

## Transfer von Bewegungs- und Körperhaltungsdaten in der Digitalen Ergonomie

Christian PLEGGE<sup>1</sup>, Dominik BONIN<sup>2</sup>, Sascha WISCHNIEWSKI<sup>2</sup>,  
Thomas ALEXANDER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Fraunhofer-Institut für Kommunikation, Informationsverarbeitung und Ergonomie  
FKIE, Fraunhoferstr. 20, D-53343 Wachtberg*

<sup>2</sup> *Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)  
Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund*

**Kurzfassung:** Die demographische Entwicklung der Gesellschaft geht mit einer zunehmenden Verlängerung des Erwerbslebens einher. Dieser Tatsache folgend, ändern sich die Anforderungen an die Ausgestaltung der im Beruf zu verrichtenden Tätigkeiten. Neue Technologien unterstützen bei deren Analyse. So erfolgt z.B. die Ergonomiebewertung in den Prozessen der Arbeitsplatzgestaltung und der Produktionsplanung zunehmend digital unter Verwendung digitaler Menschmodelle. Zur umfassenden Generierung von Informationen kann es hilfreich sein, verschiedene digitale Menschmodelle oder auch „externe“ Bewegungs- und Körperhaltungserfassungen in Kombination einzusetzen. Die Vielzahl an Modellen und Methoden erschwert die Kompatibilität der Daten untereinander, oft durch proprietäre Datenformate ohne öffentlich verfügbare Spezifikation.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages werden exemplarisch biomechanische Eigenschaften etablierter Menschmodelle und Verfahren der Bewegungserfassung erläutert. Darauf aufbauend wird ein Framework für den Austausch von Bewegungsdaten mit Bezug auf bestehende Datenformate diskutiert. Abschließend erfolgt eine Einordnung zur Eignung für die (teil-)automatisierte Bewertung im Rahmen des Forschungsprojektes ENgAge4Pro.

**Schlüsselwörter:** Digitale Ergonomie, Digital Human Modeling, Digitale Menschmodelle, Datenformate, Produktionsergonomie, Motion Capturing

### 1. Hintergrund

Die Anforderungen an die Ausgestaltung beruflich zu verrichtender Tätigkeiten ändern sich in Folge des demographischen Wandels und der einhergehenden Verlängerung des Erwerbslebens. Die Analyse körperlicher Tätigkeiten wird durch neue Technologien unterstützt. Mittlerweile werden digitale Menschmodelle oft zur Ergonomiebewertung von Arbeitsplätzen und zur Planung von Produktionsanlagen eingesetzt. Die prospektive, dreidimensionale Simulation von Arbeitsabläufen und deren Bewertung trägt zur Anpassung der Arbeitsplätze an die Bedürfnisse älterer Mitarbeiter bei. Um eine umfassende Simulation der Arbeitsabläufe vornehmen zu können, kann die Kombination verschiedener digitaler Menschmodelle angebracht sein. Bedingt durch die Vielzahl an Menschmodellen und Herstellern sowie proprietären Datenformaten wird der Austausch von Bewegungsdaten erschwert. Ziel dieses Beitrags ist es daher, einen Weg aufzuzeigen, der es ermöglicht, Haltungs-

und Bewegungsdaten zwischen unterschiedlichen digitalen Menschmodellen auszutauschen.

## 2. Biomechanische Eigenschaften digitaler Menschmodelle

Digitale Menschmodelle haben ihren Ursprung in unterschiedlichsten Branchen und wurden entsprechend für zahlreiche, verschiedene Einsatzzwecke entwickelt (Tümmler 2007). Entsprechend spiegeln sich die speziellen Anforderungen der unterschiedlichen Einsatzbereiche (z.B. Ergonomieauslegung, Arbeitswissenschaft, Biomechanik, Prothetik, Crash-Simulationen, etc.) in Art und Umfang des Menschmodells wider. In Bezug auf die biomechanische Betrachtung von Körperhaltungen- und -bewegungen wurde vor allem die Komplexität des Skeletts als relevantes Kriterium identifiziert. Eng damit verknüpft ist die Notwendigkeit, dieses an individuelle, anthropometrische Eigenschaften anpassen zu können.

