigkeiten für die Audi AG; Ergonomiebewertung eines neuartigen Joysticks zur Maschinensteuerung für die Firma Krone/Grammer; rechnerunterstützte Datenaufbereitung perzentil- und körperhaltungsabhängiger Aktionsräume für Ergonomiebewertungen der Audi AG).



## **2. Entwicklung digitaler Ergonomietools zur Bewertung von Sichtgeometrie und optischen Anzeigeeinrichtungen sowie zur Risikobeurteilung physischer Belastungen**

### *2.1 Überblick*

Das Tool „Körperkräfte“ beurteilt homogene Kraftausübungsfälle nach klassischem Ansatz über einen Kraftindex, der das Verhältnis aktueller zu empfohlener Kraft ausdrückt. Aufbereitet wurden Kraftnormdaten der DIN 33411 Teil 4 und 5 für Hand-Arm-Kräfte. Die Darstellung im Tool erfolgt in Anlehnung an die Isodynendaten als farb-kodierte Kraftangriffspunkte im Bewegungsraum des virtuellen Nutzers für die in der Norm definierten Körperhaltungen. Darüber ist zunächst eine qualitative Abschätzung isometrischer Aktionskräfte möglich. Ergänzend werden diese Aktionskraftdaten in Verbindung mit Reduktionsfaktoren des Grenzkraftverfahrens nach Siemens und Derivate einer quantitativen Risikobewertung nach Ampelverfahren zugeführt. Integriert ist weiterhin das Kraftbewertungsverfahren nach Montagespezifischen Kraftatlas MKA (Wakula et. al. 2009). Hierbei werden im digitalen Tool körperhaltungs-, personen- und tätigkeitsabhängig Kraftbewertungen unter Berücksichtigung des Kraftperzentils für die beiden normativen Bewertungsebenen Ist-Zustand und Planung automatisiert vorgenommen. Synchron zur Veränderung eines Kraftangriffspunktes im Bewegungsraum des Menschmodells ermittelt das Ergonomietool optimale, empfohlene Aktionskräfte sowie Risikofaktoren.

Das Tool „Körperhaltungsbewertung“ beurteilt arbeitsbedingt erzwungene Körperhaltungen und –bewegungen. Rechentechnisch umgesetzt sind die Screening-Verfahren RULA (Rapid Upper Limb Assessment) und OWAS (Ovako Working Posture Analysing System).

RULA beurteilt vorausgewählte einzelne Haltungen von Ober-, Unterarm, Handgelenkstellung, Kopf, Rumpf, unteren Extremitäten, ergänzt um Aspekte von Muskelarbeit ohne Einbeziehung von deren Dauer und Häufigkeit. OWAS überprüft einzelne Gesamtkörperhaltungen als Kombination aus Arm-, Bein-, Rumpfhaltung und Lastgewichtsklasse. Darüber hinaus können statische und statisch/dynamische Körperteilhaltungen zeitbasiert untersucht werden. Die Häufigkeit des Vorkommens einzelner Körperteilhaltungen führt entsprechend Ampelverfahren zu entsprechenden Risikostufen und begründet einen Handlungsbedarf. Für beide Verfahren ist dem Menschmodell ein Bewertungswürfel zugeordnet, welcher Risikowerte, Ampelfarbe und Einzelkodierungen in einem Monitor in Echtzeit zur Posenänderung ausgibt.

Im Tool „Sichtbewertung und optische Anzeigeeinrichtungen“ steuert das Menschmodell ein Sehziel visuell durch sequentielle Auge-Kopf-Körper-Motorik an. Infolge sind Fixationszentrum, Sehstrahl Lage und –ausrichtung sowie die Körperhaltung determiniert. Sehobjekte werden darüber innerhalb physiologischer Bewegungsgrenzen platziert. Weiterhin leiten sich beim Vergleich von Gestaltungsvarianten daraus z. B. Sichtkollisionen für unterschiedliche digitale Testpersonen ab. Weiterhin erhält der Anwender eine Unterstützung, Sehflächen in Abhängigkeit akkommodativer Vergenzen und der Sehschärfeminderung im ergonomisch günstigen Sehabstand zum altersabhängigen Nutzerauge zu platzieren und auszurichten. Die sonst parallelen Augenachsen der Monokularkameras drehen sich bei Unterschreitung des Fernpunktes eines fixierten Sehobjektes gegensinnig ein. Die Sicht aus linkem, rechtem bzw. Mittenaugen ergibt jeweils einen anderen Bildausschnitt. Das Scharfstellen des Bildes auf der Netzhaut bei veränderter Objektweite (Akkommodation) wird ergonomisch kontrolliert und bewertet. Ergänzend werden Abweichungen von rechtwinklig zur

Sehachse ausgerichteten Anzeigeflächen in Abhängigkeit visueller Ansprüche der Sehaufgabe ergonomisch bewertet. Der Nutzer erhält während einer interaktiven Platzierung und Ausrichtung der Sehfläche synchron Rückmeldungen zur Ergonomie des Gestaltungsentwurfs.

Das Tool „Bewertung von Lastenhandhabung“ hat die Leitmerkalmethode Heben, Halten, Tragen in ein digitales Werkzeug überführt und dient damit der vordergründig prospektiven Bewertung des Gesundheitsrisikos durch Lastenhandhabung. Es erkennt aus einer Abfolge von Arbeitsvorgängen einzelne Körperhaltungen, deren Häufigkeiten und Dauer sowie Verknüpfungen mit Lastgewichten. Dialogbasiert werden weitere Eingangsgrößen (Ausführungsbedingungen, Lastmasse) ergänzt. In Erweiterung der Leitmerkalmethode wird in der Software eine mittlere Belastung abgebildet, indem unterschiedliche Lastgewichte und Körperhaltungen als weg-, zeit-, häufigkeitsgewichtete Mittelwerte berechnet werden und zusammen mit allen Faktoren in einen Risikowert einfließen. Insgesamt werden im Tool manuelle Arbeitsrichtungen mit Lastenhandhabung weitgehend automatisch ausgewertet.

