

# Einfluss der Mensch-Maschine-Interaktion auf das Maschinendesign in der Social Networked Industry

The impact of human-machine interaction on machine design in the Social Networked Industry

**Dominik Borst**  
**Christopher Reining**  
**Michael ten Hompel**

*Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen  
Fakultät Maschinenbau  
Technische Universität Dortmund*

**D**ieser Beitrag beschreibt einen neuartigen Ansatz zum Rapid Physical Prototyping von Maschinenteilen in der Intralogistik. Zunächst werden aktuelle Maßgaben und Evaluationsmethoden zur Maschinengestaltung wie Gesetze, technische Normen und Industriestandards hinsichtlich ihrer Implikationen auf die Schnittstelle zum Menschen hin untersucht. Diesem Status Quo werden aus dem Leitgedanken der Social Networked Industry (SNI) bestimmte Anforderungen entgegengestellt und Forschungslücken abgeleitet. Die Anforderungen beziehen sich insbesondere auf die funktionale und ergonomische Gestaltung. Es wird ein Verfahren aufgezeigt, welches ein Motion Capturing System als Referenzwerkzeug nutzt, um eine quantitative Analyse der Wechselwirkung zwischen Maschinendesign und der Perspektive Mensch zu ermöglichen.

*[Schlüsselwörter: Social Networked Industry, Maschinendesign, Mensch-Maschine-Interaktion, Motion Capturing]*

**T**his contribute describes a new approach for rapid physical prototyping of machine components in material flow systems. First, current stipulations and evaluation methods for machine design such as laws, technical norms and industry standards are examined with regards to their implications for the human factor. This status quo is contrasted with the requirements that result from the central ideas of the Social Networked Industry and research gaps are derived. The requirements take functional and ergonomic aspects into account. A procedure to use Motion Capturing as a reference tool is demonstrated. It enables a quantitative analysis of the interdependency of machine design and the human perspective.

*[Keywords: Social Networked Industry, Machine Design, Human Machine Interaction, Motion Capturing]*

## 1 EINLEITUNG

Die vierte industrielle Revolution erfordert ein Neu-denken von Maschinen als Partner in einer Social Networked Industry (SNI) [HPN17]. Der Mensch steht nun im Mittelpunkt eines Cyber-physischen Systems (CPS), da dessen Assoziationsfähigkeit der einer künstlichen Intelligenz weitaus überlegen ist. Zusätzlich ist der Mensch wandelbarer und in der Lage kurzfristig auf Sondersituationen zu reagieren [Sch14]. Der bisherige Forschungsfokus auf Genauigkeit und Effizienz im klassischen Maschinendesign vernachlässigt diese menschliche Komponente.

Die Zusammenarbeit von Mensch und Technik ist ein aktueller Forschungsschwerpunkt, beispielsweise in Form von Gestensteuerung, Kraftverstärkung sowie ergonomisch adaptiver Schnittstellen. Die hohe Vernetzung in der SNI ermöglicht bessere Abstimmungen organisatorischer Abläufe. Um dieses Potenzial voll ausschöpfen zu können, müssen neu entstehende Anforderungen an Maschinen umgesetzt werden.

Der steigende Kundenwunsch nach größerer Artikelvielfalt und Produktvarianz fordert von den Anbietern eine erhöhte Flexibilität, da dies zu einer Verkürzung der Produktlebenszyklen und einem Mangel an Vorhersehbarkeit führt [BWF<sup>+</sup>09]. Hierdurch wachsen die Aufgabenfelder beider Parteien, um diesen Anforderungen in der Flexibilität gerecht zu werden. So kann beispielsweise ein Kommissionierer durch Augmented Reality Unterstützung Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten durchführen [HP16]. Aus der Maschinensicht bedeuten diese Entwicklungen eine Erhöhung der Modularisierung, um den verschiedenen Anforderungen gerecht zu werden. Am Beispiel eines Kleinteilelagers können die Ladungsträger mithilfe von intelligenten Einsteckkarten, sogenannten PhyNodes, das logistische System mitsteuern, indem sie mit dem Menschen kommunizieren und interagieren [VRR<sup>+</sup>15].

Die maschinenbauliche Konstruktionsmethodik unterscheidet beim Maschinendesign zwischen der ergonomischen Qualität und dem Erscheinungsbild einer Maschine. Der Schwerpunkt bei der Gestaltung einer Maschine liegt primär auf der Erhöhung des Gebrauchswerts, wie Produktivität, Fehlerreduzierung und Ergonomie, sowie Senkung der Herstellungskosten [HM14]. In diesem Beitrag fällt der Fokus auf den ergonomischen Aspekt.

Durch die Diversifizierung der Aufgaben von Mensch und Maschine entstehen neue Arten der physischen Interaktion. Dabei ist ein allgemeines Problem die Anwendung ergonomischer Richtlinien auf spezielle Fälle [IFA11]. Damit Arbeit für den Bediener „menschengerecht“ ist, muss sie unter anderem folgende Kriterien erfüllen [Koe01]:

- Den Körpermaßen entsprechend
- Den Körperbewegungen und -kräften angepasst
- Arbeitsgegenstände und -informationen vom Menschen wahrnehmbar

Diese Aspekte referenzieren unmittelbar auf die Gestaltung einer Maschine und dessen Einfluss auf den Faktor Mensch [HM14]. Die Wechselwirkungen können nur mit sehr hohem Aufwand betrachtet werden [IFA11].