### 2.1 Komplexität ausgewählter Skelett- und Menschmodelle

Für die im Jahr 2010 von Microsoft eingeführte 3D-Kamera Microsoft Kinect steht seit Ende 2010 mit PrimeSense NITE und seit Anfang 2012 auch ein von Microsoft angebotenes Software Development Kit (SDK) zur Verfügung, das über die Bereitstellung eines Skelettmodells die Extraktion von Informationen zur Körperhaltung ermöglicht. Die Auflösung der inneren Skelette beider SDKs unterscheidet sich. Das in Microsofts SDK verwendete Skelett verfügt über 20 Gelenke (Jana 2012), die Software PrimeSense NITE 1.3 hingegen detektiert nur 15 Gelenke (PrimeSense 2010). Im Vergleich der Strukturen der inneren Skelette von Microsofts Kinect SDK und PrimeSense NITE 1.3 fällt auf, dass die distalen Gelenke der Extremitäten nicht im Skelett der NITE-Software repräsentiert sind. Zudem ist das innere Skelett im lumbalen Bereich der Wirbelsäule und im Zentrum des Beckens geringer aufgelöst. Nach dem Erfolg mit der ersten Kinect ist seit Mitte 2014 die „Kinect v2 for Windows“ auch für Endkunden erhältlich. Das innere Skelett der Kinect v2 wurde um einen zusätzlichen Punkt der Nackenregion sowie zwei Punkte pro Hand erweitert und besteht nun aus 25 Körperpunkten (The Kinect for Windows Team 2014). Die im Laufe der Zeit erfolgte Erweiterung des inneren Skeletts ermöglicht eine detailliertere Erfassung der Körpersegmente. Anzumerken ist jedoch, dass vor allem die Extremitäten detaillierter abgebildet werden, die Auflösung der Schulter- und Wirbelsäulenregion jedoch nicht erhöht wurde.

Ein klassisches und weit verbreitetes (Spanner-Ulmer & Mühlstedt 2010) Menschmodell zur Ergonomie und Komfortauslegung in Fahrzeugen ist „RAMSIS“ (Human Solutions, Kaiserslautern). RAMSIS verfügt über bis zu 53 Gelenke mit 1-3 Freiheitsgraden (Hudelmaier 2003), wobei die Komplexität durch Wahl des Handmodells (max. 16 Gelenke/Hand) stark variiert werden kann. Unter Ausschluss der Hände ergibt sich somit eine mit den Kinect-Modellen vergleichbare Auflösung des inneren Skeletts.

Das innere Skelett des digitalen Menschmodellierungstools JACK (Siemens Technomatix) besteht aus 78 Segmenten und 77 Gelenken. Durch die hohe Auflösung der Wirbelsäule im thorakalen wie auch im lumbalen Bereich ist eine gute Basis für detaillierte ergonomische und biomechanische Analysen vorhanden, sofern entsprechende Daten zur Parametrisierung des Modells vorliegen. Mit Blick auf die obere Extremität ist hervorzuheben, dass auch die Schulter- und Nackenregion durch

Widerspiegelung der Schlüsselbeine vergleichsweise detailliert abgebildet ist.

Der Editor menschlicher Arbeit (ema) ist ein Werkzeug, das eine einfach zu benutzende Modellierung und Simulation menschlicher Arbeit mit geringem Aufwand ermöglichen soll (Leschner 2014). Es verfügt trotz des primären Entwicklungszieles, die visuellen Arbeitsplanung in der digitalen Fabrik zu unterstützen (Leidholdt 2009) über ein detailliertes inneres Skelett aus 58 Segmenten (Schönherr 2013). Ähnlich des inneren Skeletts von RAMSIS resultiert die hohe Auflösung insbesondere aus dem Detailgrad der oberen Extremität (20 Segmente pro obere Extremität).

