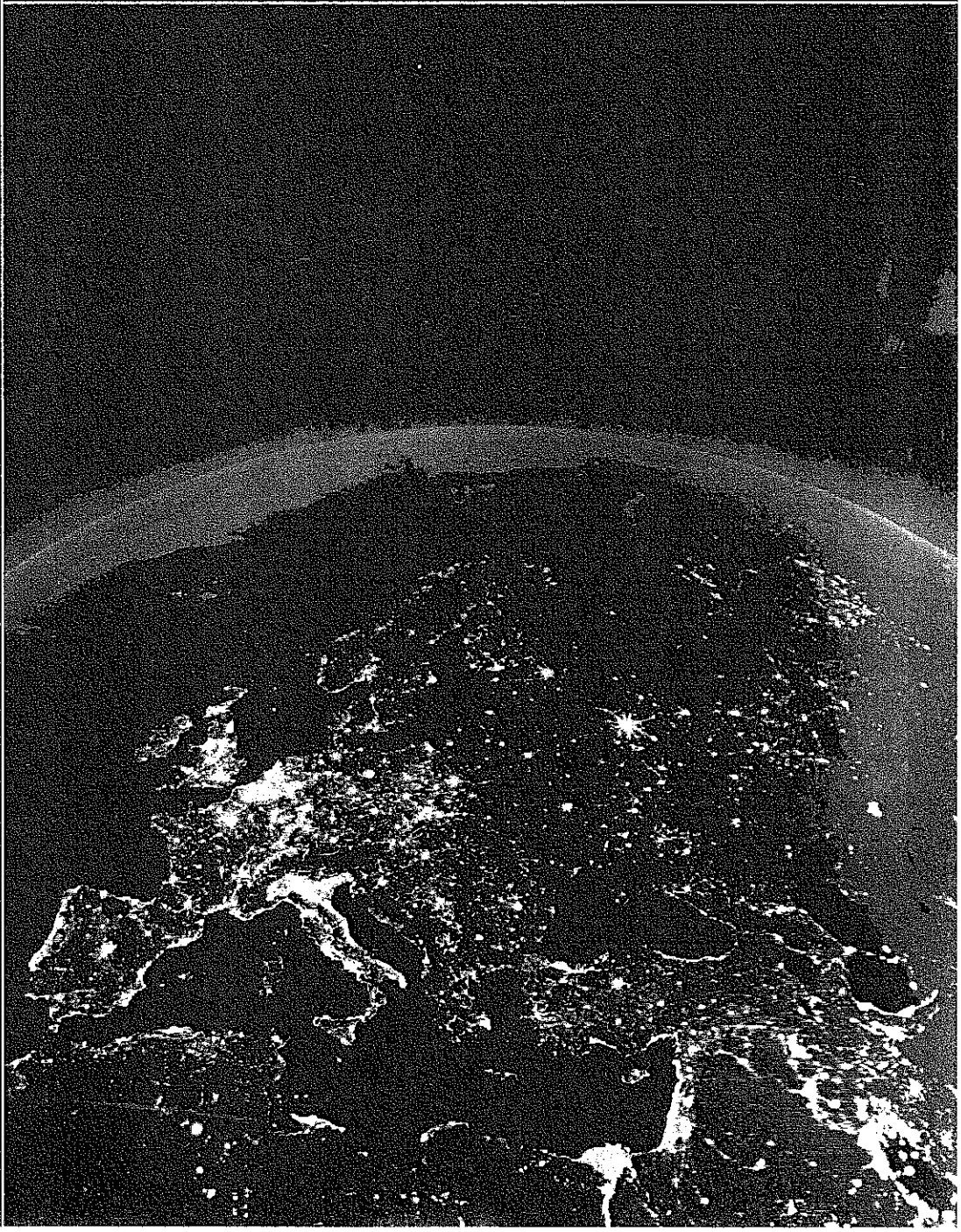
Megatrend Digitalisierung

Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation

Christopher M. Schlick (Hrsg)



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

GITO

Christopher M. Schlick (Hrsg)
c.schlick@iaw.rwth-aachen.de
www.iaw.rwth-aachen.de

ISBN 978-3-95545-185-1

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 2016
Gedruckt und gebunden in Berlin 2016

