Mensch-Technik-Interaktion in der digitalisierten Arbeitswelt

Michael Freitag
(Hrsg.)

GITO

WGAB

Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft
für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) e.V.

Michael Freitag (Hrsg.)

Mensch-Technik-Interaktion in der digitalisierten Arbeitswelt

Reihe:
Schriftenreihe der Wissenschaftlichen
Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation

Mensch-Technik-Interaktion in der digitalisierten Arbeitswelt

Michael Freitag (Hrsg.)

https://doi.org/10.30844/wgab_2020

Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag
BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH an der Universität Bremen
Hochschulring 20, 28359 Bremen, Deutschland
fre@biba.uni-bremen.de
Fachgebiet Planung und Steuerung produktionstechnischer und logistischer Systeme
Fachbereich Produktionstechnik – Maschinenbau und Verfahrenstechnik
Universität Bremen

ISBN 978-3-95545-353-4

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Veröffentlicht im GITO Verlag 2020
Gedruckt und gebunden in Berlin 2020

© GITO mbH Verlag Berlin 2020

GITO mbH Verlag
für Industrielle Informationstechnik und Organisation
Kaiserdamm 23
14057 Berlin
Tel.: +49.(0)30.41 93 83 64
Fax: +49.(0)30.41 93 83 67
E-Mail: service@gito.de
Internet: www.gito.de

Vorwort

Die Mensch-Technik-Interaktion ist Bestandteil jedes soziotechnischen Arbeitssystems, in dem Menschen und Technik kollaborieren. Im Zuge der digitalen Transformation kommt es zu einer engen und veränderten Zusammenarbeit zwischen Mensch und Technik: Die digitalisierten und automatisierten Bestandteile der Produktions- und Logistiksysteme werden von Menschen miteinander verknüpft und überwacht, z.B. bei der Mensch-Roboter-Kollaboration, oder treten in Form neuer Assistenzsysteme in ihre Arbeitsumgebung ein. Dies wirft die Frage auf, wie diese Mensch-Technik-Interaktion gestaltet werden muss, um sowohl die Potenziale digitalisierter Produktions- und Logistiksysteme nutzbar zu machen als auch für die beteiligten Menschen eine gute Arbeit zu ermöglichen.

Die zentrale Herausforderung ist hierbei die Gestaltung der Mensch-Technik-Schnittstelle als Bindeglied zwischen den Akteuren. Nur wenn die mit und an den digitalisierten Systemen arbeitenden Menschen in der Lage sind, diese zu kontrollieren und umfassend zu verstehen, können sinnvolle Entscheidungen getroffen und Handlungen ausgeführt werden. Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) möchte daher mit diesem Tagungsband unter dem Leitthema „Mensch-Technik-Interaktion in der digitalisierten Arbeitswelt“ einen Beitrag zur Bewältigung dieser Herausforderung leisten.

Mit Berichten über Forschungsergebnisse und innovative Konzepte geben die WGAB-Mitglieder und -Anwärter*innen sowie Mitarbeiter*innen aus den beteiligten Forschungsinstituten Einblicke in ihre Forschungsarbeit. Ihre Beiträge liefern wertvollen Input für Wissenschaftler*innen und Praktiker*innen und spannen dabei unter dem gemeinsamen Leitthema einen Bogen von der Mensch-Roboter-Kollaboration in Verbindung mit Ergonomie über die Schnittstellengestaltung in Bezug auf digitale Assistenzsysteme bis hin zu verbundenen Themenbereichen wie dem digitalen Zwilling oder der Gamification.

Allen beteiligten Autor*innen danke ich herzlich für ihre interessanten Beiträge zur Mensch-Technik-Interaktion in der digitalisieren Arbeitswelt und die Inspirationen zu weiterführender Forschungsarbeit.

Bremen, im September 2020

Michael Freitag

Inhaltsverzeichnis

Digitale Planung hybrider Arbeitssysteme -
Planungsprozess am Beispiel einer Leichtbauroboter-Zelle..... 1

Jochen Deuse, André Barthelmey, Vanessa Weßkamp

Verrichtungsbasierte Planung, Simulation und sozialpartnerschaftliche Potentiale der Mensch-Roboter-Kollaboration..... 21

Kai Lemmerz, Paul Glogowski, Michael Miro, Bernd Kuhlenkötter

Mensch-Technik-Interaktion mit Emotionen..... 39

Mathias Vukelić, Kathrin Pollmann, Matthias Peissner, Dieter Spath

Potenziale und Herausforderungen neuer digitaler Interaktionssysteme im Kollektionsentwicklungsprozess der Bekleidungsindustrie..... 59

Franziska Moltenbrey, Meike Tilebein

Modellieren des Umgangs mit Wissen für Industrie 4.0..... 79

Norbert Gronau

Entwicklung eines soziotechnischen Digitalisierungs-KPI-Modells für Luftfahrtunternehmen..... 103

Wolfgang Kersten, Felix Krol, Birgit von See

Homeoffice vor, während und nach der Corona-Krise..... 131

Uta Wilkens

Digitaler Zwilling zur Mensch-Technik-Interaktion..... 153

Michael Freitag, Nils Hoppe, Christoph Petzoldt, Jasper Wilhelm, Lennart Rolfs, Rafael Mortensen Ernits, Thies Beinke

Datenbasierte Ursachenanalysen zur Verbesserung der logistischen Zielerreichung..... 171

Matthias Schmidt, Janine Tatjana Maier, Lasse Härtel

Ableitung von MTM-HWD®-Analysen aus digitalen menschlichen Bewegungsdaten..... 193

Peter Kuhlang, Martin Benter, Manuela Ostermeier

Konzept und Evaluierungsparameter für Gamification in der manuellen Montage..... 215

Dennis Keiser, Christoph Petzoldt, Thies Beinke, Michael Freitag

User Interface Design für Augmented Reality-basierte Assistenzsysteme..... 237

Hendrik Stern, Moritz Quandt, Jens kleine Kamphake, Thies Beinke, Michael Freitag

Gestaltung von Mensch-Technik-Schnittstellen für die Digitalisierung von Planungs- und Steuerungsprozessen auf Automobilterminals..... 263

Marit Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik, Susanne Schukraft, Tobias Sprodowski, Michael Freitag, Dennis Dunekacke, Viktor Zeitler, Michael Görges

Autor*innenverzeichnis..... 283

Digitale Planung hybrider Arbeitssysteme

Planungsprozess am Beispiel einer Leichtbauroboter-Zelle

Jochen Deuse[1, 2], André Barthelmey[1], Vanessa Weßkamp[1]

[1] Institut für Produktionssysteme, Technische Universität Dortmund
[2] Advanced Manufacturing/ Industry 4.0 School of Mechanical and Mechatronic Engineering, Faculty of Engineering and Information Technology, University of Technology Sydney

1. Einleitung

Die Entwicklung hin zu individualisierten Produkten stellt insbesondere den Hochlohnstandort Deutschland in Bezug auf die Variabilität in den Produktionsprozessen vor neue Herausforderungen (Delang et al. 2017). Diese können durch konventionelle Automatisierungslösungen aufgrund hoher Flexibilitätsanforderungen nicht bewältigt werden (Berg/Reinhart 2017). Ein großes Potenzial hingegen verspricht eine engere Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, die bis zur Interaktionsform Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ausgeprägt werden kann (Müller et al. 2019). Die zu diesem Zweck entwickelten Leichtbauroboter (LBR) rücken daher im Zuge der Digitalisierung und Industrie 4.0 verstärkt in den Fokus. Die Anwendungen solcher Systeme in der Industrie nehmen stetig zu, sind jedoch in den Unternehmen noch nicht flächendeckend verbreitet (Oubari et al. 2018; Selevsek/Köhler 2018). Als Gründe sind insbesondere aufwändige Planungsprozesse, die für einen wirtschaftlichen Einsatz von Arbeitsplätzen mit MRK heute noch zwingend erforderlich sind, zu nennen (Ranz et al. 2017).

Eine im Rahmen des Forschungsvorhabens „KoMPI“ entwickelte digitale Planungsunterstützung für hybride Arbeitssysteme verkürzt diesen Planungsprozess (BMBF 2017). Die Basis der Planungsunterstützung bildet die Software „ema Work Designer“, welche ein realitätsgetreues Abbild von MRK-Systemen ermöglicht. Ziel der Nutzung einer digitalen Simulation ist die zielgerichtete Konzeption der Schnittstellen zwischen Mensch, Technik und Organisation. Auf diese Weise sollen die Stärken des Menschen wie Flexibilität, Kreativität und Sensitivität mit

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_1

den Vorteilen des Roboters wie Kraft, Ausdauer und Präzision kombiniert werden, so dass ein sicheres und wirtschaftliches System entsteht.

Die Planungsunterstützung ist in ein ganzheitliches Planungskonzept eingebunden, das alle Interaktionslevel von der Koexistenz bis hin zur Kollaboration berücksichtigt (vgl. Bauer et al. 2016). Zur Sicherung der Anwendungsfreundlichkeit und Eignung für KMU fand während der Entwicklung der einzelnen Schritte ein intensiver Austausch mit Anwenderunternehmen statt.

2. Entwicklung der Planungsunterstützung

Die Entwicklung der Planungsunterstützung erfolgte aus der Motivation heraus, dass die Forschung bislang noch nicht signifikant zu einer zielgerichteten und intuitiven Einführung von MRK beitragen konnte. Daher wird in diesem Kapitel zunächst der relevante Stand der Technik skizziert.

2.1 Stand der Technik

Das Interesse an hybriden Arbeitssystemen in der Industrie wächst stetig, sodass eine Vielzahl an Unternehmen bestrebt ist, Kompetenzen aufzubauen, um Leichtbauroboter selbstständig in ihre Arbeitssysteme zu integrieren. Insbesondere die Erstintegration ist jedoch oft ein sehr langer und aufwendiger Prozess, der Unternehmen vor große Herausforderungen stellt. Für einzelne Aspekte der Integration, insbesondere der Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter, wurden in der Wissenschaft verschiedene Ansätze entwickelt. In einer frühen Arbeit entwickelte Beumelburg (2005) eine fähigkeitsorientierte Zuteilung, die auf Basis von Beschreibungen der Arbeitsvorgänge und unter dem Einsatz von genetischen Algorithmen eine hinsichtlich verschiedener Zielgrößen (Zeit, Kosten, Ergonomie) optimierte Aufgabenverteilung bestimmt. Takata/Hirano (2011) setzten ebenfalls genetische Algorithmen ein, um die verschiedenen Szenarien manuell, automatisiert und hybrid zu vergleichen.

Andere Ansätze stellen die Simulation von MRK als zentrales Werkzeug in den Mittelpunkt, so z. B. das Forschungsvorhaben „MANUSERV“. Aufbauend auf einer formalen Beschreibung des Arbeitsablaufs werden unter Einsatz der Planungssprache „Planning Domain Definition Language“ (PDDL) automatisierungsrelevante Aspekte konkreten Robotersystemen zugeordnet und Lösungskonzepte vorgeschlagen, die anschließend simuliert werden (Heinze et al. 2016; Hengstebeck et al. 2016). Hierbei werden allerdings die Spezifika unterschiedlicher Interaktionsformen zwischen Mensch und Roboter nicht berücksichtigt, die jedoch einen erheblichen Einfluss auf den Aufbau und die Wirtschaftlichkeit des hybriden Arbeitssystems haben.

Die Wirtschaftlichkeit eines MRK-Systems wird i.d.R. neben den Investitionskosten maßgeblich durch die erreichbaren Zykluszeiten und davon abhängig der erreichbaren Stückzahl bestimmt. Durch die herstellerabhängigen komplexen Robotersteuerungen sowie erforderlichen reduzierten Geschwindigkeiten bei der Annäherung an den Menschen können realistische Zeiten jedoch ohne eine Simulation nur sehr ungenau bestimmt werden. Die Verfahrwege des Roboters können sich bauart- und herstellerabhängig ebenso wie das Beschleunigungsverhalten unterscheiden. Software, die es ermöglicht, die Bewegungen eines Menschen und eines Roboters gleichzeitig abzubilden, ist erst in den letzten Jahren entwickelt worden und weiterhin Gegenstand der Forschung (Busch 2016; Ore et al. 2015; Ore et al. 2017; Tsarouchi et al. 2017).

Nachteilig an den vorgestellten Vorarbeiten für den praktischen Einsatz von MRK in Unternehmen ist die Fokussierung lediglich eines Teilaspekts bei der Integration von Leichtbaurobotern. So wird z. B. die Auswahl eines geeigneten Arbeitssystems ebenso wenig berücksichtigt wie sicherheitstechnische Aspekte. Ein umfassenderer Ansatz von Schröter (2018) adressiert den gesamten Arbeitsablauf, setzt jedoch keine Simulation ein, so dass in der Planungsphase keine Überprüfung der Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit möglich ist.

Im Forschungsvorhaben KoMPI wurde daher eine ganzheitliche Planungssystematik für hybride Arbeitssysteme mit Mensch-Roboter-Kollaboration entwickelt. Die Systematik ist nicht mensch- oder technikzentriert ausgerichtet, sondern definiert ein Arbeitssystem als soziotechnisches System, in dem die Faktoren Mensch-Technik-Organisation sowie die Schnittstellen zwischen diesen gleichermaßen Berücksichtigung finden. Darüber hinaus ist die Planungssystematik praxisnah ausgestaltet, sodass sie leicht in Unternehmen anwendbar ist und durch Simulation ein gesichertes und gut zu visualisierendes Ergebnis liefert. Auf Basis dieser Anforderungen ist ein fünfstufiger Prozess wie in Abbildung 1 entstanden.

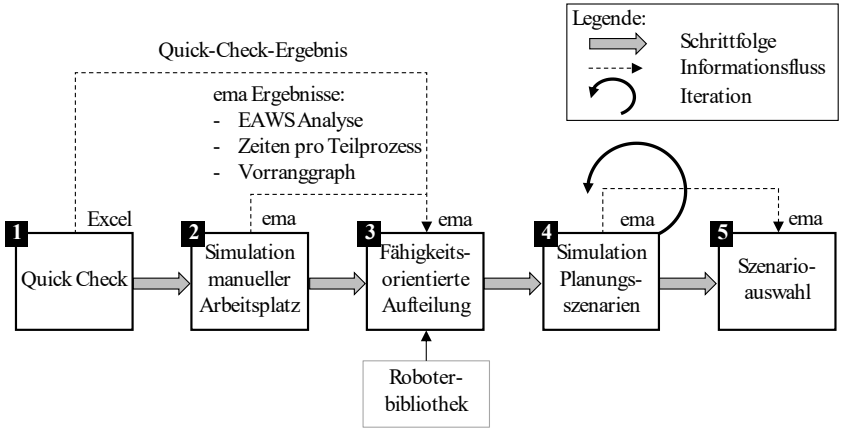


Abbildung 1: Planungssystematik für hybride Arbeitssysteme (Weßkamp et al. 2019b)

Im Sinne einer systemischen Vorgehensweise werden mithilfe einer Potenzialanalyse, dem „Quick-Check", die Arbeitsplätze mit dem höchsten MRK-Potenzial identifiziert (Schritt 1). Die sich anschließende Simulation des existierenden manuellen Arbeitssystems (Schritt 2) bildet die Grundlage für die iterativen Schritte der Arbeitsverteilung zwischen Mensch und Roboter (Schritt 3) und der Simulation der Planungsszenarien hybrider Arbeitsplätze (Schritt 4). Abschließend werden die entstandenen Szenarien in einer arbeitswissenschaftlichen Bewertung analysiert und unter Berücksichtigung u.a. der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit ausgewählt (Schritt 5). Die einzelnen Schritte werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Um die Nutzung der Systematik auch für KMU zu ermöglichen, basiert diese auf der einfach und intuitiv zu bedienenden Simulationssoftware „ema Work Designer" und auf Office-Produkten. Zielgruppe für die Anwendung der Systematik sind Arbeitsplaner und Prozessingenieure. Ein umfangreiches Vorwissen im Bereich der Automatisierung oder MRK ist nicht erforderlich.

2.2 Quick-Check

Im Sinne einer systematischen Vorgehensweise erfolgt im ersten Schritt eine Identifikation geeigneter Arbeitssysteme und Prozesse für den Einsatz von MRK in Form einer Potenzialanalyse. Zur Durchführung der Potenzialanalyse wurde der Quick-Check entwickelt. Sein Ziel besteht darin, innerhalb einer Stunde ein Arbeitssystem bewerten und mit anderen Systemen in Bezug auf das MRK-Potenzial vergleichen zu können. Für die Entwicklung wurden mit der Wirtschaftlichkeit und der ergonomischen Verbesserung einerseits die beiden Hauptgründe für den Einsatz von MRK betrachtet (Bauer et al. 2016). Andererseits wurden mit der

technischen Machbarkeit und der Sicherheit die größten Hemmnisse bei der Umsetzung analysiert (Oubari et al. 2018). Für eine erste Abschätzung des Potenzials für ein hybrides Arbeitssystem ist die technische Machbarkeit besonders geeignet (Selevsek/Köhler 2018), während eine detaillierte Analyse der Wirtschaftlichkeit und Sicherheit erst durch Simulation möglich wird (Busch et al. 2013). Auch die detaillierte ergonomische Bewertung ist erst mit einem bestimmten Planungsfortschritt möglich und wird ebenfalls durch die Simulation gestützt. Daher kann für diese Faktoren nur eine Abschätzung vorgenommen werden. Aus diesen Überlegungen heraus wurden die fünf Kategorien Bauteile, Zu- und Abführung, Verbesserungspotenzial, Sicherheit und Sonstiges mit je bis zu fünf Bewertungskriterien erarbeitet (Ermer et al. 2019).

Die Bewertung der Kriterien erfolgt über eine Skala von null bis vier Punkten. Für eine einfache Anwendung wird die Bewertung durch Beispiele unterstützt (s. Abbildung 2).

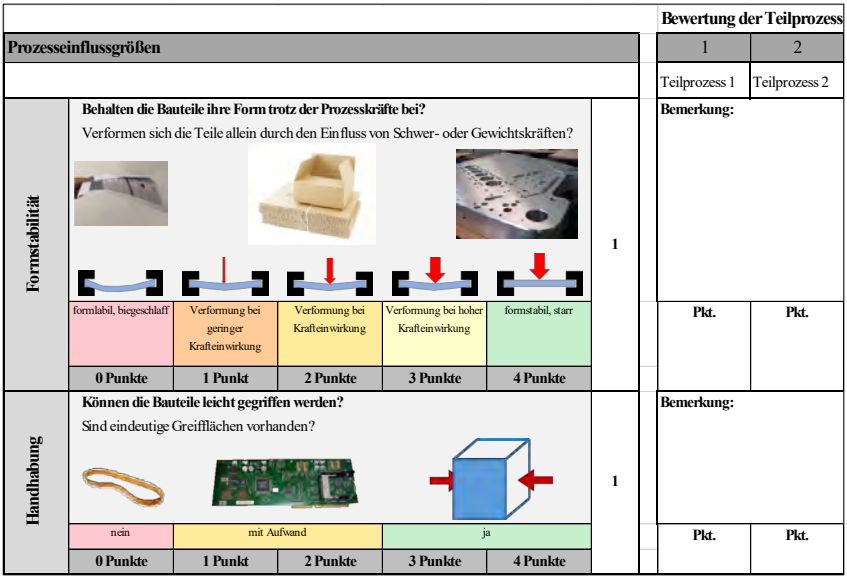


Abbildung 2: Auszug aus dem Quick-Check in der Kategorie Bauteile

Ein Arbeitssystem kann eine Vielzahl von Teilprozessen enthalten, die bei der Bewertung des Automatisierungspotenzials große Unterschiede aufweisen können, wie z. B. die Montage eines biegeschlaffen Kabels und eines stabilen Gehäuses in einem Arbeitssystem. Der Anwender muss daher im ersten Schritt die Grenzen der Teilprozesse festlegen. Dies erfolgt aufgrund der Individualität der Arbeitsinhalte

selbstständig, wobei ein Methodenniveau entsprechend des Systems vorbestimmter Zeiten MTM-UAS (Universelles Analysier-System) für die Serienfertigung empfohlen wird (Ermer et al. 2019).

Das erste Ergebnis des Quick-Checks ist ein Prozentwert für das Automatisierungspotenzial, das die Eignung jedes Teilprozesses hinsichtlich der Übernahme durch einen Leichtbauroboter angibt. Wird ein Teilprozess in drei von insgesamt 13 Kriterien mit null Punkten bewertet, wird der gesamte Teilprozess mit null Punkten bewertet und ist aufgrund des schlechten Aufwand-Nutzen-Verhältnisses nicht für eine Automatisierung geeignet.

Das zweite Ergebnis des Quick-Checks bildet das MRK-Potenzial, das die Eignung des Gesamtprozesses für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter widerspiegelt. Diese ist besonders hoch ausgeprägt, wenn einzelne Teilprozesse sehr gut durch den Roboter übernommen werden können, andere dagegen nur der Mensch durchführen kann und somit erst durch die Kombination ihrer Fähigkeiten das Potenzial dabei zur Entfaltung kommt. Über den Vergleich der Automatisierbarkeit und des MRK-Potenzials für verschiedene durchgeführte Potenzialanalysen wird das Arbeitssystem mit dem höchsten Potenzial ausgewählt.

Während seiner Entwicklung und zu Validierungszwecken wurde der Quick-Check bei verschiedenen Anwendungspartnern innerhalb des Forschungsvorhabens KoMPI und bei verschiedenen Unternehmen eines Industriearbeitskreises angewendet. Das online frei verfügbare Werkzeug bietet einen einfachen Einstieg in den Bereich MRK und kann als Teil der Planungssystematik oder auch separat genutzt werden (Ermer et al. 2019).

2.3 Simulation des manuellen Arbeitsplatzes und fähigkeitsorientierte Aufteilung der Arbeitsinhalte

Für die folgenden Schritte, bei denen es sich um den Beginn der digitalen Planung des MRK-Arbeitssystems handelt, muss das ausgewählte Arbeitssystem – sofern noch nicht vorhanden – in ein Modell überführt werden, das in der Software „ema Work Designer" simuliert werden kann (Schritt 2). Dieses Modell bildet die Grundlage für die Erstellung möglicher Planungsszenarien im dritten Schritt und die Referenz hinsichtlich der arbeitswissenschaftlichen Kriterien, die letztendlich zur Szenarien-Bewertung herangezogen werden können.

Trotz der in der Literatur existierenden Ansätze zur Aufteilung von Arbeitsinhalten zwischen Mensch und Roboter stellt dieser Schritt für Unternehmen weiterhin eine große Herausforderung und ein Hemmnis bei der Einführung von MRK-Szenarien dar (Oubari et al. 2018). Eine Automatisierung der Aufteilung zur Reduzierung der Komplexität für den Anwender findet in der Praxis ebenfalls wenig

Akzeptanz, da die Einbringung des Erfahrungswissens des Prozessplaners und unternehmensspezifischer Rahmenbedingungen essenzielle Voraussetzungen darstellen. Aus diesem Grund basiert die Zuteilung auf wenigen vorhandenen oder aus der Simulation des manuellen Arbeitsplatzes abzuleitenden Eingangsinformationen und einfachen Zuteilungsregeln.

Einen ersten technischen Hinweis auf die Eignung eines Arbeitsinhaltes zur Ausführung durch einen Menschen oder einen Roboter liefern die Ergebnisse für die Teilprozesse im Quick-Check (Weßkamp et al. 2019b). Einer der wesentlichen Treiber für den Einsatz von MRK ist jedoch die ergonomische Verbesserung. Zusätzlich zur ersten Abschätzung des ergonomischen Verbesserungspotenzials im Quick-Check wird auf MTM EAWS (Ergonomic Assessment Work Sheet), ein etabliertes und im „ema Work Designer" integriertes Werkzeug zur ergonomischen Analyse und Gestaltung von Arbeitssystemen, zurückgegriffen (Fritzsche 2010). EAWS berücksichtigt allerdings den Gesamtablauf für einen Beschäftigten und bezieht ebenfalls die Wiederholhäufigkeit innerhalb einer Schicht mit ein. Aus diesem Grund ist eine einfache Übertragung des EAWS-Verfahrens auf die Bewertung der Teilprozesse nicht möglich. Daher wird ein Ergonomie-Indikator auf Teilprozessbasis aus dem zeitunabhängigen Bereich der Körperhaltung und der wirkenden Kräfte abgeleitet und in die drei Kategorien grün (kein Handlungsbedarf), gelb (Verbesserungen empfohlen) und rot (Verbesserungen notwendig) unterteilt.

Für einen wirtschaftlichen Einsatz sind neben der Ergonomie die Prozesszeiten und Kenntnisse über die Bearbeitungsreihenfolgebeschränkungen für die Teilprozesse von besonderer Bedeutung. Die Prozesszeiten können vorhandenen Zeitstudien oder der Simulation entnommen werden. Die Reihenfolgebeschränkungen werden einem Vorranggraphen entnommen oder durch die Prozesskenntnis des Anwenders abgebildet.

Auf Basis dieser Informationen erfolgt die Zuteilung der Teilprozesse zwischen Mensch und Roboter unter Beachtung von drei Logikregeln.

- Für Teilprozesse mit einer roten Ergonomie-Bewertung erfolgt die Übernahme durch den Roboter, sofern eine Automatisierung durchführbar ist. Erfahrungswerte zeigen, dass dies bei einer Teilprozessbewertung des Quick-Checks über 50 % i.d.R. gegeben ist.
- Teilprozesse mit dem höchsten Wert aus dem Quick-Check werden dem Roboter zugeteilt.
- Layout und Zykluszeitrestriktionen müssen beachtet werden.

Unter Berücksichtigung dieser Regeln wird die Zuteilung individuell nach den Zielen des Unternehmens getroffen. Repräsentative Hauptziele von Unternehmen sind z. B. die Reduzierung der Zykluszeit, die Verbesserung der Ergonomie oder die Verbesserung der Mitarbeiterauslastung. Bei der Machbarkeit eines flexiblen Robotereinsatzes kann außerdem die Reaktion auf schwankende Stückzahlen ein Ziel darstellen (Müller et al. 2019).

Durch die Erweiterung des „ema Work Designer" im Verlaufe des Forschungsvorhabens kann diese Zuteilung mittlerweile per Drag and Drop durchgeführt werden. Grundlegende Bewegungsinformationen werden bei der Umverteilung beibehalten und tragen so zu geringeren Aufwänden bei der Simulationserstellung bei.

2.4 Simulation des hybriden Arbeitssystems und arbeitswissenschaftliche Bewertung der Planungsszenarien

Die Zuteilung der Arbeitsinhalte erfolgt nicht rein sequenziell, sondern iterativ mit Hilfe der Simulation des hybriden Arbeitssystems. Eine Roboter- und Sensorbibliothek ermöglicht eine schnelle Roboterauswahl und die Übertragbarkeit der Bewegungen zwischen Mensch und verschiedenen Robotertypen zur Entwicklung verschiedener Planungsszenarien.

Für die zielgerichtete Auswahl des für die Umsetzung am besten geeigneten Planungsszenarios muss eine Vergleichbarkeit der Szenarien hinsichtlich ihres konkreten Nutzens für das Unternehmen erreicht werden. Dieser Nutzen ist entweder anhand der Wirtschaftlichkeit oder über die ergonomische Verbesserung für die Mitarbeiter messbar (Oubari et al. 2018; Thomas et al. 2015). Allerdings sollten ungünstige organisatorische Anpassungen wie längere Laufwege und veränderte Materialversorgung verhindert werden. Darüber hinaus darf die Erzielung dieses Nutzens die Arbeitssicherheit nicht gefährden. Zur Bewertung der Planungsszenarien werden daher mit Sicherheit, Ergonomie, Wirtschaftlichkeit und organisatorischen Anpassungen vier arbeitswissenschaftliche Betrachtungsgegenstände als Kriterien ausgewählt:

Zum Ausschluss von Gefährdungen ist es erforderlich, dass eine nicht gegebene Sicherheit als K.O.-Kriterium ausgeprägt wird und somit zum Ausschluss bzw. zu einem zwingenden Änderungsbedarf des MRK-Planungsszenarios führt. Aufgrund dieser zentralen Bedeutung müssen Kollisionen, Gefährdungssituationen oder ungünstige Belastungen, z. B. nach ISO/TS 15066 (DIN 2016), DIN EN 349 (DIN) und EAWS (Schaub et al. 2012) erkannt und bewertet werden. Auch eine inakzeptable Bewertung der Ergonomie bildet einen Ausschlussgrund für das erstellte Szenario. Sind Gefährdungen ausgeschlossen, erfolgt die Bewertung der Ergonomie, Wirtschaftlichkeit und organisationaler Kriterien nach dem in Abbildung 3 dargestellten Vorgehen.

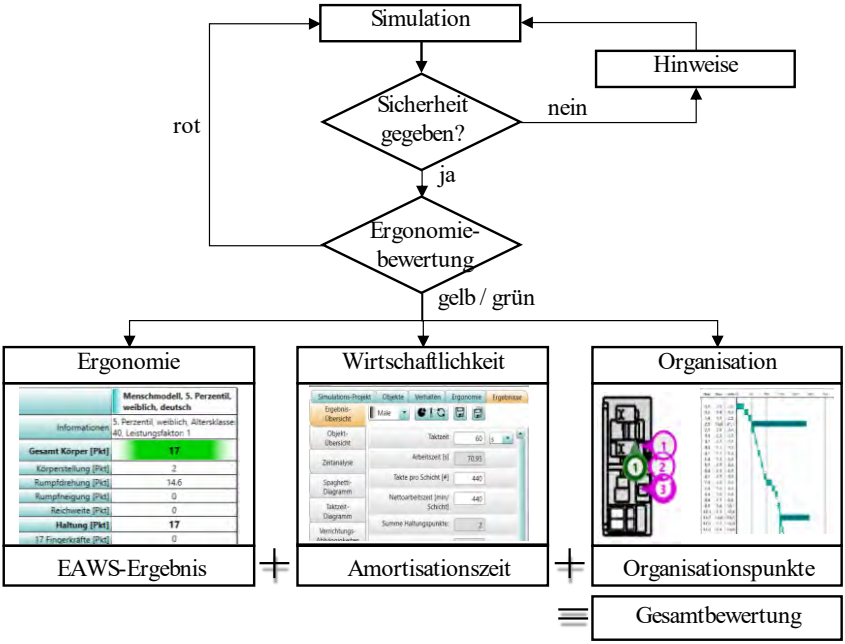


Abbildung 3: Schema der arbeitswissenschaftlichen Bewertung (Seckelmann et al. 2019)

Während für die Ergonomie-Bewertung der Ergonomie-Indikator zugrunde gelegt wird, werden für die Wirtschaftlichkeit die etablierten Verfahren der Kapitalwertmethode oder der Amortisationszeit, ergänzt um Hinweise zu MRK spezifischen Kosten wie Integrations-, Schulungs- und Akzeptanzförderungskosten, verwendet. Im Bereich der organisatorischen Anpassungen werden veränderte Materialversorgung, Laufwege und die Auslastung im Vergleich zur Ausgangssituation erfasst.

Da Unternehmen den Kriterien in Abhängigkeit der individuellen Unternehmensstrategien und -branchen einen unterschiedlichen Stellenwert einräumen, ist eine individuelle Gewichtung dieser Kriterien erforderlich. Durch die Normierung der Ergebnisse aus den drei Bewertungen erfolgt eine Gesamtbewertung des Planungsszenarios.

3. Validierung der Planungssystematik

Im Rahmen des Projekts KoMPI konnten bereits Teilschritte der Planungssystematik innerhalb industrieller Anwendungsfälle der Unternehmenspartner durchgeführt werden. In Weßkamp et al. (2019b) wurde mit Unterstützung des Quick-Checks und der Drag and Drop-Lösung zur Verschiebung der Arbeitsinhalte innerhalb der Simulation ein Planungsszenario für eine MRK-Montagelinie bei der Albrecht JUNG GmbH & Co. KG entworfen. In Seckelmann et al. (2019) konnte die Bestätigung des Nutzens dieser Planungsalternative für das Unternehmen mit der arbeitswissenschaftlichen Bewertung nachgewiesen werden.

Für eine Validierung der vollständigen Planungssystematik wurde die Montage einer Zirkulationspumpe innerhalb eines Montagesystems im Industrial Engineering Trainings Centre des Instituts für Produktionssysteme betrachtet. Ausgehend von dem manuellen Montageprozess wurden die einzelnen Schritte durchlaufen, um ein MRK-Szenario zu gestalten und zu bewerten. Für die Erweiterung des manuellen Arbeitsplatzes zum MRK-System standen mit dem kuka iiwa 7 und dem UR 10 zwei Leichtbauroboter sowie Zuführtechnik mit optischer Bauteilerkennung zur Verfügung.

3.1 Quick-Check Anwendung

Für den ersten Schritt der Planungssystematik erfolgte die Potenzialanalyse mit Hilfe des Quick-Checks für die Pumpenmontage am manuellen Arbeitsplatz. Der Montageprozess wurde dazu in neun Ablaufabschnitte unterteilt, die einzeln bewertet wurden. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis dieses Quick-Checks.

Bewertung der Teilprozesse									
Prozesseinflussgrößen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Gehäuse vor-bereiten	Pumpe mit Rohr	Ver-schrauben	Gehäuse auf Pumpe	Ver-schrauben	Platine einelgen	Stecker mit Platine verbinden	Gehäuse-Deckel Ver-schrauben	Produkt ablegen
Detailauswertung (Übertrag)									
Bauteile - Ergebnis [Potential in %]	12,00	12,00	70,00	75,00	70,00	70,00	45,00	70,00	90,00
Zu- und Abführung - Ergebnis [Potential in %]	25,00	58,33	41,67	50,00	41,67	50,00	50,00	33,33	75,00
Verbesserungspotential - Ergebnis [%]	37,50	37,50	12,50	25,00	12,50	25,00	37,50	12,50	62,50
Sicherheit - Ergebnis [%]	75,00	75,00	125,00	75,00	125,00	125,00	75,00	125,00	125,00
Sonstiges - Ergebnis [%]	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	0,00	50,00	50,00
Gesamtergebnis									
Summe Punkte je Teilprozess	23	30	27	28	27	29	21	26	39
Anzahl der bewerteten Kriterien (max. 13)	13	13	13	13	13	13	13	13	13
Maximale Punkte über alle Kriterien (max. 52 Punkte)	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Durchschnittliche Punktzahl je Kriterium	1,8	2,3	2,1	2,2	2,1	2,2	1,6	2,0	3,0
Prozentwert: Anteil der erreichten Punktzahl	0,0	62,5	56,3	58,3	56,3	60,4	0,0	54,2	81,3
Rangfolge der Teilprozesse	8	2	5	4	5	3	8	7	1
Gesamtbewertung der Automatisierbarkeit	47,7								
Gesamtbewertung des MRK-Potentials	67,2								

Abbildung 4: Quick-Check Ergebnis für die manuelle Pumpenmontage

Da für die Ablaufabschnitte eins „Gehäuse vorbereiten“ und acht „Stecker mit Platine verbinden“ jeweils in mindestens drei Kategorien null Punkte vergeben wurden, besteht laut Quick-Check für diese Ablaufabschnitte kein Automatisierungspotenzial. Die Gründe liegen insbesondere in der Biegeschlaffheit der Teile und deren ungenauer Orientierung sowie in fehlenden Greifflächen oder einer hohen Teileanzahl.

Für die Ablaufabschnitte, in denen die vier Hauptbauteile Pumpengehäuse, Pumpe, Gehäuse und Gehäusedeckel montiert werden, sowie für den letzten Ablaufabschnitt „Produkt ablegen“, besteht ein hohes Automatisierungspotenzial, das auf eine einfache Handhabung der Bauteile zurückzuführen ist. „Produkt ablegen“ nimmt in Bezug auf das Automatisierungspotenzial den ersten Rang im Vergleich der Ablaufabschnitte ein, da das hohe Bauteilgewicht von über 8 kg zu einer hohen ergonomischen Belastung führt und dennoch die technische Machbarkeit gegeben ist.

Abbildung 5 stellt einen Vergleich der ausschlaggebenden Kriterien für die beiden Ablaufabschnitte acht und neun dar. Die Variation zwischen 0 % und 81,3 % der Anteile der erreichten Punktzahlen führt zu einem MRK-Potenzial von 67,2 %. Die Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Roboter ist daher für den betrachteten Montageprozess besonders vielversprechend.

Schritt 7: Stecker mit Platine verbinden	
Formstabilität:	0 Punkte (biegeschlaff)
Handhabung:	0 Punkte (keine Greiffläche)
Sonstiges:	0 Punkte (komplexes Fügen)
Gesamtpunkte:	0 %
Rang:	8/8

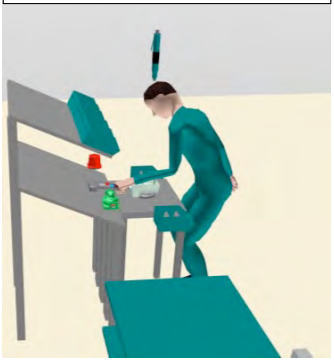
Schritt 9: Produkt ablegen	
Ordnungszustand:	4 Punkte (Vorrichtung)
Ergonomie:	4 Punkte (Gewicht > 8kg)
Quetschgefahr:	3 Punkte (frei über Tisch)
Gesamtpunkte:	81,3 %
Rang:	1/8

Abbildung 5: Vergleich der Kriterien für die beiden Ablaufabschnitte acht und neun

3.2 Simulation der MRK-Szenarien

Da noch kein CAD-Modell des manuellen Arbeitsplatzes vorlag, erfolgte die Erzeugung des manuellen Prozesses im „ema Work Designer“ durch die Nutzung der Bauteilebibliotheken und des ema-Menschmodells. Dazu war zudem ein Initialaufwand in Form der manuellen Erstellung der Ablaufabschnitte als Verrichtungen erforderlich. Die Abbildung 6 zeigt die zeitlichen und ergonomischen Analyseergebnisse des manuellen Prozesses.

Simulation des manuellen Arbeitsplatzes



EAWS-Analyse als Ergebnis der Simulation

	Menschmodell, 50. Perzentil, männlich, deutsch
Informationen	50. Perzentil, männlich, Altersklasse: 40, Leistungsfaktor: 1
Gesamt Körper [Pkt]	**45**
Körperstellung [Pkt]	2
Rumpfdrehung [Pkt]	11
Rumpfneigung [Pkt]	0
Reichweite [Pkt]	0
Haltung [Pkt]	**13**
17 Fingerkräfte [Pkt]	0
18 Arm-/Ganzkörperkräfte [Pkt]	0
Kräfte [Pkt]	**0**
19 Umsetzen [Pkt]	31.7
19 Halten [Pkt]	0
19 Tragen [Pkt]	0
19 Ziehen & Schieben [Pkt]	0
manuelle Lastenhandhabung [Pkt]	**32**

UAS-Analyse als Ergebnis der Simulation

	#	Bezeichnung	Kode	Hand	TMU	A x H	TMU beeinfl.	TMU unbeein	Gesamt TMU	Dauer [s]	Ø Daue [s]	Turnus [%]
		(...)										
−	78	**moniterte Pumpte ablegen**			158.3		50.0	108.3	158.3	5.70	5.70	100.00
+	79	Körperbewegung	KA		25.0	1 * 1	25.0	0.0	25.0	0.90	0.90	100.00
+	80	Aufnehmen & Platzieren	AH1	L + R	25.0	1 * 1	25.0	0.0	25.0	0.90	0.90	100.00
+	81	Prozesszeit	PT		97.2	1 * 1	0.0	97.2	97.2	3.50	3.50	100.00
+	82	Prozesszeit	PT		11.1	1 * 1	0.0	11.1	11.1	0.40	0.40	100.00
	83	Körperbewegung	KA		25.0	3 * 1	75.0	0.0	75.0	2.70	2.70	100.00

Prozesszeit laut MTM-UAS: 2759,44 [TMU] ~ 99,34 [s] (1,66 [min])

Abbildung 6: Simulation des manuellen Arbeitsplatzes

Tabelle 1 zeigt die für die Zuteilung der Arbeitsinhalte erforderlichen Eingangsgrößen basierend auf dem manuellen Prozess. Die ergonomischen Handlungsbedarfe in einzelnen Teilprozessen werden durch eine gelbe Einstufung des Ergonomie-Indikators aufgezeigt. Die Analyse zeigt zudem, dass das Bauteilhandling den größten Einfluss auf die Bewertung der Ergonomie hat.

	TP 1	*TP2*	*TP3*	*TP4*	*TP5*	*TP6*	*TP7*	*TP8*	*TP9*
Automatisierungspotenzial	0	62,5	56,3	58,3	56,3	60,4	0	54,2	81,3
Ergonomie-Indikator	grün	gelb	grün	gelb	grün	grün	grün	grün	gelb
Zeit Mensch	18,1	6,1	19,6	3,1	10,6	7,2	7,8	18,5	5,7

Tabelle 1: Eingangsgrößen für die Zuteilung der Arbeitsinhalte

In Bezug auf die Stückzahlen und die daraus abzuleitende erforderliche Zykluszeit sind innerhalb des betrachteten Szenarios keine Veränderungen zu erwarten. Das Hauptziel der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuteilung liegt somit in der Verbesserung der Ergonomie bei gleichzeitiger Einhaltung der Taktzeit von 1,66 Minuten.

Den in Abschnitt 2.3 aufgezeigten Regeln folgend können die Teilprozesse zwischen Mensch und Roboter aufgeteilt werden. Alle Teilprozesse mit Ausnahme der Teilprozesse eins und sieben besitzen ein hohes Potenzial zur Übernahme durch den Roboter und können laut Quick-Check dem Roboter zugewiesen werden. Auch die ergonomisch belastenden Tätigkeiten würden bei dieser Zuordnung durch den Roboter übernommen. Allerdings wird dieses Planungsszenario durch individuelle technische Restriktionen eingeschränkt, sodass das eher generische Quick-Check-Ergebnis um das Planungswissen des Anwenders ergänzt werden muss.

Der Aufwand für die Umsetzung sowohl von Handhabungs- und Fügearbeiten als auch Schraubtätigkeiten durch einen Roboter ist aufgrund der unterschiedlichen Greifer/Werkzeuge aufwendig und kostenintensiv. In der Folge wurde die in Abbildung 7 vorgestellte Aufteilung vorgenommen. Dabei wurden zunächst nur die ergonomisch kritischen Prozesse dem Roboter zugeteilt, da die ergonomische Verbesserung das Hauptziel der Einführung des Leichtbauroboters war. In diesem Szenario wird das Ablegen des Produkts durch den Roboter bereits mit der Vorbereitung des Gehäuses durch den Menschen parallelisiert, sodass sich eine geringfügige Verkürzung der Taktzeit von 1,66 Minuten auf 1,5 Minuten ergibt. Weitere Parallelisierungen der Teilprozesse drei bis acht waren aufgrund der vorgegebenen Montagereihenfolge nicht möglich.

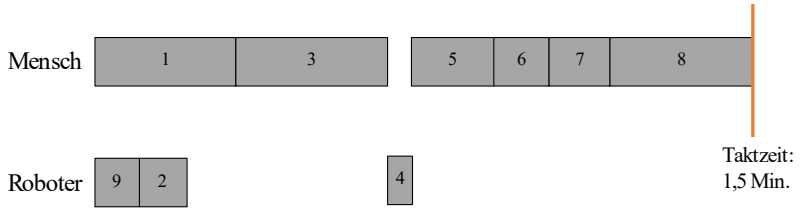


Abbildung 7: Mögliche Aufgabenzuteilung

Bei der Simulation dieses Szenarios konnte, wie eingangs der Validierung erläutert, auf die bereits vorhandene technische Ausrüstung (Kuka iiwa, UR10, etc.) zurückgegriffen werden. Der Einsatz der Zuführ- und Kameratechnik bedingt einen Einsatz des kuka iiwa 7, da hier bereits entsprechende Schnittstellen vorhanden waren. In der Simulation zeigte sich, dass der Roboter aufgrund seiner limitierten Traglast

von 7 kg, der eingeschränkten Reichweite und den Layout-Restriktionen der Zuführungen, den Teilprozess acht nicht ausführen kann, sodass dieser beim Menschen verbleiben musste. Da der Hebevorgang des 8 kg schweren Produkts jedoch ergonomisch die höchste Belastung des Menschen verursacht, wurde ein weiteres Szenario simuliert, in dem der zweite Roboter (UR10) diesen Prozessschritt übernimmt. Beide Planungsszenarien sind in Abbildung 8 dargestellt und werden im Folgenden mit a) und b) bezeichnet.

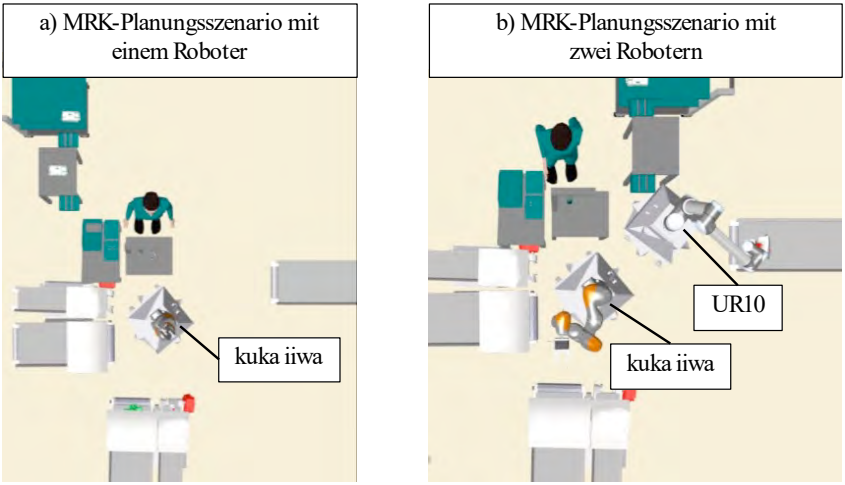


Abbildung 8: MRK-Planungsszenarien

3.3 Arbeitswissenschaftliche Bewertung der Szenarien

Zur Auswahl eines der Szenarien wurden die beiden Alternativen in der arbeitswissenschaftlichen Bewertung gegenübergestellt. Aus dem Kollisionsbericht der Simulation ergaben sich für beide Szenarien keine kritischen Hinweise in Bezug auf die **Sicherheit**. In den weiteren sicherheitstechnischen Fragen ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Szenarien. In beiden Alternativen wurde ein Betreten des Arbeitsraums der Roboter durch einen Lichtvorhang gesichert. Interaktion zwischen Mensch und Roboter findet nur in einem ausgewählten Bereich des Arbeitsplatzes statt.

Hinsichtlich der **Ergonomie** ergibt sich eine klare Überlegenheit des Szenarios b). In Szenario a) verbleibt der EAWS-Wert im gelben Bereich, bei einer geringfügigen Reduktion von 45 auf 37,5, während Szenario b) mit 13,5 Punkten deutlich im grünen Bereich liegt, vgl. Abbildung 9.

Simulation des MRK-Arbeitsplatzes mit zwei Robotern

EAWS-Analyse als Ergebnis der Simulation

	Menschmodell, 50. Perzentil, männlich, deutsch
Informationen	50. Perzentil, männlich, Altersklasse: 40, Leistungsfaktor: 1
Gesamt Körper [Pkt]	**13.5**
Körperstellung [Pkt]	2
Rumpfdrehung [Pkt]	11.5
Rumpfneigung [Pkt]	0
Reichweite [Pkt]	0
Haltung [Pkt]	**13.5**
17 Fingerkräfte [Pkt]	0
18 Arm-/Ganzkörperkräfte [Pkt]	0
Kräfte [Pkt]	**0**
19 Umsetzen [Pkt]	0
19 Halten [Pkt]	0
19 Tragen [Pkt]	0
19 Ziehen & Schieben [Pkt]	0

Abbildung 9: EAWS-Ergebnis für den MRK-Arbeitsplatz mit zwei Robotern

In Bezug auf die **Wirtschaftlichkeit** konnten konkrete Zahlen aufgrund des Einsatzes in der Forschungsumgebung nur schwer ermittelt werden. Für das Szenario a) ergibt sich gegenüber b) eine Einsparung von 25 %, da nur die Kosten eines Roboters berücksichtigt werden und der zweite Roboter für andere Anwendungsfälle zur Verfügung steht. Die mit 95,7 Sekunden geringere Zykluszeit in Szenario b) gegenüber Szenario a) mit 100 Sekunden wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit des Szenarios b) aus. Dennoch ist die Wirtschaftlichkeit der Anlage im Vergleich zum manuellen Szenario als eher gering zu bewerten, da neben den Robotern die Zuführ- und Kameratechnik für beide Szenarien höhere Kosten verursachen. Auf der für die arbeitswissenschaftliche Bewertung entwickelten Skala von -10 bis 10 (vgl. Seckelmann et al. 2019) wurde daher für Szenario a) ein Wert von -1 und für b) von -3 ermittelt.

Arbeitsorganisatorisch ergeben sich nur geringfügige Unterschiede zwischen den Szenarien. In beiden muss ein Mitarbeiter die vorbereiteten Gehäuse wieder über die Zuführtechnik dem Roboter zuführen. Es ergeben sich in Szenario b) geringere Laufwege, da das Ablegen des Produkts für den Menschen entfällt bei minimal größerem Platzbedarf. In Bezug auf die Auslastung des Menschen sind ebenfalls nur geringe Unterschiede festzustellen: Szenario a) 100%, Szenario b) 97%.

	Gewichtung	*Teilergebnisse*		*Normiert*		*Gewichtet*	
		a)	*b)*	*a)*	*b)*	*a)*	*b)*
Ergonomie (K.O.)	60%	37,5	13,5	-0,6	8,4	-0,36	5,04
Organisation	20%	0,7	0,2	0,7	0,2	0,14	0,04
Wirtschaftlichkeit	20%	/	/	-1	-3	-0,2	-0,6
GESAMT						**-0,42**	**4,48**

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Ergebnisse der arbeitswissenschaftlichen Bewertung der Szenarien a) und b)

Auf Basis der arbeitswissenschaftlichen Bewertung wurde Szenario b) für die Umsetzung ausgewählt und somit das Hauptziel der ergonomischen Verbesserung bei leichter Verbesserung der Taktzeit erreicht.

4. Fazit

Die Anwendbarkeit der Planungssystematik konnte durch die Validierung anhand der Pumpenmontage erneut bestätigt werden. Die Planungssystematik zeichnet sich in Bezug auf die einfache Anwendbarkeit und damit den einfachen Einstieg in das Thema MRK aus. Stärken bestehen insbesondere in der schnellen Schaffung von Transparenz mit dem Quick-Check, in der fähigkeitsorientierten und dennoch anpassbaren Arbeitszuteilung sowie der Absicherung durch die Simulation des Szenarios. Während der Quick-Check noch ohne Vorkenntnisse durchgeführt werden kann, sollte für die Arbeitszuteilung ein Grundwissen über Roboter und ihre Fähigkeiten erworben werden. Der Aufbau dieser Kompetenzen kann parallel zur Planungssystematik erfolgen und wird durch diese gefördert, da sie immer wieder die Auseinandersetzung mit dem Arbeitssystem und der Thematik MRK anstößt. Der Kompetenzaufbau innerhalb der Unternehmen zur selbstständigen Integration von Leichtbaurobotern ist ein wichtiger Wettbewerbsvorteil. Um die Kompetenzentwicklung weiter zu fördern, wurde ein begleitendes Schulungskonzept sowohl für Anwender der Planungssystematik als auch für operatives Personal entwickelt. Ein zielgruppendifferenziertes E-Learning in Kombination mit Workshops vermittelt Grundlagen zu MRK ebenso wie zum Quick-Check und den weiteren Planungsschritten (Weßkamp et al. 2019a).

Nachteilig ist der hohe initiale Aufwand zur Erstellung der Simulation, der sich jedoch zukünftig durch die Entwicklung zu Industrie 4.0 und die Verfügbarkeit digitaler Daten und Modelle reduzieren wird. Darüber hinaus erfolgt die Bahnplanung in der Simulation zwar realitätsnah, jedoch noch nicht exakt. Das Ausleiten der Roboterbewegung als Programm zur direkten Verwendung für reale Roboter bildet daher weiterhin einen Forschungsschwerpunkt. Wird diese Hürde bewältigt, ist zukünftig eine virtuelle Inbetriebnahme von MRK-Systemen denkbar, die den Implementierungsaufwand deutlich reduziert und gleichzeitig eine Steigerung der Qualität des Implementierungsprozesses bewirkt.

Ein weiteres zukünftiges Potenzial besteht in der Erweiterung der Planungssystematik um ein virtuelles Cardboard-Engineering. Dabei kann die Visualisierung des digitalen Planungsszenarios in der virtuellen Realität oder als erweiterte Realität genutzt werden, um Fehler und Verbesserungspotenziale aufzuzeigen, die erst durch die tatsächlichen Proportionen der Einrichtungen erkannt werden können. Darüber hinaus kann diese attraktive Art der Einbeziehung der Mitarbeiter für das virtuelle Cardboard-Engineering zur Akzeptanzförderung beitragen.

Literatur

Bauer, W., Bender, M., Braun, M., & Rally, P. (2016). Leichtbauroboter in der manuellen Montage - einfach einfach Anfangen. Stuttgart.

Berg, J., & Reinhart, G. (2017). An Integrated Planning and Programming System for Human-Robot-Cooperation. Procedia CIRP, 63, 95–100.

Beumelburg, K. (2005). Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss, 2005. IPA-IAO-Forschung und -Praxis: Vol. 413. Heimsheim: Jost-Jetter. Retrieved from http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2005/2262/pdf/Diss_Beumelburg_hs.pdf

BMBF (2017). Verrichtungsbasierte, digitale Planung kollaborativer Montagesysteme und Integration in variable Produktionsszenarien (KoMPI). Retrieved from https://www.produktion-dienstleistung-arbeit.de/de/projekte.php?PN=11050192

Busch, F. (2016). Ein Konzept zur Abbildung des Menschen in der Offline-Programmierung und Simulation von Mensch-Roboter-Kollaborationen ([1. Auflage]). Schriftenreihe industrial engineering: Band 17. Aachen: Shaker Verlag GmbH.

Busch, F., Hartung, J., Thomas, C., Wischniewski,Sascha,BAua Dortmund, Deuse, J., & Kuhlenkötter, B. (2013). Individualisierte Arbeitsassistenz in der Produktion: gesunder, sicherer und wettbewerbsfähiger Arbeit in der Industriellen Produktion. Industrie Management, 29(3), 7–10.

Delang, K., Bsiwi, M., Harsch, A.-K., & Putz, M. (2017). Evaluation and selection of workstations for an application of Human-Robot-Interaction (HRI). Retrieved from http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4733018.pdf

DIN. DIN EN 349:2008-09, Sicherheit von Maschinen_- Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen; Deutsche Fassung EN_349:1993+A1:2008. (DIN, 2008). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN (2016). DIN ISO/TS 15066:2017-04, Roboter und Robotikgeräte_- Kollaborierende Roboter (ISO/TS_15066:2016). (DIN, 2017). Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Ermer, A.-K., Seckelmann, T., Barthelmey, A., Lemmerz, K., Glogowski, P., Kuhlenkötter, B., & Deuse, J. (2019). A Quick-Check to Evaluate Assembly Systems' HRI Potential. In N.N. (Chair), 4. MHI-Kolloquium, Dortmund.

Fritzsche, L. (2010). Work Group Diversity and Digital Ergonomic Assessment as New Approaches for Compensating the Aging Workforce in Automotive Production (PhD thesis). TU Dresden.

Heinze, F., Klöckner, M., Wantia, N., Rossmann, J., Kuhlenkötter, B., & Deuse, J. (2016). Combining Planning and Simulation to Create Human Robot Cooperative Processes with Industrial Service Robots. AMM, 840, 91–98.

Hengstebeck, A., Weisner, K., Klöckner, M., Deuse, J., Kuhlenkötter, B., & Roßmann, J. (2016). Formal Modelling of Manual Work Processes for the Application of Industrial Service Robotics. Procedia CIRP, 41, 364–369.

Müller, R., Franke, J., Henrich, D., Kuhlenkötter, B., Raatz, A., & Verl, A. (Eds.) (2019). Hanser eLibrary. Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration ([1. Auflage]). München: Hanser.

Ore, F., Hanson, L., Delfs, N., & Wiktorsson, M. (2015). Human industrial robot collaboration - development and application of simulation software. International Journal of Human Factors Modelling and Simulation, 5(2), 164.

Ore, F., Hansson, L., & Wiktorsson, M. (2017). Method for Design of Human-industrial Robot Collaboration Workstations. Procedia Manufacturing, 11, 4–12.

Oubari, A., Pischke, D., Jenny, M., Meißner, A., & Trübswetter, A. (2018). Mensch-Roboter-Kollaboration in der Produktion. ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113(9), 560–564.

Ranz, F., Hummel, V., & Sihn, W. (2017). Capability-based Task Allocation in Human-robot Collaboration. Procedia Manufacturing, 9, 182–189.

Schaub, K. G., Mühlstedt, J., Illmann, B., Bauer, S., Fritzsche, L., Wagner, T., . . . Bruder, R. (2012). Ergonomic assessment of automotive assembly tasks with digital human modelling and the 'ergonomics assessment worksheet' (EAWS). International Journal of Human Factors Modelling and Simulation, 3(3/4), 398.

Schröter, D. (2018). Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperation. Dissertation. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung: Band 81. Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Seckelmann, T., Barthelmey, A., Kaiser, M., & Deuse, J. (2019). Simulationsgestützte arbeitswissenschaftliche Bewertung von MRK-Arbeitsplätzen. ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 114(11), 744–748.

Selevsek, N., & Köhler, C. (2018). Angepasste Planungssystematik für MRK-Systeme. ZWF Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 113(1-2), 55–58.

Takata, S., & Hirano, T. (2011). Human and robot allocation method for hybrid assembly systems. CIRP Annals, 60(1), 9–12.

Thomas, C., Stankiewicz, L., Deuse, J., & Kuhlenkötter, B. (2015). Arbeitsassistenz für die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter. In T. Bertram, B. Corves, & K. Janschek (Eds.), Tagungsband Mechatronik (pp. 109–112). TU Dortmund.

Tsarouchi, P., Michalos, G., Makris, S., Athanasatos, T., Dimoulas, K., & Chryssolouris, G. (2017). On a human–robot workplace design and task allocation system. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 30(12), 1272–1279.

Weßkamp, V., Ermer, A.-K., Seckelmann, T., Barthelmey, A., & Deuse, J. (2019a). Befähigung von operativen Mitarbeitern und Planungsingenieuren. In F. Hees, S. Müller-Abdelrazeq, M. Voss, R. Schmitt, G. Hüttemann, K. Rook-Weiler, . . . A. Schmidt (Eds.), Projektatlas Kompetenz Montage*:* Kollaborativ und wandlungsfähig (pp. 150–153). Aachen: RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau.

Weßkamp, V., Seckelmann, T., Barthelmey, A., Kaiser, M., Lemmerz, K., Glogowski, P., . . . Deuse, J. (2019b). Development of a sociotechnical planning system for human-robot interaction in assembly systems focusing on small and medium-sized enterprises. In 52nd Conference on Manufacturing Systems. Symposium conducted at the meeting of College International pour la Recherche en Productique (CIRP), Ljubljana, Slovenia.

Verrichtungsbasierte Planung, Simulation und sozialpartnerschaftliche Potentiale der Mensch-Roboter-Kollaboration

Kai Lemmerz, Paul Glogowski, Michael Miro, Bernd Kuhlenkötter

Lehrstuhl für Produktionssysteme, Ruhr-Universität Bochum

1. Einleitung

In diesem Beitrag wird eine Methode zur integrierten Planung und Realisierung von Montagsystemen mit direkter Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) und variablen Produktszenarien vorgestellt. Hierdurch sollen Unternehmen mit geringer Erfahrung und begrenzten Ressourcen dazu befähigt werden, kollaborative Arbeitssysteme mit Erfolg einzuführen und auch bei stark schwankender Produkt- und Variantenvielfalt dauerhaft wirtschaftlich zu betreiben. Zu diesem Zweck wird der gesamte Einführungsprozess aus soziotechnischer Sicht betrachtet. Die neue Methode zur integrierten Planung und Realisierung kollaborativer Arbeitsplatzsysteme in der Montage soll hierbei insbesondere Anwender im Gestaltungsprozess unterstützen.

Für die Planung und Simulation sowohl manueller als auch vollautomatischer Produktionssysteme gibt es heute ein breites Spektrum unterschiedlicher Softwaresysteme. Im Falle manueller Montagesysteme gibt es umfangreiche Simulationssoftware und digitale Menschmodelle (DHMs), die den komplexen Prozess der detaillierten Planung und Umsetzung unterstützen (Bullinger-Hoffmann/Mühlstedt 2016; Tsarouchi, et al. 2016). Mit DHMs und entsprechenden ergonomischen Methoden können ergonomische Aspekte oder Zykluszeitanalysen für manuelle Montageprozesse simuliert werden. Auf der anderen Seite gibt es verschiedene Robotersimulationssysteme für den Entwurf von vollautomatisierten Arbeitszellen (RobotStudio (ABB), KUKA.Sim (KUKA) oder Stäubli Robotics). Für die Simulation von MRK-Arbeitszellen gibt es bislang nur wenige Ansätze die sich speziell auf vereinzelte Zielkriterien wie bspw. der Ergonomieverbesserung (Busch 2015; Castro et al. 2019), Zeitanalyse (Bänziger et al. 2018) oder optimalen und fähigkeitsorientierten Aufgabenverteilung (Tsarouchi et al. 2017) fokussieren.

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_2

Daher soll in Kapitel 2 auf einen neu entwickeltes digitales Planungs- und Simulationswerkzeug eingegangen, welches die Analyse bestehender manueller Montageszenarien und die funktionale Integration und Bewertung geeigneter Automatisierungstechnik fokussiert. Ziel ist es, konkrete Arbeitsplätze mit dem qualitativ größten MRK-Potential zu identifizieren. Dieses Potential wird insbesondere durch die mangelnde Flexibilität der Roboter begrenzt. Durch die gezielte Verknüpfung von Sensorik, Endeffektoren und Leichtbaurobotern werden die Einsatzbereiche der Robotersysteme erweitert. Die digitale Gestaltung und Bewertung der kollaborativen Arbeitsplatzsysteme wird mit der Anwendung einer allgemeingültigen Planungsmethode durchgeführt. Die Planung erfolgt gemäß der speziellen Montageaufgaben verrichtungsbasiert und wird durch eine Funktionsbibliothek unterstützt. Nachfolgend wird die Umsetzung der geplanten MRK-Applikation durch ein technisches Integrationskonzept, sowie ein mitarbeiterorientiertes Beteiligungs- und Qualifizierungskonzept gefördert, sodass bestehende technische und soziale Hemmnisse abgebaut werden können. Auch während des laufenden Betriebs werden operative Mitarbeiter[1] über geeignete Mensch-Maschine-Schnittstellen gezielt eingebunden. Somit kann die Akzeptanz für den Einsatz von MRK gefördert werden. Nicht zuletzt wird diese Akzeptanz auch durch die aktive Beteiligung der Sozialpartner gestützt. Kapitel 3 befasst sich demnach mit den Implikationen der MRK-Einführung für die Beschäftigten und betrieblichen Interessenvertreter und ist damit hochrelevant für die Akzeptanzsteigerung zur MRK in deutschen Unternehmen. Hierzu wurden Workshops und Befragungen durchgeführt, die Aufschluss über die Vor- und Nachteile bzw. mit der Technologie verknüpften Herausforderungen aus Sicht der Zielgruppen geben. Als relevante Themenstellungen für die betriebliche Interessenvertretung sind in diesem Kontext insbesondere Entgelt, Qualifizierung, Substitution, Ergonomie sowie psychische Belastungen identifiziert worden. Der Beitrag setzt sich mit den Ergebnissen der betrieblichen Workshops dezidiert auseinander und beschreibt in Kapitel 4 die Entwicklung eines entsprechenden Schulungsdemonstrators für die MRK, welcher unter Anwendung des o. g. MRK-Simulationswerkzeugs geplant und umgesetzt wurde.

[1] Im vorliegenden Beitrag wird das generische Maskulinum zur Adressierung aller Geschlechter verwendet

2. Simulationswerkzeug für die Mensch-Roboter-Kollaboration

2.1. Systemarchitektur

Im Folgenden wird ein ganzheitliches Simulationswerkzeug für die MRK beschrieben, mit dem die Interaktionspartner Mensch und Roboter in einem kollaborativen Montageprozess analysiert und hinsichtlich arbeitswissenschaftlicher und automatisierungstechnischer Aspekte bewertet werden können. Zur Zielgruppe gehören hierbei insbesondere Planungsingenieure bzw. Fachleute aus dem Bereich der Produktionssystemplanung. Die dem Werkzeug zugrundeliegende Systemarchitektur besteht aus zwei Hauptkomponenten: einer Roboter- und Peripheriesimulation, sowie einer Mensch- und Prozesssimulation. Der Ansatz basiert auf der funktionalen Integration von Automatisierungstechnik (z. B. kollisionsfreie Roboterbahnplanung, Endeffektor- und Sensorsimulation) in eine proprietäre Software-Lösung für die Simulation manueller Arbeitstätigkeiten mit einem digitalen Menschmodell und Bausteinen zur Prozessmodellierung. Ein weiterer Bestandteil ist die zugehörige Daten- und Kommunikationsschnittstelle zwischen den genannten Hauptkomponenten. Abbildung 1 zeigt die grundsätzliche Architektur des Simulationswerkzeugs. Das hierin abgebildete Konzept ist ausführlich in den Veröffentlichungen (Glogowski et al. 2018; Lemmerz et al. 2018) beschrieben.

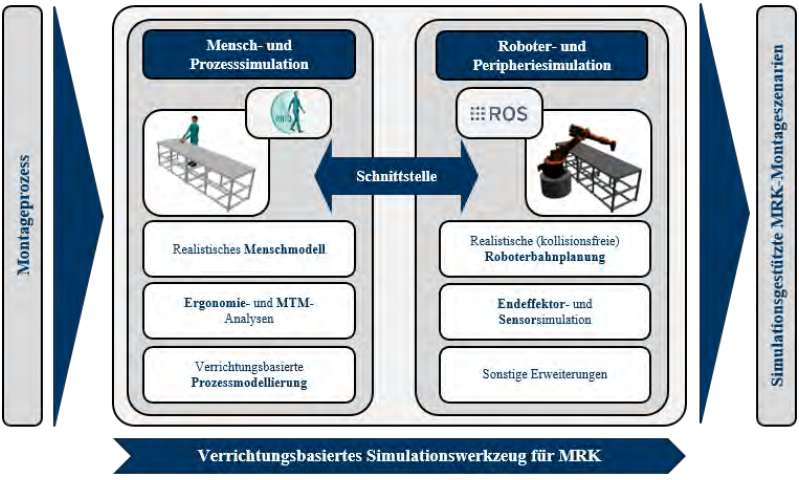


Abbildung 1: Grobkonzept des verrichtungsbasierten MRK-Simulationswerkzeugs

2.2. Systemkomponenten

2.2.1. Mensch- und Prozesssimulation

Der Teil der Mensch- und Prozesssimulation wird durch den ema Work Designer (emaWD) der Firma imk automotive GmbH abgedeckt. emaWD ermöglicht eine zeitliche Bewertung und ergonomische Analyse der geplanten Arbeitsabläufe. Zentraler Bestandteil von emaWD ist eine realitätsnahe Simulation und Visualisierung menschlicher Körperbewegungen (Bauer 2015). Das digitale Menschmodell in emaWD wird durch eine einfache und intuitive verrichtungsbasierte Modellierung parametriert und gesteuert. Typische menschspezifische Verrichtungen sind z. B. das Greifen und Bewegen eines Werkstücks. Bisweilen gibt es hier allerdings noch Defizite bei der detaillierten Simulation des Roboter-, Endeffektor- und Sensorverhaltens.

2.2.2. Roboter- und Peripheriesimulation

Der Teil der Roboter- und Peripheriesimulation basiert auf dem Open-Source-Software-Framework Robot Operating System (ROS) (Quigley et al. 2015). ROS findet eine breite Anwendung in der Roboterforschung und -entwicklung und ermöglicht eine ganzheitliche Simulation von Robotersystemen, Sensorik und Umgebung. Hierbei stehen eine Vielzahl von Treibern zur Steuerung von Sensoren, Aktoren und ganzen Robotersystemen zur Verfügung. Des Weiteren sind grundlegende Robotik-Algorithmen für die kollisionsfreie Bahnplanung, Sensordatenverarbeitung sowie Kollisionsprüfung und -überwachung implementiert. (Guzman et al. 2016; Joseph 2015)

Das in ROS integrierte Framework zur Bewegungsplanung MoveIt! beinhaltet zahlreiche Funktionsbibliotheken wie bspw. die Open Motion Planning Library (OMPL) (Şucan et al. 2012) und dient der Berechnung und Darstellung von kollisionsfreien Roboterbahnen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Kenntnis über sämtliche Umgebungsinformationen im Arbeitsraum des Roboters. Hier greift ROS auf das sogenannte OctoMap-Framework (Hornung et al. 2013) zurück. Dieses erstellt mithilfe von Distanz-Sensoren wie einer TOF-Kamera ein 3D-Voxelfeld der Umgebung. Hierdurch entsteht eine Karte aus vielen Voxeln (volumetrische Pixel), die das Umgebungsmodell repräsentieren. Das 3D-Voxelfeld wird bei der Bewegungsplanung durch ROS registriert und vermeidet somit Kollisionen mit Umgebungsobjekten (z. B. Tische oder Einrichtungen).

2.3. Workflow zum Datenaustausch

Ein wichtiger Bestandteil des Simulationswerkzeugs ist die Daten- und Kommunikationsschnittstelle zwischen emaWD und ROS (Lemmerz et al. 2018). Der grundsätzliche Workflow sieht hierbei wie folgt aus:

Der Planer modelliert in emaWD den gesamten Montagearbeitsplatz mit allen Mensch-, Roboter- und Umgebungsmodellen, sowie Prozessbeschreibungen von Mensch (z. B. Werkzeug benutzen, zum Ziel bewegen) und Roboter (z. B. Punkt-zu-Punkt Bahn, Greifer öffnen/schließen). Alle Prozess-, Umgebungs- und Menschdaten werden in Form eines virtuellen Abbildes von emaWD nach ROS übertragen, wo die Roboter- und Peripheriesimulation erfolgt. Sämtliche Umgebungsinformationen werden in einem 3D-Voxelfeld, welches durch emaWD erzeugt wird, gespeichert. Das digitale Menschmodell aus emaWD wird approximiert und als Hüllkörpergeometrie übertragen. Zur Beschreibung des approximierten Menschmodells liefert emaWD die Menschdaten (z. B. Posen, Volumina, Zeitstempel) für alle relevanten Körperregionen mit den dazugehörigen Parametern zu jedem Simulationszeitpunkt. Als zentrales Ergebnis spielt ROS das berechnete Bewegungsverhalten der Roboter- und Peripheriekomponenten (z. B. Gelenkwinkel, Gelenkgeschwindigkeiten, Greiferhub) über die Datenschnittstelle an emaWD zurück. Schließlich werden Mensch, Roboter und Peripherie in der Simulationsumgebung von emaWD angesteuert und visualisiert, wodurch eine ganzheitliche Simulation des MRK-Montageszenarios ermöglicht wird.

2.4. Softwaretechnische Umsetzung

Sämtliche Methoden zur Verarbeitung der Roboter- und Peripheriesimulation wurden in einer ROS-Arbeitsumgebung (`kompi_ws`) integriert. Diese Arbeitsumgebung besteht aus insgesamt sieben Paketen, die in Tabelle 1 aufgelistet sind. Als zentrales Paket fungiert hier das `kompi_interface`, welches für die Betriebssystem-übergreifende Schnittstellenkommunikation zwischen emaWD (Windows) und ROS (Linux) zuständig ist. Des Weiteren erfolgt hierüber bspw. die Ansteuerung von Roboter, Greifer und Sensorik und der Zugriff auf das in Abschnitt 2.2.2 eingeführte Bahnplanungs-Framework MoveIt!.

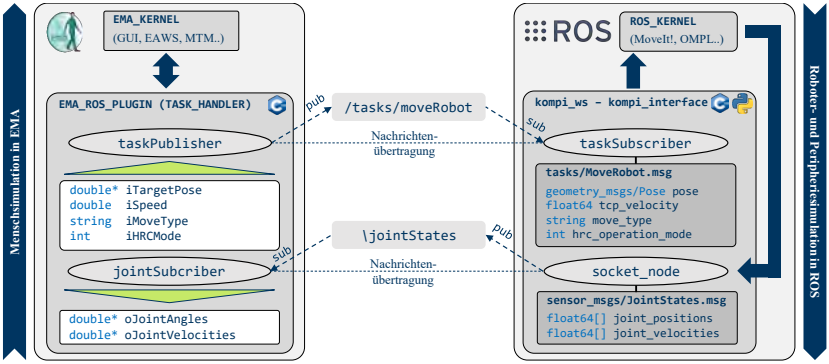


Abbildung 2: Datenaustausch und Kommunikationsprinzip zwischen emaWD und ROS

Abbildung 2 veranschaulicht das Prinzip des Daten- und Kommunikationsaustausches am Beispiel der Übertragung von roboterspezifischen Verrichtungen. Hierbei werden die vom Anwender in emaWD parametrisierten Verrichtungen über ein entwickeltes emaWD Add-On (`EMA_ROS_PLUGIN`) verarbeitet und als Nachricht auf einem definierten Kommunikationskanal (hier das Topic: `/tasks/moveRobot`) veröffentlicht. Im `kompi_interface`-Paket werden diese Nachrichten über zugeordnete Callback-Funktionen abgefangen und interpretiert. Die in den Nachrichten enthaltenden Informationen (Verrichtungstyp, Art der Bewegung, Zielpose, kartesische Geschwindigkeit etc.) werden anschließend für die Konfiguration der entsprechenden Roboterbahn- und Greifplanung genutzt und an den ROS-Berechnungskern (`ROS_KERNEL`) übergeben. In gleicher Funktionsweise erfolgt die Rekonstruktion des Umgebungsmodells (3D-Voxelfeld) und des in emaWD animierten Bewegungsverhalten des Menschen. Unter Berücksichtigung der Umgebungsinformationen wird in ROS eine kollisionsfreie Roboterbahn berechnet und als ein zentrales Ergebnis über das Topic `/joint_states` an das `EMA_ROS_PLUGIN` zurückgegeben. Eine exemplarische Anwendung des Simulationswerkzeugs wird in Abschnitt 4.2 skizziert.

Tabelle 1 Pakete der ROS-Arbeitsumgebung `kompi_ws`

Paket	Beschreibung
`kompi_msgs`	**Nachrichtenverwaltung:** Nachrichtendefinitionen mit den dazugehörigen Datentypen zur Übertragung der Roboter-, Mensch,- Umgebungs- und Verrichtungsinformationen
`kompi_interface`	**Windows-Schnittstelle**: Datenaustausch zwischen emaWD und ROS; Methoden zur Verarbeitung des Umgebungsmodells, zur Verarbeitung des Menschmodells, zum Aufruf der Roboter und Peripherie sowie zur Interpretation der Roboterverrichtungen
`kompi_robots`, `kompi_endeffectors`, `kompi_sensors`	**Ressourcenbibliothek:** Verwaltung, Modellierung und Konfiguration der Roboter-, Endeffektor- und Sensorkomponenten
`kompi_motion_planning`	**Zustandsbestimmung:** Berechnungsvorschriften für die Bewegungsplanung des Roboters (z. B. Berechnung der kartesischen Positionen und Geschwindigkeiten der einzelnen Robotergelenke)
`kompi_speed_adaption`	**Erweiterte Bahnplanung:** Adaptive Roboterbewegungsplanung für die MRK-Betriebsart "Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung"

3. Betriebliche Einführung von MRK

Im Rahmen einer ganzheitlichen Betrachtung von kollaborativen Anlagen und der Einführung in Unternehmen ist es notwendig, neben technischen Aspekten, auch den Einführungsprozess aus soziotechnischer Sicht zu adressieren. Hierzu zählt das Erörtern der Vor- und Nachteile der Technologie mit allen partizipierenden Akteursgruppen innerhalb eines Unternehmens. Dies ermöglicht den Abbau ggf. bestehender Vorurteile und Widerstände und erlaubt die Realisierung eines effizienteren Einführungsprozesses, der von allen Beteiligten mitgetragen wird. Unter diesem Leitgedanken wurden Betriebsratsworkshops bei neun Unternehmen durchgeführt, die das Ziel hatten, die Beschäftigten und ihre Vertreter zur konstruktiven Begleitung des Einführungsprozesses in ihr jeweiliges Unternehmen zu befähigen. Im Detail wurden zuerst grundlegende Aspekte der Automatisierungstechnik und industriellen Robotik erörtert und eine Abgrenzung der Mensch-Roboter-Kolla-

boration von der klassischen Industrieautomatisierung vorgenommen. Diese Herangehensweise erlaubt eine differenziertere Auseinandersetzung mit der Themenstellung durch anschauliche Begriffsdefinitionen und die dadurch geschaffene gemeinsame Sprachbasis. Erweitert um diverse Beispiele aus der industriellen Praxis der Teilnehmer, wird somit ein lösungsorientierter Diskurs angestoßen, mittels welchem der Einführungsprozess von den Beteiligten analysiert und gestaltet werden kann. Hierbei wurden Vor- und Nachteile der Technologie aus der Perspektive der Beschäftigten erörtert und Bedarfe definiert, die durch das kollaborative Arbeiten entstehen.

Zu diesem Zweck wurden in den neun Workshops regulierungsrelevante Themen mit Hilfe einer SWOT-Analyse ermittelt und gewichtet, die es im Einführungsprozess zu adressieren gilt. Tabelle 2 zeigt die Merkmale der besuchten Unternehmen und Abbildung 3 die Ergebnisse der Befragungen. Dabei wird die Priorisierung der Teilnehmer (aufsteigend von 1 – 4) über der Häufigkeit der Nennungen dargestellt.

Tabelle 2: Verteilung ausgewählter Betriebsmerkmale

Betriebsmerkmal	Ausprägungen	Anzahl
Beschäftigtenzahl am Standort	niedrig (bis 500)	2
	mittel (1.200 bis 1.800)	5
	hoch (6.000 und mehr)	2
Eigentumsform	Konzern	3
	Familienunternehmen	6
MRK-Umsetzungsstand	Anwendungsidee	1
	in Planung	2
	im (Test-) Betrieb	6

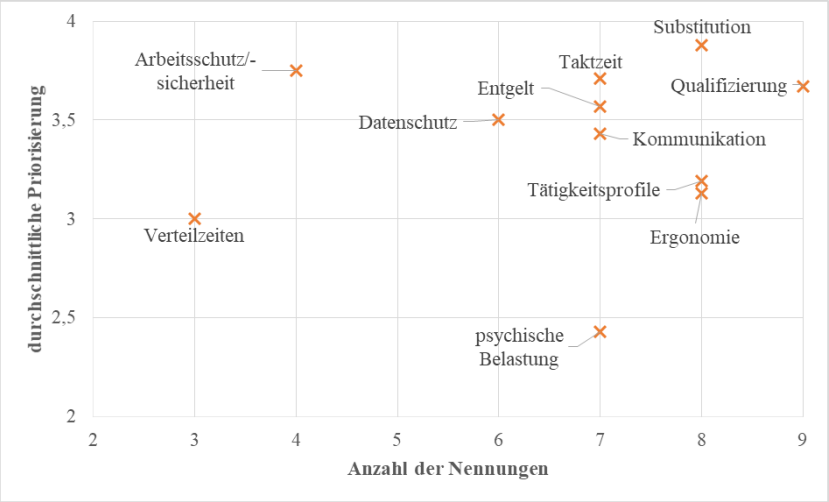


Abbildung 3 Ergebnisse der neun Workshops

Konkret wurden in den Workshops insbesondere die Themen Substitution – der Arbeitsplatzverlust durch den Roboter – und das Thema Qualifizierung für die kollaborative Aufgabe hoch priorisiert und in fast allen Unternehmen genannt. Tenor der Betriebsräte war der Wunsch der Substitutionsvermeidung bzw. der Verzicht auf Kündigungen durch die Einführung der MRK. Ebenso werden mindestens grundlegende Schulungen der Mitarbeiter als Voraussetzungen für eine sichere Zusammenarbeit betrachtet. Weiterführend ist auch die richtige Austaktung der Aufgabe, die Taktzeit, für viele Teilnehmer relevant, wobei sowohl ein zu hoher, als auch ein zu niedriger Takt kritisch gesehen werden. Ersteres gründet auf dem Druck, der durch einen zu schnell arbeitenden Roboter aufgebaut wird, wohingegen ein zu geringer Takt zu Einbußen im Akkordlohn führen könnte. Beim Thema Entgelt liegt der Fokus auf der mindestens gleichwertigen Eingruppierung der Mitarbeiter und der Vermeidung einer Abwertung der ausgeführten Tätigkeiten durch den Roboter. Eng verknüpft damit, aber etwas geringer gewichtet, sind die Tätigkeitsprofile im kollaborativen Zusammenarbeitsszenario. Nach Wunsch der Beschäftigten solle es vermieden werden, dem Menschen lediglich monotone und repetitive Tätigkeiten zuzuweisen. Die ergonomischen Vorteile der MRK zugrundeliegend, wurde in fast allen Befragungen die Priorisierung der Verlagerung von unergonomischen Aufgaben auf den Roboter bei der Suche nach Anwendungsfällen im Unternehmen befürwortet. Auch soziale Aspekte, wie die fehlende Interaktions- und Kommunikationsmöglichkeit, wurden in den Workshops hoch priorisiert und häufig genannt. Hier ist eine Verbindung zur psychischen Belas-

tung zu sehen, der durch eine die räumliche Nähe zu anderen Mitarbeitern in kollaborativen Arbeitsräumen Abhilfe geschaffen werden könnte. Darüber hinaus wurden Verbindungen zur Taktzeit und den Implikationen auf den Werker in Bezug auf schädlichen Distress gezogen, denen es vorzubeugen gilt. Entgegen der Erwartung wird das Themenfeld Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit hoch priorisiert, aber nur in vier von neun Fällen genannt. Dies könnte durch die in den Workshops vorangegangenen Ausführungen zu den hohen Sicherheitsanforderungen geschuldet sein. Außerdem waren in den meisten Betrieben bereits (kollaborierende) Roboter vorhanden, durch die sich ein subjektives Sicherheitsempfinden gegenüber der Technologie entwickelt hat und die Arbeitssicherheit als selbstverständlich vorausgesetzt wird. Von höherer Priorität, aber nur in 2/3 der Fälle genannt, ist das Themenfeld des Datenschutzes, welches weitreichende Implikationen für den Einführungsprozess mit sich bringt. Das Betriebsverfassungsgesetz § 87 regelt, dass bei der „Einführung und Anwendung von technischen Einrichtungen, die dazu bestimmt [..] [sind], das Verhalten oder die Leistung der Arbeitnehmer zu überwachen“, dem Betriebsrat ein Mitbestimmungsrecht zusteht. Nach aktueller Rechtsprechung gilt dies bereits für „technische Einrichtungen, wenn sie objektiv [zur Überwachung] geeignet sind" (Bundesarbeitsgericht 2016). Es ist daher unabdingbar, sich während des Einführungsprozesses mit den betrieblichen Akteursgruppen auseinanderzusetzen, um möglichen Verzögerungen aus dem Wege zu gehen.

Um Unternehmen und Mitarbeiter bei dem vielschichtigen Einführungsprozess konstruktiv zu begleiten, wurde ein Leitfaden[2] erstellt, der eine gemeinsame Gesprächsgrundlage darstellt und dabei unterstützt, keine in diesem Kontext relevanten Schritte zu vergessen. Der Leitfaden ist dabei an die Workshops angelehnt und adressiert theoretische Grundlagen im Themenfeld MRK ebenso, wie mitbestimmungsrechtliche Aspekte, die zu beachten sind. Darüber hinaus wird dem Leser dabei ein Glossar an die Hand gegeben, welches etwaige Fragen klärt und eine gemeinsame Wissensbasis für einen sachpräzisen Diskurs schafft. Zusammenfassend lauten die Kernthemen des Leitfadens zur Einführung von MRK-Applikationen:

1. Wo eignet sich der Einsatz von MRK?
    - Relevante K.O.-Kriterien für den kollaborativen Betrieb
    - Quick-Check und Potenzialanalyse (vgl. Ermer et al. 2019)

[2] Der MRK-Einführungsleitfaden wurde im BMBF-Forschungsprojekt KoMPI erarbeitet und ist verfügbar unter https://kompi.org/mrk-einfuehrungsleitfaden/, letzter Zugriff am 19.05.2020

2. Grundlagen und Abgrenzung der MRK zur klassischen Automatisierungstechnik
    - Theoretische Grundlagen
    - Szenarien der Zusammenarbeit
    - Normung und Zertifizierung
3. Betriebliche Mitbestimmung Regulierungsrelevante Themen
    - Betriebsverfassungsgesetz (BetrVG)
    - Musterbetriebsvereinbarung

4. Anwendung und Evaluierung

Als ein Kernergebnis der in den Betrieben durchgeführten Workshops (vgl. Kapitel 3) lässt sich festhalten, dass Mitarbeiter aus Unternehmen mit bereits vorhandenen (MRK-)Roboterzellen diesem Themenfeld gegenüber aufgeschlossener sind, als jene aus Betrieben ohne etwaige Berührungspunkte. Dies kann vor allem durch den hohen Abstraktionsgrad bedingt sein, mit dem eine unbekannte Technologie für manchen Mitarbeiter behaftet ist. Um den Einführungsprozess so konstruktiv wie möglich begleiten zu können und Hemmnisse abzubauen, ist daher über die Grundlagenvermittlung hinaus eine praktische Auseinandersetzung mit dem Thema zielführend. Die kollaborative Zusammenarbeit mit dem Roboter innerhalb einer Schulung unter Realbedingungen kann dabei helfen, ein Gefühl für die geringen auftretenden Geschwindigkeiten und Kräfte zu erhalten und gleichzeitig einen Mehrwert für die eigene Arbeit durch Humanisierung der Aufgaben - z. B. durch Ergonomieverbesserungen - zu erfahren. Auf Basis dieser Überlegung wurde das in Kapitel 2 vorgestellte Simulationswerkzeug zur Planung eines Schulungsdemonstrators verwendet. Die folgenden Abschnitte veranschaulichen in diesem Zusammenhang die sich an den Schulungsdemonstrator ergebenden Anforderungen, die simulationsgestützte Layout- und Prozessgestaltung sowie die Umsetzung einer realen MRK-Demozelle.

4.1. Anforderungen und Rahmenbedingungen

Der zu entwickelnde Schulungsdemonstrator soll leicht und transportabel ausgeführt sein und sich als Anschauungsmaterial und Übungsgerät für den praktischen Teil von mitarbeiterqualifizierenden Schulungen eignen. Der Demonstrator soll dazu aus einem Leichtbauroboter sowie entsprechender Peripherie und Sicherheitstechnik bestehen und dabei ein möglichst authentisches Produktions- oder Montageszenario abbilden. Dadurch werden Schulungsteilnehmer ohne Vorerfah-

rung im Bereich MRK dazu befähigt, sich dezidiert mit der Thematik auseinanderzusetzen. Darüber hinaus sollen die Schulungen in Form von Workshops dabei unterstützen, den Einführungsprozess in ihrem Unternehmen kompetent begleiten zu können. Im Detail sollen dazu verschiedene Interaktionsstufen wie die häufig vorkommende Koexistenz, die Kooperation und die physische Kollaboration demonstriert werden. Hierzu sind die Betriebsarten der "Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung" und "Leistungs- und Kraftbegrenzung" entsprechend der DIN ISO/TS 15066 anzuwenden, die wiederum geeignete Sensortechnik, wie Laserscanner, Lichtgitter, bzw. sensitives Verhalten am Robotersystem voraussetzen (DIN - Deutsches Institut für Normung 2016). Für eine leicht zugängliche Auseinandersetzung mit der komplexen Themenstellung bei gleichzeitiger Nähe zu einer praxistypischen Montageapplikation sollen in der Aufgabe Legosteine in verschiedenen Kombinationen verbaut werden. Hierbei kann der Mensch Teilaufgaben mit nötiger Fingerfertigkeit erledigen, während der Roboter monotone bzw. unergonomische Aufgaben bewältigt. Die definierte Aufgabe hat Implikationen für den Greifer, der für den kollaborierenden Betrieb und für die Handhabung von Kleinteilen geeignet sein muss. Das System ist als transportable Arbeitszelle zu gestalten und soll die Visualisierung verschiedener Sicherheitskonzepte gemäß der normativ zulässigen Betriebsarten und der unterschiedlichen Interaktionsstufen zwischen Mensch und Roboter ermöglichen.

Abbildung 4: Layout und Prozessmodell des erstellten MRK-Szenarios in emaWD. Die ROS-Schnittstelle wird über die Parameter der roboterspezifischen Verrichtungen angesprochen.

4.2. Modellbildung und Simulation des MRK-Szenarios

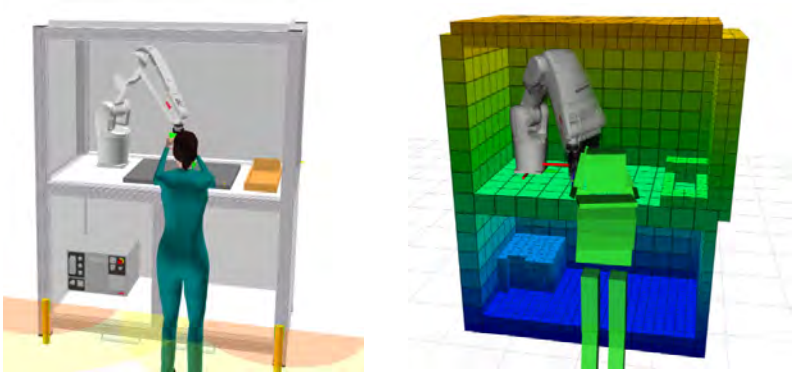
Mit Hilfe des entwickelten digitalen Simulationswerkzeugs kann der **Anwender** über eine intuitive Benutzerschnittstelle verschiedene Szenarien verrichtungsbasiert erstellen. Der Aufbau des Layouts sowie die Modellierung der zugehörigen Produktionsprozesse erfolgen dabei wie bereits in Abschnitt 2.3.1 erwähnt in der Planungssoftware emaWD. Unter Berücksichtigung der im vorherigen Abschnitt definierten Anforderungen und Rahmenbedingungen wurde in dieser Arbeit eine entsprechende MRK-Demozelle simulationsgestützt entworfen. Abbildung 4 veranschaulicht hierzu das konstruierte Layout und die Bedienoberfläche zur Parametrisierung der mensch- und roboterspezifischen Teilprozesse. Die Demozelle wurde als kompaktes Arbeitssystem entworfen und setzt sich dabei aus verschiedenen Komponenten zusammen. Mit dem ABB IRB 1200-7/0.7 (inkl. SafeMove-Funktionalität) kommt ein handelsüblicher Industrieroboter zum Einsatz, der für die kollaborativen Prozessschritte in der Betriebsart "Leistungs- und Kraftbegrenzung" mit einer zusätzlichen Sensortechnik der Fa. Mechavision ausgestattet ist. Als Sicherheitserweiterung fungiert die Contact Skin AT0201B als zusätzliche Sensorhaut, welche die relevanten Bereiche des Roboters abdeckt. Zur Umsetzung einfacher Handhabungsaufgaben wurde am Roboterflansch der MRK-zertifizierte Co-Act Greifer der Fa. Schunk angeschlossen. Darüber hinaus verfügt das System über zwei Laserscanner der Fa. Sick. Diese Sensoren sichern den vorderen, offenen Bereich der Arbeitszelle und dienen zur Arbeitsraumüberwachung in der Betriebsart "Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung", sowie ggf. zum Auslösen des

sicherheitsbewerteten überwachten Halts. Tabelle *3* fasst die genannten Sicherheitskomponenten für die Integration entsprechender Sicherheitsstrategien gemäß der zulässigen Betriebsarten "Leistungs- und Kraftbegrenzung" (LuK) und "Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung" (GuA) zusammen.

Tabelle 3 Hardwarekomponenten zur Umsetzung verschiedener Sicherheitsstrategien

Komponente	Typ	Betriebsart
Sick S300 Advanced Laserscanner	Abstandssensor	GuA
Mechavision Contact Skin AT0201B	Kapazitiver Sensor	LuK
Schunk Co-act EGP-C 50-N-N-FCR7	Greifer	LuK
ABB SafeMove Pro	Funktionalität	GuA/LuK

In der Bedienoberfläche des Simulationswerkzeugs können die durchzuführenden Prozessschritte des Menschen und des Robotersystems verrichtungsbasiert modelliert werden. Im rechten Teil von Abbildung 4 ist hierzu die Eingabemaske für die Parametrisierung der roboterspezifischen Verrichtungen dargestellt. Die Anbindung an den ROS-Server kann in diesem Kontext über den Parameter "externen-Roboter-Treiber verwenden" ausgewählt werden. Bei der Simulationsdurchführung des erstellen MRK-Prozesses werden die parametrisierten Verrichtungen, wie bereits in Abschnitt 2.4 beschrieben, an die ROS-basierte Roboter- und Peripheriesimulation übertragen und verarbeitet. Abbildung 5 veranschaulicht hierzu die in ROS rekonstruierte MRK-Demozelle sowie einen Auszug der berechneten kollisionsfeien Roboterbahn in der Visualisierungsumgebung von RViz.