**Tabelle 1:** Übersicht über Detailgrad/Auflösung ausgewählter Menschmodelle.

Skelett-/Menschmodell		Detailgrad
<b>Microsoft Kinect v1</b>	Microsoft SDK	20 Gelenke
	PrimeSense NITE	15 Gelenke
<b>Microsoft Kinect v2</b>		25 Körperpunkte
<b>RAMSIS</b>		max. 53 Gelenke
<b>JACK</b>		78 Segmente
<b>Editor menschlicher Arbeit</b>		58 Segmente

Der Vergleich dieser Modelle ergab, dass diese z.T. sehr unterschiedlich strukturiert sind. Auch kann der Detailgrad, in Form der Anzahl von Gelenken/Segmenten, deutlich innerhalb eines Modells variieren.

## 2.2 Definition und Form kinematischer Informationen

Bewegungsdaten von Menschmodellen können in unterschiedlichen Formen vorliegen. Gängig ist vor allem die Angabe von Winkelverläufen der Gelenke (Keyvani et al. 2013) oder auch die Position von Referenzpunkten im Raum (Koordinaten).

Die Angabe von Gelenkwinkeln erfordert ein hierarchisch aufgebautes Skelett, von dessen Ursprung aus die Orientierung sämtlicher abgehender Segmente durch Beschreibung der Winkelstellung zum nächsthöheren Segment beschrieben wird. Zur Beschreibung der Orientierung zweier Segmente im Raum werden unterschiedliche Verfahren (Euler-/Kardanwinkel, Quaternionen) genutzt, die letztlich alle auf die Definition der lokalen Segmentachsen zurückgreifen (Winter 2009). Bei der Interpretation von Gelenkwinkeln muss daher die Definition der Segmentachsen bekannt sein. Sollten unterschiedliche Menschmodelle verschiedene Definitionen der Segmente verwenden, ist eine entsprechende Transformation notwendig, um die Gelenkwinkel in anderen Modellen sinnvoll verwenden zu können.

Werden die Bewegungsdaten in Form von Koordinaten unterschiedlicher Referenzpunkte angegeben, sind diese losgelöst von einer Skeletthierarchie und können zur Definition und Skalierung des Skeletts herangezogen werden, da sie i.d.R. anthropometrische Daten implizit enthalten. Verglichen mit der Angabe von Gelenkwinkeln ist der Aufwand zur Interpretation größer, da die Koordinaten erst mit einem Skelett hinterlegt werden müssen. Zudem besteht die Möglichkeit, dass bei Interpretation der Markerkoordinaten Fehler, wie z.B. ungenaue Bestimmung der Gelenkzentren, die Ergebnisse beeinträchtigen (Schwartz & Rozumalski 2005). Im Vergleich mit Modellen, die auf Gelenkwinkel zurückgreifen, muss allerdings erwähnt werden, dass diese ähnliche Fehler bereits enthalten können.