Es folgt eine Untersuchung der Werkzeuge Cardboard Engineering und Motion Capture des Versuchslabors des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen [ZBV<sup>+</sup>17], um empirisch Daten zu sammeln und quantitative Aussagen über die ergonomische Zusammenarbeit von Mensch und Maschine in einem CPS-Umfeld zu treffen. Dies ist ein neuartiger Rapid Prototyping Ansatz im Bereich vernetzter interlogistischer Systeme, der folgend betrachtet wird.

Dieser Beitrag beschreibt in Abschnitt 2 die Formen der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), zeigt aktuelle Verfahren auf und bildet die Motivation von zwei Szenarien in Abschnitt 3. Hier erfolgt eine exemplarische Darstellung einer empirischen Datenaufnahme durch die Werkzeuge Motion Capture und Cardboard Engineering. Abschnitt 4 schließt den Beitrag mit einem Fazit sowie einem Ausblick ab.

## 2 FORMEN DER MENSCH-MASCHINE-INTERAKTION

Damit Maschinen im EU-Raum grundlegenden Sicherheitsanforderungen entsprechen, verabschiedete die Europäische Union die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Diese Richtlinie definiert zwar explizite Sicherheitsbestimmungen, gibt jedoch nur Grundprinzipien im Bereich der Ergonomie vor, wie beispielsweise die Möglichkeit der Anpassung an unterschiedliche Körpermaße [EU06]. Gängige Literatur zur Konstruktionspraxis definiert konkrete Maßgaben für die Bedienungsergonomie, allerdings müssen diese auf reale Fälle überführt werden [HM14]. Daher

bleibt es bei der Gestaltung einer vernetzten Maschine fraglich, wie die Schnittstellen zum Menschen baulich ausgeprägt sein müssten, um einen abgestimmten Arbeitsablauf der beiden Parteien gewährleisten zu können.

Eine Interaktion zwischen Mensch und Maschine findet auf den verschiedensten Ebenen der Kollaboration statt. Dies führt zu einer komplexen Beziehung, in der die Korrelationen vielschichtig sind und zeitlich voneinander abhängen [SGS08]. Zur Betrachtung der Zusammenarbeit werden die Interaktionen gemäß Jost et. al [JT17] in die folgenden Formen unterteilt:

- Informationsaustausch
- Reagieren
- Steuerung
- Adaptivität

Hier wird folgend auf Reagieren und Adaptivität eingegangen, da Entscheidungen in der Konstruktionsphase den Grad der Ausprägungen dieser Formen bestimmen [Con05]. Zusätzlich stellen dies aktuelle Ziele in der Forschung dar, wie intuitivere Bedienung und die Reduzierung von Sicherheitseinrichtungen [NDK14]. Zu der Reaktionsfähigkeit einer Maschine gehört beispielsweise die Kraftverstärkung des Menschen. So nimmt eine Maschine durch Kraft-Momenten-Sensorik die eingehenden Bewegungen auf und verstärkt sie in solch einem Maße, dass dem Menschen Arbeit erleichtert wird und zusätzlich keine Gefahr entsteht. Im Kontext der SNI rückt die Lernfähigkeit und Anpassungsfähigkeit der Maschinen stärker in den Fokus. Durch die Interaktion mit dem Menschen lernt die Maschine auf die Besonderheiten wie unterschiedliche Körpergrößen einzugehen. Diese Adaptivität könnte zum Beispiel die automatische Höhenanpassung zur Behälterentnahme an den Bediener darstellen.