(a) (b)

Abbildung 6: Übertragung und Rekonstruktion des virtuellen MRK-Abbilds von emaWD (a) zur Roboter- und Peripheriesimulation in ROS (b)

Abbildung 5: Realisierte MRK-Zelle in der Lern- und Forschungsfabrik des LPS

4.3. Realisierung

In Abbildung 6 ist die am Lehrstuhl für Produktionssysteme (LPS) umgesetzte Demozelle dargestellt, die in der Lern- und Forschungsfabrik zur Planung, Simulation und Umsetzung von typischen MRK-Montageapplikationen sowie zur praxisorientierten Schulung von sicherheitsbezogenen und mitbestimmungsrechtlichen Themen eingesetzt wird. Der ortsflexible Demonstrator ist für den mobilen

Einsatz im Unternehmen vor Ort ausgelegt und kann überall betrieben werden, um in einer möglichst authentischen Industrieumgebung möglichst alle beteiligten Akteursgruppen in Anlehnung an den Leitfaden (vgl. Kapitel 3) zu schulen. Hierzu wurde das Gestell platz- und gewichtsparend ausgeführt und eine schnelle und einfache Inbetriebnahme mit üblichem Schutzkontaktstecker realisiert. Der Sicherheit wird durch die Einhausung des Roboters Rechnung getragen, sodass ein Fehlgebrauch durch das Hereingreifen von der Seite verhindert wird. Eine zusätzliche Polycarbonat-Scheibe verhindert darüber hinaus ein mögliches Hineingreifen von Oben. Der Roboter eignet sich aufgrund seiner Größe und des Handhabungsgewichtes insbesondere für die kollaborative Kleinteilmontage und soll durch die geringe Masse und Geschwindigkeit Berührungsängste bei den Teilnehmern lösen und Vertrauen zur MRK aufbauen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden die soziotechnischen Herausforderungen bei der Einführung der MRK in Unternehmen veranschaulicht und Potentiale für einen optimierten Einführungsprozess aufgezeigt. Dazu konnten technische, wie sozialpartnerschaftliche Aspekte betrachtet und Herangehensweisen erarbeitet werden, die eine simulationsgestützte Planung und Inbetriebnahme von MRK-Applikationen ermöglichen. Der ganzheitliche Ansatz wurde durch das entwickelte Qualifizierungsangebot abgerundet, das theoretische und praktische Elemente vereint und somit eine dezidierte Auseinandersetzung mit der MRK ermöglicht.

Ein wesentlicher Erweiterungsaspekt für das vorgestellte Simulationswerkzeug, stellt die Untersuchung verschiedener Kollisionsszenarien für die Betriebsart der „Leistungs- und Kraftbegrenzung“ sowie die Evaluierung des implementierten Sicherheitskonzepts durch die im Anwendungsszenario eingesetzte sensitive Roboterhaut dar. Darüber hinaus soll das Bewegungsverhalten des eingesetzten Manipulators zukünftig über eine adaptive Bahnplanung in der Betriebsart der „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“ untersucht werden, um die in der Applikation vorgesehenen Prozessschritte und Taktzeiten zu optimieren. Zielsetzung hierbei ist insbesondere die Integration der Forschungsergebnisse von (Glogowski et al. 2019) und (Lemmerz et al. 2019) in die ROS-basierte Simulationsumgebung. Durch die ROS-Industrial Initiative existieren darüber hinaus mittlerweile zahlreiche reale Steuerungsschnittstellen für industrielle Roboter, die von unterschiedlichsten Herstellern bereitgestellt werden. Ein weiteres Vorhaben ist daher die Nutzung des hier vorgestellten Simulationswerkzeugs zur virtuellen Inbetriebnahme von MRK-Applikationen, um zukünftig die Lücke zwischen Planung und eigentlicher Systemintegration zu reduzieren.

Förderhinweis

Das Projekt „KoMPI“ (FKZ: 02P15A060) wurde im Rahmen des Förderprogramms „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“ zum Themenfeld „Kompetenz Montage – kollaborativ und wandlungsfähig (KoMo)“ vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut.

Literatur

Bänziger, T., Kunz, A., & Wegener, K. (2018). Optimizing human–robot task allocation using a simulation tool based on standardized work descriptions. Journal of Intelligent Manufacturing, 3(12), 1–14. https://doi.org/10.1007/s10845-018-1411-1

Bauer, S. (2015). Prozesssprachenbasiertes System zur Ansteuerung digitaler Menschmodelle als Teilkomponente einer Software zur Planung und Visualisierung menschlicher Arbeit in der Digitalen Fabrik (Dissertation). Technische Universität Chemnitz.

Bullinger-Hoffmann, A. C., & Mühlstedt, J. (Eds.) (2016). Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg. Retrieved from http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-50459-8

Busch, F. (2015). Ein Konzept zur Abbildung des Menschen in der Offline-Programmierung und Simulation von Mensch-Roboter-Kollaborationen (Dissertation). Technische Universität Dortmund.

Castro, P. R., Högberg, D., Ramsen, H., Bjursten, J., & Hanson, L. (2019). Virtual Simulation of Human-Robot Collaboration Workstations. In S. Bagnara, R. Tartaglia, S. Albolino, T. Alexander, & Y. Fujita (Eds.), Advances in Intelligent Systems and Computing: Vol. 822. Proceedings of the 20th Congress of the International Ergonomics Association (IEA 2018): Volume V: Human Simulation and Virtual Environments, Work With Computing Systems (WWCS), Process Control (pp. 250–261). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96077-7_26

DIN - Deutsches Institut für Normung (2016). DIN ISO/TS 15066 Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter. (Vornorm, DIN ISO/TS 15066).

Ermer, Ann-Kathrin; Seckelmann, Tatjana; Barthelmey, André; Lemmerz, Kai; Glogowski, Paul; Kuhlenkötter, Bernd; Deuse, Jochen (2019): A Quick-Check to Evaluate Assembly Systems' HRI Potential. In: Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, S. 128-137.

Glogowski, P., Lemmerz, K., Hypki, A., & Kuhlenkötter, B. (2019). Extended Calculation of the Dynamic Separation Distance for Robot Speed Adaption in the Human-Robot Interaction. In IEEE 19th International Conference on Advanced Robotics (ICAR) (pp. 205–212). https://doi.org/10.1109/ICAR46387.2019.8981635

Glogowski, P., Lemmerz, K., Schulte, L., Barthelmey, A., Hypki, A., Kuhlenkötter, B., & Deuse, J. (2018). Task-based Simulation Tool for Human-Robot Collaboration within Assembly Systems. In T. Schüppstuhl, K. Tracht, & J. Franke (Eds.), Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter (pp. 155–163). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Guzman, R., Navarro, R., Beneto, M., & Carbonell, D. (2016). Robotnik - Professional Service Robotics Applications with ROS. In A. Koubaa (Ed.), Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 1) (pp. 253–288). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26054-9_10

Hornung, A., Wurm, K. M., Bennewitz, M., Stachniss, C., & Burgard, W. (2013). OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. Autonomous Robots, 34(3), 189–206. https://doi.org/10.1007/s10514-012-9321-0

Joseph, L. (2015). Learning Robotics using Python (Vol. 1): Packt Publishing.

Lemmerz, K., Glogowski, P., Hypki, A., & Kuhlenkötter, B. (2018). Functional Integration of a Robotics Software Framework into a Human Simulation System. In 50th International Symposium on Robotics (ISR).

Lemmerz, K., Glogowski, P., Kleineberg, P., Hypki, A., & Kuhlenkötter, B. (2019). A Hybrid Collaborative Operation for Human-Robot Interaction Supported by Machine Learning. In 12th International Conference on Human System Interaction (HSI), Richmond, VA, USA.

Mitbestimmung bei Einrichtung und Betrieb einer Facebookseite, No. 1 ABR 7/15 (Bundesarbeitsgericht December 13, 2016).

Quigley, M., Gerkey, B., & Smart, W. D. (2015). Programming Robots with ROS: a practical introduction to the Robot Operating System: O'Reilly Media, Inc.

Şucan, I. A., Moll, M., & Kavraki, L. E. (2012). The Open Motion Planning Library. IEEE Robotics & Automation Magazine, 19(4), 72–82.

Tsarouchi, P., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2016). Human-robot interaction review and challenges on task planning and programming. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 29(8), 916–931.

Tsarouchi, P., Matthaiakis, A.-S., Makris, S., & Chryssolouris, G. (2017). On a human-robot collaboration in an assembly cell. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 30(6), 580–589.

Mensch-Technik-Interaktion mit Emotionen

Eine neurowissenschaftliche Untersuchung zu hirnphysiologischen Prozessen emotional-affektiver Nutzerreaktionen die für technische Assistenz relevant sind

Mathias Vukelić[1], Kathrin Pollmann[1], Matthias Peissner[1], Dieter Spath[1,2]

[1]Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation
[2] Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement, Universität Stuttgart

1. Einleitung

Sensortechnologien, die fortschreitende Digitalisierung sowie Methoden und Technologien der künstlichen Intelligenz (KI) verändern unsere Welt wie wir sie kennen. Die Zeiten, in denen ausschließlich mit Maschinen und Computern über Eingabemedien wie Maus und Tastatur kommuniziert wurde sind vorbei. Immer häufiger agieren interaktive Systeme in gewissem Rahmen eigenständig und eigendynamisch. So können sie den Nutzenden in unterschiedlichsten Situationen Unterstützung anbieten oder gar selbstständig Arbeiten verrichten. Manche Roboteragenten können reden, wohingegen andere auf Gesten reagieren können. Autonom agierende Algorithmen handeln mit Aktien. Betrügereien können durch Software automatisch aufgedeckt werden. Gesichter können automatisch auf Fotos erkannt werden. Autos können selbst einparken oder gar die Geschwindigkeit an das vorausfahrende Fahrzeug anpassen.

Diese Fortschritte verändern nicht nur allmählich die Art und Weise, wie mit Technologien interagiert wird, sondern beeinflusst auch die sensomotorischen Fertigkeiten und kognitiven Fähigkeiten auf unterschiedliche Weise. Osiurak und seine Kollegen*innen (Osiurak, Navarro, and Reynaud 2018) fassen diese allmählichen technologischen Entwicklungen in drei Ebenen zusammen, die die Mensch-Technik-Interaktion als physische (engl. affordance design), fortgeschrittene (engl. automation and interface design) und symbiotische (engl. embodied und cognitive design) Technologien beschreiben. Zukünftige Trends wie sprach-, gesten- oder gar gedankengesteuerte Technologien deuten auf eine zunehmende Symbiose von Mensch und Technik hin.

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_3

Jedoch bringt die zunehmende Integration von Technologie in das Alltags- und Arbeitsleben auch neue Herausforderungen und Konfliktpotenziale mit sich. Oftmals wird der Mensch mit seinen individuellen Präferenzen, Fähigkeiten und Bedürfnissen bei der Entwicklung von Zukunftstechnologien übersehen. Daraus können sich Lösungen ergeben die begrenzte Vorteile oder nennenswerte positive Effekte in Bezug auf Produktivität, Kreativität und Gesundheit der Nutzenden bieten. Wenn also autonome und anpassungsfähige Technologien, die kognitive Fähigkeiten unterstützen oder sogar erweitern, die Zukunft sind, dann ist es unerlässlich, Technik-Design so zu optimieren, so dass diese Technologien auf die Bedürfnisse des Nutzenden ausgerichtet sind und Gestaltungsprozesse der Menschzentrierung, Nachhaltigkeit und Akzeptanz berücksichtigen.

1.1. Affective Computing - Welche Rolle spielen Emotionen in der Mensch-Technik-Interaktion?

Neben einer guten Gebrauchstauglichkeit, spielen in der Interaktion mit autonom agierenden Assistenzsystemen zunehmend kognitive und emotionale Nutzerfaktoren eine wichtige Rolle. Es stellen sich Fragen wie hoch die kognitive Belastung ist oder wie das emotional-affektive Wohlbefinden des Menschen während des Umgangs mit Technik ist. Um eine nachhaltige Produktivität bei gleichzeitigem Beitrag zum subjektiven Wohlbefinden des Menschen zu erreichen, gilt es zu beachten, dass Technik nahtlos und intuitiv in den Arbeitsalltag integriert werden kann. Autonom und adaptiv agierende Assistenzsysteme sollten den Benutzenden unterstützen und nicht aufgrund der inhärenten Komplexität die Interaktion behindern. Statt Frustration zu erzeugen, sollte das System den Benutzenden motivieren, indem es während der Interaktion ein positives Erlebnis vermittelt. Positive Nutzungserlebnisse bei täglichen Mensch-Technik-Interaktionen sind sowohl für die einzelne Person als auch für das Unternehmen äußerst wichtig: Aus der Perspektive der Nutzenden tragen positive Erfahrungen zur subjektiven Wahrnehmung von Kompetenz bei, wirken sich positiv auf die psychische Gesundheit aus und führen folglich zu motiviertem Handeln, erhöhter Produktivität und Arbeitszufriedenheit. All dies sind wichtige Faktoren für Unternehmen (Deci and Ryan 2004; Hassenzahl 2008; Spath, Peissner, and Sproll 2010).

Emotionen helfen dem Menschen im alltäglichen Leben erlebte Situationen zu bewerten, umso auf die Situation adäquat zu reagieren und Entscheidungen zu treffen (Lerner et al. 2015). Ebenso wie Wahrnehmung und kognitive Prozesse werden Emotionen durch körperliche und neuronale Erregungsmuster repräsentiert. Diese Muster lassen sich durch entsprechende Sensoren, Signalverarbeitung und Maschinellem Lernen erfassen (Bauer and Vukelić 2018). Die Erkennung und Verarbeitung dieser Muster zur Identifikation von Emotionen ist der Schwerpunkt des Forschungsfelds *Affective Computing* (Picard, Vyzas, and Healey 2001). Affektive

Systeme können somit Emotionen des Nutzenden erfassen und darauf basierend adäquate Systemreaktionen initiieren. Dies schafft neue Interaktionsmöglichkeiten im Sinne des symbiotischen Designs (Osiurak et al. 2018), birgt jedoch auch Konfliktpotenzial: Oftmals kommt keine wechselseitige Interaktion zwischen Mensch und System zustande, da das System ausschließlich autonom agiert und dem Mensch keine direkte Einflussmöglichkeit anbietet. Der Nutzende erhält kein direktes Feedback darüber, welches Ergebnis die Emotionserkennung geliefert hat und welche Anpassungen des Systemverhaltens daraufhin vorgenommen wurden. Dadurch wird die Möglichkeit des Nutzenden eingeschränkt, seinerseits Feedback zu geben, ob die Systemanpassung wirklich in seinem Sinne war, oder gezielt Einfluss auf das Systemverhalten zu geben. Die Frage bleibt offen inwieweit sich die Interaktion verändert, wenn einem technischen System Informationen über den aktuellen emotionalen Zustand des menschlichen Interaktionspartners zur Verfügung steht.

1.2. Affective Computing - Affektive Gehirn-Computer Schnittstellen

Die Berücksichtigung von emotional-affektiven Reaktionen bietet großes Potenzial um mögliche Nutzungsbarrieren in der Interaktion von autonom agierenden Assistenzsystemen abzubauen, und so die Akzeptanz gegenüber dem technischem Verhalten zu erhöhen.

Durch kontinuierliche Fortschritte in der Entwicklung und Miniaturisierung von Mess-, Sensor- und Analysetechniken zur Erfassung neurophysiologischer Aktivität konnte in den letzten Jahrzehnten ein enormes Verständnis kognitiver Funktionen und emotionaler Prozesse gewonnen werden. Dies führte unter anderem zu Neurotechnologien wie der Gehirn-Computer-Schnittstelle (im engl. Brain-Computer Interface, BCI). Im Forschungsfeld des Affective Computing bietet das BCI eine mögliche Technologie um emotional-affektive Nutzerreaktionen zu berücksichtigen.

Bislang waren klinische Anwendungen die primären Ziele der BCI-Forschung (Blankertz et al. 2016; Cinel, Valeriani, and Poli 2019; Craik, He, and Contreras-Vidal 2019; Lotte et al. 2018). In klassischen Ansätzen erwägen BCIs eine aktive Steuerung zur Entschlüsselung der Hirnaktivität, um Befehle abzubilden, die eine Anwendung steuern können, die wiederum auf einem Computer oder einem anderen beliebigen Endgerät abgebildet werden kann.

Deutlich neuer ist der Ansatz des passiven BCIs (Zander and Kothe 2011), dessen Ziel nicht die aktive Ansteuerung mittels mentaler Prozesse darstellt, sondern die beiläufige Erfassung kognitiver und emotionaler Zustände ist. Dadurch wird auch der nicht-klinische Einsatz von BCIs möglich. Bei klassischen aktiven BCIs kon-

zentrieren sich die verwendeten maschinellen Lernalgorithmen hauptsächlich darauf, die Anzahl der pro Minute übertragenen Bits (Informationsübertragungsrate) und so die erfolgreichen Klassifikationsraten der extrahierten Gehirnmuster zu steigern (McFarland, Sarnacki, and Wolpaw 2003). Beim passiven BCI-Konzept steht nicht die Bit-Übertragungsrate aus den Hirnsignalen im Vordergrund, sondern vielmehr die Verbesserung der Interaktion zwischen Mensch und autonom agierenden Computern. Beim passiven BCI-Ansatz müssen die Nutzenden keine mentalen Aktionen aktiv ausführen, um Gehirnmuster zu erzeugen, die in Computeraktionen übersetzt werden. Im Gegenteil, das implizite BCI-Konzept wird als kontinuierliches Gehirnmonitoring-Prozess verstanden, der dazu dient, kognitive oder emotional-affektive Prozesse der Nutzenden in Echtzeit zu berücksichtigen (Bauer and Vukelić 2018; Hettinger et al. 2003; Pollmann et al. 2017; Pollmann, Vukelic, and Peissner 2015; Zander et al. 2016).

Als affektive Nutzerreaktion bieten sich vor allem zwei Dimension an - Valenz und Arousal (körperliche Erregung) - die als Informationsquelle für autonome Assistenzsysteme nützlich sein können (Bauer and Vukelić 2018; Liberati, Federici, and Pasqualotto 2015; Mühl et al. 2014; Pollmann et al. 2017; Vukelić, Pollmann, and Peissner 2019). In einem Closed-Loop-Paradigma der Mensch-Computer-Interaktion können diese Kenntnisse ein Benutzermodell dahingehend bereichern, um nicht nur einen konkreten Befehl, sondern auch eine adäquate Systemanpassung an die Präferenzen, Fähigkeiten und Fertigkeiten des Nutzenden zu ermöglichen.

Das Ziel eines affektiven BCIs (als passives BCI-Konzept) ist es, durch die Messung neurophysiologischer Signale, die emotional-affektive Zustimmung bzw. Ablehnung des Nutzenden ohne zusätzlichen Interaktionsaufwand zu berücksichtigen. Allerdings lässt sich eine solche Schnittstelle derzeit in *realen* (außerhalb von kontrollierten Laborumgebungen) Situationen der Mensch-Technik-Interaktion noch nicht nutzen. Dies liegt unter anderem daran, dass die Erfassung affektiver Nutzerzustände mit neurophysiologischen Methoden sich noch weitgehend im Stadium der Grundlagenforschung befindet – v.a. Nutzung bildgebender Verfahren wie der funktionellen Magnetresonanz-Tomographie (Phan et al. 2002; Pollmann et al. 2017, 2015; Sitaram et al. 2011). Dieses Verfahren bietet zwar hervorragende Möglichkeiten der Funktionsweise von Hirnmechanismen auf den Grund zu kommen, bietet jedoch keinen wirklich plausiblen und ökologisch-validen Bezug zu realen Anwendungsszenarien für die Mensch-Technik-Interaktion (MTI). Bislang gibt es wenig empirische Beweise über neurophysiologische Korrelate affektiver Reaktionen, welche bei der Interaktion mit adaptiven Assistenzsystemen zugrunde liegen (Pollmann et al. 2017, 2015). Experimentelle Paradigmen verwenden überwiegend etabliertes Stimulusmaterial, z.B. Bilder (Lang, Bradley, and Cuthbert 2008) oder Filme (Koelstra et al. 2012), um Affekte zu induzieren und messbar zu

machen. Allerdings sind diese Paradigmen nicht gut geeignet, um die Reaktionen in realistischen Anwendungen, z.B. während der Interaktion mit adaptiven Assistenzsystemen, zu untersuchen. Daher besteht ein erheblicher Mangel an Grundlagenwissen über die zugrundeliegenden neurophysiologischen Affektprozesse während der Interaktion mit adaptiven Systemen.

Zu diesem Zweck wurde ein neues interaktives Experimentalparadigma »AFFINDU[1]« (Pollmann et al. 2017) entwickelt, um affektive Reaktionen von Assistenzfunktionen unter realitätsnahen Settings mittels neurophysiologischer Messverfahren zu erforschen. Dieses Experimentalparadigma zeigt weiterhin die Grundfunktionalitäten des Anwendungsszenarios für eine web-basierte adaptive Benutzungsschnittstelle (Peissner 2014; Peissner et al. 2012). Das Ziel einer solchen Internetanwendungen ist es, Inhalte sowie Darstellungs- und Interaktionsmechanismen an individuelle Bedürfnisse und Präferenzen anzupassen. Zusammenfassend stellt die Interaktion mit AFFINDU ein plausibles Anwendungsszenario einer web-basierten adaptiven Benutzungsschnittstelle dar, in dem wesentliche systeminitiierte Verhaltensweisen eines adaptiven Assistenzsystems (Unterstützung oder gar Verhinderung eines Nutzerziels) zu Experimentalzwecken simuliert werden können (Pollmann et al. 2017). Im Rahmen des BMBF geförderten Projekts »EMOIO[2] « wurde eine empirische Studie konzipiert und durchgeführt, indem AFFINDU integriert wurde. In dieser Studie kamen mobile Messverfahren zur Erfassung der Gehirnaktivität zum Einsatz, die gerade für die MTI-Forschung praktikabel sein können. Hierzu wurde die Elektroenzephalographie (EEG) mit der funktionellen Nah-infrarotspektroskopie (fNIRS) kombiniert, wobei bereits in Arbeiten gezeigt werden konnte, dass diese Verfahren und deren Kombination zur Erkennung psychischer Prozesse besonders gut geeignet sind (Ehlis et al. 2009; Fazli et al. 2012; Obrig et al. 2002; Rossi et al. 2011). Da es vor und während der Laufzeit von EMOIO kaum Studien mit einem plausiblen Interaktionsszenario zwischen Nutzern und einem adaptiven Assistenzsystem gab, war das vordergründige Ziel die Aktivierungsmuster des Gehirns, d.h. die emotional-affektiven Zustände der Zustimmung (positiver Affekt) bzw. Ablehnung (negativer Affekt) während der Interaktionen mit AFFINDU zu erforschen, und somit der Interaktion mit Assistenzsystemen zugrunde liegen. Das Projekt legte die Grundlagen, um die Lücke zwischen der grundlagenorientierten Forschung der BCIs und praxisorientierten Anwendung der MTI zu schließen.

---

[1] Affect induction

[2] https://www.technik-zum-menschen-bringen.de/projekte/emoio

Das Ziel der vorliegenden Studie liegt in der Untersuchung, inwiefern positive und negative affektive Nutzerreaktionen auf Basis der EEG-Signale sich unterscheiden lassen können. Genauer gesagt, werden hier die ereigniskorrelierten Potenziale (EKP) im EEG-Signal auf unterstützendes bzw. behinderndes Systemverhalten untersucht. Sprich welche zeitlichen Amplitudenmodulationen in den EKPs lassen sich durch positives und negatives Systemverhalten durch AFFINDU modulieren.

2. Methoden

2.1. Empirische Studie zur Affektmessung in der Mensch-Technik-Interaktion mittels AFFINDU

Um die EEG-Signale im Zusammenhang mit den affektiven Reaktionen der Nutzenden auf systeminitiierte Verhaltensweisen zu untersuchen, wurde die Interaktion mit AFFINDU in einem ereigniskorrelierten Experimentalablauf umgesetzt. Eine detaillierte Beschreibung dazu ist in Pollmann et al. 2017 gegeben. Somit lassen sich die Amplitudenantworten im EEG in einem festen zeitlichen Zusammenhang zum gegebenen Assistenzereignis setzen und interpretieren - Analyse der EKPs.

AFFINDU ist ein prototypischer Entwurf eines Assistenzsystems, bestehend aus einer grafischen Menüoberfläche mit 16 verschiedenen Menüpunkten, siehe Abbildung 1. Die Assistenzfunktion des Systems besteht darin, dass es den Nutzenden bei der Navigation zu einer Ziel-Menükachel unterstützt. Dazu antizipiert das System die Zielkachel und ändert die Positionierung der Kacheln so, dass der Nutzende zur Zielerreichung mutmaßlich weniger Navigationsschritte benötigt. Das System kann somit verschiedene affektive Reaktionen während der Interaktion beim Nutzenden auslösen: Antizipiert es die Zielkachel korrekt und initiiert ein passendes Verhalten, führt dies zu einer positiven Reaktion des Nutzenden – unterstützendes Systemverhalten führt zu Zustimmung (Abbildung 1 oben). Antizipiert AFFINDU die Zielkachel falsch und verändert die Menüoberfläche zu Ungunsten des Nutzenden, ist eine negative affektive Reaktion zu erwarten – behinderndes Systemverhalten führt zu Ablehnung (Abbildung 1 unten). Da AFFINDU eigens für den Zweck empirischer Studien konzipiert wurde, ist das adaptive Systemverhalten hier nur simuliert. Dadurch lassen sich zu Forschungszwecken gezielt unterstützende und behindernde Verhaltensweisen einbauen und dadurch positive und negative Affekte induzieren.

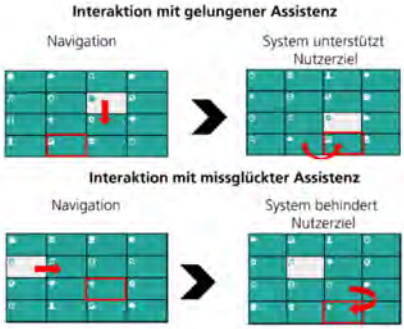


Abbildung 1: Exemplarische Illustration der zwei unterschiedlichen Assistenzweisen von AFFINDU (unterstützende (oben) und missglückte (unten) Assistenz).
Teile entnommen aus *(Bauer and Vukelić 2018)*.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde für die Interaktion mit AFFINDU mit dem oben beschriebenen Navigationsszenario eingeführt, ohne jedoch zu erwähnen, dass das System das Assistenzverhalten nur simuliert. In dieser Studie wurden insgesamt 16 Versuchsteilnehmende (Alter= 26.38 ± 3.22) mit dem adaptiven Assistenzverhalten von AFFINDU konfrontiert. Die Versuchsteilnehmenden erhielten eine Reihe von Navigationszielen und die Aufgabe, mittels einer Tastatur durch das Menü zu navigieren, um diese zu erreichen. Jede Versuchsperson durchlief insgesamt drei Blöcke à 20 Minuten in einer randomisierten Reihenfolge: A) Block mit ausschließlich unterstützendem Verhalten, B) Block mit ausschließlich behinderndes und C) Block indem beide Verhaltensweisen integriert waren. In jedem der Blöcke wurden die Adaptationen (50% der Fälle) und keine Adaptationen (50% der Fälle) in randomisierter Reihenfolge präsentiert.

Insgesamt wurden die Teilnehmenden mit dreißig unterstützenden und dreißig behindernden Anpassungen konfrontiert: zwanzig unterstützende Anpassungen in Block A, zwanzig behindernde Anpassungen in Block B und eine gemischte Zusammensetzung von zehn unterstützenden und zehn behindernden Anpassungen in Block C. Nach jedem Block wurden die subjektiven affektiven Nutzerreaktionen mit Hilfe des Self-Assessment Manikin (SAM) anhand der Dimensionen Valenz, Arousal (körperliche Erregung), und Dominanz erhoben (Bradley and Lang 1994). Das SAM-Ratings ist ein sprachfreies und kulturell universelles Verfahren, um drei verschiedene Arten von Gefühlen einzuordnen: fröhlich vs. traurig (Valenz), aufgeregt vs. ruhig (Arousal) und kontrolliert vs. kontrollierend (Dominanz). Zu jedem dieser Dimensionen werden Abbildungen (Piktogramme) verwendet die entlang eines Kontinuums bewertet werden können - Likert-Skala von 1 bis 9. Bei der Valenz-Dimension reichen die Piktogramme von einem Lächeln bis zu einem

traurigen Blick. Auf der Arousal-Skala reichen die Piktogramme von aufgeregt und hektisch bis zu entspannt und ruhig. Bei der Dominanz-Skala reichen die Piktogramme von kontrolliert und beeinflusst zu kontrollierend und einflussreich. Die Auswertung der SAM-Ratings wurde durch eine ANOVA mit Messwiederholdung (repeated measures ANOVA, rmANOVA) in SPSS (V20 IBM) durchgeführt. Dabei wurden probandenindividuelle Unterschiede hinsichtlich des emotionalen subjektiven Erlebens in den drei Testblöcken untersucht.

Während der gesamten Laufzeit des Experiments wurden sowohl EEG- als auch fNIRS-Signale anhand einer Standard-EEG-Kappe nach dem erweiterten 10-05 EEG-System erhoben. Hier werden wir uns nur auf Ergebnisse der EEG-Aufzeichnungen beziehen.

2.2. Elektroenzephalographie - Ereigniskorrelierte Potenziale (EKP)

Die EEG-Spannungsschwankungen wurden von 32 Positionen an der Kopfoberfläche mittels Ag/AgCl Elektroden aufgezeichnet (actiCAP, Brainproducts GmbH, Germany). Die EEG-Signale wurden mit einer Abtastrate von 1kHz und einem Hochpass-Filter (Zeitkonstante von 10 sekunden) zur off-line Datenauswertung mittels der *Brain Vision Recoder Software* (Brainproducts GmbH, Germany) aufgezeichnet. Die weitere Analyse der EEG-Signale wurde in MATLAB® durchgeführt.

Die Ereigniskorrelierten EEG-Signale aus den drei Blöcken A, B und C wurden nach den drei adaptiven Verhaltensweisen von AFFINDU - unterstützende, behindernde und keine Adaptation - gruppiert und ausgewertet. Damit die EKPs statistisch ausgewertet werden konnten, wurden in einem ersten Schritt die EEG-Signale vorverarbeitet (sog. EEG Pre-Processing). Dies dient der Artefaktbereinigung der EEG Signale zur Entfernung von technischen und anderen möglichen physiologischen Störanteilen, wie z.B. Muskelaktivität, Augenbewegungen und Herzaktivität. Hierzu wurden die EEG-Signale zuerst mit einem digitalen Bandpassfilter bereinigt, um nur die zeitlichen Amplitudenverläufe im relevanten EEG-Frequenzbereich (0.5-22Hz) der EKPs zu analysieren. Damit die objektive Quantifizierung der EKP-Aktivität auf ein spezifisch gegebenes Assistenzverhalten von AFFINDU weiterhin signalanalytisch durch Amplituden- und Latenzmaße untersucht werden konnte, wurden die EEG-Signale in einem festen zeitlichen Abstand zum gegebenen Assistenzereignis analysiert - zeitliche Segmente von 200 Millisekunden vor und 2000 Millisekunden nach erfolgtem adaptiven Assistenzverhalten. Im letzten Schritt des EEG Pre-Processing wurde weiterhin die Methode der „Unabhängigen Komponentenanalyse“ (engl. Independent Component Analysis, ICA) zur Artefaktkorrektur angewandt. Die ICA ist ein standardisiertes Verfahren in der EEG-Analyse, um ungewünschte Störanteile herauszurechnen und somit nur die Anteile im EEG-Signal übrig zu lassen, die mit der tatsächlichen Hirnaktivität zu

tun haben (Chaumon, Bishop, and Busch 2015; Hipp and Siegel 2013). Zur Durchführung der ICA wurde der *logistic infomax ICA* Algorithmus aus der *EEGlab* toolbox verwendet (Delorme and Makeig 2004).

Um die Modulation des Systemverhaltens von AFFINDU auf die topographischen Eigenschaften (EEG-Positionen) im relevanten Zeitbereich zu analysieren, wurden die EKP-Komponenten zwischen dem unterstützenden und behindernden Systemverhalten statistisch verglichen. Dazu wurde ein zweistufiger Ansatz gewählt.
1) Berechnung des signed r2-value (BBCI) um zu prüfen, zu welchem Zeitpunkt Modulationen in den EKPs auf systeminitiiertes AFFINDU Verhalten auftritt. Dies wurde für jeden EEG-Kanal und jeden gemessenen Zeitpunkt zwischen unterstützendem und behinderndem Systemverhalten für jeden Teilnehmer durchgeführt. Die Berechnung des signed r2-value erfolgte durch die *Berlin Brain-Computer Interface* toolbox (Blankertz et al. 2010).
2) Auf Basis der optimal identifizierten Zeitfenster wurden mögliche topographische Unterschiede in den Amplitudenmodulationen der EEG-Positionen zwischen unterstützendem und behindernden Assistenzverhalten statistisch verglichen. Dazu wurde ein clusterbasierter, nicht-parametrischer Randomisierungsansatz auf der Ebene der einzelnen EEG-Positionen auf Gruppenebene durchgeführt (Maris and Oostenveld 2007), der eine Korrektur für multiples Testen (Korrektur der α-Fehler-Kumulierung) enthält. Dieses Verfahren ist in der Open-Source-Toolbox *Fieldtrip* implementiert (Oostenveld et al. 2011).

3. Ergebnisse

3.1. Subjektive Bewertungen des Systemverhaltens

Die Auswertung der rmANOVA zeigten Haupteffekte der Testphasenblöcke in den drei SAM-Dimensionen.

Für die Valenz zeigte sich ein Haupteffekt von $F(1.37,19.10)= 10.70$; $p= 0.002$. Post-hoc Vergleiche zeigten hier, dass der Testblock A (unterstützendes Verhalten) signifikant höher bewertet wurde als der Testblock C (gemischtes Verhalten) und Testblock B (behinderndes Verhalten; zweiseitiger t-Test: A vs. C, $p=0.028$, und A vs. B, $p=0.009$). Es wurde kein signifikanter Effekt im Vergleich der Testblöcke C und B für die Valenzdimension gefunden.

Für die körperliche Erregung zeigte sich ebenfalls ein Haupteffekt von $F(1.45,49.37)= 5.95$; $p= 0.01$. Hier zeigten sich, dass der Testblock B signifikant höher bewertet wurde als Testblock A (zweiseitiger t-test: B vs. A, $p=0.03$). Es wurde kein signifikanter Effekt im Vergleich der Testblöcke C und B für die gefunden.

Für die Dominanz wurde ebenfalls ein Haupteffekt gefunden F(1.60,54.44)= 4.45; p= 0.023, allerdings ergaben die Post-hoc Test keine signifikanten Unterschiede zwischen den Blöcken.

3.2. EKP-Korrelate für die Aufteilung in positive und negative Erlebnisse

Die Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Verlauf der ereigniskorrelierten Potenziale als Gruppenergebnis (Mittelwert über alle Versuchsteilnehmer hinweg) für eine Interaktion (Abb. 2A) mit unterstützender Assistenz und eine Interaktion mit behindernder Assistenz (Abb. 2B) durch AFFINDU.

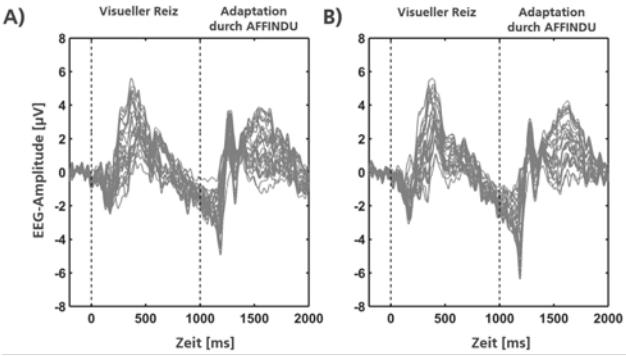


Abbildung 2: Ereigniskorrellierte Potenziale im Zeitfenster nach erfolgtem adaptiven Assistenzverhalten von AFFINDU, A) unterstützendes Systemverhalten und B) verhinderndes Systemverhalten. Die beiden Graphen zeigen einen Butterfly-plot (Mittelwert über alle Teilnehmenden), indem die einzelnen Linien die zeitlichen EEG-Signale der einzelnen EEG-Elektroden zeigen.

In beiden Fällen führte das simulierte Assistenzverhalten von AFFINDU (Zeitfenster von 1000 Millisekunden bis 2000 Millisekunden) zu einer Modulation der EKPs bereits in den ersten frühen Phasen etwas ab 100 Millisekunden nach Adaptation durch AFFINDU.

Die Berechnung der Diskriminierfähigkeit (r^2-Wert mit Vorzeichnen; Abbildung 3) zeigt, dass sich die neuronale Aktivität bei unterstützender Assistenz bei der von behindernder Assistenz im zeitlichen Verlauf der einzelnen EEG-Elektroden unterscheiden lässt. Die Abbildung 3 zeigt, dass die größte Diskriminierfähigkeit zwischen unterstützenden und behinderter Assistenz durch AFFINDU bei ca. 190 Millisekunden und ab 620 Millisekunden stattfindet.

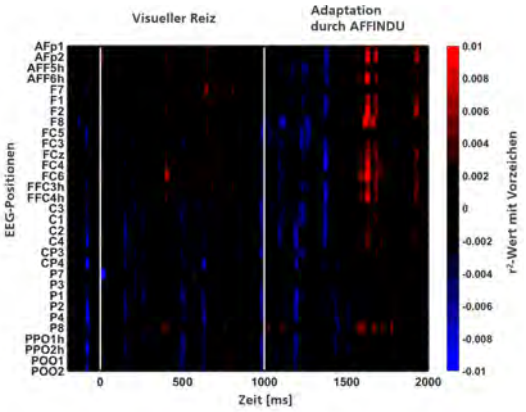


Abbildung 3: Mittelwert des r^2-Wert mit Vorzeichen (x-Achse: Zeit in Millisekunden, y-Achse: Positionen im EEG) für alle EEG-Elektroden über alle Versuchsteilnehmer hinweg.

Basierend auf diesen Zeitpunktmaxima wurden die topographischen Unterschiede zwischen unterstützendem versus verhindertem Assistenzverhalten der einzelnen EKPs im Zeitfenster 1) 190± 10Millisekunden und 2) 620± 10Millisekunden statistisch analysiert. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse des nicht-parametrischen Randomisierungstests. In Abbildung 4A ist zu sehen, dass ein sehr früher Effekt in den hinteren bilateral parietalen und okzipitalen EEG-Positionen zu beobachten ist. Wohingegen im späteren zeitlichen Verlauf ein signifikanter bilateraler Effekt in den frontalen und fronto-zentralen EEG-Positionen zu beobachten ist (Abbildung 4B).

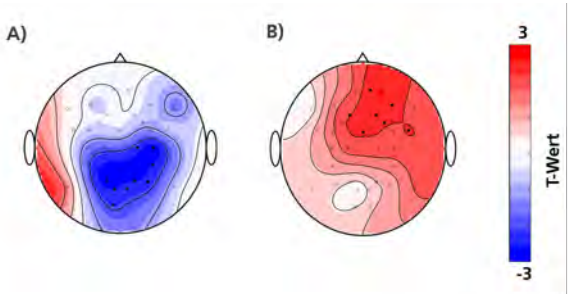


Abbildung 4: Zu sehen sind die Topographieunterschiede (unterstützendes versus verhinderndes Assistenzverhalten) im Zeitintervall 190± 10Millisekunden (A) und im Zeitintervall 620± 10Millisekunden (B). Signifikant unterschiedliche Elektroden-Positionen im EEG sind als ausgefüllte Punkte dargestellt (Elektrodencluster die einen signifikanten Unterschied im nicht-parametrischen Test ergaben), wobei die einzelnen Punkte die gemessenen Positionen der EEG-Signale darstellen. Die Farbedekodierung gibt das Signifikanzniveau (Diskriminierfähigkeit) als t-Wert Skala an. Die rote Farbe repräsentiert eine Zunahme der Negativität in der EEG-Amplitude im EKP, während blau eine Abnahme der Negativität darstellt.

4. Diskussion und Ausblick

Die empirische Studie adressierte die Forschungsfrage, inwiefern sich positive Affekte, hervorgerufen durch unterstützendes Assistenzverhalten in der Zielerreichung, und negative Affekte, ausgelöst durch behinderndes Assistenzverhalten in der Zielerreichung, auf Basis der EEG-Signale unterscheiden lassen. Dazu wurden die Teilnehmenden gebeten eine Navigationsaufgabe durchzuführen. Während der Aufgabendurchführung wurden die EEG-Signale erfasst, während die Teilnehmenden mit drei verschiedene selbstinitiierten adaptiven Verhaltensweisen von AFFINDU konfrontiert wurden. Weiterhin wurden die subjektiv emotional-affektiven Bewertungen nach jedem Interaktionsblock mit Hilfe des Self-Assessment Manikin (SAM) erhoben. Die SAM-Bewertungen deuten darauf hin, dass das adaptive Verhalten von AFFINDU auf subjektiver Ebene positive und negative affektive Reaktionen bei den Teilnehmern auslöste. Die SAM-Bewertungen zeigen, dass Interkationen mit unterstützendem Assistenzverhalten als signifikant positiver und weniger erregend bewertet wurden als Interkationen mit behinderndem Systemverhalten. Diese Ergebnisse stimmen mit den Ergebnissen der Vorstudie mit AFFINDU (Pollmann et al. 2017) überein und bestätigen, dass bei den Teilnehmenden eine affektive Beurteilung und damit eine Verarbeitung der verschiedenen Arten von Systemverhalten stattgefunden hatte.

Mit dem Einsatz der EEG konnte gezeigt werden, dass sowohl positive als auch negative affektive Reaktionen der Nutzenden zu unterschiedlichen EKP-Amplituden führen. Genauer gesagt, zeigte sich ein sehr früher Effekt im Zeitintervall von ca. 190Millisekunden vor allem in den hinteren EEG-Elektroden, wohingegen im Zeitintervall von ca. 620Millisekunden in den vorderen EEG-Positionen zu einem signifikanten Unterschied zwischen unterstützendem und behinderten Assistenzverhalten führte. Interessanterweise zeigen die Ergebnisse keine An- oder Abwesenheit bestimmter EKP-Komponenten zwischen dem unterstützendem oder behinderndem Assistenzverhalten. Spezifische Polaritäten in den Amplituden (positiver oder negativer Amplitudenausschlag) und zeitliche Latenzen in Abhängigkeit zum gegebenen Stimulus bezeichnen für gewöhnlich den Namen des Ereigniskorrelierten Potenzials. Dennoch können sie von Kontext zu Kontext variieren, insbesondere, wenn sich Reiztypen und Aufgaben von Studie zu Studie erheblich unterscheiden (Kappenman and Luck 2011).

Bis dato ist der häufigste experimentelle Ansatz zur Untersuchung affektiver Reaktionen im Gehirn auf emotionale Stimuli die Präsentation von Bildern mit unterschiedlichem Grad der emotionalen Wirkung auf den Teilnehmenden (Lang et al. 2008). Dadurch konnte gezeigt werden, dass sich die affektiven Verarbeitungen auf emotionale Stimuli in der Dynamik und Amplitudenmodulation der EKPs charakterisieren lässt. Insbesondere wurde schon mehrfach argumentiert, dass es eine grobe Unterscheidung zwischen sehr frühen EKP-Komponenten, z.B. unterhalb von ca. 300 Millisekunden nach erfolgtem Reiz (Hinweis auf selektive Aufmerksamkeitsprozesse durch saliente Reize), und späteren EKP-Komponenten, z.B. über 300 Millisekunden nach erfolgtem Stimulus (Verarbeitung der motivationalen Relevanz des Stimulus) gibt (Coutinho et al. 2018; Gianotti et al. 2008; Olofsson et al. 2008; Schupp et al. 2004, 2006). Die vorliegende Studie erweitert diesen Erkenntnisstand anhand eines Interaktionsszenarios mit einem adaptiven Assistenzsystem. Die Ergebnisse zeigen anhand der EKP-Analyse, dass positive und negative affektive Reaktionen bei ca. 190 Millisekunden (sog. N200) und ab ca. 620 Millisekunden (sog. late positive potential, LPP) statistisch signifikant voneinander unterschieden werden können. Vielmehr lassen sich die Ergebnisse, aufgrund des interaktiven Charakters von AFFINDU, im Hinblick auf mögliche Verarbeitungsprozesse des vom Computer gegebenen Feedbacks durch den Benutzenden interpretieren, wie z.B. dass die Absicht der Zielerreichung des Nutzenden durch das System berücksichtig wurde, oder auch das es zu einer möglichen Akzeptanz gegenüber dem Systemverhaltens beim Nutzenden geführt hat (Chaminade et al. 2012; Peterburs et al. 2016; Schindler et al. 2015).

Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass es für den Nutzenden wichtig ist gewisse Verhaltensweisen von autonom agierenden Assistenzsystemen zu überwachen, um mögliche Diskrepanzen zwischen einem beabsichtigten Ziel

und der ausgeführten Aktion des Systems aufzudecken. Dies ist wichtig um die eigenen Erwartungen rasch zu aktualisieren, und dadurch eine zielgerichtete Interaktion und adaptives Verhalten zu fördern. Das AFFINDU-Paradigma wurde bewusst als Beobachtungsaufgabe in einer geschlossenen Interaktionsschleife konzipiert. Die Teilnehmendem gaben ihre beabsichtigte Eingabe ein und beobachteten dann das resultierende Systemverhalten als Reaktion auf ihre eigene Eingabe. Das Verhalten von AFFINDU konnte entweder kongruent oder inkongruent mit dem Ziel der Teilnehmenden sein. Interessanterweise zeigte die Studie, dass kongruentes Verhalten (unterstützende Anpassung/positives Feedback) zu höheren Amplituden der frühen (N200) und späteren (LPP) EKP-Komponenten führte.

Die frühe N200-Komponente ist die auffälligste EKP-Komponente die in der Literatur beschrieben wurde. N200 weist für gewöhnlich auf Prozesse hin, die bei der anfänglichen Wahrnehmung und automatischen Bewertung sowie der semantischen Kategorisierung von emotional-affektiven Reizen beteiligt sind (Carretié et al. 2004; Schupp et al. 2004, 2006; Weinberg and Hajcak 2010). Die N200-Komponente die in der vorliegenden Studie berichtet wurde spiegelt sehr wahrscheinlich eine implizite Verarbeitung wider, die mit einer raschen perzeptuellen und semantischen Kategorisierung der beiden unterschiedlichen Systemverhaltensweisen zusammenhängt und zu einem höheren Amplitudenausschlag gegenüber unterstützenden Assistenzverhalten führt. Dies deutet möglicherweise auf eine sehr frühe neuroelektrische Signatur für unterscheidbare semantische Inhaltsänderungen (unterstützendes versus behinderndes) von AFFIDUN hin.

Der spätere LPP-Komplex ist für gewöhnlich mit emotionaler Valenz und erregenden Stimuli assoziiert und weist darüber hinaus auf eine stärkere perzeptuelle Bewertung emotional geladener Stimuli im Vergleich zu neutralen Stimuli sowie auf ein emotionales Engagement und anhaltenden Aufmerksamkeit des evozierenden Reizes hin (De Cesarei and Codispoti 2011; Gable and Adams 2013; Hajcak et al. 2013). Das topographische Aktivierungsmuster im LPP-Zeitfenster in der vorliegenden Studie weist auf Regionen im Gehirn hin, die sich im präfrontalen Kortex befinden, einem Bereich der für gewöhnlich mit der Emotionsregulation im Zusammenhang steht (Barrett and Satpute 2013; Cromwell and Panksepp 2011). Die höhere Amplitude für unterstützendes Assistenzverhalten deutet möglicherweise auf anhaltende Aufmerksamkeitsprozesse hin, die eine stärkere motivationale Relevanz gegenüber dem unterstützenden Systemverhaltens für die Teilnehmer zur Erreichung des gewünschten Ziels hat.

Alles in allem lässt sich die vorliegende empirische Studie wie folgt zusammenfassen: Die EKP-Ergebnisse zeigen ausgeprägte zeitlich und topographisch signifikant unterschiedliche Stadien, in denen die anfängliche frühe semantische Kategorisie-

rung (N200) und spätere motivationale Verarbeitung (LPP) durch den Benutzenden begünstigt wird, wenn das Assistenzverhalten von AFFINDU als positiv wahrgenommen wird. Diese neurophysiologischen Korrelate emotional-affektiver Effekte sind weitestgehend im Einklang mit den aus der neurowissenschaftlichen Literatur bereits bekannten Ergebnissen der zeitlichen EKP-Antworten und dem Model der motivationalen Aufmerksamkeitsfokussierung (Schupp et al. 2006, 2007). Die Ergebnisse leisten somit einen wichtigen Beitrag zur Grundlagenforschung affektiver Verarbeitungsprozesse während der Interaktion mit adaptiven Assistenzsystemen. Es bedarf allerdings noch weiteren Untersuchungen in zukünftigen Studien um die berichteten Resultate weiter zu untermauern.

In zukünftigen Studien und Anwendungen können die ermittelten neuronalen Unterscheidungsmerkmale positiver und negativer Affektreaktionen dazu genutzt werden, adaptive Assistenzsysteme besser auf den individuellen Nutzenden anzupassen. Mit Hilfe eines BCIs können die erfassten neurophysiologischen Korrelate ausgewertet und dadurch der Nutzerzustand kontinuierlich dargestellt werden. Augmentiert mit diesen Möglichkeiten kann ein solches neuro-adaptives Assistenzsystem in Echtzeit Information dazu erhalten, wie systeminitiierte Anpassungen vom Nutzenden wahrgenommen werden und sein autonomes Verhalten dadurch sukzessive an dessen Präfenzen zuschneiden (Bauer and Vukelić 2018; Fairclough 2009; Hettinger et al. 2003; Pollmann et al. 2017; Vukelić et al. 2019; Zander et al. 2016).

Die Entwicklungsperspektiven und Nutzenpotenziale von affektiven BCIs und neuro-adaptiven Systemen sind vielfältig. Vielversprechende zukünftige MTI-Anwendungen ergeben sich aus den technischen und gesellschaftlichen Herausforderungen der Digitalisierung. Der Bedarf ergibt sich hier 1) aus einem hochrelevanten gesellschaftlichen Problem, wie zunehmende Autonomie und Intelligenz von KI-Technologien; 2) das bisherige Fehlen geeigneter Lösungen, d.h. effektiver, individueller und skalierbarer Ansätze für das menschzentrierte Einlernen von autonomer Technik. Besondere Potenziale ergeben sich z.B. für die **Mobilität**: Erkennung des Fahrerzustands und kontextsensitive Rollenverteilung und Kontrollübergabe zwischen Fahrer und Fahrzeug in (teil-)autonomen Fahrszenarien. Gerade die Bewertung von Fahrmanövern ist ein besonders interessanter Anwendungsbereich eines affektiven BCIs. In diesem Zusammenhang kann ein kontinuierliches Bewertungssystem der subjektiven Angemessenheit als Laborinstrument in F&E-Abteilung als auch als Echtzeit-Monitoring-System im Auto eingesetzt werden. **Wissensmedien und Lernen**: Gestaltung von interaktiven Lernprogrammen, die das Tempo und Schwierigkeit des Lernstoffes und der Lernmethoden an den Lernfortschritt und kognitiven Fähigkeiten des Nutzenden anpassen. Durch eine automatisierte Auswertung der neurophysiologischen Signale über ein BCI könnten wich-

tige Informationen über den Lernenden gesammelt werden, um individuell Anpassungen zu machen. Emotional-affektive Reaktionen helfen so das Verständnis zu diagnostizieren und daraufhin adaptiv neue Lerninhalten anzubieten, wenn der bisherige Inhalt ausreichend verstanden wurde. **Mensch-Roboter-Kollaboration**: Eine Echtzeit-Analyse der impliziten Bewertungen (affektive Reaktionen) kann wichtige Lehrsignale für die Echtzeit-Anpassung und Personalisierung des Roboterverhaltens vermitteln. Durch ein affektives BCI lassen sich so spontane affektive Bewertungen der Experten, wie z.B. die Frustration bei einer fehlerhaften oder verbesserungswürdigen Aktion des Roboters, verwenden, um damit den Roboter zu trainieren.

Die Erfassung von EKPs ist allerdings nur ein erster Schritt, um situativ auf ein gegebenes Assistenzverhalten reagieren zu können. Für weiterführende Forschungen in diesem Bereich könnte sich eine nähere Betrachtung der oszillatorischen Aktivitäten des EEG (Frequenzen üblicherweise im Bereich von 1 - 30Hz) eignen, um neurophysiologische Affektreaktionen in der kontinuierlichen Interaktion noch besser abzubilden. Aufgrund der weitreichenden sozialen Implikationen einer neuro-adaptiven Technologie müssen aber zukünftige Forschungsbemühungen vor allem auch potentielle soziale und ethische Veränderungen einbeziehen, wie z.B. Fragen nach der kognitiven Freiheit, mentale Integrität und Privatheit sowie der psychologischen Stabilität und Datenautonomie.

Literatur

Barrett, Lisa Feldman, and Ajay Bhaskar Satpute. 2013. "Large-Scale Brain Networks in Affective and Social Neuroscience: Towards an Integrative Functional Architecture of the Brain." Current Opinion in Neurobiology 23(3):361–72.

Bauer, Wilhelm, and Mathias Vukelić. 2018. "Forschungsprojekt EMOIO." Pp. 135–51 in Digitalisierung, edited by R. Neugebauer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Blankertz, Benjamin, Laura Acqualagna, Sven Dähne, Stefan Haufe, Matthias Schultze-Kraft, Irene Sturm, Marija Uščumlic, Markus A. Wenzel, Gabriel Curio, and Klaus-Robert Müller. 2016. "The Berlin Brain-Computer Interface: Progress Beyond Communication and Control." Frontiers in Neuroscience 10.

Blankertz, Benjamin, Michael Tangermann, Carmen Vidaurre, Siamac Fazli, Claudia Sannelli, Stefan Haufe, Cecilia Maeder, Lenny Ramsey, Irene Sturm, Gabriel Curio, and Klaus-Robert Müller. 2010. "The Berlin Brain–Computer Interface: Non-Medical Uses of BCI Technology." Frontiers in Neuroscience 4.

Bradley, Margaret M., and Peter J. Lang. 1994. "Measuring Emotion: The Self-Assessment Manikin and the Semantic Differential." Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry 25(1):49–59.

Carretié, Luis, José A. Hinojosa, Manuel Martín-Loeches, Francisco Mercado, and Manuel Tapia. 2004. "Automatic Attention to Emotional Stimuli: Neural Correlates: Automatic Attention to Emotional Stimuli." Human Brain Mapping 22(4):290–99.

Chaminade, Thierry, Delphine Rosset, David Da Fonseca, Bruno Nazarian, Ewald Lutcher, Gordon Cheng, and Christine Deruelle. 2012. "How Do We Think Machines Think? An FMRI Study of Alleged Competition with an Artificial Intelligence." Frontiers in Human Neuroscience 6.

Chaumon, Maximilien, Dorothy V. M. Bishop, and Niko A. Busch. 2015. "A Practical Guide to the Selection of Independent Components of the Electroencephalogram for Artifact Correction." Journal of Neuroscience Methods 250:47–63.

Cinel, Caterina, Davide Valeriani, and Riccardo Poli. 2019. "Neurotechnologies for Human Cognitive Augmentation: Current State of the Art and Future Prospects." Frontiers in Human Neuroscience 13.

Coutinho, Eduardo, Kornelia Gentsch, Jacobien van Peer, Klaus R. Scherer, and Björn W. Schuller. 2018. "Evidence of Emotion-Antecedent Appraisal Checks in Electroencephalography and Facial Electromyography" edited by G. Valenza. PLOS ONE 13(1):e0189367.

Craik, Alexander, Yongtian He, and Jose L. Contreras-Vidal. 2019. "Deep Learning for Electroencephalogram (EEG) Classification Tasks: A Review." Journal of Neural Engineering 16(3):031001.

Cromwell, Howard Casey, and Jaak Panksepp. 2011. "Rethinking the Cognitive Revolution from a Neural Perspective: How Overuse/Misuse of the Term 'Cognition' and the Neglect of Affective Controls in Behavioral Neuroscience Could Be Delaying Progress in Understanding the Brain-Mind." Neuroscience & Biobehavioral Reviews 35(9):2026–35.

De Cesarei, Andrea, and Maurizio Codispoti. 2011. "Affective Modulation of the LPP and α-ERD during Picture Viewing: Affective Modulation of ERPs and EEG Oscillations." Psychophysiology 48(10):1397–1404.

Deci, Edward L., and Richard M. Ryan, eds. 2004. Handbook of Self-Determination Research. Softcover ed. Rochester, NY: Univ. of Rochester Press.

Delorme, Arnaud, and Scott Makeig. 2004. "EEGLAB: An Open Source Toolbox for Analysis of Single-Trial EEG Dynamics Including Independent Component Analysis." Journal of Neuroscience Methods 134(1):9–21.

Ehlis, A. C., T. M. Ringel, M. M. Plichta, M. M. Richter, M. J. Herrmann, and A. J. Fallgatter. 2009. "Cortical Correlates of Auditory Sensory Gating: A Simultaneous near-Infrared Spectroscopy Event-Related Potential Study." Neuroscience 159(3):1032–43.

Fairclough, Stephen H. 2009. "Fundamentals of Physiological Computing." Interacting with Computers 21(1–2):133–45.

Fazli, Siamac, Jan Mehnert, Jens Steinbrink, Gabriel Curio, Arno Villringer, Klaus-Robert Müller, and Benjamin Blankertz. 2012. "Enhanced Performance by a Hybrid NIRS-EEG Brain Computer Interface." NeuroImage 59(1):519–29.

Gable, Philip A., and David L. Adams. 2013. "Nonaffective Motivation Modulates the Sustained LPP (1,000-2,000 Ms): Nonaffective Motivation." Psychophysiology 50(12):1251–54.

Gianotti, Lorena R. R., Pascal L. Faber, Matthias Schuler, Roberto D. Pascual-Marqui, Kieko Kochi, and Dietrich Lehmann. 2008. "First Valence, Then Arousal: The Temporal Dynamics of Brain Electric Activity Evoked by Emotional Stimuli." Brain Topography 20(3):143–56.

Hajcak, Greg, Annmarie MacNamara, Dan Foti, Jamie Ferri, and Andreas Keil. 2013. "The Dynamic Allocation of Attention to Emotion: Simultaneous and Independent Evidence from the Late Positive Potential and Steady State Visual Evoked Potentials." Biological Psychology 92(3):447–55.

Hassenzahl, Marc. 2008. "User Experience (UX): Towards an Experiential Perspective on Product Quality." P. 11 in. ACM Press.

Hettinger, Lawrence J., Pedro Branco, L. Miguel Encarnacao, and Paolo Bonato. 2003. "Neuroadaptive Technologies: Applying Neuroergonomics to the Design of Advanced Interfaces." Theoretical Issues in Ergonomics Science 4(1–2):220–37.

Hipp, Joerg F., and Markus Siegel. 2013. "Dissociating Neuronal Gamma-Band Activity from Cranial and Ocular Muscle Activity in EEG." Frontiers in Human Neuroscience 7:338.

Kappenman, Emily S., and Steven J. Luck. 2011. ERP Components: The Ups and Downs of Brainwave Recordings. Oxford University Press.

Koelstra, S., C. Muhl, M. Soleymani, Jong-Seok Lee, A. Yazdani, T. Ebrahimi, T. Pun, A. Nijholt, and I. Patras. 2012. "DEAP: A Database for Emotion Analysis ;Using Physiological Signals." IEEE Transactions on Affective Computing 3(1):18–31.

Lang, Peter J., Margaret M. Bradley, and Bruce N. Cuthbert. 2008. "International Affective Picture System (IAPS): Affective Ratings of Pictures and Instruction Manual." Technical Report A-8. University of Florida, Gainesville, FL.

Lerner, Jennifer S., Ye Li, Piercarlo Valdesolo, and Karim S. Kassam. 2015. "Emotion and Decision Making." Annual Review of Psychology 66(1):799–823.

Liberati, Giulia, Stefano Federici, and Emanuele Pasqualotto. 2015. "Extracting Neurophysiological Signals Reflecting Users' Emotional and Affective Responses to BCI Use: A Systematic Literature Review" edited by M. J. Scherer and S. Federici. NeuroRehabilitation 37(3):341–58.

Lotte, F., L. Bougrain, A. Cichocki, M. Clerc, M. Congedo, A. Rakotomamonjy, and F. Yger. 2018. "A Review of Classification Algorithms for EEG-Based Brain–Computer Interfaces: A 10 Year Update." Journal of Neural Engineering 15(3):031005.

Maris, Eric, and Robert Oostenveld. 2007. "Nonparametric Statistical Testing of EEG- and MEG-Data." Journal of Neuroscience Methods 164(1):177–90.

McFarland, Dennis J., William A. Sarnacki, and Jonathan R. Wolpaw. 2003. "Brain–Computer Interface (BCI) Operation: Optimizing Information Transfer Rates." Biological Psychology 63(3):237–51.

Mühl, Christian, Brendan Allison, Anton Nijholt, and Guillaume Chanel. 2014. "A Survey of Affective Brain Computer Interfaces: Principles, State-of-the-Art, and Challenges." Brain-Computer Interfaces 1(2):66–84.

Obrig, Hellmuth, Heike Israel, Matthias Kohl-Bareis, Kamil Uludag, Rüdiger Wenzel, Bianca Müller, Guy Arnold, and Arno Villringer. 2002. "Habituation of the Visually Evoked Potential and Its Vascular Response: Implications for Neurovascular Coupling in the Healthy Adult." NeuroImage 17(1):1–18.

Olofsson, Jonas K., Steven Nordin, Henrique Sequeira, and John Polich. 2008. "Affective Picture Processing: An Integrative Review of ERP Findings." Biological Psychology 77(3):247–65.

Oostenveld, Robert, Pascal Fries, Eric Maris, and Jan-Mathijs Schoffelen. 2011. "FieldTrip: Open Source Software for Advanced Analysis of MEG, EEG, and Invasive Electrophysiological Data." Computational Intelligence and Neuroscience 2011:1–9.

Osiurak, François, Jordan Navarro, and Emanuelle Reynaud. 2018. "How Our Cognition Shapes and Is Shaped by Technology: A Common Framework for Understanding Human Tool-Use Interactions in the Past, Present, and Future." Frontiers in Psychology 9.

Peissner, Matthias. 2014. Entwurfsmusterbasierter Ansatz für adaptive Benutzungsschnittstellen zur Überwindung von Nutzungsbarrieren. Stuttgart: Fraunhofer-Verl.

Peissner, Matthias, Dagmar Häbe, Doris Janssen, and Thomas Sellner. 2012. "MyUI: Generating Accessible User Interfaces from Multimodal Design Patterns." P. 81 in. ACM Press.

Peterburs, Jutta, Carolin Sandrock, Wolfgang H. R. Miltner, and Thomas Straube. 2016. "Look Who's Judging—Feedback Source Modulates Brain Activation to Performance Feedback in Social Anxiety." NeuroImage 133:430–37.

Phan, K. Luan, Tor Wager, Stephan F. Taylor, and Israel Liberzon. 2002. "Functional Neuroanatomy of Emotion: A Meta-Analysis of Emotion Activation Studies in PET and FMRI." NeuroImage 16(2):331–48.

Picard, R. W., E. Vyzas, and J. Healey. 2001. "Toward Machine Emotional Intelligence: Analysis of Affective Physiological State." IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 23(10):1175–91.

Pollmann, Kathrin, Mathias Vukelic, and Matthias Peissner. 2015. "Towards Affect Detection during Human-Technology Interaction: An Empirical Study Using a Combined EEG and FNIRS Approach." Pp. 726–32 in. IEEE.

Pollmann, Kathrin, Daniel Ziegler, Matthias Peissner, and Mathias Vukelić. 2017. "A New Experimental Paradigm for Affective Research in Neuro-Adaptive Technologies." Pp. 1–8 in. ACM Press.

Rossi, Sonja, Ina B. Jürgenson, Adriana Hanulíková, Silke Telkemeyer, Isabell Wartenburger, and Hellmuth Obrig. 2011. "Implicit Processing of Phonotactic Cues: Evidence from Electrophysiological and Vascular Responses." Journal of Cognitive Neuroscience 23(7):1752–64.

Schindler, Sebastian, Martin Wegrzyn, Inga Steppacher, and Johanna Kissler. 2015. "Perceived Communicative Context and Emotional Content Amplify Visual Word Processing in the Fusiform Gyrus." The Journal of Neuroscience 35(15):6010–19.

Schupp, H. T., J. Stockburger, M. Codispoti, M. Junghofer, A. I. Weike, and A. O. Hamm. 2007. "Selective Visual Attention to Emotion." Journal of Neuroscience 27(5):1082–89.

Schupp, Harald T., Tobias Flaisch, Jessica Stockburger, and Markus Junghöfer. 2006. "Emotion and Attention: Event-Related Brain Potential Studies." Pp. 31–51 in Progress in Brain Research. Vol. 156. Elsevier.

Schupp, Harald T., Markus Junghöfer, Almut I. Weike, and Alfons O. Hamm. 2004. "The Selective Processing of Briefly Presented Affective Pictures: An ERP Analysis: Selective Emotional Processing." Psychophysiology 41(3):441–49.

Sitaram, Ranganatha, Sangkyun Lee, Sergio Ruiz, Mohit Rana, Ralf Veit, and Niels Birbaumer. 2011. "Real-Time Support Vector Classification and Feedback of Multiple Emotional Brain States." NeuroImage 56(2):753–65.

Spath, Dieter, Matthias Peissner, and Sandra Sproll. 2010. "Methods from Neuroscience for Measuring User Experience in Work Environments." Pp. 111–21 in Advances in Understanding Human Performance. Vol. 20105280, edited by V. Rice. CRC Press.

Vukelić, Mathias, Kathrin Pollmann, and Matthias Peissner. 2019. "Toward Brain-Based Interaction Between Humans and Technology." Pp. 105–9 in Neuroergonomics. Elsevier.

Weinberg, Anna, and Greg Hajcak. 2010. "Beyond Good and Evil: The Time-Course of Neural Activity Elicited by Specific Picture Content." Emotion 10(6):767–82.

Zander, Thorsten O., and Christian Kothe. 2011. "Towards Passive Brain-Computer Interfaces: Applying Brain-Computer Interface Technology to Human-Machine Systems in General." Journal of Neural Engineering 8(2):025005.

Zander, Thorsten O., Laurens R. Krol, Niels P. Birbaumer, and Klaus Gramann. 2016. "Neuroadaptive Technology Enables Implicit Cursor Control Based on Medial Prefrontal Cortex Activity." Proceedings of the National Academy of Sciences 201605155.

Potenziale und Herausforderungen neuer digitaler Interaktionssysteme im Kollektionsentwicklungsprozess der Bekleidungsindustrie

Franziska Moltenbrey, Meike Tilebein

Zentrum für Management Research, DITF Denkendorf

1. Einleitung

Im Zuge der digitalen Transformation durchläuft die Bekleidungsindustrie aktuell einen fundamentalen Strukturwandel. Kurze Produktionszyklen, ausgelagerte Produktionsstandorte und ein verschärfter Wettbewerb durch eine zunehmend anspruchsvollere Kundschaft sind nur einige von vielen Herausforderungen, denen sich diese Industrie stellen muss. Gleichzeitig sind IT-Infrastruktur sowie technisches Wissen und finanzielle Mittel in vielen Textilunternehmen nicht ausreichend vorhanden (Artschwager/Tilebein 2017a). Nicht zuletzt erschweren die Altersstruktur und der Rückgang an qualifizierten Arbeitskräften als Folge des demographischen Wandels den Umstieg in eine digitale Welt (Wischmann/Hartmann 2018).

Dennoch schreitet der digitale Wandel auch in der Bekleidungsindustrie voran und verändert deren Arbeitsbedingungen. Dies erfordert im Kollektionsentwicklungsprozess neuartige, digitale Lösungen, um neue Formen der interorganisationalen Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette sowie zwischen Mensch und Technik zu unterstützen (Artschwager/Tilebein 2017b). Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR)-Lösungen sollen hierbei die Potenziale neuer digitaler Interaktionssysteme veranschaulichen und zeigen, wie neue Lösungen für Mensch-Maschine-Interaktionen die Herausforderungen der digitalen Arbeitswelt aufgreifen.

Der vorliegende Beitrag beschreibt in Abschnitt 2 die Herausforderungen, die im Zuge der digitalen Transformation in der Bekleidungsindustrie entstehen sowie die daraus resultierende, veränderte Arbeitswelt. Der Abschnitt 3 geht zunächst auf die Wertschöpfungskette in der Textilindustrie ein und stellt anschließend den klassischen Kollektionsentwicklungsprozess in der Bekleidungsindustrie dar. In

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_4

Abschnitt 4 stehen die neuen digitalen Interaktionssysteme und deren Bedeutung für diesen Prozess im Fokus. Dabei wird insbesondere auf die Herausforderungen und Potenziale der einzelnen Lösungen eingegangen. Abschnitt 5 schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick.

2. Bekleidungsindustrie im Wandel

Die deutsche Textil- und Bekleidungsindustrie besteht derzeit aus ca. 1400 Unternehmen. In Summe generieren diese einen jährlichen Umsatz von rund 35 Mrd. Euro (davon 60% Textil, 40% Bekleidung). Damit zählt die Bekleidungsindustrie mit ihren im Inland ca. 135.000 Beschäftigten zur zweitgrößten Konsumgüterindustrie Deutschlands, bestehend aus 7 Branchen, darunter auch der Bekleidungseinzelhandel. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) prägen die Textil- und Bekleidungsindustrie; 93% der Unternehmen haben weniger als 250 Beschäftigte. (Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e.V. 2018; textil+mode 2019)

Im Zeitalter von Industrie 4.0 und E-Commerce stehen vor allem KMU unter Druck. Viele der Unternehmen haben die digitale Transformation noch nicht umgesetzt und benötigen Lösungen um sich durch individualisierte Leistungsangebote vom Wettbewerb abzuheben (Heine 2018). Digitale Technologien eröffnen der Bekleidungsindustrie zahlreiche neue Möglichkeiten, von der integrierten virtuellen Produktentwicklung bis hin zur unmittelbaren Einbindung der Kund*innen und des Einzelhandels. Momentan ist die Unterstützung solcher Prozesse in diesem Umfeld jedoch nur unzureichend. Hierfür werden durchgängige, flexible und interaktive Konzepte insbesondere im Umfeld des Einzelhandels benötigt. Für die KMU der Textil- und Bekleidungsindustrie ist die Umsetzung digitaler Maßnahmen, die mit zahlreichen Herausforderungen einhergehen, jedoch nicht trivial. Dabei werden sie mit folgenden Gegebenheiten und Rahmenbedingungen konfrontiert, denen sie sich stellen müssen:

Kurze Produktionszyklen

In Zeiten der Globalisierung kommen immer schneller neue Bekleidungsprodukte auf den Markt. Für ein und denselben Produktbereich gibt es unzählige Anbieter (Tagesspiegel 2011). Waren es früher 2-4 Kollektionen, sind es heutzutage bis zu 12 Kollektionen oder mehr, die ein Unternehmen pro Jahr herausbringt. Daher unterliegt die Bekleidungsindustrie im modischen Segment sehr kurzen Innovationszyklen. Dies stellt die Unternehmen in zunehmendem Maße vor die Aufgabe, ständig neue Produkte in relativ kurzer Zeit anzubieten, um sich von der Konkurrenz abzuheben (Petro 2012). Zudem möchten die Kund*innen modische Bekleidung, die primär kostengünstig ist, da sie saisonbedingt nur wenige Male tragbar ist. Um die zunehmende Nachfrage nach schnell wechselnden Angeboten stillen

zu können, werden Bekleidungsunternehmen daher dazu gezwungen entsprechend häufig den Kollektionsentwicklungsprozess anzustoßen (Oshri 2019). Kleidung wird daher aufgrund des "Fast Fashion"-Konzepts vieler Modefirmen zu einem Produkt für den einmaligen Gebrauch (trend 2016). Die Kehrseite ist ein Überschuss an Abfall und die Verschmutzung von Flüssen, Seen und Meeren.

Ausgelagerte Produktionsstandorte

Da viele Unternehmen keine Produktionskapazitäten mehr in Deutschland vorhalten, erfolgt nicht nur die Produktion, sondern auch die Herstellung von Mustern im Kollektionsentwicklungsprozess häufig im Ausland (Augustin 2015). Die Verlagerung ist für viele Unternehmen aufgrund der niedrigen Standort- und Personalkosten vor Ort zudem kostengünstiger (Deutsche Bank Research 2011). Sprachbarrieren, kulturelle Differenzen und Zeitunterschiede erschweren jedoch die Zusammenarbeit und Abstimmungsprozesse der Bekleidungsunternehmen mit den Produktionsstätten vor Ort. Es werden unterschiedliche IT-Systeme genutzt, die untereinander nicht kompatibel sind und daher zu Problemen während der Entwicklung führen können.

Anspruchsvolle Kundschaft

Wie bereits erwähnt steht den Kund*innen ein immer größeres Angebot zur Verfügung. In Zeiten von Multi-Channel Shopping können sie jedes beliebige Produkt zu jeder Zeit und überall erhalten (Bitkom 2016). Demnach wachsen auch die Erwartungen der Kund*innen. Qualität und Funktionalität reichen nicht mehr aus, das Produkt muss auch interaktiv erlebbar sein (Langbehn 2010). Interaktionen beschränken sich jedoch bislang auf die Produktkonfiguration und -betrachtung. Zudem gibt es bisher keine flächendeckende, enge Einbindung des Einzelhandels in den Innovationsprozess. Hiermit werden Potenziale kollaborativer oder co-kreativer Prozesse mit Einzelhandel oder gar Endkundschaft nicht erschlossen. Durch die massive Verbreitung von mobilen Endgeräten wie Smartphones, Tablets und Wearables sowie eine flächendeckende Breitband-Internetversorgung, Social Media und Online Shopping-Möglichkeiten sind die Kund*innen zudem informierter denn je. Im gleichen Zug erwarten sie auch von den Unternehmen, sich laufend über Produkte informieren zu können. Folglich wachsen die Anforderungen an Unternehmen, nicht nur innovative Produkte und ein interaktives Shopping-Erlebnis anzubieten, sondern auch bedarfsgerechte Informationen zu jeder Zeit bereitzustellen.

Individualisierungstrend

Neben den zunehmenden Erwartungen an Qualität, Funktionalität und Erlebnis eines Produktes steigt auch der allgemeine Trend zur Individualisierung (Heß 2008). Produkte müssen möglichst genau auf die individuellen Bedürfnisse der

Kund*innen angepasst sein. War es früher der maßgeschneiderte Anzug, sind es heute z.B. Sneaker die mit einem individuellen Design versehen werden. Demnach wird das Produkt an den Kund*innen ausgerichtet und nicht mehr umgekehrt. Damit nehmen sie Einfluss auf die Eigenschaften eines Produktes (z.B. Farbe, Material, Form) und werden als sogenannte "Prosumer" (eine Wortkombination aus "Producer" und "Consumer"), immer mehr zu zentralen Bestandteilen im Produktentwicklungsprozess, indem sie Funktionen übernehmen, die ursprünglich nur vom Produktanbieter geleistet wurden (Henkel 2018). Der Wunsch der Kund*innen nach Individualisierung stellt die Unternehmen in zunehmendem Maße vor die Aufgabe, Dienstleistungen sowie ihre Nutzung in den Prozessen effektiv und effizient zu gestalten (Petro 2012).

IT-Infrastruktur & Technisches Know-how

In vielen KMU der Bekleidungsindustrie ist die IT-Infrastruktur häufig nicht ausreichend für die Anforderungen der Digitalisierung gerüstet (IDG Business Media 2017). Zusätzlich sind die Bekleidungsunternehmen geprägt durch inhomogene System- und Produktionslandschaften. Teilweise gibt es dort Maschinen und Systeme, die Jahrzehnte alt sind, anderswo werden die neusten Maschinen eingesetzt. Neue digitale Lösungen müssen angesichts dieser Rahmenbedingungen flexibel, robust und skalierbar sein. Der Umgang mit neuen Maschinen setzt ein entsprechendes technisches Know-how voraus, das durch die inkonsistenten Systemlandschaften dann jedoch nicht überall auf gleichem Niveau existiert. Zudem benötigen Unternehmen für die Entwicklung und Produktion, insbesondere von technisch komplexen Textilien, sehr viel (erfahrungsbasiertes) Wissen (Weiß et al. 2017). Dementsprechend gestalten sich die abteilungs- oder unternehmensübergreifende Zusammenarbeit, der Austausch von Informationen und damit der digitale Wandel oftmals schwierig.

Demographischer Wandel & veränderte Anforderungsprofile

Neben den technischen und organisatorischen Hemmnissen gibt es auch strukturelle Hindernisse bei der Umsetzung der Digitalisierung. Die Altersstruktur sowie der Rückgang an qualifizierten Arbeitskräften (Wischmann/Hartmann 2018) als Folge des demographischen Wandels erschweren den Umstieg von den bisherigen Prozessen hin zu einer komplett digital unterstützten Arbeitswelt. Beschäftigte die es Jahrzehnte lang gewohnt waren mit ein und demselben System bzw. mit der gleichen Maschine zu arbeiten, müssen umso intensiver und länger geschult werden. Zudem bringt dies oftmals Einstiegs- und Akzeptanzproblematiken mit sich. Denn auch die Tätigkeiten der Beschäftigte und deren Rollen in der Produktion werden sich wandeln (Lasi et al. 2014). Schulungs- und Bildungsangebote müssen somit um das Thema Digitalisierung erweitert werden, um sie an den Stand der Technik und die Bedürfnisse der Unternehmen anzupassen.

3. Kollektionsentwicklungsprozess in der Bekleidungsindustrie

Aktuelle Kollektionsentwicklungsprozesse sind bislang dominiert durch klassische Wertschöpfungsstrukturen mit einer klaren Trennung von Entwicklung, Produktion und Vertrieb. Eine unmittelbare Einbindung des Einzelhandels in den Prozess ist nicht gegeben. Zudem sind einzelne Prozessstufen sehr papierlastig und sehr stark von vielen Musterungsphasen geprägt, sodass den Herstellern und Händlern ein enormer Zeit- und Kostenaufwand während der Kollektionsentwicklung entsteht. Ein typisches KMU der Bekleidungsindustrie im mittleren Preissegment bspw. stellt 2-3 Kollektionen pro Marke je Saison her, für die das Unternehmen jeweils ca. 9 Monate benötigt. Dafür werden im gesamten Entwicklungsprozess über 7000 Muster gefertigt. Die Produktion eines physischen Musters benötigt durchschnittlich 1 Monat pro Musterungsphase[1]. Die genannten Herausforderungen führen im gesamten Verlauf des Kollektionsentwicklungsprozesses zu Informationsbrüchen und -lücken. So wird die zielgerichtete, aufeinander abgestimmte Entwicklung der Kollektionsthemen, der Dessinierung, des Schnittes, der Passform und der verwendeten Materialien eines Bekleidungsstückes unter anderem dadurch behindert, dass keine digitale Abstimmung mit den nachgelagerten Prozessstufen des Handels oder zu Konsument*innen verfügbar ist.

Auch die Kund*innen sind entkoppelt vom Design- und Entwicklungsprozess. Das Feedback für den Hersteller reduziert sich auf Verkaufszahlen. Eine gezielte Entwicklung und eine verlässliche Abschätzung der Nachfrage auf Basis dieser Erhebungen ist daher sehr schwierig – Fehlmengen oder Überproduktion und dementsprechend zu viel Müll sind die Folge. Im digitalen Zeitalter nimmt der Anteil an Herstellern und Händlern in der Bekleidungsindustrie deutlich zu, die ihr Sortiment nicht nur stationär, sondern auch online anbieten. Oftmals verfügt der Handel jedoch nicht über mehr Kundschaft-bezogene Informationen als die Größe, die für die Kund*innen im Shop auswählbar ist: Bspw. fehlen Daten zu Körpermaßen und -Form, so dass keine Aussagen zur Passform getätigt werden können. Dies führt insbesondere im stationären Handel zu frustrierenden und häufigen Anproben. Im Online-Handel bestellen die Kund*innen oft ein Produkt in mehreren Größen, in der Hoffnung, dass wenigstens eine passende Größe dabei ist. Da viele der Größen standardisiert sind und nicht den individuellen Körpermaßen entsprechen führt auch dies zu einer großen Unzufriedenheit bei den Kund*innen und im Umkehrschluss zu passformbedingten Retouren, die beim Onlinehändler hohe Kosten verursachen und dadurch seine Rendite schmälern. Zwar wurden in der Vergangenheit deshalb verschiedene Tools zur Berechnung

[1] Dieses Beispiel wurde im Rahmen des AiF-Projektes "Digitale Kollektionsentwicklung - Selektive Digitalisierung von Kollektionsentwicklungsprozessen in der Bekleidungsindustrie auf Basis von unternehmensindividuellen Potenzialanalysen mittels parametrisierbarer MFCA-Modelle" erstellt.

der passenden Größe durch die Eingabe einfacher Körperparameter (wie z.B. Größe, Gewicht und Alter) oder mit Hilfe eines Maßbandes entwickelt, jedoch haben alle diese Ansätze Schwachstellen. Diese Tools sollen den Onlinekund*innen helfen, im Internet die passende Bekleidungsgröße zu finden, jedoch wird auch hier sowohl die individuelle Körperform als auch das individuelle Trageempfinden nicht mitberücksichtigt. Die Größenempfehlung erfolgt zudem nur auf Basis von Standardgrößen und bezieht das produktspezifische Passformverhalten nicht ein. Die Zukunft der Modebranche ist jedoch digital und integriert. Die Kund*innen möchten ein einzigartiges Shopping-Erlebnis, welches ihnen einen Mehrwert bietet und keinen zusätzlichen Aufwand erzeugt. Um die Bekleidungsindustrie auf die Herausforderungen aus der Sicht der KMU und Kund*innen sowie auf den digitalen Wandel vorzubereiten werden deshalb Lösungen, insbesondere im Umfeld des Einzelhandels, benötigt.

Zunächst wird im Folgenden auf die einzelnen Phasen des Kollektionsentwicklungsprozesses und deren Herausforderungen eingegangen, bevor in Abschnitt 4 des vorliegenden Beitrags neue digitale Lösungen erläutert werden.

Die Kollektions- bzw. Produktentwicklung in der Bekleidungsindustrie besteht üblicherweise aus den fünf Phasen *Planung*, *Konzeption*, *Entwurf*, *Ausarbeitung* und *Einführung* (Scholz/Pastoors 2018):

Planung

Die Basis für jede Kollektion ist eine umfassende Informationssammlung, bei der mit Zahlen von Abverkäufen vergangener Kollektionen sowie durch Markt- und Wettbewerbsanalysen Ideen zur Vorbereitung der Kollektion generiert werden. Zudem werden zukünftige Trends (Modegrad, Komfort, Funktionalitäten etc.) analysiert. Diese Daten werden in der Bekleidungsindustrie bereits heute mit Systemen verwaltet, die mit anderen gekoppelt werden können, wie z.B. das Produktinformationsmanagement (PIM), bei dem Daten zentral und standortunabhängig gepflegt werden. In vielen KMU erfolgen die Auswertungen jedoch noch teilweise auf Papier oder in Tabellen, die weder einheitlich genutzt werden noch kompatibel mit anderen Tools sind. Dies erschwert die abteilungsübergreifende Zusammenarbeit innerhalb der Planungsphase und die darauffolgenden Schritte der Kollektionsentwicklung, so dass hier bereits eine termingerechte Übergabe der Kollektion an den Vertrieb verzögert werden kann. Ein digitales Tool, welches durchgehend im Prozess und bereits zu Beginn in dieser Phase genutzt werden kann, kann diese Probleme erheblich reduzieren.

Konzeption

Basierend auf einer definierten Zielgruppe (Kundensegmentierung) erfolgt nach der Planungsphase die Konzepterstellung, bei der das Kollektionsthema definiert

sowie Farb-, Themen-, Form- und Stoffkonzepte entworfen werden. In der Regel erfolgt das Festhalten der aus der vorherigen Phase gesammelten Ideen und Ergebnisse auf papierbasierten Moodboards (Stimmungscollagen). Damit werden verschiedene Materialien wie physische Farbkarten, Nähproben oder Handskizzen mit Bildern aus Modezeitschriften zusammengestellt sowie kreative Themen mit aktuellen Modetrends vereint. Das Moodboard hilft dem Unternehmen zwar, das Kollektionsthema (inkl. der Farben, Formen und Stoffen) übersichtlich und auf eine kreative Art zusammenzufassen, jedoch entsteht auch hier bereits ein sehr hoher Papier- und Stoffbedarf, der durch digitale Tools vermindert werden kann. In Abschnitt 4 wird auf eine digitale Version des Moodboards eingegangen, welches nicht nur während der Konzeptionsphase, sondern auch für den Handel und damit für alle Akteure im Prozess anwendbar ist.

Entwurf

In der dritten Phase der Kollektionsentwicklung werden Musterskizzen erstellt, aus denen Modellentwürfe und daraufhin erste Prototypen (Erstmuster) gefertigt werden. Des Weiteren wird hier bereits die Musterkollektion zusammengestellt. Zum Einsatz kommen hier 2D-CAD-Systeme zur Schnittkonstruktion. Während dieser Phase finden i.d.R. zunächst mehrere Skizzenmeetings statt, bei der die Skizzen von mehreren Abteilungen (Produktmanagement, Design, Produktentwicklung, Vertrieb, Außendienst) überprüft und ggf. optimiert werden. Oftmals werden die Skizzen für die Mustererstellung ins Ausland zur Weiterverarbeitung verschickt, wie bereits unter dem Punkt "ausgelagerte Produktionsstandorte" dargestellt wurde. Diese müssen dann noch freigegeben werden, entsprechend werden hier ggf. noch Änderungen vorgenommen oder im schlimmsten Fall einzelne Skizzen verworfen, so dass der Prozess wieder von vorne beginnen muss. Folglich erbringen viele KMU der Bekleidungsindustrie einen enormen Zeit- und Kostenaufwand für Muster oder Teile, die später teilweise verworfen werden. So werden wie beschrieben innerhalb eines Kollektionsentwicklungsprozesses eines Bekleidungsunternehmens teilweise über 7000 Muster (je Marke und Saison) erstellt und damit Kosten im sechsstelligen Bereich nur für diese Muster (inkl. Material, Arbeitszeit und Transport) verursacht. Dies lässt sich durch die Digitalisierung und eine frühzeitige Einbindung der Händler in den Musterungsprozess erheblich reduzieren.

Ausarbeitung

Nachdem die Skizzen und Prototypen einer Kollektion erstellt wurden, werden die Teile festgelegt, die in die Kollektion mit aufgenommen werden, die sogenannte Vertretermusterkollektion. Dies erfolgt i.d.R. durch mehrere Meetings, bei denen sich die Zuständigen aus Einkauf, Vertrieb und Handel (ca. 20-30 Personen) in einem physischen Showroom über Farben, Schnitte, Muster etc. zur Kollektion

austauschen und entsprechende Modelle auswählen. Auch hier kommen zwar bereits Systeme wie z.B. PLM (Produktlebenszyklusmanagement) zur nahtlosen Integration von Daten zum Einsatz, die im Verlauf des Lebenszyklus eines Produktes anfallen. Dennoch können nicht alle KMU der Bekleidungsindustrie solche durchgängigen Systeme nutzen[2]. Zudem wird im Rahmen des Entwicklungsprozesses häufig bei Messeauftritten Feedback von Händlern für die Kollektionsentwicklung eingeholt. Dies erfolgt über die etablierten Vertriebskanäle unter Zuhilfenahme physischer Muster und führt damit zu Informationsbrüchen und -asymmetrien im Prozess. Wie im obigen Beispiel bereits dargestellt wurde, finden während der Ausarbeitungsphase sehr viele Meetings mit physischen Mustern zentral an einem Ort (Showroom) statt, an denen viele Personen an dem Prozess beteiligt sind. Eine ungefilterte zeitnahe Weitergabe des Feedbacks an die Entwicklungsabteilungen, eine Abschätzung der Nachfrage auf Basis dieser Erhebungen und eine produktive Arbeitsweise sind daher nur mit Hilfe digitaler Tools möglich.

Einführung

In der letzten Phase des Kollektionsentwicklungsprozesses erfolgt die Vervielfältigung der Kollektion, die den Vertretern zum Verkauf an Kunden (Händler) übergeben wird, z.B. in einem Mustershop oder Showroom (Eberle et al. 2007). Hierbei treffen sich die Zuständigen aus den Bereichen Produktentwicklung, Produktmanagement, Design und Vertrieb in einem letzten großen Meeting. Es werden bspw. noch Modelloptionen besprochen oder die Lieferzeitpunkte der Modelle festgelegt. Circa 70% der Kollektion ist hierbei gesetzt, 30% sind noch änderbar, z.B. durch Ausfiltern von Produkten oder Ausdünnen des Kollektionsrahmenplans. Während der Kollektionsübergabe erfolgt häufig noch eine finale Anprobe einzelner Modelle durch ein menschliches Model. Dabei werden Fotos von dem Bekleidungsstück oder Outfitkombination mit einem Smartphone oder einer Kamera erstellt, die dann irgendwann zu einem späteren Zeitpunkt manuell in einem Datenspeicher hochgeladen und abgelegt werden. D.h. oftmals werden die zu einzelnen Modellen zugehörigen Daten, Bilder oder Materialien nicht automatisiert gespeichert, synchronisiert oder an konkreten Speicherorten wie in einer Cloud abgelegt. Außerdem werden zur Planung der Produktkollektion oder für Merchandising-Zwecke, d.h. für die Vermarktung oder verkaufsfördernde Maßnahmen, zwar von größeren Bekleidungshändlern bereits digitale Tools wie MockShop (zur digitalen Planung von Verkaufsflächen) eingesetzt, diese sind aber über andere Bereiche nicht konsistent anwendbar. Zuletzt erfolgt innerhalb des Kollektionsentwicklungsprozesses die Order, bei der alle Storemanager die Ware

[2] Diese Ergebnisse wurden im Rahmen des BMBF-Projektes "Retail 4.0 - Virtual Retailerfeedback und Augmented Shopping als wissensintensive, digitale Dienstleistung im Entwicklungs- und Verkaufsprozess" erarbeitet.

zeitnah vor der Auslieferung begutachten und dem Einkauf dazu final Feedback geben. Auch dies geschieht wieder anhand von physischen Mustern und häufig noch mit Excel-und Word-Dateien sowie mit Hilfe von Systemen zur Auftragsverwaltung und für das Kunden- und Produktdatenmanagement[3].

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass sich innerhalb der vergangenen 20 Jahre die Prozesse bzw. die einzelnen Phasen der Kollektionsentwicklung nicht wesentlich verändert haben. Sowohl in der Literatur als auch in der Praxis ist die Grundstruktur der oben beschriebenen Phasen gleichgeblieben und die Potenziale der Digitalisierung in jedem der Schritte sind noch nicht umgesetzt. Dagegen hat sich der Fokus der Kollektionsentwicklung geändert. Während früher der Handel mit seinen Produkten die Bedürfnisse der Kundschaft gesteuert haben, sind es heute die Impulse der Kund*innen, die die Produktentwicklung der Herstellunternehmen durch Social Media bspw. als Influencer oder Prosumer beeinflussen. Dementsprechend muss nicht nur die Herstellung der Produkte, sondern auch der gesamte Kollektionsentwicklungsprozess auf die Kund*innen ausgerichtet werden (Henkel 2018; Langbehn 2010). Die Praxis sieht jedoch auch anders aus. Das Feedback der Endkund*innen reduziert sich vorwiegend auf Verkaufszahlen. Zwar werden Meinungsäußerungen zu Produkten eingeholt (z.B. durch Vergabe von Sternen), diese beziehen sich aber selten auf die individuelle Körperform oder produktspezifisches Passformverhalten und sind damit weder repräsentativ noch im Detail hinreichend aussagekräftig als Feedback für die Entwicklung. Auch der Handel wird nicht frühzeitig in Kollektionen miteingebunden. Folglich steigt der Kosten- und Zeitaufwand innerhalb des Entwicklungsprozesses mit einhergehender sinkender Flexibilität, und Fehlmengen oder Überproduktion sind zu beklagen. Dies beeinflusst den unternehmerischen Erfolg und damit auch die Wettbewerbsfähigkeit eines Bekleidungsunternehmens maßgeblich. Um die Kund*innen und den Handel entsprechend in den Prozess zu integrieren werden neue, digitale Lösungen benötigt, die im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben werden.

4. Neue Interaktionssysteme

Durch die zunehmenden Herausforderungen denen sich die Bekleidungsindustrie stellen muss, sind durchgängige und kompatible Feedback- und Abstimmungsprozesse zwischen allen beteiligten Akteuren während der Kollektionsentwicklung unabdingbar. Der vorige Abschnitt hat gezeigt, wie zeit- und kostenaufwändig die klassische Kollektionserstellung in der Bekleidungsindustrie tatsächlich ist. Vom

[3] Diese Ergebnisse wurden im Rahmen der bereits genannten Projekte "Retail 4.0 - Virtual Retailerfeedback und Augmented Shopping" und "Digitale Kollektionsentwicklung" erstellt.

Entwurf bis zum fertigen Produkt vergeht oftmals bis zu einem Jahr. Hier unterstützen digitale Interaktionssysteme und eröffnen neue Möglichkeiten von der integrierten virtuellen Produktentwicklung bis hin zur unmittelbaren Einbindung der Kund*innen und des Einzelhandels.

Zunächst werden für jede der im vorigen Abschnitt genannten fünf Phasen der Kollektionsentwicklung kurz einige digitale Technologien beschrieben, welche die einzelnen Tätigkeiten innerhalb einer Phase unterstützen können, bevor im späteren Verlauf dann spezifisch auf neue Interaktionssysteme aus den Projekten der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung (DITF) näher eingegangen wird:

Für die Planung können, neben etablierten Instrumenten aus der Marktforschung, auch direktes Feedback und kreativer Input der Kund*innen über Social Media genutzt werden, um Trends zu erkennen und entsprechend in der Kollektionsplanung zu berücksichtigen (Mount/Martinez 2014). Da in der schnelllebigen Modewelt die Möglichkeiten einer detaillierten Analyse der Kundendaten mittels einer klassischen Auswertung über bspw. Excel oftmals begrenzt sind, können hierbei Methoden aus den Bereichen Künstliche Intelligenz und Big Data ergänzen. Damit können sehr große Datenmengen aus Bildern, Text und Sprache strukturiert analysiert, gefiltert und sortiert werden (Berg et al. 2017). Bereits in dieser Phase unterstützen neue PLM-Systeme bereichsübergreifend eine nahtlose Übertragung und Integration von Informationen. Wichtig ist hier, dass das PLM-System auch mit anderen Tools gekoppelt werden kann, damit die Schnittstellenfähigkeit zwischen den einzelnen Phasen von der Herstellung über den Handel bis hin zu den Kund*innen gewährleistet werden kann (Assyst 2020; Lectra o.J.).