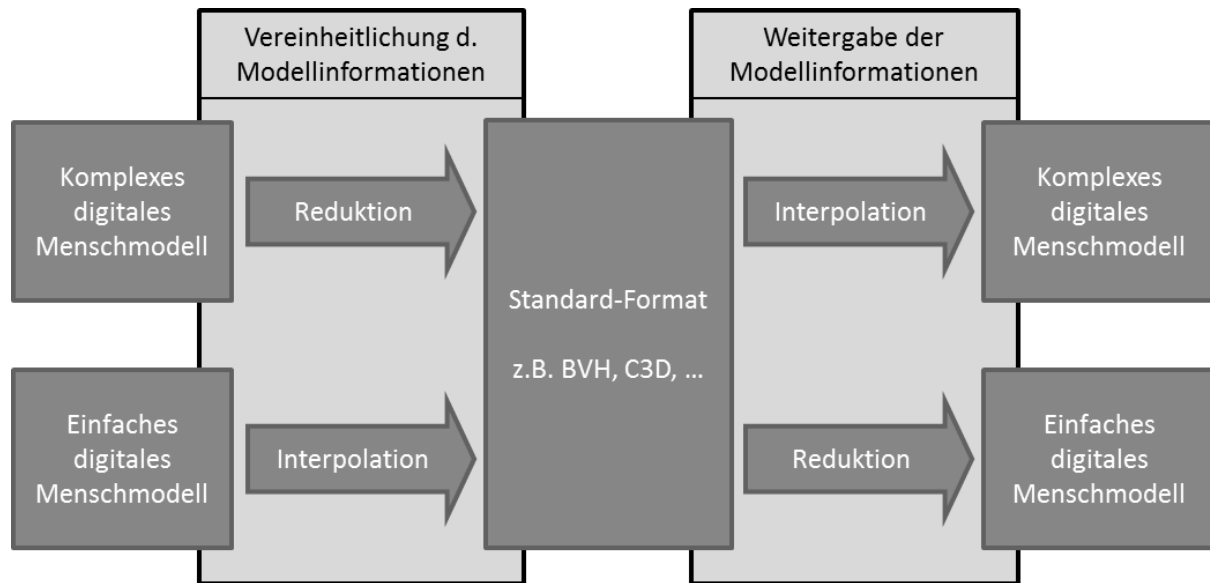
### 3. Erstellung von Bewegungsdaten

Dem Transfer von Bewegungs- und Körperhaltungsdaten geht zwangsläufig die Erzeugung derselben voraus. Diese können aus Modellen abgeleitet oder am Menschen erfasst werden.

Etablierte, in unterschiedlichsten Anwendungsbereichen verwendete Technologien zur Erfassung von Körperbewegungen stellen v.a. Videogrammetrie- (z.B. VICON, Zebris, Qualisys, SIMI Motion, etc.) und Inertialsensorik-basierte Systeme (z.B. Xsens, Biosyn Systems, Noraxon, etc.) dar (Duffy 2009), hinzu kommen neue Technologien zur markerlosen Bewegungserfassung mit integriertem Tiefensensor, Körpersegmenterfassung und hinterlegtem Skellettmodell (z.B. Microsoft Kinect). Stark vereinfacht lassen sich diese Systeme aufgrund der Technologie zur Bewegungserfassung den zuvor beschriebenen Formen kinematischer Daten zuordnen. Videogrammetrische Systeme erfassen direkt Markerkoordinaten im Raum, inertialsensorische Systeme messen die Orientierung der Sensorik im Raum und die markerlose Bewegungserfassung berechnet Körpergelenkpunkte und Segmente anhand von 3D Punktwolken. Aufgrund ihrer technischen Eigenschaften und Limitationen sollte stets das geeignete Verfahren für den jeweiligen Anwendungszweck genutzt werden. So eignen sich videogrammetrische Systeme eher für präzise, stationäre Messungen mit begrenztem Messvolumen; inertialsensorische Systeme sind hoch mobil einsetzbar und ggf. einfacher anzuwenden, erreichen jedoch nicht die Genauigkeit videogrammetrischer Systeme. Markerlose Systeme sind ebenfalls stationär einsetzbar, jedoch meist transportabel, sodass ein Umzug des Systems an andere Messplätze mit geringem Aufwand verbunden ist.