## *2.2 Probleme bei Methodenumsetzung klassischer Ergonomieverfahren in digitale Technologien*

Die Delphi-Studie Digitale Ergonomie 2025 (Wischniewski 2013) sprach die z. T. unklare Validität digitaler Ergonomietools als Hemmnisse und Defizite für deren Anwendung an. Als ein Schwerpunkt wurde genannt, allgemein anerkannte Konzepte zu entwickeln, die auf eine Genauigkeit digitaler Ergonomiesimulationen und auf eine Zuverlässigkeit der Ergebnisse von Humansimulationen abzielen. Die Validität oder Gültigkeit bzw. Zuverlässigkeit ist ein Maß dafür, ob eine Methode für die angestrebten Ziele geeignet ist (Caffier et. al. 1999). D. h., sie ist ein Gütekriterium für die Belastbarkeit der Aussage über einen bestimmten Ursache-Wirkungszusammenhang. Die zu untersuchenden Merkmale müssen methodisch sicher erfasst und in Beziehung zur Wirkung gebracht werden können.


Bei Entwicklung digitaler Ergonomietools, die bisherige klassische Ergonomie-Screeningverfahren umsetzen, werden im engeren Sinne keine neuen Methoden entwickelt, sondern vorhandene umgesetzt. Insofern kann man theoretisch davon ausgehen, dass die Zuverlässigkeit der digitalen Ergonomiebewertung vom Papier- und Bleistiftverfahren, auf dem sie basiert, abhängt. Neu sind Ergonomiesimulation, Interaktionsformen und Ergebnisdarstellungen. Die Methoden an sich verlangen allerdings, unabhängig von der Technologie, generell ein gewisses Abstraktionsniveau des Anwenders bei Erfassung der Merkmale, besonders wenn sie nicht metrisch bzw. metrisch eingeschränkt vorliegen. Bei Umsetzung der Methoden in digitale Ergonomietools treten vielmehr die Unzulänglichkeiten bzw. Lücken der Verfahren zutage, die auch bei konventioneller Nutzung beim Anwender zu Beurteilungsfehlern oder Unsicherheiten führen. Ergonomiemethoden in konventioneller Technologie werden über einen iterativen Prozess, bei der Merkmale erfahrungsgeleitet kontrolliert und nachgebessert werden, validiert und nähern sich dabei einer angestrebten Methodengenauigkeit an. Die verbleibende Methodenungenauigkeit in Form widersprüchlicher, unscharfer, unbestimmt beschriebener Prozeduren und Merkmale (weiche Kriterien), sind jedoch bei Entwicklung von Softwarelösungen zu eliminieren. Die fehlende Konsistenz der Größen ist durch Annahmen zu kompensieren, um daraus formale Regeln ableiten zu können. Die Erweiterung und Anpassung bei der Methodenaufbereitung für Softwarelösungen erbringt bei digitaler Simulation dann aller-


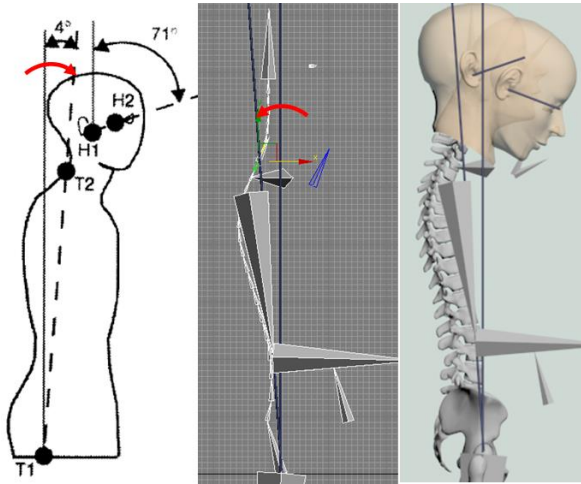
dings eine hohe Reliabilität (Wiederholbarkeit, Reproduzierbarkeit), Konsistenz (Widerspruchsfreiheit) und Erweiterung des Anwendungsspektrums.

Daher sind statt bzw. neben Validitätskonzepten zur Überprüfung der digitalen Anwendungen viel stärker Entwicklungskonzepte erforderlich, die bei konsistenter Umsetzung der Methodenmerkmale unterstützen bzw. überhaupt erst einmal dafür Standards setzen.

Die bisher in konservativen Technologien genutzten Ergonomiemethoden führen zu den im Folgenden genannten Problemen bei rechnerunterstützter Aufbereitung. Dabei werden in Tabelle 1 Defizite nur punktuell und beispielhaft angesprochen. Die Ursachen sind naheliegend und vielfach in der Natur menschlicher Eigenschaften selbst zu suchen.

**Tabelle 1:** Probleme bei Methodenumsetzung in digitale Technologien durch vielfach unscharfe, unbestimmte, umgangssprachliche Beschreibungen der Ergonomieanforderungen