Für die Konzeptionsphase können Farben über Color Management-Systeme und Muster mittels Design-Tools zur Dessinierung digitalisiert werden. Dadurch kann durchgehend Farbtreue garantiert werden. Die Designs können individuell erstellt werden und sind jederzeit abrufbar. Des Weiteren kann das bereits in Abschnitt 3 beschriebene analoge Moodboard durch ein digitales Fashionboard ersetzt werden, das die Präsentation eines digitalen Zwillings bzw. Bekleidungsstückes einfacher macht. Im Vergleich zum papierbasierten Moodboard ermöglicht es das schnellere Teilen und Festhalten von neuen Ideen, Bildern und Skizzen mit weiteren Personen sowie eine nahtlose Weiterverarbeitung der Daten in weiteren Tools wie bspw. 3D-Simulationsprogrammen, die in der nächsten Phase eine zentrale Rolle spielen (Fröhlich o.J.).

Für die Entwurfsphase sind insbesondere 3D-Simulationsprogramme von Bedeutung, bei denen Bekleidungsstücke mit realen Materialien (Farben /Textur) auf individuellen Avataren (visuelle Modelle) digital abgebildet werden. Durch die wirklichkeitsgetreue Darstellung wird insbesondere das Zusammenwirken von

Material, Schnitt und Körper sichtbar (z.B. virtuelle Passformanalysen) (Lin/Wang 2014), wodurch Prototypen und damit anfallende Entwicklungskosten und -aufwände in erheblichem Maße eingespart werden können (Assyst o.J.). Zudem können sich bspw. Produktentwickler und -manager bereits vor der eigentlichen Prototypen-Erstellung visuell über das Produkt austauschen. Auf dem textilen Markt gibt es mittlerweile einige 3D-Software-Anbieter, bei denen QR-Codes und Printmarker, zur Übersetzung wichtiger Informationen zum Produkt wie Texturen, Schnitt oder Farben, generiert werden können. Außerdem dienen die 3D-Daten als Basis für Virtual und Augmented Reality-Anwendungen.

Für die vierte Phase, die Ausarbeitung der Vertretermusterkollektion, können beispielsweise 3D-Strickmaschinen zur notwendigen Musterproduktion herangezogen werden, um Zeit und Kosten bezüglich Personal, Transport, Material und Umwelt zu reduzieren (Howe 2017). Dabei erfolgt zunächst der Entwurf eines Designs mit Hilfe eines 3D-Programms. Daraufhin erstellt die Schnitttechnik die Daten für jedes einzelne Teil in einem eigenen Programm und stellt diese der Strickmaschine zum Download bereit. So kann die Produktion einer Kollektion an einem Ort stattfinden, und mehrere Konfektionsarbeitsschritte entfallen (Druck & Zuschnitt). In circa 30 Minuten kann ein Pullover mit grobem Strickmuster an einer 3D-Strickmaschine fertig gestellt werden, doppelt so schnell wie bei einer normalen Flachstrickmaschine (ohne Konfektion). Wichtig ist allerdings, die Maschinen an die internen Anforderungen eines Unternehmens anzupassen, denn neue Systemlandschaften erfordern auch eine Anpassung an die Bedürfnisse des Menschen (z.B. durch bedarfsgerechte individualisierbare Schulungseinheiten) im Sinne der Mensch-Maschine-Interaktion (Speicher-Utsch 2017).

Eine digitale Interaktionsmöglichkeit während der letzten Phase, der Einführungsphase, stellt der digitale Showroom dar – ein virtueller Ort an dem unabhängig von Zeit und Raum Kollektionen virtuell betrachtet werden können. Die Ansätze aus dem "Retail 4.0 - Virtual Retailerfeedback und Augmented Shopping"-Projekt der DITF ersetzen die Vertretermusterkollektionen durch AR/VR-Lösungen und machen damit einen Großteil der Musterproduktion überflüssig. Mit der dort angestrebten Lösung kann durch die Vertreter direktes Feedback von Kund*innen bzw. Händlern durch Annotationen im virtuellen Raum erfasst und direkt in den Kollektionsentwicklungsprozess zurückgespielt werden, mit Hilfe einer Plattform, die als Schnittstelle zwischen VR und 3D fungiert und die Anmerkungen der Händler im System bereitstellt. Dies erspart die aufwendige Vorgehensweise der Kollektionsübergabe (über Fotoerstellung, manuellen Upload von Dateien, Einpflegen in unterschiedlichen Tools) wie sie im bisherigen Prozess bislang praktiziert wird.

Dementsprechend ist es notwendig, praxistaugliche Instrumente zur Gestaltung digitaler, interaktiver Dienstleistungen innerhalb des Kollektionsentwicklungsprozesses zu entwickeln. Nur wenn mögliche Hindernisse durch entsprechende Mensch-Maschine-Schnittstellen minimiert werden, kann eine integrative Wertschöpfung mit maximaler Produktivität erreicht werden. 3D-Tools leisten hier wichtige Unterstützung. Auch wenn das visuelle Design in Haptik und Fall des Materials dem eines physischen Bekleidungsstückes (noch) nicht ganz nahe kommt, können 3D-Tools die Bekleidungsunternehmen im Workflowmanagement unterstützen und einen Großteil des Kollektionsentwicklungsprozesses abdecken – von der Konzeption bis hin zur Kollektionsübergabe in der Einführungsphase.

Digital Textile Microfactory

Mit neuen digitalen Interaktionssystemen werden nicht nur interorganisationale Aktivitäten und Aktivitäten innerhalb der einzelnen Unternehmen der Wertschöpfungskette unterstützt. Neue Technologien ermöglichen auch die direkte Interaktion mit den Kund*innen und weiten so die Wertschöpfungskette bis in den Markt aus. Dies wird am Beispiel der Digital Textile Microfactory (DTMF) der Deutschen Institute für Textil- und Faserforschung deutlich. Dieser neue Technologieansatz enthält für die Bekleidungsproduktion einen durchgängig digital vernetzten, integrierten Entwurfs- und Produktionsprozess, von der 3D-Simulation des individuellen Kleidungsstücks über den digitalen Druck und Zuschnitt bis zum fertigen Produkt. Er gilt als Meilenstein für die Bekleidungsindustrie auf dem Weg zu Industrie 4.0 (Tilebein 2019). Der traditionelle Workflow für die Textilproduktion umfasst manuelle, arbeitsintensive Schritte von der Erstellung eines Designs bis zum Nähen des endgültigen Kleidungsstücks, wie oben ausführlich geschildert. Die DTMF reduziert diese langen, komplizierten Produktionsschritte auf ein Minimum (3D-Design, Digitaldruck, Zuschnitt und Konfektion) und einen durchgängig integrierten Arbeitsablauf. Die DITF demonstrieren die Digital Textile Microfactory regelmäßig auf unterschiedlichen Messe-Showcases, und an den DITF steht in einer Forschungsumgebung der komplette Prozess im DTMF-Lab zur Verfügung. In Losgröße 1 können in der Digital Textile Microfactory individuelle Kleidungsstücke entworfen und produziert werden, auch maßgeschneiderte Produkte, wenn zum Beispiel ein Körperscanner am Beginn des Prozesses integriert wird. Bei der Individualisierung nehmen die jeweiligen Kund*innen als Prosumer eine zentrale Rolle im Produktionsprozess ein, in dem sie ihr eigenes Produkt mit designen. Damit verlagert sich der Designprozess bis ans Ende der Wertschöpfungskette und der gesamte Kollektionsentwicklungsprozess wird auf die individuellen Kund*innen ausgerichtet (Langbehn 2010).

Die Digital Textile Microfactory bringt mit ihren zahlreichen Chancen jedoch auch große Herausforderungen mit sich. Hohe Erstinvestitionen durch kostenintensive Maschinen sind für kleine Designunternehmen schwer zu stemmen. Der Schulungs- und Qualifizierungsaufwand für die Beschäftigten ist eventuell immens und das Schnittstellenmanagement ist nicht ohne weiteres zu handhaben. Die Forschungsumgebung der DTMF an den DITF kann jedoch auch als Produktionslabor genutzt werden und ermöglicht damit auch kleineren Textilunternehmen diese erste Hürden zu minimieren. Zudem existiert an den DITF ein breites Unterstützungsangebot im Rahmen des Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrums *Textil vernetzt*, um den KMU der Bekleidungsindustrie den Weg in die voll vernetzten digitalisierten Prozesse der DTMF zu ebnen.

Eine zentrale Kundenausrichtung erfordert nicht nur in der DTMF, sondern auch in den etablierten Wertschöpfungsketten der Bekleidungsindustrie neuartige, digitale Lösungen. Dazu braucht es Instrumente damit sowohl die Integration der Kund*innen und Händler in den Kollektionsentwicklungsprozess als auch die Qualifikation der Beschäftigten in der digitalen Arbeitswelt unterstützt werden können. Die DITF entwickelten neue Lösungen für Virtual und Augmented Reality in der Retail-Industrie, bei denen Feedbackprozesse von Konsument*innen über den Einzelhandel bis zum Hersteller digital und virtuell gestützt ablaufen. Verschiedene innovative digitale Tools entlang des Kollektionsentwicklungsprozesses in der Bekleidungsindustrie demonstrieren dabei, wie mit den Herausforderungen der digitalen Arbeitswelt im Sinne der Mensch-Maschine-Interaktion umgegangen werden kann. Daraus entstanden zwei unterschiedliche B2C- und B2B-Use-Cases aus dem BMBF-Projekt "Retail 4.0 - Virtual Retailerfeedback und Augmented Shopping als wissensintensive, digitale Dienstleistung im Entwicklungs- und Verkaufsprozess", die die bestehenden und heute bereits im Kollektionsentwicklungs- und Herstellungsprozess eingesetzten Technologien erweitern. Im Folgenden werden diese Use-Cases für die letzte Phase des Kollektionsentwicklungsprozesses, die oben bereits kurz skizziert wurden, näher erläutert:

B2C – Augmentend Shopping und "Bring your own device"

Beim Augmented Shopping wird die reale Shopping-Umgebung am Point-of-Sale (POS) zusätzlich um eine virtuelle Lösung erweitert (Augmented Reality). Dabei tragen die Kund*innen eine Augmented Reality-Brille, mit der sie virtuell Outfits mittels Gestensteuerung (Kopf- und Handbewegung) zusammenstellen oder auch deren Farbauswahl verändern können (siehe Abbildung 1), trotzdem aber noch die reale Umgebung wahrnehmen. So werden bspw. nicht verfügbare Artikel am POS bzw. Alternativprodukte auf einem Avatar in einer AR-Brille visualisiert. Mit Hilfe ihres visuellen Feedbacks agieren die Kund*innen als Bindeglied zwischen Hersteller und Händler innerhalb des Verkaufsprozesses und verhelfen Händlern damit

zu einer bedürfnisgerechten Sortimentserstellung. Dadurch kann sich wiederum die Produktion besser an den Bedarfen orientieren und es müssen weniger Überbestände entsorgt werden. Dieser Prozess führt so zu einer neuen Form der Nachvollziehbarkeit von Kundenwünschen.

Abbildung 1: Farbauswahl mit einer Augmented Reality-Brille (Computer Graphics Group der TH Köln o.J.)

In einer weiteren Ausbaustufe werden die Bekleidungsstücke in Apps auf mobilen Endgeräten integriert ("Bring your own device") und auf dem eigenen Morphotypen visualisiert. D.h. man kann die Passform eines Bekleidungsstückes auf seinem "digitalen Körper“ in der App betrachten ohne wie bisher in die Umkleide zur Anprobe gehen zu müssen. Da die Passform einen der wichtigsten Faktoren im Einkaufsprozess darstellt, werden an den DITF auch hierfür Lösungen erforscht, die es Einzelhändlern ermöglichen eine passformoptimierte Produktempfehlung zur Verfügung zu stellen. Hierbei dienen sowohl die morphologischen Eigenschaften der Kund*innen als auch aus der Historie passende Produkte als spezifische Kenngrößen. Im "Bring your own device"-Szenario beteiligen sich die Kund*innen damit aktiv mit ihren eigenen Endgeräten am Geschehen und werden durch die neue digital gestützte Interaktionsmöglichkeit zu einem Teil des betrachteten Arbeitssystems.

Nicht außer Acht zu lassen sind jedoch auch die Herausforderungen die mit dieser neuen B2C-Lösung einhergehen: Es muss für die Kund*innen ein entsprechender Mehrwert generiert und es müssen Emotionen geweckt werden, z.B. durch individuelle Verkaufssettings (z.B. Golf-Kollektion auf einem virtuellen Golfplatz). Zudem muss das Outfit zu den Proportionen des Avatars bzw. zum individuellen Morphotypen passen.

B2B – Virtual Retailer Feedback

In diesem Use-Case tauschen sich Bekleidungshändler mit Herstellern in einem virtuellen Raum über zukünftige Kollektionen aus, anstelle wie üblich standortgebunden durch eine Abfolge von mehreren Meetings. Dies geschieht mit Hilfe von Virtual Reality-Brillen, mit denen Händler und Hersteller virtuelle Prototypen möglichst realistisch begutachten können (siehe Abbildung 2). Dies führt zu standortunabhängigen Arbeiten, spart lange Anfahrtswege und unterstützt wiederum langwierige Abstimmungs- und Kommunikationsprozesse zwischen Händler und Hersteller. Dabei dienen insbesondere Einkäufer und Designer während der Prototypentwicklung als Bindeglied zwischen Hersteller und Händler. Durch Einsparungen an Prototypen verlagern sich die Tätigkeiten im Design-Bereich und in der Prototypentwicklung weg von der Bearbeitung in 2D hin zur 3D-Simulation. Designer, die bisher haptisch mit physischen Modellen gearbeitet haben, arbeiten nun ausschließlich digital. Zudem entstehen neue Arbeitsfelder im Umfeld der VR- und AR-Entwicklung (Howe 2017), die die Arbeitswelt fundamental verändern. So sind hier zukünftig rollenbasierte Modelle denkbar, z.B. Kollektionspräsentationen oder moderierte Workshops im virtuellen Raum, genauso aber auch visuelle Analysen des Sortiments (z.B. für die Mengen-/Stückzahlabschätzung).

Abbildung 2: Feedback zur Kollektion mit Hilfe der Virtual Reality-Brille (Computer Graphics Group der TH Köln o.J.)

Auch das B2B-Szenario birgt Herausforderungen, denen sich Bekleidungsunternehmen stellen müssen. Jahrzehntelang etablierte Prozesse sind in der Praxis nicht von heute auf morgen änderbar. Dadurch entstehen Einstiegs- und Akzeptanzbarrieren bei den Retailern. Zwar senken digitale Showrooms die Musterkosten erheblich, jedoch kritisieren die Designer auch fehlende Haptik- und Materialparameter.

Betrachtet man beide Use-Cases, müssen beide auch benutzerfreundlich und hygienisch anwendbar sein. Insbesondere muss die Technik mit allen Devices beherrschbar sein und einwandfrei funktionieren. Die technischen Schwierigkeiten betreffen insbesondere die leistungstechnischen Unterschiede bei der Bereitstellung von 3D-Produktdarstellungen (in der entsprechenden Qualität). Auch die nicht abschätzbare Datenmenge birgt ein großes Risiko innerhalb der Feedback- und Abstimmungsprozesse. Diese müssen unter einer skalierbaren Speicherarchitektur funktionieren.

Die genannten Risiken sind jedoch beherrschbar, sofern sich Dienstleister und Unternehmen mit entsprechendem Fachwissen und langjähriger Erfahrung zusammentun. Alle technologischen Komponenten bauen auf bereits vorhandenen Lösungen oder Basistechnologien auf und werden zu einem neuen Gesamtsystem

weiterentwickelt. An den DITF wurde ein "DigitalLab" als VR/AR-Testumgebung für die prototypische Umsetzung der genannten Lösungen aufgebaut und mit den entsprechenden technischen Komponenten ausgestattet. Damit dient es auch zu Demonstrationszwecken für interessierte Unternehmen (insbesondere für KMU der Bekleidungsindustrie) und zeigt neue Formen der Kollaboration und Zusammenarbeit zwischen beteiligten Akteuren durch neue digitale Interaktionssysteme. Zudem demonstriert es die veränderten Aufgabenbereiche, die mit den digitalen Technologien einhergehen, sowie das Zusammenspiel zwischen Mensch und Technik für eine effizientere Produktentwicklung.

Zusammengefasst ergeben sich in den beschriebenen Use-Cases die nachfolgenden Potenziale der neuen digitalen Interaktionssysteme, für die Kollektionsentwicklung und den Handel und deren Zusammenwirken sowie für die Kund*innen:

- Einzigartiges Shopping-Erlebnis durch neue Mechanismen für User-Community-Interaktion
- Bedürfnisgerechte Sortimentserstellung
- Individuelle Größen- und Passformempfehlung
- Optimierter Ressourceneinsatz durch verbesserte Planbarkeit der Kollektion
- Früher Einfluss der Retailer im Entwicklungsprozess
- Einsparung langer Anfahrtswege durch Standortunabhängigkeit
- Erhebliche Kosten- und Zeitreduktion

Die dargestellten B2C- und B2B-Lösungen mit den dazugehörigen Potenzialen sollen die Feedback- und Abstimmungsprozesse zwischen allen beteiligten Akteuren während der Kollektionsentwicklung deutlich verbessern – von der integrierten virtuellen Produktentwicklung bis hin zur unmittelbaren Einbindung der Kund*innen und des Einzelhandels. Die Gesamtlösung ist skalierbar und damit für ein breites Anwendungsfeld anwendbar. Damit können die Potenziale, die sich durch den digitalen Wandel ergeben, besser nutzbar werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag beschreibt die Probleme und Herausforderungen im Zuge der digitalen Transformation, zunächst in der Bekleidungsindustrie und dann in den einzelnen Phasen des Kollektionsentwicklungsprozesses, mit Fokus auf aktuelle System- und Produktlandschaften. Vor diesem Hintergrund wurde der Bedarf

an neuen, digitalen Lösungen und einer teilweise grundlegenden Veränderung von Arbeitsprozessen deutlich.

Hierfür entwickeln die DITF neue Lösungen für Virtual und Augmented Reality für den Einzelhandel und die direkte Interaktion mit den Kund*innen, die sich mit digitalen Abstimmungs-und Feedbackprozessen während der Kollektionsentwicklung auseinandersetzen. Die vorgestellten B2C- und B2B-Use-Cases und das Konzept der Digital Textile Microfactory adressieren diesen Bedarf. Die beschriebenen Beispiele aus den einzelnen Phasen des Kollektionsentwicklungsprozesses zeigen, dass es bei der Digitalisierung der Kollektionsentwicklung nicht nur um die Digitalisierung einzelner Aktivitäten geht, sondern der ganze Prozess wie er bisher besteht auf den Prüfstand gestellt und digital unterstützt wird. Das setzt voraus, dass sich ein Bekleidungsunternehmen auch über den gesamten Prozess und die darin bestehenden Wechselwirkungen im Klaren sein muss. Neue Prozess- und Systemlandschaften müssen sich gleichermaßen an die Bedürfnisse eines Unternehmens anpassen wie auch die beteiligten Akteure offen für neue, digitale Lösungen sein müssen. Zudem muss im Zeitalter von multiplen Shopping-Möglichkeiten der individuelle Mehrwert für die Kund*innen verstärkt im Fokus stehen. Dies sind alles Faktoren, die für einen erfolgreichen digitalen Wandel im Kollektionsentwicklungsprozess in der Bekleidungsindustrie unabdingbar sind.

Die in diesem Beitrag beschriebenen Lösungen zeigen sowohl neue Formen der Kollaboration und interorganisationalen Zusammenarbeit in der Wertschöpfungskette als auch veränderte Aufgabenbereiche, die mit den digitalen Technologien einhergehen, und weisen einen Weg für die digitale Transformation der Bekleidungsindustrie.

Literatur

Artschwager, A., & Tilebein, M. (2017a). Textil digital – die Zukunft der textilen Produktion am Beispiel des Strick-Clusters Baden-Württemberg. *melliand Textilberichte*(4), S. 195-196.

Artschwager, A., & Tilebein, M. (2017b). Die Zukunft der textilen Produktion am Beispiel von Microfactories. *melliand Textilberichte*(3), S. 113.

Assyst. (2020). *Produktivität steigern. Automatisierung und intelligente Tools mit CAD & PLM*. Abgerufen am 26. Mai 2020 von https://community.human-solutions.com/group/front_content.php?idcat=214

Assyst. (o.J.). *3D-Vidya. Die Performance-Revolution in 3D*. Abgerufen am 13. Mai 2020 von https://www.assyst.de/de/produkte/3d-vidya/index.html

Augustin, L. (2015). Innovationen in der Bekleidungsbranche – Eine neuheitsgradbezogene Differenzierung von Prozess und Produktinnovationen. *3*. Dortmund.

Berg, A., Oud, B., & Simon, P. (2017). Mode nach M@ß. (McKinsey&Company, Hrsg.) *Akzente*(3), S. 44-49.

Bitkom. (2016). *Online-Shopping mit dem Smartphone ist im Kommen.* Abgerufen am 13. Mai 2020 von https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Online-Shopping-mit-dem-Smartphone-ist-im-Kommen.html

Computer Graphics Group der TH Köln (o.J.). *Retail 4.0 – AR und VR Lösungen für die Modebranche*. Abgerufen am 16. Juli 2020 von https://cg.web.th-koeln.de/retail-4-0/

Deutsche Bank Research. (2011). *Textil-/Bekleidungsindustrie: Innovationen und Internationalisierung als Erfolgsfaktoren.* Frankfurt am Main.

Eberle, H., Hermeling, H., Hornberger, M., Kilgus, R., Kupke, R., Menzer, D., . . . Ring, W. (2007). *Fachwissen Bekleidung* (9. Ausg.). Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel.

Fröhlich, E. (o.J.). *Digital Fashionboard – your assistant for the entire fashion process*. Abgerufen am 26. Mai 2020 von https://www.assyst.de/en/news-events/press/pm-fashionboard.html

Gesamtverband der deutschen Textil- und Modeindustrie e.V. (2018). *Die deutsche Textil- und Modeindustrie in Zahlen.* Berlin.

Heine, U. (2018). Der textile Mittelstand wird digital. *T EXTILPLUS*(03/04), S. 06-09.

Henkel, R. (2018). *Faster Fashion: Die Digitalisierung wird die Modeindustrie radikal verändern*. Abgerufen am 13. Mai 2020 von https://fashionunited.de/nachrichten/business/faster-fashion-die-digitalisierung-wird-die-fashionindustrie-radikal-veraendern/2018070925905

Heß, W. (2008). *Ein Blick in die Zukunft - acht Megatrends, die Wirtschaft und Gesellschaft verändern.* Allianz Dredner Economic Research.

Howe, U. (2017). Umbruch in der Modebranche. Showtime. *Textil Wirtschaft Digital*(19), S. 60-61.

IDG Business Media. (2017). *Studie Internet of things 2018.* München.

Langbehn, A. (2010). *Praxishandbuch Produktentwicklung: Grundlagen, Instrumente und Beispiele.* Frankfurt/New York: Campus Verlag.

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industrie 4.0. *Wirtschaftsinformatik*(4), S. 261-264.

Lectra. (o.J.). *Lectra Fashion PLM 4.0* . Abgerufen am 26. Mai 2020 von https://www.lectra.com/de/produkte/lectra-fashion-plm-4-0

Lin, Y.-L., & Wang, M.-J. J. (2014). Digital Human Modeling and Clothing Virtual Try-on. *Proceedings of the 2014 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management* , S. 1914–1918.

Mount, M., & Martinez, M. G. (2014). Social Media: A Tool for Open Innovation. *California Management Review, 56*(4), S. 124-143.

Oshri, H. (2019). *Three Reasons Why Fast Fashion Is Becoming A Problem (And What To Do About It).* Abgerufen am 15. Mai 2020 von https://www.forbes.com/sites/theyec/2019/05/13/three-reasons-why-fast-fashion-is-becoming-a-problem-and-what-to-do-about-it/#656ab81e144b

Petro, G. (2012). *The Future Of Fashion Retailing: The Zara Approach (Part 2 of 3)*. Abgerufen am 15. Mai 2020 von https://www.forbes.com/sites/gregpetro/2012/10/25/the-future-of-fashion-retailing-the-zara-approach-part-2-of-3/#3427ead37aa4

Scholz, U., & Pastoors, S. (2018). Modelle der Produktentwicklung. Nicht jede Produktentwicklung ist eine Innovation. In U. Scholz, S. Pastoors, J. H. Becker, D. Hofmann, & R. van Dun, *Praxishandbuch Nachhaltige Produktentwicklung. Ein Leitfaden mit Tipps zur Entwicklung und Vermarktung nachhaltiger Produkte* (S. 51-54). Berlin: Springer-Verlag.

Speicher-Utsch, S. (2017). Umbruch in der Modebranche. Premium auf Knopfdruck. *TextilWirtschaft Digital*(19), S. 16-17.

Tagesspiegel. (2011). *Produktionszyklen. Immer schneller neuer*. Abgerufen am 15. Mai 2020 von https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/produktlebenszyklen-immer-schneller-neuer/4041756.html

textil+mode. (2019). *Daten und Zahlen*. Abgerufen am 13. Mai 2020 von https://textil-mode.de/de/newsroom/daten-und-zahlen/

Tilebein, M. (2019). Small, Smart and Sustainable. *Digital Textile*(2), S. 60-63.

Trend. (2016). *Fair Fashion und Bio-Kleidung: Boom in der Nische*. Abgerufen am 14. Mai 2020 von https://www.trend.at/wirtschaft/fair-fashion-bio-kleidung-boom-nische-6305796

Weiß, M., Fischer, T., & Tilebein, M. (2017). *Wissensorientierte Nutzung von Informationen im Industrial Internet of Things. Fallbasiertes Schließen für die Textilproduktion.* Berlin: GITO-Verlag.

Wischmann, S., & Hartmann, E. A. (2018). *Zukunft der Arbeit – Eine praxisnahe Betrachtung*. Berlin: Springer Vieweg.

Modellieren des Umgangs mit Wissen für Industrie 4.0

Norbert Gronau

Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Prozesse und Systeme, Universität Potsdam

Industrie 4.0, also die Verbindung cyber-physischer Systeme mittels Internet in Produktion und Logistik führt zu erheblichen Veränderungen im sozio-technischen System der Fabrik. Die Auswirkungen reichen von einem erheblichen Weiterbildungsbedarf, der durch den derzeitigen Fachkräftemangel noch verschärft wird, über eine Öffnung der bisher unzugänglichen Grenzen der Fabrik für Zugriffe Dritter, einer zunehmenden Verschmelzung von Büro-IT und Fertigungs-IT bis hin zu einer neuen Auffassung dessen, was Maschinen mit ihren Daten anfangen können. Daraus resultieren neue Anforderungen an die Modellierung, Analyse und Gestaltung von informationsverarbeitenden und die Leistungserstellung abbildenden Geschäftsprozessen.

In der Vergangenheit wurden unter der Bezeichnung „Prozessorientiertes Wissensmanagement" Verfahren entwickelt, mit denen der Austausch und die Nutzung von Wissen in Geschäftsprozessen dargestellt, analysiert und verbessert werden konnte. Diese Ansätze blieben jedoch auf den Bürobereich beschränkt. Eine Methode, die es ermöglicht, die neuen Möglichkeiten der Wissensverarbeitung durch Einsatz von Künstlicher Intelligenz und Maschinellen Lernens in Produktion und Logistik in gleicher Weise und kompatibel zur Vorgehensweise im Büroumfeld zu dokumentieren, analysieren und gemeinsam zu optimieren, existiert bisher nicht. Einen Beitrag zum Schließen dieser Forschungslücke will die Erweiterung der Modellierungssprache KMDL leisten, die in diesem Beitrag beschrieben wird.

Dieser Beitrag beschreibt erste Ansätze für eine Analyse- und Gestaltungsmethode für ein Mensch und Maschine integrierendes Wissensmanagement im Zeitalter von Industrie 4.0.

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_5

1. Neue Anforderungen durch Industrie 4.0

Industrie 4.0 und die Verschmelzung der realen und der virtuellen Welt sind bereits ein Teil unseren Alltags geworden (Dorst 2012, S. 34-37). Die Vernetzung einzelner Gegenstände mit dem Internet, wie beispielsweise Alarmanlagen, Wärmeregulatoren oder Smartphones, ermöglicht es einerseits, mit diesen Gegenständen zu kommunizieren. Andererseits erledigen diese Gegenstände selbstständig verschiedene Aufgaben. Im Unternehmen wurden dazu weitere technische Entwicklungen und eine flächendeckende Vernetzung umgesetzt, die eine Integration von eingebetteten Systemen mit webbasierten Diensten in die Produktionsprozesse erlauben (Geisberger/Broy 2012, S. 7; Gronau 2014). Auf diese Weise können sich die technischen Entitäten in den Fabriken (gegenseitig) selbstständig regeln und steuern, Entscheidungen treffen, Informationen weiterschicken und aktuelle Umgebungsveränderungen einbeziehen.

Digitalisierte Arbeitsprozesse erfordern von den Mitarbeitenden in einer Industrie 4.0-Umgebung die Handlungskompetenz, fluiden Situationen auf Basis eigenen Wissens und der Fähigkeit, dieses in situationsspezifische Kontexte setzen zu können, adäquat begegnen zu können (Teichmann u.a. 2018). Dafür ist zuerst die Herausbildung eines umfassenden Prozessverständnisses (Spötl u.a. 2016) gegenüber digitalisierten Arbeitsumgebungen elementar. Erwachsene Lerner profitieren zudem vom Aufbau auf vorhandene Kenntnisse (Arnold 2010) und von nah am realen Arbeitsprozess angesiedelten Lerneinheiten (Dehnbostel 2010).

Eine weitere Wirkung der Digitalisierung in der Industrie ist die Despezialisierung (Gronau 2018). Durch die Verfügbarmachung von elektronischen Aufgabenhelfern und Assistenzsystemen werden Aufgaben, für die früher hervorragend ausgebildete Spezialisten benötigt wurden, durch weitgehende Laien zu erledigen sein. Beispielsweise sind Maschinen, die über Selbstregelungsfähigkeiten wie SPC (Statistische Prozesskontrolle) verfügen, auch von angelernten Mitarbeitern bedienbar. Diese Despezialisierung führt zu einem Verlust von Arbeitsplätzen für genau die Aufgaben, die vorher von Menschen wahrgenommen wurden und nun von Maschinen wahrgenommen werden können. Gleichzeitig entsteht aber eine erhebliche zusätzliche Nachfrage nach neuen Spezialisten für Aufgaben, die nicht durch automatisierte oder computerisierte Systeme abgebildet werden können.

Diese Despezialisierung bestehender Aufgaben führt daher zu einer gesteigerten Nachfrage nach neuen Spezialisten, wie in manchen Ballungsräumen zu sehen ist, in denen für IT-Spezialisten teilweise höhere Jahresgehälter gezahlt werden als für gestandene Universitätsprofessoren.

Geschäftsprozesse müssen vor diesem Hintergrund so gestaltet werden, dass sie sowohl die Kommunikationsaspekte, wie Machine-to-Machine-Communication (Baum et al. 2013, S. 10-13) und Human-Machine Interaction (Gronau, 2014), als auch die individuellen Kunden- und Lieferantenwünsche berücksichtigen. Neben der Entwicklung von Technologien und der Umstellung der Produktion müssen im organisatorischen Bereich die bestehenden Hemmnisse der Veränderungsfähigkeit erkannt und Wege gesucht werden, diese zu überwinden (Wiendahl et al. 2014, S. 163). Die Qualifikation der Führungs- und Arbeitskräfte spielt in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle, da der Automatisierungsgrad in den Produktionsprozessen zunimmt (Bettenhausen 2014). Notwendige schnelle und qualifizierte Entscheidungen in Störfällen bei Werkzeugen oder Prozessen können nur gut ausgebildete Spezialisten treffen (Hergesell 2014, S. 12-17).

1.1. Stärkerer Bedarf an Qualifizierung

Die Gestaltung komplexer Wertschöpfungsketten mit raschen Technologiewechseln, sich verkürzenden Produktionszyklen und einer Vielzahl von Schnittstellen zwischen den beteiligten Unternehmen und Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern (im Folgenden wird meist die männliche Form verwendet) erfordert kompetente Fachkräfte, die sich strukturiert und kreativ einbringen. Nur diese können aufgrund ihres umfangreichen Prozess- und Fachwissens gezielt und lösungsorientiert zur Optimierung von innerbetrieblichen und unternehmensübergreifenden Strukturen beitragen. Dies erfordert die partizipative Mitgestaltung von Arbeitsbedingungen und -prozessen entlang der gesamten Wertschöpfungskette unter Berücksichtigung der Perspektiven von Geschäftsführung und Führungskräften auf der einen Seite und Mitarbeitern sowie Betriebsrat auf der anderen Seite (Gronau u.a. 2015, S. 125).

Das erlernte Prozessverständnis ermöglicht es den Beschäftigten zudem, ihre jeweils individuellen Erfahrungen in unterschiedliche Arbeitsprozesse einzubringen und damit sozialverträgliche Innovationen am Arbeitsplatz zu generieren. Gleichzeitig sollten sie die Möglichkeit erhalten, zu lernen, ihr persönliches Kompetenzprofil berufsbegleitend weiterzuentwickeln, sich Qualifikationen angrenzender Berufsfelder anzueignen oder soziale sowie methodische Kompetenzen zu erwerben. Nur so kann den Industrie 4.0-induzierten Veränderungen durch neue Qualifikationen bei den Mitarbeitern erfolgreich begegnet werden.

Das Verständnis eines umfassenden Kompetenzmanagements orientiert sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette, mit Fokus auf Aktivierung und Integration aller intra- und interindividuellen sowie unternehmensspezifischen Kompetenzen. Dazu wird ein geeigneter Erfassungs-, Analyse- und Gestaltungsansatz benötigt.

1.2. Wissen von Maschinen berücksichtigen

Bisher wird für die Definition von stillschweigendem Wissen das von Davenport vorgeschlagene Set an Kriterien angewendet, das aus Informationen fachlicher Einsicht, Wertvorstellungen, Erfahrungen und Kontext besteht (Davenport und Prusak, 1998; Gronau, 2009). Herkömmliche Konzepte zur Unterscheidung von stillschweigendem und expliziten Wissen (Polanyi, 1966) oder des Umgangs mit Wissen, wie das SECI-Model (Nonaka und Takeuchi, 1995), verorten stillschweigendes Wissen ausschließlich bei menschlichen Wissensträgern. Dies ist aufgrund der Durchdringung von Organisationen und deren Leistungserstellungsprozessen mit cyber-physischen Systemen (Lee et al., 2014; Gronau 2015b) als selbstorganisierende und entscheidungsfähige technische Entitäten nicht mehr zeitgemäß. Entscheidungskompetenzen liegen nun auch bei technischen Akteuren. Digitalisierung, Virtualisierung und das Internet der Dinge forcieren wesentliche Veränderungen der Rollen der Mitarbeiter sowie der technischen Akteure. Maschinen und Anlagen sowie Produkte nehmen Daten ihrer Umwelt mittels Sensoren auf, verarbeiten diese und greifen mithilfe von Aktoren in ihre Umwelt ein. Daten werden an Informationssysteme - die wiederum empfangen, verarbeiten und versenden - weitergeleitet; analog der Aufnahme, Verarbeitung und Versendung von Informationen beim Menschen. Das „Verarbeiten“ inkludiert dabei sowohl die Verwendung von Informationen entsprechend vordefinierter Regeln und einem vorgegebenen Raum alternativer Lösungspfade und -möglichkeiten (Inferenz) als auch das (kreative) Erschließen von Sachverhalten und Lösungen über vorgegebene Strukturen hinweg mit vorab nicht bestimmten Ergebnis (Intelligenz; vgl. Turing, 1950). Wissen als „zweckorientierte Vernetzung von Informationen“ (Rehhäuser und Krcmar, 1996, S. 5) befähigt Akteure zum Handeln und zur Entscheidungsfindung. Es bereitet diese vor und ist ein wesentlicher Baustein, um Kompetenzen auszubilden. Diese vernetzten Informationen bestehen aus Daten mit entsprechender Semantik sowie Daten in einer vordefinierten Syntax. Mit gegenwärtig vorhandener Technik sind sowohl menschliche als auch technische Akteure in der Lage, Zeichen, Daten, Informationen und auch Wissen zweckorientiert zu verarbeiten.

Als technische Akteure werden dabei alle Einheiten in Produktions- oder Logistikprozessen betrachtet, die als Cyber-physische Systeme aufgefasst werden können, weil sie über große Fähigkeiten zur Verarbeitung von Informationen verfügen und miteinander vernetzt sind.

Dementsprechend liegt es nahe, nunmehr auch technischen Entitäten als potenzielle Wissensträger zu begreifen und behandeln. Im Zeitalter der immer intensiver die Wertschöpfungsprozesse durchziehenden cyber-physischen Systeme können demzufolge einige der in den herkömmlichen Konzepten aufgestellten Kriterien

für das personengebundene Wissen inzwischen auch Maschinen zugeschrieben werden. Dabei handelt es sich um die Aspekte der fachlichen Einsicht in die jeweilige spezielle Domäne und die Erfahrung, die eine Maschine durchaus beispielsweise durch Verfügbarmachung eines Case-Based-Reasoning Werkzeugs aufweisen kann.

1.3. Operationalisieren von Wissen

In den meisten Modellierungsansätzen für wissensintensive Geschäftsprozesse war die Abbildung von Wissen bisher rein qualitativ. So bewertete Sultanow et al. (2012) 13 verschiedene Ansätze zur Modellierung von Geschäftsprozessen, u.a. aus einer wissensorientierten Perspektive. Die meisten untersuchten Ansätze beherrschten lediglich das Mapping von Wissen, etwa durch Aufzeigen von Wissenslandkarten oder Topic Maps. Zwar war häufig eine semantische Aggregation möglich (z.B. Java -> Programmiersprache), aber eine präzisere quantitative Modellierung des Wissens, z.B. für dessen Einbeziehung in Simulationsmodelle, war nicht möglich.

So war in der Knowledge Modeling and Description Language (KMDL) bis Version 2 nur die Angabe eines einzelnen Wissensniveaus als Attribut eines Wissensobjektes möglich. Das wurde als unbefriedigend angesehen, da Wissen häufig konstruktivistisch erklärt wird und daher auch mit mehreren voneinander unabhängigen Beurteilungsmaßstäben eingeschätzt werden sollte.

2. Modellierung wissensintensiver Prozesse mit KMDL

Eine der Modellierungstechniken, die Wissen von Personen als gesonderte Objekte in Geschäftsprozessen ausdrückte, war die Knowledge Modeling and Description Language (KMDL). Ihre Entwicklung begann vor mehr als 10 Jahren. Mit dem Versionsstand 2.1 liegen sehr umfassende Praxiserfahrungen in unterschiedlichen wissensintensiven Prozessen in Bereichen der Softwareentwicklung, Produktentwicklung, Innovationsmanagement, Qualitätsmanagement und vielen anderen vor.

Die Methode der Knowledge Modeling and Description Language (KMDL) wurde zur Modellierung, Analyse und Bewertung wissensintensiver Geschäftsprozesse bzw. wissensintensiver Anteile von Geschäftsprozessen entwickelt.

Die KMDL ist eine semiformale Modellierungssprache, die auf einer eindeutig festgelegten Symbolmenge sowie einer vorgegebenen Syntax basiert. KMDL in der Version 2 ist z.B. in (Gronau 2014b) ausführlich beschrieben worden. Die KMDL dient der Analyse, Modellierung und Bewertung von wissensbasierten Geschäftsprozessen, indem neben den Ablauf- und Informationsaspekten auch personenge-

bundenes Wissen, Anforderungen an wissensintensive Aufgaben sowie die Umwandlungsmechanismen (genannt Konversionen) zwischen den Wissensarten berücksichtigt werden.

Konversionen stehen im Mittelpunkt des Konzeptes der KMDL. Ausgehend von der Annahme, dass sich das personengebundene Wissen einer direkten Erfassung entzieht, setzt KMDL dort an, wo das personengebundene Wissen seine Form wechselt oder gewonnen wird. KMDL stellt Beschreibungsmechanismen zur Verfügung, um z.B. die Internalisierung von Wissen durch Lesen eines Textes, die interpretierende Extraktion durch fachkundiges Analysieren eines physischen Gegenstandes oder die Externalisierung durch Verfassen eines Textes aus dem Gedächtnis heraus deutlich zu machen. Auch die vielleicht bedeutendste Konversion, die Sozialisierung, beschreibt den direkten Austausch von Wissen zwischen Menschen durch Kommunikation, Beobachtung oder Nachahmung. Erst mit Berücksichtigung dieser Konversionen wird es möglich, auch personengebundenes Wissen in die Gestaltung von Geschäftsprozessen einzubeziehen.

Während bisherige Modellierungsmethoden überwiegend den Daten- und Kontrollfluss in Geschäftsprozessen fokussieren, ermöglicht die KMDLeine Erfassung, Erzeugung und Verteilung von Wissen entlang der Geschäftsprozesse. Dieser Aspekt gestaltet eine erweiterte Analyse der Geschäftsprozesse im Hinblick auf die Verarbeitung von Wissen und bietet damit Ansatzpunkte zur Verbesserung der Wissensarbeit im Unternehmen (Gronau, Fröming 2006).

KMDL wurde entwickelt, weil andere Konzepte zur Modellierung und Analyse von Geschäftsprozessen den Anforderungen eines an Geschäftsprozessen orientierten Wissensmanagements nicht ausreichend gerecht wurden (Sultanow u.a. 2012). Zumeist verfügen sie nicht über die Möglichkeit zur Darstellung von personengebundenem Wissen, zur Darstellung von Anforderungen an die erfolgreiche Umwandlung zwischen unterschiedlichen Wissensarten und zur Verknüpfung von Maschinenwissen mit dem personengebundenen stillschweigenden Wissen.

2.1. Wissen in KMDL 2

Die Betrachtung von stillschweigendem (engl. tacit) und explizitem Wissen in der KMDL zielt auf die Beschreibung der unterschiedlichen Artikulierbarkeit von Wissen (Polanyi 1966).

Stillschweigendes Wissen

Stillschweigendes Wissen ist für den Menschen häufig unbewusst und liegt im Verborgenen (Renzl 2004). Es besteht aus komplexen Elementen wie z. B. Erfahrungen und äußert sich intuitiven Prozessen. Die unbewusste Anwendung stillschwei-

genden Wissens führt dazu, dass dieses nur begrenzt formal artikuliert bzw. transferiert werden kann (Faber 2007). Stillschweigendes Wissen ist damit stark personenabhängig.

Explizites Wissen

Explizites Wissen ist jener Wissensbestandteil, der in einer formalen und systematischen Sprache formuliert sowie leicht übertragen und ausgetauscht werden kann (Rehäuser, Krcmar 1996). Das explizite Wissen ist damit reproduzierbar, da es der organisationalen Wissensbasis zugänglich gemacht werden kann (Hasler Roumois 2010). Es ist personenunabhängig und wird häufig auch als „disembodied knowledge" (Bleckler 1995) beschrieben. Im Verständnis der KMDL wird explizites Wissen mit Information gleichgesetzt (Gronau, Fröming 2006).

2.2. Die Weiterentwicklung zu KMDL 3

Die mit KMDL 2 gemachten Erfahrungen zeigen, dass eine Erweiterung und Anpassung der Modellierung erforderlich ist, um den aktuellen Anforderungen gerecht werden zu können. Tabelle 1 zeigt die Veränderungen von KMDL 2 zu KMDL 3 im Überblick.

Tabelle 1: Veränderungen von KMDL 2 zu KMDL 3

	KMDL 2	KMDL 3
Objekte der Prozessperspektive		
Aufgabe	✓	✓
Operatoren	✓	✓
Prozessschnittstelle	✓	✓
Informationssystem	✓	✓
Rolle	✓	✓
Physisches Objekt	✗	✓
Informationsobjekt	✗	✓
Maschine	✗	✓
Objekte der Wissensperspektive		
Aktivität	✓	✓
Wissensobjekt	✓	✓
Anforderung	✓	✓
Person, Team	✓	✓
Informationsobjekt	✓	✗
Methode, Funktion	✓	✗
Maschinenwissen	✗	✓
Konversionen der Wissensperspektive		
Internalisierung	✓	✓

Externalisierung	✓	✓
Sozialisierung	✓	✓
Kombination	✓	✗
Interpretierende Extraktion	✗	✓
✓ = enthalten ✗ = nicht enthalten		

Um den Lesefluss nicht durch Diskussion der Unterschiede zwischen KMDL 2 und 3 zu stören, wird im folgenden ein Überblick über den Stand von KMDL 3 gegeben. Veränderungen zur Vorversion werden an geeigneten Stellen erläutert.

Im wesentlichen beziehen sich die Veränderungen auf die Verbesserung der Abbildung des Umgangs mit physischen Objekten, die vorher nicht dargestellt werden konnten. Um den Umgang mit personengebundenem Wissen deutlicher als bisher von der maschinellen Aggregation von Informationen abzugrenzen, wurde das Informationsobjekt in die Prozessperspektive verschoben. Damit wurde eine Äquivalenz zu den übrigen Prozessmodellierungsmethoden geschaffen. Als Konsequenz musste die Konversionsart „Kombination“ in der Wissensperspektive entfallen. Um den Gewinn von personengebundenem Wissen aus der Betrachtung physischer Objekte darstellen zu können, wurde die Konversionsart "interpretierende Extraktion“ neu eingeführt.

Eingebettetes Wissen

In KMDL 3.0 kommt eingebettetes Wissen hinzu. Eingebettetes Wissen oder Embodied Knowledge ist dasjenige personenbezogene Wissen, welches sich in von Menschen geschaffenen Objekten manifestiert. Die Konversion vom stillschweigenden zum eingebetteten Wissen wird als Engineering bezeichnet.

Unter Embodied Knowledge werden diejenigen physischen Objekten innewohnenden Attribute verstanden, die durch fachkundige Betrachtung dem Objekt wieder entnommen werden und in stillschweigendes Wissen umgewandelt werden können. Diese Konversion wird als interpretierende Extraktion bezeichnet.

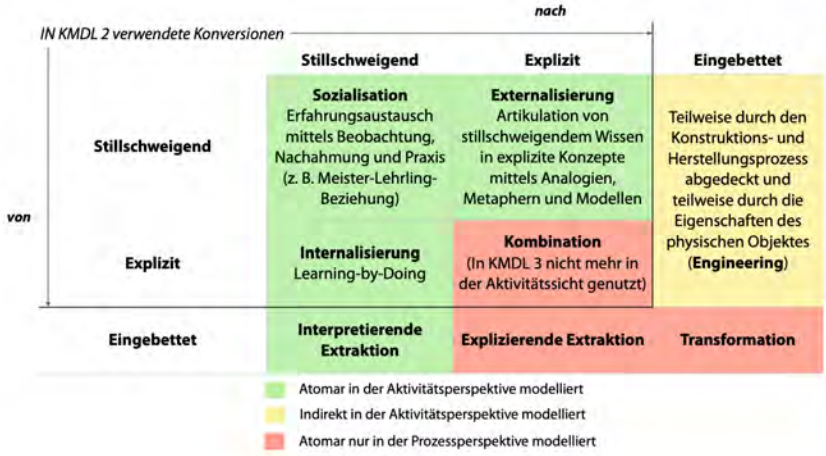


Abbildung 1: Unterschiedliche Arten der Wissensumwandlung

Physische Objekte sollten bei der Modellierung wissensintensiver Aktivitäten berücksichtigt, wenn sie Embodied Knowledge enthalten oder in ihnen Embodied Knowledge erzeugt wird. Beurteilungsmaßstab ist der Zweck der Modellierung. Abb. 1 zeigt einen Überblick über die in KMDL 3.0 erweiterten Konversionsarten.

In der KMDL werden prinzipiell zwei Perspektiven eingenommen, die Prozessperspektive und die Wissensperspektive. Während die Prozessperspektive den Geschäftsprozessablauf sowie Konzepte zur Abbildung organisationaler Beziehungen betrachtet, stehen in der Wissensperspektive Konzepte zur Erfassung des Umgangs mit personengebundenem Wissen im Fokus. Neben dem unterschiedlichen Blickwinkel wird zwischen diesen beiden Perspektiven auch die Abstraktionsebene variiert. Die Prozessperspektive betrachtet wissensintensive Geschäftsprozesse auf einer aggregierteren Ebene als die Wissensperspektive, die die zur Aufgabenerfüllung notwendigen Wissensflüsse und -umwandlungen detailliert abbildet und so einer Untersuchung zugänglich macht.

Die beiden Perspektiven beinhalten mehrere Sichten, mit Hilfe derer einzelne Aspekte durch Ausblendung einzelner Modellierungsobjekte genauer betrachtet werden können (Abb. 2).

Abbildung 2: Perspektiven in KMDL und Sichten innerhalb der jeweiligen Perspektive

Die Prozesssicht selbst beschreibt den Ablauf eines Geschäftsprozesses. Die Leistungserstellungssicht beschreibt den Ablauf der Erstellung von physischen Produkten innerhalb der betrachteten Organisation. Die rollenbezogene Organisationssicht beschreibt den hierarchischen Aufbau der Organisation, also die Über- und Unterordnung sowie funktionale Gliederung der Organisationseinheiten. Die Wissensperspektive beinhaltet ebenfalls eine Organisationssicht, jetzt jedoch auf Ebene der Personen, denn diese sind Träger des personengebundenen Wissens, nicht die Rollen. Die Zuordnung zum Prozess wird durch die Aktivitätssicht geleistet, die als wissensintensiv erkannte Aufgaben weiter detailliert. Eine Kommunikationssicht geht auf die besondere Rolle der Sozialisierung als wesentliches Mittel des Wissensaustauschs zwischen Personen ein. Gerade diese Konversion wird bei der klassischen Geschäftsprozessmodellierung unberücksichtigt gelassen. Dies ist einer der Gründe, warum sich klassische Geschäftsprozessmodellierung nicht für die Analyse und Gestaltung von Wissensmanagement in der Organisation eignet.

2.3. Die Prozessperspektive von KMDL

Die KMDL-Prozessperspektive besteht aus allen erforderlichen Notationselementen, um die Vorgänge eines leistungserstellenden Prozesses modellieren zu können (Abb. 3).

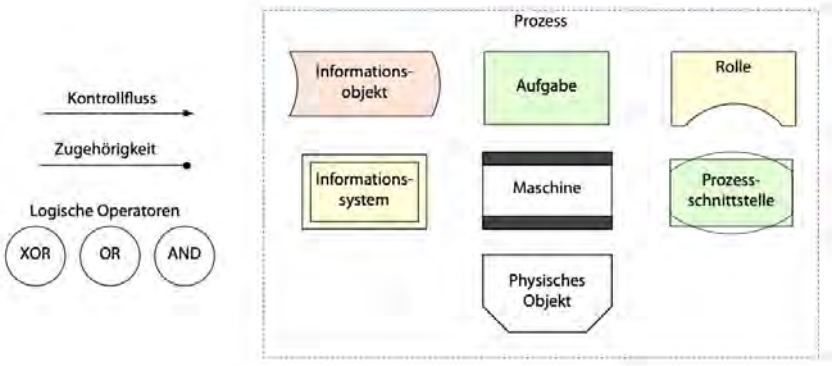


Abbildung 3: Symbole für die Prozessperspektive (Gronau 2020, S. 18)

Ein **Prozess** dient als Container bzw. Rahmen für eine endliche Anzahl von Objekten der KMDL-Prozesssicht. Zur Beschriftung eines Prozesses werden Substantive verwendet, beispielsweise Softwareentwicklung oder Projektfinanzierung.

Eine **Aufgabe** steht für eine Menge von Aktivitäten, die auf der Prozessebene nicht weiter betrachtet werden. Aufgaben können sich im Prozess wiederholen und dienen der Strukturierung von Prozessen. Eine Aufgabe repräsentiert einen geschlossenen Sachverhalt im Prozess. Um die Wissensperspektive zu erschließen, werden wissensintensive Aufgaben im Prozess identifiziert und dann durch Aktivitäten detaillierter modelliert werden. Zur Beschriftung von Aufgaben gilt die Vorgabe Objekt-Verb. Das Verb steht dabei immer im Präsens, beispielsweise Software testen oder Rohstoffe beschaffen.

Jeder Aufgabe auf Prozessebene wird mindestens eine **Rolle** zugeordnet, die für die Bearbeitung der Aufgabe zuständig ist. Die Belegung einer Rolle mit einer oder mehreren Personen erfolgt in der Wissensperspektive. Rollen werden personenneutral bezeichnet. Es werden keine Namen benannt, sondern nur die Rollen der Personen beschrieben, in der diese an der Aufgabe im Prozess beteiligt sind. Es können auch Gruppen von Personen mit der Abteilung als Rolle dargestellt werden, beispielsweise Entwickler oder Produktion

Ein **Informationssystem** repräsentiert Informations- bzw. Kommunikationstechnologie, die im Prozess eingesetzt wird. Informationssysteme können durch Algorithmen wie Sortieren, Kombinieren oder die Berechnung von mathematischen Funktionen Informationsobjekte erzeugen bzw. bearbeiten.

Prozessschnittstellen dienen dem Zusammenfügen einzelner Prozesse zu Prozessketten. Prozessschnittstellen bieten darüber hinaus die Möglichkeit einer prozessübergreifenden Auswertung und Verbesserung der modellierten Wissenskonversionen.

Verknüpfungsoperatoren dienen der Abbildung folgender möglicher Sachverhalte von Aufgaben:

- Entscheidung: Exklusives Oder (XOR), wenn nur eine der angegebenen Optionen möglich sein soll,
- Option: Logisches Oder (OR), wenn mehrere Optionen möglich sind,
- Verknüpfung: Logisches Und (AND), wenn Aufgaben parallel ausgeführt werden sollen

Der **Kontrollfluss** verbindet Aufgaben miteinander bzw. mit Verknüpfungsoperatoren und gibt die Reihenfolge an, in der die Aufgaben ausgeführt werden.

Informationen werden als **Informationsobjekt** modelliert. Informationen können dabei sowohl als Text, Zeichnung oder Diagramm auf Papier als auch in elektronischer Form, in Dokumenten, Audiodateien, Bitmaps oder Videoformaten existieren. Informationen bestehen unabhängig von Personen und können explizierbares Wissen von Personen enthalten. Als Beispiele für Informationsobjekte können eine Rezeptur oder eine SOP (Standard Operating Procedure) genannt werden.

Physische Objekte werden modelliert, wenn sie für den Zweck der Modellierung erforderlich sind. Sie können eingebettetes Wissen enthalten. Nicht nur für die Prozessperspektive ist es wichtig, diese Objekte zu modellieren. So kann z.B. in der Wissenssicht der Wissensgewinn aufgezeigt werden, wenn eine Expertin ein physisches Objekt untersucht. Dabei wird angenommen, dass physische Objekte Wissen enthalten, das durch geeignete Untersuchungsmethoden gewonnen werden kann. Ebenso kann aufgezeigt werden, welches Wissen notwendig ist, um ein physisches Objekt zu erstellen bzw. zu produzieren.
Im Zeitalter cyber-physischer Produktionssysteme können auch Maschinen als Informationsträger dienen. Es hat sich aufgrund der Datenverarbeitungsfunktion der

Maschinen als sinnvoll herausgestellt, diese mit einem gesonderten Symbol zu modellieren, da sie anders als Informationssysteme auch eine physische Repräsentation aufweisen.

2.4. Die Wissensperspektive von KMDL

Die KMDL-Wissensperspektive stellt verschiedene Notationselemente zur Verfügung, um den Umgang mit Wissen innerhalb einer Aufgabe modellieren zu können. Die Objekte der Wissensperspektive sind in Abb. 4 dargestellt.

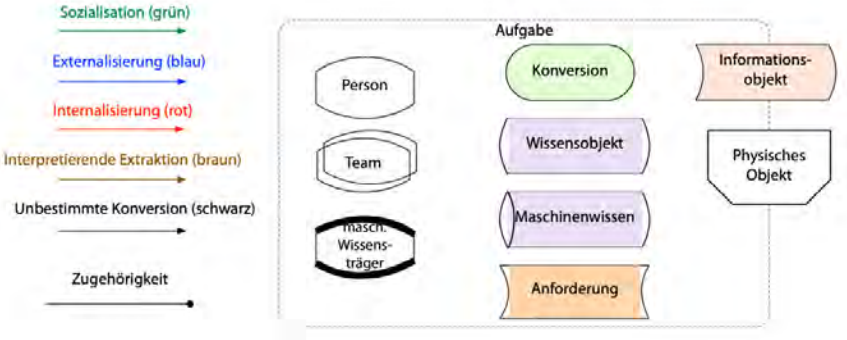


Abbildung 4: Objekte der Wissensperspektive von KMDL

Die **Aufgabe** gibt den Bezug zwischen den Wissenskonversionen in der Wissensperspektive und der Prozessperspektive an. Eine Aufgabe in der Aktivitätssicht ist eine Referenz auf eine Aufgabe aus der Prozesssicht. Die Bezeichnungen der Aufgabe werden aus dem Prozessmodell übernommen.

Wissensobjekte sind Artefakte, die das Wissen einer Person oder eines Teams repräsentieren. Das Wissensobjekt umfasst die Abbildung der Kompetenzen, Erfahrungen, Fähigkeiten und Einstellungen der Person bzw. des Teams. Wissensobjekte können Input- oder Outputobjekte von Konversionen sein. Ist ein Wissensobjekt Inputobjekt einer Konversion, so trägt dessen Inhalt zur Konversion bei, ist es Outputobjekt der Konversion, so ist es ein Resultat der Konversion. Wissensobjekte werden an eine Person oder ein Team modelliert. Jedes so modellierte Wissensobjekt deutet an, dass diese Person dieses Wissen besitzt.

Das Objekt Maschinenwissen wurde neu in KMDL 3 eingefügt, um die stark gewachsenen Möglichkeiten technischer Entitäten, Daten auszuwerten und Zusammenhänge zu erkennen und dadurch z.B. Erfahrungen zu erlangen, ebenfalls in KMDL ausdrücken zu können. Wenn heute die Generierung, Verarbeitung und Nutzung von Wissen, z.B. im Produktionsbereich, untersucht wird, so muss

gleichberechtigt neben das Wissen der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter das Vermögen der Maschinen und anderer technischer Entitäten treten, Wissen zu erwerben und abzugeben. Wenn z.B. technische Entitäten über die Fähigkeit des Machine Learning (Windt u.a. 2011, Freitag u.a. 2015) verfügen, dann soll das genauso darstellbar und analysierter sein wie das Wissen einer Person. Deshalb wurde in KMDL 3 Wert darauf gelegt, das Wissen von Maschinen in gleicher Weise operationalisierter und bewertbar zu machen wie das Wissen von Menschen.

Konversionen beschreiben die Erzeugung, Anwendung und Verteilung von Wissen und die Erzeugung, Verteilung und Bewahrung von Informationen. Sie besitzen Input- und Outputobjekte, welche durch Informations- bzw. Wissensobjekte dargestellt sind. Die Konversionsart und der Konversionstyp sind durch die Input- und Outputobjekte einer Konversion eindeutig bestimmt. Die Kanten einer Konversion zwischen den Input- und Outputobjekten werden mit einem Konversionsnamen belegt oder sind unbestimmt. Die Frequenz einer Konversion kann als Attribut angegeben werden. Konversionen werden stets über Wissens- und Informationsobjekte als Eingangs- bzw. Ausgangsobjekte miteinander verbunden. Eine direkte Verknüpfung zweier Konversionen ist sachlogisch falsch, da die Bedeutung der Konversion als Deskriptor der Wissensumwandlung verloren geht.

Aktivitäten beschreiben wissensintensive Aufgaben. Aus der Aufgabe "Rezeptur erstellen" können z.B. folgende Aktivitäten abgeleitet werden, in denen personenbezogenen oder Maschinenwissen zur Erledigung der Aufgabe genutzt wird: Rohstoffe bestellen, Rohstoffe prüfen, Testprodukt erstellen.

Die auf Wissen bezogenen **Anforderungen**, die an eine Konversion gestellt werden, um diese erfolgreich durchführen zu können, werden durch das Objekt „Anforderung“erfasst. Anforderungen können durch das Wissen von Personen oder Teams abgedeckt werden. Eine Anforderung kann differenziert werden werden in fachliche, methodische, soziale und handlungsorientierte Aspekte.

Das Objekt **Person** repräsentiert eine real existierende Person oder im Falle eines Sollmodells eine ideale Person in einer Organisation, die Aufgaben in einem Geschäftsprozess durchführt und dabei eine oder mehrere Rollen einnimmt. Personen sind Wissensträger. Personen werden als Wissensträger mit der Kante "Zugehörigkeit" an das Wissensobjekt modelliert.

Ein **Team** repräsentiert eine Gruppe von Personen, die zusammen an einer wissensintensiven Aufgabe arbeiten. Teams sind ebenfalls Wissensträger. Das an ein Team modellierte Wissen (in Form von Wissensobjekten) repräsentiert das kollektive Wissen des Teams. Das kollektive Wissen eines Teams besteht aus der Gesamtheit des Wissens aller Individuen des Teams und zusätzlich aus dem Wissen,

welches durch die Gruppe existiert, wie beispielsweise Verhaltensregeln oder Ansätze zur Problemlösung. Das Teamelement wird verwendet, wenn die Kriterien gut modelliert werden können und wenn die Gruppendynamik im Team nicht modelliert werden soll. In letzterem Fall müssten die Mitglieder des Teams betrachtet werden. Hat eine Person einen besonderen Einfluss in der Gruppe, wird diese separat modelliert. Die Ausprägungen der Wissensobjekte werden durch die Modellierenden für die gesamte Gruppe bewertet.

Die Konversionstypen beschreiben die Art der Wissensumwandlung

- Sozialisation
- Externalisierung
- Internalisierung
- Interpretierende Extraktion
- Undefiniert

Anders als in KMDL 2 werden Kombinationen nicht mehr als Konversionen der Wissensperspektive angesehen. Die Kombination von Informationen ist ab KMDL 3.0 ein Vorgang, der in der Prozessperspektive dargestellt wird. Dadurch kann in der Wissensperspektive besser erklärt werden, welches Wissen dafür notwendig ist, um erfolgreich aus Eingangsinformationen Ausgangsinformationen zu gewinnen.

3. Nutzung für Industrie 4.0

KMDL in der Version 3 bringt zahlreiche neue Möglichkeiten, um den Anforderungen der 4. industriellen Revolution gerecht zu werden (Gronau 2020):

- Ableitung von Qualifizierungsbedarfen
- Maschinen können Wissen aufweisen
- Operationalisierung von Wissen

Diese neuen Möglichkeiten, die von der Forschungsgruppe Wissen, Lernen, Weiterbildung der Universität Potsdam und des Weizenbaum-Instituts für die vernetzte Gesellschaft in jahrelanger konzeptioneller Arbeit definiert wurden, werden im folgenden kurz dargestellt.

3.1. Ableitung von Qualifizierungsbedarf

Mittels eines KMDL-Modells der Aktivitätssicht kann z.B der individuelle Weiterbildungsbedarf einer Person die eine Rolle ausfüllt, erkannt werden (Abb. 5).

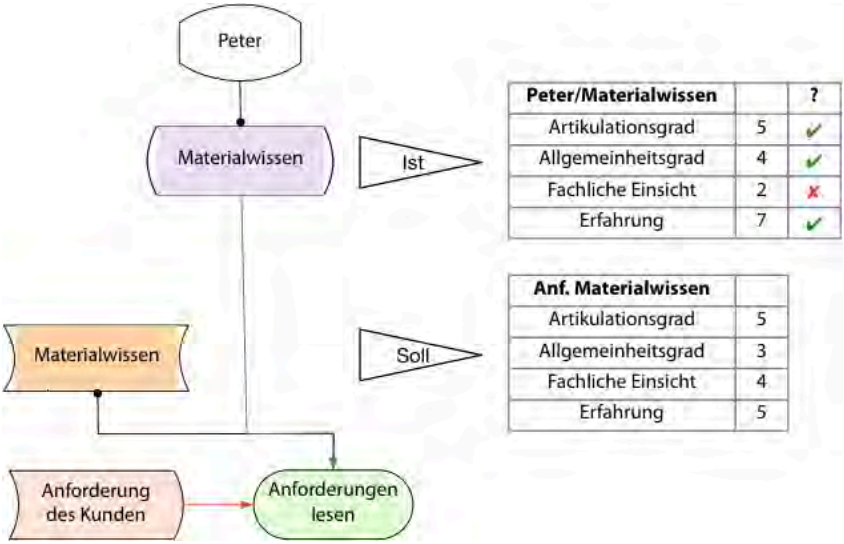


Abbildung 5: Erkennen des individuellen Weiterbildungsbedarfs

Durch die verbesserte Operationalisierung von Wissen kann der Umfang der notwendigen Qualifizierungsmaßnahmen eingeschätzt werden. Damit wird es möglich, die persönlichen Profile der Mitarbeiter mit notwendigen - und dann auch erfolgreich abzuschließenden - Personalentwicklungsmaßnahmen zu verbinden.

Der Ausschnitt in Abb. 5 zeigt, dass zur Interpretation der Anforderung des Kunden (diese liegt als Information vor) Materialwissen erforderlich ist (die orangefarbene Anforderung). Um den Weiterbildungsbedarf nun ermitteln zu können, ist eine Operationalisierung der Wissensobjekte erforderlich, deren Konzept im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

3.2. Operationalisierung von Wissen

Um Wissen operationalisieren zu können, wurden fünf Beurteilungskriterien für Wissen festgelegt (Gronau 2020), der Artikulationsgrad bzw. der Interpretationsgrad, der Allgemeinheitsgrad, der Grad an fachlicher Einsicht und der Grad an Erfahrung der Träger dieses Wissens.

Artikulation und Interpretation

Bei der Beschreibung der Artikulation wurden mehrere Ansätze aus der Literatur einbezogen. Neuweg (2005) differenziert vier Abstufungen stillschweigend, nicht verbalisierbar, nicht formalisierbar, erfahrungsgebunden. Nonaka (mit von Krogh 2009) spannt dazu lediglich eine Bandbreite auf von stillschweigend zu explizit und umgekehrt. Cowan et al. (2000) unterscheidet nur drei Stufen articulated, unarticulated und inarticulable. Die Stufe „unarticulated" wird darüber hinaus noch differenziert, ob eine Erschließung möglich ist (z.B durch ein Codebuch) oder nicht (wenn z.B. kein Codebuch existiert).

Der Artikulationsgrad ist die in Zahlen ausgedrückte Fähigkeit, Sachverhalte zu einem Wissensobjekt in Worte, Sätze und Aussagen zu fassen. Die Ausdrucksdimension stellt den Artikulationsgrad als Kontinuum dar und liegt zwischen den polaren Ausprägungen stillschweigend (0) und explizit (10).

Der Artikulationsgrad steigt, wenn das eigene mentale Modell zu einem Wissensobjekt der Umwelt und sich selbst gegenüber transparenter wird. Der Artikulationsgrad einer Person unterscheidet sich je nach Wissensobjekt. Es wird davon ausgegangen, dass der Artikulationsgrad durch eine Konversion nicht sinken kann.

Eine Artikulation findet nur statt, wenn das Wissensobjekt eines Wissensträgers als Input in eine Konversion eintritt. Daher muss es ein Äquivalent zum Artikulationsgrad für den Empfang von Wissen zur Internalisierung geben. Dieses Äquivalent ist der Interpretationsgrad. Artikulations- und Interpretationsgrad eines Wissensträgers für ein Wissensobjekt sind voneinander unabhängig - jemand, der gut erklären kann, muss nicht sehr gut in der Aufnahme neuen Wissens sein und umgekehrt.

Der Interpretationsgrad ist als die in Zahlen ausgedrückte Fähigkeit definiert, artikulierte Sachverhalte aufzunehmen, zu erschließen und zu interpretieren, sodass das Wissensobjekt im besten Fall vollständig internalisiert werden kann.

Es besteht die Annahme, dass der Interpretationsgrad ohne weiteres nicht höher sein kann als der Artikulationsgrad. Eine Ausnahme wäre, wenn in Zusammenwirkung mit anderen Merkmalen des Wissensobjektes, z.B. der fachlichen Einsicht eine bessere Interpretation ermöglicht wird.

Allgemeinheitsgrad

Der Allgemeinheitsgrad eines Wissensobjektes ist seine in Zahlen ausgedrückte Spezifität. Diese Formdimension stellt den Allgemeinheitsgrad des Wissens als Kontinuum dar und liegt zwischen den polaren Ausprägungen partikular (0) und generell (10). Ein hoher Allgemeinheitsgrad heißt bessere Übertragbarkeit zu Personen mit anderen Hintergründen. Ein niedriger Allgemeinheitsgrad deutet auf

hoch spezifisches/klebriges Wissen hin, das schwieriger an Personen mit anderen Hintergründen zu übertragen ist. Bei Personen mit gleichem Hintergrund ist die Übertragung effektiver oder einfacher. Eine umfassende Untersuchung der Bedingungen bei der Übertragung von Wissen und des Einflusses der Klebrigkeit ist in Gronau und Grum (2019) zu finden.

Grad der fachlichen Einsicht

Der Grad der fachlichen Einsicht beschreibt die intellektuelle Durchdringung der Materie zu einem Wissensobjekt durch einen Wissensträger. Er liegt zwischen den polaren Ausprägungen unwissend (0) und im Besitz allen zu diesem Wissensobjekt vorhandenen Wissens (10). Der Grad der fachlichen Einsicht steigt, wenn Neues intellektuell wahrgenommen, dessen Relevanz erfasst und es in bestehendes Wissen integriert wird.

Es wird angenommen, dass der Grad der fachlichen Einsicht nicht durch eine Wissenskonversion sinken kann. Wenn jemand sich jedoch lange mit der Materie nicht befasst hat, kann der Grad seiner fachlichen Einsicht sinken. Es wird hier ein S-kurvenförmiger Verlauf unterstellt (logistische Funktion).

Erfahrung

Erfahrung wird definiert als für das Arbeitsumfeld relevantes, subjektives Wissen, das über die Zeit durch einen Wissensträger erworben wurde (Quinones 1995). Erfahrung erwächst aus der praktischen Auseinandersetzung mit einem Gegenstand und liegt zwischen den polaren Ausprägungen unerfahren (0) und höchst erfahren (10). Dabei wird Intensität und Dauer der praktischen Auseinandersetzung bewertet.

Der Grad der Erfahrung nimmt mit Dauer und Intensität der praktischen Auseinandersetzung zu.

Analog zur fachlichen Einsicht wird angenommen, dass der Grad der Erfahrung sinkt, wenn Dauer und Intensität der praktischen Auseinandersetzung zurückgefahren werden.

Für alle Quantifizierungskriterien stehen Tabellen zur Verfügung, die dem Modellierer eine Einschätzung erleichtern (Gronau 2020).

3.3. Personenwissen und Maschinenwissen

Moderne im Fertigungsbereich eingesetzte Maschinen verfügen durchaus über einige Fähigkeiten zur Auswertung der von ihnen erzeugten Daten, die es sinnvoll erscheinen lassen, dies als Wissen zu bezeichnen. Dazu wurde in KMDL 3 ein Objekt eingefügt, das das Wissen einer Maschine mit den gleichen Operationalisierungsmöglichkeiten wie das Wissen eines Menschen ausstattet. So können auch

die Wechselbeziehungen zwischen Maschinenwissen und personengebundenem Wissen analysiert werden und in Konzepte des betrieblichen Wissensmanagements aufgenommen werden.

Im vorigen Abschnitt wurden die Kriterien Artikulations- bzw. Interpreationsgrad, Allgemeinheitsgrad, fachliche Einsicht und Erfahrung differenziert und deren Ausprägungen durch eine zehnstufige Skala operationalisiert. Angesichts der zunehmenden Verbreitung cyber-physischer Systeme mit ihrem großen Datenspeicher und umfassenden analytischen und prognostischen Verarbeitungsfähigkeiten können diese Einstufungsmerkmale auch für das von Maschinen abrufbare Maschinenwissen angewandt werden:

Der Artikulationsgrad beschreibt in diesem Fall, welches Erklärungsvermögen das cyber-physische System aufweist, um seine Entscheidungsvorschläge zu erläutern. Dieses Erklärungsvermögen kann z.B. bei bestimmten KI-Techniken wie Neuronalen Netzen sehr gering ausgeprägt sein, bei anderen (z.B. regelbasierte Systeme) sehr groß.

Ebenso kann der Interpretationsgrad anzeigen, wie umfangreich die in dem maschinellen Wissensträger vorhandenen analytischen und prognostischen Fähigkeiten ausgeprägt sind.

Der Allgemeinheitsgrad ermöglicht auch bei Maschinenwissen eine Einschätzung der Reichweite der dort abgebildeten Wissensdomäne.

Ebenso können zumindest die ersten Stufen der fachlichen Einsicht auch auf Maschinenwissen angewandt werden. Allerdings erscheinen gegenwärtig Einstufungen größer als 6 noch unwahrscheinlich.

Die Erfahrung schließlich lässt sich bei Maschinenwissen zumindest auf der Basis des Zeitraums, für den auswertbare Daten vorliegen, einschätzen. Dadurch wird es möglich, in KMDL personengebundenes und Maschinenwissen innerhalb von Konversionen in gleicher Weise zu betrachten und deren Wirkung quantitativ zu beurteilen.

Für den Fall, dass in der grafischen Modellierung zwischen personengebundenem und Maschinenwissen differenziert werden soll, können Wissensträger und Wissensobjekt mit unterschiedlichen Symbolen (Abb. 6) dargestellt werden.

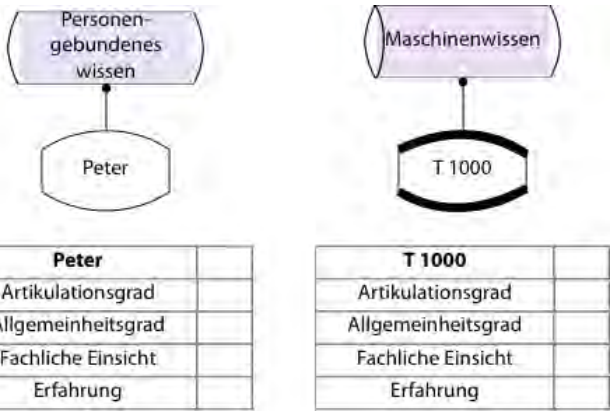


Abbildung 6: Gleichbehandlung von Personen- und Maschinenwissen

4. Zusammenfassung und Ausblick

Industrie 4.0 und die Umbrüche der Digitalen Transformation stellen erhebliche neue Anforderungen an das Wissensmanagement und an die Qualifizierung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Cyber-physischen Produktionssystemen und darüber hinaus.

Mit KMDL 3.0 liegt eine Modellierungssprache vor, mit deren Hilfe die Anforderungen von Industrie 4.0 an eine gesamthafte Darstellung der Generierung, Nutzung und Weitergabe von personengebundenem und Maschinenwissen erfüllt werden können. So können z.B. erforderliche Qualifikationsmerkmale erfasst und quantitativ bewertet werden. Dies stellt eine wesentliche Voraussetzung dar, um Qualifikationspläne personenindividuell erstellen zu können.

Dennoch sind noch eine ganze Reihe von Fragen offen, die in zukünftigen Versionen von KMDL beantwortet werden müssen, z.B.:

- Die Aggregation von Wissen mehrerer Personen, sei es in einer Community of Practice oder bei der Erfüllung der Anforderung an eine Konversion wird noch detaillierter zu betrachten sein. Wie können geeignete Regeln für die Aggregation aussehen?
- Können die quantitativen Wirkungen durch experimentelle Untersuchungen erhärtet werden?
- Welche praktische Wirkung haben die zusätzlichen Konversionen mit physischen Objekten auf die Wissensobjekte?

Literatur

Arnold, R. (2010). Assisted Learning. A Workbook. Landau.

Baum, G., Borcherding, H., Broy, M., Eigner, M., Huber, A., Kohler, H., Russwurm, S., Stümpfle, M. (2013): Industrie 4.0: Beherrschung der industriellen Komplexität mit SysLM. Springer - Vieweg.

Bettenhausen, K., (2014): Erfolgsfaktoren Industrie 4.0: Qualifikation, Geschwindigkeit und Infrastruktur, Baden-Baden: VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Blackler, F. (1995), Knowledge, knowledge work and organizations: An overview and interpretation, Organization Studies, (16) 6, 1021-1046.

Cowan, R., David, P. A., & Foray, D. (2000). The explicit economics of knowledge codification and tacitness. Industrial and corporate change, 9(2), 211-253.

Davenport, T. H., Prusak, L. (1998). Working knowledge: How organizations manage what they know, Harvard Business School Press, Boston.

Dehnbostel, P. (2010): Betriebliche Bildungsarbeit. Kompetenzbasierte Aus- und Weiterbildung im Betrieb. Baltmannsweiler.

Dorst, W., (2012). Fabrik- und Produktionsprozesse der Industrie 4.0 im Jahr 2020. Information Management und Consulting, S. 34-37.

Faber, S. (2007). Entwicklung eines integrativen Referenzmodells für das Wissensmanagement in Unternehmen. Frankfurt am Main:Lang.

Freitag, M., Kück, M., Ait Alla, A., Lütjen, M. (2015): Potenziale von Data Science in Produktion und Logistik. Teil 1 – Eine Einführung in aktuelle Ansätze der Data Science, Industrie Management 5/2015, S. 22-26

Geisberger, E., Broy, M. (2012): agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, München: acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.

Gronau, N.; Fröming, J. (2006): KMDL–Eine semiformale Beschreibungssprache zur Modellierung von Wissenskonversionen. Wirtschaftsinformatik 48 (2006) 5, S. 349-360.

Gronau, N. (2009). Wissen prozessorientiert managen. München: Oldenbourg.

Gronau, N. (2014). Enzyklopaedie der Wirtschaftsinformatik - Industrie 4.0. [Online], unter: https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/informationssysteme/Sektorspezifische-Anwendungssysteme/cyber-physische-systeme/industrie-4.0/ [4. Juni 2020].

Gronau, N. (2014b). Handbuch Prozessorientiertes Wissensmanagement: Methoden und Praxis. Berlin : Gito.

Gronau, Norbert, André Ullrich und Gergana Vladova (2015). Prozessbezogene und visionäre Weiterbildungskonzepte im Kontext Industrie 4.0. in: H. Meier (Hrsg.): Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt, Gito-Verlag: S. 125-143.

Gronau N (2015b) Der Einfluss von Cyber-Physical Systems auf die Gestaltung von Produktionssystemen. Industrie Management 31 (2015) 3, S. 16-20

Gronau:, N. (2018).Auswirkungen der Digitalisierung auf ERP-Systeme, ERP Management 14 (2018) 1, S. 22-24.

Gronau, N., Grum, M. (2019). Knowledge Transfer Speed Optimizations in Product Development Contexts. Berlin:Gito-Verlag.

Gronau (2020). Knowledge Modeling and Description Language 3.0. Eine Einführung. Berlin:Gito-Verlag.

Hasler Roumois, U. (2010). Studienbuch Wissensmanagement. Grundlagen der Wissensarbeit in Wirtschafts-, Non-Profit- und Public-Organisationen. Zürich:Orell Füssli Verlag.

Hergesell, M. (2014) : Mit Apps auf dem Milkrun: WITTENSTEIN bastian (be)lebt Industrie 4.0, Wittenstein AG - Kundenmagazin move, Nr. 13, Oktober, S. 12-17.

Neuweg, G.H. (2005). Implizites Wissen als Forschungsgegenstand. In: F. Rauner (Hrsg.): Handbuch der Berufsbildungsforschung, Bielefeld: Bertelsmann.S. 581–588

Nonaka I, Takeuchi H (1995) The knowledge creating company: how Japanese companies create the dynamics of innovation. New York: Oxford University Press, p. 284

Nonaka, I., & Von Krogh, G. (2009). Perspective—Tacit knowledge and knowledge conversion: Controversy and advancement in organizational knowledge creation theory. Organization science, 20 (2009) 3 , S. 635-652. Polanyi M (1966) The tacit dimension. Garden City, Doubleday, 1966

Polanyi, M. (1966). The tacit dimension. Glocester, Mass: Peter Smith.

Quinones, M. A., Ford, J. K. and Teachout, M. S. (1995), The Relationship Between Work Experience And Job Performance: A Conceptual And Meta-Analytic Review. Personnel Psychology, 48: 887-910. doi:10.1111/j.1744-6570.1995.tb01785.x

Renzl, B. 2004. Zentrale Aspekte des Wissensbegriffs –Kernelemente der Organisation von Wissen. In: Wyssusek, B. (Hrsg.): Wissensmanagement komplex. Perspektiven und soziale Praxis. Berlin: Erich Schmidt Verlag, S. 27-43.

Rehäuser J und Krcmar H (1996) Wissensmanagement im Unternehmen. In: Schreyögg, G, Conrad P (Hrsg.) Managementforschung 6: Wissensmanagement. Berlin: De Gruyter, 1996. S. 1-40

Spötl, G.; Gorldt, C.; Windelband, L.; Grantz, T.; Richter, T. (2016). Industrie 4.0 – Auswirkungen auf Aus- und Weiterbildung in der M+E Industrie. München.

Sultanow, E., Zhou, X., Gronau, N., & Cox, S. (2012). Modeling of processes, systems and knowledge: a multi-dimensional comparison of 13 chosen methods. International Review on Computers and Software, 7(6), 3309-3319.

Teichmann, M. u.a. (2018). Mobile IIoT-Technologien in hybriden Lernfabriken. Industrie 4.0 Management 34 (2018) 3, S. 21-24. https://doi.org/10.30844/IM18-3_21-24

Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. Mind, S. 433-460.

Wiendahl, H.P., Reichardt, J., Nyhuis, P. (2014): Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. Carl Hanser Verlag.

Windt, K., Knollmann, M., Meyer, M.: : Anwendung von Data Mining Methoden zur Wissensgenerierung in der Logistik - Kritische Reflexion der Analysefähigkeit zur Termintreueverbesserung. In: Spath, D. (Hrsg.): Wissensarbeit - Zwischen strengen Prozessen und kreativem Spielraum. Berlin: Gito 2011, S. 223-249

Entwicklung eines soziotechnischen Digitalisierungs-KPI-Modells für Luftfahrtunternehmen

Wolfgang Kersten, Felix Krol, Birgit von See

Institut für Logistik und Unternehmensführung, Technische Universität Hamburg

1. Einleitung

Die globale Luftfahrtindustrie war in den vergangenen Jahren, insbesondere durch die steigende Nachfrage auf den asiatischen Märkten, durch ein starkes Marktwachstum gekennzeichnet (Stalnaker, Usman & Tylor, 2017, S. 57). Auch die deutsche Luftfahrtindustrie profitierte von diesem Wachstum: Über die letzten Jahre erzielte die Branche jährliche Wachstumsraten von über fünf Prozent (Initiative Supply Chain Excellence, 2017, S. 10). Gleichzeitig zwingt der globale Wettbewerbsdruck die Luftfahrtunternehmen, neue technologische Innovationen in ihre Produktionsprozesse zu implementieren (Esposito, Lazoi, Margarito & Quarta, 2019, S. 2). Dem gegenüber steht ein hoher Kostendruck, der insbesondere durch die wachsenden Schwellenländer getrieben wird (Santo et al., 2019, S. 4). Zusätzlich hat die Corona-Pandemie im ersten Halbjahr 2020 dazu geführt, dass die wirtschaftliche Lage der nahezu gesamten Zuliefererbetriebe geschwächt wurde. 63 % der Betriebe rechnen mit weitreichenden, 26 % sogar mit existenzbedrohenden Folgen (Santo & Wenzel, 2020, S. 7–8). Von einer Normalisierung des Produktionsniveaus wird erst ab 2023 ausgegangen, wodurch sich Herausforderungen vor allem in einem steigenden Preiskampf aufgrund von Überkapazitäten ergeben (Santo & Wenzel, 2020, S. 23).

Die deutsche Luftfahrt-Zuliefererstruktur ist durch einen hohen Anteil an kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) charakterisiert: 76 % der Zulieferer werden als KMU klassifiziert (Initiative Supply Chain Excellence, 2017, S. 9). Die Zulieferer, die überwiegend eine Tier-2- oder Tier-3-Rolle in der Supply Chain einnehmen, sind häufig hochspezialisiert und führen meist Fertigungsaufgaben durch (Initiative Supply Chain Excellence, 2017, S. 9–10 u. 13). Derzeit streben Luftfahrt-OEM (Original Equipment Manufacturer) an, die Anzahl ihrer Zulieferer

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_6

drastisch zu reduzieren und ihren Lieferantenstamm zu konsolidieren sowie für strategische Komponenten wieder Insourcing zu betreiben (Roland Berger, 2018, S. 10–13; Santo et al., 2019, S. 10). Dies erfolgt u. a. mit dem Ziel der Sicherung margenträchtiger Aftermarkt-Geschäfte strategischer Systemkomponenten und der gewinnbringenden Nutzung von systemgenerierten Daten (Santo et al., 2019, S. 10). Folglich werden in der Zukunft nur wenige, ausgewählte Tier-1-Zulieferer umfassendere Arbeitspakete übernehmen und ihre Sub-Supply Chains eigenständig verwalten (Initiative Supply Chain Excellence, 2017, S. 12; Santo et al., 2019, S. 10). Daher streben derzeit insbesondere Tier-2- und Tier-3-Zulieferer eine Weiterentwicklung zu einem höheren Tier-Level entlang der Wertschöpfungskette an (Initiative Supply Chain Excellence, 2017, S. 15).

Um durch die OEM zukünftig als potenzieller und attraktiver Luftfahrt-Zulieferer wahrgenommen zu werden, sind KMU angehalten, agile Produktionsprozesse zu etablieren und den Digitalisierungsgrad im Unternehmen auszubauen (Initiative Supply Chain Excellence, 2017, S. 27). Anders als beispielsweise in der Automobilindustrie, ist die Fertigung in der Luftfahrtindustrie durch kleinere Losgrößen (teilweise bis Losgröße 1) und einen niedrigeren Automatisierungsgrad gekennzeichnet (Guffarth, 2016, S. 130; Hansen, 2016). Demzufolge spielt die Interaktion zwischen Menschen und Technik insbesondere in dieser Branche eine bedeutende Rolle. Unternehmen sehen sich vor der Herausforderung einerseits neue ("Industrie 4.0"-) Technologien zu implementieren und ihre Geschäftsprozesse zu digitalisieren, verfügen andererseits jedoch nur über begrenzte (finanzielle) Ressourcen und Digitalisierungs-Fachwissen (Wrobel, Schildhauer & Preiß, 2017, S. 28–29). Obwohl bei 71 % der Luftfahrt-Zulieferer die Notwendigkeit einer digitalen Transformation präsent ist, haben erst 37 % der Zulieferer mit der Digitalisierung ihrer Prozesse und Funktionen begonnen (Santo et al., 2019, S. 21). Im Kreise der Luftfahrtzulieferer besteht Einigkeit darüber, dass die Kosten für KMU in einem tragbaren Rahmen bleiben müssen, damit eine stärkere Digitalisierung der Supply Chain gelingen kann (Stegkemper, 2016, S. 11).

Somit ist es in der aktuellen wirtschaftlichen Lage mehr denn je wichtig, dass als KMU klassifizierte Luftfahrtzulieferer ihren digitalen Reifegrad auf einer fundierten Basis, bspw. mithilfe von Key Perfomance Indikatoren (KPI), bestimmen können. Diese Bewertung der digitalen Reife ermöglicht eine zielgerichtete Priorisierung der nächsten Schritte sowie der damit verbundenen Investitionen. Um den digitalen Reifegrad bestimmen zu können, wird ein standardisiertes und strukturiertes Digitalisierungs-KPI-Modell benötigt (HAMBURG AVIATION e.V., 2020). Auf dieser Grundlage kann anschließend ein Digitalisierungs-Reifegradmodell entwickelt werden. Zwar existiert heute bereits eine Vielzahl an Digitalisierungs-Reifegradmodellen (Hölzle, Gerhardt & Petzolt, 2019, S. 14), jedoch sind

Reifegradmodelle häufig nicht-konfigurierbare und unflexible Systeme, die nur einen bestimmten Entwicklungspfad vorgeben sowie keine Handlungsleitlinien beinhalten (Kamprath, 2011, S. 98). Des Weiteren ist an bestehenden Reifegradmodellen zu kritisieren, dass diese zumeist auf subjektiven Bewertungen aufsetzen und somit eine Messbarkeit des Digitalisierungsgrads der Unternehmen nur eingeschränkt möglich ist (Reinhard, Rentz & Sommerfeld, 2020, S. 47). Durch die Entwicklung eines flexiblen Digitalisierungs-KPI-Modells wird ein Rahmenwerk geschaffen, mit dem die Luftfahrtindustrie auf einer messbaren Grundlage ein branchenindividuelles Reifegradmodell entwickeln kann. Daher beantwortet dieser Beitrag vor dem Hintergrund der Mensch-Technik-Interaktion die nachfolgenden Forschungsfragen (FF):

FF1: *Welche Dimensionen und Sub-Dimensionen mit Bezug zur Mensch-Technik-Interaktion sollte ein Digitalisierungs-KPI-Modell für Luftfahrtunternehmen umfassen?*

Basierend auf dem entwickelten KPI-Modell sind anschließend objektiv messbare Indikatoren zur Bestimmung des digitalen Reifegrads zu entwickeln. Somit lautet die zweite Forschungsfrage:

FF2: *Was sind geeignete KPI für die Entwicklung eines Digitalisierungs-Reifegradmodells?*

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wird im Folgenden zunächst auf die zugrundeliegenden Definitionen von der digitalen Transformation in Supply Chains sowie zu KPI-Modellen eingegangen. Anschließend wird das methodische Vorgehen auf dem Weg zur Entwicklung des KPI-Modells beschrieben. Das resultierende KPI-Modell wird im Ergebnisteil erläutert. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Kernerkenntnisse, in der sowohl die Implikationen und Limitationen als auch der weitere Forschungsbedarf aufgezeigt wird.

2. Theoretischer Hintergrund

Zur Entwicklung eines Digitalisierungs-KPI-Modells für Luftfahrtunternehmen ist zunächst ein grundlegendes Verständnis über die Digitalisierung bzw. die digitale Transformation notwendig. Daher werden diese beiden Begriffe eingangs kurz definiert und anschließend die Begriffe KPI und KPI-Modelle erläutert.

2.1. Digitalisierung und digitale Transformation von Supply Chains

Die Begriffe "Digitalisierung" und "digitale Transformation" werden oftmals synonym verwendet. Eine Analyse unterschiedlicher Definitionen ermöglicht jedoch eine trennscharfe Abgrenzung (von See, 2019, S. 20–24), die als Grundlage für den folgenden Beitrag dient. Grundsätzlich wird insbesondere bei den aktuellen Bestrebungen in den Unternehmen mit beiden Konzepten das Ziel verfolgt, die Zukunftsvision der Industrie 4.0 zu erreichen, die sich durch Echtzeitfähigkeit, Selbststeuerung und konsequente Kundenorientierung über alle Wertschöpfungsstufen hinweg auszeichnet (von See, 2019, S. 24).

Der derzeit stark diskutierte Begriff "Digitalisierung" ist kein neues Phänomen, das Konzept hat jedoch mit der in 2013 kommunizierten Hightech-Strategie der Bundesregierung ein gesteigertes Interesse erfahren (von See, 2019, S. 23). Aus technischer Sicht beschreibt die Digitalisierung lediglich die Umwandlung von analogen in digitale Daten (Bitkom, 2016, S. 7; Wolf & Strohschen, 2018, S. 58). Analoge Daten können beispielsweise Temperaturen, Zustände, Sprache oder geschriebener Text sein, die von Computern oder technischen Geräten für die digitale Signalverarbeitung genutzt werden können (Wolf & Strohschen, 2018, S. 58). Aus wirtschaftlicher Sicht beschreibt die Digitalisierung den Einsatz und die Intensivierung der Nutzung von IT und digitalen Technologien in Unternehmen (Brennen & Kreiss, 2016, S. 556). Neben der reinen Computerisierung umfasst sie auch die Konnektivität und damit Vernetzung einzelner Komponenten (Schuh, Anderl, Gausemeier, ten Hompel & Wahlster, 2017, S. 15–16). Die Digitalisierung kann damit als Wegbereiter für die Industrie 4.0 bzw. effizientere Supply Chains verstanden werden (Kersten, von See & Indorf, 2018, S.103; von See, 2019, S. 23–24).

Die Verbesserung existierender und Einführung neuer digitaler Technologien erfordert Veränderungen von Wertschöpfungsprozessen auf Unternehmensebene (Kersten, Schröder & Indorf, 2017, S. 51). Darüber hinaus sind Anpassungen von Unternehmensstrategien basierend auf neuen, digitalen Geschäftsmodellen sowie die Aneignung der notwendigen Kompetenzen und Qualifikationen notwendig (Kersten et al., 2017, S. 51). Dieser zielgerichtete Wandlungsprozess, der sowohl die strategische als auch operative Ebene fokussiert und sich der Digitalisierung als Wegbereiter bedient mit dem Ziel, die Zukunftsvision einer Industrie 4.0 zu erreichen, wird mit dem Begriff der "digitalen Transformation" umschrieben (von See, 2019, S. 24). Bowersox, Closs und Drayer (2005, S. 22–23) heben bereits vor 15 Jahren unter dem Begriff "Digital Business Transformation" hervor, dass eine Anpassung der Geschäftsprozesse notwendig ist, um das Potenzial von digitalen Technologien entlang der gesamten Supply Chain ausschöpfen zu können. Die digitale

Transformation zielt darauf ab, die Flexibilität, Produktivität und Transparenz aller beteiligten Supply Chain Partner zu erhöhen und greift gleichzeitig das sich verändernde Kundenbedürfnis nach digitalen Produkten und Services auf (Kersten et al., 2017, S. 48 u. 51, 2017, S. 51). Eine digitalisierte Supply Chain wird durch die Implementierung von cyber-physischen Systemen (CPS) realisiert, die Software und Elektronik (z. B. Sensoren und Aktoren) in Objekten einbinden und diese mit dem Internet verbinden (Hausladen, 2016, S. 77). Dadurch können sowohl einzelne Maschinen als auch ganze Produktionssysteme mit ihrer Umgebung kommunizieren und somit die physische mit der virtuellen Welt verbinden (Hausladen, 2016, S. 77). Die Erfahrungen von vergangenen Digitalisierungs-Bestrebungen zeigen jedoch, dass rein technikzentrierte Ansätze bei weitem nicht ausreichen (Brödner, 2018, S. 238; Deuse, Weisner, Hengstebeck & Busch, 2015, S. 101–102). Vielmehr ist der Mensch - sowohl in seiner Funktion als Mitarbeiter als auch Kunde - ein zentraler Erfolgsfaktor bei der Umsetzung der digitalen Transformation (Deuse et al., 2015, S. 101; von See, 2019, S. 88 u. 164–165). Demnach erfordert eine digitale Transformation von Supply Chains die ganzheitliche Berücksichtigung der soziotechnischen Perspektive (Brödner, 2018, S. 247; Kagermann, Wahlster & Helbig, 2013, S. 27–28) und damit der Dimensionen Mensch, Technik und Organisation (Deuse et al., 2015, S. 102; Dregger, Niehaus, Ittermann, Hirsch-Kreinsen & ten Hompel, 2016, S. 3; von See, 2019, S. 74).