### 4. Datenaustausch zwischen Systemen

Der Austausch von Bewegungsdaten unterschiedlicher Menschmodelle und Messsysteme stellt aus zuvor geschilderten Differenzen bzgl. der Komplexität der Modelle, unterschiedlicher Definitionen und Restriktionen durch Messtechnik ein Hemmnis zur Kombinationen verschiedener Modellierungstools der digitalen Ergonomie dar. Bei der Entwicklung einer Vorgehensweise zum Austausch von Bewegungsdaten zwischen unterschiedlichen Menschmodellen erscheint es sinnvoll, sich an Monzani et al. (2000) und Bonin et al. (2014) zu orientieren und ein Format zu entwickeln, das Bewegungsdaten sämtlicher Menschmodelle in sich vereinen kann. Dessen Definition muss der unterschiedlichen Komplexität der Menschmodelle Rechnung tragen und zugleich eine Möglichkeit bieten, anthropometrische Informationen zu verarbeiten. Bei Entscheidung über die Komplexität des „Standard-Datenformats“, das durch seine Vorgaben bzgl. erwarteter Informationen implizit die Struktur eines neuen Menschmodells enthält, sollte v.a. das Problem des Informationsverlusts und der Interpolation bei Anpassung bestehender Datenformate bedacht werden (Abbildung 1). Es erscheint hinsichtlich der Datenqualität sinnvoll, potentielle Informationsverluste erst bei Weitergabe der Bewegungsdaten aus dem Standard-Format vorzusehen. Dies muss jedoch mit dem einhergehenden Mehraufwand der Datenverarbeitung abgewogen werden, sodass ggf. auch die Reduktion von Bewegungsdaten einzelner, sehr komplexer Menschmodelle bei Überführung in das Standard-Format sinnvoll sein kann.



**Abbildung 1:** Modell zum Vorgehen bei Verwendung eines einfachen Standardformats. Modifiziert nach Bonin et al. (2014)

Über das Vorgehen zum Transfer der Bewegungsdaten hinaus stellt sich zudem das Problem der Wahl eines geeigneten Dateiformats. Neben der Möglichkeit einer vollständigen Neuentwicklung eignen sich prinzipiell auch bestehende Formate wie BVH (biovision hierarchical data) und C3D, da diese quelloffen, gut dokumentiert und weit verbreitet sind. Beide haben gemein, dass von technischer Seite keine Vorgaben bzgl. der Komplexität der zu speichernden Bewegungsdaten gegeben sind. Im C3D-Format ist im Gegensatz zu BVH keine hierarchische Struktur vorgesehen, sodass hier ggf. mit Markerkoordinaten zur Beschreibung der Bewegungsdaten verfahren werden müsste. Durch die binäre Struktur und die Aufteilung in unterschiedliche Bereiche scheint es im C3D-Format jedoch möglich, zusätzliche Informationen, z.B. zur Interpretation der Bewegungsdaten, mitaufzunehmen.

## 5. Bezug auf Forschungsprojekt ENgAge4Pro

Im Kontext von ENgAge4Pro, in dessen Rahmen ein Ergonomie-Navigator zur automatisierten Beurteilung von Arbeitshaltungen entwickelt wird, werden zur nachfolgenden ergonomischen Bewertung Körper- und -bewegungsdaten mit Hilfe von markerlosem Motion Capturing und zusätzlicher Inertialsensorik dreidimensional erfasst und in einem Skelettmodell zusammengeführt. Die vorliegende Studie diene der Dokumentation verschiedener Mensch- und Skelettmodellvarianten, zur Definition von Schnittstellen, sowohl Projektintern zwischen Hard- und Software, als auch prospektiv zur Evaluation von möglichen Datenschnittstellen und Austauschformaten zu anderen Systemen. Heutige, für die ergonomische Beurteilung von Arbeitsplätzen eingesetzte Verfahren basieren meist auf Beobachtungen durch geschultes Personal, die anhand von Klassifizierungstools ausgewertet werden. Derartige Verfahren (z.B. EAWS, RULA, OWAS, etc.) unterscheiden Körperhaltungen i.d.R. grob (z.B. „Rumpf gebeugt“ oder „Kniend“), sodass keine hochpräzise gemessenen Gelenkstellungen erforderlich sind. Der

Umfang des internen Skelettmodells und die Messgenauigkeit des Kinect v2 Systems erscheinen für diesen Einsatzzweck, in Kombination mit zusätzlicher Inertialsensorik als ausreichend.