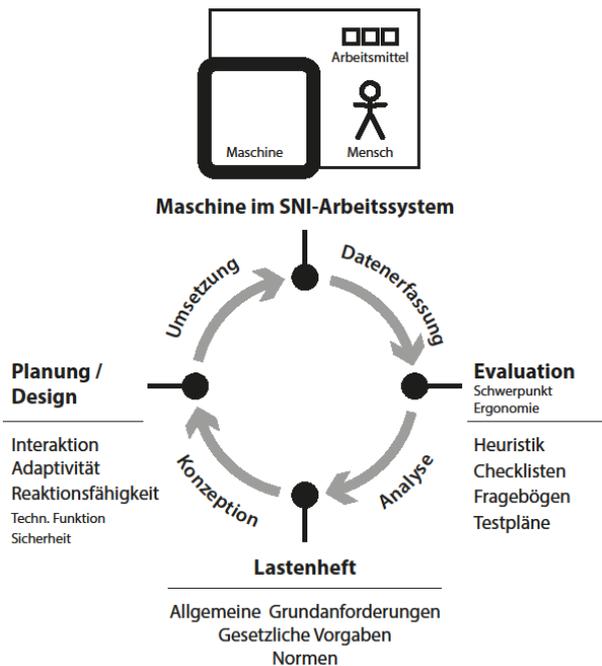


Abbildung 1. Evaluationszyklus in der Maschinenentwicklung

In einer SNI-Umgebung sind die eben beschriebenen Formen der Interaktion wichtige Eigenschaften für eine erfolgreiche Kollaboration, dennoch lassen sie sich nur im Kontext ihrer Anwendung beschreiben, was einen allgemeingültigen Ansatz erschwert. Abbildung 1 zeigt hierbei den vereinfachten Entwicklungszyklus mit dem Fokus auf der Optimierung des Maschinendesigns. Ein Lastenheft skizziert tabellarisch die Funktion einer Maschine. Hieraus lassen sich die verschiedenen Anforderungen, wie beispielsweise technische Funktionen, Sicherheit und Kosten finden. Bei Maschinen, die im Kontext der SNI fungieren, sollten sich die zu betrachtenden Formen der MMI wiederfinden. Eine Umsetzung der Anforderungen führt zur kompletten Maschine. Die real existierende Maschine dient als Evaluationsgrundlage zur Verbesserung des Designs. Verschiedene Bewertungsmethoden liefern Daten zur Aktualisierung und Erweiterung der Anforderungen. Aktuelle Methoden verfolgen die qualitative Auswertung durch Checklisten, Fragebögen oder heuristische Evaluationen. Eine ebenfalls umfangreiche Methode ist die Durchführung eines Testplans für einen definierten Kontext mit mehreren Probanden. Hierbei wird die Durchführung sowohl von Experten als auch durch Videoaufzeichnung beobachtet. Zusätzlich finden im Nachgang Interviews mit jedem Probanden statt [Adl10]. Diese Methoden sind jedoch langwierig, da die Durchführung sowie die Vor- und Nachbereitung der Prüfunterlagen zeitintensiv sind.

Der Einsatz von Videokameras erlaubt zwar nachbereitende Analysen, jedoch fehlt die Referenz in den tatsächlich aufgetretenen Bewegungen. Diese müssen als Momentaufnahme während der Durchführung direkt am Probanden gemessen werden, was in einem hoch dynamischen Kontext unmöglich ist. Hier fehlt es an Werkzeugen,

die einerseits verlässliche Messwerte, wie Winkelbeziehungen zwischen Objekten und Körpergliedern liefern, als auch in der Lage sind simultan ablaufende Arbeitsschritte automatisiert zu erfassen. Daher wird ein Vorgehen untersucht, das statt den beschriebenen qualitativen Ansätzen einen quantitativen verfolgt.

Es gilt zu identifizieren, wie die Maßgaben zur Ergonomie in einer komplexen SNI-Umgebung umgesetzt werden können, um ihre Einhaltung zu überprüfen oder Potenzial in der Optimierung des Maschinendesigns aufzuzeigen. Hierfür bietet sich das Verfahren des Rapid Physical Prototyping an, wodurch innerhalb kurzer Zeit mit geringem finanziellen Aufwand Szenarien aufgebaut werden können. Als Basis dient eine leere Versuchshalle, in der mittels Cardboard Engineering [DRS11] die Szenarien aufgebaut werden. In diesem Schritt ist es nötig die zu betrachtenden Prozessschritte zu abstrahieren und die eingangs beschriebene Komplexität zu reduzieren, um den Erkenntnisgewinn zu vereinfachen. In dem Aufbau bewegen sich Probanden, die die Prozesse physisch in einer Weise durchlaufen, wie es in einer realen Umgebung der Fall wäre. Dabei wird die Durchführung durch ein Motion Capturing System beobachtet, siehe Abschnitt 3.

Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die Evaluation des Maschinendesigns bereits in der Planungsphase. Ebenfalls lassen sich gesicherte Daten über die genaue Bewegungsdauer aufnehmen, wodurch die Planung zusätzlich unterstützt wird. Die auftretenden Interaktionsschnittstellen gilt es mit Cardboard Engineering in einem Referenzfeld nachzubilden. Dadurch wird keine real existierende Logistikumgebung benötigt, dessen Real-Nachbau zeit- und kostenintensiv wäre und für dessen Betrachtung ein Motion Capturing System zu sensibel ist. Gründe hierfür sind unter anderem Störsignale, die Verdeckung des Menschen je nach technischem Aufbau sowie Vibrationen.

### 3 MOTION CAPTURING ALS EVALUATIONSWERKZEUG

Motion Capturing bietet die Möglichkeit, menschliche Aktivität digital, automatisiert und quantitativ zu erfassen. Hypothesen bezüglich der Wechselwirkung zwischen Maschinendesign und dem Faktor Mensch werden durch Datenaufnahmen empirisch überprüfbar. Für diesen Beitrag werden zwei Szenarien der Interaktion von Mensch und Technik physisch im Forschungszentrum des Innovationslabors Hybride Dienstleistung [Fra18] nachgebaut. Die menschliche Bewegung wird aufgenommen und vergleichend bewertet. Möglichkeiten zur Nutzung von Motion Capturing als Verifizierungswerkzeug werden somit praktisch evaluiert.

#### 3.1 VERSUCHSAUFBAU

Im folgenden Abschnitt wird die technische Ausstattung des Referenzfeldes [ZBV<sup>+</sup>17] und insbesondere die Konfiguration zur Nachbildung der Szenarien vorgestellt.

Für diesen Beitrag wurden mit einem männlichen, rechts-  
 händigen Probanden Daten aufgenommen, der 190 cm  
 groß und 23 Jahre alt ist. Es ist davon auszugehen, dass die  
 Bewegungsausführung von Geschlecht, Alter und Seiten-  
 dominanz abhängt [MDW<sup>+</sup>09]. Für eine statistische Absi-  
 cherung der Erkenntnisse wird somit eine größer angelegte  
 Datenaufnahme notwendig sein. Dieser Beitrag zeigt zu-  
 nächst die technische Machbarkeit auf.