Wie eingangs erläutert, sollten Luftfahrtunternehmen, welche die digitale Transformation durch die Einführung neuer Digitalisierungs-Technologien in ihrem Unternehmen weiter vorantreiben möchten, zunächst ihren digitalen Reifegrad bestimmen. Dazu wird ein standardisiertes Digitalisierungs-KPI-Modell benötigt. Daher werden im Folgenden die Begriffe KPI und KPI-Modelle definiert, bevor das entwickelte Modell einführt wird.

2.2. KPI und KPI-Modelle

Key Performance Indikatoren (KPI) sind nach Parmenter (2015, S. 7–8) "die Indikatoren, die sich auf diejenigen Aspekte der unternehmerischen Leistungsfähigkeit fokussieren, die für den gegenwärtigen und zukünftigen Erfolg des Unternehmens am kritischsten sind." Grundsätzlich erfüllen Indikatoren drei Hauptfunktionen: Kontrolle, Kommunikation und Verbesserung (Franceschini, Galetto & Maisano, 2019, S. 9). Demnach können KPI zur Kontrolle und Kommunikation der Unternehmensperformance an interne und externe Stakeholder dienen sowie zur Identifizierung von Abweichungen zwischen der Ist- und Soll-Leistung genutzt werden. In der Konsequenz dienen KPI der Ableitung und Umsetzung von Verbesserungsmaßnahmen. Um die Leistungsfähigkeit eines Tätigkeitsbereichs, eines Geschäftsbereichs oder eines Unternehmens zu bestimmen, ist ein Grundgerüst an

KPI bzw. ein KPI-Modell erforderlich. In der Literatur werden KPI-Modelle häufig als Leistungsmessungs-Systeme (performance measurement systems) bezeichnet, die ein "Grundgerüst an Kennzahlen zur Quantifizierung der Effizienz und Effektivität von Maßnahmen bereitstellen" (Neely, Gregory & Platts, 1995, S. 80–81).

KPI werden regelmäßig ermittelt und haben einen maßgeblichen Einfluss auf die kritischen Erfolgsfaktoren eines Unternehmens (Parmenter, 2019, S. 15). Daher muss ein Unternehmen basierend auf seiner Unternehmensstrategie und deren Zielen selbst festlegen, ob ein Indikator als Key Performance Indikator definiert wird. Indikatoren, die weniger häufig gemessen werden (z. B. monatlich, viertel- oder halbjährlich) und nicht zentral für den Unternehmenserfolg sind, werden als Performance Indikatoren (PI) bezeichnet (Parmenter, 2019, S. 13). PI komplementieren KPI und sind somit wichtig für den Geschäftsbetrieb. Die Auswahl der relevanten Indikatoren und die Festlegung, ob der Indikator als PI oder als KPI definiert wird, ist ein komplexer Prozess und muss vom Unternehmen individuell festgelegt werden (Franceschini et al., 2019, S. 85). Daher unterscheidet dieser Beitrag nicht zwischen PI und KPI, sondern präsentiert ein umfassendes Modell an Indikatoren (im weiteren Verlauf als KPI bezeichnet). Die finale Auswahl der relevanten (Key) Perfomance Indikatoren obliegt den zukünftigen Anwendern.

3. Methodisches Vorgehen

Das entwickelte KPI-Modell basiert auf der Kombination aus einem Top-down- und einem Bottom-up-Ansatz (siehe Abbildung 1). Mithilfe eines Top-down-Ansatzes werden relevante Dimensionen und Sub-Dimensionen identifiziert, welche die Struktur des KPI-Modells bilden. Das KPI-Modell wird dabei im Rahmen einer Literaturrecherche zunächst generisch abgeleitet, eine spätere Fokussierung auf die Mensch-Technik-Interaktion erfolgt durch die abschließende Auswahl einzelner relevanter Dimensionen. In der Literaturrecherche finden sowohl wissenschaftliche Literatur als auch internationale Normen und Richtlinien sowie praxisorientierte Branchenberichte und -fachliteratur Berücksichtigung. Es können 42 KPI-Modelle/Reifegradmodelle identifiziert werden. Eine anschließende Analyse der KPI-Modelle hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Bestimmung der digitalen Reife von Luftfahrtunternehmen führt final zu 19 berücksichtigten KPI-Modellen. Eine Detailanalyse dieser Modelle auf ihre Themenschwerpunkte liefert neun Dimensionen und 30 darunterliegende Sub-Dimensionen.

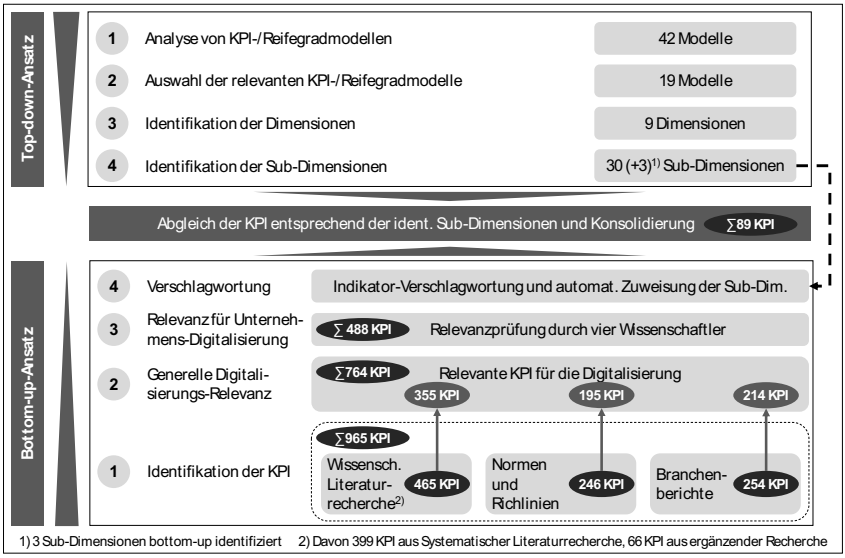


Abbildung 1: Entwicklungsansatz des Digitalisierungs-KPI-Modells

Mit Hilfe eines Bottom-up-Ansatzes werden relevante KPI für die Messung des aktuellen Digitalisierungs-Reifegrads identifiziert. Dieser Ansatz beruht auf einer Systematischen Literaturrecherche (SLR) in Anlehnung an Fink (2014), durch die 399 KPI identifiziert werden können. Der Suchstring sowie die genutzten Datenbanken für die SLR sind der Abbildung 2 zu entnehmen. Das detaillierte Vorgehen der SLR ist in Abbildung 3 dargestellt. Ergänzend werden durch eine zweite wissenschaftliche Literaturrecherche nach dem Schneeballverfahren 66 weitere KPI ermittelt. Somit liefert die Analyse insgesamt 465 KPI aus der wissenschaftlichen Literatur. Neben der wissenschaftlichen Literatur werden, wie auch im Top-down-Ansatz, internationale Normen und Richtlinien sowie Branchenberichte (z. B. Whitepaper von Managementberatungen) einbezogen. Die Analyse dieser Dokumente liefert 246 KPI aus den Normen und Richtlinien sowie 254 KPI aus den Branchenberichten. Somit können insgesamt 965 KPI aus der Literatur abgeleitet werden (vgl. Abbildung 1).

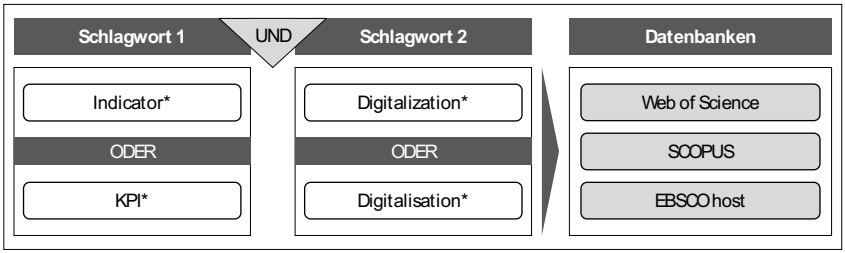


Abbildung 2: Suchstring und Quellen der Systematischen Literaturrecherche

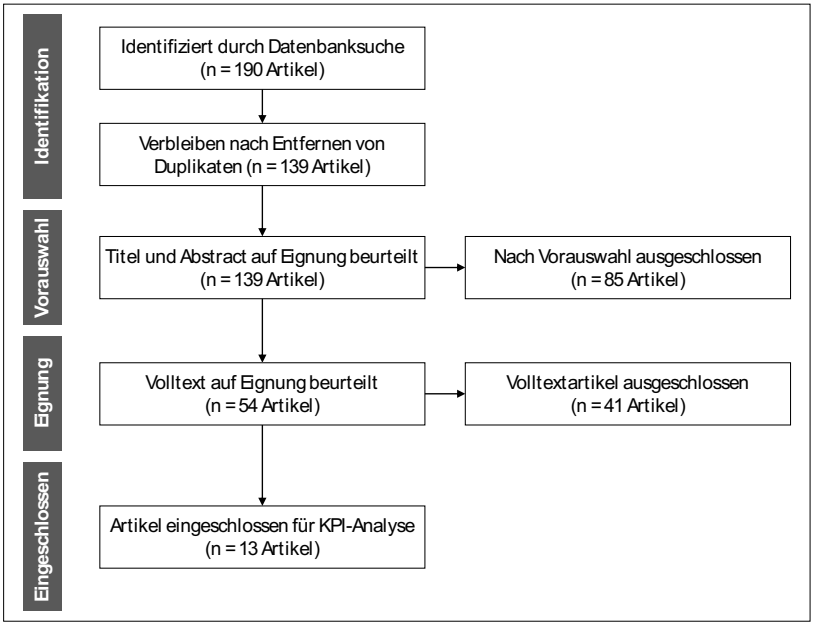


Abbildung 3: Flowchart der Systematischen Literaturrecherche

Im zweiten Schritt werden die KPI auf ihre generelle Relevanz für die Digitalisierung hin untersucht, was zum Ausschluss von 201 nicht relevanten KPI führt (vgl. Abbildung 1). Anschließend wird für die verbleibenden 764 KPI drittens eine Relevanzprüfung durch vier Wissenschaftler unabhängig voneinander durchgeführt. Jeder Indikator wird basierend auf der Frage "Ist der KPI für die digitale Transformation in der Luftfahrtindustrie relevant?" einzeln geprüft. Ein Indikator wird in das KPI-Modell inkludiert, wenn mindestens eine Dreiviertelmehrheit erreicht wird. Die verbleibenden Indikatoren, die keinen Konsens erzielen, werden in zwei

Workshops von den Wissenschaftlern diskutiert. Basierend auf dieser Prüfung werden 488 KPI in die finale Auswahl zur Entwicklung des KPI-Modells eingeschlossen.

Der Bottom-up-Ansatz wird viertens durch eine Schlagwort-Zuordnungsmethodik mit dem Top-Down-Ansatz verknüpft (siehe Abbildung 4). Basierend auf ihrem Text werden allen 488 KPI aus dem Bottom-Up-Ansatz drei Schlagwörter zugewiesen. Gleichzeitig werden alle 33 Sub-Dimensionen aus dem Top-Down-Ansatz entsprechend ihrer Definition mit Schlagwörtern in einer Zuordnungsmatrix versehen. Mithilfe eines Excel-basierten Makros werden den KPI basierend auf ihren zugeordneten drei Schlagwörtern automatisch die entsprechende Sub-Dimension zugewiesen. Durch diese Methodik können 446 KPI vollautomatisch klassifiziert werden. 42 KPI, die basierend auf ihren Schlagworten keine eindeutige Sub-Dimensionen erhalten, werden anschließend manuell klassifiziert. Alle zugewiesenen Sub-Dimensionen werden zudem einzeln durch zwei Wissenschaftler geprüft und gegebenenfalls angepasst. Zuletzt werden inhaltlich verwandte KPI in jeder Sub-Dimension gruppiert und zu 89 aussagekräftigen, messbaren KPI entwickelt.

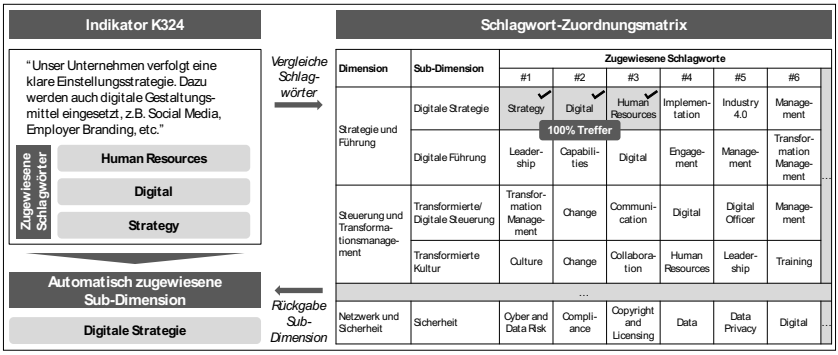


Abbildung 4: Schlagwort-Zuordnungsmethodik (Beispiel für Indikator K324)

Darüber hinaus können durch den Bottom-up-Ansatz drei weitere Sub-Dimensionen identifiziert werden, die nicht durch die 19 analysierten KPI- bzw. Reifegradmodelle abgedeckt werden. Daher werden diese Sub-Dimensionen zu den 30 Sub-Dimensionen hinzugefügt.

4. Ergebnisse

Im Rahmen der ersten Forschungsfrage konnte ein strukturiertes Digitalisierungs-KPI-Modell für Luftfahrtunternehmen entwickelt werden, welches in seiner übergeordneten Strukturierung in Krol, Saeed und Kersten (im Druck) vorgestellt

wird. Es umfasst die identifizierten Dimensionen Strategie und Führung, Steuerung und Transformationsmanagement, Digitalkompetenzen/Humankapital, intelligente Produkte, digitaler Kundenfokus, intelligente Prozesse, digitale Technologien, Finanzen sowie Netzwerk und Sicherheit. Gemäß der Prämisse, sowohl humane als auch technische Aspekte bei der digitalen Transformation in der Organisation zu berücksichtigen (Deuse et al., 2015, S. 102), erfolgt in diesem Beitrag eine Fokussierung auf diejenigen Dimensionen, die einen klaren Bezug zur Mensch-Technik-Interaktion haben (siehe Abbildung 5). Dementsprechend werden von den insgesamt neun identifizierten Dimensionen des Digitalisierungs-KPI-Modells die Folgenden erläutert:

- Dimension 1: Strategie und Führung
- Dimension 3: Digitalkompetenzen/Humankapital
- Dimension 6: Intelligente Prozesse

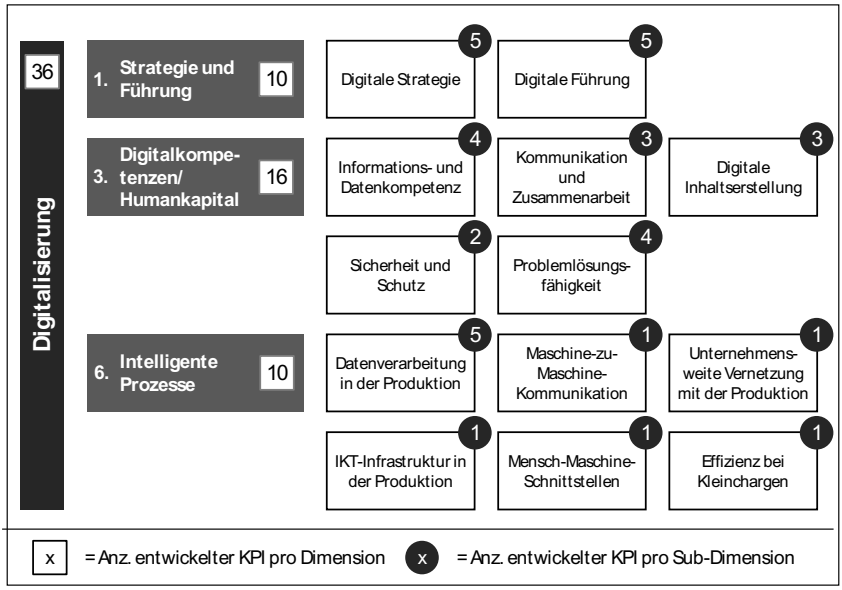


Abbildung 5: Struktur des Digitalisierungs-KPI-Modells

Im Folgenden werden die jeweiligen Dimensionen und darunterliegenden Sub-Dimensionen kurz erläutert. Basierend auf der zweiten Forschungsfrage werden jeweils im Anschluss daran die entwickelten 36 KPI vorgestellt.

Dimension 1: Strategie und Führung

Die Dimension "Strategie und Führung" beschreibt die Fähigkeit eines Unternehmens, neue Geschäftsmodelle zu entwickeln und zu implementieren (Lichtblau et al., 2015, S. 29), um das Unternehmen strategisch auf die Herausforderungen der Digitalisierung auszurichten (Berghaus, Back & Kaltenrieder, 2017, S. 29). Daher sind die zielgerichtete Allokation und Ausrichtung der geeigneten digitalen Kompetenzen und Ressourcen von hoher Bedeutung.

Sub-Dimension 1.1: Digitale Strategie

Eine digitale Strategie verknüpft Informationssysteme mit Managementstrategien und Geschäftsmodellen, um disruptiven technologischen Entwicklungen und Veränderungen im Kundenverhalten gerecht zu werden (Azhari, Faraby, Rossmann, Steimel & Wichman, 2014, S. 39; Deloitte, 2018, S. 10; Waspodo, Ratnawati & Halifi, 2018, S. 1). Daher sollte eine digitale Strategie transparent, leicht verständlich sein und im gesamten Unternehmen klar kommuniziert werden (Azhari et al., 2014, S. 39; KPMG, 2016). Digitale Strategien verfolgen das Ziel, neue digitale Technologien einzuführen, um nachhaltige Leistungssteigerungen und höhere Wettbewerbsfähigkeit zu generieren (Berghaus et al., 2017, S. 27; BSP Business School Berlin, 2016, S. 8). In Tabelle 1 sind die relevanten KPI für die Sub-Dimension "Digitale Strategie" zu finden.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D1.1.1	Ist Ihre digitale Strategie dokumentiert, regelmäßig aktualisiert und wird sie allen Mitarbeitern transparent kommuniziert?	[2]; [17]
D1.1.2	Ist eine strategische Roadmap bzw. ein Strategieprozess für die digitale Transformation Teil der Unternehmensstrategie?	[2]; [3]; [17]; [22]
D1.1.3	Wird der Umsetzungsstand Ihrer digitalen Strategie in regelmäßigen Abständen gemessen und verfolgt (z. B. durch Indikatoren)?	[2]; [15]; [18]
D1.1.4	Hat Ihr Unternehmen ausreichende Mittel (z. B. finanzielle Mittel, Personal) und eine klare Einstellungs-Strategie, um die digitale Strategie umzusetzen?	[2]; [16]; [19]
D1.1.5	Ist die digitale Kompetenz ein zentraler Bestandteil in Ihrer Personalentwicklungsstrategie?	[2]; [3]

Tabelle 1: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Digitale Strategie“

Sub-Dimension 1.2: Digitale Führung

Digitale Führung integriert den digitalen Wandel in bestehende Führungskonzepte (Buhse, 2014, S. 230). Das mittlere und Top-Management sollte den Umgang mit neuen Technologien erlernen und eine Unternehmenskultur fördern, die Mitarbeiter zur Einbringung neuer Ideen, Innovationen und Organisationsentwicklung ermutigt (Azhari et al., 2014, S. 39; EFQM, 2012, S. 6). Um die Mitarbeiter von der Notwendigkeit des digitalen Wandels zu überzeugen, sollte das Ma-

nagement selbst eine Vorbildfunktion und Vorreiterrolle übernehmen (BSP Business School Berlin, 2016, S. 7; EFQM, 2012, S. 6; Stowasser & Peschl, 2019, S. 147). Die relevanten KPI für die Sub-Dimension "Digitale Führung" sind in Tabelle 2 zu finden.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D1.2.1	Besitzt Ihr Unternehmen die Fähigkeit, mögliche Lücken im Bereich der Digitalkompetenz aufzudecken und zu schließen?	[17]; [24]
D1.2.2	Betreibt Ihr Unternehmen eine konsistente kanalübergreifende (online und offline) operative Führung mit externen Stakeholdern?	[3]; [11]
D1.2.3	Entwickelt Ihr Unternehmen seine Führungskultur kontinuierlich weiter und werden diese Entwicklungen sowohl dokumentiert als auch kommuniziert?	[2]; [16]
D1.2.4	Arbeitet Ihr oberes Management an einer Verbesserung des Managementsystems und dessen Performance und steuert diesen Wandel effektiv?	[3]; [11]; [20]
D1.2.5	Entwickelt Ihr mittleres Management die Mission, Vision, Werte sowie das Leitbild und agiert als Vorbild für seine Mitarbeiter?	[3]; [11]; [22]

Tabelle 2: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Digitale Führung“

Dimension 3: Digitalkompetenzen/Humankapital

Die Digitalkompetenzen bzw. das Humankapital sind der zentrale Bestandteil für den Erfolg der digitalen Transformation eines Unternehmens (BSP Business School Berlin, 2016, S. 7; Geissbauer, Vedso & Schrauf, 2016, S. 9). Dafür müssen Mitarbeiter über relevante Kenntnisse in der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) verfügen, aber auch die Bereitschaft zum lebenslangen Lernen, Offenheit für neue Technologien und interdisziplinäres Denken mitbringen (BSP Business School Berlin, 2016, S. 7; Dombrowski, Wullbrandt & Fochler, 2019, S. 22; European Commission, 2019; Kotarba, 2017, S. 127; Lichtblau et al., 2015, S. 52; Schumacher, Erol & Sihn, 2016, S. 164). Unternehmen müssen spezifische Fort- und Weiterbildungsmaßnahmen sowie Gestaltungsfreiheiten und Autonomie ermöglichen, um Mitarbeiter zu entwickeln und fördern, aber auch um neue Mitarbeiter zu gewinnen (Azhari et al., 2014, S. 39; Geissbauer et al., 2016, S. 9; KPMG, 2016, S. 4; Lichtblau et al., 2015, S. 52; Schumacher et al., 2016, S. 164).

Sub-Dimension 3.1: Informations- und Datenkompetenz

Informations- und Datenkompetenz umfasst die Fähigkeit, digitale Daten, Informationen und Inhalte abzurufen und zu analysieren (Carretero, Vuorikari & Punie, 2017, S. 19). Somit umfassen diese Fähigkeiten die grundlegenden IT-Fähigkeiten, z. B. Internetnutzung, die für das Arbeiten in einer digitalisierten Umgebung notwendig sind. Die KPI für die Sub-Dimension "Informations- und Datenkompetenz" sind in Tabelle 3 dargestellt.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D3.1.1	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die am Arbeitsplatz einen Computer nutzen (inkl. Tablets und Smartphones)	[6]; [10]; [15]; [17]; [19]; [26]
D3.1.2	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die das Internet nutzen	[5]; [13]; [15]; [17]; [25]
D3.1.3	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die über grundlegende Digitalkompetenzen verfügen (z. B. Internetnutzung, Dateien und Ordner kopieren und durchsuchen, Daten suchen und bewerten, Formeln in Tabellenkalkulationen verwenden)	[4]; [9]; [12]; [15]; [17]; [24]
D3.1.4	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern im IKT-Sektor (inkl. Software, Hardware, Telekommunikation, verbundene Dienstleistungen)	[7]

Tabelle 3: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Informations- und Datenkompetenz“

Sub-Dimension 3.2: Kommunikation und Zusammenarbeit

Kommunikations- und Kollaborationsfähigkeiten umfassen die Fähigkeit, mit Hilfe digitaler Technologien zu kommunizieren und zusammenzuarbeiten (Berghaus et al., 2017, S. 33; Carretero et al., 2017, S. 11; IBF Intranet Benchmarking Forum, 2010, S. 11). Diese Fähigkeiten unterstützen flexible Arbeitsformen, die Suche nach Wissen und den Austausch von Ideen mit anderen Mitarbeitern sowie in der gesamten Wertschöpfungskette (Berghaus et al., 2017, S. 33; IBF Intranet Benchmarking Forum, 2010, S. 11; Nabitz, Klazinga & Walburg, 2000, S. 13). In Tabelle 4 sind die relevanten KPI für die Sub-Dimension "Kommunikation und Zusammenarbeit" zu finden.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D3.2.1	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die mittels Digitaltechnologien zusammenarbeiten, z. B. durch Interaktion und Teilen von Daten auf digitalen Kollaborationsplattformen	[3]; [14]; [22]; [24]
D3.2.2	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die digitale Kommunikationstools nutzen, z.B. Videoanrufe und soziale Netzwerke	[17]; [22]
D3.2.3	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die das Internet zur Kommunikation nutzen, z. B. Senden/Empfangen von Emails, Videoanrufe, Messenger Dienste, soziale Netzwerke	[12]

Tabelle 4: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Kommunikation und Zusammenarbeit"

Sub-Dimension 3.3: Digitale Inhaltserstellung

Die Sub-Dimension "Digitale Inhaltserstellung" umfasst Fähigkeiten, um digitale Informationen und Inhalte zu erstellen, zu bearbeiten und in die Geschäftsprozesse zu integrieren (Carretero et al., 2017, S. 11 u. 33). Diese Fähigkeiten umfassen auch die Wertschöpfung aus Daten durch die Anwendung von Datenanalyse-

Technologie (Geissbauer et al., 2016, S. 17; Lichtblau et al., 2015, S. 54). Die relevanten KPI für die Sub-Dimension "Digitale Inhaltserstellung" sind in Tabelle 5 dargestellt.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D3.3.1	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die Werkzeuge zum Analysieren und Entwickeln von digitalen Inhalten verwenden, um das Tagesgeschäft zu unterstützen	[2]; [17]; [24]
D3.3.2	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern mit besonderer Digitalkompetenz (z. B. IKT-Spezialisten, MINT-Absolventen, Programmierer)	[2]; [3]; [9]; [17]; [21]; [22]; [24]
D3.3.3	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die aus Daten wertvolle Erkenntnisse gewinnen können, z. B. durch Verbindung und Neuauswertung von digitalen Inhalten	[20]; [24]

Tabelle 5: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Digitale Inhaltserstellung"

Sub-Dimension 3.4: Sicherheit und Schutz

Sicherheitskompetenzen in einem digitalisierten Humanressourcenkontext beziehen sich auf den Schutz der physischen und psychischen Gesundheit der Mitarbeiter in der veränderten Arbeitsumgebung (Carretero et al., 2017, S. 11 u. 38; EFQM, 2012, S. 13). Die Mitarbeiter müssen sich der Auswirkungen der digitalen Technologien auf das soziale Wohlbefinden bewusst sein (Vuorikari, R., Punie, Y., Carretero Gomez S. & Van den Brande, G., 2016, S. 9) und eine Kultur der gegenseitigen Unterstützung und Vielfalt respektieren und unterstützen (EFQM, 2012, S. 13). In Tabelle 6 sind die relevanten KPI für die Sub-Dimension "Sicherheit und Schutz" abgebildet.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D3.4.1	Sind Ihren Mitarbeitern wichtige IT-Sicherheitsvorschriften (z. B. Privatsphäre und Schutz personenbezogener Daten, Verwaltung digitaler Identitäten, Netiquette) bekannt und werden diese regelmäßig evaluiert (z. B. durch externe Audits)?	[3]; [20]; [24]
D3.4.2	Hat Ihr Unternehmen definierte Regeln und Handlungsempfehlungen, um das Wohlbefinden und die Gesundheit der Mitarbeiter zu gewährleisten?	[24]

Tabelle 6: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Sicherheit und Schutz"

Sub-Dimension 3.5: Problemlösefähigkeit

Mithilfe dieser Fähigkeiten können Mitarbeiter Probleme in einer digitalen Umgebung selbstständig lösen (Carretero et al., 2017, S. 11 u. 40). Diese Fähigkeiten umfassen neben technischem Wissen auch Systemdenken und Prozessverständnis (Lichtblau et al., 2015, S. 54). Um Problemlösungsfähigkeiten zu entwickeln und

auf dem neuesten Stand zu bleiben, sind kontinuierliche Ausbildung und Schulung erforderlich (Lichtblau et al., 2015, S. 52). Die relevanten KPI für die Sub-Dimension "Problemlösefähigkeit" sind in Tabelle 7 dargestellt.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D3.5.1	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die Online-Kurse belegen und das Internet für Trainings- oder Bildungszwecke nutzen	[1]; [12]; [17]
D3.5.2	Bietet Ihr Unternehmen seinen Mitarbeitern kontinuierliche Weiterbildungsmaßnahmen zur Entwicklung der Digitalkompetenzen an?	[2]; [16]; [25]
D3.5.3	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern, die eine industriespezifische Weiterbildung für die entsprechenden digitalen Anforderungen durchlaufen (z. B. IT-Infrastruktur, Automatisierungstechnologie, Datenanalyse, Datensicherheit/Kommunikationssicherheit, Entwicklung und Anwendung von Assistenzsystemen, Kollaborationssoftware, Prozessverständnis)	[2]; [10]; [18]
D3.5.4	Prozentualer Anteil an Mitarbeitern mit IKT-Problemlösungsfähigkeiten (z. B. Verbindung und Einrichtung neuer IKT-Geräte)	[12]; [24]

Tabelle 7: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Problemlösefähigkeit"

Dimension 6: Intelligente Prozesse

Intelligente Prozesse sind die Voraussetzung für die Vernetzung der horizontalen und vertikalen Lieferkette (Lichtblau et al., 2015, S. 39 u. 68). Prozesse sollten automatisiert, dezentralisiert und durchgängig gestaltet werden, wobei alle Systeme integriert und alle Komponenten zu berücksichtigen sind (Berghaus et al., 2017, S. 31; EFQM, 2012, S. 16; Lichtblau et al., 2015, S. 39 u. 66-67; Schumacher et al., 2016, S. 164). Daher ist es entscheidend, Prozesse nicht nur innerhalb des eigenen Unternehmens, sondern entlang der gesamten Wertschöpfungskette vom Lieferanten bis zum Kunden zu vernetzen (Lichtblau et al., 2015, S. 39).

Sub-Dimension 6.1: Datenverarbeitung in der Produktion

Datenverarbeitung in der Produktion ist erforderlich, um die physische Produktionsausrüstung der Fabrik mit der virtuellen Welt zu verbinden (Lichtblau et al., 2015, S. 13). Daten aus der Produktion werden für die autonome Planung und Steuerung des Produktionsprozesses gesammelt, gespeichert und verarbeitet. (IHK München und Oberbayern, 2015; Lichtblau et al., 2015, S. 13; VDMA, 2016, S. 16). Die KPI für die Sub-Dimension "Datenverarbeitung in der Produktion" sind in Tabelle 8 enthalten.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D6.1.1	Nutzt Ihr Unternehmen Erkenntnisse aus Daten und Informationen, die in der Produktion generiert werden können?	[3]; [8]; [16]; [18]; [22]; [23]

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D6.1.2	Reagieren Produktionsprozesse in Ihrem Unternehmen schnell bzw. automatisch in Echtzeit?	[16]; [18]
D6.1.3	Haben Sie Anwendungsfälle in Ihrer Produktion, in denen sich Werkstücke autonom selbst leiten?	[18]
D6.1.4	Beruht der Einkauf in Ihrem Unternehmen auf hochwertigen Stammdaten?	[16]
D6.1.5	Stellt Ihr Unternehmen die Kontrolle und Konsistenz aller Materialstammdaten sicher?	[16]

Tabelle 8: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Datenverarbeitung in der Produktion"

Sub-Dimension 6.2: Maschine-zu-Maschine-Kommunikation
Die Maschine-Maschine-Kommunikation wird durch Datenschnittstellen, z. B. Feldbus-, Ethernet- und Web-Schnittstellen, ermöglicht, was den autonomen Informationsaustausch erleichtert (VDMA, 2016, S. 15). Auf diese Weise können Information und Standort voneinander getrennt werden, wodurch es möglich wird, Verknüpfungen der Produktionen zwischen Unternehmen in der Wertschöpfungskette herzustellen (IHK München und Oberbayern, 2015; VDMA, 2016, S. 15). In Tabelle 9 ist die KPI für die Sub-Dimension "Maschine-zu-Maschine-Kommunikation" enthalten.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D6.2.1	Verwendet Ihr Unternehmen die Maschine-zu-Maschine (M2M)-Kommunikation in der Produktionsumgebung?	[16]; [18]; [23]

Tabelle 9: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Maschine-zu-Maschine-Kommunikation"

Sub-Dimension 6.3: Unternehmensweite Vernetzung mit der Produktion
Um effiziente und standardisierte Arbeitsabläufe zu entwickeln, sind Vernetzung und Datenaustausch nicht nur innerhalb der Produktion, sondern auch zwischen der Produktion und anderen Unternehmensfunktionen erforderlich (Dombrowski et al., 2019, S. 27; VDMA, 2016, S. 15). Durch die Verwendung konsistenter Dateiformate und einheitlicher IT-Lösungen können Geschäftseinheiten wie die Beschaffung oder der Vertrieb Produktionsdaten mit ihren Informationen und Daten verknüpfen (IHK München und Oberbayern, 2015; VDMA, 2016, S. 15). Tabelle 10 enthält die KPI für die Sub-Dimension "Unternehmensweite Vernetzung mit der Produktion".

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D6.3.1	Teilt Ihre Produktion Informationen mit anderen Geschäfts- oder Zentralbereichen?	[16]; [18]; [23]

Tabelle 10: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Unternehmensweite Vernetzung mit der Produktion"

Sub-Dimension 6.4: IKT-Infrastruktur in der Produktion

Der Austausch von Produktionsdaten zwischen Partnern innerhalb der Wertschöpfungskette erfordert eine zuverlässige und konsistente Informations- und Telekommunikationsinfrastruktur in der Produktion (IHK München und Oberbayern, 2015; VDMA, 2016, S. 15). Die IKT-Infrastruktur in der Produktion ist eine zentrale Voraussetzung für die Implementierung von Anwendungen, die auf technische und organisatorische Prozessverbesserungen abzielen (VDMA, 2016, S. 15). Die identifizierte KPI für die Sub-Dimension „IKT-Infrastruktur in der Produktion" ist in Tabelle 11 abgebildet.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D6.4.1	Wie fortgeschritten entwickelt ist die IKT-Infrastruktur Ihrer Produktionsausstattung?	[3]; [16]; [17]; [22]; [23]

Tabelle 11: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „IKT-Infrastruktur in der Produktion"

Sub-Dimension 6.5: Mensch-Maschine-Schnittstellen

Innovative Mensch-Maschine-Schnittstellen ermöglichen es den Mitarbeitern, die relevanten Informationen der Produktionseinheiten zur richtigen Zeit am richtigen Ort zu erhalten (IHK München und Oberbayern, 2015; VDMA, 2016, S. 15). Daher sollten Unternehmen mobile Endgeräte wie Tabletts oder Datenbrillen bereitstellen, die die betrieblichen Abläufe vereinfachen und die Produktionseffizienz steigern (IHK München und Oberbayern, 2015). In Tabelle 12 ist die KPI für die Sub-Dimension "Mensch-Maschine-Schnittstellen" abgebildet.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D6.5.1	Verwendet Ihr Unternehmen Mensch-Maschine-Schnittstellen in der Produktionsumgebung?	[8]; [16]; [23]

Tabelle 12: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Mensch-Maschine-Schnittstellen"

Sub-Dimension 6.6: Effizienz bei Kleinchargen

Die Kundenanforderung nach hochgradig individualisierten Waren führt zu kleinen Losgrößen, die eine höhere Komplexität der Produktionsprozesse implizieren (VDMA, 2016, S. 15). Dies gilt insbesondere für Luftfahrtunternehmen, in der heute noch häufig in Einzelfertigung produziert wird (Hansen, 2016). Somit wird eine hohe Effizienz bei kleinen Chargen, bzw. niedrigen Losgrößen entscheidend für die Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Luftfahrtunternehmen. Der Produktionsprozess muss daher flexibel und modular gestaltet werden, wobei die Produktionsplanung eng mit der Auftragsplanung und -abwicklung verknüpft werden muss (IHK München und Oberbayern, 2015). Die KPI der Sub-Dimension "Effizienz bei Kleinchargen" ist in Tabelle 13 enthalten.

Nr.	Key Performance Indikator (KPI)	Quellen
D6.6.1	Nutzt Ihr Unternehmen flexible Produktionssysteme, um selbst Kleinchargen effizient herzustellen?	[16]; [23]

Tabelle 13: Identifizierte KPI für die Sub-Dimension „Effizienz bei Kleinchargen"

5. Zusammenfassung

Abschließend werden Implikationen der erzielten Forschungsergebnisse betrachtet. Darüber hinaus werden Einschränkungen dargestellt, die mit dem gewählten Forschungsdesign einhergehen, und weitere Forschungsmöglichkeiten und mögliche Weiterentwicklungen des Digitalisierungs-KPI-Modells skizziert.

5.1. Implikationen

Dieser Beitrag stellt ein wissenschaftlich fundiertes Digitalisierungs-KPI-Modell vor, welches für alle Partner in den Lieferketten der Luftfahrtindustrie anwendbar ist. Er leistet einen Beitrag zur bestehenden Theorie, indem ein bereichsübergreifendes Digitalisierungs-KPI-Modell bereitgestellt wird, das sich insbesondere auf die soziotechnischen Dimensionen der digitalen Transformation fokussiert. Auf diese Weise finden sowohl technologische, sicherheits- und strategiebezogene als auch organisatorische und humanbezogene Aspekte in ihrem Wirkgeflecht Berücksichtigung. Somit wird Anwendern aus Praxis und Wissenschaft eine ganzheitliche Grundlage für die Bewertung der digitalen Reife von Unternehmen geboten. Diese fußt auf dezidierten quantitativen sowie qualitativen KPI, welche nicht nur eine einmalige Status Quo-Bewertung in den Unternehmen ermögli-

chen, sondern auch ein handlungsleitendes, nachhaltiges Voranschreiten der digitalen Transformation in den Unternehmen unterstützen (Reinhard et al., 2020, S. 50). Die vorgestellten soziotechnischen Dimensionen des Digitalisierungs-KPI-Models inklusive der zugehörigen KPI können in bestehende oder neue Reifegradmodelle integriert werden und diese um Digitalisierungsaspekte erweitern. Auf diese Weise sind Luftfahrtunternehmen sowohl bei der Einführung neuer Technologien als auch der Anpassung bestehender Geschäftsprozesse in der Lage soziotechnische Aspekte der digitalen Transformation strukturiert zu berücksichtigen. Somit schafft das entwickelte Modell eine essenzielle Grundlage für die Wettbewerbsfähigkeit und den Fortbestand ihrer Anwender.

Zwar erfolgte bei der Auswahl sowohl der analysierten existierenden Reifegradmodelle als auch der Indikatoren eine Berücksichtigung, ob diese für die Luftfahrtindustrie von Relevanz sind, dies führte jedoch nicht zu einem Digitalisierungs-KPI-Modell, welches ausschließlich von Luftfahrtunternehmen angewendet werden kann. Während einige Dimensionen einen eindeutigen branchenübergreifenden Charakter aufweisen (bspw. Digitale Führung oder Digitale Inhalterstellung), wird bei anderen der Luftfahrtindustriebezug deutlicher (bspw. Effizienz bei Kleinchargen). Mit Einschränkungen ist das Modell somit branchenübergreifend einsetz- sowie erweiterbar.

Reifegradmodelle können des Weiteren für einen standardisierten Benchmarking-Prozess genutzt werden. So können Manager die digitale Reife ihres eigenen Unternehmens bewerten, aber auch die Ergebnisse mit Peer-Gruppen oder vor- und nachgelagerten Supply Chain Partnern vergleichen. Gerade vor dem Hintergrund der fortschreitenden Konsolidierung der Lieferketten in der Luftfahrtindustrie und des zunehmenden Drucks auf Tier-2- und Tier-3-Zulieferer könnte eine ausgeprägte digitale Reife in Zukunft ein wichtiges Auswahlkriterium für Luftfahrt-OEM und damit ein Wettbewerbsvorteil für KMU werden. Zudem ebnet eine hohe digitale Reife über alle Supply Chain Partner hinweg den Weg zur transparenten, vollvernetzten Wertschöpfungskette (Kersten, Seiter, von See, Hackius & Maurer, 2017, S. 39).

5.2. Limitationen und weiterer Forschungsbedarf

Auch wenn die Forschungsarbeit auf einer definierten Methodik fundiert, ist dieser Beitrag mit einigen Einschränkungen verbunden. Erstens ist die verfügbare wissenschaftliche Literatur aufgrund der Aktualität und Neuartigkeit des Themas derzeit noch begrenzt. Um ein umfassendes Digitalisierungs-KPI-Modell zu entwickeln, war es dringend erforderlich, graue Literatur wie Firmenberichte sowie Branchenrichtlinien und -studien einzubeziehen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Kombination von wissenschaftlicher und grauer Literatur zu einer Erhö-

hung der Qualität des KPI-Modells und Steigerung der Anwendbarkeit für potenzielle Nutzer beigetragen hat. Zweitens wurde das entwickelte Digitalisierungs-KPI-Modell in der Praxis trotz Diskussion in einer Fokusgruppe noch nicht hinreichend validiert. Daher können nur bedingt Aussagen über die Anwendbarkeit oder praktische Messbarkeit des entwickelten Modells getroffen werden. Drittens wird in diesem Beitrag davon ausgegangen, dass alle Indikatoren KPI sind. Wie im Abschnitt 2.2 dargelegt wurde, können einige Indikatoren auch als PI betrachtet werden, was jedoch für den Benutzer sehr individuell ist. Schließlich wird in diesem Beitrag ein soziotechnisches Digitalisierungs-KPI-Modell vorgestellt, wobei die (Sub-) Dimensionen möglicherweise nicht klar voneinander abgegrenzt sind, sondern sich in ihrer Bedeutung überschneiden. Dies ist in Nachfolgearbeiten zu berücksichtigen.

Grundsätzlich ist, wie bereits in Abschnitt 5.1 erläutert, festzuhalten, dass das entwickelte Digitalisierungs-KPI-Modell noch keinen eindeutigen Branchenbezug zur Luftfahrtindustrie aufweist. Jedoch bietet das Modell eine wissenschaftliche Grundlage für die Entwicklung eines Digitalisierungs-Reifegradmodells für produzierende Luftfahrtunternehmen. Basierend auf einem einzelnen KPI oder einer Teilmenge von KPI können in Zusammenarbeit mit Luftfahrtexperten luftfahrtspezifische digitale Reifegrade entwickelt werden. Dementsprechend bilden Workshops oder Fokusgruppen eine geeignete Methodik zur Weiterentwicklung des Modells. Darüber hinaus haben die Diskussionen während der Fokusgruppe gezeigt, dass die Bedeutung der verschiedenen Dimensionen unterschiedlich wahrgenommen wird. Es erscheint deshalb empfehlenswert, bei der Entwicklung eines zukünftigen Reifegradmodells einen Gewichtungsvektor/Ansatz zu bestimmen, z. B. auf der Grundlage eines paarweisen Vergleichs jeder (Sub-) Dimension. Eine weitere Forschungsmöglichkeit ist die erneute Überprüfung der wahrgenommenen Bedeutung von KPI, z. B. in einer quantitativen, groß angelegten Studie mit Luftfahrtexperten. Neben einer höheren Validität der bewerteten Bedeutung könnte diese Studie auch Hinweise darauf liefern, ob es sich bei den Indikatoren um KPI oder PI handelt.

Da die hier dargestellten Ergebnisse auf Literaturanalysen basieren, ist geplant, das entwickelte Digitalisierungs-KPI-Modell gemeinsam mit Experten aus der Luftfahrtindustrie zu diskutieren und gegebenenfalls zu verfeinern, um eine bessere praktische Anwendbarkeit und Messbarkeit zu gewährleisten.

Danksagung

Das vorgestellte Digitalisierungs-KPI-Modell ist Bestandteil des deutsch-kanadischen Forschungsprojektes DIMLA (Digitalization and Internationalization Maturity Level in Aerospace). Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Projektträger Jülich (PtJ) herzlich für die Projektförderung.

Literaturverzeichnis

Azhari, P., Faraby, N., Rossmann, A., Steimel, B. & Wichman, K. S. (2014). Digital Transformation Report (neuland digital vision & transformation, Hrsg.). Köln. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://www.wiwo.de/downloads/10773004/1/DTA_Report_neu.pdf

Berghaus, S., Back, A. & Kaltenrieder, B. (2017). Digital Maturity & Transformation Report 2017 (Institut für Wirtschaftsinformatik (IWI-HSG), Universität St.Gallen, Hrsg.). St. Gallen. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://crosswalk.ch/digital-maturity-and-transformation-report

Bitkom (Hrsg.). (2016). Industrie 4.0 – Status und Perspektiven. Berlin. Zugriff am 20.02.2020. Verfügbar unter https://www.bitkom.org/sites/default/files/file/import/160421-LF-Industrie-40-Status-und-Perspektiven.pdf

Bowersox, D. J., Closs, D. J. & Drayer, R. W. (2005). The Digital Transformation: Technology and Beyond. Supply Chain Management Review, 9(1), 22–29.

Brennen, J. S. & Kreiss, D. (2016). Digitalization. In K. Jensen, R. T. Craig, J. Pooley & E. W. Rothenbuhler (Hrsg.), The international encyclopedia of communication theory and philosophy (The Wiley Blackwell-ICA international encyclopedias of communication, S. 556–566). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.

Brödner, P. (2018). Industrie 4.0 und Big Data – wirklich ein neuer Technologieschub? In H. Hirsch-Kreinsen, P. Ittermann & J. Niehaus (Hrsg.), Digitalisierung industrieller Arbeit (S. 323–346). Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. https://doi.org/10.5771/9783845283340-322

BSP Business School Berlin. (2016). Mitelstand im Wandel - Wie ein Unternehmen seinen digitalen Reifegrad ermitteln kann. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter http://kommunikation-mittelstand.digital/content/uploads/2017/01/Leitfaden_Ermittlung-digitaler-Reifegrad.pdf

Buhse, W. (2014). Management by Internet. Neue Führungsmodelle für Unternehmen in Zeiten der digitalen Transformation; Unternehmen im Wandel, digitale Medien als Werkzeugkoffer für Veränderer, Vernetzung, Offenheit, Partizipation und Agilität als Werte einer neuen Unternehmenskultur. Kulmbach: Plassen.

Carretero, S., Vuorikari, R. & Punie, Y. (2017). DigComp 2.1. The digital competence framework for citizens with eight proficiency levels and examples of use (EUR, Scientific and technical research series, Bd. 28558). Luxembourg: Publications Office.

Deloitte. (2018). Digital Maturity Model. Achieving digital maturity to drive growth. Deloitte. Zugriff am 16.11.2018. Verfügbar unter https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/global/Documents/Technology-Media-Telecommunications/deloitte-digital-maturity-model.pdf

Deuse, J., Weisner, K., Hengstebeck, A. & Busch, F. (2015). Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In A. Botthof & E. Hartmann (Hrsg.), Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0 (Bd. 108, S. 99–109). Berlin: Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45915-7_11

Dombrowski, U., Wullbrandt, J. & Fochler, S. (2019). Kompetenzentwicklung in der digitalen Transformation: dezentrales und lebenslanges Lernen im Arbeitsprozess. In D. Spath & B. Spanner-Ulmer (Hrsg.), Digitale Transformation – Gutes Arbeiten und Qualifizierung aktiv gestalten (Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation, S. 21–50). Berlin: GITO Verlag.

Dregger, J., Niehaus, J., Ittermann, P., Hirsch-Kreinsen, H. & ten Hompel, M. (2016). The digitization of manufacturing and its societal challenges: a framework for the future of industrial labor. In ETHICS (ed.), IEEE International Symposium on Ethics in Engineering, Science and Technology (ETHICS). May 13-14, 2016, Vancouver, BC, Canada (S. 1–3). Piscataway, NJ: IEEE.

EFQM. (2012). EFQM Excellence Modell. Brussels: European Foundation for Quality Management.

Esposito, M., Lazoi, M., Margarito, A. & Quarta, L. (2019). Innovating the Maintenance Repair and Overhaul Phase through Digitalization. Aerospace, 6(53), 1–14. https://doi.org/10.3390/aerospace6050053

European Commission. (2019). The Digital Economy and Societyx Index (DESI). Integration of Digital Technology. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://ec.europa.eu/newsroom/dae/document.cfm?doc_id=59979

Fink, A. (2014). Conducting research literature reviews. From the internet to paper (Fourth edition). Thousand Oaks, California: SAGE.

Franceschini, F., Galetto, M. & Maisano, D. (2019). Designing Performance Measurement Systems. Theory and Practice of Key Performance Indicators (Management for professionals). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01192-5

Geissbauer, R., Vedso, J. & Schrauf, S. (2016). Industry 4.0: Building the digital enterprise (pwc, Hrsg.). Zugriff am 20.11.2018. Verfügbar unter https://www.pwc.com/gx/en/industries/industries-4.0/landing-page/industry-4.0-building-your-digital-enterprise-april-2016.pdf

Guffarth, D. (2016). Ambidextrie in Netzwerken komplexer Produkte. Exploration und Exploitation in der Luftfahrtindustrie (1. Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.

HAMBURG AVIATION e.V. (Hrsg.). (2020). Kanada-Kooperation. Die Luftfahrtstandorte Hamburg und Montréal haben eine offizielle Kooperation gestartet. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter https://www.hamburg-aviation.de/kanada-kooperation.html

Hansen, S. (MTU Aero Engines AG, Hrsg.). (2016). Industrie 4.0 in der Luftfahrt. Intelligente Fabrikation in der Luftfahrtindustrie. MTU AEROREPORT. Zugriff am 17.06.2020. Verfügbar unter https://aeroreport.de/de/innovation/industrie-4-0-in-der-luftfahrt

Hausladen, I. (2016). IT-gestützte Logistik. Systeme - Prozesse - Anwendungen (3., aktualisierte und erweiterte Auflage). Wiesbaden: Springer Gabler.

Hölzle, K., Gerhardt, F. & Petzolt, S. (2019). Reifegradmessung zur digitalen Transformation von KMU. Potsdam. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28402.66242

IBF Intranet Benchmarking Forum. (2010). Digital Workplace Maturity Model. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter https://www.scribd.com/document/293841194/Digital-Workplace-Maturity-Model

IHK München und Oberbayern. (2015). Selbstcheck - Industrie 4.0 München. Zugriff am 18.05.2020. Verfügbar unter https://ihk-industrie40.de/selbstcheck/

Initiative Supply Chain Excellence (Hrsg.). (2017). Supply Chain Excellence in der deutschen Luftfahrtindustrie. Status Quo und Perspektiven für den Luftfahrtstandort Deutschland. Zugriff am 23.01.2020. Verfügbar unter https://www.german-aerospace.de/wp-content/uploads/2017/07/240606_Studie-SCE-in-Deutschland.pdf

Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. (2013). Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. Zugriff am 18.10.2018. Verfügbar unter https://www.bmbf.de/files/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf

Kamprath, N. (2011). Einsatz von Reifegradmodellen im Prozessmanagement. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, 48(6), 93–102. https://doi.org/10.1007/BF03340648

Kersten, W., Schröder, M. & Indorf, M. (2017). Potenziale der Digitalisierung für das Supply Chain Risikomanagement: Eine empirische Analyse. In M. Seiter, L. Grünert & S. Berlin (Hrsg.), Betriebswirtschaftliche Aspekte von Industrie 4.0 (S. 47–74). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Kersten, W., Seiter, M., von See, B., Hackius, N. & Maurer, T. (2017). Trends and Strategies in Logistics and Supply Chain Management. Digital Transformation Opportunities. Hamburg: DVV Media Group GmbH.

Kersten, W., von See, B. & Indorf, M. (2018). Digitalisierung als Wegbereiter für effizientere Wertschöpfungsnetzwerke. In A. Khare, D. Kessler & J. Wirsam (Hrsg.), Marktorientiertes Produkt- und Produktionsmanagement in digitalen Umwelten (S. 101–117). Wiesbaden: Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-21637-5_8

Kotarba, M. (2017). Measuring Digitalization - Key Metrics. Foundations of Management, 9, 123–138. https://doi.org/10.1515/fman-2017-0010

KPMG. (2016). Digital Readiness Assessment. KPMG. Zugriff am 14.04.2020. Verfügbar unter https://atlas.kpmg.de/business-assessments/digital-readiness-assessment.html

Krol, F., Saeed, M. A. & Kersten, W. (im Druck). Developing a Holistic Digitalization KPI Framework for the Aerospace Industry. In W. Kersten, T. Blecker & C. M. Ringle (Hrsg.), HICL 2020 - New Ways of Creating Value in Supply Chains and Logistics (Bd. 14, 1. Aufl., Bd. 20). Berlin: epubli GmbH.

Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millac, A. et al. (2015). Industrie 4.0 Readiness. Aachen, Cologne: VDMA's IMPULS-Stiftung. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/26342484/Industrie_40_Readiness_Study_1529498007918.pdf/0b5fd521-9ee2-2de0-f377-93bdd01ed1c8

Nabitz, U., Klazinga, N. & Walburg, J. (2000). The EFQM excellence model: European and Dutch experiences with the EFQM approach in health care. International Journal for Quality in Health Care, 12(3), 191–202. https://doi.org/10.1093/intqhc/12.3.191

Neely, A., Gregory, M. & Platts, K. (1995). Performance measurement system design. International Journal of Operations & Production Management, 15(4), 80–116. https://doi.org/10.1108/01443579510083622

Parmenter, D. (2015). Key performance indicators. Developing, implementing, and using winning KPIs (Third edition). Hoboken: Wiley.

Parmenter, D. (2019). Key Performance Indicators: Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119620785

Reinhard, H., Rentz, R. & Sommerfeld, T. (2020). Digitalisierung steuerbar machen. Controlling & Management Review, 64(2), 46–51. https://doi.org/10.1007/s12176-019-0083-9

Roland Berger (Hrsg.). (2018). Aerospace & Defense Radar 2018: disruption as a threat to traditional business models. München. Zugriff am 02.06.2020. Verfügbar unter https://www.rolandberger.com/en/Publications/Aerospace-defense-disruption-as-a-threat-to-traditional-business-models.html

Santo, M., Maire, S., Schmid, J., Maisonneuve, F., Wenzel, S., Dintrans, O. et al. (2019). Competitiveness of European Aerospace Suppliers. A Joint Analysis of France and Germany (h&z Unternehmensberatung AG, Hrsg.). Zugriff am 20.02.2020. Verfügbar unter https://huz.de/wp-content/uploads/2019/03/20180425-hz_KeaPartners-Aerospace-supplier-study-_released-final-small8061.pdf

Santo, M. & Wenzel, S. (2020). Studie: Auswirkungen der Corona-Pandemie auf die deutsche mittelständische Luftfahrtzulieferindustrie (h&z Unternehmensberatung AG, Hrsg.). Berlin/München. Zugriff am 02.06.2020. Verfügbar unter https://www.bavairia.net/fileadmin/Redaktion/Anlagen___Downloads/Corona/20200417_BDLI_Studie_Covid-19_Luftfahrtzulieferindustrie_-_h_z_lang.pdf

Schuh, G., Anderl, R., Gausemeier, J., ten Hompel, M. & Wahlster, W. (Hrsg.). (2017). Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten (acatech STUDIE). Zugriff am 18.10.2018. Verfügbar unter http://www.acatech.de/de/publikationen/empfehlungen/acatech/detail/artikel/industrie-40-maturity-index-die-digitale-transformation-von-unternehmen-gestalten.html

Schumacher, A., Erol, S. & Sihn, W. (2016). A Maturity Model for Assessing Industry 4.0 Readiness and Maturity of Manufacturing Enterprises. Procedia CIRP, 52, 161–166. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040

Stalnaker, T., Usman, K. & Tylor, A. (2017). Airline Economic Analysis. 2016-2017 Edition (Oliver Wyman, Hrsg.). New York. Zugriff am 17.07.2020. Verfügbar unter https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2017/jan/aea/NEW_NYC-MKT59202-002_AirlineEconomicAnalysis_2016-17_web.pdf

Stegkemper. (2016). Digitalisierung der Aerospace Supply Chain – Komplexe Aerospace-Supply-Chain-Netzwerke erfolgreich steuern. Zugriff am 02.06.2020. Verfügbar unter https://www.supplyon.com/img/Studie_Digitalisierung_Aerospace-Supply-Chain_2016_DE.pdf

Stowasser, S. & Peschl, A. (2019). Arbeitswelt im Wandel: Qualifizierung zu resilienzfördernder Führung. In D. Spath & B. Spanner-Ulmer (Hrsg.), Digitale Transformation – Gutes Arbeiten und

Qualifizierung aktiv gestalten (Schriftenreihe der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation, S. 143–162). Berlin: GITO Verlag.

VDMA. (2016). Guideline Industrie 4.0. Guiding principles for the implementation of industrie 4.0 in small and medium sized businesses. VDMA, DIK, WBK. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/vdma-guideline-industrie-40.pdf

Von See, B. (2019). Ein Handlungsrahmen für die digitale Transformation in Wertschöpfungsnetzwerken. Dissertation. TUHH, Hamburg. https://doi.org/10.15480/882.2513

Vuorikari, R., Punie, Y., Carretero Gomez S. & Van den Brande, G. (2016). DigComp 2.0: The Digital Competence Framework for Citizens. The Conceptual Reference Model (EUR 27948 EN). Luxembourg Publication Office of the European Union. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC101254/jrc101254_digcomp%202.0%20the%20digital%20competence%20framework%20for%20citizens.%20update%20phase%201.pdf https://doi.org/10.2791/11517

Waspodo, B., Ratnawati, S. & Halifi, R. (2018). Building Digital Strategy Plan at CV Anugrah Prima, an Information Technology Service Company. In The 6th International Conference on Cyber and IT Service Management (CITSM 2018) (S. 1–4). https://doi.org/10.1109/CITSM.2018.8674281

Wolf, T. & Strohschen, J.-H. (2018). Digitalisierung: Definition und Reife. Informatik-Spektrum, 41(1), 56–64.

Wrobel, M., Schildhauer, T. & Preiß, K. (2017). Kooperation zwischen Startups und Mittelstand. Learn. Match. Partner (Alexander von Humboldt Institut für Internet und Gesellschaft (HIIG), Hrsg.). Berlin. Zugriff am 17.07.2020. Verfügbar unter https://www.hiig.de/wp-content/uploads/2017/11/Kooperationen_Startups_Mittelstand_small.pdf

Literaturverzeichnis KPI-Tabellen

[1] Andersen, K. V., Beck, R., Wigand, R. T., Bjùrn-Andersen, N. & Brousseau, E. (2004). European e-commerce policies in the pioneering days, the gold rush and the post-hype era. Information Polity: The International Journal of Government & Democracy in the Information Age, 9(3/4), 217–232. Zugriff am 18.05.2020. Verfügbar unter https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=buh&AN=17109068&lang=de&site=ehost-live

[2] Azhari, P., Faraby, N., Rossmann, A., Steimel, B. & Wichman, K. S. (2014). Digital Transformation Report (neuland digital vision & transformation, Hrsg.). Köln. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://www.wiwo.de/downloads/10773004/1/DTA_Report_neu.pdf

[3] Berghaus, S., Back, A. & Kaltenrieder, B. (2017). Digital Maturity & Transformation Report 2017 (Institut für Wirtschaftsinformatik (IWI-HSG), Universität St.Gallen, Hrsg.). St. Gallen. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://crosswalk.ch/digital-maturity-and-transformation-report

[4] Bumbac, R. & Vasilcovschi, A. (2016). Digitalization Progresses in European Catching-up Countries - The Case of Romania. Basiq International Conference: New Trends in Sustainable Business and Consumption 2016, 40–49. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter http://conference.ase.ro/wp-content/uploads/2018/01/BASIQ_Volume2016.pdf

[5] Cámara, N. & Tuesta, D. (2016). DiGiX: The Digitization Index. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter https://www.bbvaresearch.com/en/publicaciones/digix-the-digitization-index/

[6] Colecchia, A. (2000). Defining and Measuring Electronic Commerce. Towards the development of an OECD methodology. OECD, Paris. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter https://docplayer.net/12163491-Defining-and-measuring-electronic-commerce-towards-the-development-of-an-oecd-methodology.html

[7] Corrocher, N. & Ordanini, A. (2002). Measuring the digital divide: a framework for the analysis of cross-country differences. JOURNAL OF INFORMATION TECHNOLOGY, 17(1), 9–19. https://doi.org/10.1080/02683960210132061

[8] Digital in NRW - Kompentenzen für den Mittelstand. (o.D.). Quick Check Industrie 4.0 Reifegrad. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter https://indivsurvey.de/umfrage/53106/uHW7XM

[9] Dobrolyubova, E., Alexandrov, O. & Yefremov, A. (2017). Is Russia Ready for Digital Transformation? Communications in Computer and Information Science, (745), 431–444. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69784-0

[10] Dudzeviciute, G., Simelyte, A. & Liucvaitiene, A. (2017). The Application of Smart Cities Concept for Citizens of Lithuania and Sweden: Comperative Analysis. Independent Journal of Management & Production (IJM&P), 8(4), 1433–1450. https://doi.org/10.14807/ijmp.v8i4.659

[11] EFQM. (2012). EFQM Excellence Modell. Brussels: European Foundation for Quality Management.

[12] Evangelista, R., Guerrieri, P. & Meliciani, V. (2014). The economic impact of digital technologies in Europe. Economics of Innovation & New Technology, 23(8), 802–824. https://doi.org/10.1080/10438599.2014.918438

[13] Falk, M. & Biagi, F. (2017). Relative demand for highly skilled workers and use of different ICT technologies. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84983080851&doi=10.1080%2f00036846.2016.1208357&partnerID=40&md5=7715e4943a344adc041e5a5eddb21de6

[14] Forrester. (o.D.). Digital Transformation Assessment. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://forrester.co1.qualtrics.com/jfe/form/SV_7WZBAU12u0dJbWl?Q_JFE=qdg

[15] Hanafizadeh, P., Hanafizadeh, M. R. & Khodabakhshi, M. (2009). Extracting core ICT indicators using entropy method. Zugriff am 10.04.2020. Verfügbar unter https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-70449640053&doi=10.1080%2f01972240903028490&partnerID=40&md5=2fc0e6e47f84654826d46756d957d4c3

[16] IHK München und Oberbayern. (2015). Digitalisierung im Mittelstand - Leitfaden Industrie 4.0. Zugriff am 18.05.2020. Verfügbar unter https://ihk-industrie40.de/selbstcheck/

[17] Kotarba, M. (2017). Measuring Digitalization - Key Metrics. Foundations of Management, 9, 123–138. https://doi.org/10.1515/fman-2017-0010

[18] Lichtblau, K., Stich, V., Bertenrath, R., Blum, M., Bleider, M., Millac, A. et al. (2015). Industrie 4.0 Readiness. Aachen, Cologne: VDMA's IMPULS-Stiftung. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://industrie40.vdma.org/documents/4214230/26342484/Industrie_40_Readiness_Study_1529498007918.pdf/0b5fd521-9ee2-2de0-f377-93bdd01ed1c8

[19] McConnell International and Witsa. (2001). Ready? Net. Go! Partnerships Leading the Global Economy. McConnell International and Witsa. Zugriff am 24.11.2018. Verfügbar unter http://www.mcconnellinternational.com/ereadiness/ereadiness2.pdf

[20] Pwc. (o.D.). Industry 4.0 - Enabling Digital Operations Self Assessment. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://i40-self-assessment.pwc.de/i40/landing/

[21] Soldatos, J., Gusmeroli, S., Malo, P., and Di Orio, G. (2016). Digitising the Industry – Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds. In P. Friess (Hrsg.), Digitising the industry: internet of things connecting the physical, digital and virtual worlds.. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://www.researchgate.net/publication/305033020_Internet_of_Things_Applications_in_Future_Manufacturing

[22] Strategy & Transformation Consulting. (o.D.). Digital Maturity Assessment (DMA) . Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://www.strategy-transformation.com/digital-maturity-assessment/

[23] VDMA. (2016). Guideline Industrie 4.0. Guiding principles for the implementation of industrie 4.0 in small and medium sized businesses. VDMA, DIK, WBK. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/vdma-guideline-industrie-40.pdf

[24] Vuorikari, R., Punie, Y., Carretero Gomez S. & Van den Brande, G. (2016). DigComp 2.0: The Digital Competence Framework for Citizens. The Conceptual Reference Model (EUR 27948 EN). Luxembourg Publication Office of the European Union. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC101254/jrc101254_digcomp%202.0%20the%20digital%20competence%20framework%20for%20citizens.%20update%20phase%201.pdf https://doi.org/10.2791/11517

[25] World Economic Forum, INSEAD (Baller, S., Dutta, S. & Lanvin, B., Hrsg.). (2016). The Global Information Technology Report 2016. Innovating in the Digital Economy. Zugriff am 18.05.2020. Verfügbar unter http://www3.weforum.org/docs/GITR2016/WEF_GITR_Full_Report.pdf

[26] Žwaková, M. (2018). The conditions for digitalization and industry 4.0 development in selected European states. S. 484 - 497. Zugriff am 08.04.2020. Verfügbar unter https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85051421329&partnerID=40&md5=46f8211014869c32a756ca1a370ac938

Homeoffice vor, während und nach der Corona-Krise

Lessons learned für den resilienzförderlichen Personaleinsatz

Uta Wilkens

Institut für Arbeitswissenschaft, Ruhr-Universität Bochum

1. Einleitung

Die Auseinandersetzung mit Homeoffice-Konzepten und digitaler Führung war schon vor der Corona-Krise ein wichtiger Diskussionspunkt zur Entwicklung der Arbeitswelt und Nutzung der Digitalisierungspotenziale. Umfragen zufolge konnte bis zum Ausbruch der Pandemie der Wunsch vieler Beschäftigter nach mehr Homeoffice-Möglichkeiten nicht in angemessener Weise erfüllt werden. Brenke (2016) berichtet für 2016, dass nur zwölf Prozent der Beschäftigten vom Homeoffice aus tätig seien, obgleich bei 40 Prozent die Arbeitsaufgaben dafür prinzipiell geeignet erschienen. Als Hauptmotiv der Beschäftigten wird die zeitliche Autonomie und nicht nur die Vereinbarkeit von Familie und Beruf angegeben; der Wunsch nach einem flexiblen Arbeitsort zeigt sich als unabhängig vom Familienstand hoch ausgeprägt. Eine Statista-Umfrage von 2017 zeichnet ein ähnliches Bild, dass fast die Hälfte der dort Befragten Homeoffice oder Telearbeit begrüßen, diese Möglichkeit zu dem Zeitpunkt aber nur bei 16 Prozent betrieblicherseits bestand (s. Abb. 1). Auffällig ist auch, dass Beschäftigte den regelungsarmen Arbeitszeitmodellen ohne Zeiterfassung, wie Vertrauensarbeitszeit, mehr Zuspruch gewähren als diese in der praktischen Umsetzung erfahren (s. Abb. 1). Eine mögliche Entgrenzung zwischen Arbeits- und Freizeit, die vor allem bei Vertrauensarbeitszeit kritisch angemerkt wird (dazu Janke et al. 2014), scheint sich bei der Frage nach persönlichen Präferenzen als nicht problematisch darzustellen. Für Arbeitskräfte überwiegt der Vorteil der Zeitautonomie, auch wenn die Flexibilisierung von Arbeitszeit und Arbeitsort oftmals mit längeren Arbeitszeiten einhergeht (Brenke 2016; ähnlich Seitz/Rigotti 2018). Der Vollständigkeit halber sei darauf

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_7

hingewiesen, dass nach einem Urteil des EuGH verbindliche Zeiterfassung zukünftig auch im nationalen Recht zu verankern ist (Pressemitteilung Nr. 61/19 des EuGH).

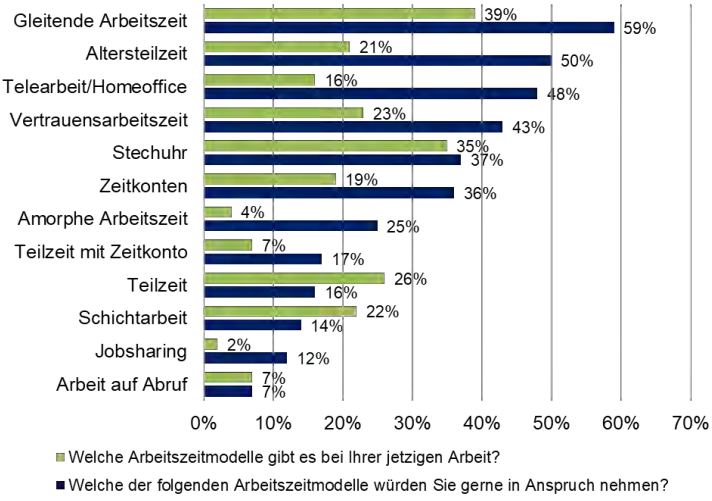


Abbildung 1: Online-Befragung zu Arbeitszeitpräferenzen in Deutschland (n = 1059 Vollzeitbeschäftigte ab 18 Jahre), Quelle: Statista-Umfrage 2017

Den Ursachen für eine vergleichsweise geringe Umsetzung – auch in den Bereichen, in denen Homeoffice organisatorisch grundsätzlich realisierbar erscheint – wurde nachgegangen. Die Synopse von Blagoev et al. (2018) zur Persistenz von Arbeitszeitregimen verweist auf ein Bündel institutionalisierter, unhinterfragter und sich in der Folge selbst reproduzierender und verstärkender Praktiken der Arbeitswelt, durch die bestehende Strukturen und Herrschaftsverhältnisse manifestiert werden. Die Autoren betonen ein wirkmächtiges multi-faktorielles Gefüge, das Pfadabhängigkeiten verursacht und demzufolge Veränderungen nahezu verunmöglicht. Es sind nicht nur die Beweggründe des Managements, wonach (lange) Präsenz am Arbeitsplatz als Ausdruck von Loyalität, Identifikation mit der Arbeit und Leistung gedeutet und von Arbeitnehmerseite dann in korrespondierenden Verhaltensmustern widergespiegelt werden (Williams et al. 2016). Auch auf Seiten der betrieblichen Interessenvertretung ist das Anliegen verbreitet, bei einem mitbestimmungspolitisch relevanten Thema eine Vor-Ort-Kontrollmöglichkeit zu haben. Homeoffice entzieht sich tendenziell der Sphäre betrieblicher Mittbestimmung und eine unhinterfragte freiwillige Mehrarbeit steht im Konflikt zum Ar-

beitsschutz. Letztlich hat eine arbeitszeitbezogene Erfassung gegenüber einer ergebnisbezogenen Erfassung von Leistung auch eine Schutzfunktion, wenn Pflichterfüllung durch Anwesenheit als gegeben angenommen werden kann. Es gibt eine Tendenz Homeoffice mit Blick auf Arbeits- und Gesundheitsschutz eher kritisch zu beäugen (Kreiner 2006; Seitz/Rigotti 2018; Janke et al. 2014), auch wenn von individueller Seite ein hohes Wohlbefinden berichtet wird (Hill et al. 2003). Die Bewertung rührt daher, dass die Ausübung der Schutzfunktion dann weniger im unmittelbaren betrieblichen Regelungsrahmen liegt als beim betriebsinternen Arbeitsplatz.

Auch wenn man bis vor Kurzem noch von einer Wirkmächtigkeit des bestehenden Gefüges von Arbeitszeit und Arbeitsort ausgehen konnte, so wurde diese im Zuge der Corona-Pandemie doch außer Kraft gesetzt. Viele Unternehmen haben spätestens Mitte März 2020 binnen einer Woche nahezu ihre gesamten Arbeitsprozesse ins Homeoffice überführt soweit sie nicht unmittelbar dem Basisbetrieb vor Ort dienten oder zwingende betriebliche Gründe dagegen sprachen. In den nicht produktionsbezogenen wissensintensiven Bereichen, die keine Vor-Ort-Versorgung, z.B. von Patienten, erforderten, ging dieser Anteil an die hundert Prozent. Dies ist zugleich der Bereich, in dem der Wunsch nach Homeoffice besonders ausgeprägt ist (Brenke 2016). Sogar die sonst stark auf face-to-face ausgerichteten Kundenbetreuungen wurden über Informations- und Kommunikationstechnologien vom Homeoffice aus wahrgenommen.

Parallel wurden in betrieblichen Produktionsprozessen Abstände zwischen Arbeitsplätzen vergrößert, Schutzmasken eingeführt und ggf. auch Schichtsysteme durch Veränderung von Anfangs- und Endzeiten so modifiziert, dass das Maß der Begegnungen reduziert werden konnte. Daraus ergibt sich für Betriebe in Deutschland die kollektive, flächendeckende und branchenübergreifende Erfahrung, dass weitreichende arbeitsorganisatorische Veränderungen binnen kürzester Zeit umgesetzt werden können. Neuerliche Umfragen berichten, dass fast ein Drittel der derzeit im Homeoffice tätigen Beschäftigten sich dieses Modell dauerhaft wünscht (Frankfurter Allgemeine Zeitung 2020, 21.04.). Folgt man der aktuellen Stimmungslage, so wird es kein vollständiges Zurück zum ursprünglichen Regime von Arbeitszeit und Arbeitsort geben; fortan können sich neue Modelle aufgrund veränderter Gesamtbewertungen hinsichtlich der effizienten Umsetzung dieser Personaleinsatzkonzepte etablieren.

Wenn der zukünftige Gestaltungsspielraum für Homeoffice-Konzepte wächst, dann stellt sich die Frage nach einer Einordnung der derzeitigen Praxis, welche Modelle angesichts neuerlicher Erfahrung besonders zukunftsweisend sein können, welche indessen eher nicht. Das Ziel dieses Beitrags ist es, eine qualitative

Bestandsaufnahme und kriteriengeleitete Bewertung der praktizierten Homeoffice-Varianten vorzunehmen, um festzuhalten, welche Gestaltungsformen über den Krisenmodus hinaus zukunftsweisend sein können. In die Bestandsaufnahme und Einordnung fließen auch Homeoffice-Konzepte bzw. Ansätze mobiler Arbeitsorte ein, die bereits vor der Corona-Pandemie etabliert waren. Denn trotz des angedeuteten Entwicklungsstaus gab es ja bereits Erfahrungsbereiche, die sich dann wiederum in der Krise bewähren mussten.

Im Folgenden wird zunächst eingeordnet, warum sich unter den derzeitigen Krisenbedingungen die Grundannahmen zu vielen arbeitspolitischen Regelungsbereichen so grundsätzlich ändern konnten. Es wird zudem auf die speziellen Rahmenbedingungen des Pandemieschutzes eingegangen, unter denen sich aktuelle Varianten von Homeoffice herausgebildet haben oder bestehende bewähren mussten. Darauf aufbauend werden bereits bekannte und neu hinzukommende Varianten qualitativ exploriert und hinsichtlich ihres Zukunftspotentials bewertet, inwieweit sie zu einer krisenfesten neuen Form von Arbeitsorganisation und Personaleinsatz beitragen können. Diese Bewertung legt Kriterien zum Arbeits- und Gesundheitsschutz, zur strukturellen Redundanz (Resilienz), zur Verlässlichkeit der technisch-organisatorischen Rahmenbedingungen, zu den individuellen Fähigkeiten der Beschäftigten und zur Kongruenz zwischen Homeoffice und Führungsansatz zugrunde. Die Ausführungen münden in einem Plädoyer für mehr resilienzförderliche Homeoffice-Varianten.

2. Grundlegende Einordnungen

2.1. Krise als Auslöser von Wandel

Grundsätzlich findet das Thema Unternehmenskrisen in der Forschung eher zyklisch in Abhängigkeit von konjunkturellen und wirtschaftlichen Krisen Aufmerksamkeit. Die Managementforschung hat sich zuletzt auf die Finanzkrise bezogen. International wurde auch die Ausbreitung von Ebola reflektiert (Barasa et al. 2018). Diesbezügliche Arbeiten zur Resilienz können am ehesten die Dimension der Corona-Pandemie als Ansatz zur Krisenbewältigung aufgreifen. Für eine grundsätzliche Einordnung des Geschehens erweist sich die sozialwissenschaftliche Perspektive von Rosenthal et al. (2001), die sich auf gesellschaftliche und ökonomische Herausforderungen bei Entscheidungen unter höchster Unsicherheit und Verunsicherung bezieht, als geeignetes Fundament. Die Autoren heben die folgenden zentralen Merkmale von Krisen hervor:

- Phase starker Diskontinuität – es ergeben sich völlig neue Rahmenbedingungen, so dass bestehende, etablierte Praktiken nicht mehr weiter verfolgt werden können

- Hohe Verunsicherung – es gibt kein verlässliches Wissen hinsichtlich der Angemessenheit von Entscheidungen und alternativer Handlungsmuster
- Extremes kollektives Stressniveau – bedingt durch die hohe Unsicherheit unter gleichzeitigem Handlungsdruck, der alle Lebens- und Arbeitsbereiche erfasst, treten Stressfaktoren nicht nur personell, sondern kollektiv auf
- Zerstörung alltäglicher Handlungsmuster und Strukturen – diese dürfen oder können nicht mehr weiter praktiziert werden und erscheinen in hohem Maße ineffizient
- Hinterfragen/Zerstörung von Wertsystemen und Normen – auch soziale Handlungspraktiken werden völlig neu bewertet und verändert, z.B. Distanz halten statt Nähe zeigen als Ausdruck sozialer Kompetenz
- Hohe Interdependenzen, systemischer Charakter; vermehrt von transnationaler Dimension – durch Vernetzung der Gesellschaftssysteme und hohe internationale Mobilität ergibt sich eine schnelle globale Ausbreitung
- Unterschiedliche Situationsbewertungen und Ansätze des Denkbaren – dies betrifft das Ausmaß der Krise, die Angemessenheit von Praktiken und die zu berücksichtigenden Nebenwirkungen von Praktiken gleichermaßen
- Notwendigkeit der Entscheidungsfindung unter hohem zeitlichen Druck und gleichzeitiger Ungewissheit über die Richtigkeit/Angemessenheit einer Entscheidung – es müssen kurzfristig Richtungsentscheidungen getroffen werden, so dass Praktiken zur Umsetzung gelangen, deren Angemessenheit erst später evaluiert werden kann
- Situatives und routineartiges Entscheiden unter nicht-routinisierten Bedingungen ersetzt teilweise den Versuch rationaler Entscheidung (Druck) – durch den Entscheidungsdruck bei mehrdeutiger Entscheidungslage wächst die Tendenz sich andernorts schon getroffenen Entscheidungen anzuschließen anstatt eigene situative Bewertungen vorzunehmen, so dass wiederum dominante Handlungsmuster entstehen, die dann durchaus zur Legitimation der Entscheidung verwendet werden
- Stark emotionale Reaktionsmuster – die starke Verunsicherung und das hohe Stressniveau wirken als Belastungsfaktor, der in hohem Maße emotionale Reaktionsmuster hervorruft.

Rosenthal et al. (2001) zeigen wie es vor dem Hintergrund dieser Konstellation zu völlig neuen Denk- und Handlungsmustern in Wirtschaft und Gesellschaft kommen kann, indem bestehende Strukturen, politische wie soziale Handlungsprakti-

ken fundamental hinterfragt werden und bis dato nicht denkbare Handlungspraktiken Beachtung finden. Dies schließt ggf. auch eine Verschiebung unter den dominanten und besonders beachteten Eliten ein. Die Autoren geben Hinweise zum Krisenmanagement und betonen, dass Krisen immer auch eine Chance zur Erneuerung beinhalten, und dass idealerweise zuvor Routinen für das Krisenmanagement ausgebildet wurden und sich das Management von Krisen nicht nur auf die Prävention beschränken, sondern zum Aufbau von Resilienz genutzt werden sollte. Dies wurde in der aktuellen Literatur mit Blick auf die Ebola-Ausbreitung aufgegriffen (Barasa et al. 2018).

2.2. Homeoffice zur Gesundheitsprävention und Sicherung von Produktivität während der Corona-Pandemie

Ganz im Sinne der Beschreibung von Rosenthal et al. (2001) sind im Zuge der Corona-Pandemie bestehende Personaleinsatzkonzepte als ineffizient und nicht hinreichend für den betrieblichen Gesundheitsschutz bewertet worden. Eine normative Grundlage für den veränderten Personaleinsatz im Falle der Pandemie schafft das Handbuch betriebliche Pandemieplanung (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2010), das eine Reihe von Personalanpassungen für den Arbeitsschutz vorgibt. Neben dem speziellen Schutz von Risikogruppen, erweiterten Hygienemaßnahmen, der räumlichen Distanz zwischen Arbeitsplätzen, der Rückholung von im Ausland eingesetzten Beschäftigten etc. geht es um die Benennung von Personal in Schlüsselfunktionen, die Einrichtung von Telearbeit und Schaffung von Voraussetzungen für die Arbeit von zu Hause aus sowie um die temporäre Deaktivierung nicht unmittelbar benötigten Personals.

Der Betrieb muss präventiv das Infektionsrisiko der eigenen Belegschaftsmitglieder reduzieren. Dies ergibt sich aus der Fürsorgepflicht, aber auch aus dem Interesse an der Aufrechterhaltung der Betriebsabläufe. Treten Infektionen innerhalb eines Betriebes gehäuft auf, kann das Gesundheitsamt in die Betriebsabläufe eingreifen und temporär Betriebsstillegungen erwirken. Daher wird ein Betrieb die Notwendigkeit der Anwesenheit vor Ort oder der Inkaufnahme von Arbeitswegen unter Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel abwägen, wenn dadurch die Infektionsgefahr für Belegschaftsmitglieder steigt. Es kommt offensichtlich zu einer Neubewertung sozialer Praktiken. Der Verbleib im Homeoffice wird gegenüber dem Aufsuchen des Arbeitgebers als verlässlichere, den Betriebsablauf stabilisierende Praktik angesehen.

Die grundsätzliche Entwicklungsrichtung der Betriebe war deutschlandweit übereinstimmend und hat zu einer bis dato nicht gekannten Größenordnung von

Homeoffice geführt. Bei der Umsetzung im Detail gab es allerdings durchaus Unterschiede. Diese lassen sich an der Schnelligkeit der Umsetzung und am Ausmaß neuer arbeitspolitischer Weichenstellungen und der Bewertung des allgemeinen Handlungsdrucks festmachen. Natürlich gibt es Branchenunterschiede, die vor allem den Verwaltungsanteil am Gesamttätigkeitsumfang bestehen; interessant ist aber vor allem, dass auch innerhalb von Branchen und damit im Leistungsspektrum ähnliche Unternehmen trotzdem unterschiedlich gehandelt haben, was das Ausmaß von Homeoffice anbetrifft. Der Umstand extremer Verunsicherung und emotionaler Belastung von Belegschaftsmitgliedern unter teilweise auch veränderter familiärer Rahmenbedingungen durch Schließung von Kitas und Schulen ist in den Managemententscheidungen in unterschiedlicher Weise antizipiert und übersetzt worden. Ein Urteilen über richtig oder falsch ist derzeit weder möglich und angesichts der Mehrdeutigkeit und Ungewissheit der Kontextbedingungen und nicht abschätzbaren späteren Folgen auch nicht angemessen. Es kann aber geschaut werden, welche der praktizierten Homeoffice-Varianten Merkmale aufweisen, die ein besonderes Zukunftspotenzial beinhalten.

Festzuhalten bleibt, dass das Thema Homeoffice unter schlagartig veränderten Rahmenbedingungen neu bewertet wurde. Ausgehend von Notwendigkeiten und normativen Vorgaben zur Gesundheitsprävention wurde darin ein Weg zur Sicherung der Produktivität gesehen. Das in vielen Fällen praktizierte Konzept von Homeoffice hat den Anschein einer temporären Notlösung in vielen Fällen gar nicht erst aufkommen lassen, sondern sich als neue soziale Praktik rasch etabliert. Letztlich traf es ja auch auf eine Sogwirkung vieler Beschäftigter, die schon zuvor Interesse an Homeoffice hatten (s.o.).

Während man bis zum Ausbruch der Pandemie Homeoffice als soziale Innovation wahrgenommen hat, die vereinzelt praktiziert wurde, ist das Homeoffice ausgelöst durch die Krise zum Ort für die Sicherung von Produktivität geworden. Das Thema wurde damit nicht mehr im Kontext von Exploration und Widerstand gegen soziale Neuerung verortet, sondern als Kernbeitrag für Exploitation, als verlässliche Organisation des Leistungsprozesses gesehen (zur Einordnung von Exploration und Exploitation siehe March 1991).

Im Folgenden soll nun eine weitere Differenzierung der Homeoffice-Konzepte, auch unter Rückbezug auf bereits bekannte Praktiken erfolgen, um eine Einordnung zu ermöglichen. Für die Einordnung werden zunächst Gütekriterien aus dem Stand der Forschung abgeleitet.

3. Varianten von Homeoffice vor und während der Krise

3.1. Evaluationskriterien für eine zukunftsgerichtete Entwicklung

Die bisherigen Ausführungen haben bereits erkennen lassen, dass der Diskurs zum Homeoffice mit Fragen zum Arbeits- und Gesundheitsschutz einhergeht. Während bislang problematisiert wurde, dass mit der Flexibilisierung des Arbeitsortes eine tendenzielle Ausweitung der Arbeitszeit einhergehen könne, gilt das Homeoffice im Handbuch für Pandemieplanung als Schutzort, um Infektionsrisiken zu reduzieren. Offensichtlich sind Arbeits- und Gesundheitsschutz ein relevantes Bewertungskriterium. Angelehnt an Rosenthal et al. (2001) sollten Fragen der Prävention idealerweise um Ansätzen zur Resilienz ergänzt werden. Nach Barasa et al. (2018, 491) ist Resilenz definiert als "not just a system's capacity to withstand shocks, but also to adapt and transform." Entsprechend arbeiten die Autoren in ihrer Meta-Analyse die Ressourcen und Fähigkeiten heraus, die den Handlungsspielraum für Adaption und Transformation erhöhen. Dazu zählen materielle Ressourcen, Planungsverhalten, Informationsmanagement, redundante Strukturen und Handlungsalternativen, die betrieblichen Governance-Ansätze, Führungspraktiken, Organisationskultur, Humankapital, Netzwerke und Kooperationsbeziehungen. Rodríguez-Sánchez (2019) betonen stärker die individuellen Fähigkeiten und Grundhaltungen als Beitrag zur organisationalen Resilienz. Windt et al. (2010) heben die systemimmanenten Flexibilitäts- und Adationspotenziale hervor, die die Robustheit erhöhen. Auch hier soll die weiter gefasste Perspektive eingenommen werden, die die strukturelle Sicherung der Adaptionsfähigkeit auf systemischer Ebene berücksichtigt. Dies erweist sich als in hohem Maße anschlussfähig an die allgemeine Diskussion zum Homeoffice. Dort geht es um die technisch-organisatorischen Voraussetzungen für ein reibungsloses Arbeiten (Friedrich 1985), die den Ursprung der Auseinandersetzung gebildet haben, mittlerweile aber eher nur noch hervorgehoben werden, wenn es in diesem Bereich Defizite gibt (Weichbrodt 2014). Es geht ebenso um die individuellen Fähigkeiten, um vom Homeoffice aus tätig zu sein; dies ist ursprünglich sehr stark als digitale Fähigkeit ausgeführt (Wang/Haggerty 2011), mittlerweile aber auch als Fähigkeit zum eigenverantwortlichen Handeln weiter unterfüttert worden (Flüter-Hoffmann et al. 2018). Ursprünge dazu liegen in Ausführungen wonach Telearbeit und Homeoffice im Zusammenhang mit unternehmerisch eigenverantwortlichem Handeln stehen (Reichwald, 2000). Ebenso geht es um korrespondierende Führungsansätze, um Arbeitskräfte bei der eigenverantwortlichen Arbeit zu unterstützen (Illegems/Verbeke 2004; Lautsch et al. 2009; Hoch/Kozlowski 2014; Flüter-Hoffmann et al. 2018). Verbindet man diese Diskurse zu einem Evaluationsraster, so ergeben sich folgende Kriterien:

- Arbeits- und Gesundheitsschutz ist gewährleistet
- Technisch-organisatorische Voraussetzungen, einschließlich der Informationsflüsse, sind gesichert
- Individuelle Fähigkeiten im eigenverantwortlichen Handeln sind ausgeprägt
- Führungsansätze unterstützen die Tätigkeit vom Homeoffice, worin auch eine organisationskulturelle Verankerung angenommen werden kann
- Homeoffice erweitert Handlungsalternativen und stärkt die strukturelle Redundanz (Resilienz i.e.S.)

Im weitesten Sinne lassen sich alle genannten Kriterien als Beitrag zur Resilienz verstehen. Im engeren Sinne und über den bisherigen Diskurs zum Thema Homeoffice hinausgehend, lässt sich die Bewertung der strukturellen Redundanz hier aber als ergänzendes Kriterium aus der Resilienzforschung ableiten.

3.2. Vor der Corona-Krise – Evaluation bekannte Konzepte von Homeoffice und mobiler Arbeit

Auch wenn Homeoffice bis vor Kurzem nicht sehr stark verbreitet war, so gab es doch in Teilbereichen der Arbeitswelt eine etablierte Praxis. Diese lässt sich entlang von zwei Grundvarianten beschreiben, einer ortgebundenen und einer mobilen Variante (Kleemann 2017).

3.2.1. Das ortsgebundene Homeoffice in ausgeregelter Form

Die ortsgebundene Gestaltungsform findet man als geregelte, üblicherweise in Betriebsvereinbarungen abgestimmte Variante. Es wird sichergestellt, dass die Gewährung von Homeoffice an Voraussetzungen geknüpft ist und in wechselseitig abgesicherter Form erfolgen kann. Für die Gewährung muss nachgewiesen sein, dass die vom Homeoffice aus erledigten Aufgaben dafür geeignet sind und dass das häusliche Büro als räumlich vollständig getrennter und abschließbarer Bereich zur Verfügung steht, der die Arbeitsfähigkeit in technisch-organisatorischer Sicht gewährleistet und unter Arbeitsschutzgesichtspunkten eingerichtet wurde. In den Prüfprozess mündet auch ein, dass die Arbeitskraft die Voraussetzungen zum eigenverantwortlichen Handeln mitbringt. Führungskräfte müssen dazu ihr Einverständnis geben. Es findet aber keine Eignungsprüfung der Führungskräfte statt, ob diese einen dem Homeoffice angemessenen Führungsansatz ausüben können. Die Führungsfrage wird mit dem Einverständnis der Führungskraft als hinreichend geklärt angesehen. Hinsichtlich der Informationsflüsse, Erreichbarkeit und Abstimmungsmodi gibt es Absprachen. Die digitale Kommunikation gewährleistet hier eine vollständige Anbindung und den Zugriff auf die betrieblichen Systeme auf

remote-Basis. Die Vereinbarung regelt auch Präsenzen und Abstimmungen im Betrieb.

3.2.2. Die ortsungebundene mobile Arbeit

Die mobile Variante schließt auch das Homeoffice ein, geht aber deutlich darüber hinaus, indem sie vorsieht, dass von jedem Ort aus, der eine technisch-organisatorische Anbindung an den Arbeitgeber erlaubt, Arbeit erbracht werden kann. Zumeist ist diese Variante weniger ausgeregelt, auch wenn es einzelne Beispiele für betriebliche Regelungsabreden zum mobilen Arbeiten gibt. Vorreiter für dieses Modell ist die amerikanische Digitalindustrie, die in Deutschland vor allem auch die Informations- und Kommunikationsbranche mit beeinflusst hat. Hier wird von vornherein auf Ordnungsmuster von Arbeitszeit und Arbeitsort, die aus der industriellen Ära stammen, verzichtet. Dementsprechend gilt zumeist Vertrauensarbeitszeit und eine ergebnisorientierte statt eine zeitorientierte Bewertung von erbrachter Leistung. Das Zusammenspiel zwischen Orten der Arbeit und Orten der Freizeit wird gegenüber der industriellen Ära nahezu umgedreht. Es kann von überall aus gearbeitet werden, aber der Arbeitgeber gilt doch als wichtige kulturell-identitätsbildende, fast magnetische Anlaufstelle, weil man dort Kollegen zum Mittagessen, zum gemeinsamen Sport oder auch für face-to-face Meetings trifft. Man sucht den Arbeitgeber auf, um Freizeitinteressen nachzugehen. Vor Ort gibt es Flex-Büro-Konzepte (Fincke et al. 2018). Für die Arbeitskraft steht kein Büro zur Verfügung, aber sie loggt sich dort ein wo eine Schreibtischfläche frei ist und hinterlässt diese vollständig aufgeräumt und nutzbar für die nächste Person. Die Architektur des Arbeitgebers spielt eine wichtige Rolle und es werden bei Neuimmobilien Campus-Konzepte verfolgt, wie sie ursprünglich durch Google bekannt wurden, aber heute auch bei Vodafone, der Telekom oder vielen mittelgroßen IT-Dienstleistern zu finden sind. Führungskräfte werden gezielt geschult, um Mitarbeiter im eigenverantwortlichen Handeln zu unterstützen und dafür eine Coaching-Rolle auszuüben. Typische Führungsansätze dafür sind Servant Leadership (Greenleaf 1998) und Empowering Leadership (Srivastava et al. 2006; Zhang/Bartol 2010), die auf die Unterstützung und Informationsversorgung durch die Führungskraft abstellen. Dazu gehören auch das Vorleben einer offenen Austauschkultur und der Rückgriff auf Gamification-nahe Komponenten einer Führung auf Distanz, die zugleich den Teamzusammenhalt fördern soll. Das mobile Arbeiten ist in der Regel mehr als eine Praktik zur Wahl des Arbeitsortes, es ist gesamtkulturell eingebunden. Dabei steht immer auch modernste technische Infrastruktur zur Verfügung, deren Bedienung als Fähigkeit vorausgesetzt wird. Es wird deutlich, dass hier eine veränderte Arbeitsphilosophie verfolgt wird, aber es stehen dahinter auch andere ökonomische Überlegungen (Klaffke 2014). Denn die Impulse für neue Bürokonzepte gingen in der Regel vom Gebäudemanagement

aus, um teure Bürofläche einzusparen und eine optimierte Vor-Ort-Flächenbewirtschaftung zu erzielen (Klaffke 2017).