© GITO mbH Verlag Berlin 2016

GITO mbH Verlag
für Industrielle Informationstechnik und Organisation
Detmolder Straße 62
10715 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

Inhaltsverzeichnis

Manufacturing Data Analytics zur Identifikation dynamischer Engpässe in Produktionssystemen mit hoher wertschöpfender Variabilität.....11
Jochen Deuse, David Lenze, Ferdinand Klenner, Tilman Friedrich

Zeitmodelle zur Klassifikation und Identifikation von Produktionsereignissen.....27
Wilhelm Dangelmaier

Optimierung der Instandhaltungsstrategie durch datenanalytische Risikoklassifikation und Störungsprognose.....71
Hubert Biedermann

Agile Working – Ansätze und Nutzen agiler und beteiligungsorientierter Verfahren zur Spezifikation kollaborativer Arbeitsumgebungen.....89
Wilhelm Bauer, Carsten Schmidt

Industrie 4.0: Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis.....111
Michael Riedl, Daniel García, Erwin Rauch, Dominik Matt

Herausforderungen der Mensch-Technik-Interaktion für die Gestaltung zukünftiger Arbeitssysteme.....131
Michael Schenk, Tina Haase, Alinde Keller, Dirk Berndt

Die Produktivitätswirkung von Augmented Reality in der Unikatfertigung.....141
Axel Friedewald, Philipp Sebastian Halata, Nikolaj Meluzov, Hermann Lödding

Gestaltung von gebrauchstauglichen tangiblen Mensch-Maschine-Schnittstellen – ein Werkstattbericht.....163
Michael Wächter, Angelika C. Bullinger

Tiefenbildbasierte Echtzeiterfassung von Arbeitsbewegungen im Rahmen digitaler Ergonomieanalysen.....175
Martin Schmauder, Edgar Scherstjanoi, Daniel Gröllich

Prozessorientierte CO2-Bewertung in der Produktion als Bestandteil des ganzheitlichen Wertstrommanagements.....193
Thomas Edtmayr, Alexander Sunk, Wilfried Sihn

Gibt es eine Arbeitswissenschaft der Digitalisierung? – Ein Diskursbeitrag.....215
Uta Wilkens, Thomas Herrmann

Ganzheitlich flexible Vernetzung durch Erweiterung bestehender IT-Strukturen zu Serviceorientierten Architekturen mithilfe von Agentensystemen zur humanzentrierten Entscheidungsunterstützung – Ein Konzept zur RAMI Umsetzung.....231
Christian Block, Friedrich Morlock, Bernd Kuhlenkötter

Business Model Innovations in the Digital Publishing Industry.....261
Hans Koller, Bianca Dennstedt

Erschließen ergonomischer Potenziale durch die Optimierung der täglichen Personaleinsatzplanung.....281
Christopher M. Schlick, Christopher Brandl

Konzeption eines MTM-basierten Bewertungsmodells für digitalen Assistenzbedarf in der cyber-physischen Montage.....295
Philipp Hold, Fabian Ranz, Wilfried Sihn

Anforderungen an die lernförderliche Gestaltung von Assistenzsystemen für die Instandhaltung – Beispiele aus der Stahl- und Prozessindustrie 323
Tina Haase, Dirk Berndt, Wilhelm Termath

Industrial Symbiosis – Potenziale für einen fabrikübergreifenden Ressourcenaustausch.....339
Uwe Dombrowski, Alexander Karl, Philipp Krenkel

Konzeption eines MTM-basierten Bewertungsmodells für digitalen Assistenzbedarf in der cyber-physischen Montage

Philipp Hold[1,2], Fabian Ranz[2], Wilfried Sihn[1,2]

[1] Technische Universität Wien, Institut für Managementwissenschaften

[2] Fraunhofer Austria

Durch den Trend stetig wechselnder und kurzzyklischer Arbeitsinhalte in Montagesystemen steigt das Risiko kognitiver, psychischer sowie physischer Belastungssituationen für den Menschen, welches durch den Einsatz von Assistenzsystemen reduziert wird. Die Integration von Assistenzsystemen führt zu einem steigenden Digitalisierungs- und Vernetzungsgrad, wodurch Assistenzsystemen eine zentrale Rolle im Kontext cyber-physischer Montagesysteme zukommt. Der positive Einfluss digitaler Assistenzsysteme zur Reduktion kognitiver und physischer Belastungen ist vielfach in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben. Der Einfluss auf die Produktivität eines Montagesystems wird hingegen nur ansatzweise verfolgt. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Beitrag erste Erkenntnisse für ein konzeptionelles Vorgehensmodell zur Identifikation von digitalem Assistenzbedarf und dessen Produktivitätseffekten im cyber-physischen Montagesystem beschrieben.