Methodenmerkmale etlicher Verfahren besonders zur Beurteilung des Gesundheitsrisikos von Muskel-Skelett-Erkrankungen liegen nicht metrisch, sondern in ausschließlich beschreibender Form vor.	
<b>z. B.:</b> Verfahren OWAS zur Beurteilung von Körperzwangshaltungen Einstufung der Rückenhaltung beschrieben als „gerade“, „gebeugt“	<b>Anmerkung:</b> Ab wann ist ein Rücken noch gerade oder bereits gebeugt? Es fehlen Winkelangaben, die aus der Zusatzliteratur entnommen werden müssen. Hier wird jeder Entwickler andere Literatur heranziehen und eigene Annahmen treffen.
Lückenhafte Beschreibung von Merkmalen, fehlende Merkmalskombinationen	
<b>z. B.:</b> Verfahren OWAS: Rückenhaltung, beschrieben als „gebeugt“ bzw. als „Rücken gedreht oder zur Seite gebeugt“.	<b>Anmerkung:</b> Wie wird eine sitzende Rückenhaltung „nach hinten gebeugt“, „abgestützt“ oder „nicht abgestützt“ bewertet?
<b>z. B.:</b> Verfahren OWAS: Rückenhaltung, beschrieben als „Rücken gedreht oder zur Seite gebeugt“.	<b>Anmerkung:</b> Es fehlt die UND-Kombination „gedreht <u>und</u> zur Seite gebeugt“ und deren Wertung.
Zweifelhafte (nicht mehr dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand entsprechende) Merkmalskombinationen und Risikoeinstufung	
<b>z. B.:</b> Verfahren OWAS: Die Haltung „Rücken gerade, Stehen auf einem Bein, beide Arme über Schulterhöhe, Lastgewicht > 20 kg“ führt zur Einstufung grün: „Körperhaltung normal, Maßnahmen nicht notwendig“   <p style="text-align: center;">Beine Last  <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</span> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">1</span> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</span> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">3</span> → ●          Rücken Arme</p>	<b>Anmerkung:</b> hier wird Lastenhandhabung in ein Verfahren vordergründig zur Einstufung von Körperhaltungen integriert (Entstehung des Verfahrens in den 70er Jahren), zur Bewertung von Lastenhandhabung ist OWAS nicht geeignet. Der unerfahrene Nutzer könnte jedoch einzelne Vorgänge der Lastenhandhabung gleich nebenbei mit OWAS bewerten. Die grüne Einstufung der genannten Merkmalskombination entspricht nicht mehr dem wissenschaftlichen Erkenntnisstand.
Kombination metrischer und unscharfer Merkmale führt zu einem quantitativen Gesamtergebnis	
<b>z. B.:</b> Verfahren RULA zur Beurteilung von Belastungen der oberen Extremitäten: Punktwert für Kopfflexion: 0° bis 10° (theoretisch messbar, in der Praxis nur abschätzbar) Punktwert für „Kopf gedreht“	<b>Anmerkung:</b> Verknüpfung objektives und subjektives Kriterium; die Gesamtpunktzahl suggeriert ein genaues Ergebnis.

<p>aus beiden Einstufungen leitet sich ein Gesamtpunktwert ab.</p>	
<p>Fehlerhaft interpretierbare Merkmalsfestlegungen</p>	
<p><b>z. B.:</b> Verfahren RULA:                  Punktaddition +1 für „Muskelarbeit bei statischer Körperhaltung länger als eine Minute“</p>	<p><b>Anmerkung:</b> nach DIN EN 1005-1 gilt eine Körperhaltung als statisch, wenn sie für mehr als 4 s eingehalten wird. Es entsteht ein scheinbarer Widerspruch zwischen der Definition statisch für eine einzelne Körperhaltung und deren Anwendung im RULA-Verfahren, das vorausgewählte <u>Einzelhaltungen</u> bewertet.</p>
<p>Gelenkwinkelangaben der klassischen Methoden stammen aus der Zeit der Schablottensomatographie und werden daher zweidimensional angegeben.</p>	
<p><b>z. B.:</b> der Hüftwinkel zwischen Oberschenkel und Torso wird in etlichen Normen, z. B. nach DIN 33408-1 in Seitenansicht angegeben.</p>	<p><b>Anmerkung:</b> die kinematischen Kettenglieder Wirbelsäule, bestehend aus 24 Wirbeln und die Gliedmaßen verkörpern Raumvektoren, eine direkte Vergleichbarkeit mit zweidimensionalen Winkeln ist nicht möglich.</p> 
<p>Fehlerhafte Merkmalsdefinitionen</p>	
<p><b>z. B.:</b> DIN EN 1005-4 verweist im Punkt 4.3.2.2 auf die Norm ISO 11226:2000, in welcher eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens zur Bestimmung der Rumpfhaltung und Bewegung enthalten ist. Die Rumpfbeugung wird dort zwischen der Vertikalen und einer Linie durch die Punkte Trochanter major und dem Dornfortsatz des 7. Halswirbels (C7) beschrieben, allerdings werden die Ausrichtung der Geraden und die Winkelvorzeichen falsch definiert.</p>	
	

Vereinfachte Messsysteme für Körperwinkel, die realitätsfern sind

**z. B.:** Die Rumpfflexion wird als Winkel zwischen zwei gedachten Linien (s. o.) definiert. Die Gelenkwinkelbereiche der DIN EN 1005-4 beziehen sich z. B. auf Zonen 0° bis 20°, 20° bis 60°.

**Anmerkung:** Die Wirbelsäule besteht aus 24 Wirbeln, die unterschiedlich an einer Flexion des Rumpfes beteiligt sind. Die Summe aller Winkel der involvierten Wirbelgelenke ist ungleich den genannten Zonen und kann auch nicht direkt verglichen werden. D. h. die Summe aller Wirbelgelenke von z. B. 60° entspricht nicht 60° Auslenkung der Linie zwischen den beiden Punkten Trochantor major – C7. Theoretisch wäre demnach eine exakte Winkeleinstellung nicht ohne weiteres möglich, ebenso verlangt die Winkelmessung eine Überführung von Raumwinkeln in eine zweidimensionale Betrachtung. Außerdem wird die Rumpfbeugung von einer Beckenbewegung begleitet. Dazu gibt es keine ergonomischen Normwerte.

Mangelhafte Übereinstimmung von Daten zur Zonenbewertungen in der Literatur (i. S. einer Stufung nach Ampelfarben)

**z. B.:** Bei Literaturrecherche zur Zonenbewertung von Gelenkwinkelgrenzen gibt es nur geringe Übereinstimmung der Daten verschiedener Quellen. Des Weiteren lassen sich nicht alle Winkelabstufungen 1:1 in das 3-Zonenmodell überführen. Bedingungen für Winkeldefinitionen und ihr Geltungsbereich sind teilweise nicht dokumentiert, Zonenanzahl und -definitionen weichen teilweise voneinander ab.