3.2.3. Vergleichende Evaluation

Bewertet man die beiden Grundvarianten hinsichtlich des zuvor beschriebenen Kriterienkatalogs, so gelangt man zu folgender Gesamteinschätzung hinsichtlich der Zukunftsfähigkeit im Sinne einer krisenfesten Variante der Arbeitsorganisation und Personaleinsatzgestaltung (s. Tabelle 1).

Variante **Kriterium**	**Ortsgebunden, Homeoffice**	**Ortsungebunden, mobil**
Arbeits- und Gesundheitsschutz	Explizites Prüfkriterium ++	Nicht hinreichend spezifiziert, mobile Arbeitsplätze und Flex-Konzepte ohne gesicherten Pandemieschutz und insgesamt wenig entwickeltem Arbeitsschutz (s. auch Fincke et al. 2018) -
Technisch-organisatorische Voraussetzungen, Informationsflüsse	Auf struktureller Basis und durch Netzwerkanbindung gesichert ++	Durch technische Ausstattung gesichert und Führungsansatz nachgehalten ++
Individuelle Fähigkeiten im eigenverantwortlichen Handeln	Werden durch Vorgesetzte bestätigt +	Werden schon bei Rekrutierung vorausgesetzt, aber durch Arbeitskultur auch weiter gestärkt ++
Führungsansätze und Arbeitskultur unterstützen die Tätigkeit vom Homeoffice	Kein explizites Führungsthema, Konzept eher entkoppelt vom sonstigen Organisationsgeschehen -	Gelebte Kultur in allen Führungs- und Arbeitspraktiken ++
Strukturelle Redundanz (Resilienz i.e.S.)	Nicht explizit, aber schafft weiteren Erfahrungsraum 0	Nicht auf Redundanz, sondern deren Einsparung hin ausgerichtet -
Gesamteinschätzung	Schafft durch seinen Regelungsrahmen verlässliche Basis für zukunftsgerichtete Entwicklung und bleibt in Krise stabil, ist aber in den Grundkonstellationen so angelegt, dass das Modell nur für einen kleinen Teil der entkoppelt arbeitenden Belegschaft eingesetzt werden kann	Zeigt Stärken in der Führungs- und Arbeitskultur, aber deutliche Schwächen im Lichte der aktuellen Krise, weil Gesundheitsschutz nur im Homeoffice gesichert werden kann und Magnetfunktion des Arbeitsortes mit ihren kulturell-identitätsbildenden Elementen nicht krisenresistent ist

Tabelle 1: Bewertung der Zukunftsfähigkeit bekannter Konzepte des ortsgebundenen und mobilen Arbeitens *(Qualitative Bewertung: ++ sehr hoch ausgeprägt, + hoch ausgeprägt, 0 ansatzweise ausgeprägt, - schwach ausgeprägt)*

3.3. Während der Corona-Krise – Exploration von (temporären) Homeoffice-Varianten

3.3.1. Qualitativ exploratives Vorgehen

Die Herausarbeitung von praktizierten Varianten während der Krise basiert auf qualitativ erhobenen Erfahrungsberichten. Es haben 15 berufstätige Studierende aus dem Mastermodul „Digitaler Wandel" im April 2020 ihre Erfahrungen in Kurzberichten aufgeschrieben, davon hatten 13 unmittelbare Erfahrungen mit pandemiebedingten veränderten Einsatzformen im Homeoffice gemacht. Der berufliche Hintergrund für die Erfahrungsberichte reichte von der Verwaltung bis hin zur Digitalwirtschaft. Eine Teilnehmerin kam aus dem Erfahrungsfeld der zuvor beschriebenen mobilen Arbeit. Es wurde zudem im Mai 2020 ein „Ideenlabor digital" zum Thema „Home Office und digitale Führung" durchgeführt, an dem sich 124 Teilnehmer zur Diskussion angemeldet haben und in dem vier von fünf Unternehmensportraits ganz explizit die Gestaltungsvarianten von Homeoffice aufgezeigt haben. Neben der Arbeitnehmerperspektive konnte dabei auch die Führungsperspektive exploriert werden. Für die Aufarbeitung der Fälle gab es vorbereitende ca. 30 minütige Interviews. Dabei flossen auch Vorerfahrung mit mobilen Arbeitsformen ein. Diskussionsteilnehmer des Ideenlabors haben dann ihre identischen oder abweichenden Erfahrungen eingebracht. Außerdem wurden zum selben Zeitpunkt die praktizierten Varianten im eigenen Arbeitsumfeld und im Umfeld von Freunden und Bekannten durch Fragen nach den Gestaltungsmerkmalen eruiert. Durch Verdichtung der beschriebenen Merkmale ließen sich fünf Grundvarianten identifiziert, die nachfolgend genauer beschrieben werden.

Es handelt sich bei dieser Exploration nicht um ein sorgfältig vorbereitetes Untersuchungsprogramm, das wäre wohl auch kaum möglich gewesen, aber durchaus um einen feldexplorierenden Ansatz, der sich auf Erhebungsformen der empirischen Sozialforschung stützt und dabei in schriftlicher und mündlicher Form vorliegende Berichte auswertet. Mündliche Berichte liegen als Gesprächsnotiz, aber nicht als Interviewtranskription vor.

3.3.2. Identifizierte Erscheinungsformen in der Krise

3.3.2.1. Homeoffice als Parallelorganisation

Ein erster Typus etabliert Homeoffice als Parallelorganisation zum Betrieb vor Ort. Es werden die notwendigen technischen Voraussetzungen dafür geschaffen, aber nicht betont. In der Regel sind diese aufgrund von Vorerfahrungen auch schon vorhanden. Der Fokus liegt hier auf der veränderten Arbeitsorganisation und -koordination zwischen Vor-Ort-Tätigkeit und Arbeit vom Homeoffice. Es werden mehrere parallele Teams mit vergleichbaren Kompetenzen gebildet, um Redun-

danz zu sichern. Eines der Teams arbeitet vor Ort (z.B. 20% der Beteiligten), andere Teams arbeiten vom Homeoffice aus. Die Zuordnung kann rollierend oder durchgehend sein. Im Falle der Infektion innerhalb des Vor-Ort-Teams wird unmittelbar gewechselt und eines des bisherigen Homeoffice Teams übernimmt den Betrieb vor Ort. Umso weniger nicht notwendige Wechsel erfolgen, umso geringer das Risiko, dass Infektionen sich über größere Mitarbeitergruppen ausbreiten. Das Hauptaugenmerk liegt auf der engen und permanenten Koordination zwischen Vor-Ort Team und Homeoffice Teams auf remote-Basis. Dabei haben auch im Homeoffice tätige Mitarbeiter Service-Funktionen für Vor-Ort-Teams. Es findet eine permanente Abstimmung unter den Teams statt. Während bisherige Homeoffice-Konzepte eher temporär entkoppelt vom Basisbetrieb waren, entsteht hier ein stark gekoppeltes remote-Konzept, das auf Teamkoordination und hohe Selbstorganisationsfähigkeit auf Teambasis setzt. Der Einfluss der Führung wird als teilweise hinderlich, aber auch nicht wirklich wirkmächtig beschrieben. Durch die neue Teamorganisation wird ein redundanzförderlicher Strukturansatz verfolgt, der Führung als Regulativ eher zurückdrängt. Ob neue Führungsrollen entwickelt wurden, lässt sich nicht erkennen, wird so aus Mitarbeitersicht jedenfalls nicht berichtet.

Die hier vorgestellte Variante zeigt, dass durch die Aktivierung des Homeoffice als „erweiterte Werkbank" eine bis dato nicht vorhandene Resilienz geschaffen wird, die dem Arbeitsschutz dient und zugleich die Sicherung betrieblicher Arbeitsabläufe erhöht. Die Krisenresistenz für zukünftige Herausforderungen wird durch den verfolgten Ansatz gestärkt. Der Ansatz der dezentral verteilten Parallelstruktur hat mehr stabilitätsbildende Elemente als die reine Arbeit vor Ort. Das Homeoffice bekommt damit ein Attribut, mit dem es bis dato nicht in Verbindung gebracht wurde. Zu finden ist diese Variante in Arbeitsbereichen, in denen ein Teil des Basisbetriebs und der Infrastrukturversorgung im Betrieb verbleiben muss. Es heißt aber nicht, dass alle Organisationen mit diesen Notwendigkeiten einen Weg der Parallelorganisation im Homeoffice gegangen sind oder realisieren konnten.

3.3.2.2. Homeoffice mit Führung als sozialem Kitt

In einer zweiten Variante liegt das zentrale Koordinationsinstrument in der personalen Führung. Dies ist gerade auch bei den im Ursprung mobilen Arbeitsformen der Fall. Diese werden unmittelbar in ortsgebundene Homeoffice-Konzepte überführt. Die weiteren organisatorischen Rahmenbedingungen im Homeoffice spielen wie auch schon zuvor beim mobilen Arbeiten in den Ausführungen keine Rolle. Der Prozess wird als völlig problemlos beschrieben. Es wird dabei auf die technische Ausstattung und die schon zuvor gelebte Arbeitskultur verwiesen. Die entstandenen Einschränkungen werden durch Führungsleistung aufgefangen. Füh-

rungskräfte aktivieren auf digitaler Basis zusätzliche Teamevents, ersetzen den fehlenden gemeinsamen Ort durch virtuelles Teamerleben, um den Zusammenhalt zu fördern.

Diese stark über das Führungshandeln forcierte Entwicklung gibt es auch in Organisationen, die bis dato nahezu keine Vorerfahrung mit flexiblen Arbeitsorten hatten. Hier hat es das Management verstanden, die Veränderungen in eine wertebasierte Kommunikation zu überführen, die die ausgeübte Schutzfunktion spürbar werden lässt und zugleich auf veränderte zukünftige Arbeitsformen orientiert. Es wird dann das verantwortliche Handeln des Managements betont. Dies wird seitens der Mitarbeiter weniger am digital Operativem festgemacht als vielmehr am übergreifend Kommunikativen. Eine Organisation berichtet sogar von deutlich gesunkenen Krankenständen.

Anstelle der Vor-Ort-Koordination tritt hier die wertebasierte Führung. Damit kann die Arbeitskultur auch zukunftsgerichtet weiterentwickelt werden und die Organisation in dieser Hinsicht krisensicherer werden. Ohne Weiterentwicklung bleibt die Resilienz allerdings gering, denn die Frage der Koordination ist damit zugleich stark führungsabhängig und führungsfokussiert. Gerade bei den Konzepten, die von mobiler Arbeit auf Homeoffice umgestellt haben und die nicht mehr auf die identitätsbildenden Impulse des Campus zurückgreifen können, ist die Einschränkung erkennbar. Es ist eher ein temporärer Ansatz. Es bleibt aber zu konstatieren, dass der Pandemieschutz anders als beim mobilen Arbeiten vom Homeoffice aus gewahrt werden kann.

3.3.2.3. Homeoffice als Notlösung

Die überwiegende Erfahrung ist, dass Homeoffice ohne große Vorerfahrung eingeführt wird. Die Schilderung zur Schaffung der technisch-organisatorischen Voraussetzungen dominiert die Beschreibungen. Insgesamt bemängeln Mitarbeiter sehr lange Wartezeiten und Rückkoppelungsschleifen mit ihren Vorgesetzten sowie regelmäßig auftretende technische Schwierigkeiten, die einen reibungslosen Prozess und ein positives Arbeitserleben erschweren. Insgesamt erleben sie ihren persönlichen Arbeitsfluss als durch die Rahmenbedingungen verlangsamt. Führungskräfte berichten einen medialen Overload, um die ganzen Abstimmungen von Arbeitsaufträgen mit ihren Mitarbeitern und darüberhinausgehenden Abstimmungen im Führungszirkel zu bewerkstelligen. Hier zeigt sich, dass weder auf Seiten der Mitarbeiter die erforderliche Auseinandersetzung mit eigenverantwortlichem Handeln noch auf Seiten der Führungskräfte mit einem diesbezüglichen Führungsansatz stattfinden konnte und damit ein korrespondierendes Arbeitshandeln fehlt, weil diese zuvor zu stark auf Vor-Ort-Abstimmungsformen orientiert waren und nun nicht einfach digital ersetzt werden können. Dass sich eine neue Kultur herausbildet, lässt sich an den Erfahrungsberichten nicht erkennen.

Hier zeigt sich, dass Homeoffice praktiziert wird, aber weder technisch-organisatorisch, noch im Mitarbeiterhandeln oder im Führungsverhalten so gereift und darauf vorbereitet ist, dass hier ein zukunftsweisendes Konzept entsteht, das auch über Krisenzeiten hinaus verfolgt wird.

3.3.2.4. Homeoffice als Homestory

Genaugenommen ist diese vierte Variante eine Abwandlung der dritten. Auch hier ist die Umstellung auf das Homeoffice eher eine Notlösung. Sie zeigt vor allem organisatorische Schwächen, da die Voraussetzungen für ein konzentriertes Arbeiten von zu Hause aus aufgrund der Gesamtkonstellation fehlen. Es beginnt mit dem fehlenden Büroarbeitsplatz, der als Behelfslösung im Wohnraum errichtet wird und setzt sich fort in parallelen Familienpflichten, die bedingt durch die Schließung von Kitas und Schulen hinzukommen und dieselben Räumlichkeiten beanspruchen. Es wird eine deutliche Überlast auf Seiten der Frauen berichtet, die in stärkerem Maße die Aufgaben der Kinderbetreuung übernehmen, auch wenn es gleichzeitig Hinweise auf die gestiegene Beteiligung der Väter an der Familienarbeit gibt (Bayrischer Rundfunk 24 vom 16.06.2020). Frühere Einlassungen über Arbeit vom Homeoffice unter paralleler Kinderbetreuung haben ebenfalls die Doppelbelastung und Entgrenzung thematisiert, um Ansatzpunkte für eine organisierte Vereinbarkeit zu benennen, die dann auch Teil der Führungsverantwortung sein kann (Hill et al. 1996). Diese Studien haben aber nie den Anschein erweckt, die vorwiegend weiblichen Arbeitskräfte könnten unter den Bedingungen gar keine verlässliche Arbeitsleistung erbringen. Das Homeoffice wurde immer auch als Entgegenkommen gesehen, um Familienpflichten besser mit der Berufstätigkeit vereinbaren zu können (Hill et al. 2003). Unter Corona-Bedingungen stellt sich dies anders dar. Die Situation wird als extern verursacht attribuiert und offen als völlige Zumutung dargestellt, bei der sich Arbeitskräfte mit ihrer Überlast alleine gelassen fühlen. Beschäftigte des öffentlichen Dienstes erwähnen die Entgeltfortzahlung nicht, sondern kritisieren die Arbeitsbedingungen. Führungskräfte äußern sich verständnisvoll gegenüber der schwierigen Gesamtsituation der Arbeitskräfte und halten sich zurück. Sie sehen ihre Unterstützung darin, eher nichts einzufordern. Einzelne Arbeitgeber legen Programme auf, damit betroffene Beschäftigte finanzielle Mittel beantragen können, wenn sie spezielle Unterstützungsleistung hinzuziehen. Zu einer Frage der Personalführung wird dies aber nicht. In dieser Hinsicht halten sich alle Beteiligten zurück.

Medial hat diese Variante die meiste Aufmerksamkeit auf sich gelenkt und damit ein eher fragwürdiges Bild von der Arbeit im „Homeoffice“ gezeichnet. Inwieweit dies auch etablierten Ansätzen schadet, bei denen Arbeitskräfte unter gleichzeitiger Wahrnehmung von Familienaufgaben von zu Hause aus arbeiten, wird sich in Zukunft zeigen.

3.3.2.5. Homeoffice im Abseits

Die fünfte Variante lässt sich nur indirekt erschließen, weil sie nicht direkt von Betroffenen berichtet wird, sondern eher aus dem Umfeld heraus erschlossen werden kann. Sie tritt in dieser Form im öffentlichen Dienst auf, weil andernfalls eher eine Beantragung von Kurzarbeit erfolgt wäre. Das eingangs erwähnte Handbuch für betriebliche Pandemieplanung (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe 2010) sieht vor, Arbeitskräfte zu deaktivieren, die nicht unmittelbar benötigt werden. Dies ist eine Formulierung, die unter „normalen" Bedingungen so in einem betrieblichen Kontext nicht verwendet wird. Unter Krisenbedingungen gilt es als legitim und sogar geboten die Komplexität an den Stellen zu reduzieren, wo eine Arbeitskraft keinen unmittelbar erkennbaren Mehrwert für den Leistungsprozess mit sich bringt. Die Beschreibungen gehen dann dahin, dass Arbeitskräfte ins Homeoffice geschickt und gebeten wurden, sich zur besonderen Verfügung zu halten. Sie werden zu einer Gruppe zusammengefasst, die man vorerst aus dem Betrieb heraushalten und bewusst nicht in die weitere Koordination einbeziehen will. Es wird nicht darüber berichtet wie man die Arbeitsfähigkeit technisch-organisatorisch gewährleistet hat. Es wird auch nicht erkennbar wie man führungsseitig in einem Austausch steht oder dass von Kollegenseite ein arbeitsbezogener Austausch erfolgt. Im Kontext der Pandemiebekämpfung liegt der Beitrag dieser Variante darin, dass durch das Heraushalten der Arbeitskräfte aus den betrieblichen Abläufen das Infektionsrisiko reduziert wird. Der Beitrag dieser Arbeitskräfte wird dann allerdings auch darauf reduziert, dass sie als Infektionsrisiko für andere nicht in Erscheinung treten. Über das persönliche Wohlempfinden kann dann nur spekuliert werden. Auf jeden Fall ist nicht erkennbar, dass Führung hier eine Aufgabe in der krisenbezogenen persönlichen Begleitung in einer schwierigen Situation erfolgt.

3.3.3. Vergleichende Evaluation

Nunmehr sollen die fünf beschriebenen Varianten hinsichtlich der zuvor herausgearbeiteten Bewertungskriterien noch einmal vergleichend betrachtet werden, um Schlussfolgerungen für die Zeit nach der Corona-Pandemie ziehen zu können (s. Tabelle 2).

Die Betrachtung der beschriebenen Varianten entlang der Bewertungskriterien macht deutlich, dass es im Zuge des Krisenmanagements teilweise gelungen ist, zukunftsweisende Ansätze für ein Homeoffice zu entwickeln, die deutlich über die bisherigen Konzepte hinausgehen. Es zeigt sich, dass das Homeoffice auch zu einer bewusst gewählten verlängerten Werkbank für betriebliche Arbeitsprozesse werden kann. Durch Parallelorganisation unter Abläufen vor Ort und vom Homeoffice aus entsteht eine für die Sicherheit und Krisenresistenz des Gesamtsystems überle-

gende Personaleinsatzform. Das Modell setzt eine starke Teamkoordination voraus, was die Abhängigkeiten gegenüber einer führungsbezogenen Koordination reduziert und damit wiederum durch die gemeinschaftliche Verantwortung eine besonders krisenresistente Koordinationsform darstellt. Allerdings zeigt sich darin auch, dass Homeoffice ab dem Moment wo es breitenwirksam wird, seinen Charakter als tendenziell temporär etwas entkoppelter Arbeitsbereich (Rückzugsort) verliert, sondern ebenso im Zentrum stehende Werkbank ist wie die Arbeit, die vor Ort im Betrieb verrichtet wird.

Es zeigt sich ebenso, dass alle anderen Konzepte in ihrer Wirkung in starkem Maße davon abhängig sind wie es im Zuge der Führungsarbeit gelingt einen sozialen Zusammenhalt zu schaffen. Wenn dies erkennbar wurde, dann lässt sich das als wichtiger Beitrag zum Krisenmanagement herausstellen. Nicht zuletzt deshalb hat digitale Führung viel Aufmerksamkeit erfahren. Allerdings lässt sich daraus nicht schlussfolgern, dass man Homeoffice-Konzepte der Zukunft auf der Frage der Führungskoordination aufbauen sollte, weil hier gleichzeitig ein Flaschenhals entsteht, der sich eher als resilienzmindernd auswirken kann und zu wenig auf eine Breitenverteilung der Verantwortung setzt. Der Ansatz ist als Breitenkonzept zu hinterfragen zumal absehbar davon auszugehen ist, dass mobile Arbeit und Flex-Konzepte angesichts des sehr geringen Pandemieschutzes reduziert werden. Wenn dadurch arbeitskulturelle Komponenten dieser flexiblen Personaleinsatzvarianten verloren gehen, können diese nicht dauerhaft durch die Führungsrolle aufgefangen werden. Es muss dann neu überlegt werden wie die Teamkoordination aussehen kann.

Andere Homeoffice-Varianten sind Notlösungen geblieben, weil ihre Grundpfeiler eher so angelegt sind, dass man nach einem zurück zum bisherigen Personaleinsatz ruft. Es wurde sogar deutlich, dass bedingt durch den Pandemieschutz Konstellationen geschaffen hat, die andere Belastungsfaktoren erhöht haben, womit bereits die Eingangsfrage nach betrieblicher Fürsorge für Wohlergehen und Gesundheit ambivalent zu beantworten ist.

Variante **Kriterium**	**Homeoffice als Parallelorganisation**	**Homeoffice mit Führung als sozialem Kitt**	**Homeoffice als Notlösung**	**Homeoffice als Homestory**	**Homeoffice im Abseits**
Arbeits- und Gesundheitsschutz	Parallel optimiert für Arbeitskräfte vor Ort und im Homeoffice ++	Gewährleistet; kommunikativ verstärkt ++	Pandemieschutz ja, Wohlbefinden unklar 0	Pandemieschutz ja, sehr hohes Stressniveau -	Pandemieschutz ja, Wohlbefinden nein 0
Technisch-organisatorische Voraussetzungen, Informationsflüsse	Durch technische Infrastruktur und Teamkoordination ++	Durch Infrastruktur und Führungshandeln +	Teilweise für reibungslosen Arbeitsablauf geschaffen 0	Organisatorisch eingeschränkte Arbeitsfähigkeit -	Nicht angelegt -

Individuelle Fähigkeiten im eigenverantwortlichen Handeln	Hoch ausgeprägt, auf Teambasis weiterentwickelt ++	Tritt hinter Verantwortung der Führungskräfte zurück, aber über Commitment erkennbar +	Nicht ausgebildet und thematisiert 0	Hinsichtlich der Rahmenbedingungen an der Überforderungsgrenze -	Nicht thematisiert, nicht abgefordert oder gewollt -
Führungsansätze und Arbeitskultur unterstützen die Tätigkeit vom Homeoffice	Durch teamorientierte Arbeitskultur, Rolle der Führung nicht so zentral +	In hohem Maße sichtbar durch Führungskräfte initiiert und vorgelebt ++	An der Grenze zur Überforderung praktiziert 0	Eingeschränkt durch Programme, auf personaler Ebene eher Rückzug 0	Nicht erkennbar -
Strukturelle Redundanz (Resilienz i.e.S.)	Homeoffice als gekoppelte und verlängerte, aber dezentral besser geschützte Werkbank ++	Teilweise durch Ausstattung des Homeoffice geschaffen, aber nicht als gekoppelte Koordination übersetzt 0	Fehlt in Strukturen und Verhaltensmustern, leidet an ungelöster Koordination -	Homeoffice etabliert sich nicht als Arbeitsort, sondern verliert tendenziell an Legitimation -	Teilbereiche werden bewusst zur Sicherung anderer Bereiche deaktiviert -
Gesamteinschätzung	Resilienzsteigernde Variante des Homeoffice, die über bisherige Erfahrungen hinaus geht und einen neuen Maßstab bilden kann	Zukunftsfähige kulturelle Basis, aber nur unter deutlich stärkerer Beanspruchung der Führungskräfte; Fokussierung schwächt Resilienz ab	Bleibt Notlösung, keine Basis für zukünftige Weiterentwicklung	Durch Ausüben des Pandemieschutzes gehen andere Schutzfunktionen gegenüber der Arbeitskraft verloren	Unter Nicht-Krisenbedingungen nicht legitim

Tabelle 2: Bewertung der Zukunftsfähigkeit der Corona-bedingt entstandenen Homeoffice-Varianten (Qualitative Bewertung: ++ sehr hoch ausgeprägt, + hoch ausgeprägt, 0 ansatzweise ausgeprägt, - schwach ausgeprägt)

4. Ausblick – Homeoffice nach der Corona-Krise

Krisen werden trotz ihrer zahlreichen negativen Begleiterscheinungen immer auch als Chance für Erneuerung und Weiterentwicklung gesehen, weil sie Erfahrungen mit neuen Praktiken hervorbringen. Im Lichte der Erfahrungen aus der Corona-Krise wurde in diesem Beitrag nach diesem Erneuerungspotenzial zur Ausgestaltung von Homeoffice-Konzepten gesucht. Es wurde der Frage nachgegangen, ob sich im Zuge der Krise Gestaltungsformen gezeigt haben, die ein besonderes Zukunftspotenzial aufweisen. Das Zukunftspotenzial wurde kriteriengeleitet eruiert und hat fünf Bewertungskriterium der Resilienz im engeren und weiteren Sinne zugrunde gelegt. Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass teilweise Homeoffice-Konzepte etabliert wurden, die eine Parallelorganisation zum Betrieb schaffen und in starkem Maße auf einer Teamkultur und Teamkoordination fußen, durch die betriebliche Abläufe hinsichtlich ihrer Krisenresistenz robuster werden als sie zuvor je waren,

weil das Homeoffice zu einem dezentralen Ort wird, von dem aus auch der Ablauf vor Ort besser abgesichert werden kann. Damit wird das Homeoffice in seiner Bedeutung und „Zentralität" für den betrieblichen Ablauf neu bewertet. Es sichert das reibungslose produktive Miteinander. Daraus ergibt sich eine Neubewertung hinsichtlich dessen, was das Homeoffice für den Betrieb an zusätzlichem Nutzen und Sicherungspotenzial mit sich bringt. Es ist dann kein „Entgegenkommen" an Arbeitskräfte, die sich mehr Flexibilität wünschen. Es ist auch keine Variante, um Bürokapazität vor Ort einzusparen. Vielmehr sollte überlegt werden, ob diese Einsparpotenziale für Bürofläche dann für die Mitfinanzierung von Homeoffice genutzt werden, weil hier für die Sicherung betrieblicher Abläufe besonders wichtige Werkbänke stehen.

Die Umsetzung solch eines besonders resilienzförderlichen Ansatzes ist allerdings keine Selbstverständlichkeit. Es setzt die Mitwirkungsbereitschaft aller Akteure voraus, sich in dieser Form in einen gemeinsamen Dienst zu stellen und bereichsübergreifende Koordination zu sichern. Entsprechende Varianten waren auch in Organisationen bekannt, die andere Wege gegangen sind, weil Führungskräfte sich nicht darauf verständigen konnten oder es an der Bereitschaft der Arbeitskräfte fehlte auch vor Ort im Betrieb oder vom Homeoffice aus in steter enger Rückkoppelung mit Vor-Ort Teams tätig zu werden. Gleichwohl ist es wichtig, dass Erfahrungswerte mit neuen Varianten entstanden sind, die den Orientierungspunkt für die zukünftige Entwicklung bilden können.

5. Limitationen

Die vorgestellte Bestandsaufnahme basiert auf einer eingeschränkten empirischen Basis und erlaubt in ihrer qualitativen Anlage keinerlei Rückschlüsse auf den Verbreitungsgrad der vorgestellten Varianten. Sie zeigt lediglich die Phänomene auf, die für Folgeuntersuchungen entlang der hervorgehobenen Merkmale weiter operationalisiert werden können, um auf dieser Basis Aussagen hinsichtlich des Verbreitungsgrades zu treffen und ggf. nach Einflussvariablen hinsichtlich der Verteilung wie z.B. Branche, Kundeninteraktion, Einstellungen der Führungskräfte etc. differenzieren zu können. Der hier generierte Erkenntniszuwachs liegt in der Systematisierung der Grundvarianten und ihrer kriteriengeleiteten Evaluation.

Literatur

Barasa, E., Mbau, R., & Gilson, L. (2018). What Is Resilience and How Can It Be Nurtured? A Systematic Review of Empirical Literature on Organizational Resilience. *International Journal of Health Policy and Management, 7*(6), 491–503. https://doi.org/10.15171/ijhpm.2018.06

Bayrischer Rundfunk 24 (2020, 16.06., 11.30 Uhr). *Corona verschärft Ungerechtigkeit zwischen Mann und Frau*; https://www.br.de/nachrichten/kultur/corona-verschaerft-ungerechtigkeit-zwischen-mann-und-frau,S1zE0hi

Blagoev, B., Muhr, S. L., Ortlieb, R., & Schreyögg, G. (2018). Organizational working time regimes: Drivers, consequences and attempts to change patterns of excessive working hours. *German Journal of Human Resource Management: Zeitschrift Für Personalforschung, 32*(3-4), 155–167. https://doi.org/10.1177/2397002218791408

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe. (2010). *Handbuch Betriebliche Pandemieplanung* (2. Aufl.). Abgerufen von https://www.bbk.bund.de/SharedDocs/Downloads/BBK/DE/Downloads/GesBevS/Handbuch-Betriebl_Pandemieplanung_2_Auflage.html

Brenke, K. (2016). Home Office: Möglichkeiten werden bei weitem nicht ausgeschöpft. *DIW Wochenbericht, 83*(5), 95-105. Abgerufen von https://www.econstor.eu/handle/10419/127434

Fincke, I., Harth, V., & Mache, S. (2018). Arbeitsbedingungen in innovativen Bürokonzepten unter gesundheitsrelevanten und arbeitswissenschaftlichen Aspekten. *Zentralblatt Für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz Und Ergonomie, 68*(3), 168–176. https://doi.org/10.1007/s40664-017-0236-7

Flüter-Hoffmann, C., Hammermann, A., König, C., Märki, H., Muckel, M., Neuhaus, R., Niepmann, F., Niessen, P., Ottersböck, N., Peck, A., Peschl, A., Sandrock, S., Schüth, N.J., & Stettes, O. (2018). *Resilienzkompass zur Stärkung der individuellen und organisationalen Resilienz in Unternehmen*. Abgerufen von https://www.arbeitswissenschaft.net/forschung-projekte/staerke/

Frankfurter Allgemeine Zeitung. (2020, 21 April). Fast jeder Dritte wünscht sich Homeoffice für immer. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*. Abgerufen von https://www.faz.net/aktuell/karriere-hochschule/buero-co/corona-folge-fast-jeder-dritte-wuenscht-sich-home-office-fuer-immer-16735068.html

Friedrich, J. (1985). Stand, Entwicklungstendenzen und Auswirkungen der Telearbeit. In W. Brauer & H. R. Hansen (Hrsg.), *Informatik Fachberichte. GI/OCG/ÖGI-Jahrestagung 1985* (Bd. 108, S. 87–107). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-70639-4_8

Gerichtshof der Europäischen Union. (2019, 23 September). Die Mitgliedsstaaten müssen die Arbeitgeber verpflichten, ein System einzurichten, mit dem die tägliche Arbeitszeit gemessen werden kann. [Pressemeldung]. Abgerufen von https://curia.europa.eu/jcms/jcms/p1_2007179/de/

Greenleaf, R. K. (1998). *The power of servant-leadership: Essays*. Berrett-Koehler Publishers.

Hill, E.J., Ferris, M., & Märtinson, V. (2003). Does it matter where you work? A comparison of how three work venues (traditional office, virtual office, and home office) influence aspects of work and personal/family life. *Journal of Vocational Behavior, 63*(2), 220–241. https://doi.org/10.1016/S0001-8791(03)00042-3

Hill, E.J., Hawkins, A.J. & Miller, B.C. (1996). Work and family in the virtual office: Perceived influences of mobile telework. *Family relations, 45*(3), 293–301.

Hoch, J. E., & Kozlowski, S. W. J. (2014). Leading virtual teams: Hierarchical leadership, structural supports, and shared team leadership. *The Journal of Applied Psychology, 99*(3), 390–403. https://doi.org/10.1037/a0030264

Illegems, V., & Verbeke, A. (2004). Telework: What Does it Mean for Management? *Long Range Planning, 37*(4), 319–334. https://doi.org/10.1016/j.lrp.2004.03.004

Janke, I., Stamov-Roßnagel, C., & Scheibe, S. (2014). Verschwimmen die Grenzen? Auswirkungen von Vertrauensarbeitszeit auf die Schnittstelle von Arbeit und Privatleben. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 68*(2), 97–104. https://doi.org/10.1007/BF03374430

Klaffke, M. (2014). Büro der Zukunft – Generationenorientierte Gestaltung von Arbeitswelten. In M. Klaffke (Hrsg.), *Generationen-Management: Konzepte, Instrumente, Good-Practice-Ansätze* (S. 205–226). Wiesbaden: Springer Gabler. https://doi.org/10.1007/978-3-658-02325-6_9

Klaffke, M. (2017). *Büro 4.0 – Wertschöpfungsbeitrag neuer Büro- und Arbeitswelten*. [Diskussionspapier] Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin. Abgerufen von http://people.f3.htw-berlin.de/Professoren/Klaffke/pdf/Diskussionspapier.pdf

Kleemann, F. (2017). Mobile und ortsungebundene Arbeit. In H. Hirsch-Kreinsen & H. Minssen (Hrsg.), *Lexikon der Arbeits- und Industriesoziologie* (2. Aufl., S. 222–225). Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. https://doi.org/10.5771/9783845276021-222

Kreiner, G. E. (2006). Consequences of work-home segmentation or integration: a person-environment fit perspective. *Journal of Organizational Behavior, 27*(4), 485–507. https://doi.org/10.1002/job.386

Lautsch, B. A., Kossek, E. E., & Eaton, S. C. (2009). Supervisory approaches and paradoxes in managing telecommuting implementation. *Human Relations, 62*(6), 795–827. https://doi.org/10.1177/0018726709104543

March, J. G. (1991). Exploration and Exploitation in Organizational Learning. *Organization Science, 2*(1), 71–87. https://doi.org/10.1287/orsc.2.1.71

Reichwald, R. (2000). Small Office/Home Office (SOHO): Neue Beschäftigungschancen in Telediensten – Entwicklungschancen und Probleme. In F. Woijda (Hrsg.), Innovative Organisationsformen (S. 269-290). Schäffer Poeschel Verlag, Stuttgart.

Rodríguez-Sánchez, A., Guinot, J., Chiva, R., & López-Cabrales, Á. (2019). How to emerge stronger: Antecedents and consequences of organizational resilience. *Journal of Management & Organization*, 1–18. https://doi.org/10.1017/jmo.2019.5

Rosenthal, U., Boin, A., & Comfort, L. K. (2001). *Managing crises: Threats, dilemmas, opportunities*. Springfield, Illinois, USA. https://books.google.de/books?hl=de&lr=&id=8-1wCQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA5&dq=change+management+crises&ots=i99LdFSH7x&sig=nwxGkjXQwAUfOacg-6HbBaPWmg0&redir_esc=y#v=onepage&q=change%20management%20crises&f=false

Seitz, J., & Rigotti, T. (2018). How do differing degrees of working-time autonomy and overtime affect worker well-being? A multilevel approach using data from the German Socio-Economic Panel

(SOEP). German Journal of Human Resource Management: *Zeitschrift Für Personalforschung, 32*(3-4), 177–194. https://doi.org/10.1177/2397002218780630

Srivastava, A., Bartol, K. M., & Locke, E. A. (2006). Empowering Leadership in Management Teams: Effects on Knowledge Sharing, Efficacy, And Performance. *Academy of Management Journal, 49*(6), 1239–1251. https://doi.org/10.5465/amj.2006.23478718

Statista. (2017). *Welche der folgenden Arbeitszeitmodelle würden Sie gerne in Anspruch nehmen*? [Graph]. In Statista. Abgerufen von https://de.statista.com/prognosen/1016673/umfrage-in-deutschland-zur-attraktivitaet-von-arbeitszeitmodellen

Wang, Y., & Haggerty, N. (2011). Individual Virtual Competence and Its Influence on Work Outcomes. *Journal of Management Information Systems, 27*(4), 299–334. https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222270410

Weichbrodt, J. (2014). *SwissFlexWork 2014: Repräsentative Befragung der Schweizer Erwerbstätigen zur Verbreitung von mobiler Arbeit und Home Office*. University of Applied Sciences and Arts Northwestern Switzerland - School of Applied Psychology. Abgerufen von https://irf.fhnw.ch/handle/11654/5008 https://doi.org/10.13140/2.1.4621.1526

Williams, J. C., Berdahl, J. L., & Vandello, J. A. (2016). Beyond Work-Life "Integration". *Annual Review of Psychology, 67*, 515–539. https://doi.org/10.1146/annurev-psych-122414-033710

Windt, K., Jeken, O. & Gebhardt, N. (2010). Nutzung und Erweiterung von Flexibilitätspotenzialen in Fertigung und Montage durch Selbststeuerung und Konstruktion. In Nyhuis, P. (Hrsg.). Wandlungsfähige Produktionssysteme (S. 65-82). GITO Verlag, Berlin.

Zhang, X., & Bartol, K. M. (2010). Linking Empowering Leadership and Employee Creativity: The Influence of Psychological Empowerment, Intrinsic Motivation, and Creative Process Engagement. *Academy of Management Journal, 53*(1), 107–128. https://doi.org/10.5465/amj.2010.48037118

Digitaler Zwilling zur Mensch-Technik-Interaktion

Zugriff auf unterschiedlichen Entscheidungs- und Ausführungsebenen eines autonomen Containerentladesystems

Michael Freitag[1,2], Nils Hoppe[2], Christoph Petzoldt[1], Jasper Wilhelm[1], Lennart Rolfs[1], Rafael Mortensen Ernits[1], Thies Beinke[1]

[1]BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen
[2]Fachbereich Produktionstechnik, Universität Bremen

1. Einleitung

Die Containerlogistik ist einerseits durch einen stetig wachsenden Warenstrom im Seehandel und andererseits durch eine körperlich anstrengende Tätigkeit bei der heute vorherrschenden manuellen Containerentladung gekennzeichnet (World Trade Organization 2019, UNCTAD 2020). Die Arbeitsbedingungen dieser Entladung sind geprägt durch ein raues Umfeld und extreme Temperaturen, bedingt durch Sonneneinstrahlung oder Schnee und Eis, und sind folglich sowohl physisch als auch psychisch stark fordernd (Stoyanov et al. 2016). Aktuelle Tendenzen zeigen, dass der allgemeine Wettbewerb um Arbeitskräfte sowie die geschilderten Arbeitsbedingungen dazu führen, dass nicht mehr ausreichend Personal für diese Tätigkeiten gefunden werden kann, welches den Bedarf nach Automatisierungslösungen begründet (Mortensen et al. 2019). Die vorherrschende Varianz und die unterschiedlichen Größen an Produkten und Umverpackungen sowie die Vielfalt an Packmustern im Container führen zu einer komplexen Situation, die von Automatisierungslösungen in diesem Kontext bewältigt werden muss (Rolfs et al. 2020). Darüber hinaus müssen sich diese Lösungen sowohl hinsichtlich des Warendurchsatzes als auch der Wirtschaftlichkeit gegen die heute übliche manuelle Entladung behaupten (Rolfs et al. 2020). Trotz verschiedener existierender Lösungen zur automatischen Entladung von Containern konnte sich bislang kein System in der Praxis durchsetzen. Gründe dafür sind deren unzureichende Flexibilität,

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_8

mangelnde Sensitivität oder unzureichende Robustheit der autonomen Steuerungen (Petzoldt et al. 2020). Hieraus ergibt sich der Bedarf für ein autonomes Containerentladesystem, welches zu jeder Zeit den operativen Mitarbeiter*innen den Eingriff in sämtliche Prozesse und Abläufe ermöglicht. Um dies zu erreichen, bedarf es einer zielgerichteten Mensch-Technik-Interaktion (MTI), welche auf den Ebenen der operativen Pakethandhabung sowie der operativen und taktischen Entscheidungen einen Eingriff von geschultem, aber nicht speziell ausgebildetem Personal ermöglicht und das Agieren des Systems auf unterschiedlichen Stufen der Automatisierung (adaptive Automatisierung) unterstützt.

Ziel dieses Beitrags ist es, anhand des Beispiels Containerentladung eine neue Form der nutzer*innenorientierten MTI vorzustellen, bei der die Interaktion zwischen Bediener*in und System über einen digitalen Zwilling erfolgt.

Im Folgenden wird in Kapitel 2 zunächst der Stand der Forschung und Technik in den Bereichen „Entladesysteme für Container“ und „MTI mittels Digitalem Zwilling“ vorgestellt. Hieran schließt sich in Kapitel 3 eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus des im Forschungsprojekt „IRiS – Interaktives Robotiksystem zur Entleerung von Seecontainern“ entwickelten Entladeroboters an. Im vierten Kapitel wird auf die MTI-Schnittstelle des Systems eingegangen. Den Abschluss dieses Beitrags bilden eine Zusammenfassung und ein Forschungsausblick.

2. Containerentladesysteme und Mensch-Technik-Interaktion

2.1. Morphologie von Containerentladesystemen

Sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie wurde der Bedarf nach einer Automatisierung des Entladeprozesses von Containern erkannt und aufgenommen. Basierend auf unterschiedlichen Automatisierungsgraden und in Abhängigkeit von der zu entladenden Ware wurden unterschiedliche Systemen entwickelt. Die nachfolgenden Abbildungen 1 und 2 ordnen die bestehenden Systeme zur Verdeutlichung der Unterschiede in eine von Petzoldt et al. (2020) entwickelte Morphologie ein.

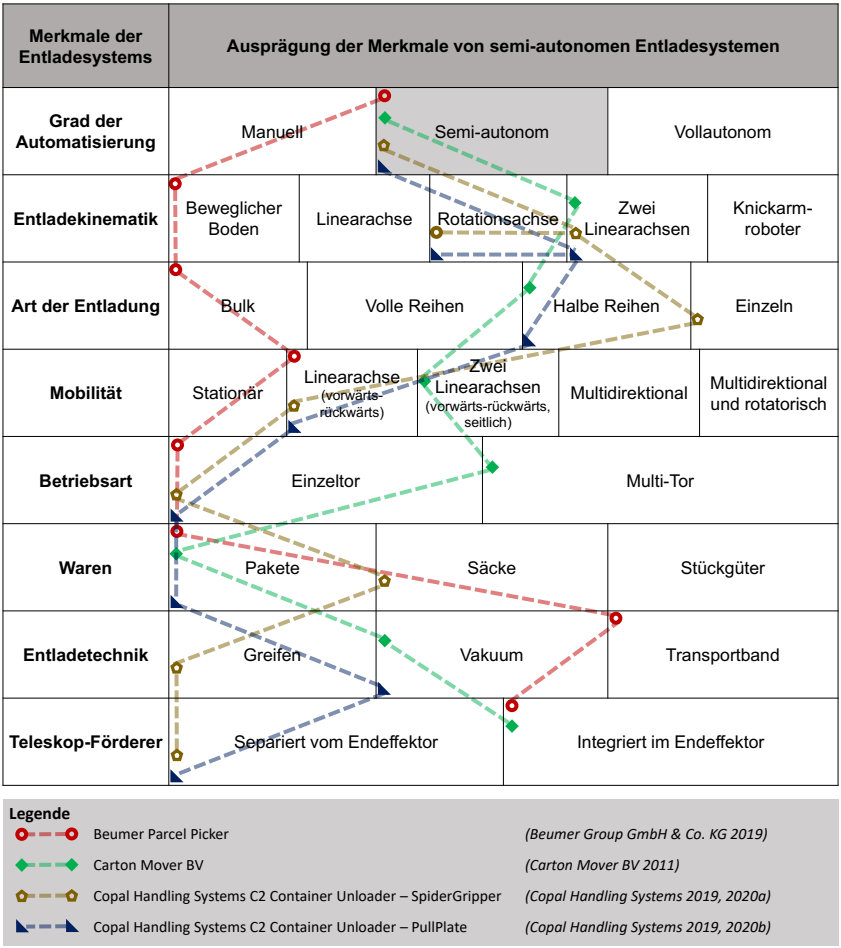


Abbildung 1: Einordung von semi-autonomen Entladesystemen in die Morphologie von Petzoldt et al. (2020)

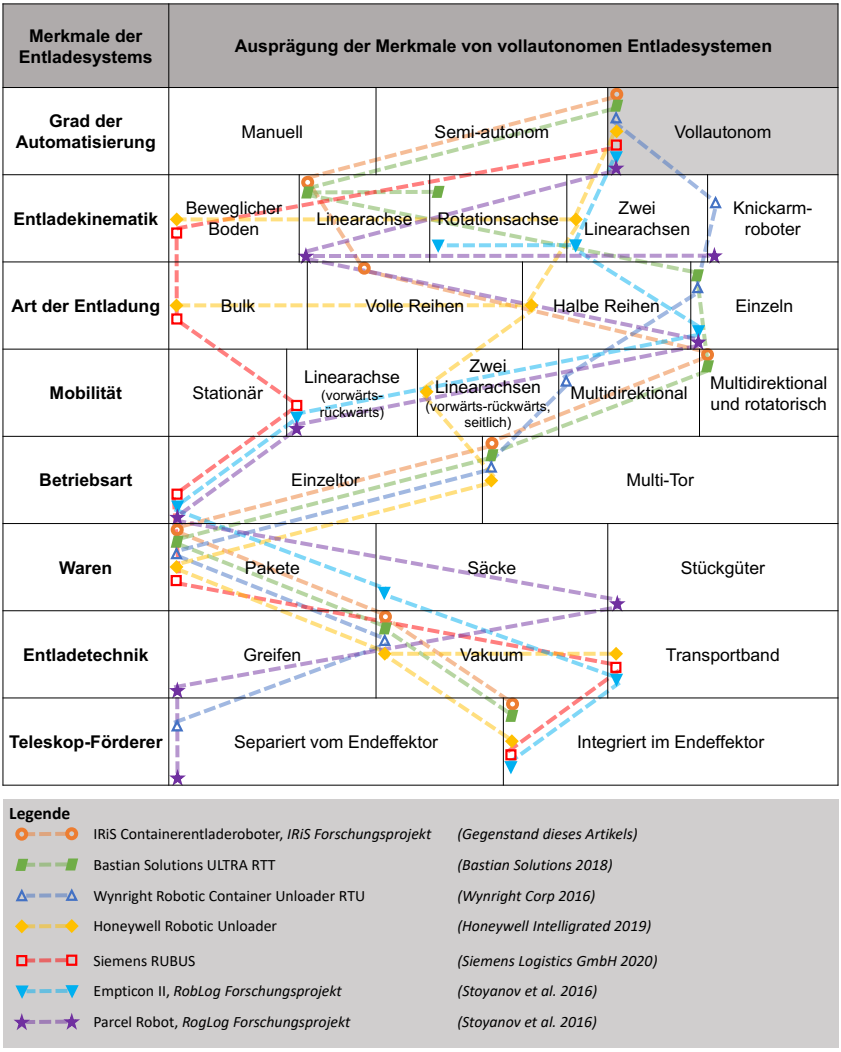


Abbildung 2: Einordung von vollautonomen Entladesystemen in die Morphologie von (Petzoldt et al. 2020)

Basierend auf einer Analyse der betrachteten Systeme lässt sich der Bedarf an einer interaktionsorientierten Entwicklung von autonomen Entladesystemen ableiten mit dem Ziel, dass das bedienenden Personal zu jedem Zeitpunkt auf den unterschiedlichen Ebenen der Entscheidung und Steuerung sowie der Materialhandhabung eingreifen kann. Insbesondere vollautonome Entladesysteme (vgl. Abb. 2)

sehen eine solche Interaktion nicht vor, was bei komplexen Entladesituationen zu Systemstillständen und aufwendigen manuellen Eingriffen führen kann. Als Lösungsansatz wird hier eine MTI über einen digitalen Zwilling vorgeschlagen. Dieser Ansatz hat sich bereits in der Mensch-Roboter-Kollaboration etablieren können (Uhlenkamp et al. 2019).

2.2. Mensch-Technik-Interaktion über den digitalen Zwilling

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Definitionen für den digitalen Zwilling (Negri et al. 2017). Sie haben gemein, dass der digitale Zwilling ein digitales Abbild eines physischen Objektes darstellt (Kritzinger et al. 2018). Die Unterschiede in den Definitionen ergeben sich durch die Sichtweise bzw. das betrachtete Objekt und reichen von der Betrachtung der Komplexität bzw. des Detailgrads der Modellierung und Simulation über den Lebenszyklus des Produkts bis hin zum Einsatzzweck des digitalen Zwillings (Wilhelm et al. 2020b). Aus produktionstechnischen Sicht lässt sich der digitale Zwilling als ein virtuelles Abbild eines Produktionssystems beschreiben, welches durch die Synchronisation von virtuellem und realem Objekt charakterisiert ist (Negri et al. 2017). Die technische Vernetzung der Objekte und mathematische Modelle zur echtzeitnahen Analyse von Daten bilden die Grundlage für diese Synchronisation (Wilhelm et al. 2020b).

Im Kontext der MTI ist eine Unterscheidung der virtuellen Abbilder realer Objekte in digitale Modelle, digitale Schatten und digitale Zwillinge vorzunehmen. Die Unterschiede ergeben sich aus den Datenflüssen zwischen realem und virtuellem Objekt (Kritzinger et al. 2018). Diese Differenzierung ist im Kontext der Systemfunktionalitäten Modellierung, Überwachung und Steuerung in Abbildung 3 verdeutlicht.

Ein digitales Modell zur MTI präsentieren beispielsweise Graessler und Pöhler (2017) als eine Repräsentation eines Mitarbeiters oder einer Mitarbeiterin samt seiner bzw. ihrer Bedürfnisse in einem cyberphysischen Produktionssystem für die Entscheidungsfindung und Planung von Aufgaben.

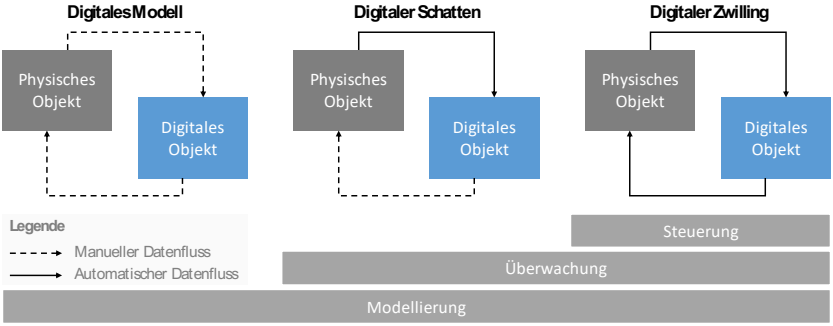


Abbildung 3: Klassifizierung von digitalem Modell, Schatten und Zwilling anhand des Datenflusses und im Kontext der Systemfunktionalitäten (Wilhelm et al. (2020b) in Anlehnung an Kritzinger et al. (2018))

Als Beispiele für digitale Schatten sind die Arbeiten von Longo et al. (2019), Park et al. (2019), Lu und Xu (2020) sowie Malik et al. (2020) zu nennen. Dabei werden die Mitarbeiter*innen durch die Bereitstellung aller verfügbarer Daten einer Anlage bei der Wartung unterstützt (Longo et al. 2019), dem bzw. der operativen Mitarbeiter*in mittels einer dienstleistungsorientierten Plattform, welche IoT-Sensordaten aufnimmt und eine Optimierung der Planung durchführt, eine Entscheidungsunterstützung angeboten (Park et al. 2019) sowie ein Zusammenführen von Maschinenzustandsdaten in einer Cloudlösung realisiert, um daraus den Produktionsfortschritt zu ermitteln und dem Benutzer bzw. der Benutzerin die Möglichkeit zu geben, Fertigungsaufträge bzw. Fertigungsdienstleistungen online zu verwalten (Lu und Xu 2020). Schließlich wird mittels einer Virtual Reality-Anwendung ein Arbeitsplatz mit einem kollaborativen Roboter analysiert und das Layout bei Bedarf angepasst (Malik et al. 2020).

Als Beispiele für einen digitalen Zwilling mit bidirektionalem, automatischem Informationsflusses sind die Arbeiten von Segura et al. (2020), Horváth und Erdős (2017) sowie Bilber und Malik (2019) anzuführen. Segura et al. (2020) stellen in einem Konzeptpapier vor, wie ein*e Mitarbeiter*in virtuell für die Zusammenarbeit mit einem kollaborativen Roboter trainiert werden kann, um technisch und psychologisch auf eine neuartige Interaktion mit Maschinen und Robotern vorbereitet zu sein. Ebenfalls in der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter stellt die Arbeit von Horváth und Erdős (2017) eine virtuelle Repräsentation von Mitarbeiter*innen und Robotern dar, welche die Vorhersage möglicher Kollisionen vornimmt und eine Gestenerkennung zur Robotersteuerung einbezieht. Im Beitrag von Bilber und Malik (2019) wird in einer Simulationsstudie eine Mensch-Roboter-Kollaboration in einem Montageprozess betrachtet, um über eine ereig-

nisgesteuerte Simulation in einem digitalen Zwilling die Planung der Aufgabenzuweisung und des Arbeitslastausgleiches zu optimieren sowie eine Optimierung der Steuerung von Robotern hinsichtlich der Bahnplanung und Kollisionsvermeidung zu realisieren.

3. Aufbau des IRiS-Containerentladesystems

Für das Verständnis der MTI für den Eingriff bzw. die Steuerung des im Forschungsprojekt IRiS entwickelten Entladeroboters durch den bzw. die Bediener*in wird in diesem Kapitel zunächst der mechanische Aufbau des Systems erläutert. Die in Abbildung 4 dargestellte, modulare Systemarchitektur sowie die Nutzer*innenschnittstellen des Containerentladesystems bilden den Rahmen der nachfolgenden Erläuterungen in diesem und dem folgenden Kapitel. Nach einer Beschreibung der grundlegenden Anforderungen wird zunächst das Gesamtsystem entsprechend der in Abbildung 4 dargestellten Teilsysteme (Fahrwerk, Hubkinematik, Greifer, Vakuum- und Fördertechnik) vorgestellt. Eine detaillierte Auseinandersetzung mit dem System, den zugrundeliegenden Anforderungen und Rahmenbedingungen erfolgt in Hoppe et al. (2020).

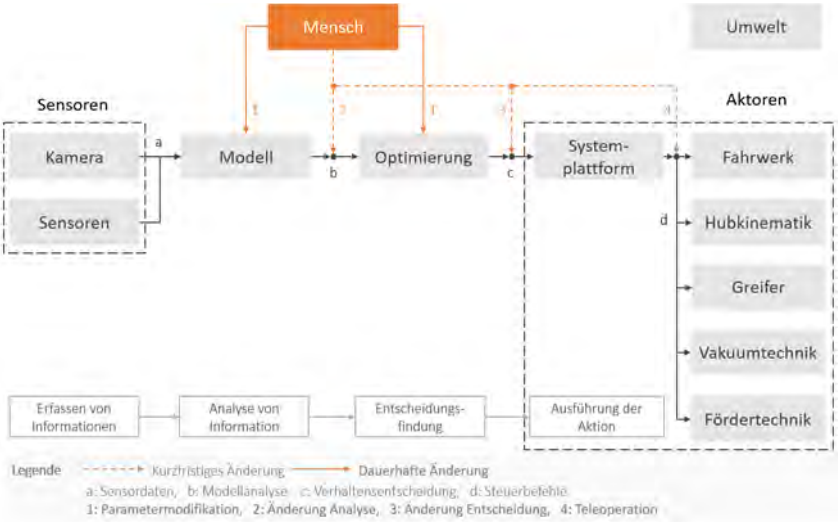


Abbildung 4: Systemarchitektur und Nutzer*innenschnittstellen des digitalen Zwillings für das vorgestellte Entladesystem in Anlehnung an (Wilhelm et al. 2020b)

3.1. Anforderungen an die (autonome) Containerentladung

Um die Entladung von mehreren nebeneinanderstehenden Containern durchzuführen, sollte ein Entladesystem mobil sein und entsprechend verfahren werden können. Bei der Entladung eines 40-Fuß-Containers mit den Innenmaßen von

12 m Länge, 2,33 m Breite und einer Höhe von bis zu 2,69 m muss sich das System in den Container hineinbewegen und Steigungen und Kanten durch Überladerampen oder ein Gefälle des Containers überwinden können.

Für eine automatische Entladung eines Containers muss das System die Pakete selbstständig erkennen und eine dem Packmuster entsprechende Entladestrategie erstellen, nach der es die Entladung durchführt. Die einzelnen Prozessschritte, die das System beim Entladen durchführen muss, gliedern sich dabei wie folgt:

1. Erkennen des Paketstapels
2. Planen der Entladestrategie
3. Positionieren des Greifers vor einer Paketreihe
4. Greifen der Pakete
5. Herausziehen der Pakete
6. Abfördern der Pakete

Das Gewicht und die Größe der Pakete in den verschiedenen Containern kann stark variieren und zwischen 300 mm × 200 mm × 110 mm und 800 mm × 600 mm × 685 mm liegen. In Ausnahmefällen kann das Gewicht bis zu 35 kg betragen. Die Größe dieser schweren Pakete weisen dabei eine Kantenlänge von mindesten 600 mm auf. Beim Entladen einer ganzen Reihe von vier solcher Pakete muss ein Maximalgewicht von 150 kg gehandhabt werden. Die Leistung der manuellen Entladung von durchschnittlich 419 Paketen/h muss übertroffen werden. Ziel sollte es sein, mindestens 800 Pakete/h zu entladen, was den oberen 10% bei der manuellen Entladung entspricht. Die Pakete sind bei der Entladung vorsichtig zu handhaben, da die darin enthaltenen Waren häufig nicht durch zusätzliches Verpackungsmaterial vor Beschädigungen geschützt werden.

Zur weiteren Verarbeitung in nachgelagerten Prozessen müssen die Pakete aus dem Container befördert und ausgerichtet an die nachfolgende Fördertechnik übergeben werden.

3.2. Beschreibung des Systems

Auf Grundlage der Anforderungserfassung an ein Containerentladesystem (vgl. Petzoldt et al. 2020) wurde das in Abbildung 5 dargestellte System entwickelt. Es weist Abmessungen von 5,2 m × 2,2 m × 2,2 m (L, B, H) auf und ist darauf ausgelegt, 40-Fuß-Container zu entladen. Das System selbst kann in 20-Fuß-Containern transportiert zu werden und ist mit einem Gesamtgewicht von 1.700 kg bedeutend leichter als frühere Prototypen.

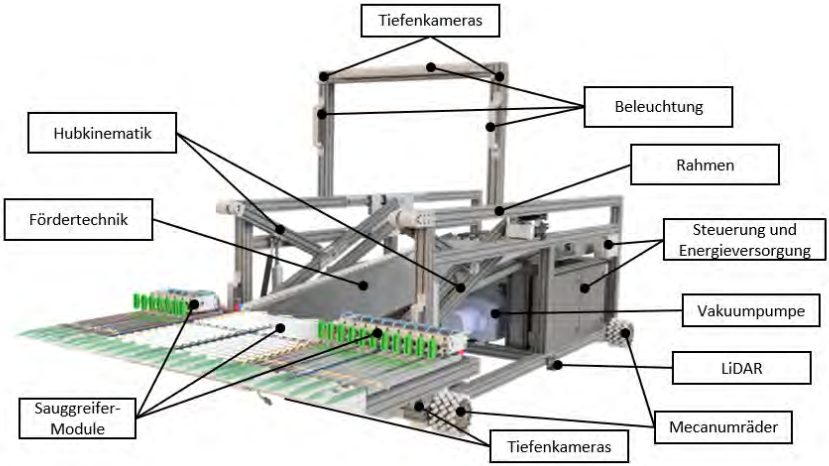


Abbildung 5: Aufbau und Komponenten des Containerentladesystems

Die Basis des Systems stellt ein Gerüstkörper aus Aluminiumprofilen dar, welcher als Träger der einzelnen Subsysteme fungiert. Die Subsysteme bzw. funktionellen Untergruppen sind das Fahrwerk, die Vakuumerzeugung und -verteilung, die Hauptsensorik und Distanzmessung, die Steuerung sowie Energieversorgung und -verteilung, die Fördertechnik, die Greifer und die Hubkinematik. Die Schaltschränke der Steuerung sowie der Stromversorgung sind direkt in den Rahmen integriert, ebenso die omnidirektionalen Fahrantriebe und die Vakuumerzeugung.

Sensorik

Zur Erfassung der Entladesituation sind an der Rahmenvorderseite vier Tiefenkameras montiert, die die Position und Orientierung der Pakete dreidimensional erfassen. Unabhängig von der Position des Greifers und dessen Verdeckung befinden sich die zu entladenden Pakete immer im Blickfeld von mindestens zwei Kameras. An der Front montierte LED-Scheinwerfer ermöglichen die Aufnahme eines Farbbildes (RGB-Bild).

An den Seiten des Rahmens sind knapp über dem Boden zwei 270°-Laserscanner zur Umfeldüberwachung eingesetzt. Hiermit wird sichergestellt, dass das System beim Betreten des Sicherheitsbereichs durch einen Menschen stoppt. Die Scanner sind dabei so ausgerichtet, dass sich die überwachten Räume überschneiden.

Zur Kollisionsvermeidung und exakten Ausrichtung im Container sind an den Seiten des Greifers zusätzlich Ultraschallsensoren sowie verschiedene Laserdistanzmesser zur Feinjustierung der Sauggreifer verbaut. Zur Überwachung der im Greifer verbauten Vakuumsauger ist jeder einzelne mit einem Drucksensor ausgerüstet.

Hubkinematik

Während des Entladeprozesses erfolgt nach der Erkennung der Pakete ein Verfahren des Systems zur nächsten zu entladenden Paketreihe und eine Bewegung des Greifers auf die entsprechende Höhe. Hierzu wurde eine neuartige Hubkinematik entwickelt, welche durch Gelenke und Linearführungen mit dem Rahmen verbunden ist und über Elektrozylinder angetrieben wird. Bei Änderung der Höhe bleibt der Greifer parallel zum Boden und verschiebt sich weder nach vorn noch nach hinten, wodurch keine ausgleichenden Fahrbewegungen entlang der Containerachse notwendig sind. Dies stellt eine Besonderheit dieser Hubkinematik dar. Für bodennahe Pakete ermöglicht die Kinematik darüber hinaus eine Neigung des Greifers (siehe Abbildung 6). Eine detaillierte Beschreibung der Entwicklung und Realisierung der Hubkinematik erfolgt in Hoppe et al. (2020).

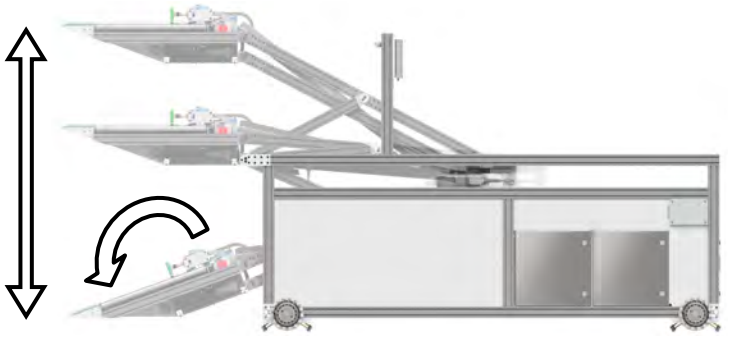


Abbildung 6: Heben, Senken und Neigen des Greifers aus der Seitenansicht.

Das System ist so dimensioniert, dass ganze Paketreihen mit einem Gesamtgewicht von bis zu 200 kg in einem Greifvorgang entladen werden können. Gemäß den in Abschnitt 3.1 erläuterten Eigenschaften der Stückgüter und den abgeleiteten Systemanforderungen ist damit eine Entladung vollständiger Paketreihen sicherstellt.

Greifer

Auf dem höhenverstellbaren Greifer sind mehrere Sauggreifer angebracht. Auf das Verfahren des Greifers folgt im Entladeprozess das Greifen der nächsten Paketreihe. Hierzu werden die Sauggreifer nach vorne verfahren (siehe Abbildung 7), die Pakete angesaugt, die Sauggreifer samt Pakete zurückgefahren und diese auf dem Rollenförderer abgelegt.

Abbildung 7: Bewegungen der gruppierten Vakuumsauger. Links in Endposition für den Pakettransport zum nachgeschalteten Förderer; rechts vor dem Ansaugen der Pakete.

Die beiden äußeren der drei unabhängig voneinander verfahrbaren Greifersegmente sind über Wellenführungen linear geführt. Der Antrieb erfolgt über eine Kette, die an den Enden des Greifers umgelenkt wird. Das mittlere Modul wird in seiner Ausgangsposition abgesenkt, um das Abfördern der Pakete zu ermöglichen.

Durch die Förderrollen auf dem Greifer können die entnommenen Packstücke ausgeschleust und über die nachfolgende Fördertechnik, welche zwischen Greifer und Rahmen eingehängt ist, aus dem Container transportiert werden.

Vakuumtechnik

Für das Greifen und Herausziehen der Pakete verfügt das System über 32 Sauggreifer. Das Vakuum zum Betrieb der Sauggreifer (Unterdruck von 900 mbar) wird zentral von einer Vakuumpumpe mit einem Volumenstrom von 130 m^3/h erzeugt. Die Verteilung des Vakuums erfolgt im Greifer, was die Wege zu den einzelnen Vakuumsaugern kurz und den Umfang der Schlauchpakete gering hält. Die zum Schalten der 32 Ventile benötigte Steuerluft wird über einen Kompressor bereitgestellt. Zur Überwachung des Vakuumaufbaus und dem ggf. notwenigen Abschalten einzelner Sauger (Leergriff) befindet sich vor jedem Vakuumsauger ein Drucksensor.

Fördertechnik

Die Abförderung der Pakete erfolgt über eine Schrägrollenbahn (siehe Abbildung 8). Die Schrägstellung der Rollenbahn bewegt die Packstücke gegen eine Führungsschiene und richtet sie so aus. Dies ist notwendig, da einige nachfolgende Anlagen und Systeme wie z.B. Barcode-Scanner oder Palettierer nur einzelne, sauber ausgerichtete Pakete handhaben können. Eine Unterteilung der Fördertechnik

in vier Zonen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten erlaubt die Vereinzelung und Ausrichtung der Pakete. Ein ggf. notwendiges Drehen der Pakete um die Querachse erfolgt im Anschluss durch ergänzende Systeme.

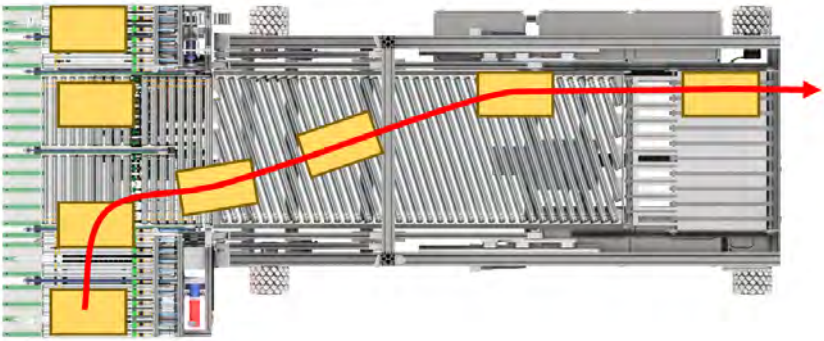


Abbildung 8: Transport der Packstücke über im Greifer integrierte Fördertechnik und Ausrichtung über die nachfolgenden Schrägrollenförderer

4. Mensch-Technik-Interaktion mit dem IRiS-Containerentladesystems

Im Normalbetrieb arbeitet das IRiS-Containerentladesystem autonom und führt die in Abschnitt 3.1 aufgeführten Schritte zur Containerentladung aus. Dabei kann es jedoch zu unvorhergesehenen Situationen kommen, die ein vollautonomes System in Störung versetzen und dessen Leistungsfähigkeit beeinträchtigen würden. Probleme können potentiell entlang der gesamten Informationsverarbeitungskette (vgl. Abbildung 9, dort „System“) auftreten. So können systeminterne Fehler z.B. bei der Erfassung oder Analyse von Informationen – wie z.B. einer fehlerhaften Erkennung von Paketkanten – in einem Ansaugen von Paketen gegen die Kante des Geifers resultieren. Darüber hinaus können externe störungsverursachende Situationen auftreten wie z.B. ein unvorhergesehenes Klemmen von Paketen oder das Herunterfallen eines Paketes, was die Laserscanner des Sicherheitsbereiches auslösen und damit das Entladesystem stoppen würde.

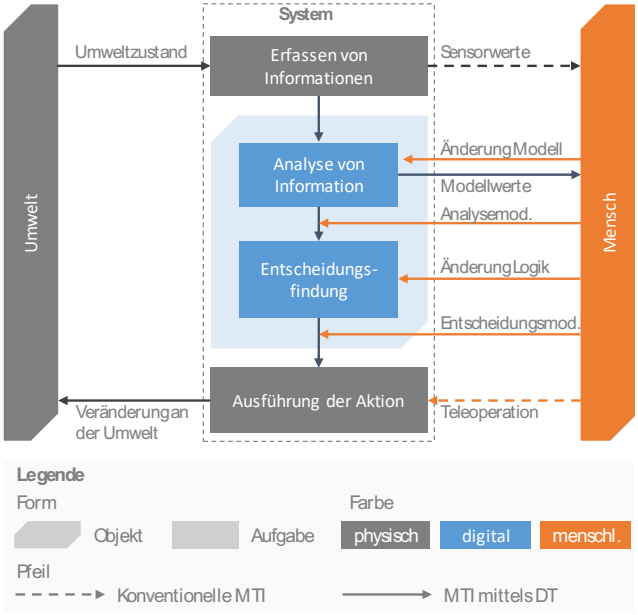


Abbildung 9: MTI über einen digitalen Zwilling (Wilhelm et al. 2020a)

Bei solchen Situationen kann der Bediener bzw. die Bedienerin in den autonomen Entladeprozess eingreifen (Abbildung 9). Dies erfolgt dabei ausschließlich innerhalb des gestörten Prozessschrittes durch klar definierte Interventionspunkte, die durch einen modularen digitalen Zwilling realisiert werden. Grundlage dieser MTI stellt eine menschenlesbare Schnittstelle dar, welche sowohl auf Sensorrohdaten als auch auf gesammelten und vorverarbeiteten Informationen aufbaut. Die Interaktion erfolgt über die entsprechenden Segmente des digitalen Zwillings, wobei jedes Modul einem Prozessschritt der Informationsverarbeitung entspricht. Die Informationsgrundlage liefert die in Abschnitt 3.3 beschriebene Sensorik sowie die Tiefenbildkameras, deren Daten in eine dreidimensionale Repräsentation des Systems und der Systemumgebung überführt werden. Mit diesem Modell kann der Mensch, auch über einen Fernzugriff, das System bei unklaren Situationen unterstützen. Dabei kann der Bediener bzw. die Bedienerin jeden Verarbeitungsschritt überwachen, modifizieren und/oder überschreiben. Im oben aufgeführten Beispiel einer fehlerhaften Paketkantenerkennung kann der Bediener bzw. die Bedienerin die tatsächliche Paketkante über den digitalen Zwilling korrigieren (Analysemodifikation). Findet im Fall von verklemmten Paketen der Algorithmus zur Steuerung der Entladestrategie keine automatische Lösung der Situation, kann der Mensch

über den digitalen Zwilling die getroffenen Entscheidungen anpassen (Entscheidungsmodifikation) oder gänzlich die Steuerung über das System übernehmen (Teleoperation). Neben diesen kurzfristigen Unterstützungen lassen sich durch Eingriffe in die bzw. Anpassung der Algorithmen des Systems längerfristige Veränderungen des Systemverhaltens durch den Bediener bzw. die Bedienerin umsetzen (Wilhelm et al. 2020b).

Die MTI erfolgt physisch an einem Leitstand mit Zwei-Faktor-Authentifizierung. Er besteht aus zwei Monitoren und stellt zum einen die Leistungsdaten eines oder mehrerer überwachter Containerentladeroboter dar und visualisiert zum anderen in einer Simulations- bzw. spieleähnlichen Umgebung das virtuelle Abbild und den Zustand des ausgewählten Roboters. Diese dreidimensionale Abbildung des Systems und der Umgebung (Abbildung 10) ermöglicht es, die Situation aus unterschiedlichen, frei wählbaren Blickrichtungen zu betrachten und wurde mittels Unity umgesetzt. Der Bediener bzw. die Bedienerin kann so unklare Situationen umfassend begutachten und analysieren, um diese nachfolgend zu lösen bzw. das System bei der Lösung zu unterstützen. Hinsichtlich der Eingabegeräte zur MTI wurden verschiedene Steuerungsmodalitäten umgesetzt. Neben einer klassischen Interaktion über Maus und Tastatur, welche sich insbesondere für die Navigation durch die Leistungsdatenvisualisierung eignet, wurde eine Gamepad-Steuerung sowie deren virtuelle Abbilder auf einem Smartphone und einem Tablet für die Interaktion in der Simulationsumgebung realisiert (Rolfs et al. 2020). Erste Usability-Pre-Tests mit operativen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Containerentladung zeigen, dass diese die Steuerung mittels Spielecontroller sowohl hinsichtlich Bedienbarkeit als auch Zielerfüllung präferieren.

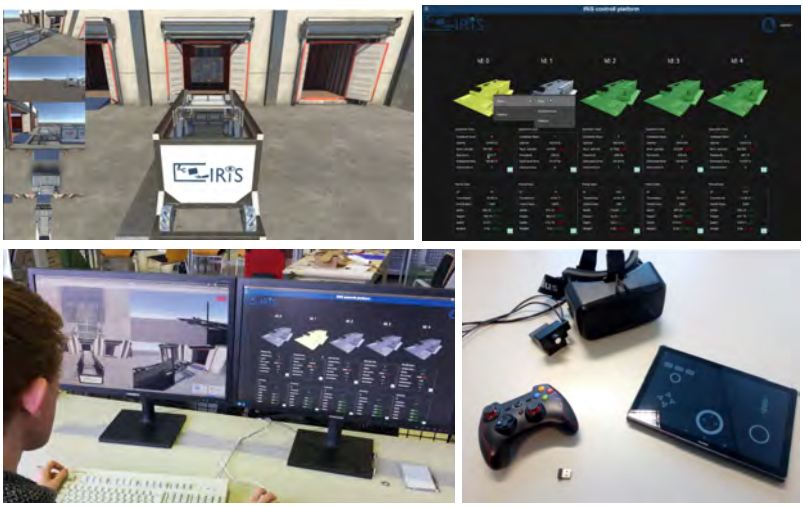


Abbildung 10: (oben) Visualisierungsinterface für Desktop- und VR-Anwendung sowie Oberfläche des Leitstands zur Überwachung mehrerer Entladesysteme; (unten) Leitstand sowie Eingabemodalitäten und Visualisierungsendgeräte (vgl. Rolfs et al. 2020)

Basierend auf dem Feedback der Tester*innen wurde für die Systemvisualisierung zusätzlich zu der Darstellung über eine Desktopanwendung die Unterstützung einer Virtual Reality (VR)-Brille (Oculus Rift) umgesetzt. Statt durch Eingaben über den Controller oder Schaltflächen in der Bedienoberfläche zwischen den verschiedenen Kamerapositionen wechseln zu müssen, können sich die Nutzer*innen einfach zu dem für sie relevanten Bildausschnitt hinbewegen, wodurch die angestrebte besonders intuitive Bedienung des Systems verbessert werden kann. Da die VR-Visualisierung jedoch nicht von allen Nutzer*innen problemlos genutzt werden kann (VR-Sickness, vgl. Lawson 2014), sollte sie lediglich als Ergänzung zu den anderen vorgestellten Lösungen gesehen werden.

Die Kombination aus digitalem Zwilling und verschiedenen Ein- und Ausgabegeräten ermöglicht eine sehr große Flexibilität bei der Steuerung des vorgestellten Entladeroboters. Sie reduziert die physischen Anforderungen an das Bedienpersonal und ermöglicht eine bedarfsgerechte und an den Nutzer*innen orientierte Steuerung des weitgehend autonomen Systems. Die Mitarbeiter*innen erhalten eine Bedienoberfläche, die jederzeitig ausschließlich die aktuell notwendigen Informationen auf sehr zugängige Art darstellt. Sobald eine verstärkte Interaktion mit dem System notwendig ist, erlaubt die Informationsaufbereitung auf Basis der Modelle im digitalen Zwilling ein hohes Systemverständnis und eine klare Darstellung der Eingriffsmöglichkeiten und trägt damit zum nutzer*innenorientierten MTI-Ansatz des IRiS-Systems bei.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde der Aufbau des und die Interaktion mit dem neu entwickelten IRiS-Entladeroboters für Container vorgestellt. Dafür wurden zunächst bestehende Systeme zur Entladung von Container in eine Morphologie eingeordnet und der Bedarf nach einer entsprechenden MTI verdeutlicht. Für den IRiS-Entladeroboters wurde die MTI mittels eines digitaler Zwilling realisiert.
Der weitere Forschungsbedarf besteht neben der Erprobung und Evaluation des Systems unter Labor- und Feldbedingungen in der Entwicklung von Schulungskonzepten für die MTI, einer Erweiterung der MTI durch eine beleuchtungsbasierte Visualisierung des Systemzustands sowie der Weiterentwicklung des Systems zu einem lernenden System, um mit immer komplexeren Entladesituationen autonom umzugehen. Hiermit sollen erforderliche Eingriffe der Benutzer*innen im Zuge des Lernprozesses zunehmend verringert werden, sodass die Person, die die Maschine bedient, weitestgehend die Rolle der Systemüberwachung einnimmt.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „IRiS – Interaktives Robotiksystem zur Entleerung von Seecontainern“, das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur unter dem Kennzeichen 19H17016C gefördert wird.

Literatur

Bastian Solutions (2018): ULTRA: Robotic Truck Trailer - Case Loader /Unloader. Indianapolis. URL: https://www.bastiansolutions.com/solutions/service/industrial-robotics/industrial-robotic-solutions/mobile-robotics/robotic-truck-unloading-loading/.

Beumer Group GmbH & Co. KG (2019) Beumer Parcel Picker. Beckum. Available at: https://www.beumergroup.com/uploads/tx_bbbrochures/BEUMER_Parcel_Picker_DE.pdf.

Bilberg, Arne, and Ali Ahmad Malik. "Digital twin driven human–robot collaborative assembly." CIRP Annals 68.1 (2019), pp. 499-502, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.011.

Carton Mover BV (2011) Carton Mover. Available at: http://cartonmover.com/ (Accessed: 30 January 2020).

Copal Handling Systems (2020a) SpiderGripper: Säckengreifer, Automatisches Entladen von Säcken aus einem Container. Available at: https://www.copalhandlingsystems.de/produkte/spidergripper/ (Accessed: 2 June 2020).

Copal Handling Systems (2020b) PullPlate, Ausbalancierte Technik. Available at: https://www.copalhandlingsystems.de/produkte/pullplate/ (Accessed: 2 June 2020).

Copal Handling Systems (2019) C2 Container Unloader. Heerenberg. Available at: https://www.copalhandlingsystems.de/produkte/copal-c2/.

Honeywell Intelligrated (2019) Robotic Unloader. Mason. Available at: https://www.intelligrated.com/en/solutions/technology/robotics/robotic-unloader.

Hoppe, N.; Wilhelm, J.; Petzoldt, C.; Rolfs, L.; Beinke, T.; Freitag, M.: Design eines Robotiksystems zur Entleerung von Seecontainern, 16. Fachkolloquium der WGTL, Hamburg, (2020)

Horváth, Gergely, and Ferenc Gábor Erdős. "Gesture control of cyber physical systems." Procedia Cirp 63 (2017), pp. 184-188, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.312.

W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes, und W. Sihn, „Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification“, IFAC-PapersOnLine, Bd. 51, Nr. 11, (2018) pp. 1016–1022, doi: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474.

Francesco Longo, Letizia Nicoletti, Antonio Padovano, „Ubiquitous knowledge empowers the Smart Factory: The impacts of a Service-oriented Digital Twin on enterprises' performance“, Annual Reviews in Control, Volume 47, (2019), pp. 221-236, doi: 10.1016/j.arcontrol.2019.01.001.

Yuqian Lu, Xun Xu: „Cloud-based manufacturing equipment and big data analytics to enable on-demand manufacturing services“, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Volume 57 (2019), pp. 92-102, https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.11.006.

Ali Ahmad Malik, Tariq Masood & Arne Bilberg: „Virtual reality in manufacturing: immersive and collaborative artificial-reality in design of human-robot workspace“, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 33,1 (2020), 22-37, doi: 10.1080/0951192X.2019.1690685.

Mortensen, E. R.; Beinke, T.; Freitag, M.; Rohde, M.: Automatic Unloading of Coffee Sacks out of Sea Containers – Special Pile Situations and Challenges for Gripping. Int. Conf. Mater. Handl. Constr. Logist. Wien, (2019), pp. 229-234.

E. Negri, L. Fumagalli, und M. Macchi, „A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems“, Procedia Manuf., Bd. 11, Nr. June, (2017), pp. 939–948, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.198.

Kyu Tae Park, Sung Ju Im, Yong-Shin Kang, Sang Do Noh, Yong Tae Kang & Suk Gon Yang: „Service-oriented platform for smart operation of dyeing and finishing industry“, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Volume 32, 3, (2019), pp. 307-326, doi: 10.1080/0951192X.2019.1572225.

Petzoldt, C.; Wilhelm, J.; Hoppe, N. H.; Rolfs, L.; Beinke, T.; Freitag, M.: Control architecture for digital twin-based human-machine interaction in a novel container unloading system. In: 5th International Conference on System-Integrated Intelligence. Bremen 2020, (in print).

Lawson, Ben D.: Motion sickness symptomatology and origins. In Handbook of Virtual Environment: Design, implementation, and applications, 2nd ed. (2014), pp. 532-587, doi: 10.1201/b17360-29

Lennart Rolfs, Nils Hoppe, Christoph Petzoldt, Jasper Wilhelm, Thies Beinke, Michael Freitag „Steuerung adaptiver Systeme mittels digitalem Zwilling – Mensch-Technik-Interaktion während des Produktlebenszyklus am Beispiel der Containerentladung“, In: Industrie Management 36 (2020) 5, (eingereicht).

Álvaro Segura, Helen V. Diez, Iñigo Barandiaran, Ander Arbelaiz, Hugo Álvarez, Bruno Simões, Jorge Posada, Alejandro García-Alonso, Ramón Ugarte: „Visual computing technologies to support the

Operator 4.0“, Computers & Industrial Engineering, Volume 139, (2020), doi: 10.1016/j.cie.2018.11.060.

Siemens Logistics GmbH (2020) RUBUS - Effective parcel unloading and transport. Available at: https://www.siemens-logistics.com/en/unloading (Accessed: 4 February 2020).

Stoyanov, T.; Vaskevicius, N.; Mueller, C.A.; Fromm, T.; Krug, R.; Tincani, V.; Mojtahedzadh, R.; Kunaschk, S.; Mortensen Ernits, R.; Rohde, M.: „No More Heavy Lifting: Robotic Solutions to the Container Unloading Problem“. In: IEEE Robot. Autom. Mag. 23 (2016) 4, S. 94–106, doi: 10.1109/MRA.2016.2535098.

Uhlenkamp, Jan-Frederik, Wellsand, Stefan; Hribernik, Karl; Thoben, Klaus-Dieter: Digital Twin Applications : A first systemization of their dimensions. IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (2019) doi: 10.1109/ICE.2019.8792579

UNCTAD: Quantity of loaded freight in international maritime trade from 1970 to 2017 (in million metric tons loaded). In: Statista. 2018. URL: https://www.statista.com/statistics/234698/loaded-freight-in-international-maritime-trade-since-1970/, abgerufen am 17.04.2020.

J. Wilhelm, T. Beinke, und M. Freitag, „Improving Human-Machine Interaction with a Digital Twin“, in Dynamics in Logistics, M. Freitag, H. Kotzab, und J. Pannek, Hrsg. Bremen: Springer International Publishing, (2020a), pp. 527-540, doi: 10.1007/978-3-030-44783-0_49.

Wilhelm, J.; Petzoldt, C.; Beinke, T.; Freitag, M.: Modularer digitaler Zwilling für adaptive Systeme - Mensch-Technik-Interaktion zur Steuerung semi-autonomer Systeme am Beispiel der Containerentladung. In: Industrie Management 36 (2020b) 2, S.24-28.

World Trade Organization, World Trade Statistical Review 2019. Genf 2019.

Wynright Corp (2016) Robotic Container Unloader (RTU). Arlington. Available at: https://robotics.wynright.com/pdf/RTL-U-Standard.pdf.

Datenbasierte Ursachenanalysen zur Verbesserung der logistischen Zielerreichung

Matthias Schmidt[1], Janine Tatjana Maier[1], Lasse Härtel[2]

[1]Institut für Produkt- und Prozessinnovation, Leuphana Universität Lüneburg
[2]Institut für Fabrikanlagen und Logistik, Leibniz Universität Hannover

1. Einleitung

Technologischer Fortschritt und zunehmende Digitalisierung bieten Produktionsunternehmen viele Chancen, stellen sie jedoch auch immer wieder vor neue Herausforderungen. Während im Produktionsbereich eine fortschreitende Automatisierung der Prozesse zu beobachten ist und technische Lösungen zur Unterstützung der Mitarbeiter, wie zum Beispiel durch Mensch-Roboter-Kollaborationen, zu deutlichen Veränderungen der Arbeitsläufe führen, wird in anderen Unternehmensbereichen nach wie vor ein Großteil der Arbeit vom Menschen erledigt. So verhält es sich teilweise auch mit Nutzung von Daten. Zwar werden bereits vielen Daten automatisiert erfasst und sortiert, jedoch erfolgt die finale Auswertung dieser Daten und die Entscheidungsfindung oft manuell. Aufgrund der Dynamik im Produktionsumfeld und der Tragweite der zu treffenden Entscheidungen ist eine vollständige Automatisierung in diesem Bereich jedoch auch in Zukunft nicht absehbar. Ziel muss es daher sein, den Menschen bei der Datenanalyse durch den gezielten Einsatz technischer Hilfsmittel im Entscheidungsprozess zu unterstützen.

Im Rahmen des Produktionscontrollings stellen daten- und kennzahlenbasierte Analysen eine Grundvoraussetzung zur kontinuierlichen Überwachung und Verbesserung der logistischen Leistungs- und Kostengrößen dar (Wiendahl/Wiendahl 2019). Abweichungen von den vorgegebenen logistischen Zielgrößen sind anhand geeigneter Indikatoren frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen abzuleiten. Hierbei stoßen klassische Produktionscontrolling-Ansätze aber auch rein datengetriebene Analytics-Ansätze an ihre Grenzen.

Ein dynamisches Produktionsumfeld und ein fehlendes Verständnis über die komplexen logistischen Ursache-Wirkungsbeziehungen entlang der Lieferkette führen

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_9

dazu, dass häufig nur die Symptome einer Abweichung von den logistischen Zielgrößen, jedoch nicht die Ursachen selbst, identifiziert und beseitigt werden (Nyhuis 2016). Produktionscontroller nutzen die vorhandenen Daten oft nicht systematisch, wodurch Entscheidungen ohne ein tiefergehendes Verständnis über die vorliegenden Wirkbeziehungen getroffen werden und Maßnahmen zum Teil wirkungslos bleiben oder mitunter sogar zu einer Verschlechterung der logistischen Leistungsfähigkeit führen.

In diesem Beitrag wird aufgezeigt, wie ein modellbasierter Ansatz Produktionscontroller dabei unterstützen kann das Potenzial der aufgenommenen Produktionsdaten durch systematische Analysen ideal zu nutzen. Dazu werden in Kapitel 2 bestehende Ansätze des Produktionscontrollings kategorisiert und anhand von drei Kriterien bewertet. Anhand dieser Gegenüberstellung wird das Potenzial logistischer Modelle zur systematischen Datenanalyse für das Produktionscontrolling herausgestellt. Die Datenanalyse fußt auf der Ableitung der zentralen Einflussgrößen auf die logistischen Zielgrößen aus allgemeingültigen logistischen Wirkmodellen und der Strukturierung bestehender Wirkbeziehungen in Form von Ursachenbäumen. In Kapitel 3 werden hierfür die für das Produktionscontrolling entscheidenden Zielgrößen der unternehmensinternen Lieferkette dargestellt. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 die generelle Modellierungsidee zur Identifizierung der Ursachen einer unzureichenden Zielerreichung beschrieben. Zur Veranschaulichung des Konzeptes werden exemplarisch zwei Ursachenbäume vorgestellt. Der Ansatz zur modelbasierten Ursachenanalyse wird in Kapitel 5 thematisiert. Den Entscheidungspunkten entlang der Ursachenbäume wurden geeignete Methoden der Datenanalyse und logistische Modelle zugeordnet und in einen systematischen Analyseablauf unter Nutzung valider Entscheidungsregeln überführt. Auf Basis des entwickelten Vorgehens wird in Kapitel 6 diskutiert, welche technischen Möglichkeiten zur Integration in ein IT-basiertes Entscheidungsunterstützungssystem für das Produktionscontrolling bestehen, welches die beiden essentiellen Faktoren Domain-Expertise und Know-how zur Datenanalyse bestmöglich miteinander verknüpft. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und Ausblick in Kapitel 7.

2. Ansätze des Produktionscontrollings

In der unternehmensinternen Lieferkette liegen zwischen den unterschiedlichen kernprozessspezifischen wirtschaftlichen und logistischen Zielgrößen Konflikte vor. Die Entspannung der Zielkonflikte schafft die Voraussetzungen für eine Verbesserung der Zielerreichung. Geeignete Maßnahmen hierfür sind im Rahmen des Produktionscontrollings zu erarbeiten.

Das Produktionscontrolling hat zur Aufgabe, eine wirtschaftliche Produktion und Einhaltung der logistischen Leistungs- und Kostenziele sicherzustellen (Gollwitzer/Karl 1998, Reichmann 2011). Zur Bewältigung der Aufgaben des Produktionscontrollings und insbesondere der Ableitung von geeigneten Maßnahmen bedarf es eines systematischen Vorgehens. In der Literatur existierende Ansätze lassen sich wie folgt kategorisieren:

- empirische Ansätze,
- wirtschaftlich orientierte Ansätze,
- simulationsbasierte Ansätze,
- modellbasierte Ansätze und
- Data Mining Ansätze.

Die verschiedenen Ansätze innerhalb dieser Kategorien sowie die Kategorien selbst lassen sich anhand von drei übergeordneten Kriterien bewerten. Der Nutzen der Ansätze wird hierbei durch das Kriterium "Gewährleistung der Allgemeingültigkeit" dem Aufwand in Form der Kriterien "Aufwand zur Anwendung" und " Erforderliches Know-how" gegenübergestellt.

Empirische Ansätze nutzen Vergangenheitsdaten aus vergleichbaren Situationen, um Wirkzusammenhänge einzuschätzen und somit Potenziale und Maßnahmen abzuleiten. Ein Beispiel für einen Ansatz dieser Kategorie ist das Toolset von Wildemann (2007). In der Regel sind in Unternehmen keine oder nur wenig Daten zu vergleichbaren vergangenen Situationen vorhanden. Die mangelnde statistische Absicherung ist daher meist ein grundlegendes Problem der empirischen Ansätze. Die Optimierung der Unternehmenssituation mithilfe von betriebswirtschaftlichen Kennzahlen steht im Fokus wirtschaftlich orientierter Ansätze. In diesem Zusammenhang häufig eingesetzte Instrumente sind Kennzahlensysteme (siehe exempl. Luczak et al. 2004) und Treiberbäume (siehe exempl. Jodlbauer 2007). Kennzahlensysteme allein sind nur bedingt dazu geeignet Maßnahmen abzuleiten, da hierbei Wechselwirkungen zwischen den Zielgrößen der unternehmensinternen Lieferkette nicht berücksichtigt werden. Treiberbäume sind in diesem Zusammenhang ein sehr wirksames Instrument, erfordern jedoch viel Knowhow. Folglich ist sowohl bei den empirischen Ansätzen als auch bei den wirtschaftlich orientierten Ansätzen der Aufwand zur Anwendung eher gering und die Gewährleistung der Allgemeingültigkeit sowie das notwendige Know-how sind kritisch zu sehen.

Simulationsbasierte Ansätze eignen sich, wenn die Konsequenzen von weitreichenden Entscheidungen nicht unmittelbar erkennbar sind (Rabe et al. 2008). Ohne

Maßnahmen tatsächlich umsetzten zu müssen, können mithilfe von Simulationen verschiedenen Maßnahmen evaluiert werden. Simulationen können somit als objektive Entscheidungsgrundlage für das Produktionscontrolling dienen (Eley 2012). Vor mehr als 20 Jahren wurde bereits Kritik zu einem an dem hohen Modellierungsaufwand (Kuhn/Rabe 1998) und zum anderen daran, dass Aussagen nur für das zugrundeliegende Modell gelten und somit nicht ohne weiteres verallgemeinerbar sind (VDI 1997) geübt. Trotz des seit dieser Zeit stattgefunden technologischen Fortschrittes, sind diese Aspekte weiterhin nachteilig, wenn auch nicht mehr im gleichem Ausmaß (Nyhuis/Wiendahl 2012, Gutenschwager et al. 2017). Während das erforderliche Know-how und der Rechen- und Modellierungsaufwand zur Anwendung simulationsbasierter Ansätze zunehmend geringer wird, kann die Allgemeingültigkeit dennoch nicht gewährleistet werden.

Als Grundlage von modellbasierten Ansätzen dienen vorrangig logistische Modelle. Durch die Anwendung und Interpretation geeigneter Modelle lassen sich Wechselwirkungen zwischen den Stell-, Regel- und Zielgrößen in der unternehmensinternen Lieferkette aufzeigen. Die grundlegenden Wechselwirkungen zwischen den Prozessen zu verstehen, ermöglicht es Ursachen für unzureichende Werte der Zielgrößen zu identifizieren, die Wirkung möglicher Maßnahmen abzuschätzen und schlussendlich geeignete Maßnahmen auszuwählen (Nyhuis et al. 2008, Nyhuis/Wiendahl 2012). Die Herausforderungen von modelbasierten Ansätzen liegen zum einen in der Inkonsistenz der Daten in vielen Unternehmen und zum anderen in dem erforderlich Know-how für die Modellbildung. Positiv sind hierbei der geringe Anwendungsaufwand sowie die Allgemeingültigkeit der getroffenen Aussagen.