### 3.1.1 REFERENZFELD

Mit über 38 Kameras verfügt das Referenzfeld über ei-  
 nes der größten Motion Capturing Systeme Europas. In der  
 zum Zeitpunkt der Aufnahmen verwendeten Konfiguration  
 deckt es ein Volumen von ca. L x B x H / 22 m x 10 m x 6  
 m ab. Somit können nicht nur einzelne Arbeitsplätze, son-  
 dern das Zusammenspiel von Mensch und Technik in der  
 Makro-Perspektive eines Materialflusssystems betrachtet  
 werden. Sowohl starre Objekte wie Drohnen, Roboter und  
 Handhabungsobjekte, als auch Menschen werden erfasst.  
 Zu diesem Zweck werden mindestens vier passive Marker  
 in einem jeweils einzigartigen Muster an den starren Ob-  
 jekten angebracht. Menschen werden mit Hilfe spezieller  
 Anzüge, an denen 39 Marker anzubringen sind, als Skelett-  
 modell erkennbar. Die Bewegungserfassung erfolgt milli-  
 metergenau und mit bis zu 300 Frames pro Sekunde (fps).  
 Für die Aufnahmen der Szenarien wurden 200 fps gewählt.

Nach erfolgter Aufnahme wird die globale Position aller  
 erfassten Objekte im Zeitverlauf je Frame ausgegeben  
 und kann zur Weiterverarbeitung exportiert werden, bspw.  
 in einer csv-Datei. Der Output beinhaltet sowohl die Trans-  
 lation als auch die Rotation bezüglich der drei Raumachsen  
 – also sechs Werte je Frame. Darüber hinaus ermöglicht ein  
 Plug-In der Motion Capturing Software Vicon Nexus die  
 Ausgabe der globalen Positionen der Gliedmaßen. Dies  
 schließt auch ihre Winkelbeziehungen zueinander ein,  
 bspw. dem Kniewinkel zwischen Ober- und Unterschenkel.  
 Geringfügiges Rauschen in den Rohdaten wird durch  
 Pipelines der Software eliminiert. Zur Erhebung korrekter  
 Messwerte ist es notwendig, charakteristische Maße des  
 Probanden im Vorhinein zu nehmen, da eine Anbringung  
 der Marker unmittelbar in einem Gelenk nicht möglich ist.  
 Aus der Markerpositionierung und den Abmessungen des  
 Probanden, beispielsweise der Kniebreite, kann auf die Po-  
 sition und Haltung von Gelenken geschlossen werden.

Zum Nachbau der Szenarien kommen Roboter zum  
 Einsatz, die sich eigenständig im Referenzfeld bewegen  
 und Arbeitsstationen sowie Gestelle transportieren können.  
 Auf den Gestellen sind Kleinladungsträger (KLT) mit einer  
 Grundfläche in den Flächenmodulmaßen 600 mm x 400  
 mm bzw. 400 mm x 300 mm platziert. Unterschiedliche  
 Konfigurationen der Arbeitsstationen wurden mit Hilfe von  
 Cardboard Engineering realisiert. Die Bewegung bzw. Re-  
 positionierung aller markierten Objekte ist nachvollzieh-  
 bar.

### 3.1.2 VORSTELLUNG SZENARIO I

Das erste Szenario zeigt die Übergabe eines KLT mit  
 den Maßen 600 mm x 400 mm x 200 mm und einem Brut-  
 togewicht von 4,5 kg von einem Roboter an einen Men-  
 schen. Der KLT wird vom Menschen gehoben. Eine adap-  
 tive Hubeinrichtung am Roboter würde die Kiste in einer  
 ergonomisch optimierten Höhe anreichen, sodass die Ent-  
 nahme schneller und für den Menschen schonender ge-  
 schieht. Diese Höhenverstellbarkeit wurde stellvertretend  
 durch die Überstapelung mehrerer Kisten dargestellt. Es  
 wurden je zehn Durchgänge für vier Höhen der Kiste  
 durchgeführt. Bei Höhe I steht die zu hebende Kiste unmit-  
 telbar auf dem Gestell. Bei den Höhen II-IV wird sie ent-  
 sprechend bis zu dreimal überstapelt. Die Oberkantenhöhe  
 der zu hebenden Kiste von I bis IV beträgt 610 mm, 810  
 mm, 1010 mm und 1210 mm.

Der Versuchsaufbau der ersten Szenarios ist in Abbil-  
 dung 2 dargestellt. Links ist die physische Durchführung  
 von Höhe IV zu sehen. Auf der rechten Seite ist das Ske-  
 lettmodell des Menschen zum Zeitpunkt der Aufnahme ab-  
 gebildet. Die dünnen roten und hellgrünen Linien verbind-  
 en die am Anzug angebrachten Marker auf der linken und  
 rechten Körperseite. Die blauen Linien verbinden die Mar-  
 ker auf der Körperinnenseite. Die dicken, dunkelgrünen Li-  
 nien stellen das Skelettmodell dar, das durch Plug-In aus  
 Markerposition und Abmaßen des Probanden errechnet  
 wird. Auf dieses Modell beziehen sich die globale Position  
 der Gliedmaßen sowie die Winkelbeziehungen. Die oran-  
 genen Punkte, die mit Linien verbunden sind, stellen die an  
 der Oberkante der Kiste angebrachten Marker dar. Der ein-  
 zelne Punkt darunter ist der geometrische Schwerpunkt der  
 Kiste, auf welchen sich die Bewegung der Kiste im dreidi-  
 mensionale Raum bezieht.

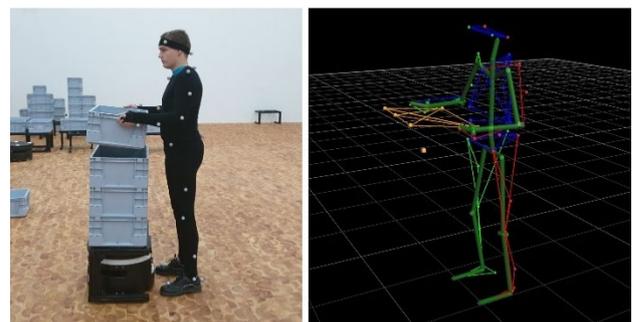


Abbildung 2. Szenario I, Höhe IV – Physischer Versuchsauf-  
 bau und Abbildung im Motion Capturing System

Durch die Auswertung der Aufnahmen ist es möglich, ver-  
 schiedene Anreicherungshöhen sowohl unter ergonomischen  
 als auch zeitlichen Gesichtspunkten quantitativ verglei-  
 chend auszuwerten.