Freiheitsgrad	-95	-90	-85	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-45	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105										
EGIA X	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-						
EGIA Y	-	-	-	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
EGIA Z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
LUBA X	3	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
LUBA Y	-	-	-	-	-	-	4	3	3	3	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
LUBA Z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Drury X	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	3	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
Drury Y	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Drury Z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4	4	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FIULA X	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
FIULA Y	-	-	-	-	-	-	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
FIULA Z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DWAS X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
DWAS Y	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
DWAS Z	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

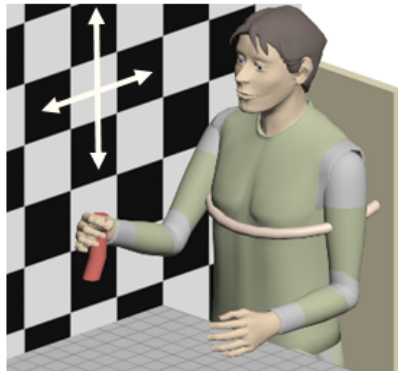
Versuchsdesign bei Labormessungen aus Gründen des Mess- und Zeitaufwands nicht an die Anthropometrie der Nutzer anpassbar, Notwendigkeit bestimmter Kompromisse

**z. B.:** Bei Messung maximaler Aktionskräfte des Ganzkörpersystems für den MKA wurde der Kraftangriffspunkt pro Körperhaltung in Höhe und Entfernung für alle Probanden fix festgelegt. Die Geometrie des Versuchsstandes wirkt sich auf das situative, individuelle Kraftvermögen aus. Die Verfahrensregeln des MKA selbst operieren mit qualitativen Höhenbereichen, deren Grenzen fließend sind, Armreichweiten entfallen ganz. Messbedingungen für die Körperhaltung Knien sind nicht beschrieben.

**Anmerkung:** Die bewusst mit Freiheitsgraden versehenen Messhaltungen erschweren eine formale Beschreibung. Für eine rechen-technische Umsetzung benötigt man perzentilierte und z. B. in kartesischen Koordinaten ausdrückbare Raumsektoren, die den Körperhaltungen des MKA zugeordnet werden können. Diese liegen so in der Papier- und Bleistiftmethode nicht vor.



Messbedingungen und Geltungsbereiche für Verfahren nicht definiert	
<p><b>z. B.:</b> Die Messdaten (Aktionskräfte Hand-Arm-System) des Grenzkraftverfahrens nach Siemens und Derivate wurde entstehungsbedingt (ursprünglich unternehmensinterne Datenerhebung und -anwendung) nicht für die Fachwelt dokumentiert, weder zu Messhaltungen, Probanden und zur Qualität der Daten. Bei Weiterentwicklung und Modifikation des Verfahrens haben es die Entwickler versäumt, diese fehlenden Angaben zu hinterfragen, zu dokumentieren und die Anwendungsbedingungen zu definieren. So geht z. B. aus der Fachliteratur nicht hervor, ob es sich bei den maximalen Aktionskräften um ein- oder beidhändige Kraftdaten für welche Körperhaltung und für welches Kraftperzentil handelt.</p>	<p><b>Anmerkung:</b> Die Daten sind übrigens in sitzender angegurter Haltung als einhändige Kräfte bei jungen Männern und Frauen, Siemenspersonal und Studenten, gemessen worden, Probandenzahl: ca. 20 bis 30 (Kamusella 2014).</p>



Telefonnotiz mit Herrn Balk (2014):  
ehemaliger Mitarbeiter im Siemens Konzern,  
Bereich Angewandte Arbeitswissenschaft

- Stabgriff/ Kugelgriff
- Brustgurt
- Abstützung Rücken
- Messwand mit Raster etc.
- Versuchspersonen: ca. 20 Personen Siemens incl. Studenten aus Nürnberg
- Männer/Frauen: ca. 20 – 30 Jahre alt

**Fehlende Ergonomiedaten (infolge Erfassungsaufwand)**

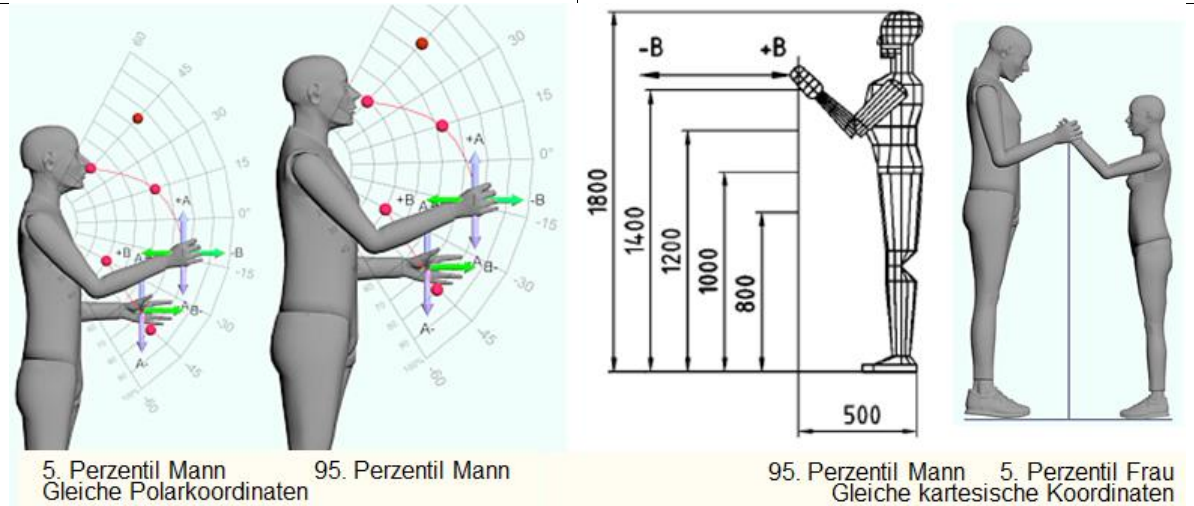
<p><b>z. B.:</b> DIN 33411, Teil 4 und 5 umfasst maximale Aktionskräfte in definierten Ausführungsbedingungen. Allerdings liegen die Messdaten nur für eine begrenzte Anzahl von Kraftausübungsfällen und für definierte Körperhaltungen vor.</p>	<p><b>Anmerkung:</b> Isodynendaten können zwar rechentechnisch aufbereitet und dargestellt werden, jedoch ist ein automatischer Zugriff auf eine interne Datenbank, die aufgrund fehlender Daten viele weiße Felder aufweist, nur begrenzt anwendungsorientiert. Dieser Sachverhalt existiert auch bei Nutzung der Papier- und Bleistiftdaten, ist aber nicht so offensichtlich. Erst eine Datenbank macht das Ausmaß fehlender Daten deutlich.</p>
---	---