Data Mining Ansätze sind unter dem Begriff Business Analytics oder im Produktionsumfeld auch Production Analytics zu verorten (Schuh et al 2019). Häufig werden sie zur Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Produktionssteuerung (bspw. Auswahl der optimalen Maschinenbelegung) angewendet. Vermehrt finden sich jedoch auch Ansätze, die Data Mining Methoden zur Ursachenanalyse einsetzen. Diese fokussieren bislang jedoch meist exemplarisch einzelne Ziel- bzw. Einflussgrößen. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Identifikation der wesentlichen Einflussfaktoren auf die Termintreue. Während Windt und Hütt (2011) Clusteranalysen nutzen, wenden Veigt et al. (2019) datenbasierte, prädikativen Methoden an. Veigt et al. (2019) merken jedoch an, dass rein datenbasiert keine konkreten Ursachen für Verspätungen identifiziert, sondern nur Ansatzpunkte für die weitere Ursachensuche herausgefiltert werden können. Schuh et al. (2019) entwickeln erste IT-Anwendungen, die bei der Analyse von Produktionsdaten unter Nutzung künstlicher Intelligenz unterstützen. Neben einem hohen Aufwand zur Datenvorverarbeitung und anwendungsfallspezifischen Auswahl einer geeigneten Methode,

ist bei den rein datengetriebenen Analysen zudem kritisch zu sehen, dass die Analyseergebnisse stark von der Auswahl der Datenbasis abhängen und ein umfangreiches Logistikverständnis benötigt wird, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen. Data Mining Ansätze weisen hinsichtlich aller Beurteilungskriterien Schwächen auf, verfügen jedoch auch über das größte Entwicklungspotenzial.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass in den letzten Jahren vor allem der Einsatz von Methoden aus dem Bereich des Data Mining an Bedeutung gewinnt (Nguyen et al. 2018). Data Mining Ansätze bieten die Möglichkeit Einflussfaktoren auf die logistische Leistungsfähigkeit anhand von Produktionsdaten zu identifizieren und Prognosen über das zukünftige Systemverhalten abzuleiten. Es besteht jedoch die Gefahr, dass irrelevante Merkmale betrachtet werden und die Haupt-Ursachen verborgen bleiben. Zudem können keine Kausalzusammenhänge, sondern lediglich Korrelationen identifiziert werden. Somit ist eine sorgfältige Interpretation der Analyseergebnisse durch Prozessexperten weiterhin erforderlich. Jedoch wird gerade das fehlende Logistikverständnis der Mitarbeiter/innen von Unternehmen oftmals bemängelt (Nyhuis 2016, Mundt et al. 2019). Fehlt das notwendige Verständnis über vorliegende Wirkbeziehungen, ist das Risiko einer Fehlinterpretation hoch. Die Vielschichtigkeit der Ursachen einer mangelhaften Zielerreichung sowie der Einfluss verschiedenster, in der Praxis vorhandener interner und externer Faktoren machen eine weitere Unterstützung des Produktionscontrollings notwendig. Logistische Modelle ermöglichen systematische Analysen der vorhandenen Unternehmensdaten auf Basis bekannter, allgemeingültiger Ursache-Wirkungszusammenhänge, unterstützen bei der Interpretation der Analyseergebnisse und tragen zudem zu einem steigenden Verständnis über logistische Wirkbeziehungen bei. Nachfolgend wird ein Ansatz zur systematischen Datenanalyse unter Nutzung allgemeingültiger logistischer Modelle für das Produktionscontrolling vorgestellt.

3. Zielgrößen im Produktionscontrolling der unternehmensinternen Lieferkette

Um langfristig an einem globalen dynamischen Markt bestehen zu können, müssen Unternehmen ihre Kunden zufrieden stellen und zugleich wirtschaftlich agieren. Unternehmen stehen daher vor der Herausforderung, sich zwischen den operativen Leistungszielen Kosten, Zeit und Qualität bestmöglich zu platzieren (Westkämper/Decker 2006). Diese drei Leitungsziele lassen sich in mehrere erfolgswirksame und durch die PPS beeinflussbare Teilziele unterteilen. In der Praxis gelingt vielen Unternehmen jedoch die zielorientierte Erfüllung der Aufgaben der PPS nicht oder nur bedingt. Dies zeigt sich beispielsweise an (in Anlehnung an Wiendahl 2012):

- dem Einsatz von Faustregeln,
- der Auswahl ungeeigneter Verfahren für die PPS-Aufgaben,
- der fehlerhaften Einstellung von PPS-Parametern,
- der häufigen Notwendigkeit von Umplanungen und
- und somit in einer unzureichenden logistischen Zielerreichung.

Der entscheidende Grund hierfür liegt meist in dem fehlenden Verständnis für die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen und innerhalb der PPS-Aufgaben und der Zielgrößen (Nyhuis 2016). Die Ausprägungen der wirtschaftlichen und logistischen Zielgrößen beschreiben den unternehmensspezifischen Systemzustand. Sie können daher sowohl zur Planung und Steuerung als auch zur Überwachung der Zielerreichung eingesetzt werden (Wiendahl 2012). Die sich aus den übergeordneten drei Leistungszielen ergebenen Teilziele lassen sich als Zielsysteme auf die drei Kernprozesse Beschaffung, Produktion und Versand der unternehmensinternen Lieferkette übertragen. Diese Zielsysteme werden für jeden Kernprozess durch spezifische wirtschaftliche und logistische Zielgrößen beschrieben. Die Herausforderung hierbei besteht in den Wechselwirkungen zwischen den Zielgrößen innerhalb der Kernprozesse sowie über diese hinweg. Zudem besteht teilweise eine konträre Ausrichtung der Zielgrößen. Besonders für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) stellt das Produktionscontrolling aufgrund der diversen Wechselwirkungen eine große Herausforderung dar. In KMUs existieren oftmals keine separaten Planungs- und Controlling-Abteilungen. Zudem müssen Entscheidungen aufgrund der geringen Verhandlungsmacht gegenüber Lieferanten und Kunden meist unter Zeitdruck getroffen werden.

Abbildung 1 verortet die wirtschaften und logistischen Zielgrößen in der unternehmensinternen Lieferkette. Ausgehend vom Kernprozess Versand werden im Folgenden die Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen entlang der unternehmensinternen Lieferkette kurz beschrieben.

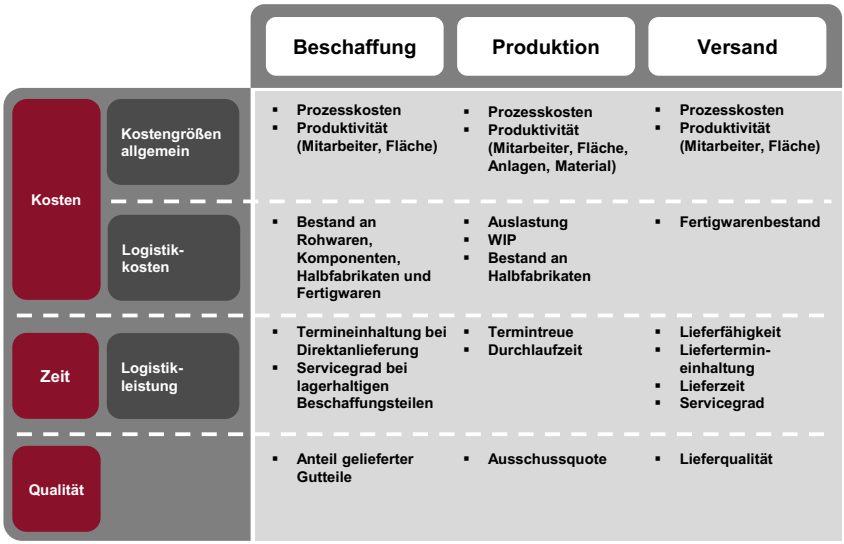


Abbildung 1: Zielgrößen in der unternehmensinternen Lieferkette
(in Anlehnung an Lödding 2008: 7, Schmidt 2018: 178)

Im Versandbereich eines Produktionsunternehmensnehmens werden die Fertigerzeugnisse entweder aus der Produktion (vom Unternehmen selbst hergestellte Produkte) oder aus der Beschaffung (Handelswaren) bezogen. In Abhängigkeit der Kundenanforderungen an Lieferzeit und Individualisierungsgrad werden die Produkte in den jeweiligen Fertigungsstufen entweder kundenauftragsneutral oder kundenauftragsspezifisch produziert und auch beschafft. Während die Zielgrößen in Bezug auf die allgemeinen Kostengrößen und die Qualität für Auftrags- und Lagerfertiger gleich sind, unterscheiden sie sich für Logistikleistung und -kosten. Für einen Lagerfertiger hängt die Logistikleistung von der Lieferfähigkeit und dem Servicegrad ab. Die Zielgrößen stehen in Zusammenhang mit dem Bestand von kundenauftragsneutral hergestellten Produkten im Fertigwarenlager. Im Fall eines Auftragsfertigers bezieht sich der Bestand hingegen auf zu früh fertiggestellte Kundenaufträge. Diese Zielgröße steht in Wechselwirkung mit den beiden Zielgrößen Liefertermineinhaltung und Lieferzeit. Sowohl für Lager- als auch Auftragsfertiger herrschen verschiedene Zielkonflikte zwischen den beschrieben Zielgrößen vor.

Die zentralen Zielgrößen im Kernprozess Produktion sind die Auslastung, der Work in Process, die Termintreue und die Durchlaufzeit. Bei einem Auftragsfertiger wirkt sich eine geringe Termintreue unmittelbar aus die Liefertermineinhaltung aus und lange Durchlaufzeiten spiegeln sich in langen Lieferzeiten wieder. Eine geringe Termintreue und lange Durchlaufzeiten müssen bei einem Lagerfertiger durch hohen Sicherheitsbestand im Fertigwarenlager kompensiert werden.

Die Auslastung und der Work in Process wirken sich in Form von Kosten für ungenutzte Kapazitäten und Bestände direkt auf den Unternehmenserfolg aus. Die anderen Zielgrößen im Kernprozess Produktion (Prozesskosten, Produktivität, Bestand an Halbfabrikaten und Ausschussquote) haben Einfluss auf die vier zentralen Zielgrößen.

Die Beschaffung versorgt sowohl die Produktion als auch den Versandbereich mit Material. Im Fall einer ausschließlich zeitlichen Entkopplung der Versorgung ist die Termineinhaltung die zentrale Zielgröße. Auf Logistikkostenseite resultiert dies oft in einem Pufferbestand. Bei einer Entkopplung über eine Lagerstufe für Rohwaren, Halbfabrikate oder Fertigwaren ist die entscheidende Zielgröße der Servicegrad. Dieser steht dem Bestand an Rohwaren, Komponenten, Halbfabrikaten und Fertigwaren (Handelswaren) gegenüber. Die Zielgrößen in Bezug auf Kostengrößen allgemein und Qualität unterscheiden sich bei den Entkopplungsarten nicht.

4. Ursachen für unzureichende Zielerreichung

Die Identifizierung von sich negativ auf die Zielgrößen auswirkenden Faktoren stellt die Grundlage zur Verbesserung der Zielerreichung dar. Zur Ableitung allgemeingültiger Ursache-Wirk-Beziehung können Ursachenbäume genutzt werden. Ausgehend von einer Zielgröße in der unternehmensinternen Lieferkette werden mögliche Ursachen für einen mangelhaften Wert dieser Zielgröße ermittelt. Mögliche Ursachen werden über mehrere Ebenen hinweg weiter aufgesplittet bis die primären Ursachen ermittelt werden können. Die Anzahl der Ebenen kann sich hierbei für die verschiedenen Zielgrößen sowie auch für die einzelnen Aspekte einer Zielgröße unterscheiden. Aufgrund der zahlreichen Wechselwirkungen zwischen den Zielgrößen bestehen auch zwischen den einzelnen Ursachenbäumen Verbindungen. Mithilfe von Verweisen lassen sich die Ursachenbäume zu einem lückenlosen Kausalnetzwerk entlang der unternehmensinternen Lieferkette zusammenfügen. Abbildung 2 stellt das generelle Konzept des entwickelten Kausalnetzwerkes dar.

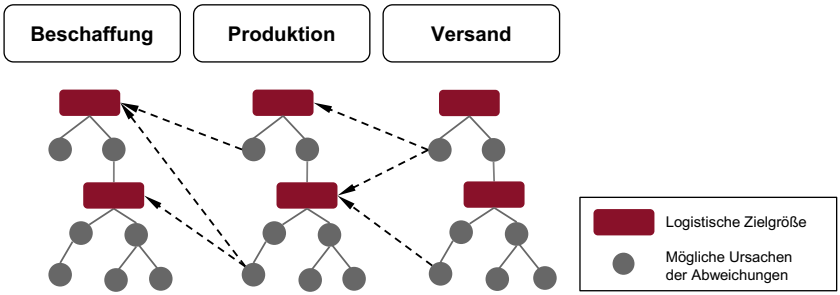


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Modellierungsidee (Härtel/Nyhuis 2018: 7)

Eine umfassende Beschreibung aller Ursachenbäume findet sich bei Schmidt (2018). Mit dem Softwaredemonstrator QuantiLoPe (Härtel n.d.) steht zudem ein kostenloses Tool zur schrittweisen Anwendung von Ursachenbäumen zur Verfügung. Unternehmen sind somit in der Lage die Ursachen für eine mangelhafte Zielerreichung zu identifizieren und geeignete Maßnahmen abzuleiten. Als Beispiel für die Ursachen-Wirkbeziehungen sind im Folgenden die Ursachenbäume für die Zielgrößen Termintreue und Servicegrad dargestellt. Aufgrund der vielen Wechselwirkungen zwischen den Zielgrößen sind die Ursache-Wirkbeziehungen in der Praxis sehr komplex. Um die Verständlichkeit zu erhöhen, sind in den beispielhaft dargestellten Ursachenbäumen ausschließlich starke direkt Verknüpfungen aufgeführt. Alle Ebenen, die den in Abbildungen 3 und 4 dargestellten, nachgelagert sind, basieren auf unternehmensspezifischen Ursachen.

Die Termintreue ist eine zentrale Zielgröße im Kernprozess Produktion. Sie gibt das Verhältnis der in einem definierten Toleranzbereich fertiggestellten Produktionsaufträge zu der Gesamtanzahl an bearbeiteten Produktionsaufträgen im Untersuchungszeit an. Abbildung 3 veranschaulicht die Ursachen für eine geringe Termintreue. Die nachgelagerten Ebenen splitten die drei Hauptursachen Terminabweichung im Zugang, Rückstand und Reihenfolgeabweichungen detailliert auf.

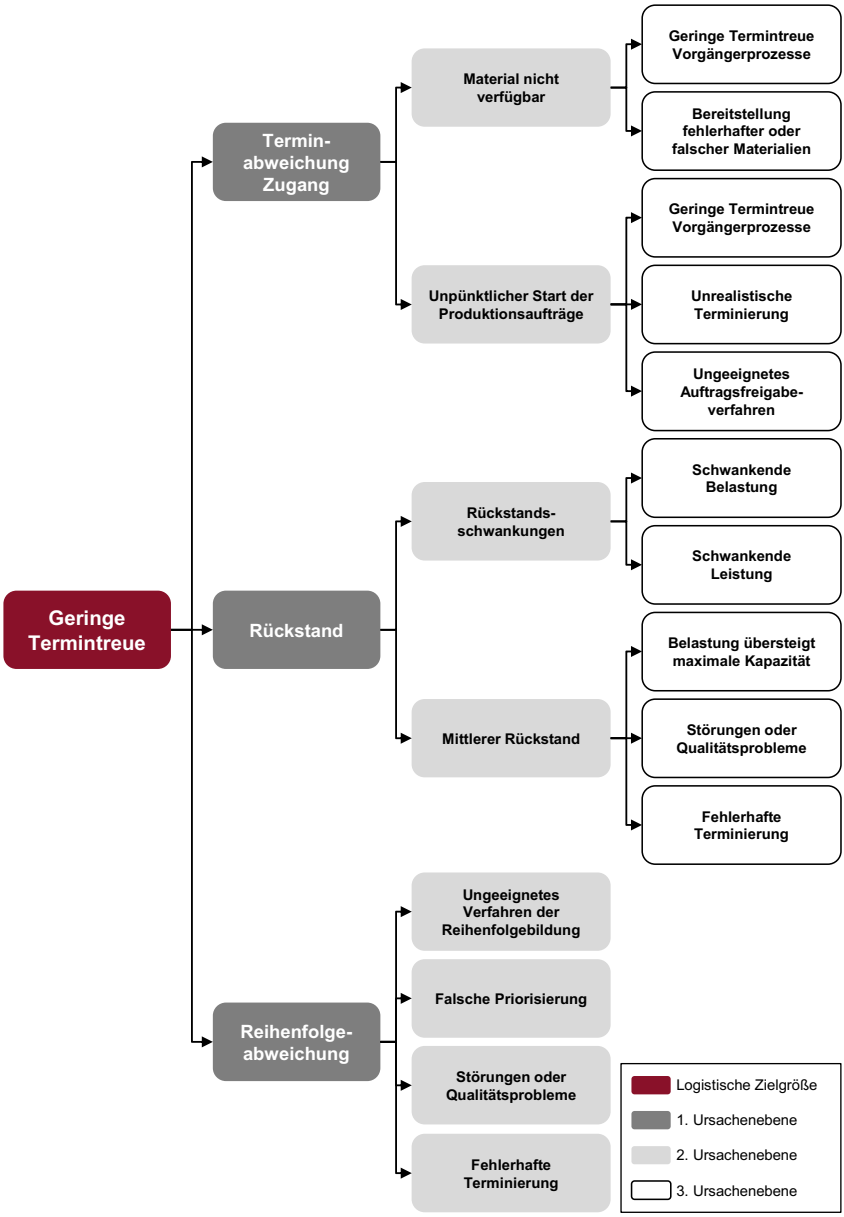


Abbildung 3: Ursachenbaum für die Zielgröße Termintreue (Schmidt et al. 2019: 278)

Eine Abweichung im Zugang tritt auf, wenn für einen Produktionsauftrag benötigtes Material zum Zeitpunkt des geplanten Produktionsstarts nicht verfügbar ist. Gründe hierfür können eine geringe Termintreue in vorgelagerten Prozessen oder die Bereitstellung fehlerhafter bzw. falscher Materialien sein. In diesen Fällen sind die Vorgängerprozesse zu untersuchen. Eine weitere Ursache für Abweichungen im Zugang können unpünktlich freigegebene Produktionsaufträge sein. Aufgrund einer geringen Termintreue in Vorgängerprozessen können beispielweise Auftragsdokumente, Zeichnungen oder Bestätigungen der Qualität oder der benötigten Werkzeuge fehlen und somit Aufträge nicht rechtzeitig freigegeben werden. Zudem kann eine unrealistische Planung zu einer Abweichung vom Plan-Starttermin führen. Darüber hinaus können individuelle oder systematische Fehler durch die Anwendung eines ungeeigneten Auftragsfreigabeverfahrens einen verfrühten oder verspäteten Start von Produktionsaufträgen nach sich ziehen.

Die Differenz zwischen der geplanten und der tatsächlichen Leistung eines Systems wird durch den Rückstand beschrieben (Lödding et al. 2014). Entspricht die tatsächliche Leistung nicht der geplanten, unabhängig davon ob diese geringer oder höher ist, führt dies zu einer Terminabweichung. Der Rückstand kann sowohl im Mittel abweichen, als auch schwankend sein. Rückstandsschwankungen wirken sich in erster Linie auf die Streuung der resultierenden Terminabweichungen aus. Sie ergeben sich aufgrund einer schwankenden Belastung, welche durch ein dynamisches Kundenverhalten begründet sind, oder aufgrund einer ungleichmäßig Leistung. Eine kontinuierliche die verfügbare Kapazität übersteigende Belastung führt zu einem steigenden mittleren Rückstand und lässt sich direkt in eine mittlere Terminabweichung übertragen (Yu 2001, Lödding et al. 2014). In diesen Fällen wurden Aufträge angenommen ohne die Belastung der Produktion zu berücksichtigen. Ohne eine Erhöhung der verfügbaren Kapazität oder Senkung der Belastung steigt der Rückstand und somit die mittlere Terminabweichung weiter an. Ein weiterer Grund für einen mittleren Rückstand können häufig auftretende technische oder organisatorische Störung sowie Qualitätsprobleme bezüglich Produkten oder Prozessen sein. Dies ist besonders problematisch, wenn die Systeme am Auslastungsmaximum operieren. Außerdem kann ein mittlerer Rückstand aus einer fehlerhaften Terminierung resultieren. Eine Abweichung der Ist-Durchlaufzeiten von den Plan-Durchlaufzeiten kann z.B. durch fehlerhafte Arbeitspläne und veraltete Stammdaten hervorgerufen werden.

Die dritte Hauptursache für eine geringe Termintreue ist eine Abweichung der Ist-Fertigstellungsreihenfolge von der Plan-Fertigstellungsreihenfolge. Veränderungen in der Warteschlange von Arbeitssystemen führen zu einer höheren Varianz der Durchlaufzeiten. Abweichungen werden oft absichtlich durch Prioritätsregeln herbeigeführt. Ein anderer Grund für eine Reihenfolgevertauschung ist eine falsche

Priorisierung durch Mitarbeiter. Um ihre eigenen Leistung oder die ihrer Maschine zu erhöhen, bündeln Mitarbeiter ähnliche Aufträge oder ziehen Aufträge mit großen Stückzahlen. Weitere Ursachen können technische und organisatorische Störungen oder Qualitätsprobleme bezüglich Produkten und Prozessen sein. In diesen Fällen ist häufig eine Wiederholung oder eine Ergänzung um weitere Prozessschritte notwendig. Darüber hinaus kann eine fehlerhafte Terminierung aufgrund von falschen oder veralteten Annahmen zu Reihenfolgeabweichungen führen.

Je nach identifizierter Ursachen sind verschiedene Maßnahmen, wie z.B. die Sensibilisierung und Qualifizierung von Mitarbeitern oder die Verbesserung des Informationsmanagements, abzuleiten. Zudem kann auf einen anderen Ursachenbaum verwiesen werden. Beispielsweise kann eine notwendige hohe positive Abgangsterminabweichung bei den Vorgängerprozessen eine Erhöhung des Servicegrads einer vorgelagerten Lagerstufe erfordern.

Der Servicegrad ist eine wichtige Zielgröße in der Beschaffung und im Falle eines Lagerfertigers auch im Kernprozess Versand. Zudem steht der Servicegrad in direkter Wechselwirkung mit dem Bestandsniveau der jeweiligen Lagerstufe. Abbildung 4 zeigt den Ursachenbaum für die Zielgröße Servicegrad.

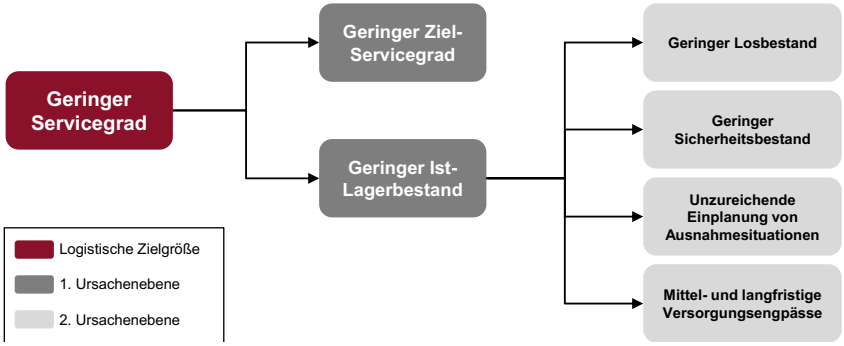


Abbildung 4: Ursachenbaum für die Zielgröße Servicegrad (Schmidt 2018: 194)

Ein geringer Servicegrad kann entweder durch einen geringen Ziel-Servicegrad oder einen geringen Ist-Lagerbestand hervorgerufen werden. Für den Fall, dass kein geeigneter oder ein unrealistischer Ziel-Servicegrad definiert ist, sind der Ziel-Servicegrad und der Plan-Lagerbestand abzustimmen. Erscheint der hierfür notwendige Lagerbestand zu hoch, sind die Gründe hierfür im Ursachenbaum für hohen Lagerbestand zu identifizieren.

Ein geringerer Ist-Lagerbestand als der zur Erreichung des Ziel-Servicegrads erforderliche Plan-Lagerbestand kann mehrere Ursachen haben. Der Servicegrad steht in direkt Zusammenhang mit dem Lagerbestand der jeweiligen Lagerstufe. Folglich können sowohl ein zu geringer Losbestand als auch Sicherheitsbestand zu einem geringen Servicegrad führen. Der Sicherheitsbestand dient zum Ausgleich von Störungen. Bei einer unzureichenden Einplanung von Ausnahmesituationen, wie z.B. Sonderverkaufsaktionen, reicht der Sicherheitsbestand jedoch nicht zur Kompensation aus. Um Bull-Whip-Effekte zu vermeiden, sollte in solch einem Fall eine sukzessive Anpassung der Bestandswerte erfolgen (Forrester 1961). Bei einem andauerten Anstieg der Nachfrage ohne Anpassung der Lagerversorgung in gleichem Maße, kann es zu mittel- und langfristige Versorgungsengpässen kommen. Ein weiterer Grund für Versorgungengpässe kann der Wegfall eines Lieferanten sein.

5. Ansatz zur modellbasierten Ursachenanalyse

Die entwickelten Ursachenbäume bilden den Rahmen für die modellbasierte Ursachenanalyse. Jede Verzweigung entlang der Ursachenbäume stellt einen Entscheidungspunkt dar, an dem entschieden werden muss, welche der möglichen Ursachen primär verantwortlich sind. Bei jeder dieser Entscheidungen kann der Mensch durch geeignete technische Hilfsmittel unterstützt werden. Zur Interaktion zwischen Mensch und Technik sind den einzelnen Entscheidungspunkten Methoden zur daten- und kennzahlengestützten Ursachenanalyse unter Nutzung logistischer Modelle und geeigneter statistischer Analysen zuzuordnen. Durch die Ergänzung um umfangreiche Analysehinweise zur Interpretation der Ergebnisse jedes Analyseschritts und daraus abgeleiteten daten- und kennzahlenbasierten Entscheidungshinweisen zur Ursachenpriorisierung, kann so ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt werden. Das Konzept und einige zentrale verwendete Methoden sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt.

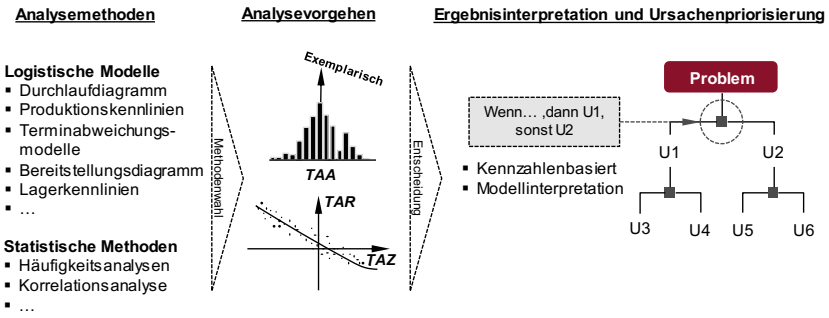


Abbildung 5: Konzept der modellbasierten Ursachenanalyse

Zur Ursachenanalyse kommen im Wesentlichen bereits in Theorie und Praxis erprobte logistische Modelle zum Einsatz. Neben dem Durchlaufdiagramm (Erdlenbruch 1983) zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens eines Produktionssystems kommen Produktionskennlinien (Nyhuis/Wiendahl 2012), Modelle zur Beschreibung des Terminverhaltens von Arbeitssystemen und Produktionsbereichen (Lödding et al. 2014, Schmidt et al. 2014) und das Bereitstellungsdiagramm (Beck 2013, Schmidt 2010) zur Beschreibung der Termin- und Bestandssituation in Komplettierungspunkten zur Analyse von Produktionsbereichen zum Einsatz. Zur Analyse von Lagerprozessen stehen insbesondere Lagerkennlinien (Lutz 2002) zur Verfügung. Ergänzend werden weitere deskriptive und diagnostische statistische Analysemethoden zielgerichtet in allgemeingültigen Analyseverfahren eingesetzt. Die betrachteten logistischen Modelle und statistischen Methoden sind in Abbildung 6 aufgelistet.

Abbildung 6: In der Methodik vorgesehene Analysewerkzeuge (Härtel 2019: 28)

Das generelle Vorgehen soll nachfolgend exemplarisch anhand des Problems einer geringen Termintreue der Produktion dargestellt werden.

Liegen keine signifikanten Terminabweichungen im Auftragszugang vor, ist auf der ersten Ursachenebene zu entscheiden, ob Abgangsterminabweichungen aus Rückstand oder Reihenfolgeabweichungen resultieren. Anhand der Terminabweichungsverteilung im Abgang der Produktion und dem Durchlaufdiagramm (mit Ist- und Plan-Zu- und Abgang) kann festgestellt werden, ob eine hohe Streuung der Terminabweichung aus Rückstandsschwankungen oder Reihenfolgevertauschungen resultiert.

Bildet man die Differenz aus dem Ist-Abgang und dem Plan-Abgang erhält man den Rückstandsverlauf der Produktion. Auf Basis der Modellierung der rückstandsbedingten Terminabweichung nach Kuyumcu (2013) kann die Streuweite der resultierenden Terminabweichung aus Rückstand eingeschätzt werden. Ein

Abgleich mit der Gesamtterminabweichungsverteilung im Abgang der Produktion ermöglicht eine Einschätzung darüber, ob Terminabweichungsstreuungen zu einem signifikanten Anteil auf Rückstandsschwankungen zurückzuführen sind oder ob Reihenfolgevertauschungen als Ursache weiter zu untersuchen sind.

Das generelle Vorgehen ist in Abbildung 7 in Anlehnung an eine Praxisanwendung der Methodik bei einem Anlagenbauer aufgezeigt. Im dargestellten Beispiel zeigt sich, dass bei einer angenommenen Leistung von 8 Std/BKT rückstandsbedingte Terminabweichungen lediglich in einer Spannweite zwischen -2,5 und 3 BKT zu erwarten sind. Daraus lässt sich nur ein geringer Teil der aufgetretenen Streuungen erklären, sodass der Fokus der weiteren Analyse auf Reihenfolgeabweichungen zu legen ist.

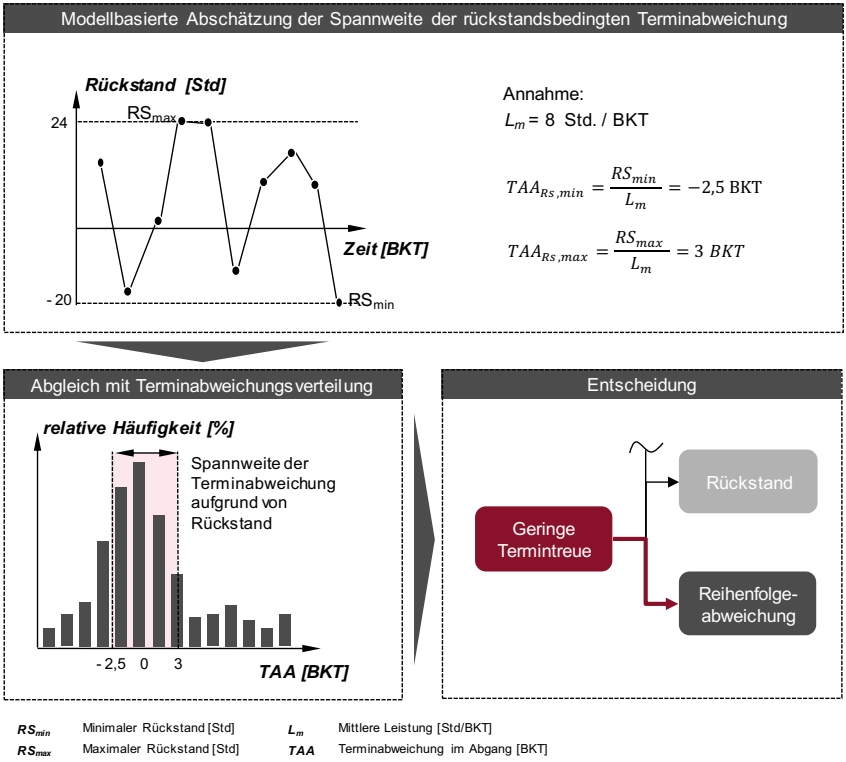


Abbildung 7: Exemplarische modellbasierte Ursachenpriorisierung am Beispiel der rückstands- und reihenfolgebedingten Terminabweichungsstreuung

Reihenfolgebedingte Terminabweichungen im Auftragsdurchlauf sind gemäß dem Ursachenbaum für eine geringe Termintreue häufig auf die Reihenfolgebildung an

den Arbeitssystemen in der Produktion zurückzuführen. Werden die Bearbeitungsreihenfolgen nicht terminorientiert oder nach dem First-In-First-Out Prinzip gebildet, steigt die Terminabweichungsstreuung während des Auftragsdurchlaufs an (Mütze/Nyhuis 2020). In weiteren Analyseschritten wird daher nun zunächst die Reihenfolgebildung genauer analysiert. Dazu können unter anderem Korrelationsanalysen genutzt werden. Eine hohe Streuung der relativen Terminabweichung verursachen auftragszeitabhängige Reihenfolgeverfahren, bei denen Aufträge mit einer kleinen Operationszeit (KOZ-Regel) oder großen Operationszeit (LOZ-Regel) bevorzugt bearbeitet werden. Ein entsprechendes Systemverhalten wird durch die Gegenüberstellung der Auftragszeit und der relativen Terminabweichung je Auftrag identifiziert (vgl. Abbildung 8). Ist die Korrelation positiv, kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb der Produktion eine Tendenz zur Priorisierung kleiner Aufträge mit geringem Arbeitsinhalt vorliegt (z.B. ausgelöst durch ungeeignete Anreizsysteme). Ist die Korrelation negativ, liegt entsprechend eine Tendenz zur Priorisierung großer Aufträge vor.

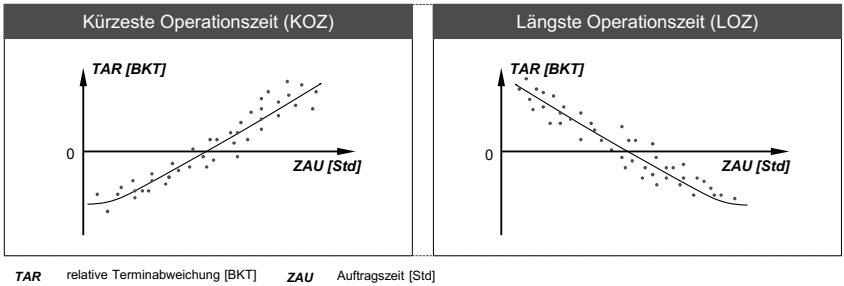


Abbildung 8: Exemplarische Korrelationsanalysen zur Gegenüberstellung des Systemverhaltens bei auftragszeitabhängige Reihenfolgeverfahren

Wird eine auftragszeitabhängige Priorisierung festgestellt, liegt die Ursache für eine hohe reihenfolgebedingte Terminabweichung folglich mit großer Wahrscheinlichkeit in einer ungeeigneten Priorisierung der Mitarbeiter/innen begründet. Verbesserungsmaßnahmen sollten somit eine Sensibilisierung der Mitarbeiter/innen zur Beachtung der Plan-Endtermine bei der Reihenfolgebildung adressieren.

Basierend auf den entwickelten allgemeingültigen Analyseverfahren wurden standardisierte Datenbedarfe je Analysemethode anhand der definierten Eingangsgrößen deduktiv abgeleitet, wobei sich der Datenbedarf auf üblicherweise vorhandene Auftragskopf- und Arbeitsvorgangsdaten bzw. Lagerbewegungsdaten sowie einige benötigte Stammdaten (bspw. Ressourcendaten) beschränkt. Im Ergebnis liegt ein umfangreicher Datenanforderungskatalog vor, der zur Ableitung der erforderlichen Datenbasis eines zukünftigen Entscheidungsunterstützungssystems herangezogen werden kann. In der aktuellen Entwicklungsstufe liegt ein softwaregestützter

Leitfaden zur Ursachenanalyse vor, der Praxisanwender/innen anhand von Schritt für Schritt Anleitungen dazu befähigt, die beschriebenen Analysen eigenständig durchzuführen (Härtel 2019). Somit wurde ein erster Schritt zu einer bereichsübergreifenden Mensch-Technik-Interaktion erfolgreich umgesetzt. Für eine umfassende Mensch-Technik Interaktion ist eine Erweiterung der entwickelten Analysesystematik um eine ERP Schnittstelle sowie ein integriertes Datenanalysemodul notwendig.

6. Technische Möglichkeiten zur Integration in ein IT-basiertes Entscheidungsunterstützungssystem

Mit der entwickelten allgemeingültigen Analysesystematik wurde die Grundlage für ein intelligentes IT-gestütztes Entscheidungsunterstützungssystem geschaffen, das Anwender systematisch bei der Durchführung umfassender Schwachstellenanalysen unterstützt und die größten Hebel zur Verbesserung der logistischen Leistungsfähigkeit bereits anhand relativ weniger Auftrags- und Arbeitsvorgangsdaten aufzeigt. Besonders für KMUs kann solch eine Systematik eine wertvolle Unterstützung bieten.

Anhand des aus logistischen Modellen abgeleiteten Datenbedarfs können standardisierte Systemschnittstellen zum einfachen Export und zur Aufbereitung der benötigten Daten (unter Nutzung vorhandener Analytics Anwendungen) entwickelt werden. Daraus können standardisierte Auswertungen und Kennzahlen automatisiert erzeugt und dem Anwender graphisch aufbereitet in einem Analysedashboard direkt zur Verfügung gestellt werden. Anhand der bereitgestellten Hinweise zur Durchführung und Interpretation der Analyseergebnisse ist es möglich ein solches System so zu gestalten, dass Anwender zudem durch eine intelligente Mensch-Software-Interaktion unter Bereitstellung spezifischer Hilfestellungen zur eigenständigen Analyse der logistischen Leistungsfähigkeit befähigt werden. Ein solches Self-Service-Business-Intelligence (SSBI) System erlaubt es Verantwortlichen der PPS, auch ohne Einbezug von Data Scientists, die richtigen Daten aus der Vielzahl möglicher Rohdaten sinnvoll auszuwählen und nutzerzentrierte Datenanalysen selbstständig durchzuführen (Lennerholt et al. 2019). Abbildung 9 visualisiert die Grundidee eines solchen Systems.

Der definierte Datenanforderungskatalog gibt vor, welche Unternehmensdaten zu erheben sind. Die jeweiligen Systemschnittstellen zum möglichst automatisierten Datenexport können darauf aufbauend fallspezifisch integriert werden. Für jede Analysemethode ist bekannt, in welcher Form, welche Daten vorliegen müssen. Somit lassen sich die extrahierten Unternehmensdaten bereits anhand standardisierter Datentransformationen in die zur Analyse benötigte Form bringen. Eine

manuelle Datenbereinigung erscheint aufgrund der Vielzahl möglicher Datenfehler jedoch auch weiterhin unvermeidlich. Die eigentliche Datenanalyse erfolgt über ein Datenanalysemodul. Weiterer Forschungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Gestaltung einer geeigneten Nutzeroberfläche, die eine Interaktion des Analysemoduls mit dem Anwender erlaubt. Die Bandbreite möglicher Lösungen ist groß und reicht von einer reinen visuellen Aufbereitung sämtlicher Analyseergebnisse bis hin zu einer interaktiven Analyseumgebung, die bei allen Analyseschritten, von der Datenaufbereitung bis zur Ergebnisinterpretation unterstützt.

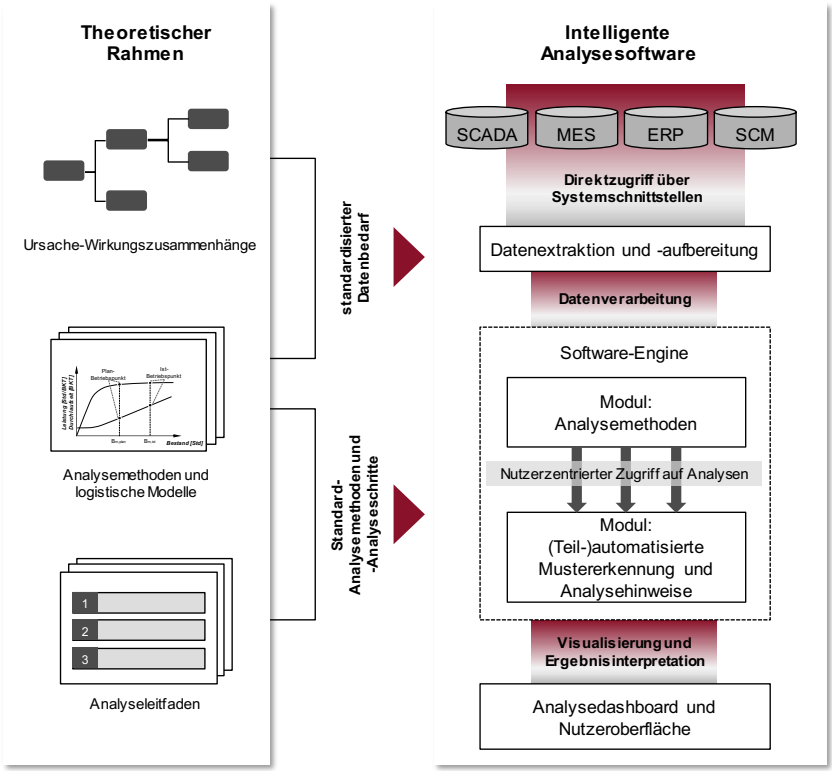


Abbildung 9: Integration der entwickelten Analysesystematik in eine intelligente Analysesoftware

Zudem können anwendungsfallspezifische Erweiterung vorgesehen werden, die über die allgemeingültigen Analysen hinausgehen und bspw. Auswertungen zu den

Ursachen von Maschinen- oder Prozessstörungen erlauben. Hier ist eine Kombination der allgemeingültigen Verfahren mit modernen Analytics Methoden denkbar.

7. Fazit und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wird ein systematischer Ansatz zur datenbasierten Ursachenanalyse bei nicht zufriedenstellender Erreichung von Performancezielen in der unternehmensinternen Lieferkette aufgezeigt. Die Anwendung von Ursachenbäumen und logistischen Modellen ermöglicht hierbei ein allgemeingültiges Vorgehen, um methodisch fundiert auf die wirklichen Ursachen zu gelangen und damit nachhaltig wirkende Gegenmaßnahmen bei unzureichender Zielerreichung abzuleiten.

Die systematische, datengestützte Analyse liefert die Grundlage zur Entwicklung effektiver Entscheidungsunterstützungssysteme, die Anwender optimal bei der Analyse ihrer vorhandenen Daten unterstützen. Unter anderem wird aufgezeigt, welche Kennzahlen erhoben werden sollten und welche Daten ausgewertet sowie grafisch aufbereitet werden sollten. Zudem wird dem Anwender softwaregestützt eine Unterstützung bei der Datenauswertung gegeben. Der Nutzen für Unternehmen liegt in der Reduzierung des Analyseaufwands und ggf. von Beraterkosten, zufriedeneren Kunden durch gesteigerte Logistikleistung sowie einer Steigerung der Produktivität.

Literatur

Beck, S. (2013). Modellgestütztes Logistikcontrolling konvergierender Materialflüsse. Handelns (Dissertation). Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Erdlenbruch, B. (1984). Grundlagen neuer Auftragssteuerungsverfahren für die Werkstattfertigung. Untersuchungen mit Hilfe eines praxisgerechten Analyse- und Simulationskonzeptes. Fortschrittsberichte VDI-Z, Reihe, 2.

Eley, M. (2012). Simulation in der Logistik. Eine Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin, Heidelberg: Springer Gabler Verlag.

Forrester, J. W. (1961). Industrial Dynamics. Cambridge: M.I.T. Press.

Gollwitzer, M., Karl, R. (1998). Logistik-Controlling. Wirkzusammenhänge - Leistung, Kosten, Durchlaufzeiten und Bestände. München: Wirtschaftsverlag Langen-Müller/Herbig.

Gutenschwager, K., Rabe, M., Spieckermann, S., Wenzel, S. (2017). Simulation in Produktion und Logistik - Grundlagen und Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg Verlag.

Härtel, L. (n.d.). QuantiLoPe - Quantitative Analyse und Bewertung der Ursachen einer geringen logistischen Performance entlang der unternehmensinternen Lieferkette. Verfügbar unter: https://www.quantilope-ifa.de/

Härtel, L. (2019). Schlussbericht zum IGF-Vorhaben 19223 N: Quantitative Analyse und Bewertung der Ursachen einer geringen logistischen Performance entlang der unternehmensinternen Lieferkette. Verfügbar unter: https://www.bvl.de/files/1951/2125/2131/2019_04_15_Schlussbericht_IGF-Vorhaben_19223N.pdf

Härtel, L., Nyhuis, P. (2018). Systematic Data Analysis in Production Controlling Systems to Increase Logistics Performance. In R. Schmitt, G. Schuh (Eds.), Advances in production Research. WGP 2018 (pp.3-13). Cham: Springer Verlag.

Jodlbauer, H. (2007). Produktionsoptimierung. Wertschaffende sowie kundenorientierte Planung und Steuerung. Wien: Springer Verlag.

Kuhn, A., Rabe, M. (1998). Simulation in Produktion und Logistik. Fallbeispielsammlung. Berlin: Springer Verlag.

Kuyumcu, A. (2013). Modellierung der Termintreue in der Produktion. Reihe: Wissen schafft Innovation (Dissertation). Technische Universität Hamburg.

Lennerholt, C., van Laere, J., Söderström, E. (2019). Data access and data quality challanges of self-service business intelligence. In: Proceedings of the 27th European Conference on Information Systems (ECIS)

Lödding, H., Nyhuis, P., Schmidt, M., Kuyumcu, A. (2014). Modelling lateness and schedule reliability: how companies can produce on time. Production Planning and Control, 25(1), 59-72.

Lödding, H. (2008). Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. (2. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Luczak, H., Weber, J., Wiendahl, H.-P. (Hrsg.). (2004). Logistik-Benchmarking. Praxisleitfaden mit LogiBEST (2. Aufl.). Berlin: Springer Verlag.

Lutz, S. (2002). Kennliniengestütztes Lagermanagement. Düsseldorf: VDI- Verlag.

Mundt, C., Winter, M., Heuer, T., Hübner, M., Seitz, M., Schmidhuber, M., Maibaum, J.; Bank, L., Roth, S., Scherwitz, P., Theumer, P. (2019). PPS-Report 2019. Garbsen: TEWISS Verlag.

Mütze, A., Nyhuis, P. (2020). Deriving of Sequencing Strategies for Multi-Stage Productions Supported by Logistic Models and Software Tools. In: Proceedings of the 1st Conference on Production Systems and Logistics. doi; https://doi. org/10.15488/9640

Nguyen, T., Zhou, L., Spiegler, V., Ieromonachou, P., Lin, Y. (2018). Big data analytics in supply chain management: A state-of-the-art literature review. Computers & Operations Research, 98, 254-264. doi: 10.1016/j.cor.2017.07.004

Nyhuis, P. (Hrsg.). (2016). Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen. Garbsen: TEWISS Verlag.

Nyhuis, P., Busse, T., Münzberg, B. (2008). Logistische Beherrschung von Fertigungs- und Montageprozessen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 103 (6), 400–403.

Nyhuis, P., Wiendahl, H.-P. (2012). Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen (3. Aufl.). Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Rabe, M., Spieckermann, S., Wenzel, S. (2008). Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Reichmann, T. (2011). Controlling und Kennzahlen. Die systemgestützte Controlling-Konzeption mit Analyse- und Reportinginstrumenten (8. Aufl.). München: Vahlen Verlag.

Schmidt, M. (2010). Modellierung logistischer Prozesse der Montage (Dissertation). Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Schmidt, M. (2018). Beeinflussung logistischer Zielgrößen in der unternehmensinternen Lieferkette durch die Produktionsplanung und-steuerung und das Produktionscontrolling (Habilitationsschrift). Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Schmidt, M., Bertsch, S., Nyhuis, P. (2014). Schedule compliance operating curves and their application in designing the supply chain of a metal producer. Production Planning & Control, 25(2), 123–133.

Schmidt, M., Maier, J.T., Härtel, L. (2019). Data based root cause analysis for improving logistic key performance indicators of a company's internal supply chain. Procedia CIRP, 86, 276-281.

Schuh, G., Prote, J.-P., Sauermann, F.; Schmitz, S. (2019). Production Analytics. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 114 (9), 588-591. doi: 10.3139/104.112153

VDI (1997). VDI-Richtlinie 3633, Blatt 3: Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Experimentplanung und -auswertung. Berlin: Beuth Verlag.

Veigt, M., Staar, B., Schukraft, S., Freitag, M. (2019). Data Analytics in der Produktionsplanung. Einsatz von Data Analytics Methoden zur Identifikation von Einflussfaktoren auf die Termintreue. wt Werkstattstechnik online, 109 (4), 230-234.

Westkämper, E., Decker, M. (2006). Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Wiendahl, H.-H. (2012). Auftragsmanagement der industriellen Produktion. Grundlagen, Konfiguration, Einführung. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

Wiendahl, H.-P., Wiendahl, H.-H. (2019). Betriebsorganisation für Ingenieure (9. Aufl.). München: Hanser Verlag.

Wildemann, H. (2007). Logistik-Check. Leitfaden zur Analyse und Optimierung von Lo-gistiksystemen (7. Aufl.). München: TCW Verlag.

Windt, K., Hütt, M.T. (2011). Exploring due date reliability in pro-duction systems using data mining methods adapted from gene expression analysis. CIRP annals, 60 (1), 473-476. doi: 10.1016/j.cirp.2011.03.042

Yu, K.W. (2001). Terminkennlinie - Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsprozess (Dissertation). Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Ableitung von MTM-HWD®-Analysen aus digitalen menschlichen Bewegungsdaten

Automatische Erfassung von Einflussgrößen bei der Anwendung von Humansimulationen

Peter Kuhlang, Martin Benter, Manuela Ostermeier

MTM ASSOCIATION e.V.

1. Motivation

Eine produktive und ergonomische Gestaltung menschlicher Arbeit spielt eine zentrale Rolle für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit industrieller Unternehmen. Um diese Aufgabe erfolgreich zu meistern, kommen unterschiedliche Methoden zur Bewertung und Gestaltung von Arbeitsabläufen zum Einsatz. Die gängigsten Methoden untersuchen dabei entweder produktive oder ergonomische Aspekte. Zudem ist für die Analyse der Arbeitsprozesse ein hoher manueller Erhebungs- und Analyseaufwand durch den Methodenanwender notwendig. Diese Faktoren führen dazu, dass nicht alle industriellen Arbeitsplätze sowohl produktiv als auch ergonomisch gestaltet sind.

Mit MTM-HWD® (Methods-Time Measurement-Human Work Design, kurz: HWD) wurde eine Methode entwickelt, die eine integrierte Analyse der produktiven und ergonomischen Gesichtspunkte ermöglicht. Obwohl beide Aspekte in einem Schritt analysiert werden, erfordert die Anwendung dieser Methode dennoch einen nicht unerheblichen Aufwand (vgl. Finsterbusch 2016).

Eine Möglichkeit, diesen Aufwand zu reduzieren, ist die automatische Auswertung von digitalisierten menschlichen Bewegungsdaten. Diese Daten beschreiben die Bewegungen des Menschen und umfassen beispielsweise zurückgelegte Wege, Gelenkstellungen oder Objektinteraktionen. Insbesondere die Technologien Humansimulation und Motion Capture eignen sich, um diese Bewegungsdaten zu erfassen bzw. zu generieren. Durch die Fortschritte der Technologien in den letzten Jahren ist zudem ein Einsatz bei einer Vielzahl von Arbeitsplätzen denkbar.

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_10

Dieser Beitrag stellt vor, wie man die Bewegungsdaten einer Humansimulation nutzen kann, um teilautomatisiert eine HWD-Analyse abzuleiten. Damit reduziert dieser Ansatz den Analyseaufwand und bietet so die Möglichkeit, die Einsatzbereiche der Humansimulation als auch von HWD und damit die produktive und ergonomische Gestaltung menschlicher Arbeit auszuweiten.

Zunächst stellt der Beitrag dazu vor, welche Informationen für eine vollständige HWD-Analyse notwendig sind (Abschnitt 2). Anschließend beschreibt er, welche dieser Informationen durch Humansimulationen automatisch generiert werden und welche Informationen manuell ergänzt werden müssen (Abschnitt 3). Durch Berücksichtigung dieser nicht automatisch ermittelbaren Informationen bei der Simulationserstellung ist es dann möglich, eine vollständige HWD-Analyse aus den Simulationsdaten abzuleiten. Um diesen Vorgang zu verdeutlichen, wird die Umsetzung dieser teilautomatisierten Ableitung einer Analyse am Beispiel der Simulationssoftware imk ema (vgl. Leidholdt et al. 2016) dargestellt (Abschnitt 4).

Den Abschluss des Beitrags bildet ein Ausblick, wie dieser Ansatz auf andere Humansimulationen und auf die Technologie Motion Capture übertragen werden kann (Abschnitt 5). Mit einer solchen Übertragung auf andere Technologien ist es denkbar, eine höhere Anzahl von Arbeitsplätzen produktiv und ergonomisch zu gestalten und somit die Wettbewerbsfähigkeit industrieller Unternehmen zu erhalten.

2. Das Prozessbausteinsystem MTM-HWD®

2.1. Ziel von MTM-HWD®

Hauptziel des Prozessbausteinsystems HWD ist die integrierte zeitliche und ergonomische Bewertung von manuellen Arbeitsprozessen. Es ist damit mehr als nur ein neues MTM-System zur Produktivitätsbewertung. Es unterstützt eine ganzheitliche Gestaltung der Arbeitsprozesse (vgl. Finsterbusch 2016).

Um dieses Ziel zu erreichen, erfasst der HWD-Anwender die ausgeführten Aktionen bei einem manuellen Arbeitsprozess und ihre zeitlichen und ergonomischen Einflussgrößen. Zur Vereinfachung und Systematisierung der Erfassung orientieren sich die Einflussgrößen an den menschlichen Körperteilen und sind zudem als leicht interpretierbare Piktogramme dargestellt (vgl. Finsterbusch 2016).

HWD wurde dabei für kurzzyklische Tätigkeiten entworfen und ist somit vor allem für manuelle Arbeit in Serienproduktionen von hoher Bedeutung. Insbesondere im Zykluszeitbereich von 30 bis 120 Sekunden weist es eine hohe Genauigkeit im Vergleich zu dem Grundsystem MTM-1 auf (vgl. Faber et al. 2019).

2.2. HWD als Kernelement der Digitalisierung

HWD ermöglicht nicht nur eine umfassende manuelle Bewertung und Gestaltung von manuellen Arbeitsprozessen. Durch die objektive Beschreibung der menschlichen Bewegungen bildet es zudem die Grundlage für die Digitalisierung der Arbeitsplanung und -gestaltung (vgl. Finsterbusch/ Kuhlang 2015, Kuhlang 2019).

Der Industrial Engineer der Zukunft wird in der Lage sein, digitale Tools zu nutzen, um Arbeitsprozesse aufwandsarm und detailliert zu planen. Insbesondere Technologien, die Bewegungsdaten verarbeiten, haben dabei einen hohen Anwendungsbezug. Dazu gehören beispielsweise die Humansimulation und Motion Capture. Die Verbindung zwischen der digitalen Welt und der realen menschlichen Arbeit entsteht durch Übersetzung der digital verfügbaren Informationen in geeignete Verfahren des Industrial Engineering (vgl. Kuhlang 2019).

Die Ableitung korrekter HWD-Analysen aus digitalen Bewegungsdaten bildet somit einen Schlüssel für die sinnvolle Anwendung digitaler Planungswerkzeuge durch den Industrial Engineer. Für die Erstellung einer HWD-Analyse ist dabei eine Vielzahl Informationen notwendig, die menschliche Arbeit umfangreich beschreiben. Die erfolgreiche Ableitung dieser Informationen ist die Grundlage für die Erzeugung sogenannter Simulationsanalysen (vgl. Abbildung 1, Kuhlang 2019).

Simulationsanalysen beschreiben und bewerten hierbei den digital beschriebenen Bewegungsablauf (die Arbeitsweise). Mit anderen Worten: "What you see (simulate, capture) is what you get (describe)!" (vgl. Kuhlang 2019). Eine Simulationsanalyse beschreibt somit auch Abläufe, die in der Realität nicht stattfinden können, wenn die digitalen Tools die Abläufe so erfassen.

Durch die in HWD hinterlegte MTM-Normleistung können den digital abgebildeten Arbeitsabläufen menschlich durchführbare Plan-Zeiten zugeordnet werden. Durch die integrierte ergonomische Bewertung kann zudem sichergestellt werden, dass die Abläufe menschgerecht sind (vgl. Finsterbusch 2016). Dadurch können die Simulationsanalysen dann auch mit dem Gütesiegel „Approved by MTM“ (vgl. Abbildung 1) versehen werden (vgl. Kuhlang 2019).

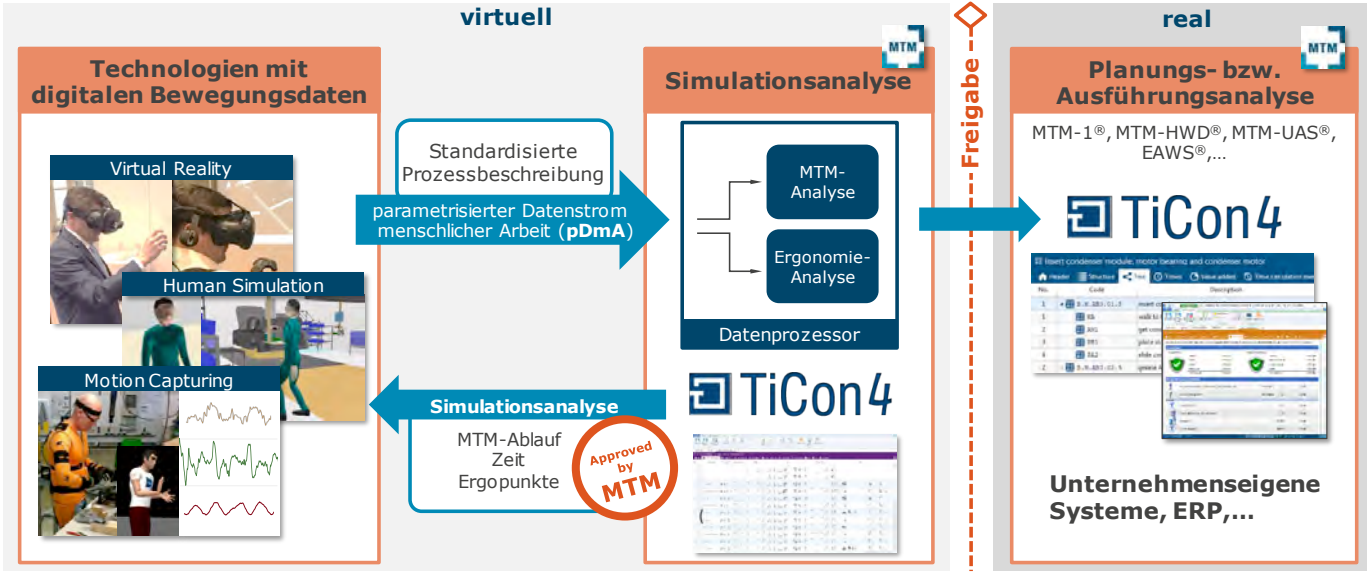


Abbildung 1 Übertragung digitaler Bewegungsdaten in MTM-Analysen und Simulationsanalyse

Trotz der umfangreichen Möglichkeiten der digitalen Planungswerkzeuge wird es dennoch weiterhin notwendig sein, die erstellten Simulationsanalysen durch einen MTM- bzw. IE-Experten freigeben zu lassen (vgl. Abbildung 1). Erst dann werden sie in Planungs- oder Ausführungsanalysen überführt. So wird der digital abgebildete Arbeitsablauf bewusst in eine festgelegte Arbeitsmethode überführt (vgl. Kuhlang 2019).

2.3. Anwendung von MTM-HWD - Beispieltätigkeit

Eine erfolgreiche Anwendung von HWD erfordert die korrekte Erfassung der HWD-Bausteine und deren Einflussgrößen. Zur Erläuterung dieser Informationen wird hier eine exemplarische Arbeitsaufgabe vorgestellt (vgl. Kuhlang 2018, Benter/ Kuhlang 2019). Die Aufgabe gehört zu einem Montagearbeitsplatz, an dem Pumpen zusammengebaut werden. Die folgenden Ausführungen beziehen sich dabei auf den ersten Teil der Montage, bei dem das Pumpengehäuse auf dem Arbeitstisch platziert wird.

Abbildung 2 zeigt das Layout des Beispielarbeitsplatzes. Die Aufgabe beginnt, indem der Monteur - ausgehend von der dargestellten Ausgangsposition - zum Materialwagen geht, um ein Gehäuse aufzunehmen. Anschließend geht er zum Arbeitstisch und platziert das Gehäuse in der Montagevorrichtung.

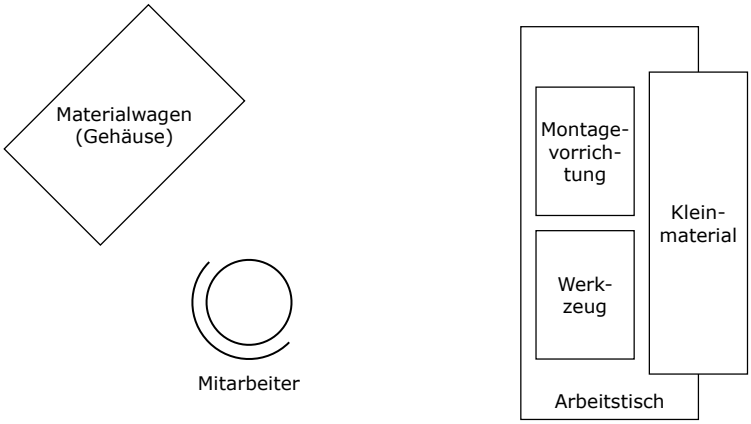


Abbildung 2 Layout des Beispielarbeitsplatzes

2.4. Anwendung von MTM-HWD - Bausteinbeschreibung

Anhand der Beispielaufgabe wird nun dargestellt, wie der Anwender die manuellen Prozesse mit HWD beschreibt. Die Ausführungen beschreiben dabei nicht alle möglichen, sondern lediglich die für die Arbeitsaufgabe notwendigen Bausteine und Einflussgrößen.

Ein HWD-Baustein besteht aus Bausteinelementen, die die wichtigsten Informationen des Arbeitsschrittes zusammenfassen. Wichtigstes Bausteinelement ist dabei die durchzuführende Aktion. Im ersten Schritt erfasst der Anwender deshalb die Aktionen des Monteurs (vgl. Tabelle 1). Zu einem Baustein gehört zudem das Objekt, mit dem der Monteur bei der Aktion interagiert. Weitere Bausteinelemente sind die Informationen, welche Extremität bei der Aktion aktiv ist und was die passive Extremität währenddessen macht (vgl. Finsterbusch 2016). In dem dargestellten Beispiel nimmt der Monteur zunächst ein Pumpengehäuse vom Materialwagen (Obtain). Anschließend transportiert er es mit mehreren Aktionen (Deposit) zur Montagevorrichtung. Dabei verwendet er bei allen Schritten beide Hände und hat somit keine passive Extremität (vgl. Tabelle 1). Auftretende Körperbewegungen wie Gehen oder Beugen stellen bei HWD - im Gegensatz zu anderen MTM-Verfahren - keine separaten Bausteine dar, sondern sind als Einflussgrößen bei den jeweiligen Aktionen abgebildet.

Nr.		Bezeichnung	Objekt	Aktion	aktive Extremität	passive Extremität
1		Ausgangsposition	-	-		-
2	(	zum Gehäuse	Teil	OBTAIN	linke Hand	keine
3		zum Gehäuse	Teil	OBTAIN	rechte Hand	keine
4	(	Gehäuse vor Körper	Teil	DEPOSIT	linke Hand	keine
5		Gehäuse vor Körper	Teil	DEPOSIT	rechte Hand	keine
6	(	Aufrichten	Teil	DEPOSIT	linke Hand	keine
7		Aufrichten	Teil	DEPOSIT	rechte Hand	keine
8	(	Gehäuse in Vorrichtung	Teil	DEPOSIT	linke Hand	keine
9		Gehäuse in Vorrichtung	Teil	DEPOSIT	rechte Hand	keine
10		Endhaltung	-	-	-	-

Tabelle 1 Bausteinbeschreibung

Weitere beispielhafte Aktionen sind die Prüfung (Check) oder das Trennen von Bauteilen (Retract). Weitere Objekte sind beispielsweise Werkzeuge oder Transportmittel. Statt wie im Beispiel beide Hände gleichzeitig zu nutzen kann der Monteur auch einhändig arbeiten (vgl. Finsterbusch 2016).

2.5. Anwendung von MTM-HWD - Einflussgrößen

Nachdem der Anwender die vom Monteur durchgeführten Aktionen und die dazugehörigen Bausteinelemente erfasst hat, ermittelt er nun die relevanten Einflussgrößen (vgl. Finsterbusch 2016, Kuhlang 2018, Benter/ Kuhlang 2019). Je nach Aktion muss er dabei unterschiedliche Einflussgrößen erfassen. Die folgenden Erläuterungen beziehen sich dabei nicht auf das vollständige Beispiel, sondern lediglich auf die Zeilen Nr. 1, 3 und 9 (vgl. Tabelle 1).

untere Extremitäten

Zunächst beschreibt der Anwender die unteren Extremitäten des Monteurs (vgl. Tabelle 2). Dafür verwendet er die Einflussgrößen Weg, Ausführungsbedingungen, Beinhaltung und Stabilität (nicht dargestellt).

Nr.	Weg	Ausführungs-bedingungen	Grundstellung	Beinhaltung (links)	Beinhaltung (rechts)
1	-	unbehindert	Stehen	gestreckt	gestreckt
3	1 Schritt 1 Seitenschritt	unbehindert	Stehen	gestreckt	gestreckt
9	Gehen 2 m Gehen: 2 Meter	unbehindert	Stehen	gestreckt	gestreckt

Tabelle 2 Einflussgrößen – untere Extremitäten

Der Weg ist die Strecke, die vom Monteur vor der Benutzung seiner Arme zurücklegt wird. Bei HWD unterscheidet der Anwender dabei zwischen Gehen, Stufen steigen, Klettern und Kriechen. In Abhängigkeit davon gibt er dann die zurückgelegten Meter, Schritte oder Sprossen an. Im Beispiel führt der Monteur einen Seitenschritt zum Materialwagen aus und geht anschließend zwei Meter zum Arbeitstisch.

Die Ausführungsbedingungen beschreiben den nötigen Kontrollaufwand, der durch die Bodenbeschaffenheit gegeben ist. Im Beispiel ist der Boden eben und ohne Hindernisse und behindert den Monteur somit nicht.

Die Grundstellung spiegelt die Stellung des Körpers wider. Im dargestellten Beispiel steht der Monteur am Ende jeder seiner Bewegungen.

Die Einflussgröße Beinhaltung gibt an, ob der Monteur die Beine ausgestreckt oder angewinkelt hat. Bei der Beispielaufgabe steht er am Anfang der Tätigkeit und am Ende der Bewegungen mit ausgestreckten Beinen.

Rumpf und Kopf/Nacken

Nach den unteren Extremitäten erfasst der HWD-Anwender die Haltung des Rumpfes (vgl. Tabelle 3). Dazu gehören die Rumpfbeugung, -drehung und -neigung sowie die Haltung des Kopfes (nicht abgebildet).

Nr.	Rumpfbeugung	Rumpfdrehung	Rumpfneigung
1	aufrecht	keine Rumpfdrehung	keine Rumpfneigung
3	stark nach vorne gebeugt	starke Körperhilfe	keine Rumpfneigung
9	aufrecht	keine Rumpfdrehung	keine Rumpfneigung

Tabelle 3 Einflussgrößen – Rumpf

Rumpfbeugung, -drehung und -neigung spiegeln die Haltung des Oberkörpers wider. Sie sind dabei vollständig unabhängig von den unteren Extremitäten. Der Monteur kann beispielsweise seinen Rumpf verdrehen, wenn seine Beine ausgestreckt oder wenn sie gebeugt sind. Die Beugung stellt die Auslenkung des Rumpfes nach vorne oder hinten dar, die Neigung die Auslenkung zur Seite und die Drehung gibt an, wie sehr die Schulter im Bezug zur Hüfte gedreht sind. Im Beispiel ist der Monteur zu Beginn in Neutralstellung, das heißt er beugt, neigt oder verdreht seinen Rumpf nicht. Bei Aufnahme des Pumpengehäuses neigt und verdreht er den Rumpf und bringt ihn anschließend wieder in Neutralstellung.

obere Extremitäten

Im Anschluss an den Rumpf beschreibt der HWD-Anwender die oberen Extremitäten. Die relevanten Einflussgrößen beschreiben hier zunächst die Haltung des Armes sowie die aufzubringenden Kräfte (vgl. Tabelle 4). Die Erfassung dieser Größen erfolgt getrennt für beide Arme (hier beispielhaft am rechten Arm erläutert).

Nr.	Oberarmhaltung	Handposition	Armstreckung	Handhaltung	Gewicht / Kraft
1	Winkel 0<x<20°	unterhalb der Schulterhöhe	Streckung 80%<x	Neutralstellung	keine Kraft
3	Winkel x>60° oder x<0°	unterhalb der Schulterhöhe	Streckung 40%<x<80%	Neutralstellung	keine Kraft
9	Winkel 20°<x<60°	unterhalb der Schulterhöhe	Streckung 40%<x<80%	Drehung zur Seite	Gewicht Gehäuse: 3 kg

Tabelle 4 Einflussgrößen – obere Extremitäten (1/2)

Die Oberarmhaltung beschreibt, ob der Monteur seinen Arm nach vorne, hinten oder zur Seite auslenkt. In der Beispielaufgabe lenkt er seinen rechten Oberarm bei

Aufnahme des Gehäuses stark nach vorne aus. Beim Platzieren auf dem Arbeitstisch lenkt er ihn erneut aus, jedoch nicht so stark wie beim Aufnehmen.

Die Einflussgröße Handposition gibt die Höhe der Hand in Relation zur Schulter an. Im dargestellten Beispiel ist die rechte Hand dabei stets unter Schulterhöhe.

Die Armstreckung umschreibt die Entfernung zwischen Hand und Schultergelenk des Armes. Im Beispiel ist der rechte Arm in der Ausgangsposition ausgestreckt. Bei Aufnahme und Absetzen des Gehäuses ist er nur halbgestreckt.

Die Handhaltung stellt analog zur Rumpfhaltung die Beugung, Neigung oder Drehung des Handgelenks dar. Bei der Beispielaufgabe ist das rechte Handgelenk zunächst in Neutralstellung und erst beim Platzieren des Gebäudes ist es geneigt.

Mit der Einflussgröße Gewicht/ Kraft erfasst der Mitarbeiter zum einen die Last des zu bewegenden Gegenstandes als auch die auftretenden Finger-Handkräfte oder Arm-Körperkräfte. Im Beispiel tritt lediglich das Gewicht des Pumpengehäuses beim Transport als Kraft auf.

Als letztes erfasst der HWD-Anwender die Einflussgrößen zur detaillierten Beschreibung der Handbewegungen (vgl. Tabelle 5). Das sind der Entfernungsbereich, die Bereitstellung oder Platziergenauigkeit inklusive Einbaulage, die Fügebedingungen, die Greifbewegung inklusive Greifart und die Vibration (nicht abgebildet).

Nr.	Entfernungsbereich	Bereitstellung / Platzier-genauigkeit + Einbaulage	Fügebedingungen	Greifbewegung + Greifart
1	-	-	-	offene Hand ohne Objekt
3	10 Zentimeter	vereinzelt, ortsveränderlich	-	Umfassen + 4-Finger-Umfassen
9	10 Zentimeter	enges Platzieren, mit Ausrichten	Griffabstand Sichtbehinderung	4-Finger-Umfassen

Tabelle 5 Einflussgrößen – obere Extremitäten (2/2)

Der Entfernungsbereich beschreibt die zurückgelegte Strecke durch die Hand bei einer Aktion. Im Beispiel bewegt der Monteur seine rechte Hand zehn Zentimeter zum Aufnehmen des Pumpengehäuses und ebenso weit beim Abstellen des Gehäuses

Die Einflussgröße Bereitstellung gibt die Lage der zu greifenden Gegenstände wieder. In dem dargestellten Beispiel sind die Gehäuse einzeln auf dem Materialwagen bereitgestellt. Sie befinden sich dabei nicht stets am gleichen Ort.

Die Einflussgrößen Platziergenauigkeit, Einbaulage und Fügebedingungen beschreiben die Genauigkeit, mit der der Monteur Objekte platzieren muss. Im Beispiel fügt er das Gehäuse mit leichtem Druck in die Montagevorrichtung. Zudem

ist eine definierte Ausrichtung erforderlich und die Sicht auf die Vorrichtung ist durch das Gehäuse blockiert.

Greifbewegung und Greifart umschreiben die Position der Finger, damit der Monteur einen Gegenstand unter Kontrolle bringen oder halten kann. In der Beispielaufgabe ist seine rechte Hand zunächst geöffnet. Zur Aufnahme des Pumpengehäuses umfasst er dieses dann und hält es mit vier Fingern bis zum Absetzen am Arbeitstisch unter Kontrolle.

2.6. Übersicht der benötigten Informationen

Abbildung 3 zeigt einen Überblick über die Informationen, die der Anwender zur Erstellung einer vollständigen HWD-Analyse benötigt (vgl. Benter/ Kuhlang 2019). Zentraler Bestandteil sind dabei die Bausteinelemente, die den Arbeitsablauf unterteilen (links). Die Einflussgrößen (rechts) sind dann für jeden Baustein zu ermitteln, um den Ablauf zeitlich und ergonomisch zu bewerten.

Wenn der Anwender alle Bausteinelemente und die dazugehörigen Einflussgrößen korrekt erfasst hat, kann er nun den notwendigen Zeitbedarf und die ergonomische Belastung der Arbeitsaufgabe ermitteln. Damit ist die Grundlage für eine gezielte Gestaltung des Arbeitsplatzes geschaffen.

Bausteinbeschreibung

Bausteinelement
Objekt
Aktion
aktive Extremität
passive Extremität

Einflussgrößen

Beschreibungs-segment	Bezeichnung
untere Extremitäten	Weg
	Ausführungsbedingungen
	Stabilität
	Grundstellung
	Beinhaltung
Rumpf	Rumpfbeugung
	Rumpfdrehung
	Rumpfneigung
Kopf/Nacken	Kopfhaltung
	Blickverschieben

Beschreibungs-segment	Bezeichnung
obere Extremitäten	Oberarmhaltung
	Handposition
	Armstreckung
	Handgelenkshaltung
	Gewicht [kg]
	Kraft [N]
	Kraftrichtung
	Entfernungsbereich
	Bereitstellung
	Platziergenauigkeit
	Einbaulage
	Fügebedingungen
	Greifbewegung
	Greifart
	Vibration

Abbildung 3 Übersicht Bausteinbeschreibung und Einflussgrößen

3. Erfassung der Informationen durch Humansimulationen

Abschnitt 2 beschreibt, welche Informationen der HWD-Anwender ermitteln muss, um einen Arbeitsablauf vollständig zu beschreiben und zu bewerten. Eine automatisierte Bewertung durch Verwendung von Humansimulationen erfordert somit eine Erfassung dieser Informationen. Dieser Abschnitt beschreibt, welche Informationen automatisch ermittelbar sind und welche manuell ergänzt werden müssen.

3.1. Kategorisierung der Einflussgrößen

Abschnitt 2.5 hat verdeutlicht, welche Einflussgrößen erfasst werden müssen. Dieser Abschnitt teilt diese Größen in Kategorien ein, die die folgenden Untersuchungen und Beschreibungen systematisieren (vgl. Benter/ Kuhlang 2019). Tabelle 6 zeigt die Einflussgrößen und ihre Zuordnung zu den Kategorien.

Beschreibungs-segment	Einflussgröße	Kategorie			
		bausteinspezifisch		bausteinübergreifend	
		Genauigkeit	Entfernung	Haltung	Kraft
untere Extremitäten	Weg		x		
	Ausführungsbedingungen	x			
	Stabilität			x	
	Grundstellung			x	
	Beinhaltung			x	
Rumpf	Rumpfbeugung			x	
	Rumpfdrehung			x	
	Rumpfneigung			x	
Kopf/Nacken	Kopfhaltung			x	
	Blickverschieben		x		
obere Extremitäten	Oberarmhaltung			x	
	Handposition			x	
	Armstreckung			x	
	Handgelenkshaltung			x	
	Gewicht [kg]				x
	Finger-Handkraft [N]				x
	Arm-Körperkraft [N]				x
	Kraftrichtung				x
	Entfernungsbereich		x		
	Bereitstellung	x			
	Platziergenauigkeit	x			
	Einbaulage	x			
	Fügebedingungen	x			
	Greifbewegung	x			
	Greifart	x			
	Vibration				x

Tabelle 6 Kategorisierung der Einflussgrößen

Eine grundsätzliche Möglichkeit zur Unterscheidung der Einflussgrößen von MTM-Verfahren ist der Bausteinbezug. Eine Einflussgröße ist bei HWD bausteinspezifisch, wenn sie konkret einer HWD-Aktion (und den dazugehörigen Bausteinelementen) zugeordnet werden kann. Ein Beispiel dafür ist die Bereitstellung. Sie beschreibt, wie ein Gegenstand aufgenommen werden muss und ist somit insbesondere für die Aktion Obtain von Bedeutung.

Bausteinübergreifende Einflussgrößen sind nicht auf einzelne Aktionen begrenzt. Sie können für mehrere aufeinanderfolgende Aktionen gelten oder sich während eines Bausteins verändern. Sie sind zudem nicht auf HWD beschränkt, sondern könnten auch in anderen Analyseverfahren Einsatz finden. Ein Beispiel dafür ist

die Einflussgröße Grundstellung, die angibt, ob der Mitarbeiter sitzt, steht oder kniet. Die Grundstellung kann für mehrere Aktionen gleichbleiben und sie ist zudem auch für ergonomische Bewertungsverfahren wie EAWS (vgl. Schaub et al. 2012) relevant.

Die bausteinspezifischen Einflussgrößen lassen sich unterscheiden in Genauigkeiten und Entfernungen. Genauigkeiten umschreiben den notwendigen Kontrollaufwand bei der jeweiligen Aktion. Zu den Genauigkeiten gehören beispielsweise die Platziergenauigkeit und die Fügebedingungen. Die Genauigkeiten hängen vorrangig von der Art der verwendeten Objekte wie Bauteilen und Werkzeuge ab. So ist beispielsweise beim Ansetzen eines Schraubendrehers eine höhere Genauigkeit notwendig als beim Anlegen einer Feile.

Entfernungen hingegen geben die notwendigen Bewegungslängen bei den Aktionen an. Das sind bei HWD die Bewegungen des Körpers (Weg), der Hände (Entfernungsbereich) und der Augen (Blickverschieben). Die Entfernungen sind hauptsächlich bestimmt durch das Arbeitsplatzlayout. Ein optimiertes Layout mit besserer Materialanordnung sorgt so für geringere Entfernungen bei der Handhabung.

Die bausteinübergreifenden Einflussgrößen bestehen aus den Haltungen und den Kräften. Die Haltungen beschreiben die Stellung des menschlichen Körpers und seiner Körperteile. Die detaillierte und korrekte Beschreibung der Haltungen ist die Grundlage für die ergonomische Bewertung des Arbeitsplatzes. Ähnlich wie die Entfernungen sind die Haltungen dabei vorrangig bedingt durch das Arbeitsplatzlayout. Ein Arbeitsplatz, der derart gestaltet ist, dass Mitarbeiter vorrangig über-Kopf-Tätigkeiten durchführen müssen, führt beispielsweise zu stark erhöhten ergonomischen Anforderungen.

Die letzte Gruppe von Einflussgrößen sind die Kräfte, die durch den Mitarbeiter aufzubringen sind. Dazu gehören beispielsweise zu hebende Gewichte oder Finger-Kräfte, die bei der Werkzeugnutzung auftreten. Die Kräfte spielen wie die Haltungen eine entscheidende Rolle für die ergonomische Bewertung. Anders als diese hängen die Kräfte jedoch hauptsächlich von den verwendeten Objekten ab. Je schwerer beispielsweise zu montierende Bauteile und die dazugehörigen Werkzeuge sind, desto höher sind die aufzubringenden Kräfte.

Die Kategorisierung der Einflussgrößen in diese vier Gruppen kann auf andere Verfahren zur Bewertung menschlicher Arbeit übertragen werden. Das MTM-UAS-Verfahren (vgl. Bokranz/ Landau 2006) benötigt insbesondere Informationen aus den Kategorien Genauigkeiten und Entfernungen, um eine zeitliche Bewertung zu ermöglichen. Das EAWS-Verfahren (vgl. Schaub et al. 2012) hingegen erfordert hauptsächlich Haltungen und Kräfte zur ergonomischen Bewertung von Arbeitsabläufen. Diese Kategorisierung kann man nun nutzen, um Aussagen darüber zu treffen, inwiefern digitale Tools zur Generierung von Bewegungsdaten geeignet sind, die notwendigen Daten für solche Verfahren zu liefern. Im folgenden Kapitel wird dies am Beispiel von HWD und der Technologie Humansimulation durchgeführt. Die Ausführungen zur Humansimulation basieren dabei vor allem auf den Möglichkeiten des Tools imk ema (vgl. Leidholdt et al. 2016).

3.2. Erfassung der Bausteinelemente

Kernelement einer HWD-Analyse ist die korrekte Erfassung der durchzuführenden Aktion mit dem dazugehörigen Objekt sowie der Extremität, die diese Aktion durchführt. Erst wenn diese ermittelt sind, können die Einflussgrößen ergänzt werden.

Tools zur digitalen Simulation menschlicher Arbeit wie imk ema verwenden digitale Menschmodelle, um Arbeitsprozesse abzubilden. Bei der Modellierung der Prozesse werden dabei ähnliche Informationen und Parameter wie bei der Erstellung einer HWD-Analyse benötigt. Dazu gehören beispielsweise die verwendeten Objekte und mit welcher Extremität sie gehandhabt werden. Damit ist ein wichtiger Teil der Bausteinelemente bereits durch die Modellierung der Simulation vorhanden (vgl. Abbildung 3).

Die Aktionen sind ein wichtiges Element, das sich nicht trivial aus den Simulationseingaben ableiten lässt. Die Auswahl der richtigen Aktionen ist jedoch ein wichtiger Bestandteil einer korrekten HWD-Anwendung. Um dieser Herausforderung zu begegnen, werden oft verwendete Objekte (Werkzeuge und Normteile) identifiziert und die dazugehörigen möglichen Abfolgen an Aktionen definiert. So ist beispielsweise definiert, welche Aktionen (und zugehörige Bausteinelemente) bei der Anwendung eines Akkuschraubers auftreten.

Damit lässt sich eine korrekte Ableitung der Bausteinelemente aus einer Humansimulation bei einer Vielzahl von Anwendungsfällen sicherstellen. Eine korrekte Ableitung einer HWD-Analyse in allen Fällen kann jedoch noch nicht gewährleistet werden. Die Korrektheit der Analyse hängt zudem stark von der modellierten Simulation ab.

Entsprechen die simulierten Abläufe nicht der Realität in der Produktion, ist das auch nicht für die HWD-Analyse der Fall. Deshalb ist es notwendig, dass ein

HWD-Anwender die Simulation erstellt und die automatisiert erzeugte Analyse prüft und gegebenenfalls korrigiert.

3.3. Erfassung der Einflussgrößen

Nach Ermittlung der Bausteinelemente müssen nun die Einflussgrößen bestimmt werden. Die unterschiedlichen Kategorien der Einflussgrößen lassen sich dabei unterschiedlich gut aus den Simulationsdaten ableiten.

Genauigkeiten

Die Bestimmung der Genauigkeiten ist ähnlich schwierig wie die Bestimmung der Aktionen. Auch sie sind nicht direkt aus den notwendigen Simulationseingaben ableitbar. Um dies zu erreichen, werden sie als zusätzliche Eingaben bei der Simulationserstellung abgefragt. So kann beispielsweise die Information über die Einflussgröße Bereitstellung an die verwendeten Simulationsobjekte gekoppelt werden.

Ähnlich wie bei den Aktionen gilt hierbei dann, dass ein geübter HWD-Anwender die Eingaben beziehungsweise die Simulationsergebnisse prüfen sollte.

Entfernungen

Bei der Humansimulation werden Bewegungen unter Verwendung des digitalen Menschmodells kalkuliert und visualisiert. Die dabei erstellten Bewegungsdaten enthalten unter anderem die Koordinaten der Körperteile während des Arbeitsablaufs.

Die Entfernungen, die dabei zurückgelegt werden, können somit sehr gut aus den Daten abgeleitet werden. Die Ermittlung aus den Bewegungsdaten ist an dieser Stelle unter Umständen sogar genauer als die manuelle Erfassung durch einen HWD-Anwender, da Messfehler und Schätzungen vermieden werden können. Allerdings kann es durch eine fehlerhafte Abbildung des Arbeitsplatzes oder durch unrealistisch abgebildete Bewegungen dazu kommen, dass die gemessenen Entfernungen in der Realität so nicht anzutreffen sind.

Haltungen

Die Haltungen sind analog zu den Entfernungen sehr gut aus den Bewegungsdaten der Humansimulation abzuleiten. Die Körperteile und ihre Stellungen sind Teil der durch die Simulation generierten Daten. Die Ableitung der Haltungen ist somit möglich.

An dieser Stelle ist es notwendig gewesen, die bisher verwendeten Haltungsdefinitionen von HWD zu konkretisieren. Das liegt zum einen daran, dass die ursprünglichen Definitionen von einer Beurteilung durch einen Menschen ausgehen. So ist

beispielsweise nicht eindeutig definiert gewesen, bei welchen Körperwinkeln ein Mitarbeiter liegt oder sitzt. Zudem gibt es technisch mögliche Haltungen in der Simulation, die nicht mit HWD bewertet werden können, da sie in der Planung nicht berücksichtigt werden sollen. So ist es beispielsweise nicht sinnvoll, Arbeiten hinter dem Rücken auszuführen. In Humansimulationen ist dies jedoch zumindest theoretisch denkbar.

Kräfte

Die Kräfte sind nicht direkt aus den Daten des digitalen Menschmodells ableitbar, sind aber teilweise Bestandteil der Eingaben in die Humansimulation. So werden beispielsweise die Gewichte der verwendeten Objekte in der Simulation eingepflegt. Andere auftretende Kräfte müssen manuell ergänzt werden, damit die Daten vollständig bei der HWD-Analyse vorliegen. Demnach ist auch hier eine Eingabe beziehungsweise Überprüfung durch einen erfahrenen Anwender notwendig.

3.4. Zusammenfassung

Tabelle 7 fasst die Ausführungen von Abschnitt 3 zusammen. Man kann erkennen, welche für HWD notwendigen Informationen bei der Erstellung und Auswertung von Simulationen zu ergänzen beziehungsweise zu berücksichtigen sind, um eine regelkonforme und zur Simulation passende HWD-Analyse ableiten zu können.

So sind die Objekte beispielsweise notwendige Eingaben zur Erstellung der Simulation und bedürfen daher keiner besonderen Überprüfung durch einen MTM-Anwender. Anders ist es bei den Genauigkeiten, die der Anwender ergänzend angeben muss.

HWD-Bestandteile	HWD-Informationen	Erfassung bei Verwendung von Humansimulation	zusätzliche Tätigkeit durch HWD-Anwendung
Bausteinelemente	Objekt	notwendige Eingabe	nein
	Aktion	Zuordnung von Aktionsfolgen	ja (Überprüfung)
	Extremitäten	notwendige Eingabe	nein
Einflussgrößen	Genauigkeiten	ergänzende Eingabe	ja (Eingabe)
	Entfernungen	automatische Ermittlung	Nein
	Haltungen	automatische Ermittlung	Nein
	Kräfte	notwendige/ ergänzende Eingabe	teilweise (Eingabe)

Tabelle 7 Ermittlung der HWD-Informationen bei Verwendung von Humansimulationen

4. Automatisierte Erstellung einer MTM-HWD-Analyse am Beispiel von imk ema

Abschnitt 3 hat aufgezeigt, welche Informationen prinzipiell durch Simulationstools erzeugt werden können, um so die Erstellung einer HWD-Analyse zu unterstützen. Nun soll an einem Beispiel demonstriert werden, wie das Vorgehen praktisch umgesetzt wurde.

In einem gemeinsamen Entwicklungsprojekt entwickelten die MTM ASSOCIATION e. V. und imk eine Lösung zur automatisierten Erstellung einer HWD-Analyse. In der Lösung werden zunächst die Bausteinelemente und ihre Einflussgrößen im Simulationstool imk ema eingegeben beziehungsweise generiert (vgl. Abbildung 4 links). Um vollständige Analysen zu generieren, wurden die in Abschnitt 3 erläuterten notwendigen Ergänzungen und Anpassungen vorgenommen.

Die generierten Daten werden anschließend über eine gemeinsam entwickelte Schnittstelle an die MTM-Software TiCon übertragen. Die über die Schnittstelle übertragenen Daten bestehen aus den generierten HWD-Informationen sowie weiteren Daten, die TiCon oder andere Programme zur weiteren Verarbeitung benötigen. Die übertragenen Daten werden unter dem Namen 'parametrisierter Datenstrom menschlicher Arbeit' (pDmA) zusammengefasst.

In TiCon erfolgt dann eine Überprüfung der überlieferten Daten sowie der Regeln, die bei der Erstellung von HWD-Analysen zu beachten sind. Nach der Prüfung ordnet TiCon die passenden MTM-Zeiten zu. Zudem erfolgt die ergonomische Bewertung der Arbeitsaufgabe.

Das Ergebnis ist eine regelkonforme Analyse, die genau die Arbeitsabläufe beschreibt, die im Simulationstool stattgefunden haben. Das heißt, die Analyse würde auch fehlerhafte oder menschlich unmögliche Abläufe wiederspiegeln, wenn die Simulation nicht korrekt erstellt wurde.

Insgesamt entsteht eine Simulationsanalyse, die über den Normleistungsbezug von MTM eine verlässliche Plan-Zeit liefert und über das Verfahren EAWS eine aussagekräftige Bewertung der Ergonomie ermöglicht.

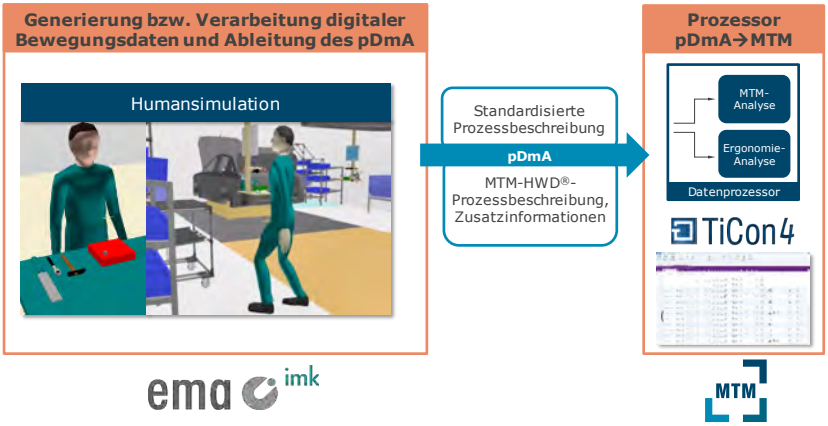


Abbildung 4 Übertragung der HWAD-Daten zwischen imk ema und TiCon

Diese gemeinsame Lösung zur automatisierten Erstellung einer HWD-Analyse wird zurzeit in einem Validierungsprojekt ausführlich erprobt.

Ein Beispiel, das bei der Validierung verwendet wird, ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Abbildung zeigt die Oberfläche der Software ema. Im unteren Bereich ist das Layout des Arbeitsplatzes zu sehen sowie der simulierte Mensch bei Durchführung der Arbeitsaufgabe. In diesem Fall ist die Aufgabe das Öffnen von Clic-Schellen an einem Abgasschlauch, bevor dieser an einem Auto angebaut wird.

Im oberen Bereich ist ein Ausschnitt der dazugehörigen HWD-Analyse zu sehen. Mit den Funktionalitäten des ema kann man nun zu bestimmten Aktionen im Ablauf springen und den korrespondierenden Teil der Simulation sehen.

Abbildung 5 Darstellung einer HWD-Analyse im ema

5. Ausblick: Übertragung auf Motion Capture-Systeme

In den vorhergehenden Abschnitten wurde gezeigt, wie man eine MTM-HWD-Analyse unter Verwendung von Humansimulationen erstellen kann. Dieser Abschnitt diskutiert nun die Möglichkeiten, die sich durch die Verwendung von Motion Capture-Technologien ergeben.

Motion Capture-Technologien erfassen menschliche Bewegungen und wandeln sie in Bewegungsdaten um (vgl. Jackèl et al. 2006, Kitagawa/ Windsor 2008). Das Ergebnis ist damit ähnlich wie bei den Humansimulationen: Daten, die menschliche Bewegungen abbilden. Die Erzeugung der Daten ist jedoch sehr verschieden. Während Humansimulationen Bewegungen nach vorgegeben Algorithmen generieren (vgl. Leidholdt et al. 2016), zeichnet Motion Capture real auftretende Bewegungen auf. Eine Humansimulation würde somit für eine gleichbleibende Arbeitsaufgabe auch immer die gleichen Bewegungsdaten erzeugen, während eine Motion Capture-Technologie bei mehreren Aufnahmen eines Menschen jedes Mal unterschiedliche Daten aufzeichnen könnte. Simulationen können zudem unsinnige Bewegungen generieren, also Bewegungen, die ein Mensch so nicht durchführen würde oder könnte.