1 Einleitung

1.1 Von der komplexen zur cyber-physischen Montage

Durch steigende Produktindividualisierung wird in der produzierenden Industrie vermehrt das Konzept der sogenannten „Mixed Model Montage" verfolgt, mit dem Ziel kapazitätsauslastend, flexibel und wandlungsfähig eine Vielzahl gleichartiger Produkte einer Produktfamilie, aber auch vermehrt unterschiedliche Produkte verschiedener Produktfamilien zu montieren. Hierdurch resultiert eine zunehmende Komplexität in Bezug auf die Koordination von Informations- und Materialflüssen. Vielfach geht mit dieser Form der Montagegestaltung ein hoher Anteil von Montagetätigkeiten einher, deren Automatisierung nicht wirtschaftlich ist und vom Menschen durchgeführt wird. Die Mitarbeiter müssen den Anforderungen nach Flexibilität und Wandlungsfähigkeit des Konzepts der „Mixed Model Montage" folgen, worin ein erhöhtes Risiko für kognitive, psychische aber auch physische Belastungen bei den Mitarbeitern resultiert. Die Integration von Assistenzsystemen wirkt diesen Herausforderungen entgegen (Fast-Berglund et al., 2013).

Die allgemeine Zielsetzung von Assistenzsystemen ist, die Diskrepanz zwischen der menschlichen Leistungsfähigkeit sowie -fertigkeit und der von einer Arbeitsaufgabe geforderten Anforderung zu minimieren, mit dem Ziel die Produktivität des Mitarbeiters als auch des gesamten Arbeitssystems nachhaltig zu sichern. Assistenzsysteme verfügen vor diesem Hintergrund über eine Art Reglerfunktion, indem sie die von einer Aufgabe geforderten Anforderungen mit der individuellen menschlichen Leistungsfertigkeit ausgleichen (Spillner, 2015).

Im Allgemeinen werden im Kontext der Montage zwei Arten von Assistenzsystemen unterschieden. Zum einen eine technische Assistenz, beispielsweise in Form eines kooperierenden oder auch kollaborierenden Robotiksystems und zum anderen in Form einer digitalen Assistenz, welche den Mitarbeiter im Wesentlichen durch die Repräsentation von Informationen sowie durch elektronische Absicherung von qualitätskritischen Prozessen unterstützt. Die Integration von Assistenzsystemen in klassische Montagesysteme führt zu einem steigenden Digitalisierungs- und Vernetzungsgrad, wodurch Assistenzsystemen eine zentrale Rolle im Kontext cyber-physischer Montagesysteme zukommt.

1.2 Konzept eines cyber physischen Montagesystems

Cyber-physische Systeme (CPS) realisieren eine Verbindung zwischen der physikalischen und der digitalen Welt. Dabei bauen CPS auf eingebetteten Systemen auf (engl. embedded systems), welche über einen Sensor Daten einer physikalischen Umgebung erfassen, diese mittels eines Mikroprozessors verarbeiten und über Aktuatoren auf physikalische Vorgänge einwirken. Sie sind mittels digitaler Netzte miteinander verbunden und können auf weltweit verfügbare Daten und Dienste zugreifen. CPS sind als (technisch) nicht abgeschlossene Systeme definiert und sind durch einen hohen Grad der Vernetzung zwischen der physischen, sozialen und virtuellen Welt gekennzeichnet (Geisberger et al., 2012). Durch die Integration von CPS in Montagesystemen entstehen sogenannte cyber-physische Montagesysteme (CPMS). Es wird vorausgesagt, dass CPMS in der Lage sind, Herausforderungen volatiler Märkte wirtschaftlich zu entgegen und gleichzeitig auf ergonomische sowie in Hinblick auf eine alters- und alternsgerechte Arbeitsgestaltung einzugehen (Dombrowski et al., 2013).