	Kraftrichtung	Körperstellung	Körperhaltung	Kraftausübungsart	Seitenwinkel	Geschlecht	Kraftdatenbank
Polare Darstellung	± A ± B ± C	Stehen	aufrecht, frei, Füße nebeneinander	einhändig	0°, 30°, 60°, 90°	männlich	DIN 33411-4:1987
					0°, 90°		
				0°, 90°			
	± A ± B	Stehen	aufrecht, frei, versetzte Fußstellung	beidhändig	0°, 30°	männlich	
	0°, 30°						
	± A ± B ± C	Stehen	Rumpf aufrecht, Füße nebeneinander	beidhändig	15°	männlich	DIN 33411-5:1999
				einhändig			
	± B	Knien	frei, Füße in Schrittstellung	beidhändig	0°	männlich	

Verwendung verschiedener Darstellungsformen (z. B. Koordinatensysteme) für Ergonomiedaten

**z. B.:** Die DIN 33411, Teil 4 und 5 listet maximale statische Aktionskräfte in Polar- und kartesischen Koordinatensystemen.

**Anmerkung:** Während Polarkoordinatendaten auf beliebige Körperhöhenpercentile übertragbar sind, geht das für Kraftangriffspunkte in kartesischen Koordinaten nicht, insbesondere dann nicht, wenn daraus zu viele Freiheitsgrade in den Messhaltungen resultieren.



Widersprüchliche Messdaten aufgrund unterschiedlichen Versuchsdesigns

**z. B.:** In den Teilen 4 und 5 der DIN 33411 kommt es zu Überschneidungen von Kraftpunkten. Zwischen Kraftdatenbanken beider Normteile liegen Überschneidungen in sieben Kraftausübungsfällen vor, wobei bis zu vierfache Abweichungen in den Daten auftreten:

**Anmerkung:** Bei Anlegung einer einheitlichen Software-Datenbank können dadurch Zugriffsfehler entstehen (gleiche Datenfelder). Es sind Zusatzbedingungen zu definieren, unter denen diese Datendifferenz in einem Ergonomietool plausibilisiert wird.

Kraftausübungsfall	DIN 33411-4	DIN 33411-5	Kraftdifferenz
-B, $\alpha=15^\circ$ , $a=50\%$ , $\beta=0^\circ$	150 N	541 N	391 N
+B, $\alpha=0^\circ$ , $a=80\%$ , $\beta=0^\circ$	381 N	100 N	281 N
-B, $\alpha=0^\circ$ , $a=40\%$ , $\beta=0^\circ$	579 N	160 N	419 N
-B, $\alpha=-15^\circ$ , $a=40\%$ , $\beta=0^\circ$	675 N	170 N	505 N
+B, $\alpha=-15^\circ$ , $a=80\%$ , $\beta=0^\circ$	367 N	105 N	262 N
-B, $\alpha=-45^\circ$ , $a=40\%$ , $\beta=0^\circ$	596 N	225 N	371 N
-B, $\alpha=-45^\circ$ , $a=50\%$ , $\beta=0^\circ$	647 N	240 N	407 N


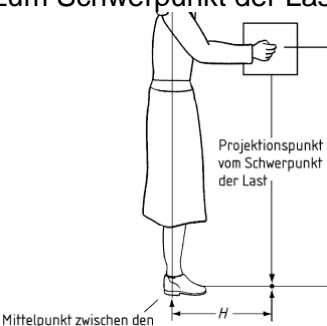
Abweichung normativer Daten untereinander und zu gesicherten arbeitswissenschaftlichen Erkenntnissen

**z. B.:** Daten zur geometrischen Auslegung alphanumerischer und Bildzeichen sowie zu Seh winkeln lassen eine große Auslegungsspanne zu. So weist der Seh Winkel in Bogenminuten Werte von 15' bis 31' auf (DIN EN 894-2; GUV 50.12). Das Verhältnis Zeichenbreite zu -höhe wird angegeben mit 0.5:1 bis 1:1 (DIN EN 29241-3; DIN Fachbericht 124).

Begriffsdefinitionen aufgrund des Beurteilungsniveaus (z. B. Screening) nicht umfassend und eindeutig genug

**z. B.:** die Leitmerkmalmethode zur Lastenhandhabung definiert u. a. vier Haltungswichtigungen. Dabei treten Begriffe wie „körperfern“, „weites Vorneigen“, „tiefes Beugen“, „Last am Körper“, „körper-

**Anmerkung:** Die Feinheiten dieser Abstufung werden dem Anwender durch die umgangssprachlichen Begriffe nicht eindeutig genug vermittelt. Ebenso bleibt offen, woran „körperfern“ gemessen wird (Hebelarm): der

<p>nah“ etc. auf.</p> 	<p>Anwender könnte je nach Kenntnissen gedanklich eine Strecke von den haltenden Händen versus Lastschwerpunkt bis zur Körperhülle oder bis zur Lendenwirbelsäule oder bis zum Körperschwerpunkt messen.</p>
<p><b>z. B.:</b> Verwirrend sind in diesem Zusammenhang Angaben in der DIN EN 1005-1, die den Abstand des Mittelpunkts zwischen den inneren Fußknöcheln bis zum Mittelpunkt beider Hände als Hebelarm definieren                  In Skizzen dazu wird der Projektionspunkt zum Schwerpunkt der Last gleich gesetzt</p> 	<p><b>Anmerkung:</b> Es wird vernachlässigt, dass bei hockender oder weit vorgebeugter Haltung das Becken mit Lendenwirbelsäule weit über die Fußknöchel hinausragen und damit den wahren Hebelarm verändern.                  Ist der Schwerpunkt der Last ungleich dem Mittelpunkt der Hände, wird der Hebelarm ebenfalls verfälscht.</p>