Ein weiterer Unterschied, der große Auswirkungen auf die erzeugten Bewegungsdaten hat, sind die Voraussetzungen für die Erzeugung der Daten. Bei der Simulation muss das Arbeitssystem und die Arbeitsaufgabe bereits vollständig beschrieben sein, damit die Bewegungen des Menschen errechnet werden können.

Bei Motion Capture ist dies nicht notwendig. Die Bewegungsdaten werden auch ohne Beschreibung des Arbeitssystems erzeugt. Ein Sonderfall ist hierbei die Anwendung von Motion Capture im Zusammenhang mit Virtual Reality-Anwendungen. Hierbei können die erzeugten Motion Capture-Daten mit den Arbeitssystemdaten der VR-Anwendung ergänzt werden.

Diese Unterschiede der Technologien wirken sich auch auf die Informationen aus, die für die Erstellung einer HWD-Analyse zur Verfügung stehen.

Bausteinelemente

Bei der Aufnahme realer Abläufe durch Motion Capture-Technologien gibt es im Moment noch keine Lösungen, mit denen HWD-Aktionen identifiziert werden können. Es gibt zwar Ansätze, die die aufgenommene Zeit in Abschnitte einteilen (vgl. Benter 2018, Feldhorst 2018), jedoch nicht in die HWD-Aktionen. Ebenso schwierig ist die Erkennung von Objekten. Reine Motion Capture-Lösungen erfassen lediglich die Bewegungen des Menschen und können nicht ermitteln, mit welcher Art von Objekten gehandhabt wird. Allerdings existieren Ansätze, wie man mit Zusatztechnologien die Objekte bestimmen kann. Dazu gehört beispielsweise

die Erfassung der Objekte über Kameras oder RFID-Systeme. Im Gegensatz zu den Aktionen und Objekten können die Extremitäten wie bei der Humansimulation sehr gut bestimmt werden.

Einflussgrößen

Die Erfassung der Bausteinelemente ist zentrale Voraussetzung für die Erstellung von HWD-Analysen. Auch wenn diese Voraussetzung noch nicht gegeben ist, wird hier noch auf die Einflussgrößen eingegangen.

Die *Genauigkeiten* können im Moment nicht durch Motion Capture-Technologien erfasst werden. Sie müssten manuell durch einen MTM-Anwender ergänzt werden.

Im Gegensatz dazu könnten die *Entfernungen* bestimmt werden, wenn die Aktionen gegeben sind, da bei Motion Capture analog zur Humansimulation die notwendigen Koordinaten der Körperteile erfasst werden.

Die *Haltungen* können generell sehr gut durch Motion Capture erfasst werden, da auch sie direkt aus den Daten abgeleitet werden können. Sie sind zudem, im Gegensatz zu den Entfernungen, nicht bausteinspezifisch (vgl. Abschnitt 3.1).

Die *Kräfte* können nur durch Motion Capture-Lösungen erfasst werden, wenn diese über Möglichkeiten zur Kraftmessung verfügen. Dies ist beispielsweise bei dem Anzug der Firma AXS der Fall (vgl. Benter/ Kuhlang 2019). Bei reiner Erfassung der Bewegungen ist dies somit nicht der Fall.

Tabelle 8 fasst zusammen, welche Informationen Motion Capture-Technologien erfassen können. Sie verdeutlicht, dass diese Technologien im Vergleich zu Humansimulationen (vgl. Tabelle 7) weniger der notwendigen Informationen bereitstellen. Insbesondere die fehlende Erfassung der Aktionen und Objekte führt dazu, dass Motion Capture die Erstellung von HWD-Analysen kaum beschleunigt. An dieser Stelle sind also weitere Untersuchungen notwendig, um ähnliche Erfolge wie bei der Humansimulation (vgl. Abschnitt 4) zu erzielen.

HWD-Bestandteile	HWD-Informationen	Erfassung bei Verwendung von Motion Capture
Bausteinelemente	Objekt	nein
	Aktion	nein
	Extremitäten	ja
Einflussgrößen	Genauigkeiten	nein
	Entfernungen	ja
	Haltungen	ja
	Kräfte	teilweise

Tabelle 8 Erfassung der HWD-Informationen bei Verwendung von Motion Capture

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dem Beitrag wurde aufgezeigt, welche Informationen für die Erstellung einer vollständigen HWD-Analyse notwendig sind. Er hat anschließend untersucht, inwiefern diese Informationen durch die Technologie Humansimulation automatisiert generiert werden können. Es hat sich gezeigt, dass ein Großteil der Informationen bei der Erstellung einer Simulation ohnehin eingegeben beziehungsweise anschließend generiert werden. Der Rest der notwendigen Informationen kann ein HWD-Anwender bei Erstellung der Simulation manuell ergänzen. Der Anwender erhält dann eine fundierte zeitliche und ergonomische Bewertung der simulierten Arbeitsabläufe.

Anschließend wurde an einem Praxisbeispiel dargestellt, wie die automatisierte Erstellung einer HWD-Analyse technisch durch imk ema und die MTM-Software TiCon umgesetzt wurde.

Den Abschluss bildete eine Untersuchung, inwiefern analog eine automatisierte Analysenerstellung durch die Technologie Motion Capture möglich ist. Hierbei hat sich gezeigt, dass hier noch mehr Entwicklungstätigkeiten notwendig sind, da die generierten Informationen unzureichend sind.

Insgesamt wird deutlich, dass eine automatisierte Ableitung von HWD-Analysen aus digitalen menschlichen Bewegungsdaten möglich und sinnvoll ist. Für eine produktive und ergonomische Gestaltung menschlicher Arbeit in der zunehmend digitalisierten Produktion ist dies von hoher Bedeutung. Die Schnittstelle pDmA und die das Prozessbausteinsystem MTM-HWD® haben das Potenzial, dem Industrial Engineer der Zukunft eine zielgerichtete und menschgerechte Arbeitsgestaltung auf Basis von Bewegungsdaten zu ermöglichen.

Literatur

Benter, M. (2018). Analyse von Arbeitsabläufen mit 3D-Kameras. Hamburg, Techn. Univ., Dissertationsschrift.

Benter, M., Kuhlang, P. (2019). Kategorisierung der MTM-HWD®-Einflussgrößen zur Bewertung der Ableitbarkeit aus digitalen Bewegungsdaten. In: GfA (Hrsg.), Tagungsband der Herbstkonferenz 2019, 12.-13. September 2019, Böblingen, GfA-Press, Dortmund, Deutschland.

Bokranz, R., Landau, K. (2006). Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Faber, M., Przybysz, P., Latos, B. A., Mertens, A., Brandl, C., Finsterbusch, T., Härtel, J., Kuhlang, P., Nitsch, V. (2019). Empirical validation of the time accuracy of the novel process language Human Work Design (MTM-HWD®), Production & Manufacturing Research.

Feldhorst, S. (2018). Automatische Aktivitäts- und Kontexterkennung zur Analyse des Kommissionierprozesses. Dortmund, techn. Univ., Dissertationsschrift.

Finsterbusch, T., Kuhlang, P. (2015). A New Methodology for Modelling Human Work – Evolution of the Process Language MTM towards the Description and Evaluation of Productive and Ergonomic Work Processes. In: Proceedings of 19th Triennial Congress of the IEA, Melbourne 9.-14

Finsterbusch, T. (2016). Entwicklung einer Methodik zur Bildung von Bausteinsystemen für die Gestaltung menschlicher Arbeit. Dresden, Techn. Univ., Dissertationsschrift.

Jackèl, D., Nenreither, S., Wagner, F. (2006). Methoden der Computeranimation. Springer, Berlin.

Kitagawa, M., Windsor, B. (2008). MoCap for artists. Workflow and techniques for motion capture. Elsevier/Focal Press, Amsterdam.

Kuhlang P (2018). Produktive und ergonomiegerechte Arbeit – Von Grundsätzlichem zur Prozesssprache MTM über die Ergonomiebewertung zu Human Work Design (MTM-HWD®). In: ifaa (Hrsg.), Leistung und Entgelt. Joh. Heider Verlag, Düsseldorf, Ausgabe 2/2018, S. 6-46.

Kuhlang P (2019). Positionen der Deutschen MTM-Vereinigung e. V. zu Assistenzsystemen und zur Verarbeitung von digitalen Bewegungsdaten. In: Kuhlang P. (Hrsg.), MTM-Schriftenreihe Industrial Engineering, Ausgabe 12. Hamburg: Eigenverlag Deutsche MTM-Vereinigung e. V.

Leidholdt, W., Fritzsche, L., Bauer, S. (2016). Editor menschlicher Arbeit (ema). In: Bullinger-Hoffmann A., Mühlstedt J. (eds) Homo Sapiens Digitalis - Virtuelle Ergonomie und digitale Menschmodelle. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg.

Schaub, K., Caragnano, G., Britzke, B., Bruder, R. (2012). The European Assembly Worksheet. In: Theoretical Issues in Ergonomics Science. Volume 14 (Issue 6), S. 616-639. London: Taylor & Francis.

Konzept und Evaluierungsparameter für Gamification in der manuellen Montage

Dennis Keiser[1], Christoph Petzoldt[1], Thies Beinke[1], Michael Freitag[1,2]

[1]BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen
[2]Fachbereich Produktionstechnik, Universität Bremen

1. Einleitung

Der Mensch stellt in vielen Montagesystemen weiterhin einen zentralen Produktivitätsfaktor dar (Bertagnolli, 2018). Trotz wachsender Automatisierungsbestrebungen ist eine wirtschaftliche Automatisierung von komplexen Handhabungs- und Montageoperationen oft nicht möglich, was die Bedeutung des Menschen als Produktivitätsfaktor unterstreicht (Schenk, 2015). Dies ergibt sich insbesondere durch die hohen Flexibilitätsanforderungen an heutige Montagesysteme, welche auf kürzere Produktentwicklungszyklen und spezifischere Kundenanforderungen zurückzuführen sind (Budde, 2016). Der Wandel von großen Stückzahlen des gleichen Produkts hin zu einer kundenspezifischeren Kleinserien- und Einzelfertigung führt letztendlich zur Losgröße Eins. Dies führt zur weiteren Verschärfung der Flexibilitätsanforderungen (Stecken et al., 2019). Weiterhin bewirkt die Zunahme von individuellen Kundenwünschen, dass Entscheidungen über Form, Funktion und spezifische Eigenschaften von Produkten bei gleichbleibenden Qualitätsansprüchen und einer hohen Lieferfähigkeit immer näher an den Beginn der Produktion rücken. (Friedli und Schuh, 2012). Die Montage als einer der letzten Schritte im Wertschöpfungsprozess ist diesen Herausforderungen in besonderem Maße ausgesetzt, da mögliche Fehlplanungen oder Probleme der Qualität zu besonders starken Turbulenzen führen (Kardos et al., 2020; Lotter und Wiendahl, 2012; Scholz-Reiter und Freitag, 2007). Zudem stellt die Montage als Verursacher von mehr als 50 % der Produktionszeit und 20 % der Produktionskosten (ElMaraghy und ElMaraghy, 2016) einen zentralen Faktor für die Produktivität und Wirtschaftlichkeit von produzierenden Unternehmen dar (Andolfatto et al., 2014).

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_11

Zur Bewältigung des hohen Komplexitätsgrads sowie der kurzzyklischen intern und extern induzierten Änderungen schafft der Mensch mit seinen kognitiven Fähigkeiten wie Geschicklichkeit, Flexibilität, Wahrnehmungsfähigkeit und Intelligenz notwendige Freiheitsgrade in der industriellen Montage (Tsarouchi et al., 2016). Gleichzeitig stellen die Personalkosten jedoch einen signifikanten Teil der Gesamtkosten in der Montage dar (Lotter und Wiendahl, 2012). Zudem sind eine Mehrzahl von Montagefehlern direkt auf das Personal zurückzuführen (Di Pasquale et al., 2018). Die Ursachen hierfür sind vielfältig. So führen sich wiederholende und monotone Tätigkeiten oft zu einer fehlenden Motivation, welche zu geringerer Leistung und erhöhten Fehlerraten führen kann (Rosenstiel, 2015). Andererseits belegen Untersuchungen, dass gut strukturierte Arbeitsanweisungen einen signifikanten Einfluss auf Qualität sowie Effizienz der ausgeführten Montageaufgaben haben (Claeys et al., 2019).

Zur Bewältigung der hohen Produkt- und Prozessvarianz werden in der industriellen Praxis informatorische Montageassistenzsysteme eingesetzt (Hinrichsen und Bendzioch, 2019). Beispielhaft können hier Assistenzsysteme genannt werden, welche mittels Prozessanweisungen durch die Montage führen. Die Informationsbereitstellung kann dabei mit Bildschirmen oder durch Projektion in den Arbeitsraum erfolgen. Eingesetzt werden derartige Systeme insbesondere in der Automobil- und Maschinenbauindustrie. Diese Systeme fokussieren auf eine prozess- und produktspezifische Assistenz. Eine mitarbeiterorientierte Auslegung solcher Systeme, um beispielsweise spezifische Anreize zur Steigerung der Motivation zu schaffen, wird bisher nicht verfolgt (Petzoldt et al., 2020b). Dies führt zu ungenutzten Potentialen und fehlender Akzeptanz von Assistenzsystemen (Sochor et al., 2019). Gamification – die Nutzung von spieltypischen Elementen in einem spielfremden Kontext (Werbach und Hunter, 2012) – greift diese Problematik auf (Pötters et al., 2017). Für den Erfolg von Gamification stellen die Mensch-Technik-Interaktion (MTI) sowie die zielgerichtete Evaluation zentrale Rollen dar und sind folglich bei der Konzeption von hoher Bedeutung.

Aus dieser Motivation heraus wird in diesem Beitrag die Möglichkeit der Kombination von Assistenz- und Anreizfunktionen sowie deren Parameter zur Evaluation in der manuellen Montage vorgestellt. Für die Anreizgestaltung soll dabei der Ansatz der Gamification genutzt werden.

Der Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Im zweiten Kapitel wird die grundlegende Methode der Design Science Research (DSR) und deren Anwendung in der Forschung vorgestellt. Darauf folgend werden im dritten Kapitel die Grundlagen von Gamification und Assistenzsystemen dargestellt. Dem DSR-Ansatz folgend schließt sich in Kapitel vier eine Anforderungsdefinition auf Grundlage der MTI sowie den allgemeinen Anforderungen in der industriellen Montage an. In Kapitel

fünf erfolgt die Konzeption der Gamification-Anwendung. Kapitel sechs beschreibt das Vorgehen zur Evaluation von Gamification in der Montage. Abschließend werden die Erkenntnisse zusammengefasst und weitere Untersuchungsgegenstände aufgezeigt.

2. Methodik

Das übergeordnete Vorgehensmodell der Forschungsaktivitäten, welche in diesem Beitrag präsentiert werden, orientiert sich an dem von Peffers (2008) vorgeschlagenen Prozessablauf der Design Science Research (DSR) sowie den von Hevner (2004) formulierten Leitlinien (Hevner et al., 2004; Peffers et al., 2008). Abbildung 1 zeigt die Schritte der DSR, deren hier adressierten Betrachtungsgegenstand sowie die verwendeten Methoden. Grundlage für die Schritte Problemidentifikation & Motivation sowie die lösungsorientierte Zielsuche bilden Prozessbeobachtungen und die Dokumentation von implizitem Wissen durch Experteninterviews. Zudem wurde eine Literaturanalyse mit dem Ziel, Assistenzsysteme und Gamification in Zusammenhang mit der manuellen Montage zu betrachten, durchgeführt. Den Kern dieses Beitrags stellt das Design und die Entwicklung des Gamification-Konzepts für die manuelle Montage dar. Hierzu wurden Anforderungen ermittelt und Kennzahlen auf Basis der Anforderungen entwickelt. Diese Kennzahlen bilden die Grundlage des Gamification-Konzepts. Die Evaluation wird auf konzeptioneller Ebene dargestellt und bildet die Basis für weitere Forschungen.

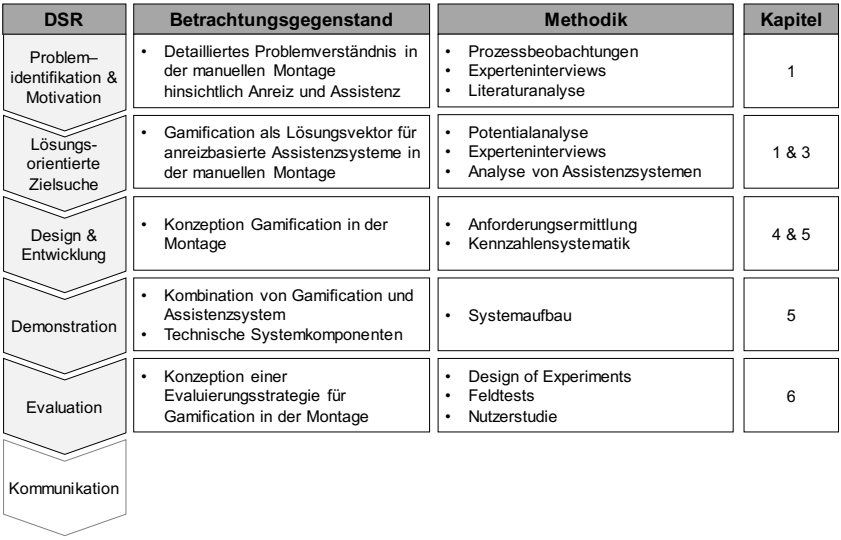


Abbildung 1: Forschungsdesign und Methodik angelehnt an den Design Science Research Prozess (angelehnt an Peffers et al., 2008)

3. Stand der Wissenschaft und Technik

Im Rahmen dieses Kapitels wird der Begriff der Gamification eingeführt und eine für die manuelle Montage zielführende Definition abgeleitet. Zudem werden die Grundlagen von Assistenzsystemen in der Montage dargestellt.

3.1. Gamification

Der Begriff „Gamification" tauchte Anfang der 2000er Jahre in der internationalen Forschung erstmals auf, erhielt jedoch bis in das Jahr 2010 keine große Aufmerksamkeit (Shauchenka et al., 2014). Mit der Aufnahme in den Gartner Hype Cycle für Emerging Technologies (2011) stieg die Aufmerksamkeit bei Unternehmen und Forschungseinrichtungen (Gartner, 2011). Dies zeigt sich nicht zuletzt in der stark gestiegenen Anzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen und an durchgeführten Forschungsprojekten (Koivisto und Hamari, 2019). Beispiele für die erfolgreiche Umsetzung von Gamification lassen sich u.a. im Gesundheits- und Bildungssektor finden (Sailer, 2016). Auch für die manuelle Montage gilt der Ansatz der Gamification als vielversprechendes Instrument. Dies ergibt sich insbesondere durch die zumeist vorhandenen ERP-Systeme, welche Kennzahlen der Produktivität und Qualität messen und so die Umsetzung von punkte-basierten Elementen (Score) mit relativ geringem Aufwand ermöglichen (Korn und Schmidt, 2015). Trotz der vielfältigen Forschungen findet sich in der wissenschaftlichen Literatur

keine allgemeingültige und eindeutige Definition für den Begriff der Gamification (Seaborn und Fels, 2014). Auf Grundlage der von Werbach und Hunter (Werbach und Hunter, 2012), Deterding (Deterding et al., 2011b), Zichermann und Cunningham (Zichermann und Cunningham, 2011) und Kapp (Kapp, 2012) vorgenommenen Begriffsbestimmungen schlagen die Autoren eine kombinierte Definition von Gamification unter Berücksichtigung einer klaren Zielsetzung vor:

Gamification ist ein Prozess der spielerischen Gestaltung von Aktivitäten in einem spielfremden Kontext durch die Verwendung von Spiel-Design-Elementen. Diese dienen der Förderung des Engagements und der Motivation, z.B. des Lernens oder der Leistungssteigerung.

Gamification ist dabei von klassischen Spielen sowie vom Serious Gaming abzugrenzen. Deterding et. al. (2011) schlagen hierzu zwei Dimensionen vor (Deterding et al., 2011a), welche den Grad der Strukturierung des Spiels sowie der Vollwertigkeit umfassen. Hieraus lassen sich, wie in Abbildung 2 dargestellt, vier Quadranten definieren. Insbesondere das Serious Gaming wird dabei oft im Zusammenhang mit Gamification genannt (Stieglitz, 2015). Das Hauptunterscheidungsmerkmal ist die Vollwertigkeit des Spiels. Serious Gaming-Anwendungen werden als vollumfängliche Spiele konzipiert, dies ist bei Gamification nicht der Fall (Ernste und Merkel, 2013). Gleich ist beiden Ansätzen der hohe Grad der Strukturierung. Hieraus leitet sich die vornehmliche Zielstellung beider Konzepte ab. Während normale Spiele dem Spaß dienen, wird in den beiden oberen Quadranten ein konkretes Ziel verfolgt (Deterding et al., 2011a). Die beiden unteren Quadranten unterscheiden nach Spielzeugen und spielerischem Design. Beim spielerischen Design werden bei der Gestaltung von Tätigkeiten Spielelemente eingesetzt, um die Ausübung für den Anwender „spaßiger“ zu gestalten. Systematische Regeln und Ziele werden allerdings nicht genutzt.

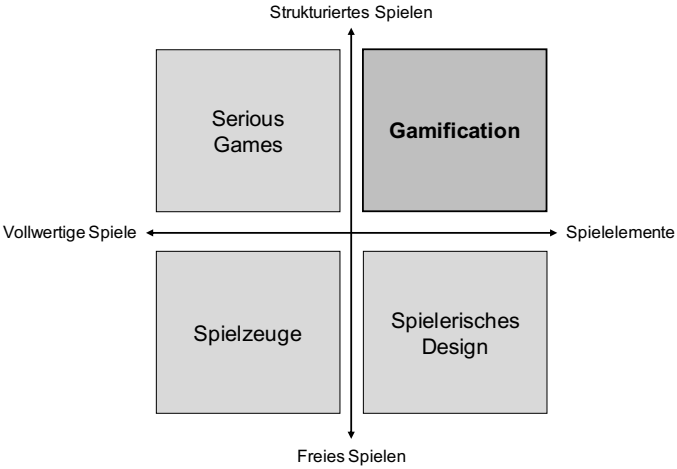


Abbildung 2: Klassifizierung von und Abgrenzung zwischen Serious Games, Gamification, Spielzeugen und spielerischem Design (angelehnt an Deterding et al., 2011a)

Die Umsetzung von Gamification erfolgt mittels Spiel-Design-Elementen (SDE). Die gezielte Auswahl ebendieser spielt für den Erfolg von Gamification eine entscheidende Rolle (Keiser et al., 2020). Die motivationspsychologische Grundlage stellt die Selbstbestimmungstheorie (engl.: self-determination theory) nach Deci und Ryan dar (Deci und Ryan, 1985).

3.2. Assistenzsysteme in der manuellen Montage

Assistenzsysteme lassen sich nach der Art der Systemunterstützung klassifizieren (Hinrichsen und Bendzioch, 2019). Zum einen werden in der Montage energetische Assistenzsysteme, welche dem Mitarbeiter*innen beispielsweise bei der Manipulation von schweren Bauteilen unterstützen, eingesetzt. Ziel derartiger Systeme ist die Reduzierung der körperlichen Belastung von Mitarbeiter*innen. Zum anderen finden informatorisch assistierende Systeme einen immer größeren Durchdringungsgrad. Informatorische Assistenzsysteme stellen Informationen zur Verfügung mit dem Ziel, Unsicherheiten und mentale Belastungen zu senken (Hinrichsen und Bendzioch, 2019). Darüber hinaus können informatorische Montageassistenzsysteme einen großen Beitrag zur Steigerung der Arbeitsproduktivität und zur Verkürzung der Anlernzeiten bei neuen Mitarbeiter*innen sowie neuen Produkten leisten (Hinrichsen et al., 2018). Typische Anwendungsfelder von informatorischer Assistenz stellen neben der Montage die Instandhaltung und die Logistik dar (Niehaus, 2017). Befragungen zeigen, dass insbesondere in diesen drei Bereichen große Potentiale für neuartige Assistenzsysteme gesehen werden (Kasselmann und Willeke, 2015). Als Grund für die positive Erwartungshaltung

ist die zunehmende IT-Integration der Wertschöpfungsprozesse zu nennen (VDI/VDE-Gesellschaft, 2016).

Die speziellen Anforderungen und Rahmenbedingungen in der industriellen Montage führen zu einer Vielzahl von möglichen Ausprägungen von Assistenzsystemen. Abbildung 3 stellt mittels einer Morphologie den breiten Lösungsraum von Merkmalen und Ausprägungen von Assistenzsystemen in der Montage dar. Dieser Beitrag fokussiert dabei auf stationäre kognitive Assistenzsysteme, mit denen die Mitarbeiter*innen bei allen Montageoperationen durch optische Informationen unterstützt werden. Eine physische Unterstützung der Montagetätigkeit ist nicht Gegenstand dieses Beitrags.

Merkmal	Ausprägung					
Art der Unterstützung	Physisch			Kognitiv		
Datenübertragung	Stationär	Mobil		Mobiles Handgerät	Tragbar (z.B. auf dem Kopf)	
Art der unterstützenden Operation	Fügen	Handhaben	Justieren	Kontrollieren	Hilfsfunktionen	Einrichten des Montagesystems
Umfang der Prozessunterstützung	Teilprozess			Gesamtprozess		
Mensch-Maschine-Interaktion	Unimodal			Multimodal		
Art der Informationsausgabe	Optisch		Akustisch		Haptisch	
Art der visuellen Informationsausgabe	Bildschirmanzeige		Darstellung im Arbeitsraum (z.B. Projektion)		Überlagernde Darstellung über dem Montageobjekt (z.B. In-situ-Projektion)	
Umfang der visuellen Informationsausgabe im Arbeitsbereich	Keine	Punktuelle Darstellung (z.B. Markierungshilfen		Begrenzte Darstellung von Symbolen, Zeichnungen	Umfangreiche Darstellung von Informationen	
Art der Informationseingabe / Steuerungssystem	Manuell (Mittels Aktoren)	Verbal (Steuerung durch Stimme)		Gestik (Tracking System)	Automatisch (Sensorische Steuerung)	
Umfang der Individualisierung	Festgelegte Einstellung von In- und Output-Informationen		Individualisierbare Einstellung von Output- Informationen		Individualisierbare Einstellung von In- und Output- Informationen	
Benutzererkennung	Keine		Registrierung und Speicherung von Mitarbeiterprofilen		Automatische Registrierung und Speicherung von Mitarbeiterprofilen	
Bewegungserfassung	Keine	Durch Messsensoren		Durch optische Sensoren	Andere	
Kompatibilität / Installationsaufwand	Gesamter Arbeitsplatz muss neu eingerichtet werden	Grundlegende Anpassungen notwendig		Kleine Anpassungen notwendig	Keine Anpassungen notwendig	
Flexibilität / Rekonfigurierbarkeit	Erhebliche Anpassungen der Hardware notwendig	Großer Aufwand für Softwareanpassungen		Mittlerer Aufwand für Softwareanpassungen	Geringer Aufwand für Softwareanpassungen	

Abbildung 3: Morphologie von Assistenzsystemen (angelehnt an Hinrichsen et al., 2016)

4. Anforderungsdefinition

Nachfolgend werden ausgehend vom Umfeld der manuellen Montage sowie der MTI spezifische Anforderungen an Gamification in der Montage definiert. Diese wurden mittels einer Literaturrecherche sowie Experteninterviews ermittelt.

Ausgewogene Anreizgestaltung [A1]. Auf Grundlage der hohen Qualitätsansprüche in der Montage stellt eine ausgewogene Anreizgestaltung eine Anforderung von hoher Wichtigkeit für die Konzeption von Gamification dar (Keiser et al., 2020). Die einseitige Berücksichtigung von Produktivität kann zu Qualitätsverlusten führen und so die Akzeptanz von Gamification stark beeinträchtigen.

Anpassbarkeit [A2]. Bedingt durch die hohe Variantenvielfalt sowie den Prozessvarianten ist die Anpassbarkeit der Gamification auf den spezifischen Anwendungsfall vorzusehen (Korn et al., 2012). Die Flexibilität ist dabei zweidimensional zu betrachten. Zum einen sind die Visualisierungsformen so zu gestalten, dass eine Anpassung auf den Kontext möglich ist. Zum anderen ist eine Gewichtung der Anreizziele zu ermöglichen.

Kognitive Skalierbarkeit [A3]. Wird Gamification in der Montage umgesetzt, so ist je nach Komplexität der Montageoperation die kognitive Belastung zu evaluieren. Die SDE sollten nicht zu einer kognitiven Überlastung des Mitarbeiters oder der Mitarbeiterin führen und damit zu einem kritischen Faktor für Qualität und Sicherheit werden (Korn, 2014). Zudem ist die Abschaltbarkeit der gesamten Gamification-Anwendung vorzusehen. Insbesondere bei Anlernprozessen ist dies oft notwendig.

Ergonomie der Mensch-System-Interaktion [A4]. Da die MTI einen essentialen Bestandteil von Gamification darstellt und insbesondere für die Akzeptanz eine entscheidende Rolle spielt, ist die DIN 9241-110 zur Ergonomie der Mensch-System-Interaktion zu beachten (DIN EN ISO 9421-110). Diese definiert sieben Grundsätze der Dialoggestaltung, welche die Grundlage für eine nutzerzentrierte Gestaltung von MTI darstellen. Diese Grundsätze sind: Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Lernförderlichkeit, Steuerbarkeit, Fehlertoleranz und Individualisierbarkeit. Diese Anforderungen stellen ein wichtiges Gestaltungsparadigma für das Gesamtsystem in der manuellen Montage dar und sind während der Entwicklung durch Nutzerstudien zu evaluieren.

Abschließend fasst Abbildung 4 die beschriebenen Anforderungen zusammen und stellt damit die Grundlage der Konzeption dar.

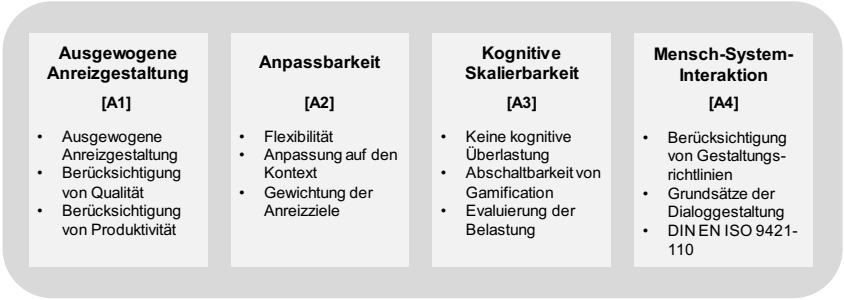


Abbildung 4: Anforderungen an Gamification in der Montage

5. Konzeption einer manuellen Montagestation mit Gamification

Die Umsetzung des Gamification-Konzepts erfolgt an einem manuellen Montagearbeitsplatz. Zur Komplexitätsbeherrschung ist ein informatorisches Assistenzsystem integriert, welches mittels Montageanweisungen durch den Montageprozess führt. Zudem erfolgt die Projektion von Hinweisen direkt in den Arbeitsbereich. Weiterhin ist eine durchgängige Prozesskontrolle durch Tiefenkameras implementiert. Diese ermöglichen es, den Zustand und den Montagefortschritt des Bauteils zu bestimmen und entsprechende Informationen für den nächsten Montageschritt bereitzustellen. Weiterhin erfolgt die ergonomische Bewertung des Montagepersonals durch ein externes Kamerasystem. Abbildung 5 zeigt den Aufbau des Arbeitsplatzes sowie die Integration der notwendigen Teilsysteme.

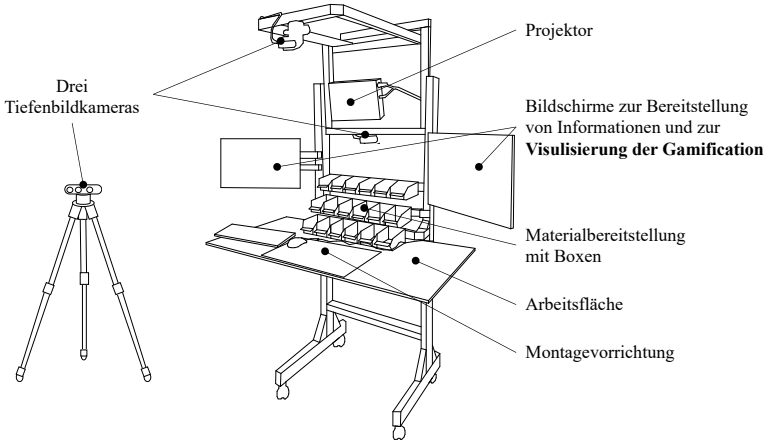


Abbildung 5: Aufbau der Montagestation. Drei Tiefenkameras werden verwendet, um Input für die Bildverarbeitungs- und Analysealgorithmen des Systems zu liefern. Die Kameraperspektiven werden wie folgt genutzt: Seitenansicht und Frontansicht zur Ergonomieanalyse; Draufsicht zur Erkennung des Montageprozesses, Qualitäts- und Vollständigkeitskontrolle und Messung der Prozesszeiten zur Individualisierung der Unterstützung (Petzoldt et al., 2020a)

Die mehrdimensionale Betrachtung von Prozess, Mitarbeiter*innen und Produkt ermöglicht es, neue Kennzahlen zu entwickeln, welche zum einen ein nutzerzentriertes Vorgehen und zum anderen die Anforderungen der Montage berücksichtigen (Anforderungen A1 – A3). In besonderem Maße ist dabei auf eine ausgeglichene Anreizgestaltung zu achten. So sind neben den Produktivitätskennzahlen auch Kennzahlen der Qualität zu beachten (Anforderung A1). Wird diese Gestaltungsrichtlinie nicht beachtet, kann die Gamification-Anwendung zu Qualitäts- oder Produktivitätsverlusten führen. Zudem sollte die Ausgestaltung nicht zu Ablenkung oder zu einer kognitiven Überforderung führen (Keiser et al., 2020).

Auf diesen Anforderungen aufbauend, zeigt die nachfolgende Abbildung 6 das entwickeltes Gamification-Konzept für die gezielte Anreizgestaltung in der manuellen Montage. Berücksichtigt werden die Spiel-Design-Elemente (SDE) Aufgaben, Punkte, Erfahrungspunkte, Level, Avatare, und Abzeichen. Ziele mit unterschiedlichen Betrachtungsaspekten stellen die Grundlage für die Ausgestaltung der SDE dar und werden nachfolgend näher erläutert.

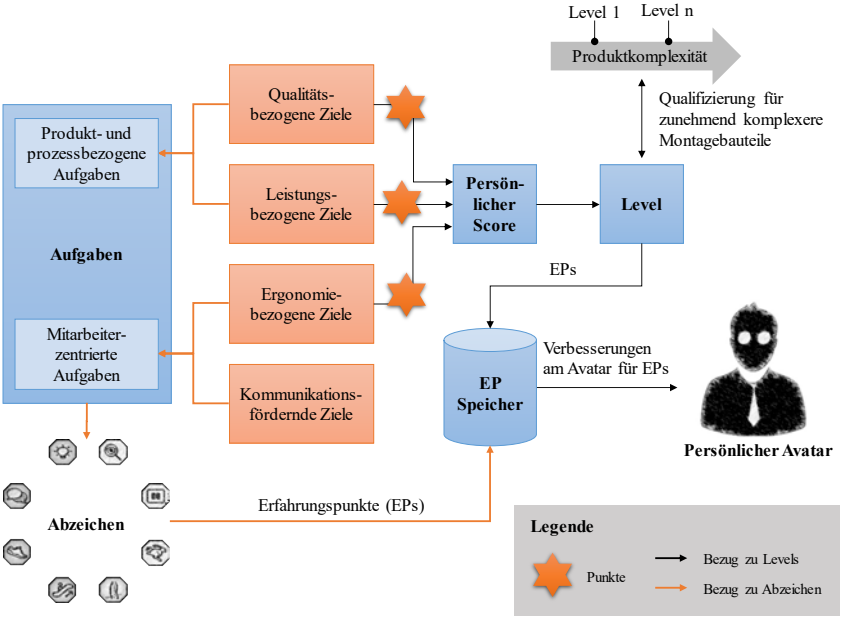


Abbildung 6: Gamification-Konzept für die manuelle Montage (angelehnt an Petzoldt et al., 2020a)

5.1. Ziele des Gamification-Konzepts in der Montage

Grundlage für die Gamification-Anwendung bilden Qualitäts- und Leistungsziele sowie ergonomische und kommunikationsfördernde Ziele, welche entsprechend der Anforderungen an die jeweilige Montagestation individuell konfiguriert werden können (Anforderung A2). Basis für die Definition der Zielkriterien stellen die typischen Zielgrößen der Montage wie Qualität und Produktivität dar. Zudem werden weitere Zieldimensionen zur ergonomischen und kommunikativen Optimierung definiert. Diese sollen insbesondere die Akzeptanz des neuartigen Systems fördern. Nachfolgend werden die vier übergeordneten Zieldimensionen der Gamification-Anwendung dargestellt.

Qualitätsbezogene Ziele

Für die qualitätsbezogenen Ziele wird die Fehlerrate *ER* (engl.: error rate) herangezogen. Die *ER* berechnet sich aus der Anzahl fehlerhaft entnommener Bauteile $ER_{picking}$ und den Montagefehlern $ER_{assembly}$. Um einen relativen Bezug zum Prozess

herzustellen, erfolgt die Division durch die Anzahl der Gesamtprozessschritte. Somit ergibt sich für die Berechnung von $ER_{picking}$ und $ER_{assembly}$ folgender Zusammenhang:

$$\mathrm{ER}_{\mathrm{pick,\,assembly}} = \frac{\mathrm{errors}_{\mathrm{x}}}{\mathrm{n}}$$

x: Anzahl Teilprozessfehler

n: Anzahl Teilprozessschritte

Die Fehlerrate *ER* berechnet sich abschließend durch die Summierung von $ER_{picking}$ und $ER_{assembly}$:

$$\mathrm{ER} = \mathrm{ER}_{\mathrm{picking}} + \mathrm{ER}_{\mathrm{assembly}}$$

Leistungsbezogene Ziele

Die leistungsbezogene Kennzahl der Prozessschrittzeit *TCT* (engl.: task completion time) leitet sich aus dem General Assembly Task Model (*GATM*) (Funk et al., 2015) ab und wird durch die Summe der Mittelwerte der Prozessschrittzeiten berechnet. Berücksichtigt wird die Zeit zur Lokalisierung der korrekten Materialbereitstellungsbox (TCT_{locate}), die Zeit zur Entnahme des Bauteils (TCT_{pick}), die benötigte Zeit zur Lokalisierung des korrekten Verbauortes ($TCT_{locate\text{-}assembly\text{-}position}$) sowie die Dauer der Fügeoperation ($TCT_{assembly}$). Für die *TCT* ergibt sich somit folgender Zusammenhang unter Berücksichtigung der Gesamtzahl an Montageschritten:

$$\mathrm{TCT} = \frac{\sum_{\mathrm{i}=1}^{\mathrm{n}} \mathrm{TCT}_{\mathrm{i}}^{\mathrm{x}}}{\mathrm{n}}$$

n: Anzahl Montageschritte

i: Index Montageschritte

x: Teilprozessschritt

Aus der Summe aller TCT kann die Fertigungszeit *PCT* je Bauteil (engl.: production completion time) berechnet werden.

Ergonomiebezogene Ziele

Für die Berücksichtigung der Ergonomie werden drei Dimensionen betrachtet und entsprechende Kennzahlen abgeleitet. Erstens die Dauer nicht-ergonomischer Körperhaltungen *DEUP* (engl.: duration of ergonomically unfavorable postures), zweitens die Häufigkeit nicht-ergonomischer Körperhaltungen *FEUP* (engl.: frequency of ergonomically unfavorable postures) und drittens die Zeit bis zur Korrektur ergonomisch ungünstiger Körperhaltungen nach Warnungen *TCEUP* (*engl. time for correction of ergonomic unfavorable posture*). Aus den Messkrite-

rien Neigung des Oberkörpers, Schulterneigung, der Verdrehung des Oberkörpers, Haltung der Arme sowie der Überkopfarbeit ergeben sich somit folgende Kennzahlen:

$$DEUP = \frac{\sum_i t_i\left(DEUP^{body}\right) + \sum_i t_i(DEUP^{shoulder}) + \sum_i t_i(DEUP^{twisting}) + \sum_i t_i\left(DEUP^{overhead}\right) + \sum_i t_i(DEUP^{arms})}{\Delta t}$$

$$FEUP = \sum EUP^{body} + \sum EUP^{shoulder} + \sum EUP^{twisting} + \sum EUP^{overhead} + \sum EUP^{arms}$$

$$TCEUP = t_{corr}(EUP) - t_{warning}(EUP)$$

Je nach Anwendungsfall kann der Betrachtungshorizont für einen bestimmten Zeitraum definiert werden. Dieser kann beispielsweise für eine Gruppe von Montageobjekten oder aber auch über einen diskreten Zeitraum bestimmt werden.

Kommunikationsbezogene Ziele

Weitere spezifische Ziele ergeben sich vor dem soziotechnischen Hintergrund der manuellen Montage. Folglich sind Ziele zu definieren, welche dazu dienen, das Assistenzsystem kontinuierlich zu verbessern, Feedback zum System zu geben, andere Mitarbeiter*innen in niedrigeren Qualifikationsphasen zu unterstützen (z.B. in Anlernphasen) oder Fehler in Montageanleitungen zu melden. Diese Ziele werden nicht für die Berechnung von Punkten oder Levels verwendet, sondern fließen, wie in Abbildung 6 dargestellt, in die Erfüllung spezifischer Aufgaben ein.

5.2. Punkte und Level

Aus den oben dargelegten Zielen lässt sich ein Punktestand, welcher einer Mitarbeiterin bzw. einem Mitarbeiter individuelles Feedback gibt, ableiten. Die Berechnung des individuellen Punktestands erfolgt aus der gewichteten Summe der Ziele:

$$\text{Individueller Punktestand} = a\left(\frac{1}{ER_m} ER_m^{max}\text{-}1\right) + b\left(\frac{1}{TCT_m} TCT_m^{target}\text{-}1\right) + c\left(\frac{1}{PCT_m} PCT_m^{target}\text{-}1\right) + d\left(\frac{1}{DEUP_m} DEUP_m^{max}\text{-}1\right) + e\left(\frac{1}{FEUP_m} FEUP_m^{max}\text{-}1\right) + f\left(\frac{1}{TCEUP_m} TCEUP_m^{max}\text{-}1\right)$$

Mit den Faktoren *a* bis *f* kann dabei die Gewichtung der einzelnen Ziele bei der Berechnung des persönlichen Mitarbeiter*innenpunktestandes festgelegt und anforderungsgerecht angepasst werden (Anforderung A2). Die Indices *max* bzw. *target* beschreiben die Zielvorgabe für die Erfüllung des jeweiligen Kriteriums für die Dauer beziehungsweise die Anzahl an Montageobjekten m. Um ein zu schnelles Erreichen von Levels zu verhindern, sollte m so groß gewählt werden, dass es der minimalen Zeit zum Erreichen eines neuen Levels entspricht. Level beschreiben hierbei eine steigende Schwierigkeitsstufe innerhalb des Gamification Konzepts.

Die jeweilige Punkteskala reicht dabei von eins bis null, wobei null den Zielzustand darstellt. Den oben erläuterten Formeln folgend ergibt sich somit für die Berechnung des persönlichen Punktestands ein Punktewert von Null, sobald alle Soll-Ziele entsprechend der Gewichtung erreicht sind. Für die Montage des aktuellen Produktes ist somit die Zielvorgabe erreicht. Um die Punkteskala ansprechender und damit motivierender zu gestalten, kann zudem ein Bias angewandt werden. Dieser wird auf den Punktstand addiert und entspricht damit dem Soll-Punktestand für das Erreichen des nächsten Levels.

Die Anzahl der Level kann nach der gewünschten Anzahl an freizuschaltenden Produktkomplexitäten gewählt werden. Die Produktkomplexität definiert sich dabei durch die Anzahl der Bauteile und den notwendigen Fertigkeiten und Fähigkeiten zur Montage. Mit jedem erreichten Level können zudem die Werte für die Zielvorgabe kontinuierlich angepasst werden, um durch die Erhöhung des Schwierigkeitsgrades weitere Anreize zu schaffen.

5.3. Avatar

Mit Erreichen eines neuen Levels werden, neben dem Freischalten von komplexen Produkten (Produktkomplexität), Erfahrungspunkte vergeben. Die gesammelten Erfahrungspunkte können von den Mitarbeiter*innen gegen persönliche Ausrüstungsgegenstände (Accessoires) für die Individualisierung eines persönlichen Avatars eingetauscht werden. Avatare stellen die visuelle Repräsentation des Nutzers oder der Nutzerin dar und dienen als Identifikationsfiguren (Sailer, 2016). Die Ausgestaltung reicht dabei von sehr einfachen Darstellungen bis hin zu komplexen Animationen.

5.4. Aufgaben und Abzeichen

Als von Punkten und Levels entkoppeltes SDE können Aufgaben und Abzeichen als weitere Gestaltungsdimension von Gamification umgesetzt werden. Abzeichen werden durch die Erfüllung spezifischer Aufgaben vergeben und entsprechen pro-

dukt- und prozessbasierten Aufgaben. Diese beziehen sich auf qualitäts- und leistungsbezogene Ziele sowie auf mitarbeiter*innenzentrierte Aufgaben, welche ergonomische und kommunikationsfördernde Ziele adressieren. Zudem werden durch das Erfüllen von Aufgaben und Abzeichen Erfahrungspunkte vergeben, sodass diese für die Individualisierung des Avatars (Abschnitt 5.3) verwendet werden können. Beispiele für qualitätsbezogene Aufgaben sind die fehlerfreie Montage für eine bestimmte Zeitdauer (z.B. einen Arbeitstag) oder das Unterschreiten einer durchschnittlichen Bauteilmontagezeit während eines definierten Zeitraums. Aufgaben bezogen auf die Ergonomie können beispielsweise durch eine kontinuierlich förderliche ergonomische Haltung umgesetzt werden. Kommunikationsbezogene Aufgaben sind unter anderem die Meldung von Fehlern und Verbesserungsvorschlägen innerhalb des Montageprozesses. Je nach Schwierigkeitsgrad und entsprechender Anreizgestaltung erfolgt die Vergabe und Visulisierung der Abzeichen. Auf Basis der definierten Anforderungen (Anforderung A3) ist jedoch bei der Visulisierung das Potential für Ablenkungen zu beachten und folglich zu evaluieren.

6. Konzept zur Evaluation von Gamification in der Montage

Die Evaluation des dargestellten Gamification-Konzepts für die manuelle Montage erfolgt angelehnt an die aufgestellten Anforderungen (Abschnitt 3) mittels qualitativen und quantitativen Methoden. Für die Konzipierung der Evaluationsstudie wurden unabhängige und abhängige Variablen definiert. Zum einen soll mittels variierend komplexer Montageoperationen untersucht werden, inwieweit Interdependenzen von Komplexitätsgrad der Montage und Akzeptanz von Gamification bestehen. Zum anderen wird mittels einer Kontrollgruppe, welche die Montageoperationen ohne Anreicherung des Arbeitsplatzes durch Gamification durchführt, ein Vergleich ermöglicht. Hiermit werden die allgemeinen Auswirkungen von Gamification auf die abhängigen Variablen untersucht. Abschließend werden Untersuchungen zur Visualisierungsform der SDE durchgeführt. Dies ermöglicht eine iterative Optimierung des Visualisierungskonzeptes. Als unabhängige Variablen sind erstens der Komplexitätsgrad der Bauteile, zweitens die Aktivierung der Gamification-Anwendung und drittens die Visualisierungsform der SDE definiert. Die abhängigen Variablen leiten sich aus den in Kapitel 5 dargelegten Zielen ab. Als abhängige Variablen können so Qualitäts-, Kommunikations-, Leistungs- und Ergonomieziele definiert werden (Abschnitt 5.1). Zudem stellt der Akzeptanzgrad von Gamification eine wichtige abhängige Variable im Studiendesign dar.

Diese kann mittels einer Befragung der Studienteilnehmer*innen auf Interdependenzen mit den unabhängigen Variablen untersucht werden. Abbildung 7 gibt einen Überblick über die verwendeten Metriken.

Abbildung 7: Abhängige und unabhängige Variablen der Evaluationsstudie

Die Evaluationsstudie dient zum einen zur iterativen Optimierung der Gamification-Anwendung und zum anderen der Überprüfung von Hypothesen. Die in Abbildung 8 dargestellten Hypothesen leiten sich aus den unabhängigen und abhängigen Variablen ab und untersuchen den Einfluss von Gamification auf die definierten Ziele. Ferner soll ein möglicher Zusammenhang von Visualisierungsform und Akzeptanz untersucht werden. Das Evaluierungskonzept sieht eine mehrstufige Evaluierung vor. Im ersten Schritt wird in einer Laborumgebung eine erste Studie mit Teilnehmer*innen aus dem universitären Umfeld durchgeführt. Werden positive Effekte festgestellt, erfolgt eine weitere Studie in einer realen manuellen Montage.

Gamification hat einen positiven Einfluss auf Qualitäts- und Leistungsziele in der industriellen Montage
Gamification hat einen positiven Einfluss auf Kommunikations- und Ergonomieziele in der industriellen Montage
Die Visualisierungsform der SDE haben eine Auswirkung auf die Akzeptanz von Mitarbeiter*innen hinsichtlich Gamification
Der Komplexitätsgrad sowie die Gamification von Montageprozessen stellen interagierende Variablen für den Akzeptanzgrad dar.

Abbildung 8: Hypothesen der Evaluierungsstudie

7. Zusammenfassung und Ausblick

Der Beitrag stellte ein Konzept für Gamification in der manuellen Montage sowie dessen Verbindung mit Assistenzsystemen vor. Auf Grundlage von definierten Anforderungen wurde die Gamification-Anwendung auf konzeptioneller Ebene entwickelt und notwendige Kennzahlen, welche den spezifischen Betrachtungsgegenstand der industriellen Montage berücksichtigen, vorgestellt. Die Kennzahlen bie-

ten zum einen die notwendigen Freiheitsgrade, um Anpassungen an neue Zielparamater zu ermöglichen und zum anderen, um eine mehrdimensionale Anreizgestaltung sicher zu stellen. Der Beitrag schlägt zudem ein generelles Vorgehen zur Evaluation von Gamification vor. Durch die Definition von abhängigen und unabhängigen Variablen wurden Hypothesen aufgestellt, welche im Rahmen der weiteren Forschung untersucht werden sollen.

Der aktuelle Forschungsschwerpunkt stellt die Implementierung des entwickelten Gamification-Konzepts dar. Zudem werden auf Basis des dargestellten Vorgehens Nutzerstudien sowie Feldtests zur Evaluation durchgeführt. Grundlegender Forschungsbedarf besteht weiterhin hinsichtlich der Flow-Theorie und deren Möglichkeiten zur Evaluation im Kontext von Gamification. Die Theorie des Flows entstammt der psychologischen Forschung und beschreibt einen mentalen Zustand der völligen Vertiefung (Csikszentmihalyi, 2004).

Die Theorie wird von verschiedenen Wissenschaftlern zur Erklärung der motivationalen Wirkung von Gamification herangezogen (Blohm und Leimeister, 2013; Korn et al., 2012). Darüber hinaus ist die Kombination von Assistenz und Anreiz in der Praxis auf ihre Übertragbarkeit zu analysieren.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „AxIoM – Gamifiziertes KI-Assistenzsystem zur Unterstützung des manuellen Montageprozesses“, das vom Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und der Bremer AufbauBank (BAB) unter dem Kennzeichen FUE0619B gefördert wird.

Literatur

Andolfatto, L.; Thiébaut, F.; Lartigue, C.; Douilly, M. (2014): Quality- and cost-driven assembly technique selection and geometrical tolerance allocation for mechanical structure assembly. In: *Journal of Manufacturing Systems*, 33 (1), S. 103–115. DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.03.003.

Bertagnolli, F. (2018): Lean Management - Einführung und Vertiefung in die japanische Management-Philosophie. Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag. DOI: 10.1007/978-3-658-13124-1.

Blohm, I.; Leimeister, J.-M. (2013): Gamification: Gestaltung IT-basierter Zusatzdienstleistungen zur Motivationsunterstützung und Verhaltensänderung. In: *Wirtschaftsinformatik*, DOI: 10.1007/s11576-013-0368-0

Budde, L. (2016): Integriertes Komplexitätsmanagement in produzierenden Unternehmen Ein Modell zur Bewertung von Komplexität. Dissertatoin. Universität St. Gallen.

Claeys, A.; Hoedt, S.; Schamp, M.; de Ginste, L. Van; Verpoorten, G.; Aghezzaf, E.H.; Cottyn, J. (2019): Intelligent authoring and management system for assembly instructions. In: *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 39, S. 1921–1928. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.01.240.

Csikszentmihalyi, M. (2004): Flow im Beruf - Das Geheimnis des Glücks am Arbeitsplatz. 2. Auflage. Stuttgart: Klett-Cotta.

Deci, E.L.; Ryan, R.M. (1985): Intrinsic Motivation and Self-Determination in Human Bahavior. New York, London: Plenum Press.

Deterding, S.; Dixon, D.; Khaled, R.; Nacke, L. (2011a): From Game Design Elements to Gamefulness: Defining "Gamification". *15th International Academic MindTrek Conference*

Deterding, S.; Dixon, D.; Khaled, R.; Nacke, L. (2011b): Gamification: Toward a Definition. *CHI 2011 Gamification Workshop Proceedings*, URL: https://www.researchgate.net/publication/273947177_Gamification_Toward_a_definition.

DIN EN ISO 9421-110 (2006): Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung.

ElMaraghy, H.; ElMaraghy, W. (2016): Smart Adaptable Assembly Systems. In: *Procedia CIRP*, 44, S. 4–13. DOI: 10.1016/j.procir.2016.04.107.

Ernste, P.; Merkel, S. (2013): Serious Games für ältere Menschen: Theoretische Grundlagen zur Evaluation des Projektes „MobilityMotivator". Gelsenkirchen.

Friedli, T.; Schuh, G. (2012): Wettbewerbsfähigkeit der Produktion an Hochlohnländern. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. DOI: 10.1007/978-3-642-30276-3.

Funk, M.; Kosch, T.; Greenwald, S.W.; Schmidt, A. (2015): A benchmark for interactive augmented reality instructions for assembly tasks. In: *ACM International Conference Proceeding Series*, 30-Novembe, S. 253–257. DOI: 10.1145/2836041.2836067.

Gartner (2011): Gartner Hype Cycle. München. URL: https://www.gartner.com/en/documents/1754719.

Hevner, A.R.; March, S.T.; Park, J.; Ram, S. (2004): Design Science in Information System Research. In: *MIS Quarterly*, 10 (2), S. 75–106. DOI: 10.1007/BF01205282.

Hinrichsen, S.; Bendzioch, S. (2019): How digital assistance systems improve work productivity in assembly. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, DOI: 10.1007/978-3-319-94334-3_33.

Hinrichsen, S.; Riediger, D.; Unrau, A. (2016): Assistance Systems in Manuel Assembly. In: Production engineering and management. Proceedngs 6th international conference. S. 3–14.

Hinrichsen, S.; Riediger, D.; Unrau, A. (2018): Montageassistenzsysteme - Begriffe, Entwicklungstrends und Umsetzungsbeispiele. In: *Betriebspraxis & Arbeitsforschung*, 232, S. 24–27.

Kapp, K.M. (2012): The Gamification of Learning and Instructions: Game-Based Methods and Strategies for Training an Education. San Francisco: Pfeoffer.

Kardos, C.; Kovács, A.; Váncza, J. (2020): A constraint model for assembly planning. In: *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier, 54 (July 2019), S. 196–203. DOI: 10.1016/j.jmsy.2019.11.007.

Kasselmann, S.; Willeke, S. (2015): Interaktive Assistenzsysteme. *Technologie-Kompendium Interaktive Assistenzsysteme Vorwort*, Hannover. URL: https://www.iph-hannover.de/_media/files/downloads/Projekt_40-Ready_Technologie-Kompendium.pdf.

Keiser, D.; Petzoldt, C.; Beinke, T.; Freitag, M. (2020): Einsatz von Gamification zur Motivationssteigerung in manuellen Montageassistenzsystemen - Methodik zur Auswahl geeigneter Spiel-Design-Elemente. In: *Industrie 4.0 Management*, 3, S. 49–52.

Koivisto, J.; Hamari, J. (2019): The rise of motivational information systems: A review of gamification research, Bd. 45. *International Journal of Information Management*, DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2018.10.013.

Korn, O. (2014): Context-Aware Assistive Systems for Augmented Work. A Framework Using Gamification and Projection. Dissertation. Universität Stuttgart.

Korn, O.; Schmidt, A. (2015): Gamification of business processes : Re-designing work in production and service industry. In: *Procedia Manufacturing*, The Authors, 3, S. 3424–3431. DOI: 10.1016/j.promfg.2015.07.616.

Korn, O.; Schmidt, A.; Hörz, T. (2012): Assistive Systems in Production Environments: Exploring Motion Recognition and Gamification. In: *5th International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments, PETRA 2012*, DOI: 10.1145/2413097.2413109.

Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. (2012): Montage in der industriellen Produktion. *Montage in der industriellen Produktion*, 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. DOI: 10.1007/978-3-642-29061-9.

Niehaus, J. (2017): Mobile Assistenzsysteme für Industrie 4.0 - Gestaltungsoptionen zwischen Autonomie und Kontrolle. Düsseldorf. URL: https://www.fgw-nrw.de/fileadmin/user_upload/FGW-Studie-I40-04-Niehaus-A1-web-komplett.pdf.

Di Pasquale, V.; Miranda, S.; Neumann, W.P.; Setayesh, A. (2018): Human reliability in manual assembly systems: a Systematic Literature Review. In: *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier B.V., 51 (11), S. 675–680. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.396.

Peffers, K.; Tuunanen, T.; Rothenberger, M.; Chatterjee, S. (2008): A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: *Journal of Management Information Systems*

Petzoldt, C.; Keiser, D.; Beinke, T.; Freitag, M. (2020a): Functionalities and implementation of future informational assistance systems for manual assembly. In: *Communications in Computer and Information Science, 12th International Conference on Subject-Oriented Business Process Management*

Petzoldt, C.; Keiser, D.; Beinke, T.; Freitag, M. (2020b): Requirements for an Incentive-based Assistance System for Manual Assembly. Präsentiert auf: 2020, *Freitag, M., Haasis, H.-D., Kotzab, H., Pannek, J. (eds.): Dynamics in Logistics. Proceedings of the 7th International Conference on Dynamics in Logistics. Springer, Cham 2020*, S. 541–553.

Pötters, P.; Klöckner, I.; Leyendecker, B. (2017): Gamification in der Montage - Untersuchung von Motivations- und Performancesteigerung bei Mitarbeitern. In: *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112 (3), S. 163–167. DOI: 10.3139/104.111679.

Rosenstiel, L. von (2015): Motivation im Betrieb. 11. Auflag. Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag. DOI: 10.1007/978-3-658-07810-2.

Sailer, M. (2016): Die Wirkung von Gamification auf Motivation und Leistung. München: Springer Fachmedien Verlag.

Schenk, M. (2015): Produktion und Logistik mit Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg Verlag. DOI: 10.1007/978-3-662-48266-7_5.

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M. (2007): Autonomous Processes in Assembly Systems. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56 (2), S. 712–729. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.002.

Seaborn, K.; Fels, D.I. (2014): Gamification in theory and action: A survey. In: *International Journal of Human Computer Studies*, 74, S. 14–31. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2014.09.006.

Shauchenka, N.; Ternés, A.; Towers, I. (2014): Gamification. In: Internationale Trends in der Markenkommunikation: Was Globalisierung, neue Medien und Nachhaltigkeit erfordern. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 33–51.

Sochor, R.; Kraus, L.; Merkel, L.; Braunreuther, S.; Reinhart, G. (2019): Approach to Increase Worker Acceptance of Cognitive Assistance Systems in Manual Assembly. In: *Procedia CIRP*, 81, S. 926–931. DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.229.

Stecken, J.; Linsinger, M.; Sudhoff, M.; Kuhlenkötter, B. (2019): Didactic Concept for Increasing Acceptance of Consistent Data Standards Using the Example of Assistance Systems in Assembly. In: *Procedia Manufacturing*, Elsevier B.V., 31, S. 277–282. DOI: 10.1016/j.promfg.2019.03.044.

Stieglitz, S. (2015): Gamification – Vorgehen und Anwendung. In: *HMD Praxis der*

Wirtschaftsinformatik, 52, S. 1–10. DOI: 10.1365/s40702-015-0185-6.

Tsarouchi, P.; Makris, S.; Chryssolouris, G. (2016): Human – robot interaction review and challenges on task planning and programming. In: *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29 (8), S. 916–931. DOI: 10.1080/0951192X.2015.1130251.

VDI/VDE-Gesellschaft (2016): Statusreport - Arbeitswelt Industrie 4.0. Düsseldorf.

Werbach, K.; Hunter, D. (2012): For the Win: How Game Thinking Can Revolutionize Your Business. Philadelphia: Wharton Digital Press.

Zichermann, G.; Cunningham, C. (2011): Gamification by Design: Implementing Game Mechanics in Web an Mobile Apps. Sebastopol: O´Reilly Media.

User Interface Design für Augmented Reality-basierte Assistenzsysteme

Konzept und Anwendungsbeispiele für eine menschorientierte Gestaltung der Nutzer*innenschnittstellen

Hendrik Stern[1], Moritz Quandt[1], Jens kleine Kamphake[2], Thies Beinke[1], Michael Freitag[1, 2]

[1]BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen
[2]Fachbereich Produktionstechnik, Universität Bremen

1. Einführung und Motivation

Augmented Reality (AR) stellt eine Form der „Anreicherung der visuellen Wahrnehmung durch die situationsgerechte Anzeige von computergenerierten Inhalten im Sichtfeld der Anwender*innen sowie die Bereitstellung von Möglichkeiten zur echtzeitfähigen Interaktion mit diesen Inhalten“ (Berndt 2015) dar. Bei der Verwendung von AR spielt die nutzer*innenorientierte Gestaltung der Anwendungen eine übergeordnete Rolle, da diese die Schnittstelle zwischen den Anwender*innen und der Technologie bildet (Mayer/Pantförder 2016).

Der Fokus dieses Beitrages soll im Folgenden auf der Gestaltung der Nutzer*innenschnittstelle für AR-Anwendungen liegen (im Folgenden sollen die Begriffe „Nutzer*innen“ und „Anwender*innen“ sowie „Nutzer*innenschnittstelle“ und „User Interface“ synonym verwendet werden). Hierzu wird eine Gestaltungsempfehlung auf Basis bestehender, allgemeiner Gestaltungsansätze für Nutzer*innenschnittstellen aus der Literatur abgeleitet. Die Basis hierfür bilden Grundlagen zu möglichen AR-Interaktionsformen und zur Mensch-Maschine-Interaktion. Hieran anschließend folgt ein Blick in aktuelle Forschungsvorhaben des BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen im Bereich AR-basierte Assistenzsysteme. Hier sollen zwei Anwendungsbeispiele vorgestellt und die jeweilige Umsetzung der Nutzer*innenschnittstellen beschrieben werden. Ferner wird ein Ausblick auf mögliche Anschlussforschung gegeben.

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_12

2. Augmented Reality-basierte Assistenzsysteme im industriellen Arbeitskontext

In diesem Abschnitt werden die für diesen Beitrag relevanten Grundlagen zu AR-basierten Assistenzsystemen im industriellen Arbeitskontext behandelt und näher auf Interaktionsmöglichkeiten zwischen den Nutzer*innen und AR-Anwendungen eingegangen. Die Nutzung der AR-Technologie im industriellen Arbeitskontext wird durch die Einführung der Industrie 4.0 gefördert, welche die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie adressiert (BMWi 2020). Der Förderungsrahmen Industrie 4.0 beschleunigt die Anwendung von Methoden zur Digitalisierung und Vernetzung der Produktion. Auf diese Weise kann eine Steigerung der Produktivität sowie eine Verbesserung des Ressourceneinsatzes erreicht werden (Brynjolfsson et al. 2011). Ungeachtet dessen wird menschlicher Arbeit im Zuge der Veränderungen eine sehr große Bedeutung für die Zukunft zugeschrieben. Die „Fabrik der Zukunft" wird folglich nicht menschenleer sein, sondern sich als hybrides System darstellen, welches aus Menschen und (vernetzten) Maschinen besteht (Spath et al., 2013). Die zentrale Herausforderung in diesem Kontext ist die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle als Bindeglied zwischen den Akteur*innen (Hirsch-Kreinsen, 2014). In diesem Kontext verspricht der Einsatz von AR-Technologie großes Potenzial zur Unterstützung der veränderten Arbeitsprozesse beizutragen (SCOPE 2015; Marks 2019).

2.1. Augmented Reality-Grundlagen

Der Begriff AR bezieht sich in dieser Arbeit auf die Definition von Azuma (1997), nach der ein AR-System mindestens folgende Charakteristika aufweisen muss:

- Kombination von Realität und Virtualität,
- Echtzeitinteraktion,
- 3D-Bezug von virtuellen und realen Objekten.

AR bietet die Möglichkeit, virtuelle Gegenstände in die reale Welt zu integrieren, sodass den Nutzer*innen ein erweitertes Bild der Realität angezeigt werden kann (Tönnis 2010). Damit können beispielsweise virtuelle, dreidimensionale Objekte direkt mit Aufnahmen der realen Welt verknüpft werden. AR ist eine Form der Mensch-Technik-Interaktion, bei der virtuelle Objekte in reale, durch Kameras erfasste Umgebungen in Echtzeit eingefügt werden, sodass diese räumlich korrekt positioniert sind und das reale Bild ergänzen (Mehler-Bicher/Steiger 2014). Entscheidend für die Auslegung des gesamten AR-Systems ist die Art der Anwendung, für die eine geeignete Darstellungsvariante zu wählen ist (Ludwig/Reimann 2005;

Cameron 2012). Wesentliche Auslegungsfaktoren, beispielsweise der Mobilitätsgrad, die freihändige Bedienung oder die Infrastruktur, sind dabei vorab zu berücksichtigen (Ludwig/Reimann 2005). Die Darstellung der AR-Inhalte kann u.a. über Datenbrillen, am Kopf getragenen Displays (engl. head mounted display, nachfolgend HMD), Smartphones oder Tablet-Computer erfolgen (Mayer/Pantförder 2016). Die Abschirmung der Nutzer*innen von der realen Welt und das damit verbundene Eintauchen in die virtuelle Welt wird mit dem Begriff Immersion beschrieben. Die Immersion wird z.B. durch ruckelnde Bilder, hohe Latenzen oder unrealistische Darstellungen gestört (Butz/Krüger 2017). Ein vollständiges Eintauchen der Nutzer*innen in die virtuelle Welt kann allerdings z.B. aus Gründen der Sicherheit nicht erwünscht sein, da ein Bezug zur realen Umgebung erhalten bleiben muss. Quandt et al. (2018) identifizierten Potenziale für den AR-Einsatz in der Industrie vorrangig in den Bereichen der Aus- und Fortbildung, der Montageunterstützung, dem Anlagenbau, der vorausschauenden Instandhaltung, der Qualitätssicherung, der Produktentwicklung, der Produktionslogistik sowie der Fernwartung.

2.2. Interaktion mit AR-Anwendungen

Nachfolgend werden auszugsweise potenziell einsetzbare Interaktionsformen vorgestellt. Die Eignung der jeweiligen Interaktionsform ist dabei von der genutzten AR-Hardware abhängig (Mehler-Bicher/Steiger 2014):

Mobile Endgeräte verfügen gegenwärtig i.d.R. über Displays, welche Eingaben durch Berührung entgegennehmen können. Diese Interaktionsform wird folglich als Touchinteraktion bezeichnet. Während die ersten Touchdisplays nur einzelne Berührungen aufnehmen konnten, ist eine Interaktion mit mehreren Fingern (Multi-Touch) inzwischen der Regelfall. Damit können beispielsweise standardisierte Gesten, wie das Spreizen zweier Finger auf dem Display, dazu verwendet werden, Darstellungen zu vergrößern (Heinecke 2012).

Das Bewegungstracking in Form von Hand- und Blicktracking stellt eine weitere Interaktionsform dar. Durch dieses Tracking können bestimmte Bewegungen vom System erkannt werden. Beim Handtracking kann etwa der „Fingerspitzencursor" als intuitiv einsetzbare Geste genutzt werden. Die Nutzer*innen setzen dabei die Fingerspitze ein, um mit einem virtuellen Objekt im Raum zu interagieren (Microsoft 2019b). Das Blicktracking stellt eine freihändige Interaktion durch die Anwender*innen dar. Dabei ist es möglich, bestimmte Dialogelemente durch längeres Anvisieren zu selektieren. Dies erlaubt u.a. eine freihändige Interaktion in einem industriellen Umfeld (Microsoft 2019a).

Darüber hinaus kann eine Interaktion mit künstlichen Markern (Bild- oder Positionsdaten) erfolgen. Die Nutzer*innen interagieren hierbei mit Markern, welche

von der Kamera des eingesetzten Systems durch ein Ausrichten auf die Marker oder durch eine Bewegung der Marker ins Sichtfeld der Kamera erfasst werden. Marker mit einer hohen Erkennungsqualität im Sinne von spezifischen Bildeigenschaften sind für die Interaktion besonders geeignet (Butz/Krüger 2017).

3. Menschorientierte Gestaltung von Nutzer*innenschnittstellen

In diesem Abschnitt werden bestehende Hinweise und Richtlinien zur Gestaltung von Nutzer*innenschnittstellen im Allgemeinen und für AR im speziellen thematisiert. Eine formgerechte und funktionale Gestaltung der Nutzer*innenschnittstelle wirkt direkt auf ihre Gebrauchstauglichkeit für die Nutzer*innen. Folglich bestehen daher Hilfestellungen, welche die Gestaltung von Nutzer*innenschnittstellen standardisieren (Shneiderman et al. 2018). Darüber hinaus bestehen Vorgehensmodelle zur Strukturierung des Gestaltungsprozesses, um Fehlentwicklungen zu vermeiden und eine Lösungsfindung zu fördern, wie z.B. der Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher Systeme nach DIN EN ISO 9241-210.

Richtlinien zur Gestaltung einer Nutzer*innenschnittstelle stellen konkrete Anleitungen für den Gestaltungsprozess bereit. In derartigen Richtlinien wird u.a. die Ausgestaltung von Abbildungen oder Texten beschrieben (z.B. bei Google 2020b), damit ein gewünschtes Endresultat erreicht werden kann. Inwieweit solche Richtlinien gänzlich umgesetzt werden können, muss im Einzelfall bewertet werden, da bestehende Richtlinien oftmals zu konkret, unvollständig oder im Anwendungskontext schwer umsetzbar sind (Shneiderman et al. 2018).

Das Unternehmen Google beispielsweise beschreibt in seinen Richtlinien für die AR-Gestaltung, dass die Nutzer*innen grundsätzlich in die AR-Welt eintauchen und nicht zu sehr durch Informationen bzw. einer Informationsflut gestört werden sollen. Folglich sollen Push- oder Vollbildbenachrichtigungen beispielsweise vermieden oder auf eine ständige Anzeige von 2D-Inhalten verzichtet werden, da sich diese störend auf die Immersion (siehe Abschnitt 2.1) auswirken. Mögliche Nutzer*inneneingaben sollten einfach gestaltet werden und intuitiv bedienbar sein. Die Kontinuität des AR-Erlebnisses sollte im Vordergrund stehen und die physische Interaktion der Nutzer*innen reduziert werden. Wenn die Nutzer*innen bereits mit bestimmten Interaktionsformen vertraut sind (z.B. direkte Manipulation durch Ziehen oder Tippen), sollten diese priorisiert implementiert werden mit dem Ziel, unnötige Lernaufwände zu vermeiden (Google 2020a).

Durch das Bereitstellen von Richtlinien werden konkrete Anhaltspunkte zur Gestaltung angeboten, an denen sich die User Interface Designer*innen orientieren können. Prinzipien zur Gestaltung von Nutzer*innenschnittstellen fokussieren hingegen auf das Verständnis über den Zweck der Anwendung, die Eigenschaften der Nutzer*innengruppe sowie die Interaktionsformen (Shneiderman et al. 2018).

Demnach existieren verschiedene Grundsätze zur Gestaltung von Nutzer*innenschnittstellen, wie z.B. DIN EN ISO 9241-110 oder die acht „goldenen" Regeln nach Shneiderman et al. (2018), welche z.B. die Konsistenz in der Gestaltung oder die Umkehrbarkeit von Nutzer*inneninteraktionen thematisieren.

Richtlinien und Prinzipien zur Gestaltung von Nutzer*innenschnittstellen bieten wichtige Hinweise auf dem Weg zur Bereitstellung eines User Interface, erlauben jedoch keine Bewertung seiner Benutzbarkeit. Zu diesem Zweck stehen verschiedene Evaluationsmöglichkeiten zur Verfügung. Damit sollen Schwachstellen des Designs identifiziert und die individuelle Nutzer*innenzufriedenheit erfasst werden (Quandt et al. 2020). Für die Evaluation interaktiver Systeme haben sich Methoden der Evaluation durch Expert*innen oder durch die Nutzer*innen etabliert (Dix et al. 2004). Zur Erhöhung der Akzeptanz von AR-Anwendungen stellt die Qualität der Interaktion zwischen Mensch und Maschine das maßgebende Kriterium dar (Butz/Krüger 2017). In diesem Zusammenhang nimmt die nutzer*innenzentrierte Evaluation eine wichtige Rolle ein, d.h. die Prüfung und Bewertung einer Gestaltungslösung aus der Nutzer*innenperspektive (Heinecke 2012). Gegenüber der Entwicklung derzeit dominierender grafischer Nutzer*innenschnittstellen, welche sich aus Windows, Icons, Menus und Pointers (kurz WIMP) zusammensetzen, stellen AR-Anwendungen andere Anforderungen an die Gestaltung der Nutzer*innenschnittstellen (Dünser/Billinghurst 2011). Die hohe Anzahl möglicher Interaktionsformen, Hardwarekonfigurationen sowie die Möglichkeit der Ansprache verschiedener Sinne erschwert die Auswahl allgemeingültiger, umfassender Evaluationsmethoden für die Nutzer*innenschnittstellen von AR-Anwendungen (Dünser/Billinghurst 2011). Folglich werden zur Untersuchung verschiedener Aspekte des Nutzer*innenerlebnisses i.d.R. unterschiedliche expert*innen- und nutzer*innenbasierte Evaluationsmethoden über den Entwicklungsprozess kombiniert (Billinghurst et al. 2014).

4. User Interface Design für Augmented Reality-basierte Assistenzsysteme

In diesem Abschnitt sollen Gestaltungselemente für die User Interfaces hinsichtlich ihrer Eignung für AR-Anwendungen im industriellen Arbeitskontext (bspw. zur vorausschauenden Instandhaltung oder zur Montageunterstützung, siehe auch Abschnitt 2) analysiert und qualitativ bewertet werden. Als Grundlage dienen 20 User Interface-Gestaltungselemente nach Garrett (2010) und Google (2019). Die Gestaltungselemente lassen sich in drei Kategorien gliedern:

- *Eingabekomponenten* erlauben den Nutzer*innen, Informationen an das System zu übermitteln,

- *Systeminformationen* werden den Nutzer*innen über Informationskomponenten mitgeteilt und
- *Navigationskomponenten* sollen es den Nutzer*innen ermöglichen, sich auf der Schnittstelle zu orientieren (Koelsch 2016).

Alle Gestaltungselemente sind jeweils mit einer kurzen Begriffsklärung in den nachfolgenden Tabellen 1 bis 3 dargestellt und sind dort qualitativ bezüglich ihrer Eignung für AR-Anwendungen bewertet. Die Bewertung wurde mittels leitfadengestützter Interviews vorgenommen. Hierfür konnten insgesamt vier Expert*innen aus den Bereichen Anwendung/Produktion (2), Entwicklung von AR-Anwendungen (1) und Integration von Mensch-Technik-Interaktion in Produktionssysteme (1) gewonnen werden. Dabei wurden die möglichen Interaktionsformen sowie der Anwendungskontext eines Einsatzes in der Industrie mit einbezogen. Ziel ist es, anhand dieser Bewertung geeignete Gestaltungselemente zu identifizieren und priorisiert in den Designprozess einfließen zu lassen. Einige der Gestaltungselemente wurden in Folge dessen für den AR-Einsatz im industriellen Arbeitskontext als geeignet bewertet.

Tabelle 1: Eingabe-Gestaltungselemente nach Garrett (2010) und Google (2019) und ihre Eignung als Nutzer*innenschnittstellen in Verbindung mit AR

Gestaltungs-element	Beschreibung	Eignung für AR
Auswahl-kästchen	Nutzer*innen können eine oder mehrere Optionen aus einer Menge auswählen.	
Optionsfelder	Nutzer*innen können jeweils nur ein Element auswählen.	
Combo-Box	Nutzer*innen können mehrere Optionen aus einer Menge auswählen (ähnlich zu Auswahlkästchen), jedoch kompakter gestaltet und somit für Situationen mit vielen Auswahlmöglichkeiten geeignet.	
Schaltfläche	Eine Schaltfläche impliziert eine Aktion bei Berührung und wird normalerweise mit Text, einem Symbol oder beidem beschriftet.	X
Aufklapp-menü	Aufklappmenüs ermöglichen ein Element aus einer Menge auszuwählen, erscheinen jedoch erst bei Interaktion.	X
Umschalter	Änderung einer Einstellung zwischen zwei Zuständen.	X
Textfeld	Nutzer*innen können Text eingeben.	
Datum & Uhrzeit-Picker	Eine Datumsauswahl ermöglicht Nutzer*innen, ein Datum und/oder eine Uhrzeit auszuwählen. Der Picker formatiert diese Informationen konsistent.	

Die Eingabekomponenten *Schaltflächen*, *Aufklappmenü* und *Umschalter* gehören zu diesen geeigneten Gestaltungselementen, bedingt u.a. durch die leichte Bedienbarkeit. Die Möglichkeit der Größenvariation, die universale Gestaltbarkeit sowie die Kombinierbarkeit mit Symbolen begründen ihre Bewertung der *Schaltflächen*. *Aufklappmenüs* ermöglichen eine Bereitstellung vielfältiger Auswahlmöglichkeiten ohne das Sichtfeld der Nutzer*innen dauerhaft einzuschränken. Dies korrespondiert mit der Forderung nach einer möglichst ausgeprägten Immersion bei AR-Anwendungen in Bezug auf die störenden Einflüsse auf die Nutzer*innen, wie in Abschnitt 2.1 dargestellt. *Umschalter* ermöglichen eine binäre Auswahl in Verbindung mit der Visualisierung der aktuellen Einstellung.

Tabelle 2: Navigation-Gestaltungselemente nach Garrett (2010) und Google (2019) und ihre Eignung als Nutzer*innenschnittstellen in Verbindung mit AR

Gestaltungs-element	Beschreibung	Eignung für AR
Suchfeld	Nutzer*innen können Schlüsselwort oder Phrase (Suchanfrage) eingeben und danach suchen lassen.	
Brotkrümel-navigation	Nutzer*innen können die aktuelle Position innerhalb des Systems identifizieren anhand einer Spur von fortschreitenden Seiten.	
Pagination	Teilt Inhalte zwischen einzelnen Seiten und die Nutzer*innen können zwischen Seiten springen.	
Stichworte	Mithilfe von Stichworten können die Nutzer*innen Inhalte gleicher Kategorie suchen.	
Schieberegler	Nutzer*innen können einen Wert einstellen oder anpassen. Information wird konsistent formatiert.	X
Symbole	Ein Symbol ist ein vereinfachtes Bild dessen Bedeutung intuitiv erkannt werden kann.	X
Bildkarussell	Nutzer*innen können durch eine Reihe von Objekten blättern und daraus eine Auswahl treffen.	X

Auch *Schieberegler*, *Symbole* und *Bildkarussells* aus der Kategorie der Navigationskomponenten wurden als geeignete Gestaltungselemente identifiziert. *Schieberegler* gelten als intuitive Gestaltungselemente, da diese der Bedienung von Schaltern aus der physischen Welt ähneln. Diese einfache Bedienbarkeit bietet sich folglich im industriellen Arbeitskontext an. *Symbole* ermöglichen das Erkennen ihrer Bedeutung, ohne das Sichtfeld durch Beschriftungen einzuschränken. Mit Hilfe eines *Bildkarussells* können die Nutzer*innen in komplexeren Auswahlsituationen auf einer visuellen Grundlage eine Auswahl treffen.

Die Informationskomponenten *Benachrichtigungen, Fortschrittsbalken* und *Tooltips* ermöglichen es, die Nutzer*innen zu unterstützen: Sie zeigen Nutzer*innen u.a. den Status einer Aufgabe oder erkannte Fehler an (*Benachrichtungen* und/oder *Fortschrittsbalken*). Bedingt durch die Lenkung der Aufmerksamkeit der Nutzer*innen auf einen bestimmten Aspekt wird den Hinweisen ein positiver Effekt beigemessen. Auch Informationsfelder, die beispielsweise bei Annäherung des Fingerspitzencursors auftauchen (*Tooltips*), können die Gestaltung von AR-Anwendungen im industriellen Arbeitskontext bereichern. Bedingt durch die Vermeidung etwaiger Falscheingaben vermitteln Sie den Nutzer*innen Sicherheit in der Systembedienung.

Tabelle 3: Systeminformation-Gestaltungselemente nach Garrett (2010) und Google (2019) und ihre Eignung als Nutzer*innenschnittstellen in Verbindung mit AR

Gestaltungs-element	Beschreibung	Eignung für AR
Benachrichti-gung	Nutzer*innen werden Informationen wie der erfolgreiche Abschluss einer Aufgabe oder eine Fehler- oder Warnmeldung angezeigt.	X
Fortschritts-balken	Zeigt einen Prozessfortschritt an. In der Regel sind Fortschrittsbalken nicht interaktiv.	X
Tooltip	Ermöglicht es den Nutzer*innen, Hinweise zu erhalten wie beispielsweise Bezeichnung oder Zweck des Dialogelements.	X
Meldungsfeld	Benachrichtigung, die den Nutzer*innen sowohl Informationen liefert als auch zu einer Aktion auffordert.	
Modale Dialoge	Erfordert eine zwingende Aktion seitens der Nutzer*innen bevor weitere Interaktionen durchgeführt werden können.	

Bezogen auf die Interaktionsformen kann davon ausgegangen werden, dass das Handtracking bei HMD sowie die Interaktion mit dem Touchdisplay bei mobilen Endgeräten kategorieübergreifend zur Nutzung von AR im industriellen Arbeitskontext geeignet sind, da diese in bestehenden Lösungen bereits vielfach zum Einsatz kommen. Die Interaktion mit Touchdisplays ist den Nutzer*innen bereits aus bestehenden Applikationen bekannt, daher muss der Umgang in der Regel nicht erlernt werden. Das Handtracking ist insbesondere dann geeignet, wenn das Mitführen eines mobilen Endgeräts die Bewegungsfähigkeit der Nutzer*innen einschränkt. Diese Interaktionsform muss zunächst erlernt werden, ermöglicht jedoch eine intuitive Bedienung.

5. Anwendungsbeispiele aus der Praxis

In diesem Abschnitt werden zwei Anwendungsbeispiele aus der Praxis geschildert, in der AR-Anwendungen als Teil von Assistenzsystemen entwickelt wurden. Dabei wird auf die Erkenntnisse der vorangegangenen Abschnitte Bezug genommen.

5.1. AR-Anwendung für die Instandhaltung von LNG-Armaturen

Die Nutzung von LNG-Antrieben (engl. liquified natural gas) bei Schiffen hat große umwelttechnische Vorteile, zieht jedoch ebenso Herausforderungen bei der Handhabung des LNG nach sich. Infolgedessen war eine AR-Anwendung zu entwickeln, welche zu Wartungs- und Servicezwecken entsprechender LNG-Armaturen eingesetzt werden kann. AR bietet in diesem Nutzungskontext die Möglichkeit, direkt am zu wartenden System virtuell Zusatzinformationen einzublenden

und dabei die Interaktion mit den Nutzer*innen so zu gestalten, dass diese bedarfsgerecht aufgerufen werden können. Somit kann mittels der AR-Unterstützung der Arbeitsprozess erleichtert und in seiner Leistung verbessert werden (z.B. Fehleranzahl, Arbeitsgeschwindigkeit).

Die AR-Anwendung wurde bedarfsgerecht gemäß den Anforderungen der Techniker entwickelt. Hierbei wird sich am Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher Systeme nach DIN 9241-210 orientiert. Die hier durchzuführenden Schritte wie das Verstehen des Nutzungskontexts, die Spezifikation der Nutzungsanforderungen, die Entwicklung von Gestaltungslösungen und deren Evaluation aus der Nutzer*innenperspektive wurden und werden im laufenden Projekt durchgeführt.

Um den Nutzungskontext zu verstehen und die Anforderungen zu spezifizieren, wurde zunächst eine Recherche aktueller AR-Systeme durchgeführt. So konnte ein Überblick über verfügbare Funktionalitäten, Anschaffungskosten und die jeweils verwendbaren Programmierumgebungen gewonnen werden. Hierbei wurde nach technologischen Varianten und damit verbundenen Interaktionsformen (AR-Anwendungen auf Handheld-Geräten, Smart Glasses und AR-Headsets) unterschieden. Weiterhin wurde ermittelt, welche grundlegenden Arbeitsschritte die Instandhaltung und Betriebsführung im Kontext von Armaturen zur Handhabung von LNG beinhalten und welche Sensorwerte und Informationen hierfür erforderlich sind. Hierauf aufbauend wurden anhand von User Stories der Nutzer*innen Anforderungen ermittelt, um den projektspezifischen Mehrwert der konzipierten Unterstützungsmöglichkeiten zu steigern. Das Ergebnis stellt ein Konzept für (allgemeine) AR-basierte Unterstützungsfunktionen dar. Dieses sieht vor, dass vorrangig eine Unterstützung des Komponentenaustausches erfolgen soll. Hierzu wurden die Tätigkeiten Demontage, Montage und Dokumentieren der Armaturen ausgewählt. Die Ausführungen dieser Tätigkeiten erfolgen oftmals an Bord der Schiffe, auf denen die Armaturen eingesetzt werden. Da somit keine Entsendung von Servicetechniker*innen möglich ist, muss die AR-Anwendung auf unterschiedliche Gruppen von Nutzer*innen zugeschnitten und idealerweise ohne zusätzliche Hardware einzusetzen sein. Daher wird eine Touchdisplay-Lösung auf Android-Basis verwendet. Die Nutzer*innen erhalten über die AR-Lösung Zugriff auf Wartungsanleitungen und Handbücher und werden so bei ihrer Arbeitsdokumentation unterstützt. Der Prozess der initialen Erstellung von Wartungshandbüchern soll einfach gestaltet werden, so dass diese ohne große Änderungen möglichst direkt aus dem EDV-System des Herstellers übernommen werden können.

Die Entwicklung der Gestaltungslösung wird unter Verwendung der Software Vuforia und der Spiele-Engine Unity umgesetzt. Dies beinhaltet die Umsetzung der Assistenzfunktionen der Tätigkeiten der Instandhaltung (Demontage, Montage und Dokumentation). Dabei wird eine Assistenz durch Visualisierungen in Form

einer Anzeige von Prozessschritten verwendet. Zusätzlich erfolgte die Festlegung der Nutzer*innenschnittstelle hinsichtlich des grundsätzlichen Designs, der Interaktionsform sowie der Verwendung von Gestaltungselementen.

Die Identifikation der Komponenten der LNG-Armatur erfolgt bildbasiert mittels Markern. Hierfür werden in einem ersten Schritt Merkmale der Markierungen identifiziert, zumeist Gradienten im Bild, etwa durch Kanten und Ecken. Zur Suche nach der Markierung im Bild-Stream einer Kamera werden per Kantendetektion geometrische Muster gesucht, welche dem Marker entsprechen könnten und mit denen des gesuchten Markers verglichen. Bei einer Übereinstimmung lässt sich aus der Größe und Deformation des Musters auf die Entfernung und Blickrichtung auf den Marker schließen. Aufgrund der weiten Verbreitung im AR-Segment wurde Vuforia als Framework zur Entwicklung ausgewählt. In Abbildung 1 ist die Markererkennung illustriert. Hier ist ein Testbauteil vor und nach der Erkennung gezeigt. Die weiße Hervorhebung gibt den Nutzer*innen eine entsprechende Rückmeldung.

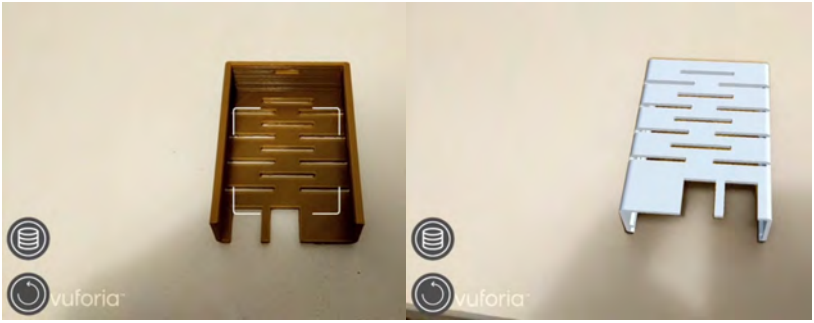


Abbildung 1: Illustration der Markererkennung (links: vor Erkennung, rechts: nach Erkennung)

Entsprechend der in Abschnitt 4 dargestellten Gestaltungselemente wurde zudem eine Gestaltung der Nutzer*innenschnittstelle vorgenommen. Auf Basis des identifizierten Nutzungskontextes sowie der ausgewählten Hardware und Interaktionsform (Touchbedienung) wurden die Gestaltungselemente *Schaltfläche*, *Aufklappmenü*, *Symbole* sowie *Benachrichtigung* verwendet. Ein prototypisches Mock-Up der Nutzer*innenschnittstelle ist in Abbildung 2 gezeigt.

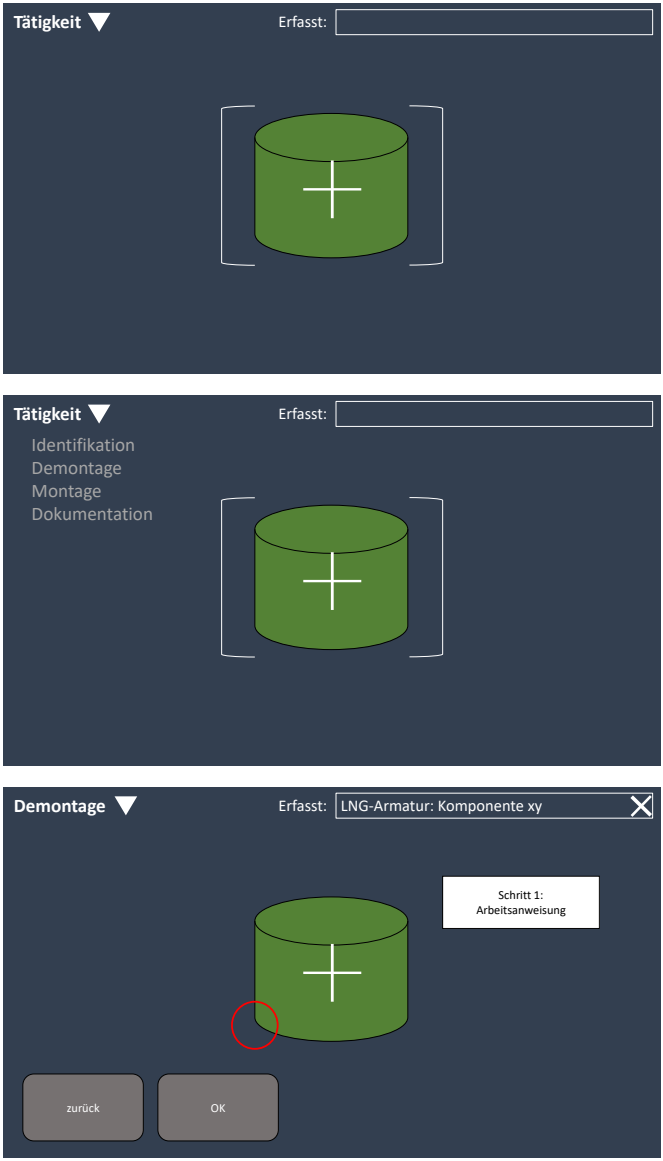


Abbildung 2: Prototypisches Mock-Up der Nutzer*innenschnittstelle (oben: Startansicht, mittig: Auswahl der Tätigkeit, unten: Unterstützung der Demontage)

Die Nutzer*innenschnittstelle bietet den Nutzer*innen mittels *Schaltflächen* Interaktionsmöglichkeiten. So kann die Tätigkeit ausgewählt werden, für die eine

Unterstützung erfolgen soll. Durch Betätigung des Dreieck-*Symbols* öffnet sich ein entsprechendes *Aufklappmenü* (siehe Abbildung 2, oben und mittig). Durch Veränderung der Bezeichnung wird den Nutzer*innen anschließend die aktuell ausgewählte Tätigkeit angezeigt (siehe Abbildung 2, unten). Ebenfalls erfolgt eine Rückmeldung über die durch das Markertracking erkannte Komponente der LNG-Armatur. Diese wird angezeigt, um die Nutzer*innen darüber zu informieren, für welche Komponente eine Tätigkeit durchgeführt wird. Wenn eine Tätigkeit ausgewählt wurde, erscheint die entsprechende Unterstützungsfunktion.

Diese soll hier am Beispiel Demontage erläutert werden (siehe Abbildung 2, unten). Die Nutzer*innen werden hier in Analogie zu einer konventionellen Montage-/ Demontageanleitung durch den Arbeitsprozess geführt. Durch virtuelle Einblendungen wird sowohl der Ort der Ausführung des jeweiligen Arbeitsschritts (rote Kennzeichnung) als auch mittels eines *Benachrichtigungsfeldes* eine Kurzbeschreibung des Arbeitsschrittes angezeigt. Durch den Einsatz von Schaltflächen können die Nutzer*innen hierbei durch den Anleitungsprozess navigieren und einerseits den vorherigen Schritt erneut anzeigen lassen (Schaltfläche „zurück“) und andererseits zum nächsten Arbeitsschritt übergehen (Schaltfläche: „OK“).