Durch den Einzug intelligenter Systemtechniken im Arbeitssystem der Montage wird die Mensch-System-Interaktion deutlich erhöht. Die direkte funktionale und informationelle Distanz des Menschen zum Arbeitssystem, in welchem der Mensch agiert, wird dabei deutlich vergrößert (Hirsch-Kreinsen, 2014). Darüber hinaus wird in der Literatur dargestellt, dass es im Arbeitssystem der Zukunft zu steigenden Beanspruchungen des Mitarbeiters kommt. Gründe für steigende Beanspruchungen sind dabei vor allem durch den kurzzyklischen Wechsel der Arbeitstätigkeiten, die Zunahme problemlösender Tätigkeiten, dem hochflexiblen Mitarbeitereinsatz sowie dem Gebrauch neuer Kommunikationstechniken zu sehen (Dombrowski et al., 2014).

Basierend auf dem Konzept eines cyber-physischen Montagesystems wird im Rahmen des Projekts „Industrie 4.0 Pilotfabrik" an der Technischen Universität Wien gegenwärtig ein diesem Gestaltungsparadigma entsprechendes Montagesystem zu vertiefenden Forschungs- aber auch zu industrieorientierten Demonstrationszwecken entwickelt. Das Montagesystem baut dabei auf drei mobil verbundenen Montagestationen auf, entlang derer unterschiedliche Varianten eines 3D-Druckers nach dem Prinzip einer „Mixed Model Montage" in Losgröße 1 montiert werden. Dabei erfolgt die Montage des Werkstücks auf fahrerlosen und sich autonom steuernden Transportsystemen. Über Auto-ID Technologien wie RFID erfolgt eine dezentrale Koordination zwischen dem angrenzenden Logistikbereich, der Kommissionierung und dem Materialtransport. Der Mitarbeiter wird in diesem komplexen Montagesystem auf der einen Seite durch kooperative und kollaborative Robotiksysteme sowie auf der anderen Seite durch digitale Assistenzsysteme mit unterschiedlichen technischen Funktionsausprägungen bei der Durchführung seiner Tätigkeiten unterstützt. Parallel werden ergonomische Belastungssituationen des Mitarbeiters über ein „Human Motion Capture" System erfasst. Die gewonnenen Informationen werden dazu verwendet, Synergieeffekte zwischen der Produktivität des Montagesystems und ergonomischen Belastungssituationen des Mitarbeiters zu analysieren – mit der Zielsetzung, gewonnene Erkenntnisse in eine optimierte Produktionsplanung und -steuerung einfließen zu lassen. Das Montagesystem ist dabei in ein fabrikübergreifendes Produktionssystem eingebunden (Erol et al, 2016). Die folgende Grafik verdeutlicht den konzeptionellen Aufbau.