## 2.2 Lösungsansätze zur Minimierung der Methodendefizite in eigenen digitalen Ergonomietool-Entwicklungen

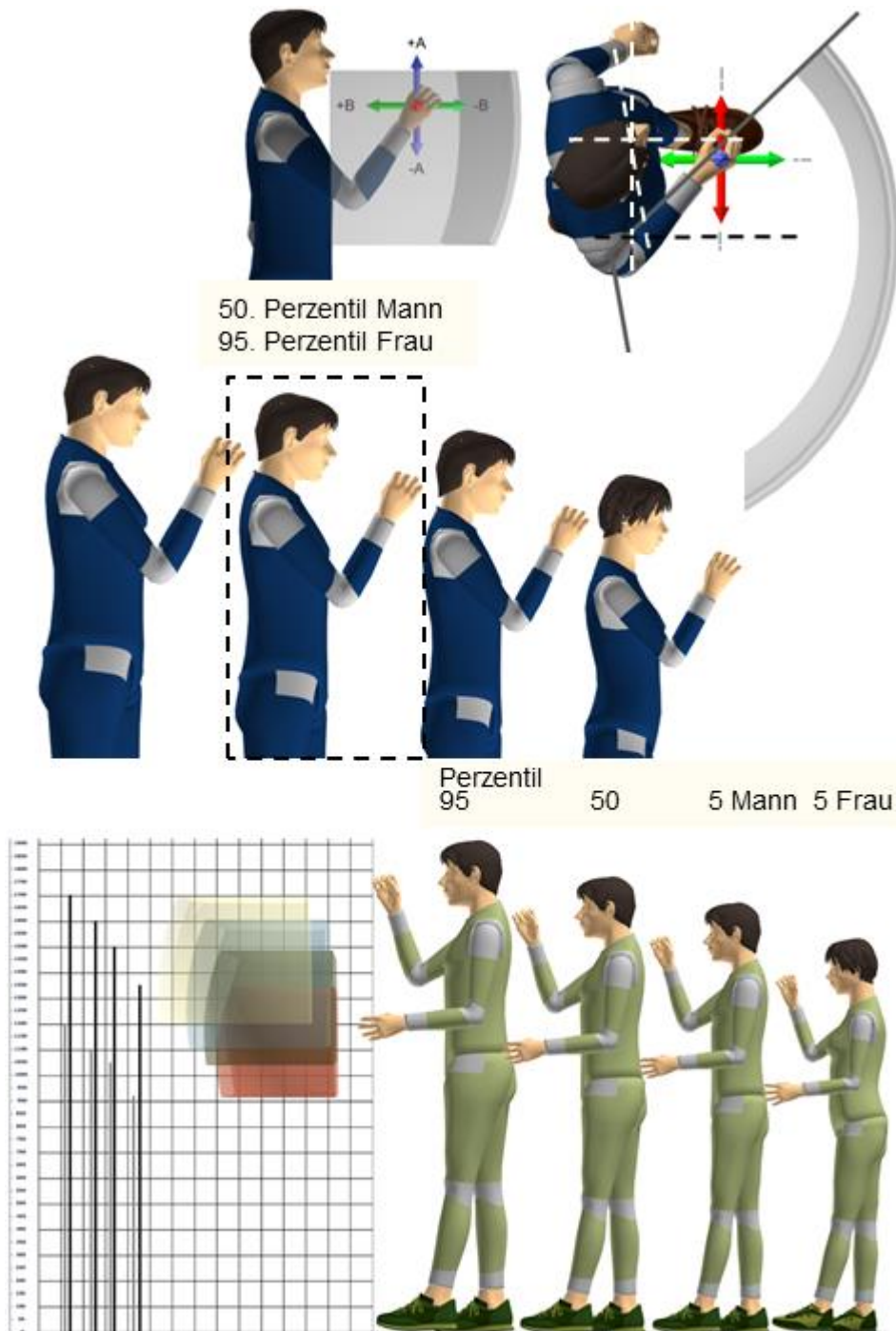
Wiederum nur punktuell soll aufgezeigt werden, welche Ansätze einer Methodenaufbereitung in den eigenen Softwarelösungen verfolgt wurden. Dabei wird ersichtlich, dass eine Umsetzung umgangssprachlicher Beschreibungen in mathematische Modelle mit Kompromissen verbunden ist.

Exemplarisch wird hier lediglich die Integration eines Aspekts des MKA erläutert. Der MKA umfasst z. B. tabellarisch gelistet Maximalkräfte u. a. für die stehende Körperstellung in der Körperhaltung aufrecht, gebeugt und über Kopf. Höhen- und Entfernungsbereiche sind für diese Einstufung nicht definiert, auch nicht für unterschiedliche Körperhöhenperzentile. In der Praxis sieht der Anwender vor Ort bei einer konkreten Person, ob diese über Kopf oder gebeugt arbeitet, wobei der Ermessensspielraum bei Abgrenzung dieser Haltungen auch hier groß ist und von der Erfahrung des Anwenders abhängt. Zur Auswertung einer Haltungspose des Menschmodells müssen formale Regeln gefunden werden, die eindeutig und für jedes Perzentil gleichermaßen anwendbar werden. Gewissermaßen kann das über Definition einer synthetischen Messhaltung abgeleitet werden. Die Messbedingungen im Labor zum MKA sahen für die Probanden eine definierte Höhe des Kraftangriffspunktes (1500 mm) und eine definierte Entfernung der Füße zum Kraftpunkt (200 mm und 400 mm links, rechts) für diese Haltung aufrecht stehend vor. Für andere Messhaltungen waren die geometrischen Bedingungen andere. Die Körperausrichtung der unterschiedlich großen Probanden während der Messung wich je nach individuellen Gegebenheiten voneinander ab. Unter der Annahme, dass der Kraftangriffspunkt im kartesischen Koordinatensystem für den Durchschnittsprobanden (50. männliches Körperhöhenperzentil) passfähig ist, kann eine Durchschnittsmesshaltung für dieses Perzentil bestimmt werden, welche dann gleichermaßen als Schablone auf andere Perzentile

übertragen wird. Die Körperhaltung ist demnach die bestimmende einheitliche Bezugsgröße. Dadurch ergeben sich für die einzelnen Körpergrößenklassen angepasste geänderte kartesische Koordinaten für den Kraftangriffspunkt aufrecht stehend. Darüber sind perzentilierte Bewegungsräume ableitbar, wobei durch die oben getroffenen Annahmen zunächst nur perzentilierte Höhen bestimmt sind. Zusatzkriterien und weiterführende Annahmen sind erforderlich, um den Raumsektor in Greifweite und seitlich zu begrenzen. Ebenso unterscheidet der MKA ohne nähere Definition einen asymmetrischen von einem symmetrisch ausgeführten Kraftausübungsfall.