### 3.1.3 VORSTELLUNG SZENARIO II

Abgebildet wird ein Ware-zur-Person Kommissioniersze-  
 nario, wie es in einer Social Networked Industry zu erwar-  
 ten ist. Eine mobile Arbeitsstation wird dem Menschen von

einem Roboter bereitgestellt. Ein weiterer Roboter bringt dem Menschen die notwendigen Artikel, die in Sichtbehältern auf einem Gestell bereitgestellt sind. Der Mitarbeiter hat die Aufgabe, Artikel, die bspw. für weiterführende Montagearbeiten benötigt werden, aus den Sichtbehältern zu entnehmen und in eine weitere Kiste abzugeben. Der Eingriff der Sichtbehälter befindet sich auf einer ergonomischen Höhe von 1300 mm. Ein Terminal zeigt die notwendigen Arbeitsschritte an. Jeder erledigte Arbeitsschritt ist händisch am Terminal zu bestätigen.

Eine adaptive Positionierung des Terminals passt sich den Menschen an und unterstützt ihn. Dazu ist der Einfluss der Terminal-Position auf den Workflow zu quantifizieren, d. h. welche Bewegungen und wieviel Zeit für die Erledigung der Kommissionierung notwendig sind. Es werden drei Varianten des Szenarios aufgebaut, die der Proband je fünfmal durchläuft:

- Position I: Das Terminal ist auf der den Sichtbehältern abgewandten Seite und über der Kopfhöhe auf 1900 mm des Probanden positioniert
- Position II: Das Terminal ist auf einer Höhe von 1500 mm zwischen den Sichtbehältern und dem Sammelbehälter angebracht
- Position III: In einer Höhe von ca. 800 mm ist das Terminal unter dem Sammel-KLT positioniert

In Abbildung 3 ist Szenario II dargestellt. Die KLT, das Terminal sowie der Mensch sind mit Markern versehen.



Abbildung 3. Szenario II, Position I - Physischer Versuchsaufbau im Referenzfeld und Abbildung im Motion Capturing System

Die Datenaufnahme in den Szenarien ermöglicht eine vergleichende Bewertung der Anordnungen von Mensch, Arbeitsstation, Behälter und Terminal. Die Wechselwirkung der Positionierung auf die Prozessgeschwindigkeit und Bewegungsmuster des Menschen wird quantifiziert.

### 3.2 EVALUATION

Die in den Szenarien aufgenommenen Daten werden ausgewertet und die Tauglichkeit von Motion Capturing als Verifizierungswerkzeug der MMI evaluiert. Die korrekte Zuordnung der Daten und Plots zur menschlichen Aktivität

ist durch einen optischen Abgleich mit dem Skelettmodell in diesem Zeitraum sichergestellt.

#### 3.2.1 AUSWERTUNG SZENARIO I

Aus der Vielzahl möglicher Ausgabewerte des Motion Capturing Systems wird hier beispielhaft der Winkelverlauf des Thorax näher betrachtet. In Abbildung 4 ist der Winkelverlauf für den ersten Durchlauf der Höhe I dargestellt. Ein Winkel von 0° entspricht dabei einer aufrechten Körperhaltung. Ein Winkel von 90° zeigt eine waagrecht nach vorne gebeugte Haltung an.

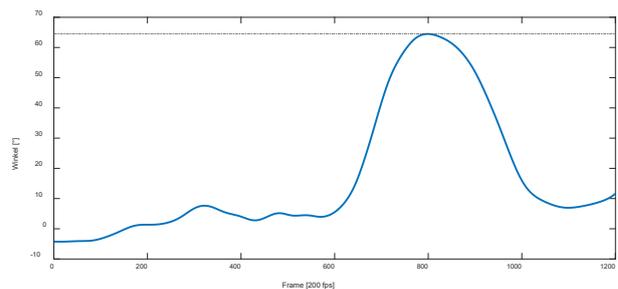


Abbildung 4. Szenario I, Höhe I, Durchlauf 1 - Winkelverlauf des Thorax

In Abbildung 4 ist zu erkennen, dass der Proband den Oberkörper um ca. 64,5° nach vorne beugt, um die Kiste anzuheben. In Tabelle 1 ist dieser Ausschlag des Thorax-Winkels aller Durchläufe und Höhen aufgeführt.

Tabelle 1. Szenario I, Thorax-Winkel aller Höhen und Durchläufe, Angaben in [°], gerundet auf eine Nachkommastelle

#	Höhe I	Höhe II	Höhe III	Höhe IV
1	64,5	44	8,8	6,5
2	75,4	43,5	8,2	5,7
3	66,3	44,1	9,9	7,0
4	77,4	41,6	10,9	6,6
5	77,1	46,0	9,1	7,6
6	69,1	41,3	9,2	5,4
7	60,6	45,2	15,5	8,4
8	69,1	44,3	14,5	9,3
9	66,4	42,5	14,6	10,0
10	71,6	43,8	11,8	9,1
Ø	69,8	43,6	11,3	7,6

Tabelle 1 zeigt, dass der Winkel des Oberkörpers im Verlauf von Höhe I bis III abnimmt. Der Unterschied zwischen Höhe III und IV fällt vergleichsweise gering aus. Um diesen Zusammenhang genauer zu betrachten, wird im Folgenden die Höhe des rechten Handgelenks betrachtet. In Abbildung 5 ist der Verlauf der Handgelenkhöhe (z-Richtung) für die jeweils ersten Durchläufe dargestellt.