Abzuwarten bleibt jedoch, ob sich Umfang und Qualität der im Rahmen von ENgAge4Pro erhobenen Bewegungsdaten für eine spätere Verwendung in komplexen digitalen Menschmodellen eignen.

## 6. Literatur

- Bonin D, Wischniewski S, Wirsching HJ, Upmann A, Rausch J, Paul G (2014) Exchanging data between Digital Human Modelling systems – A review of data formats. 3<sup>rd</sup> International Digital Human Modelling Symposium, Odaiba, Tokyo, Japan.
- Duffy VG (2009) Handbook of digital human modeling. Research for applied ergonomics and human factors engineering (Human factors and ergonomics). Boca Raton: CRC Press.
- Hudelmaier J (2003) RAMSIS, der virtuelle Motorradfahrer. Accessed July 29, 2014. [http://www.fh-zwickau.de/fileadmin/ugroups/ftz/Konferenzen/2003/01\\_Hudelmaier.pdf](http://www.fh-zwickau.de/fileadmin/ugroups/ftz/Konferenzen/2003/01_Hudelmaier.pdf).
- Jana A (2012) Kinect for Windows SDK Programming Guide (Community experience distilled). Birmingham: Packt Pub.
- Keyvani A, Lämkuhl D, Bolmsjö G, Örtengren R (2013) Considerations for aggregations of motion-captured files in structured databases for DHM applications. 2<sup>nd</sup> International Digital Human Modeling Symposium, Ann Arbor, Michigan, USA.
- The Kinect for Windows Team (2014) The Kinect for Windows v2 Sensor and free SDK 2.0 public preview are here, Microsoft Developer Network. Accessed July 31, 2014. <http://blogs.msdn.com/b/kinectforwindows/archive/2014/07/15/the-kinect-for-windows-v2-sensor-and-free-sdk-preview-are-here.aspx>.
- Leidholdt W (2009) Der "Editor menschlicher Arbeit – EMA" – ein Planungsinstrument für manuelle Arbeit. 2. Symposium Produktionstechnik innovativ und interdisziplinär – im Fokus des Automobil- und Maschinenbaus, Zwickau.
- Leschner K (2014) Benutzerhandbuch ema V5. Version 1.4.1.0 (imk automotive GmbH, Hrsg).
- Monzani MH, Baerlocher P, Boulic R, Thalmann D (2000) Using an Intermediate Skeleton and Inverse Kinematics for Motion Retargeting. Computer Graphics Forum 19(3):11-19.
- PrimeSense (2010) Prime Sensor™ NITE 1.3 Framework Programmer's Guide. Accessed July 30, 2014. <http://pr.cs.cornell.edu/humanactivities/data/NITE.pdf>.
- Schönherr R (2013) Simulationsbasierte Absicherung der Ergonomie mit Hilfe digital beschriebener menschlicher Bewegungen. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz.
- Schwartz MH, Rozumalski A (2005) A new method for estimating joint parameters from motion data. Journal of biomechanics 1:107-116.
- Spanner-Ulmer B, Mühlstedt J (2010) Digitale Menschmodelle als Werkzeuge virtueller Ergonomie. Industrie Management – Zeitschrift für industrielle Geschäftsprozesse 4:69-72.
- Tümmler J (2007) Avatare in Echtzeitsimulationen. Dissertation, Universität Kassel, Kassel.
- Winter DA (2009) Biomechanics and motor control of human movement (4<sup>th</sup> ed). Hoboken, New Jersey: Wiley.

**Danksagung:** Das diesem Beitrag zugrundeliegende Forschungsvorhaben „ENGAGE4PRO – Ergonomie-Navigator für die alters- und alternsgerechte Produktion“ wurde mit Mitteln des BMBF (FKZ: 16SV6144) gefördert. Projektträger ist der VDI/VDE-IT.