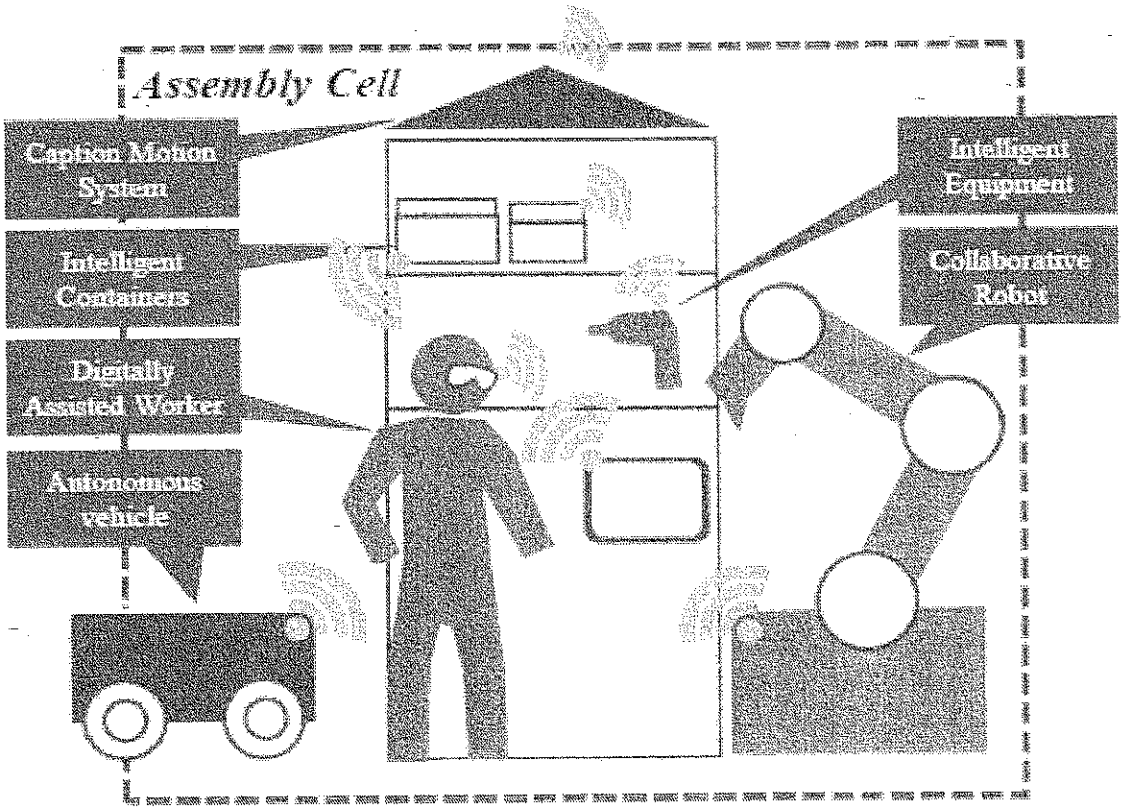


Abbildung 1: Aspekte eines cyber-physischen Montagesystems (Erol et al., 2016)

1.3 Digitale Assistenzsysteme in der Montage

Informationen, die in der klassischen Montage trivial erscheinen, erschließen sich häufig in einem komplexen Montagesystem nicht intuitiv, wodurch für Produktionsmitarbeiter ein Informationsbedarf entsteht. Die Praxis zeigt, dass herkömmliche papiergebundene Informationen und Anweisungen von Mitarbeitern kaum beachtet werden und auch von Seiten der Arbeitsvorbereitung selten aktuell gehalten sind. Unabhängig von den enthaltenen Informationen besitzen solche Informationen lediglich für die betrachtete Produktvariante Gültigkeit und sind damit per se nachteilig für die Bereitstellung von Informationen in einem komplexen Montagesystem, welches durch variantenreiche Produkte und sich dynamisch ändernde Arbeitstätigkeiten charakterisiert ist.

Um dem erhöhten Bedarf an Informationen zur Durchführung manueller Tätigkeiten in der Montage gerecht zu werden, sind in den letzten Jahren vermehrt Technologien zur Unterstützung der Produktionsmitarbeiter am Markt erhältlich. Kognitive und digitale Assistenzsysteme ermöglichen es bereits heute, komplexe Montageinhalte über intuitiv verständliche Montageanweisungen dem Produktionsmitarbeiter am Shop-Floor zur Verfügung zu stellen. Dabei ist jedoch auffällig, dass diese Systeme vielfach keiner adäquaten Mensch-System-Interaktion gerecht werden. Die Repräsentation von Informationen erfolgt zumeist statisch entlang definierter Informationssequenzen, welche der Dynamik stetig ändernder Arbeitsaufgaben nur bedingt folgt. Eine Synchronisation mit der Montagesystemperipherie und der aktuellen Problemsituationen des Mitarbeiters erfolgt kaum (Hold et al, 2015).