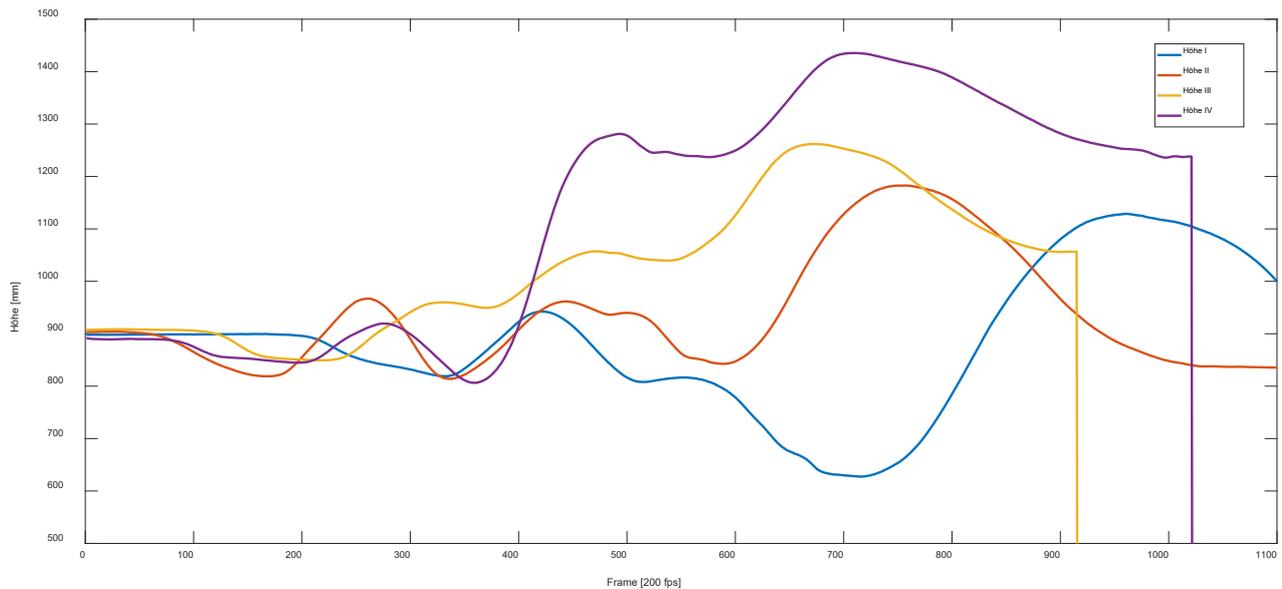


Abbildung 5. Szenario I, Höhen I-IV, jeweils erster Durchlauf – Verlauf der rechten Handgelenkshöhe

Die Höhe des Handgelenks ist beim Start aus der Ruheposition bei allen Durchläufen vergleichbar. Der Zeitraum der Greifbewegung lässt sich an zwei Merkmalen erkennen. Zum einen ist das Handgelenk auf Höhe der Kiste (siehe Abschnitt 3.1.2.) und zum anderen handelt es sich um einen lokalen Tiefpunkt. Die Hand wird vom Probanden zuerst an den KLT geführt, dann leicht abgesenkt, um in den Eingriff zu fassen und anschließend angehoben, um den KLT zu entstackeln. Im Vergleich der Höhen zeigt sich analog zum Thorax-Winkel, dass die Höhen III und IV die bevorzugte Wahl sind. Ein geringerer Thorax-Winkel und eine schnellere Handhabung sind erkennbar.

### 3.2.2 AUSWERTUNG SZENARIO II

Quantitative Unterschiede zwischen den Terminal-Positionen lassen sich u. a. am Neigungswinkel des Kopfes aufzeigen. In Abbildung 6 ist der Verlauf der Kopfneigung für den dritten Durchlauf aller Positionen aufgezeigt. Ein Winkel von  $0^\circ$  entspricht einem rechten Winkel zwischen Oberkörper und Blickrichtung des Menschen. Ein positiver oder negativer Ausschlag bedeutet, dass der Mensch aufrecht stehend nach oben bzw. nach unten schaut.