Körpernah kann dabei durch den entferntesten Punkt der Körperhülle zu den Händen definiert sein, körperfern durch die äußere Begrenzung der Greifweite. Die seitliche horizontale Begrenzung in der Transversalebene ergibt sich lateral durch die Greifweite, medial durch Orientierung an Ergonomieanforderungen der Fachliteratur, z. B. (Ellegast 2005), (DIN 15996: 2008). So sollte der Unterarm nicht über die Körpermitte hinaus arbeiten und beschränkt darüber die Einwärtsdrehung des Unterarms. Ebenso führt die Komfortbewegung von Augen, Kopf und Rumpf zur Begrenzung der Ausrichtung der Sehachse und dem Sehfeld für symmetrisches Arbeiten (s. Abbildung 3).

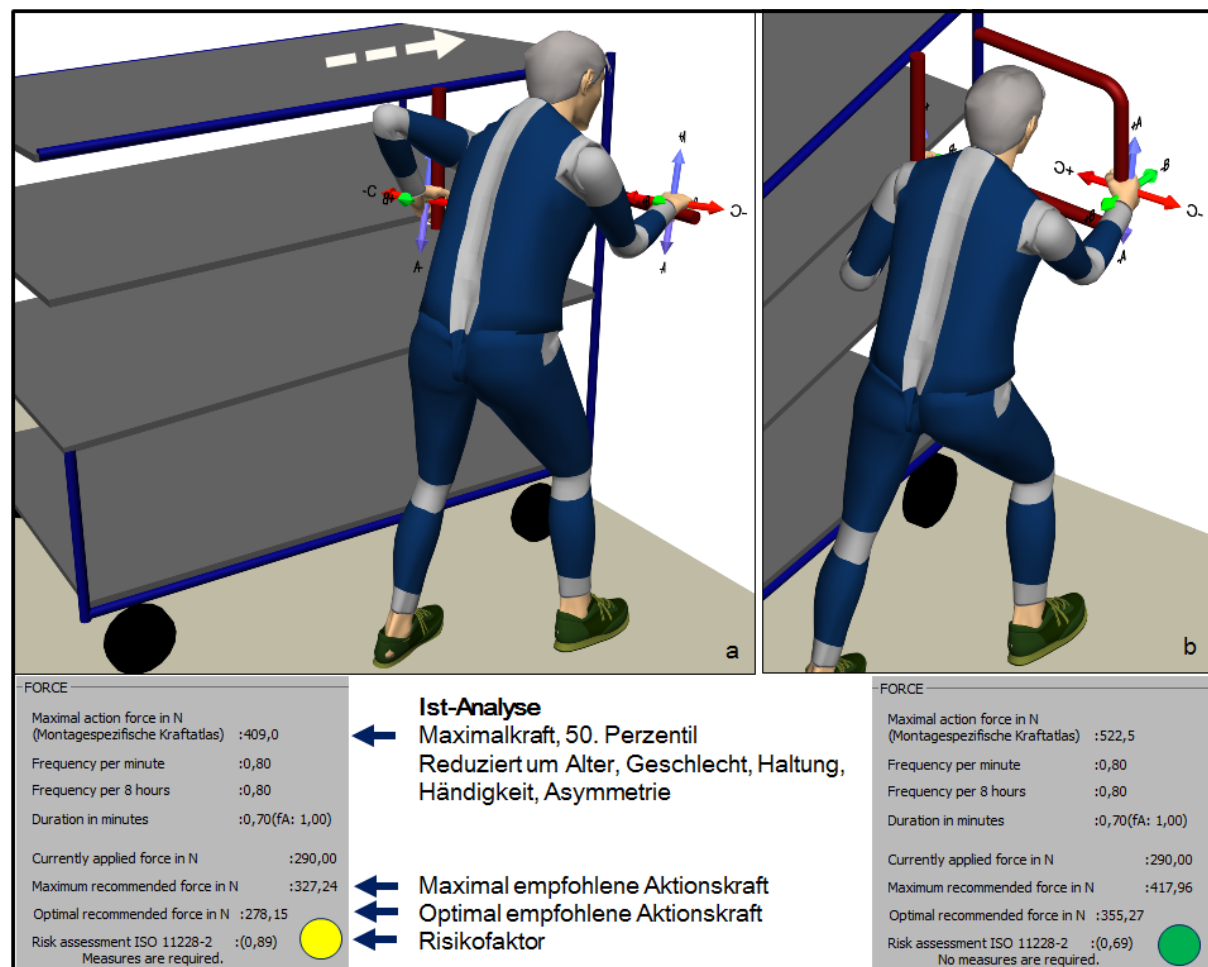
Die abgeleiteten Bewegungsräume definieren den Wertebereich der Kraftangriffspunkte. Bewegt sich das Handtarget des Menschmodells in diesen Bereichsgrenzen, erfolgt programmintern ein Datenbankzugriff auf zugehörige isometrische Maximalkraftwerte. Auf deren Basis werden empfohlene Kraftwerte unter Berücksichtigung personen- und tätigkeitsspezifischer Parameter und eine Risikobeurteilung über Ermittlung des Kraftindex nach DIN EN 1005-3 bzw. ISO 11228-2 automatisch errechnet und ausgewiesen.