Der Funktionsumfang moderner digitaler Assistenzsysteme geht dabei weit über eine reine Repräsentation von Anweisung zu Arbeitsschritten hinaus und bietet durch die Vernetzung mit der Montagesystemperipherie eine echtzeitfähige, taktsynchrone und damit situative Unterstützung für den Mitarbeiter. Das bedeutet: Montageanweisungen sind automatisch mit dem Arbeitsfortschritt des Mitarbeiters synchronisiert, ohne dass eine manuelle Rückmeldung an das System erfolgen muss. Die Verwendung der richtigen Werkstückkomponenten und der Einsatz der richtigen Montagewerkzeuge, Hilfs- und Betriebsmittel werden sensor- und kameragestützt in Echtzeit überwacht. Über logische Relationen dieser Signale mit entsprechenden Prozessdaten werden montagebedingte Fehler durch die Software des Assistenzsystems identifiziert und Entscheidungsunterstützung zur Korrektur dieser Fehler dem Mitarbeiter zur richtigen Zeit, am richtigen Ort und in der richtigen Qualität zur Verfügung gestellt. Ebenso werden Fehler in der Materialbereitstellung sowie auch in der Qualität der zur Montage bereitgestellten Bauteile identifiziert, Montagereihenfolgen situativ durch das System geändert und entsprechend angepasste Informationen dem Mitarbeiter zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus interagieren moderne Formen von digitalen Assistenzsystemen mit qualitätskritischen Prozessen, d.h. sie steuern und konfigurieren beispielsweise Schraub- (Drehmoment, Drehwinkel, ...) und Messwerkzeuge, wodurch deren aufgabenspezifischer Einsatz abgesichert und gleichzeitig dokumentiert wird.

Als Beispiel ist das ultraschallbasierte Assistenzsystem der Firma Sarissa zu nennen. Dieses System identifiziert präzise Positionen von Montagobjekten, wie beispielsweise verwendete Arbeits- und Betriebsmitteln sowie Handpositionen des Mitarbeiters durch die Integration spezifischer Sensoren. Eine entsprechende Software verarbeitet die gewonnene Information und zieht Rückschlüsse auf die aktuelle Situation des Mitarbeiters und auf die qualitative Ausführung seiner Arbeitstätigkeit. Auf diese Weise wird eine Synchronisation der digitalen Informationsverarbeitung und der physikalischen Tätigkeitsausführung erzielt. Über den Einsatz verschiedener Geräte, wie Monitore, Tablets oder auch Datenbrillen erfolgt eine adäquate Repräsentation von Informationen. Darüber hinaus werden taktsynchron und über eine Anbindung an die Fertigungssteuerung Arbeits- und Betriebsmittel des Montagesystems gesteuert (Sarissa, 2016). Die folgende Grafik verdeutlicht die technische Komplexität dieser Systeme.

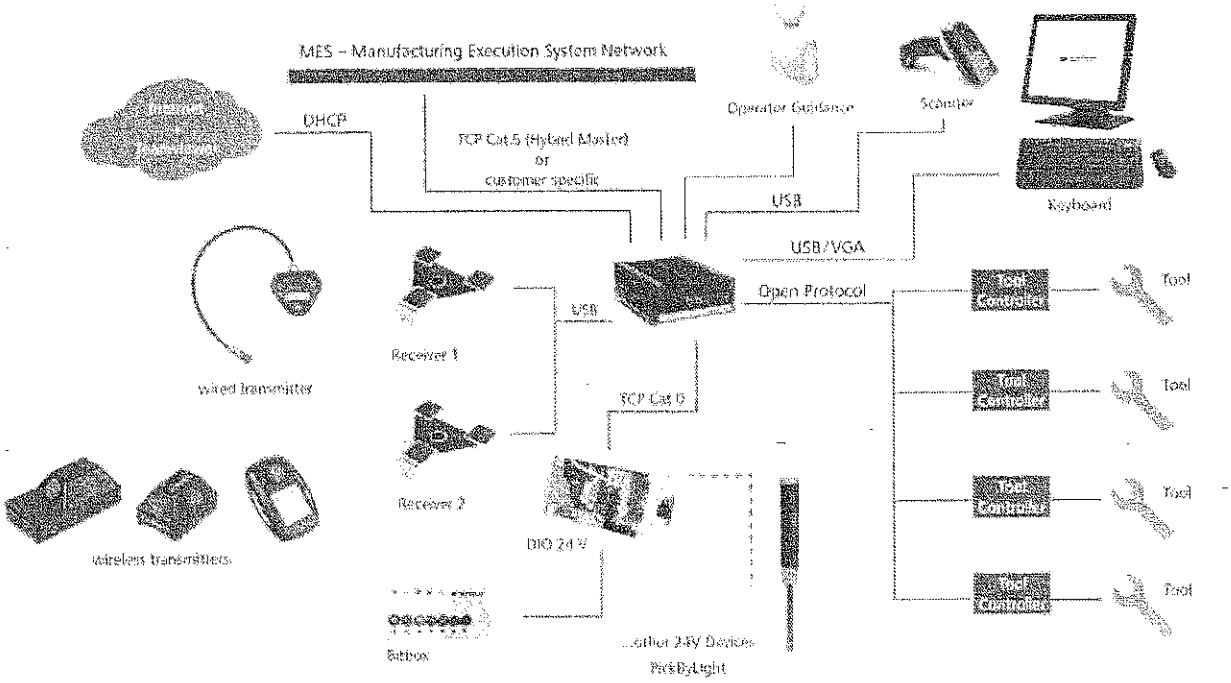


Abbildung 2: Technischer Umfang eines Assistenzsystem (Sarissa, 2016)