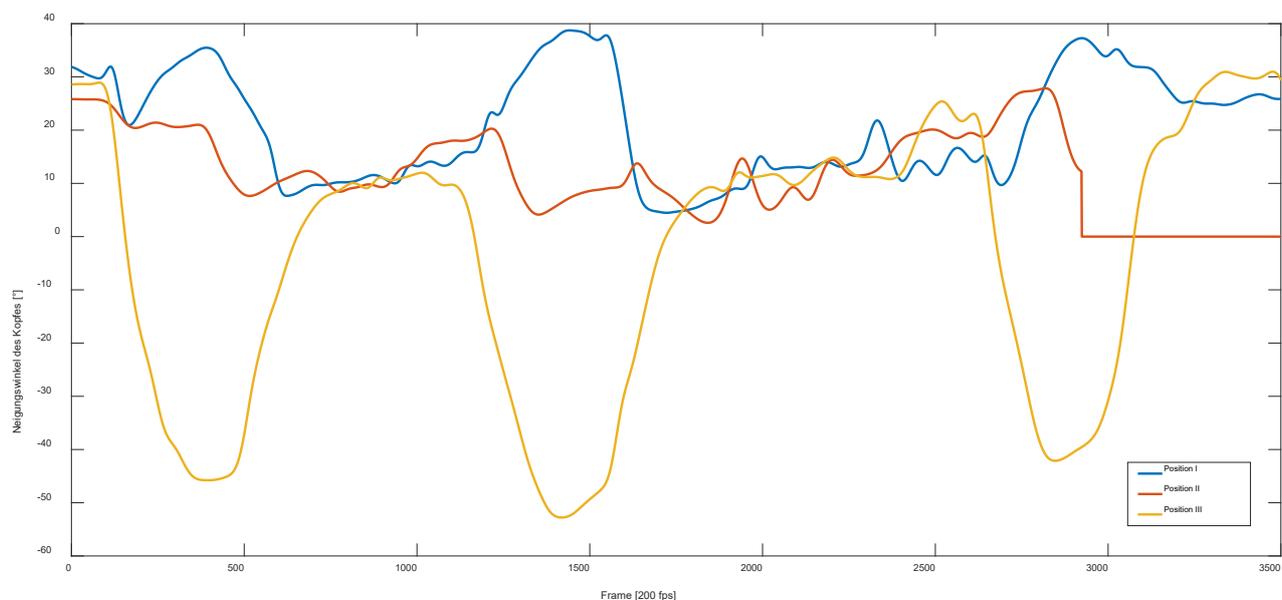


Abbildung 6. Szenario II, Positionen I-III, jeweils dritter Durchlauf - Winkelverlauf der Kopfneigung

Bei den Höhen I und III liegen deutliche Ausschläge vor. Bei Höhe II liegen die Werte niedriger als bei Position I und durchgängig im positiven Bereich. Sie zeigen keine starken Ausschläge. Die im Szenario gestellte Kommissionieraufgabe konnte zudem schneller abgeschlossen werden. Diese Beobachtungen treffen analog auf alle Durchläufe zu.

#### 4 FAZIT UND AUSBLICK

Das komplexe Zusammenspiel von Mensch und Maschine in einer SNI-Umgebung erschwert eine analytische Herangehensweise zur ergonomischen Maschinengestaltung. Der in diesem Beitrag verfolgte Ansatz des Rapid Physical Prototyping erwies sich als effizient umsetzbar. Hiermit konnten bereits in einer ersten beispielhaften Versuchsreihe konkrete Erkenntnisse zur Optimierung des Maschinendesigns eines fahrerlosen Transportfahrzeugs gewonnen werden. Da diese Erkenntnisse automatisiert erfasst werden, können sie unmittelbar an die Maschine weitergegeben werden, sodass sie sich selbst hinsichtlich des Faktor Mensch optimiert. Die empirisch erhobenen Daten dienen dazu manuelle Arbeitstätigkeiten in Kooperation mit Maschinen in der SNI-Umgebung objektiv und standardisiert zu begutachten. Dies ermöglicht eine gesicherte ergonomische Gestaltung von intelligenten Maschinen und die Erweiterung bestehender Richtlinien und Normen.

In weiterer Forschungsarbeit ist es möglich komplexere Szenarien, bestehend aus mehreren Prozessschritten sowie weiteren Maschinen, wie Drohnen und Roboterarme, durchzuführen. Die hierdurch entstehenden simultanen Arbeitsaufgaben durch die vielschichtige und zeitabhängige Zusammenarbeit werden in Bewegungsprofilen erfasst. Es kann beobachtet werden auf welche Weise ein Mensch mit einer Maschine interagiert und ob dies der zuvor erdachten Soll-Interaktionsweise entspricht. Zur Absicherung sind weitere Aufnahmen mit einer vielfältigeren Auswahl an Probanden notwendig. Die dadurch anfallenden Datenmengen können mittels Deep Learning auf Muster untersucht und automatisiert ausgewertet werden. Ebenfalls denkbar ist die Überführung des Cardboard Engineering Ansatzes in die virtuelle Realität, um beim Nachbau der Szenarien weiter an Geschwindigkeit und Flexibilität zu gewinnen. Vorteilhaft ist hierbei die Möglichkeit der Datenaufnahme und Evaluation bereits am Konstruktionsmodell, sodass ein abstrahierter Versuchsaufbau nicht mehr notwendig ist.

#### FÖRDERHINWEIS

Diese Veröffentlichung wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Innovationslabor Hybride Dienstleistungen in der Logistik“ sowie dem DFG-Projekt „Adaptive, ortsabhängige Aktivitätserkennung und Bewegungsklassifikation zur Analyse des manuellen Kommissionierprozesses“ (Fi799/10-1, HO2403/14-1) gefördert.