**Abbildung 3:** Raumsektor möglicher Kraftangriffspunkte am Beispiel Stehen aufrecht für Körpergrößenklassen Mann/Frau

Im Beispiel einer Ist-Analyse, der Schubbewegung von Fächerwagen (Abbildung 4 a), ermittelt das digitale Ergonomietool „Körperkraftbewertung“ für die Situation einen Kraftindex von 0,89, der in die gelbe Risikozone fällt. Das Risiko von Erkrankungen und Verletzungen kann nicht außer Acht gelassen werden. Um in die empfohlene Zone zu wechseln, dürfte die Aktionskraft den optimalen Wert von 278 N nicht übersteigen. Stellschrauben der Veränderung ergeben sich aus Modifikation der Körperhaltung, die über Rumpftorsion und Höhe des Kraftangriffspunktes beeinflusst wird. Eine Körperhaltungsanpassung des Menschmodells führt im Ergonomietool zu einer in Echtzeit angezeigten aktualisierten Wertänderung von Aktionskräften und des

Kraftindex (Risikowertes). Die Veränderungstendenz ist demnach permanent nachvollziehbar und kann beliebige Iterationen durchlaufen. Im Beispiel führt eine Griffpositionsanpassung zur Verbesserung der Kraftausübung, was sich in der Senkung des Risikowertes ausdrückt (s. Abbildung 4 b). Als Maßnahme kann die Griffstange in Form und Lage gestaltet werden.



**Abbildung 4:** Digitale Ergonomiebewertung der Schubkräfte nach MKA am Beispiel Vorwärtsbewegung eines Fächerwagens: Einfluss von Rumpftorsion und Höhe Kraftangriffspunkt anhand Pose a und b

### 3. Diskussion

Insgesamt wird ersichtlich, dass die Ergonomieverfahren in konventioneller Anwendung etlichen Auslegungsspielraum lassen, vielfach nicht metrische Merkmale oder z. T. unklare Definitionen beinhalten und ihnen vordergründig eine zweidimensionale Denkweise anhaftet, die eine rechentechnische Umsetzung erschweren. Ergänzend heranzuziehende Daten aus Normen und Fachliteratur erbringen hier auch nicht immer den erwünschten Erfolg und die Klarheit. Demnach stehen Entwickler digitaler Ergonomiewerkzeuge weniger vor der Frage, ob die (digital) umgesetzten Methoden valide sind, da praxisübliche, bewährte Methoden mit breiter industrieller Anwendung zugrunde liegen. Vielmehr ist zu hinterfragen, wie exakt und eindeutig die Methodenvorgaben insbesondere vor dem Hintergrund einer rechentechnischen Aufbereitung sind. In der Vergangenheit war das Vorgehen für eine Anwendung als

Papier- und Bleistiftmethode ausreichend und die Defizite wurden nicht so augenscheinlich. Der Anwender bzw. Beobachter trifft in den vordergründig vor Ort durchgeführten Analysen am realen Menschen erfahrungsgeleitet Entscheidungen, abstrahiert und trifft eigene Annahmen. Erst bei Methodenumsetzung, welche i. allg. mathematisch exakte, formale Regeln voraussetzt, wird das Definitionsmanko offensichtlich. Dieses sollte für die Entwicklung von Softwarelösungen durch Standards beseitigt bzw. minimiert werden, um den neuen digitalen Technologien Rechnung zu tragen.

Evtl. sind hier Fuzzylogiktheorien hilfreich, welche bei einer Modellierung umgangssprachlicher Beschreibungen, die verwischt, unsicher, unbestimmt sind, Entwicklungsansätze bieten. In diesem Zusammenhang gilt es, Grenzbereiche für Zonen neu zu überdenken bzw. modifiziert zu definieren. Die Anzahl etablierter Ergonomieverfahren zumindest zur Beurteilung physischer Belastungen ist begrenzt und überschaubar. Es wäre wünschenswert, wenn für diese Ergonomie-Standardverfahren einheitliche Vorgaben festgelegt würden.

#### 4. Literatur

- Caffier G, Steinberg U, Liebers F (1999) Praxisorientiertes Methodeninventar zur Belastungs- und Beanspruchungsbeurteilung im Zusammenhang mit arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen. 1. Auflage. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH 1999. (Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschungsbericht, Fb 850)
- Kamusella C, Schmauder M (2009) Ergotyping im rechnerunterstützten Entwicklungs- und Gestaltungsprozess. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 63:212-222.
- Kamusella C, Schmauder M (2010) Ergotyping®-Tool „Sichtbewertung“. Dokumentation des 56. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft in Darmstadt, 24.-26.03.2010. GfA-Press Dortmund (2010). ISBN 978-3-936804-08-9, 135-138.
- Kamusella C, Ördögh L (2011) Ergotyping®-Tool „Körperkräfte“. Dokumentation des 57. Arbeitswissenschaftlichen Kongresses der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft in Chemnitz, 23.-25.03.2011. GfA-Press Dortmund (2011). ISBN 978-3-936804-10-2, 623-626.
- Kamusella C (2012) Digitale Ergonomie-Tools zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte im Produktentstehungsprozess. In: Tagungsband zum 10. Gemeinsamen Kolloquium Konstruktionstechnik. KT2012: Entwickeln – Entwerfen – Erleben. Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung. 14.-15. Juni 2012 Dresden (2012). ISBN 978-3-942710-80-0, 123-143.
- Kamusella C (2014) Gesprächsnotiz mit Herrn Balk, ehemaliger Mitarbeiter im Siemens Konzern, Bereich Angewandte Arbeitswissenschaft zur Körperkraftmessung für das Verfahren Siemens und Derivate
- Kamusella C, Scherstjanoi E, Schmauder M (2015) Gefährdungsbeurteilung manueller Lastenhandhabung mit digitalem Ergonomiewerkzeug – ein Lösungsansatz. In: „sicher ist sicher“. (66) 2015/1. Erich Schmidt Verlag. ISSN 2199-7330, 20-26.
- Mühlstedt J (2012) Entwicklung eines Modells dynamisch-muskulärer Arbeitsbeanspruchungen auf Basis digitaler Menschenmodelle. Chemnitz: Universitätsverlag Chemnitz
- Wakula J, Berg K, Schaub Kh, Bruder R, Glitsch U, Ellegast R (2009) Der Montagespezifische Kraftatlas. BGIA-Report 3/2009. Hrsg. Deutsche gesetzliche Unfallversicherung Berlin.
- Wischniewski S, (2013) Digitale Ergonomie 2025. Trends und Strategien zur Gestaltung gebrauchstauglicher Produkte und sicherer, gesunder und wettbewerbsfähiger sozio-technischer Arbeitssysteme. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.