Das Gestaltungskonzept soll durch Berücksichtigung der verschiedenen Gestaltungsmerkmale die Nutzbarkeit steigern. Entsprechend der DIN 9241-210 soll im weiteren Projektverlauf eine Evaluation der Anwendung aus der Nutzer*innenperspektive erfolgen.

5.2. AR-Assistenzsystem für die Instandhaltung von Heizungs-, Klima- und Kälteanlagen

Die Instandhaltung von Heizungs-, Klima- und Kälteanlagen in großen Infrastrukturen wie z.B. Kaufhäusern oder Flughäfen stellt hohe Anforderungen an die Servicetechniker*innen hinsichtlich der Orientierung in der Arbeitsumgebung, des Auffindens der Komponenten, der Dokumentation von Messwerten, festgestellten Schäden sowie der ausgeführten Instandhaltungstätigkeiten. Aktuell werden in diesem Bereich die Instandhaltungsmaßnahmen überwiegend auf der Grundlage papierbasierter Unterlagen durchgeführt. Die Servicetechniker*innen führen in der Regel eine Wartungskontrollliste zu Dokumentationszwecken sowie einen Revisionsplan mit, in welchem die zu wartenden Komponenten in einem Grundriss des Gebäudes verzeichnet sind. Bei der Durchführung von Instandhaltungsmaßnahmen führt die Suche nach einzelnen Komponenten zu großen Zeitverlusten. Dies ist in der oftmals fehlenden Dokumentation von Planänderungen während der Bauteilmontage begründet, welche durch die Nutzung des zur Verfügung stehen-

den Installationsraums durch verschiedene Gewerke entstehen. Des Weiteren sorgen die Innenausbauten wie z.B. abgehängte Decken oder die Möblierung bei der Durchführung von Instandhaltungstätigkeiten für eine erschwerte Erreichbarkeit der Komponenten gegenüber der Montage. Daher können aktualisierte Revisionspläne erheblich zu einem effizienteren Arbeitsprozess beitragen.

In diesem Anwendungsfall bietet der Einsatz einer AR-Brille den Vorteil, dass die Hände der Servicetechniker*innen frei bleiben, ihre Bewegungsfähigkeit bei der Durchführung der Instandhaltungstätigkeiten nicht eingeschränkt wird und die Informationen unmittelbar im Sichtfeld eingeblendet werden können. Daher wird in diesem Beitrag eine AR-Anwendung vorgestellt, welche die zweidimensionalen Revisionspläne in der realen Umgebung einblendet und eine unmittelbare Interaktion zwischen Servicetechniker*in und AR-Assistenzsystem ermöglicht, indem die virtuellen Objekte mithilfe eines Handtrackings angepasst werden können.

Dafür müssen zunächst die vorhandenen Revisionspläne für die Darstellung auf der AR-Hardware aufbereitet werden. Die Aufbereitung der Pläne erfolgt nach definierten Modellierungskonventionen, welche z.B. die Anordnung der Raumwände auf einer Ebene der Zeichnung erfordern. Weiterhin erfolgt die Zuordnung der verschiedenen im Plan dargestellten Medien wie z.B. Zuluft, Abluft oder Elektronik auf einzelnen Ebenen der Zeichnung, welches eine spätere Filterung der Darstellung ermöglicht. Über die Auftragsverwaltung werden die Revisionspläne den jeweiligen Aufträgen zugeordnet und gemeinsam mit den weiteren Wartungsunterlagen an die mobile AR-Anwendung übertragen. Ein Importwerkzeug stellt die Übertragung des Revisionsplans in einem geeigneten Datenformat sicher. Am Ort der Auftragsdurchführung muss zunächst eine Ausrichtung des virtuellen Revisionsplans in der realen Umgebung erfolgen. Hierfür wird der reale Raum mit den Plandaten abgeglichen. Für die Anzeige im Raum wählen die Servicetechniker*innen die benötigten Informationen sowie die Darstellungsebene aus. Das Handtracking ermöglicht eine handgestenbasierte Interaktion mit einzelnen Komponenten des Revisionsplans. Auf diese Weise können die Plandaten unmittelbar in der Arbeitsumgebung durch die Nutzer*innen aktualisiert werden. Objekte, welche an einem anderen Ort verbaut sind als im Plan angegeben, können verschoben oder dem Plan neue Objekte hinzugefügt werden. Nach Abschluss der Instandhaltungsmaßnahme werden die aktualisierten Revisionspläne zur Überführung in die Auftragsverwaltung mit Hilfe eines Exportwerkzeugs konvertiert und verlustfrei in die Auftragsverwaltung übertragen.

Zum Zeitpunkt der Entwicklung der vorgestellten AR-Anwendung erfüllte die Microsoft HoloLens die Anforderungen der Anwendung im Bereich der Instandhaltung von Heizungs-, Klima- und Kälteanlagen am besten. Dieses halbtransparente HMD ist eine mobile AR-Hardware, die auf Grundlage der Rekonstruktion

der realen Umgebung der Nutzer*innen die Darstellung dreidimensionaler Hologramme im Sichtfeld der Anwender*innen ermöglicht (Liu et al. 2018). Die Interaktion zwischen AR-Hardware und Nutzer*innen erfolgt über die Blickrichtung (Gaze) sowie über Gesten oder Sprachbefehle. In diesem Fall wurde die Interaktion zwischen Nutzer*in und AR-Anwendung vorrangig mit Hilfe des Handtrackings umgesetzt, da die Sprachbefehle bisher ausschließlich in englischer Sprache verfügbar sind. Im Zentrum des Blickfeldes ist ein Cursor visualisiert, mit dem Objekte erkannt und durch den „AirTap" markiert werden können. Gesteuert wird der Cursor durch die Blickrichtung/Kopfbewegung des Anwenders. Der „AirTap" ist eine Handgeste, die mit dem linken Mausklick vergleichbar ist und in drei Schritten durchgeführt wird (s. Abbildung 3).

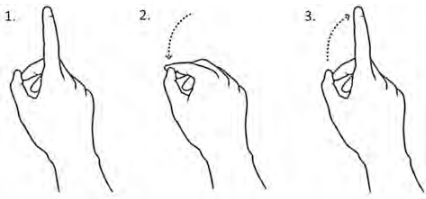


Abb. 3: Durchführung der „AirTap" Geste (Microsoft 2019c)

Mittels der ersten beiden Handbewegungen wird das Objekt „festgehalten" und kann an eine beliebige Position verschoben werden. Durch heben des Zeigefingers wird das Objekt wieder „losgelassen". Die Bewegung von Objekten wird als „Tap&Move"-Geste bezeichnet.

Im Folgenden wird die Nutzung der AR-Anwendung anhand der Nutzer*innenschnittstelle beschrieben. Zunächst wird der betreffende Revisionsplan über das Menü geladen und den Nutzer*innen im Sichtfeld dargestellt (siehe Abbildung 4).

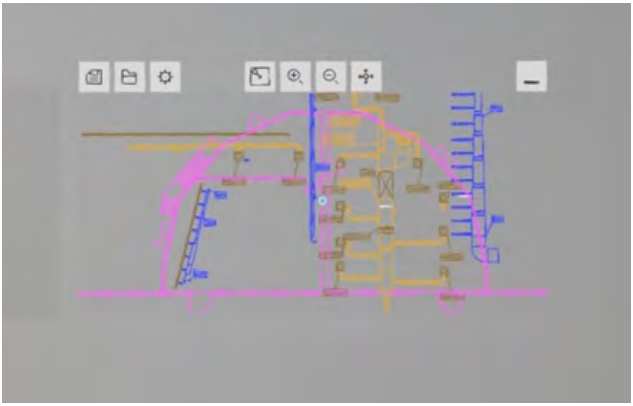


Abb. 4: Menü der AR-Applikation: Revisionsplan mit Komponenten des Beispielobjekts

Über die oben angeordneten *Schaltflächen* können die Funktionen der AR-Anwendung angezeigt werden. Mit Hilfe von *Tooltips* erhalten die Nutzer*innen Informationen zu den Funktionen der einzelnen Schaltflächen. Der Revisionsplan kann über die mittig angeordneten Schaltflächen verkleinert, vergrößert oder bewegt werden. Über die linke Schaltfläche des mittig angeordneten Blocks der Systemfunktionen starten die Nutzer*innen die Schritte zur Überlagerung der realen Umgebung mit dem Revisionsplan. Durch die Betätigung der Schaltfläche erscheint zunächst in der Nutzer*innenschnittstelle ein *Schieberegler*, welcher der Einstellung des Radius des Umgebungsscans dient (siehe Abbildung 5). Nach der Einstellung des Filterradius und der damit verbundenen Erfassung der Umgebung wird diese Einstellung über die entsprechende Schaltfläche bestätigt.

Abb. 5: Schieberegler zur Einstellung des Filterradius

Zur optimalen Überlagerung von Revisionsplan und Arbeitsumgebung müssen die Nutzer*innen nachfolgend ihre Position auf dem Grundriss angeben. Für das Setzen des Startpunkts wird demnach der Standort mit dem Blickcursor fixiert und eine „Tap&Move"-Handgeste ausgeführt. Durch die Bewegungsrichtung der Handgeste geben die Nutzer*innen ihre Blickrichtung an (siehe Abbildung 6).

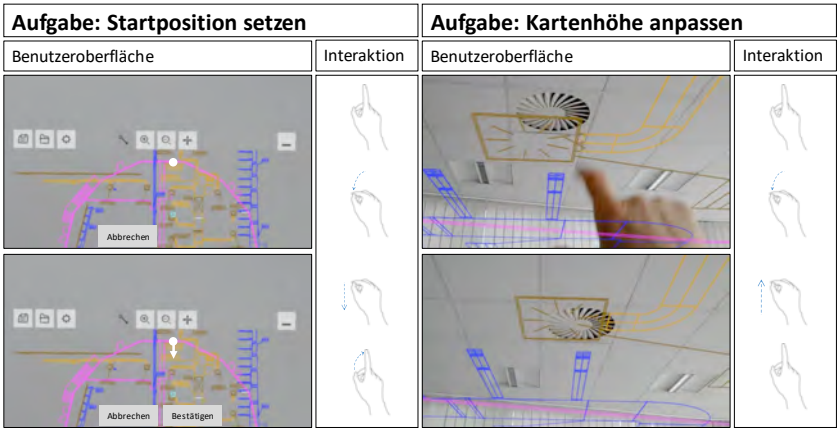


Abb. 6: Nutzer*innenschnittstelle und Interaktion für die Aufgaben „Startposition setzen“ und „Kartenhöhe anpassen“

Auf Basis der gesetzten Startposition der Nutzer*innen wird der Revisionsplan in die Arbeitsumgebung eingeblendet. Der gesamte Plan kann über die Auswahl der Funktion „Kartenhöhe anpassen“ durch die Ausführung einer „Tap&Move“-Geste auf die gewünschte Höhe verschoben werden, wie in Abbildung 6 dargestellt. Über drei weitere Modi können die Nutzer*innen Anpassungen am Revisionsplan vornehmen. Einzelne Objekte des Plans können bewegt, dupliziert oder gelöscht werden (siehe Abbildung 7). Die Interaktion zwischen den Nutzer*innen und virtuellen Objekten erfolgt über „Tap&Move“-Gesten, über das Menü können die vorgenommenen Änderungen bestätigt werden.

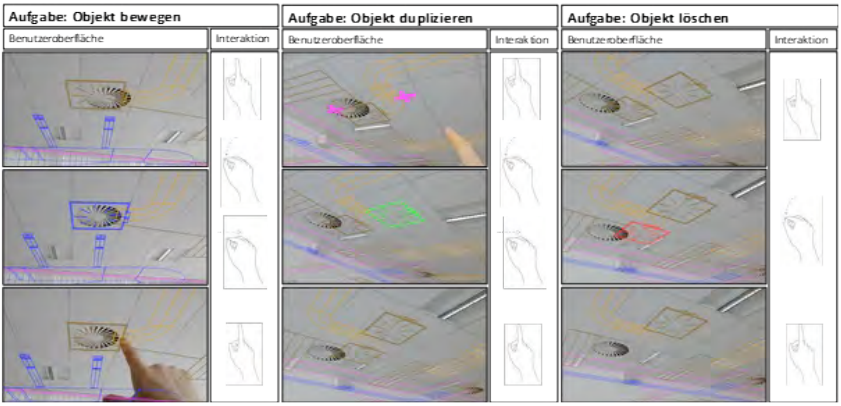


Abb. 7: Nutzer*innenschnittstelle und Interaktion für die Aufgaben „Objekt bewegen“ und „Objekt duplizieren“ und „Objekt löschen“

Die Evaluation des entwickelten AR-Assistenzsystems erfolgte in drei aufeinander aufbauenden Nutzer*innentests. Zunächst wurde ein Labortest anhand eines Prototypen des lauffähigen Assistenzsystems, ein zweiter Labortest mit dem auf Basis des Nutzerfeedbacks angepassten Assistenzsystem und ein abschließender Feldtest durchgeführt. Die Vergleichbarkeit der durchgeführten Nutzer*innentests konnte durch die Einhaltung eines definierten Workflows sowie durch die realitätsnahe Nachstellung des Anwendungsfelds im Laborszenario sichergestellt werden. Durch die Erhebung der subjektiv empfundenen Gebrauchstauglichkeit mit Hilfe der System Usability Scale (SUS) (Brooke 1996) konnten Rückschlüsse auf die Einsetzbarkeit sowie die Akzeptanz der Nutzer*innenschnittstelle aus Sicht der Nutzer*innen geschlossen werden. Die SUS ist ein etablierter Fragebogen zur Erhebung der subjektiv empfundenen Gebrauchstauglichkeit, welcher insbesondere im industriellen Arbeitskontexte zum Einsatz kommt (Lewis 2018). Darüber hinaus wurde das konkrete Feedback der Nutzer*innen zu den Verbesserungspotenzialen gesammelt, dokumentiert und in der weiteren Entwicklung der AR-Anwendung berücksichtigt.

Der erste Labortest wurde mit 14 männlichen Testpersonen im Alter zwischen 26-40 Jahren durchgeführt. Die Testteilnehmer hatten wenig bis grundlegendes Wissen über die Instandhaltung von Heizungs-, Klima- und Kälteanlagen. Von den Testnutzern hatten vier keine Erfahrungen im Umgang mit AR-Anwendungen, sechs hatten erste Erfahrungen und vier ein mittleres Erfahrungsniveau. Da für den zweiten Labortest ein Vergleich von Nutzer*innen mit Vorerfahrungen mit AR-User Interfaces mit neuen Nutzer*innen angestrebt wurde, ist der zweite Labortest mit 20 Testnutzer*innen durchgeführt worden. Diese Anwender*innen (zwei weiblich, 18 männlich) konnten folgenden Altersgruppen zugerechnet werden: 20-25 Jahre (ein*e Anwender*in), 26-30 Jahre (neun Anwender*innen), 31-35 Jahre (fünf Anwender*innen), 36-40 Jahre (fünf Anwender*innen). Die Vorerfahrungen mit der Instandhaltung von Heizungs-, Klima- und Kälteanlagen wurden mit nicht vorhanden (17 Anwender*innen), Grundlagenwissen (ein*e Anwender*in) und mittleres Erfahrungsniveau (zwei Anwender*innen) bewertet. Drei Nutzer*innen hatten keine Erfahrungen im Umgang mit AR-Systemen, zwölf Nutzer*innen hatten erste Erfahrungen und fünf Nutzer*innen ein mittleres Erfahrungsniveau. Der abschließende Feldtest wurde mit fünf Teilnehmer*innen (eine weiblich, vier männlich) eines Unternehmens durchgeführt, welches Instandhaltungsmaßnahmen an Klima-, Heizungs- und Kälteanlagen durchführt. Die Vorerfahrungen im Bereich der Instandhaltung von Heizungs-, Klima- und Kälteanlagen waren daher durchgehend sehr hoch. Die Altersstruktur der Nutzer*innengruppe setzte sich aus einer Testperson im Alter von 20-25 Jahren, zwei Testpersonen im Alter von 26-30 Jahren, einer Testperson im Alter von 31-35 Jahren und einer Testperson im Alter von 36-40 Jahren zusammen. Die Vorerfahrungen mit AR-Systemen waren

in zwei Fällen nicht vorhanden, drei Teilnehmer*innen gaben erste Erfahrungen an.

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen der SUS-Scores der einzelnen Nutzer*innentests dargestellt. Die subjektiv empfundene Gebrauchstauglichkeit der entwickelten AR-Anwendung ist insbesondere vom ersten zum zweiten Labortest deutlich angestiegen. Dies wird auf die Berücksichtigung des Nutzer*innenfeedbacks, die Beseitigung von Fehlern sowie die generelle Verbesserung der AR-Anwendung durch die Anpassung auf die Rechenleistung der AR-Hardware zurückgeführt. Zwischen den Bewertungen der beiden Gruppen des zweiten Labortests wurden keine deutlichen Unterschiede festgestellt. Die Anwendung hatte sowohl für die bereits am ersten Test beteiligten Nutzer*innen eine höhere empfundene Gebrauchstauglichkeit als auch für diejenigen Nutzer*innen, die bisher keine Vorerfahrungen mit der AR-Anwendung hatten. Die Bewertungen des Feldtests fallen erneut höher aus und bestätigen somit die Ergebnisse der Labortests. Bei Betrachtung der Vorerfahrungen der Anwender*innen lässt sich allerdings feststellen, dass die Teilnehmer*innen der ersten beiden Labortests generell einen höheren Grad an Vorerfahrungen mit AR-Anwendungen aufweisen. Die daraus erwachsende Erwartungshaltung an die entwickelte Lösung könnte aus unserer Sicht die teilweise niedrigeren persönlichen Bewertungen begründen.

Tabelle 4: SUS-Scores der Labor- und Feldtests

	Labortest 1 14 Teilnehmer*innen (TN)	**Labortest 2** 10 TN, mit Vorerfahrungen	**Labortest 2** 10 TN, ohne Vorerfahrungen	**Feldtest** 5 TN
SUS-Score	66,61 ± 18,31	75,00 ± 12,15	74,00 ± 15,74	79,50 ± 11,11

Das im ersten Labortest aufgenommene Nutzer*innenfeedback wurde unmittelbar für die Verbesserung der AR-Anwendung umgesetzt. In der nachfolgenden Tabelle sind die Anmerkungen der Nutzer*innen in den Kategorien Datengrundlage, Handtracking und Nutzer*innenschnittstelle sowie die aufgedeckten und mittels Verbesserungsmaßnahmen behobenen Fehler dargestellt.

Tabelle 5: Nutzer*innenfeedback und Verbesserungsmaßnahmen aus Labortest 1

Kategorie	Nutzer*innenfeedback	Verbesserungsmaßnahme
Datengrundlage	Performance-Probleme in der Kartenansicht	Vereinfachung der Revisionspläne durch Entfernen irrelevanter Ebenen und Bereiche der Zeichnung
Handtracking	Probleme mit der präzisen Ausführung einzelner Handgesten	Beobachtung Lerneffekte im Umgang mit der handgestenbasierten Interaktion, deutliche Ausführung und Timing der Handgesten
	Zahlreiche Interaktionen zur Anpassung der Höhe des Revisionsplans	Erhöhung des Bewegungsfaktors bei Ausführung der Handgesten
	Mehrfaches Setzen der Startposition	Mehrstufiges Feedback eingeführt
	Schieberegler schwer zu bedienen	Vergrößerung des Schiebereglers
Nutzer*innenschnittstelle	Schaltflächen schwer zu fokussieren	Vergrößerung der Schaltflächen
	Das Menü sollte direkt bei den Objekten des Plans sein	Hoher Umsetzungsaufwand; Hinweise zur Positionierung des Menüs deutlicher hervorgehoben
	Fehlendes Feedback bei Fokussierung und Betätigung von Schaltflächen	Akustisches und optisches Feedback eingeführt
	Einfärbung von 3D-Bedienelementen in rot und grün schwer erkennbar	Farbgebung angepasst
	Demarkierung ausgewählter Objekte beim zweiten Klicken	In den Modus „Bewegen“, „Duplizieren“ und „Löschen“ umgesetzt
	Farbliche Unterscheidung für Bewegen, Duplizieren und Löschen-Modus	Farbliche Abgrenzung der Modi Einfärbung der aktiven Objekte
Behobene Fehler	Abbrechen/Bestätigen-Schaltflächen werden ohne Funktion angezeigt	
	Achsen beim Bewegen der Objekte vertauscht	
	Im Löschen-Modus können mehrere Objekte nicht wieder abgewählt werden	
	Im Bewegen-Modus kann das erste Objekt nicht mehr bewegt werden, wenn ein zweites Objekt markiert wurde	

Bezüglich der genutzten Gestaltungselemente konnten im Zusammenhang mit einer handtrackingbasierten Nutzer*innenschnittstelle folgende Erkenntnisse gewonnen werden: Der Einsatz von Schaltflächen wurde an bestehende Anwendungen mit Touchinteraktion angelehnt. Durch die Verwendung weitgehend bekannter Symbole wie z.B. ein Zahnrad zum Aufruf der Systemeinstellungen konnten die Nutzer*innen die einzelnen Funktionalitäten der AR-Anwendung im Menü

auswählen. Aufgrund der für viele der Testnutzer*innen neuen Steuerung über die Blickrichtung und Handgesten war für einige das Aktivieren der Schaltflächen zunächst schwierig. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase im Umgang mit der handtrackingbasierten Interaktion gelang dies zunehmend besser. In diesem Zusammenhang wurde das vielfach geäußerte Feedback, die Schaltflächen zu vergrößern umgesetzt und eine Option einfügen, die es den Nutzer*innen ermöglicht, die Größe der Schaltflächen individuell anzupassen. Eine weitere wesentliche Erkenntnis des ersten Labortests war, das Feedback der AR-Anwendung an die Nutzer*innen zu verbessern. Durch die farbliche Hervorhebung der durch den Blickcursor fixierten Objekte sowie die Einblendung von Tooltips nach längerer Fixierung der Schaltflächen fiel den Nutzer*innen die Navigation durch die Anwendung wesentlich leichter. Des Weiteren konnte durch die Einbindung von akustischem Feedback bei der Betätigung von Schaltflächen das Feedback weiter verbessert werden. Fortschrittsbalken wurden sowohl zu Beginn eingesetzt, um den Ladestatus des Revisionsplans darzustellen, als auch für den Status der Positionierung nach Setzen der Startposition. Diese erwiesen sich als gute Option zur Überbrückung von Ladezeiten. Der eingesetzte Schieberegler hat sich in der Bedienung mittels Handgesten als gut geeignet erwiesen, die Einstellung des Filterradius konnte allerdings nicht beliebig genau erfolgen. Dies war in diesem Fall nicht erforderlich, sollte aber bei einem weiteren Einsatz von Schiebereglern beachtet werden.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Dieser Beitrag setzt sich mit dem Einsatz von AR-Technologie in industriellen Arbeitskontexten auseinander und fokussiert insbesondere auf die Gestaltung der Interaktion zwischen Mensch und den im Arbeitsprozess bereitgestellten AR-Assistenzsystemen. Hierfür wurden zunächst die technologischen Grundlagen der AR-Technologie sowie die Richtlinien und Prinzipien zur menschzentrierten Gestaltung von Nutzer*innenschnittstellen dargestellt. In diesem Zusammenhang wurden auch die Grundsätze der nutzer*innenzentrierten Evaluation sowie die Herausforderungen für den Einsatz bei der Evaluation von AR-Anwendungen beschrieben. Durch die Vorstellung und Bewertung gängiger Gestaltungselemente des User Interface Designs in Bezug auf die Nutzung für AR-Anwendungen konnte die grundsätzliche Eignung einzelner Gestaltungselemente für AR-Anwendungen gezeigt werden. Anhand von zwei Fallbeispielen wurde nachfolgend die Berücksichtigung der vorgestellten Gestaltungsgrundsätze demonstriert. Durch die Evaluation können die umgesetzten Gestaltungselemente kritisch betrachtet und Erkenntnisse für die zukünftige Gestaltung von industriellen AR-Anwendungen abgeleitet werden.

Für die hier betrachteten Gestaltungselemente kann ihre grundsätzliche Verwendung für AR-Anwendungen empfohlen werden. Die praktische Umsetzung lässt weiterhin Rückschlüsse auf die konkrete Gestaltung zu. Die Größe von Schaltflächen muss an das Interaktionskonzept angepasst werden, da eine handtrackingbasierte Interaktion aufgrund der Neuartigkeit der Bedienung einen gewissen Lernaufwand erfordert, der sich auf die Präzision der Bedienung auswirkt. Da die Lerneffekte im Umgang mit der Bedienung aus Sicht der Autoren eine große Rolle spielen, sollte man derartige Bedienelemente für die Nutzer*innen anpassbar gestalten, da sich die Bedürfnisse zwischen den Anwender*innen stark unterscheiden. Zur sicheren Bedienung der Anwendung nimmt das Feedback eine wichtige Rolle ein. Insbesondere im Zusammenhang mit der Ausführung mehrstufiger Handgesten konnte festgestellt werden, dass für die Nutzer*innen zu jedem Zeitpunkt erkennbar sein muss, welche Objekte ausgewählt sind oder welche Funktionen aktiv sind. Darüber hinaus tragen Tooltips, welche über die einzelnen Funktionen der AR-Anwendung informieren, zu einer sicheren Bedienung der Anwendung bei. Für andere Gestaltungselemente ist der Einsatzzweck das entscheidende Kriterium. So wurde z.B. für den Schieberegler festgestellt, dass dieser grundsätzlich geeignet ist, einer präzisen Einstellungen konkreter Werte (bei der Angabe von zwei Nachkommastellen) in Kombination mit einer handtrackingbasierten Interaktion allerdings Grenzen gesetzt sind. Daher sollte entweder eine weniger genaue Einstellmöglichkeit, eine vergrößerte Darstellung oder ein anderes Gestaltungselement für die Eingabe sehr genauer Werte gewählt werden.

Durch den Nachweis der grundsätzlichen Eignung einzelner Gestaltungselemente können keine unmittelbaren Rückschlüsse auf die konkrete Ausgestaltung gezogen werden, da diese stark von den verwendeten Interaktionsformen sowie der AR-Hardware abhängig sind. Da es bisher keine einheitlichen Gestaltungsrichtlinien für industrielle AR-Anwendungen gibt, diese aber einen positiven Einfluss auf die Gebrauchstauglichkeit der Systeme sowie die Akzeptanz durch die Nutzer*innen haben, müssen in Zukunft weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Dies dient der Ausschöpfung des Potenzials der AR-Technologie für industrielle Arbeitskontexte sowie der Ableitung einheitlicher Regeln zur Gestaltung von AR-Nutzer*innenschnittstellen sowohl abhängig als auch unabhängig von der ausgewählten Interaktionsform.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen der Projekte „KlimAR - Augmented Reality-basiertes Assistenzsystem zur Instandhaltung von komplexer Heizungs-, Klima- und Kältetechnik“ und „LNG Armaturen Set - Entwicklung eines sensitiven Armaturen-Sets für den hochvolumigen ship to ship LNG Transfer“, welche vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie unter den Förderkennzeichen „16KN062830“ bzw. „16KN062729“ gefördert wurden.

Literatur

Azuma, R. (1997): A Survey of Augmented Reality, S. 355–385.

Berndt, D. (2015): Montage-Arbeitsplatz - Visuelle Assistenz und optische Prüfung. In: Schenk, M. (Hg.): Produktion und Logistik mit Zukunft. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 84–108.

Billinghurst, M.; Clark, A.; Lee, G. (2014): A Survey of Augmented Reality. In: Foundations and Trends in Human–Computer Interaction 8 (2-3), S. 73–272.

BMWi (2020): Was ist Industrie 4.0? Menschen, Maschinen und Produkte sind direkt miteinander vernetzt: die vierte industrielle Revolution hat begonnen. Online verfügbar unter https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html, zuletzt geprüft am 04.05.2020.

Brooke, J. (1996): SUS: A quick and dirty usability scale. In: P. W. Jordan, B. Thomas, I. L. McClelland und B. Weerdmeester (Ed.): Usability Evaluation in Industry. London: Taylor & Francis, p. 189–194.

Brynjolfsson, E.; Hitt, L.; Kim, H. (2011): Strength in Numbers: How Does Data-Driven Decisionmaking Affect Firm Performance? In: SSRN Journal.

Butz, A.; Krüger, A. (2017): Mensch-Maschine-Interaktion. 2., erweiterte Auflage. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg.

Chin, J.; Diehl, V.; Norman, K. (1988): Development of an instrument measuring user satisfaction of the human-computer interface. In: Elliot Soloway, Douglas Frye und Sylvia Sheppard (Hg.): Human factors in computing systems. CHI '88 Conference proceedings: the SIGCHI conference. Washington, D.C., 15.05.-19.05.1988. New York, NY, Reading, MA: Association for Computing Machinery; Addison-Wesley Pub, S. 213–218.

DIN EN ISO 9241-110:2008-09, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006).

DIN EN ISO 9241-210:2011-01, Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010).

Dix, A.; Finlay, J.; Abowd, G.; Beale, R. (2004): Human-computer interaction, 3. Auflage. Harlow: Pearson Education.

Dünser, A.; Billinghurst, M. (2011): Evaluating Augmented Reality Systems. In: Furht, B. (Hg.): Handbook of augmented reality. New York: Springer, S. 289–307.

Garrett, J. (2010): The Elements of User Experience, Second Edition: User-Centered Design for the Web and Beyond. 2nd edition: New Riders.

Google (2019): User Interface & Navigation. Online verfügbar unter https://developer.android.com/guide/topics/ui, zuletzt geprüft am 04.05.2020.

Google (2020a): Augmented Reality Design Guidelines. Interaction - UI. Google Inc. Online verfügbar unter https://designguidelines.withgoogle.com/ar-design/interaction/ui.html#, zuletzt geprüft am 10.05.2020.

Google (2020b): Components. Online verfügbar unter https://material.io/components, zuletzt geprüft am 01.05.2020.

Heinecke, A. (2012): Mensch-Computer-Interaktion. Berlin, Heidelberg: Springer.

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. In: Abschlussbericht des Ar-beitskreises Industrie 4 (5).

Koelsch, G. (2016): Requirements writing for system engineering. New York, NY: Apress Springer Science+Business Media.

Lewis, J. R. (2018): The System Usability Scale: Past, Present, and Future. In: International Journal of Human–Computer Interaction 34 (7), p. 577–590.

Liu, Y., Dong, H., Zhang, L., & El Saddik, A. (2018). Technical evaluation of HoloLens for multimedia: a first look. IEEE MultiMedia.

Ludwig, C.; Reimann, C. (2005): Augmented Reality: Information im Fokus. In: Cooperative computing & communication laboratory 4 (1), S. 1–12.

Marks, A. (2019): Wirtschaftliche Mitarbeiterqualifizierung durch lernorientierte Montagesystemgestaltung. 1. Auflage. Aachen: Apprimus Verlag.

Mayer, F.; Pantförder, D. (2016): Unterstützung des Menschen in Cyber-Physical Production Systems. In: Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel (Hg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.2. Automatisierung. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 525–535.

Mehler-Bicher, A. Steiger, L. (2014): Augmented Reality. Theorie und Praxis. 2. überarbeitete Auflage. München: De Gruyter Oldenbourg.

Microsoft (2019a): Anvisieren und Verweilen. Online verfügbar unter https://docs.microsoft.com/de-de/windows/mixed-reality/gaze-and-dwell-eyes, zu-letzt geprüft am 05.02.2020.

Microsoft (2019b): Direkte Manipulation mit den Händen. Online verfügbar unter https://docs.microsoft.com/de-de/windows/mixed-reality/direct-manipulation, zuletzt geprüft am 05.02.2020.

Microsoft Coporation. (2019c). Gesten Microsoft. Oline verfügbar unter https://docs.microsoft.com/de-de/windows/mixed-reality/gestures, zuletzt geprüft am 14.05.2020.

Milgram, P.; Takemura, H.; Utsumi, A.; Kishino, F. (1994): Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum. In: Telemanipulator and telepresence technologies (2351), S. 282–292.

Quandt, M.; Knoke, B.; Gorldt, C.; Freitag, M.; Thoben, K. (2018): General Requirements for Industrial Augmented Reality Applications. In: Procedia CIRP 72, S. 1130–1135.

Quandt, M.; Stern, H.; Grudpan, S.; Beinke, T.; Freitag, M.; Malaka, R.: Evaluation of Human-Computer-Interaction Design in Production and Logistics by Using Experimental Investigations. In: Freitag, M.; Haasis, H.-D.; Kotzab, H.; Pannek, J. (Hrsg.): Dynamics in Logistics. Proceedings of the 7th International Conference on Dynamics in Logistics (LDIC 2020). Springer, Cham, 2020, S. 554-566

SCOPE (2015): Augmented Reality - PTC investiert in virtuelle Welten. Hg. v. WEKA BUSINESS MEDIEN GmbH. Online verfügbar unter https://www.scope-online.de/produktionssysteme/augmented-reality---ptc-investiert-in-virtuelle-welten.htm, zuletzt geprüft am 02.05.2020.

Shneiderman, B.; Plaisant, C.; Cohen, M.; Jacobs, S.; Elmqvist, N. (2018): Designing the user interface. Strategies for effective human-computer interaction. Sixth edition, global edition. Boston: Pearson.

Spath, D., Ganschar,O. u. a. (2013). Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer IAO.

Tönnis, M. (2010): Augmented Reality. Berlin, Heidelberg: Springer.

Gestaltung von Mensch-Technik-Schnittstellen für die Digitalisierung von Planungs- und Steuerungsprozessen auf Automobilterminals

Marit Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik[1], Susanne Schukraft[1], Tobias Sprodowski[1], Michael Freitag[1,2], Dennis Dunekacke[3], Viktor Zeitler[3], Michael Görges[4]

[1] BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik an der Universität Bremen
[2]Fachbereich Produktionstechnik, Universität Bremen
[3] 28Apps Software GmbH
[4] BLG Logistics Group AG & Co. KG

Die Planung und Steuerung des Fahrzeugumschlags auf Autoterminals ist durch eine hohe Komplexität und Dynamik geprägt. Mit fortschreitender Digitalisierung eröffnen sich jedoch neue Möglichkeiten, die Planungs- und Steuerungsprozesse durch IT- und Assistenzsysteme zu erweitern, um das Terminalpersonal über adäquat gestaltete Mensch-Technik-Schnittstellen in seiner täglichen Arbeit zu unterstützen. In diesem Beitrag wird die Gestaltung von Mensch-Technik-Schnittstellen zu einer interaktiven Planungsoberfläche und einem app-basierten Steuerungsalgorithmus vorgestellt. Die vorgestellten Lösungen wurden anhand eines konkreten Anwendungsfalls der BLG Logistics Group entwickelt. Für die Ausgestaltung der Schnittstellen wurden in Zusammenarbeit mit den Mitarbeiter*innen des Automobilterminals detaillierte Anforderungen identifiziert, um bei der Gestaltung die Bedürfnisse der mit dem System interagierenden Menschen möglichst optimal abzudecken. So zeichnet sich die Planungsoberfläche durch eine übersichtliche Informationsdarstellung und umfangreiche Interaktionsmöglichkeiten für mehrere Personen gleichzeitig aus. Für die Steuerung der Fahrzeugbewegungen wurde ein Algorithmus entwickelt, der durch die Nutzung einer modellprädiktiven Regelung und die Integration einer App in der Lage ist, spontane Änderungen, die sich durch die Dynamik der Terminalprozesse ergeben, aufzugreifen und in die weiteren Planungsschritte zu integrieren. Durch Feedback-Runden mit den Mitarbeiter*innen des Terminals konnte gezeigt werden, dass die Umsetzungen der Mensch-Technik-Schnittstellen die Arbeit auf dem Terminal erleichtern kann.

DOI: https://doi.org/10.30844/wgab_2020_13

1. Einleitung

Die logistischen Dienstleistungen von Seehäfen sind ein wesentlicher Bestandteil der Distributionskette in der Automobilindustrie. Die Seehäfen übernehmen den Umschlag für den Import und Export von Fahrzeugen. Das Leistungsangebot der Automobilterminals auf den Seehäfen umfasst die gesamte logistische Abwicklung, d. h. die Fahrzeugannahme und Zwischenlagerung der Fahrzeuge sowie die Verladung der Fahrzeuge für den Abtransport und die Durchführung technischer Dienstleistungen, bspw. das Anbringen von Sonderausstattungen (Böse/Piotrowski 2009, Mattfeld 2006).

Die Planung und Steuerung der logistischen Prozesse auf den Automobilterminals ist durch eine hohe Komplexität und Dynamik geprägt. Die Komplexität der logistischen Abwicklung ergibt sich u.a. durch die hohe Variantenvielfalt in der Automobilindustrie, die sich unmittelbar auf das übergreifende Logistiksystem auswirkt (Klug 2018). Auf den Automobilterminals führt die hohe Anzahl an Fahrzeugvarianten zu einer heterogenen Auftragszusammensetzung mit vielfältigen Anforderungen an das Handling, die Lagerung und die Distribution der Fahrzeuge. Die Dynamik ergibt sich durch angebundene externe Prozesse, interne Störungen (z. B. nicht anspringendes Fahrzeug) und durch den Faktor Mensch und erfordert, dass stets ein echtzeitgenaues Abbild des Terminals vorliegt, um die Auftragsvergabe in der Steuerung situationsgerecht zu gestalten (Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik et al. 2017). Die Planung und Steuerung auf den Automobilterminals werden durch IT-Systeme unterstützt, die im Rahmen von Digitalisierungsmaßnahmen stetig erweitert werden, um alle Prozesse durchgängig abzudecken. Für eine fehlerfreie und effiziente Auftragsabwicklung ist dabei auf Seiten der Planung in vielen Bereichen die Integration der IT-seitig nicht abgebildeten Fachkenntnisse und des Erfahrungswissens der Mitarbeiter*innen erforderlich. Auf Seiten der Steuerung ist ein stetiger Kontakt zwischen den auf dem Terminal arbeitenden Mitarbeiter*innen und dem Steuerungssystem die Grundlage, um ein echtzeitgetreues Abbild gewährleisten zu können. Insgesamt ist also sowohl für die Planung als auch für die Steuerung der logistischen Prozesse auf Automobilterminals eine enge Zusammenarbeit zwischen Mensch und Technik unabdingbar.

Der vorliegende Beitrag entwickelt in diesem Kontext ein Lösungskonzept für die Gestaltung von Mensch-Technik-Schnittstellen, das im Rahmen der fortschreitenden digitalen Transformation der logistischen Prozesse für wesentliche Bestandteile der Planungs- und Steuerungssysteme auf Automobilterminals Anwendung finden kann. Die entwickelte Lösung beinhaltet auf Seiten der Planung eine interaktive Planungsoberfläche, welche die anwendungsfreundliche Darstellung der Ist-Situation beinhaltet. Zudem besteht über die Kopplung der Planungsoberfläche an eine ereignisdiskrete Simulation die Möglichkeit, Zukunftsszenarios gemeinsam

zu erstellen, auszuwerten und zu diskutieren. Der vorgestellte Steuerungsalgorithmus basiert auf einer standortabhängigen Zuweisung der Fahraufträge zu den Mitarbeiter*innen, die über eine mobile Anwendung (App) in stetem Kontakt zu dem Steuerungssystem stehen. Die beschriebene Lösung wurde am Beispiel des Automobilterminal Bremerhaven entwickelt und evaluiert.

2. Anwendungsfall Automobilterminal Bremerhaven

Auf dem Automobilterminal Bremerhaven werden jährlich 2,3 Millionen Fahrzeuge umgeschlagen. Das Terminalgelände umfasst eine Fläche von 240 Hektar mit einer Stellflächenkapazität von 95.000 Fahrzeugen. Für die Verkehrsträgerabwicklung verfügt das Terminal über 18 Schiffsliegeplätze sowie 16 Gleisanschlüsse und Kopframpen für die Abfertigung von Bahnwaggons und LKWs. Darüber hinaus befinden sich auf dem Gelände 3 Technikzentren, in denen zusätzliche technische Dienstleistungen angeboten werden, bspw. der Einbau von Sonderausstattungen (BLG 2020). Die Planungs- und Steuerungsprozesse auf dem Terminal Bremerhaven beinhalten eine hohe Komplexität, die sich unter anderem aus der Größe des Terminals, den hohen Umschlagsmengen und der Berücksichtigung sowohl land- als auch wasserseitiger Verkehrsträger für den Fahrzeugumschlag ergibt (Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik et al. 2017). Das Automobilterminal deckt damit eine Vielzahl von Planungs- und Steuerungsproblemen ab, die in ähnlicher Form auch auf anderen Automobilterminals anzutreffen sind und stellt somit einen repräsentativen Anwendungsfall dar.

Die nachfolgend dargestellten Planungs- und Steuerungsprozesse wurden im Rahmen einer Prozessaufnahme auf dem Automobilterminal Bremerhaven aufgenommen.

2.1. Kurzfristige Planung

In dem zugrundeliegenden Anwendungsfall erfordert insbesondere die Ressourcenplanung im Zuge der kurzfristigen Planung eine intensive Interaktion zwischen den Planer*innen und den IT-Systemen. Aufgabe dieses Planungsschritts ist die Flächenbelegungsplanung, d. h. die Allokation der eingehenden Fahrzeuge zu den Lagerflächen auf dem Terminal. Zudem erfolgt basierend auf den avisierten Verkehrsträgern die Planung des Personalbedarfs für die Be- und Entladung der Verkehrsträger und das Verfahren der Fahrzeuge auf dem Terminal.

Die Flächenbelegungsplanung erfordert eine Übersicht der avisierten Verkehrsträger und der damit einhergehenden Fahrzeugein- und -ausgänge des Planungszeitraums sowie die Kenntnis der aktuellen Flächenauslastung und der für die Planung verfügbaren Flächen. Die Zuordnung berücksichtigt zudem neben der aktuellen Auslastungssituation verschiedene Auftragsmerkmale, bspw. das Fahrzeugmodell,

die Fahrzeugdestination und das Ausgangstransportmittel. Die erforderlichen Planungsinformationen werden durch die Planer*innen aus den IT-Systemen ausgelesen und müssen teils in zusätzlichen Arbeitsschritten aufbereitet und ausgewertet werden. Organisatorisch erfolgt die Planung heute teils manuell in Form von regelmäßigen Planungsrunden. Die Planung erfolgt parallel durch unterschiedlichen Planungsgewerke für die verschiedenen Terminalbereiche, aufgeteilt nach Wasserseite (Schiffsabwicklung) und Landseite (Zug- und LKW-Abwicklung). Um Planungsfehler, bspw. Doppelbelegungen von Flächen zu vermeiden, ist eine regelmäßige Abstimmung zwischen den einzelnen Planungsgewerken erforderlich.

Die Schwachstellen des beschriebenen Planungsablaufs liegen zum einen in dem teils hohen manuellen Aufwand für die Datenerhebung und -aufbereitung sowie in der Abstimmung zwischen den Planungsgewerken. Dieser Abstimmungsbedarf birgt das Risiko, dass die einzelnen Planungsgewerke mit unterschiedlichen Planungsgrundlagen, bspw. mit unterschiedlichen Daten oder Daten mit unterschiedlicher Aktualität arbeiten. Für eine Optimierung des beschriebenen Ablaufs im Rahmen der Gestaltung einer neuen Mensch-Technik-Schnittstelle müssen (i) alle erforderlichen Planungsinformationen aus den unterschiedlichen IT-Systemen in einer Planungsoberfläche zusammengeführt werden, (ii) umfangreiche Auswertungsmöglichkeiten bereitgestellt werden, die auch die Verknüpfung verschiedener Suchkriterien ermöglicht, bspw. kombinierte Suche nach Verkehrsträger und Fahrzeugmodell, (iii) die Möglichkeit bestehen, die Planungsoberfläche als gemeinsame Informationsbasis für die Diskussion innerhalb einer Planungsrunde und zwischen den Planungsgewerken zu nutzen und (iv) die Datenaktualität sichergestellt sein. Für die Umsetzung dieser Anforderungen bietet sich die Gestaltung der Mensch-Technik-Schnittstelle in Form eines Multitouch-Tisches an. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er interaktiv ist, die Interaktion mehrerer Personen gleichzeitig zulässt und Schnittstellen zu IT-Systemen ermöglicht.

2.2. Langfristige Planung

Für die kontinuierliche Sicherstellung ausreichender Ressourcen für die Auftragsabwicklung ist eine vorausschauende Bedarfsplanung über einen längerfristigen Zeitraum erforderlich. Diese langfristige Planung erfolgt basierend auf einem Forecast der zukünftig zu erwartenden Auftragsmengen. Dadurch können bspw. Phasen mit einem voraussichtlich erhöhten Auftragsvolumen identifiziert und entsprechende Maßnahmen zur Sicherstellung der Ressourcen eingeleitet werden. Dies beinhaltet bspw. das Anmieten zusätzlicher Flächen oder die Erhöhung des Personalbestands.

Die langfristige Planung steht vor der Herausforderung, dass der Auftragsforecast auf Vertriebsdaten basiert und demnach durch eine hohe Unsicherheit geprägt ist. Die Planungssicherheit kann durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Planungsszenarios gesteigert werden, bspw. Szenarios mit höheren oder niedrigeren Auftragsmengen als angenommen. Die Auswirkungen unterschiedlicher Auftragsvolumina auf den Ressourcenbedarf können jedoch nicht vollumfänglich ermittelt werden. So erfolgt bspw. die Ermittlung des Personalbedarfs in Abhängigkeit vom Auftragsvolumen; komplexere Zusammenhänge zwischen der aktuellen Planungssituation und dem Ressourcenbedarf werden nicht ausreichend berücksichtigt. So führt bspw. eine höhere Flächenauslastung zu längeren Fahrwegen für das Verfahren der Fahrzeuge auf dem Terminal, da vermehrt abgelegene Parkplätze genutzt werden müssen. Der Einsatz der ereignisdiskreten Simulation stellt in diesem Kontext einen vielversprechenden Ansatz dar, um die Verlässlichkeit der Ressourcenplanung unter Einbeziehung der aktuellen Terminalsituation zu verbessern (Görges/Freitag 2020).

Aktuell sind bereits umfangreiche Analysen mittels spezifischer Simulationstools möglich. Deren Bedienung ist jedoch zeitintensiv und erfordert ein hohes Expertenwissen im Bereich der Materialflusssimulation, sodass die Tools heute nicht übergreifend für die Ressourcenplanung eingesetzt werden. Der durchgängige Einsatz von Simulationstools erfordert die Gestaltung einer Mensch-Technik-Schnittstelle, die die Interaktion zwischen den Planer*innen und dem Simulationsmodell ohne Vorkenntnisse im Bereich der Materialflusssimulation ermöglicht. Die zu gestaltende Benutzeroberfläche muss die Möglichkeit bieten, (i) Einstellung verschiedener Planungsszenarios vorzunehmen, (ii) das Simulationsmodells zu starten und (iii) die Simulationsergebnisse zu visualisieren. An die Benutzeroberfläche für die Simulation werden hinsichtlich der Bedienbarkeit und Interaktionsfähigkeit ähnliche Anforderungen gestellt wie an die Planungsoberfläche. Daher soll die Benutzeroberfläche für die langfristige Planung in die Planungsoberfläche für die kurzfristige Planung eingebunden und ebenfalls über den Multitouch-Tisch realisiert werden.

2.3. Steuerung

Aufgabe der Steuerung ist die Umsetzung der Umfuhrprozesse auf dem Terminal. Hierzu zählen die Be- und Entladung externer Verkehrsträger (Schiffe, Züge, LKW) sowie Umfuhren innerhalb des Terminals, z. B. zwischen Stellplätzen und Technikcentern. Um die Umfuhren zu bearbeiten, ist das Fahrpersonal in feste Teams eingeteilt, die über die Schicht hinweg von einem fest zugeordneten Shuttle begleitet werden, der sie zu ihren Aufträgen transportiert. Die Auftragsabarbeitung erfolgt durch Pendeltouren, d.h. dass die Shuttlebusse die Fahrer*innen stets zu einem festen Auftragspool zurückbringen, bis dieser abgearbeitet ist und ein neuer

begonnen wird. Die Auftragsvergabe erfolgt vorwiegend über papierbasierte Auftragslisten, die den Shuttlefahrer*innen zu Schichtbeginn ausgeteilt werden. Sie kommunizieren die Aufträge während der Schicht an die Fahrer*innen. Nach der Umfuhr erfolgt die Buchung der Fahrzeuge auf die neuen Stellplätze in einem zeitlich entkoppelten Prozess, sodass der Abarbeitungsstand auf dem Terminal zeitlich verzögert an die IT-Systeme zurückfließt. Durch die aktuelle Gestaltung der Prozesse ist es nur schwer möglich, die Umfuhrprozesse über die Schicht hinweg an die aktuellen Gegebenheiten anzupassen, wenn die auf dem Terminal vorherrschende Dynamik dies erfordert. Hieraus ergibt sich der Bedarf, die Auftragsvergabe zu digitalisieren und die Buchung fertiggestellter Aufträge direkt in den Umfuhrprozess zu integrieren. Im Rahmen von Digitalisierungsmaßnahmen ist es gängig zu überprüfen, ob für die zugrundeliegenden Prozesse durch die Digitalisierung ggf. auch neue Möglichkeiten zur Prozessgestaltung geschaffen werden können. Hierbei wurde bezüglich der Auftragsabarbeitung in Form von Pendeltouren Optimierungspotential identifiziert. Es besteht darin, bei der Auftragsfertigstellung zu überprüfen, ob weitere Aufträge fußläufig zu erreichen sind, sodass Shuttlefahrten eingespart und die Produktivität des Terminals, d.h. die Anzahl der pro Stunde bearbeiteten Aufträge, erhöht werden können.

Diese Überlegung soll im Rahmen der Digitalisierung der Steuerungsprozesse mitbetrachtet werden. Daraus ergibt sich das folgende neue Konzept für die Steuerung der Umfuhrprozesse: Die Auftragsvergabe erfolgt durch einen Steuerungsalgorithmus, dem die aktuellen Standorte aller Shuttles und Fahrer*innen vorliegen. Nach Auftragsfertigstellung wird einer/einem Fahrer*in basierend auf ihrem/seinen aktuellen Standort ein neuer Auftrag zugewiesen. Dieser ist nach zeitminimalem Kriterium entweder zu Fuß oder per Shuttle zu erreichen. Das Fahrpersonal wird demzufolge individuell über das Terminal geroutet, sodass (i) ein individueller Kommunikationsweg zwischen Steuerungsalgorithmus und Fahrer*in nötig ist, der die bisher oft papierbasierte und über die/den Shuttlefahrer*in kommunizierte Art der Auftragsvergabe ersetzt. Des Weiteren bedarf es (ii) eines Kommunikationswegs zwischen dem Steuerungsalgorithmus und den Shuttlefahrer*innen, über den die ad-hoc entstehenden Transportaufträge für die Shuttles in Echtzeit an die Shuttlefahrer*innen kommuniziert werden. Eine weitere nötige Umgestaltung des ursprünglichen Prozesses ist, dass (iii) die Buchung der verfahrenen Fahrzeuge direkt in den Umfuhrprozess integriert wird und somit in Echtzeit erfolgt. Außerdem muss der Steuerungsalgorithmus nicht nur die Effizienz der Terminalprozesse gewährleisten, sondern als im Hintergrund stehende Mensch-Technik-Schnittstelle auch (iv) die Bedarfe der auf dem Terminal arbeitenden Personen abbilden und auf die Integration von Störungen, Verzögerungen und Planabweichungen ausgelegt sein.

Für die Umsetzung des neuen Umfuhrprozesses bietet sich an, den Steuerungsalgorithmus über eine modellprädiktive Regelung umzusetzen, sodass spontane Änderungen des Terminalgeschehens in Echtzeit integriert werden können. Die individuellen Kommunikationswege zwischen Fahrer*innen und Steuerungsalgorithmus sowie zwischen Shuttlefahrer*innen und Steuerungsalgorithmus können über Apps und Smartphones bzw. Tablets abgebildet werden. Auf diese Weise wird es möglich, die Auftragsvergabe echtzeitfähig und digitalisiert zu gestalten. Des Weiteren können Informationen zu Planabweichungen von dem Terminalpersonal an den Steuerungsalgorithmus übermittelt werden.

3. Vorgehensweise zur Gestaltung der Mensch-Technik-Schnittstellen

Um die Mensch-Technik-Schnittstellen zu gestalten, wurden zum einen anwendungsfallspezifische Anforderungen aufgenommen und umgesetzt und zum anderen nach generellen Gestaltungsleitlinien vorgegangen.

3.1. Aufnahme und Umsetzung von anwendungsfallspezifischen Anforderungen

Um die anwendungsfallspezifischen Anforderungen gezielt und strukturiert aufnehmen und später umsetzen zu können, wurde nach DIN 9241-210 vorgegangen. Die Entwickler*innen haben den aktuellen Vorgehensweisen und Prozessabläufen in der kurz- und langfristigen Planung sowie in der Steuerung zunächst als „stille Beobachter*innen“ beigewohnt, um auf diese Weise erste Einblicke zu erhalten. Darauf aufbauend wurden wiederkehrende Workshops mit verschiedenen Gruppen von Mitarbeiter*innen des Automobilterminals durchgeführt, in denen unterschiedliche Methoden wie z. B. Brainstorming, Einzel- und Gruppenbefragungen und World-Cafés zur Informationsbeschaffung Anwendung fanden. Hierbei wurden Vertreter*innen aller auf dem Terminal arbeitenden Personengruppen, die mit den zu gestaltenden Mensch-Technik-Schnittstellen arbeiten werden oder diesen vorgesetzt sind, eingebunden.

Für die Mensch-Technik-Schnittstelle der kurzfristigen Planung haben die Entwickler*innen in der Konzeptionsphase ein Visualisierungs- und Bedienkonzept erstellt, das sie in wiederkehrenden Feedback-Runden mit den zuständigen Terminalmitarbeiter*innen, insbesondere den Planer*innen erarbeitet haben und welches im Anschluss als verbindliche Grundlage für die Implementierungsphase diente. Das Bedienkonzept gibt zunächst eine Übersicht über den Aufbau und die einzelnen Elemente der Darstellung. Außerdem erläutert es die Interaktion und Navigation innerhalb der Anwendung und hält den Detailgrad der in den verschiedenen Ansichten darzustellenden Informationen fest. Das Visualisierungskonzept

beschreibt das Farbschema, die Typographie sowie die verschiedenen Bedienelemente. Es wird ebenso für die Mensch-Technik-Schnittstelle der langfristigen Planung eingesetzt, da diese ebenfalls auf dem Multitouch-Tisch umgesetzt wird.

In der Implementierungsphase haben die Entwickler*innen den Anwender*innen in relativ kurzen Zeitabständen Zwischenstände zur Verfügung gestellt, anhand derer zeitnahes Feedback eingeholt und die Umsetzung gemeinsam geprüft und evaluiert wurde. Hierdurch konnten bei Bedarf Korrekturen durchgeführt sowie bisher nicht beachtete Aspekte in den weiteren Verlauf der Implementierung einbezogen werden.

3.2. Vorgehen nach generellen Gestaltungsleitlinien

Sowohl für die Gestaltung des Multitouch-Tisches als auch für die Gestaltung der Apps für die Smartphones und Tablets wurden zudem generelle Gestaltungsrichtlinien zur Software-Ergonomie befolgt. So sollen dargestellte Informationen nach DIN 9241-12 zunächst einmal klar, unterscheidbar, kompakt, konsistent, erkennbar, lesbar und verständlich dargestellt werden. Die Befolgung dieser Vorgaben unterstützt wiederum die Grundsätze der Dialoggestaltung (DIN 9241-110), die bei den zu entwickelnden interaktiven Mensch-Technik-Schnittstellen eine wichtige Rolle einnehmen. So sollen Dialoge z. B. angemessen, selbsterklärend, kontrollierbar, erwartungskonform und fehlertolerant sein. Hierunter fällt z. B. die Beschränkung auf sinnvolle Auswahlmöglichkeiten (angemessen), intuitives Design (selbsterklärend), die Möglichkeit z. B. über eine Korrekturfunktion in Prozesse einzugreifen (kontrollierbar), die Abstimmung auf den Qualifikationshintergrund der Nutzer*innen (erwartungskonform) sowie Plausibilitätsprüfungen bzgl. der Nutzer*inneneingaben (fehlertolerant).

Nach Butz/Krüger (2017) können diese Gestaltungsrichtlinien von Benutzeroberflächen um weitere Punkte bzgl. einer intuitiven Bedienung ergänzt werden. Hierunter fallen Affordance, d.h. dass ein Objekt eine bestimmte Handlung ermöglicht und zu dieser einlädt, Mappings, d.h. dass äußere Gegebenheiten sinnvoll auf das Design übertragen werden, Feedback, d.h. dass die Nutzer*innen über ihren derzeitigen Status informiert sind, sowie Physikanalogien, was bedeutet, dass alltägliche physikalische Prinzipien wie das Drücken von Knöpfen oder das Bewegen von Elementen durch Handbewegungen auf der Benutzeroberfläche nachempfunden werden.

4. Anforderungen an die Gestaltung der Mensch-Technik-Schnittstellen

4.1. Kurzfristige Planung

An die Umsetzung der Planungsoberfläche wurden die folgenden Anforderungen gestellt: Die Flächenbelegungsplanung benötigt Informationen zur Einschätzung der aktuellen Terminalsituation sowie die Kenntnis über die avisierten ein- und ausgehenden Verkehrsträger. Die Beschreibung der Terminalsituation erfordert eine Übersicht über die Parkflächen und Parkhäuser des Terminals, deren Stellflächenkapazität und den aktuellen Belegungsgrad. Für die Allokation der eingehenden Fahrzeuge zu den Parkflächen muss zudem die Möglichkeit vorhanden sein, die avisierten Verkehrsträger und Liegeplätze sowie die damit einhergehenden Fahrzeugeingänge anzuzeigen. Darüber hinaus müssen analog die ausgehenden Verkehrsträger und Fahrzeugströme ausgewertet werden können, um z. B. freiwerdende Flächen zu erkennen und für erwartete Fahrzeugeingänge zu berücksichtigen. Für die Personalplanung ist neben den Liegeplätzen der Verkehrsträger insbesondere die Kenntnis der aktuellen Fahrzeugstandorte auf dem Terminal von entscheidender Bedeutung. Auf dieser Basis können die mit der Be- und Entladung der Verkehrsträger verbundenen Verfahrwege und -zeiten und der damit verbundene Personalbedarf abgeschätzt werden.

Die dargestellten Informationen sollen in einer Planungsoberfläche zusammengeführt werden, sodass die Planer*innen mit nur einem Tool arbeiten und der manuelle Aufwand für das Zusammenführen von Informationen aus unterschiedlichen IT-Systemen entfällt. Für die Informationsdarstellung und die Datenanalyse müssen entsprechende Darstellungs- und Auswertungsmöglichkeiten bereitgestellt werden. Dies beinhaltet zum einen die einfache Anzeige von Informationen nach Bedarf, bspw. eine Auflistung aller avisierten Verkehrsträger. Zum anderen müssen komplexere Analysen unterstützt werden, die die Kombinationen verschiedener Suchkriterien erfordern, bspw. die Anzeige aller Fahrzeuge und jeweiligen Standorte eines Herstellers für einen avisierten Verkehrsträger.

Eine weitere Anforderung besteht in einer hohen Übersichtlichkeit der Darstellung. Dies ist insbesondere aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Informationen und der großen Datenmengen von hoher Bedeutung. Die Planer*innen müssen die Möglichkeit haben, Informationen ein- und auszublenden, um jeweils nur die aktuell relevanten Informationen anzuzeigen. Zudem sollen die Informationen nicht ausschließlich textbasiert dargestellt werden, sondern auf intuitiv verständliche Weise visualisiert werden. Dies beinhaltet bspw. die Visualisierung des Flächenbelegungsgrads oder die Anzeige der Fahrzeugstandorte auf dem Terminalgelände.

Weitere, wesentliche Anforderungen bestehen darin, dass mehrere Personen gleichzeitig und gemeinsam mit der Planungsoberfläche interagieren können müssen und dass die angezeigten Daten jederzeit auf dem aktuellen Stand sein müssen. Dies stellt insbesondere aufgrund der hohen Datenmengen eine Herausforderung dar, ist aber für die Sicherstellung der Planungsqualität und die Akzeptanz der Anwendung durch die Nutzer*innen von hoher Bedeutung.

4.2. Langfristige Planung

Für die Gestaltung der Benutzeroberfläche für die Interaktion zwischen den Planer*innen und dem Simulationsmodell wurden die folgenden Anforderungen identifiziert: Grundsätzlich muss die Benutzeroberfläche eine Bedienung der Simulation ohne die direkte Arbeit mit dem Simulationstool ermöglichen, damit auch Anwender*innen ohne Fachkenntnisse im Bereich der Materialflusssimulation das Tool nutzen können. Die Anwender*innen müssen zunächst die Möglichkeit haben, über die Benutzeroberfläche verschiedene Planungsszenarios zu definieren. Dabei muss neben der Einstellung des Planungszeitraums vor allem die Möglichkeit bestehen, die Auftragsmengen des Forecasts zu variieren, bspw. über eine Erhöhung oder Reduzierung des Auftragsvolumens. Darüber hinaus wurden weitere Parameter identifiziert, für die über die Planungsoberfläche Einstellmöglichkeiten bereitgestellt werden müssen. Dies beinhaltet bspw. die Anpassung der Schichtzeiten der Mitarbeiter*innen oder die Möglichkeit, einzelne Flächen auf dem Terminal für bestimmte Zeiträume zu sperren, falls diese temporär nicht genutzt werden können.

Die Simulationsergebnisse müssen automatisiert aus dem Simulationstool ausgelesen und den Planer*innen bereitgestellt werden können. An die Darstellung der ausgewerteten Informationen (bspw. Flächenauslastung oder Personalbedarf) werden ähnliche Anforderungen gestellt wie bereits an die Informationsdarstellung der kurzfristigen Planung (vgl. Kap. 4.1). Die Informationen müssen übersichtlich und für die Planer*innen verständlich aufbereitet sein. Zudem soll die Darstellung nicht ausschließlich in Form von Tabellen erfolgen, sondern auch hier auf intuitiv verständliche Weise visualisiert werden.

4.3. Steuerung

Auf Seiten der Steuerung wurden für den Steuerungsalgorithmus und die Apps Anforderungen identifiziert. Für den Steuerungsalgorithmus gibt es drei Anforderungen, die die grundlegende Funktionsweise sicherstellen: (i) die Zuweisung von Aufträge an das Fahrpersonal, (ii) die bedarfsgesteuerte Generierung von Shuttleaufträgen und (iii) die Zuweisung dieser an die Shuttles. Um den angestrebten Effizienzsteigerungen, die durch die Umgestaltung des Steuerungsprozesses er-

reicht werden sollen, zu entsprechen, besteht die Anforderung, dass der Steuerungsalgorithmus die Aufträge nach zeitoptimalen Kriterien zuweist. Auf technischer Seite besteht zudem die Anforderung, dass die Zuweisung der Shuttleaufträge die maximalen Kapazitäten der Shuttlebusse berücksichtigt. Auf Seiten des Arbeitsrechts besteht die Anforderung, dass Schicht- und Pausenzeiten eingehalten werden, zu denen das Terminalpersonal zu den Sozialräumen zurückgebracht werden muss. Neben diesen planbaren Ereignissen gibt es weitere, nicht planbare Ereignisse, die über den Steuerungsalgorithmus abgebildet werden müssen. Hierzu zählt die Einforderung von individuellen Pausen durch die Fahrer*innen und Shuttlefahrer*innen. Dies kann z. B. nötig sein, wenn Personen die Toilette aufsuchen möchten oder spontane Termine, z. B. mit ihren Vorgesetzten, angesetzt werden. Ein weiterer Grund für eine nicht-planbare Arbeitsunterbrechung kann gegeben sein, wenn die Witterung das Abholen und Anlegen von Regenkleidung erfordert. Neben Arbeitsunterbrechungen muss der Steuerungsalgorithmus Störungen abfangen können, wenn z. B. ein Fahrzeug wegen einer leeren Batterie oder eines leeren Tanks nicht verfahren werden kann oder der vorgegebene Zielstellplatz nicht frei ist. Eine weitere Anforderung ist der Umgang mit Verzögerungen, die durch das auf dem Terminal vorherrschende Verkehrsgeschehen und den Faktor Mensch regelmäßig auftreten.

Für die Interaktion zwischen Fahrer*innen und Steuerungsalgorithmus sowie zwischen Shuttlefahrer*innen und Steuerungsalgorithmus wird je eine App entwickelt. Hierbei bestehen sowohl Anforderungen bezüglich der Funktionalität als auch bezüglich der Gestaltung der Benutzeroberfläche. Die Funktionalität der Fahrer*innen-App muss das Anzeigen von Fahraufträgen beinhalten. Hierbei wurden als Datenbedarfe die Anzeige des Modells, der Fahrgestellnummer (VIN), der Farbe und des Stellplatzes identifiziert. Eine weitere wesentliche Anforderung ist die Möglichkeit von Rückmeldungen an das Steuerungssystem durch die App bzw. die Fahrer*innen. Hierzu zählen der Auftragsstart und die Auftragsfertigstellung sowie Störungen und Planabweichungen sowie die Einforderung individueller Pausen. Des Weiteren soll die App zu Auftragsstart und bei Auftragsfertigstellung überprüfen, ob es sich zum einen um das richtige Fahrzeug handelt, das das Fahrpersonal bewegt und zum anderen, ob der angesteuerte Abstellort dem vorgegebenen entspricht. Für die Shuttle-App gilt bzgl. der Funktionalität ebenso, dass die Aufträge angezeigt werden müssen. Hierbei sind die Datenbedarfe der anzusteuernde Haltepunkt und die dort einzusammelnden oder abzusetzenden Fahrer*innen. Außerdem muss auch für die Shuttlefahrer*innen die Möglichkeit gegeben sein, über die App individuelle Pausen einzufordern.

Für die Gestaltung der Benutzeroberfläche gilt in beiden Fällen, dass die unter 3.2. aufgeführten generellen Richtlinien umgesetzt werden sollen. Insbesondere ist für die Apps eine intuitive und einfache Bedienung wichtig, sodass die Bedienung für

alle auf dem Terminal arbeitenden Personen auch ohne Vorkenntnisse zum Smartphone- und App-Gebrauch problemlos möglich ist.

5. Lösungskonzept zur Gestaltung der Mensch-Technik-Schnittstellen

5.1. Kurzfristige Planung

Die nachfolgend vorgestellte Planungsoberfläche verfolgt die Zielsetzung, den Planer*innen unterschiedlicher Planungsgewerke eine übersichtliche und einheitliche Informationsbasis für die Ressourcenplanung zur Verfügung zu stellen. Bei der Entwicklung wurden die in Kap. 4.1 dargestellten Anforderungen sowie die in Kap. 3.2 erläuterten generellen Gestaltungsrichtlinien berücksichtigt.

Die Planungsoberfläche basiert auf einer Visualisierung des Terminalgeländes über einen Multitouch-Tisch, an dem mehrere Benutzer*innen innerhalb der Planungsrunde oder Planer*innen unterschiedlicher Planungsgewerke parallel arbeiten können (Abb. 1).

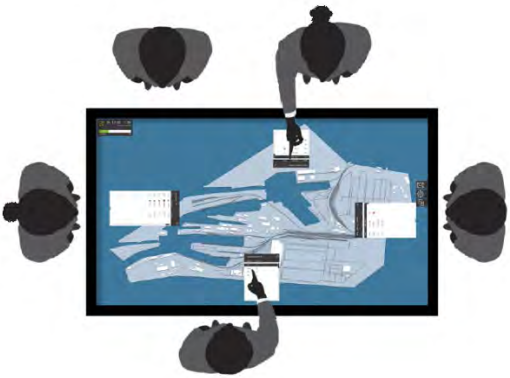


Abbildung 1: Mehrbenutzer*innen-Bedienung des Multitouch-Tisches.

Für die Visualisierung wurde das gesamte Terminalgelände innerhalb einer virtuellen 3D-Umgebung modelliert. Die Visualisierung beinhaltet die Parkflächen einschließlich der Parkregale, die Verkehrswege auf dem Terminal, die Liegeplätze für die Verkehrsträger sowie die prägnantesten Gebäude auf dem Terminalgelände (Abb. 2a). Die Abbildung erfolgt in einem simplifizierten, schematischen Stil. Dieser ermöglicht im Gegensatz zu einer komplexen und fotorealistischen Darstellung eine wesentlich übersichtlichere Abbildung, was eine wesentliche Forderung der Anwender*innen darstellt. Die Steuerung der Terminalansicht erfolgt durch eine Touch-Steuerung, bei der die bereits durch Smartphones und Tablets bekannten Mechanismen zur Anwendung kommen. Die Ansicht kann durch die Touch-Steuerung gedreht werden, damit die Anwender*innen die Ansicht von allen Seiten des

Tisches nutzen können. Durch Zoomen kann zwischen zwei Detailebenen gewechselt werden. Die unterschiedlichen Ebenen dienen zum einen dazu, die umfangreichen Informationen für die Benutzer*innen auf unterschiedlichen Detailebenen übersichtlich darzustellen. Zum anderen werden dadurch technischen Limitierungen der eingesetzten 3D-Engine abgefangen, da die dauerhafte Anzeige aller verfügbaren Informationen auch auf aktuellen Hardware-Plattformen Performance-Probleme verursacht, welche einer flüssigen Bedienung durch die Benutzer*innen entgegenstehen. Der Wechsel zwischen den beiden Detailebenen geschieht nahtlos. Ab einen festgelegten Zoomfaktor werden neue Details eingeblendet, die die angezeigten Informationen aus der vorherigen Ebene ergänzen. In der oberen Ebene werden die Parkflächen, die bis zu 1000 Fahrzeuge umfassen können, als einzelne Lagerflächen dargestellt. Die aktuelle Belegung der Flächen wird über ein Farbschema visualisiert, welches sich zwischen den Farben Grün und Rot bewegt. Grüne Flächen stellen aktuell unbelegte Flächen dar, während voll belegte Flächen in Rot dargestellt werden. Je nach aktuellen Belegungsgrad wird ein entsprechender Farbverlauf zwischen den Farben generiert und zur Anzeige gebracht. In der unteren Ebene werden die einzelnen Reihen innerhalb der Parkflächen eingeblendet (Abb. 2b). Der Farbverlauf wird nun nicht mehr für die gesamte Fläche, sondern für die einzelnen Reihen innerhalb der Fläche angewendet. Bei der Darstellung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit bewusst auf die automatische Anzeige konkreter Kennzahlen zur Flächenbelegung verzichtet. Diese Kennzahlen (bspw. Informationen zu den, in den Flächen bzw. Reihen geparkten Fahrzeugen) können bei Bedarf durch Anklicken der Bereiche aufgerufen werden. Das mehrstufige Visualisierungskonzept hat den Vorteil, dass die Benutzer*innen wie gefordert jeweils nur die für die jeweilige Planungsaufgabe relevanten Informationen angezeigt bekommt. Durch die Aufteilung wird es den Benutzer*innen ermöglicht, sich in der höchsten Ebene zunächst einen Überblick zu verschaffen, in welcher sie sich dann für die detaillierte Betrachtung eines bestimmten Abschnittes entscheiden können.

Abbildung 2: a) Benutzeroberfläche des Planungstisches mit der Darstellung der 3D-Visualisierung des Automobilterminals Bremerhaven auf der oberen Detailebene und mit eingeblendeten Informationsboxen zur Schnellansicht. b) Darstellung von Parkreihen auf der unteren Detailebene. c) Darstellung der Filtermöglichkeiten für die erweiterte Suche und Markierung der Filterergebnisse durch Pins.

Die neben der Flächenbelegung erforderlichen Planungsinformationen werden in sogenannten Schnellansichten in Form einzelner Fenster dargestellt (Abb. 2a). Die Schnellansichten sind dabei hierarchisch von links nach rechts angeordnet, d. h. die Auswahl eines Eintrages (z. B. ein bestimmter Auftrag) öffnet eine weitere Schnellansicht mit den entsprechenden zugehörigen Einträgen. Diese Detail-Hierarchie umfasst maximal vier Ebenen. Damit wird ebenfalls die Übersichtlichkeit der Darstellung unterstützt, da die Planer*innen in Abhängigkeit ihres Informationsbedarfes die Anzahl der angezeigten Ebenen selbst bestimmen können.

Für komplexere Datenabfragen wurde die Funktion der „erweiterten Suche“ zur Verfügung gestellt. Diese Funktion erlaubt die Abfrage von Daten anhand komplexer Filterkriterien, welche durch den Nutzer zusammengestellt werden können (Abb. 2c). Die Ergebnisse werden in Form einer Liste, bspw. von Fahrzeugen dargestellt, wobei der jeweilige Standort jedes Fahrzeugs auf der Karte des Terminals angezeigt werden kann. Für die Markierung auf der Karte kommen „Pins“ zur Anwendung, welche auch in anderen populären Kartendiensten wie beispielsweise Google Maps zur Anwendung kommen. Diese Pins können auch bei der Schnellansicht aktiviert werden. Analog zur Steuerung der Terminalansicht sind auch die Schnellansichten frei positionierbar und drehbar, sodass sie sich bei Bedarf von den Planer*innen heranziehen lassen können und von allen vier Seiten des Tisches bedienbar sind.

Die angezeigten Planungsinformationen werden über Schnittstellen zwischen der Planungsoberfläche und den IT-Systemen bereitgestellt. Um die Anforderungen hinsichtlich der Datenaktualität zu erfüllen, werden die Daten in fest einstellbaren Zeitabständen aktualisiert. Darüber hinaus haben die Planer*innen die Möglichkeit, die Datenaktualisierung bei Bedarf auch manuell anzustoßen.

5.2. Langfristige Planung

Die Umsetzung der Benutzeroberfläche für die Bedienung der Simulation erfolgt aufbauend auf der beschriebenen Planungsoberfläche für die kurzfristige Planung. Die Anwender*innen erhalten über Eingabefenster die Möglichkeit, verschiedene Planungsszenarios zu definieren und die Simulation zu starten. Dabei werden Ausgangswerte hinterlegt, die den Anwender*innen angezeigt und bei Bedarf angepasst werden können. Dies beinhaltet die Anpassung des Auftragsvolumens durch eine prozentuale Steigerung oder Senkung der Auftragsmengen sowie die Anpassung der hinterlegten Schichtzeiten der Mitarbeiter*innen. Über einen weiteren Dialog können bei Bedarf Flächensperrungen für definierte Zeiträume hinterlegt werden. Die Eingabefenster sind analog zu den Schnellansichten der kurzfristigen Planung konzipiert und sind u.a. frei auf dem Tisch bewegbar und drehbar.

Die Simulationsergebnisse werden grafisch aufbereitet und in Form von Zeitreihen bereitgestellt. Die Ergebnisdarstellung erfolgt ebenfalls über die Planungsoberfläche. Die Visualisierung der ermittelten Flächenauslastung erfolgt analog zur Darstellung der Flächenbelegung der kurzfristigen Planung (4.1). Über eine Schieberegler kann zudem der Auswertungszeitpunk variiert werden, um die Auslastungssituation zu verschiedenen Zeitpunkten des Simulationslaufs anzuzeigen. Darüber hinaus können weitere relevante Kennzahlen (bspw. Personalbedarf) über eine grafische Darstellung visualisiert werden.

5.3. Steuerung

Steuerungsalgorithmus

Um die grundlegende Funktionalität der Auftragszuweisung und der Shuttletransporte zu erfüllen, wird ein kombiniertes Optimalsteuerungsproblem formuliert, das zum einen eine Zuweisung von Aufträgen an Fahrer*innen und zum anderen eine Zuweisung von Transportaufträgen an Shuttles vornimmt. Im Anschluss daran erfolgt eine Optimierung der Auftragsreihenfolge für die Shuttles. Die Zielfunktion der Optimierung ist eine möglichst kurze Gesamtausführungszeit für alle Aufträge. Das Optimalsteuerungsproblem wird durch einen Optimierer für gemischt-ganzzahlige Probleme (MIPCL, Pisaruk 2018) in festen Zeitschritten gelöst. Die dafür nötige Routenberechnung erfolgt auf Grundlage einer selbst erstellten OpenStreetMap-Karte des Terminals (OpenStreetMap Contributors 2017) mit Hilfe einer frei verfügbaren Routingbibliothek (OSRM-Router, Luxen/Vetter 2011). Auch die Längen bzw. der damit einhergehende Zeitbedarf für Laufwege wird auf Basis der OpenStreetMap-Karte des Terminals berechnet.

Feste Restriktionen und planbare Ereignisse werden über Rand- und Nebenbedingungen in das Optimalsteuerungsproblem eingebracht. Hierzu gehören die Beachtung der Kapazitätsgrenze der Shuttles sowie die Rückführung der Fahrer*innen zu den Sozialräumen zu Pausenzeiten und Schichtende. Um nichtplanbare Ereignisse und generelle Planabweichungen abbilden zu können, wird die Steuerung als modellprädiktive Regelung realisiert. Hierzu erfolgt die Optimierung wiederkehrend in festen Zeitschritten, wobei zu jedem Zeitschritt ein Abgleich zwischen Soll- und Ist-Zustand erfolgt und die darauffolgende Optimierung auf Basis des aktuellen Ist-Zustand durchgeführt wird. So ist es möglich, dass der Steuerungsalgorithmus flexibel auf Änderungen bzw. Abweichungen vom berechneten Systemverhalten reagieren kann. Auf diese Weise können individuelle Pausen und Planänderungen, die sich auf Grund von technischen Defekten oder Störungen im Prozessablauf ergeben, ad-hoc in die geplanten Abläufe eingebracht werden. Während diese Ereignisse dem Steuerungsalgorithmus über die unten beschriebenen Apps explizit zurückgemeldet werden, gibt es weitere Änderungen vom Planablauf, die nicht explizit zurückgemeldet werden. Hierzu zählen Abweichungen von geplanten Lauf- oder Fahrzeiten. Diese werden dem Steuerungsalgorithmus implizit durch die in jedem Zeitschritt durchgeführte Abfrage des Standorts aller Fahrer*innen und Shuttles zurückgemeldet und erhalten so ebenfalls Eingang in die fortlaufenden Optimierungszyklen.

Fahrer*innen- und Shuttle-App

Die grafische Oberfläche beider Apps wurde in ihrer Gestaltung nach dem Material Design erstellt, das sich durch Minimalismus und eine Gestaltungsweise auszeichnet, die physikalische Effekte von Materialien wie z. B. Tiefeneffekte darstellt und interaktive Elemente als solche hervorhebt (Google 2020). In Abb. 3a ist die grafische Oberfläche der Fahrer*innen-App gezeigt, auf der dem Fahrpersonal ein Auftrag zugewiesen wird. Hierbei sind die Informationen zu Modell, VIN, Farbe und Stellplatz hierarchisch und übersichtlich dargestellt. Zudem wird dem Fahrpersonal zur besseren Orientierung ein Kartenausschnitt angezeigt, auf dem über Pins der aktuelle Standort der Person sowie des zu erreichenden Fahrzeugs markiert sind. Über eine Umrandung hervorgehoben ist die Information, wie der Auftrag erreicht werden soll. Sobald sich die Fahrer*innen in einer bestimmten Nähe zum Fahrzeug befinden, ändert sich der Bildschirm automatisch und es wird möglich, einen sich am Fahrzeug befindlichen Barcode über die Kamerafunktion des Smartphones einzuscannen. Es erfolgt eine Überprüfung, ob es sich um das richtige Fahrzeug handelt und nach erfolgreicher Prüfung die Verbuchung auf Seiten des Steuerungsalgorithmus, dass der Auftrag begonnen wurde. Im Anschluss wird dem Fahrpersonal das Auftragsziel auf der Karte angezeigt. Während der Fahrt zeigt die App einen schwarzen Bildschirm, um die Fahrer*innen nicht abzulenken. Wenn das Fahrzeug sich in einem bestimmten Fangkreis um den Zielort herum befindet, wird es möglich, das Fahrzeug auf dem Abstellplatz erneut zu scannen. Darüber erfolgt die Buchung des Fahrzeugs auf den Zielstellplatz und die Übermittlung der aktuellen Geoposition an den Steuerungsalgorithmus, sodass auf dieser Grundlage ein neuer Auftrag übermittelt werden kann.

Im Fall von Störungen können die Fahrer*innen den Auftrag abbrechen und über die App aus einer Liste möglicher Gründe einen auswählen, der dem Steuerungsalgorithmus zurückgemeldet wird. Des Weiteren ist es möglich, das Fahrzeug in Sonderfällen an einem anderen Stellplatz als von der App vorgegeben abzustellen. In diesem Fall können die Fahrer*innen den selbst gewählten Stellplatz über die App eingeben.

Über das Hauptmenü können die Fahrer*innen per Knopfdruck individuelle Pausen einfordern. Diese werden vom Steuerungsalgorithmus mit höchster Priorität in die Abläufe integriert. Die Fahrer*innen müssen ihren bestehenden Auftrag in diesem Fall zu Ende ausführen und werden im Anschluss zu ihrem individuellen Pausenort geroutet. Während einer individuellen Pause sind die Fahrer*innen aus dem System abgemeldet. Eine Rückmeldung erfolgt, sobald sich die Fahrer*innen über die App wieder im System anmelden.

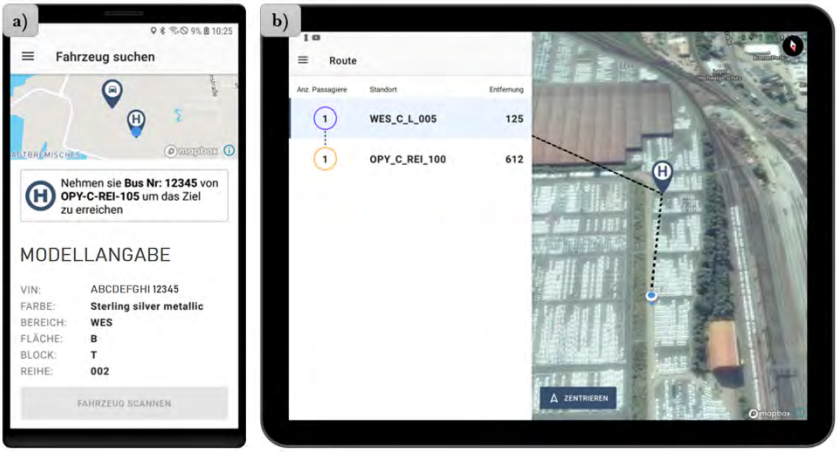


Abbildung 3: Benutzer*innenoberflächen der (a) Fahrer*innen-App und (b) Shuttle-App.

In der Shuttle-App werden dem Shuttlepersonal die aktuellen Aufträge angezeigt (Abb. 3b). Hierzu ist der Bildschirm des Tablets in zwei Bereiche aufgeteilt. Auf der linken Seite sind die Aufträge in ihrer Bearbeitungsreihenfolge aufgeführt. Es werden die Anzahl an einzusammelnden oder abzusetzenden Fahrer*innen angezeigt sowie der zugehörige Haltepunkt und die Entfernung. Auf der rechten Seite ist der Weg zum Haltepunkt auf einer Karte abgebildet, sodass die Navigation erleichtert wird. Die Karte ist dabei automatisch im Navigationsmodus, analog zu der üblichen Darstellung bekannter Navigationsgeräte und unterstützt gängige Bedienfunktionen wie z. B. freie Bewegung der Karte sowie das Hinein- und Heraus-Zoomen. Sobald sich der Shuttle in der Nähe des nächsten Haltepunktes befindet, wird automatisch ein gesonderter Bildschirm zum Aus- bzw. Einchecken der Fahrer*innen eingeblendet. Analog zu der Fahrer*innen-App kann das Shuttlepersonal über ein Hauptmenü individuelle Pausen einfordern.

6. Diskussion und Ausblick

Über die stetigen Feedback-Runden mit den Terminalmitarbeiter*innen hat sich insbesondere bzgl. der Umsetzung der Mensch-Technik-Schnittstelle der kurzfristigen Planung gezeigt, dass das Ergebnis den Erwartungen an den Funktionsumfang der Anwendung entspricht und die täglichen Arbeitsabläufe erleichtert. Durch den hohen Grad der Einbindung der Benutzer*innen konnte zudem eine hohe Akzeptanz der entwickelten Lösung erreicht werden. Für die Umsetzung der Mensch-Technik-Schnittstellen der langfristigen Planung und des Steuerungsalgorithmus liegen die vorgestellten Lösungskonzepte vor und werden aktuell implementiert. Ausgehend von Basisversionen beider Schnittstellen wurden im Rahmen

von iterativen Entwicklungszyklen bereits aufeinander aufbauende Funktionstests unter Einbindung kleiner Gruppen von Terminalmitarbeiter*innen durchgeführt, die die Funktionalität der Zwischenstände validiert haben. Eine abschließende Evaluation der beiden Schnittstellen mit Integration aller beschriebenen Funktionalitäten steht noch aus. Für beide Schnittstellen sind Erweiterungen über den bisher geplanten Umfang hinaus denkbar und z.T. sogar nötig. Der Steuerungsalgorithmus muss zunächst dahingehend ausgewertet werden, ob die durchgeführte Prozessänderung weg von Pendeltouren hin zur Auftragsvergabe durch den Algorithmus die Effizienz der Auftragsabarbeitung tatsächlich erhöht. Diese Untersuchungen werden derzeit durchgeführt. Im Rahmen dessen wird auch ausgewertet, in wie weit es nötig ist, die Nebenbedingungen des Algorithmus bzgl. den resultierenden Arbeitsbedingungen zu erweitern. Denkbar sind erweiterte Nebenbedingungen, die maximale Laufwege pro Schicht oder maximale Wartezeiten pro Haltepunkt vorgeben, wobei es sich anbietet, diese Einstellungen auch schichtweise an aktuelle Witterungsverhältnisse anpassbar zu gestalten. Neben einer globalen Einstellung dieser Werte für alle Fahrer*innen ist des Weiteren eine Individualisierung der Einstellungen für die einzelnen Fahrer*innen denkbar, die bspw. die Präferenzen für Lauf- oder Shuttleaufträge abfragen. In diesem Fall wäre auch eine Erweiterung der Apps nötig, sodass die Fahrer*innen diese Einstellungen selbst vornehmen können. Die bisherige Gestaltung der Apps wurde durch die Fahrer*innen als intuitiv und leicht bedienbar bewertet.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) unter dem Förderkennzeichen 19H17003 geförderten Projekts "Isabella - Automobillogistik im See- und Binnenhafen: Interaktive und simulationsgestützte Betriebsplanung, dynamische und kontextbasierte Steuerung der Gerät- und Ladungsbewegungen".

Literatur

BLG Logistics Group (2020). Autoterminal Bremerhaven. Online verfügbar unter https://www.blg-logistics.com/de/dienstleistungen/umschlagslogistik/terminals/autoterminal-bremerhaven, zuletzt geprüft am 08.06.2020.

Böse, F., Piotrowski, J. (2009). Autonomously controlled Storage Management in Vehicle Logistics - Applications of RFID and Mobile Computing Systems. In: International Journal of RF Technologies: Research and Applications 1.1, 2009, S. 57-76.

Butz, A., Krüger, A. (2017). Mensch-Maschine-Interaktion. (2. Aufl.). Berlin: De Gruyter.

DIN 9241-110 (2008). DIN EN ISO 9241-110 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung (ISO 9241-110:2006).

DIN 9241-210 (2010). DIN EN ISO 9241-210 Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO 9241-210:2010).

DIN 9241-12 (1998). DIN EN ISO 9241-12 Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 12: Informationsdarstellung (ISO 9241-12:1998).

Google (2020). Material Design. Online verfügbar unter https://material.io/, zuletzt geprüft am 01.06.2020.

Görges, M., Freitag, M. (2020). On the Influence of Structural Complexity on Autonomously Controlled Automobile Terminal Processes. In: Dynamics in Logistics. Springer, Cham, 2020, S. 42-51.

Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik, M., Schukraft, S., Werthmann, D., Oelker, S., Freitag, M. (2017). Interactive Planning and Control for Finished Vehicle Logistics. In: Jahn, C.; Kersten, W.; Ringle, C. M. (eds.): Digitalization in Maritime and Sustainable Logistics. epubli GmbH, Berlin, 2017, S. 77-93.

Klug, F. (2018). Logistikmanagement in der Automobilindustrie (2. Aufl.). Berlin: Springer.

Luxen, D., Vetter, C. (2011). Real-time routing with OpenStreetMap data. In: Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL International Conference on Advances in Geographic Information Systems, ser. GIS'11. Chicago, IL, USA: ACM, 2011, S. 513-516.

Mattfeld, D. (2006). The Management of Transshipment Terminals: Decision Support for Terminal Operations in Finished Vehicle. Supply Chains. In: Operations Research/Computer Science Interfaces Series 34. New York: Springer Science+Business Media.

OpenStreetMap Contributors (2017). OpenStreetMap. Online verfügbar unter https://www.openstreetmap.org, zuletzt geprüft am 01.06.2020.

Pisaruk, N. (2018). MIPCL (Mixed Integer Class Library, Version 2.5.4). Online verfügbar unter www.mipcl-cpp.appspot.com (2018), zuletzt geprüft am 15.01.2020. alternative URL: https://www.researchgate.net/publication/301802556_MIPCL_Mixed_Integer _Class_Library

Autor*innenverzeichnis

André Barthelmey
Institut für Produktionssysteme
Technische Universität Dortmund

Dr.-Ing. Thies Beinke
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Dr.-Ing. Martin Benter
MTM ASSOCIATION e.V.

Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse
Institut für Produktionssysteme
Technische Universität Dortmund

Advanced Manufacturing/ Industry 4.0 School of Mechanical
and Mechatronic Engineering
Faculty of Engineering and Information Technology
University of Technology Sydney

Dennis Dunekacke
28Apps Software GmbH

Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Fachbereich Produktionstechnik
Universität Bremen

Paul Glogowski
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Ruhr-Universität Bochum

Michael Görges
BLG Logistics Group AG & Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Norbert Gronau
Lehrstuhl für Wirtschaftsinformatik, Prozesse und Systeme
Universität Potsdam

Lasse Härtel
Institut für Fabrikanlagen und Logistik
Leibniz Universität Hannover

Marit Hoff-Hoffmeyer-Zlotnik
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Nils Hoppe
Fachbereich Produktionstechnik
Universität Bremen

Dennis Keiser
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Prof. Dr. Dr. hc. Wolfgang Kersten
Institut für Logistik und Unternehmensführung
Technische Universität Hamburg

Jens kleine Kamphake
Fachbereich Produktionstechnik
Universität Bremen

Felix Krol
Institut für Logistik und Unternehmensführung
Technische Universität Hamburg

Prof. Dr. techn. Peter Kuhlang
MTM ASSOCIATION e.V.

Prof. Dr.-Ing. Bernd Kuhlenkötter
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Ruhr-Universität Bochum

Kai Lemmerz
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Ruhr-Universität Bochum

Janine Tatjana Maier
Institut für Produkt- und Prozessinnovation
Leuphana Universität Lüneburg

Michael Miro
Lehrstuhl für Produktionssysteme
Ruhr-Universität Bochum

Franziska Moltenbrey
Zentrum für Management Research
DITF Denkendorf

Rafael Mortensen Ernits
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Manuela Ostermeier
MTM ASSOCIATION e.V.

Dr.-Ing. Matthias Peissner
Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation

Christoph Petzoldt
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Kathrin Pollmann
Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation

Moritz Quandt
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Lennart Rolfs
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Prof. Dr.-Ing. Matthias Schmidt
Institut für Produkt- und Prozessinnovation
Leuphana Universität Lüneburg

Susanne Schukraft
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath
Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation

Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement
Universität Stuttgart

Tobias Sprodowski
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Dr.-Ing. Hendrik Stern
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Prof. Dr. rer. pol. Meike Tilebein
Institut für Diversity Studies in den Ingenieurwissenschaften
Universität Stuttgart

Zentrum für Management Research
DITF Denkendorf

Dr. rer. pol. Birgit von See
Institut für Logistik und Unternehmensführung
Technische Universität Hamburg

Dr. rer. nat. Mathias Vukelić
Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation

Vanessa Weßkamp
Institut für Produktionssysteme
Technische Universität Dortmund

Jasper Wilhelm
BIBA - Bremer Institut für Produktion und Logistik
an der Universität Bremen

Prof. Dr. Uta Wilkens
Institut für Arbeitswissenschaft
Ruhr-Universität Bochum

Viktor Zeitler
28Apps Software GmbH

WGAB

Wissenschaftliche Gesellschaft
für Arbeits- und Betriebsorganisation

Dieter Spath, Birgit Spanner-Ulmer (Hrsg.)

Digitale Transformation – Gutes Arbeiten und Qualifizierung aktiv gestalten

2019
304 Seiten, € 49,90
ISBN 978-3-95545-309

Dominik T. Matt

KMU 4.0 - Digitale Transformation in kleinen und mittelständischen Unternehmen

2018
298 Seiten, € 49,90
ISBN 978-3-95545-267-4

Norbert Gronau (Hrsg.)

Industrial Internet of Things in der Arbeits- und Betriebsorganisation

2017
260 Seiten, € 49,80
ISBN 978-3-95545-225-4

GITO

Bestellungen unter: +49 30 41938364
shop.gito.de
service@gito.de

Im Zuge der digitalen Transformation kommt es zu einer engen und veränderten Zusammenarbeit zwischen Mensch und Technik: Die digitalisierten und automatisierten Bestandteile der Produktions- und Logistiksysteme werden von Menschen miteinander verknüpft und überwacht, z.B. bei der Mensch-Roboter-Kollaboration, oder treten in Form neuer Assistenzsysteme in ihre Arbeitsumgebung ein. Wie kann diese Mensch-Technik-Interaktion gestaltet werden, um die Potenziale der digitalen Transformation nutzbar zu machen und für die Menschen eine gute Arbeit zu ermöglichen?

Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Arbeits- und Betriebsorganisation (WGAB) möchte mit diesem Tagungsband zur Bewältigung dieser Herausforderung beitragen. In ihren Beiträgen geben die WGAB-Mitglieder und -Anwärter*innen sowie Mitarbeiter*innen aus beteiligten Forschungsinstituten Einblicke in ihre Forschungsarbeit und liefern so Input für Wissenschaftler*innen und Praktiker*innen.

ISBN 978-3-95545-353-4