#### LITERATUR

- [Adl10] M. Adler und Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Hrsg., *Ergonomiekompodium: Anwendung ergonomischer Regeln und Prüfung der Gebrauchstauglichkeit von Produkten*. Dortmund: BAuA, 2010. – ISBN 978-3-88261-118-2
- [BWF+09] C. C. Bozarth, D. P. Warsing, B. B. Flynn, und E. J. Flynn, „The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance“, *J. Oper. Manag.*, Bd. 27, Nr. 1, S. 78–93, Jan. 2009. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.jom.2008.07.003>
- [Con05] K.-J. Conrad, *Grundlagen der Konstruktionslehre: Methoden und Beispiele für den Maschinenbau; mit 82 Tabellen, zahlreichen Kennnisfragen und Aufgabenstellungen mit Lösungen*, 3., aktualisierte und erw. Aufl. München: Hanser, 2005. – ISBN 978-3-446-40471-7
- [DRS11] U. Dombrowski, C. Riechel, und S. Schulze, „Enforcing employees participation in the factory planning process“, in *2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, 2011, – DOI 10.1109/ISAM.2011.5942337
- [EU06] Europäische Union, „2006/42/EG - Maschinenrichtlinie D“. 17-Mai-2006.
- [Fra18] Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, „Innovationslabor hybride Dienstleistungen in der Logistik“, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.innovationslabor-logistik.de/>
- [HM14] G. Hoenow und T. Meißner, *Konstruktionspraxis im Maschinenbau: vom Einzelteil zum Maschinendesign*, 4., aktualisierte Auflage. München: Fachbuchverl. Leipzig im Hanser-Verl, 2014. – ISBN 978-3-446-44054-8
- [HP16] P. Hermanski und M. Parlings, „Einfach näher dran - Forschungs- und Innovationsreport Industrie 4.0“. 2016. Verfügbar unter: <https://www.digital-in-nrw.de/de/downloads?file=files/stand>

- dard/publisher/downloads/sonstiges/Digital%20in%20NRW\_Forschungs-Innovationsreport%202016.pdf
- [HPN17] M. ten Hompel, M. Putz, und A. Nettsträter, „Social Networked Industry“. Fraunhofer IML, 2017. Verfügbar unter: [https://www.e3-produktion.de/content/dam/iwu/e3-produktion/de/documents/E3\\_Whitepaper\\_SocialNetworkedIndustry\\_Web.pdf](https://www.e3-produktion.de/content/dam/iwu/e3-produktion/de/documents/E3_Whitepaper_SocialNetworkedIndustry_Web.pdf)
- [IFA11] Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, „Checkliste zur Maschinenergonomie“, Nr. 12/2011. Verfügbar unter: <http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/aifa0236.pdf>
- [JT17] J. Jost und T. Kirks, „Herausforderungen der Mensch-Technik-Interaktion in der Intralogistik“, 2017. – DOI 10.24406/iml-n-462114
- [Koe01] R. Koether, Hrsg., *Betriebsstättenplanung und Ergonomie: Planung von Arbeitssystemen; mit 64 Tabellen sowie Fallbeispielen und Übungsaufgaben*. München: Hanser, 2001. – ISBN 978-3-446-21074-5
- [MDW+09] R. Müller-Rath, C. Disselhorst-Klug, S. Williams, C. Braun, und O. Miltner, „Einfluss des Geschlechts und der Seitendominanz auf die Ergebnisse der quantitativen, dreidimensionalen Bewegungsanalyse der oberen Extremitäten“, *Z. Für Orthop. Unfallchirurgie*, Bd. 147, Nr. 04, S. 463–471, Juli 2009. – DOI 10.1055/s-0029-1185409
- [NDK14] M. Naumann, T. Dietz, und A. Kuss, „Mensch-Maschine-Interaktion“, in *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, und B. Vogel-Heuser, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 509–523. – ISBN 978-3-658-04681-1
- [Sch14] A. Schließmann, „iProduction, die Mensch-Maschine-Kommunikation in der Smart Factory“, in *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik*, T. Bauernhansl, M. ten Hompel, und B. Vogel-Heuser, Hrsg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, S. 451–480. – ISBN 978-3-658-04681-1
- [SGS08] L. Schmidt, J. Grosche, und C. M. Schlick, Hrsg., *Ergonomie und Mensch-Maschine-Systeme*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. – ISBN 978-3-540-78330-5
- [VRR+15] A. K. R. Venkatapathy, A. Riesner, M. Roidl, J. Emmerich, und M. t Hompel, „PhyNode: An intelligent, cyber-physical system with energy neutral operation for PhyNetLab“, in *Smart SysTech 2015; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*, 2015, S. 1–8. – DOI 10.15439/2017F253
- [ZBV+17] F. Zeidler, H. Bayhan, A. K. Ramachandran Venkatapathy, und M. ten Hompel, „Referenzfeld zur Erforschung und Entwicklung neuartiger hybrider Formen der Zusammenarbeit von Menschen und Maschinen in der Logistik“, *Logist. J. Proc.*, Bd. 2017, Nr. 10, Okt. 2017. – DOI 10.2195/lj\_Proc\_zeidler\_de\_201710\_01

---

**Dominik Borst, M.Sc.**, Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University Dortmund. He studied Mechanical Engineering in Venlo (Netherlands) and Bochum (Germany).

Phone: +49 231 755-2794, Fax: +49 231 755-4768,  
E-Mail: [dominik.borst@tu-dortmund.de](mailto:dominik.borst@tu-dortmund.de)

**Christopher Reining, M.Sc.**, Research Assistant at the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University Dortmund. He studied Logistics at the Technical University of Dortmund.

Phone: +49 231 755-3228, Fax: +49 231 755-4768,  
E-Mail: [christopher.reining@tu-dortmund.de](mailto:christopher.reining@tu-dortmund.de)

**Prof. Dr. Dr. h. c. Michael ten Hompel**, head of the Chair of Materials Handling and Warehousing, Technical University of Dortmund and Managing director of the Fraunhofer Institute for Material Flow and Logistics.

Phone: +49 231 9743-600, Fax: +49 231 755-4768,  
E-Mail: [michael.tenHompel@tu-dortmund.de](mailto:michael.tenHompel@tu-dortmund.de)

Address: Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, TU Dortmund, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Germany