Während der positive Einfluss von digitalen Assistenzsystemen vielfach in der wissenschaftlichen Literatur beschrieben ist, liegen wenige Erkenntnisse vor, welchen quantifizierbaren Einfluss digitale Assistenzsysteme auf die Leistungsfähigkeit und die Produktivität von Montagemitarbeitern sowie auf das Montagesystem ausüben.

2 Planung digitaler Assistenz in der Montage

2.1 Planungskomponenten von digitalen Assistenzsystemen

Bei der Analyse und Planung digitaler Assistenzsysteme sind in Bezug auf die Konfiguration der Systemausführung zunächst vier wesentliche Anforderungen zu berücksichtigen, welche von HOLLNAGL (1987) beschrieben sind. Zunächst sind Rückschlüsse auf die Anforderung zu ziehen, welche Informationen einer Arbeitsaufgabe dem Mitarbeiter repräsentiert werden *(Fokus: WHAT)*. Des Weiteren sind die Anforderung zu klären auf welche Weise die Information dem Mitarbeiter *(Fokus: HOW)* und schließlich, wann die Information dem Mitarbeiter *(Fokus: WHEN)* zur Verfügung zu stellen sind. Anschließend gilt es, spezifische Anforderungen zur individuellen Anpassung des Systems an individuelle Bedürfnisse der Mitarbeiter festzulegen. Der Einfluss des digitalen Assistenzsystems auf die Leistungsfähigkeit und die Produktivität von Montagemitarbeitern sowie auf das Montagesystem wird durch die technische Ausgestaltung maßgeblich bestimmt. Des Weiteren sind mit der technischen Ausgestaltung des digitalen Assistenzsystems verschiedene Investitionen verbunden. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht ist die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit eines digitalen Assistenzsystems sicherzustellen. Im Folgenden werden ausgewählte technische Komponenten, spezifische Anforderungen sowie Merkmale digitaler Assistenzsysteme näher beschrieben.

Informationen zu einer Aufgabenstellung: Um fehlerfrei und in der Vorgabezeit wechselnde Produktvarianten zu montieren, ist es erforderlich, dass Mitarbeiter ein zugeführtes Werkstück unmittelbar identifizieren können, die variantenspezifisch durchzuführenden Arbeitsvorgänge kennen, die korrekten Teile und Komponenten zur Durchführung der Arbeitsvorgänge auswählen und die richtige Arbeitsmethode sowie die richtigen Werkzeuge zur Anwendung bringen.

Darstellungsmedien: Vereinfacht wird die Darstellung von Informationen in Arbeitssystemen durch steigende Verfügbarkeit von mobilen elektronischen Endgeräten wie Tablet-Computern, Datenbrillen, Smart Watches oder mobilen Projektoren, welche eine dezentrale Verfügbarmachung digitaler Informationen direkt im Arbeitssystem ermöglichen - verbunden mit der steigenden Verbreitung vernetzbarer Betriebsmittel. Sie bilden die physische Mensch-Maschine-Schnittstelle und sind daher aus ergonomischer Sicht von hoher Relevanz. Tablet-Computer und herkömmliche Monitore sind beispielsweise geeignet, wenn ein hoher Informationsbedarf für einen einzelnen Arbeitsschritt, eine hoch skalierte Darstellung und ein vollständig freies Sichtfeld des Mitarbeiters gefordert werden. Einen steigenden Verbreitungstrend zeigen auch am Körper tragbare Geräte wie Head-Mounted Displays (HMD), auch Datenbrillen genannt, auf. Ihre wesentlichen Vorteile liegen darin, dass ihr Display sich zu jeder Zeit in unmittelbarer Nähe zum oder im Sichtfeld des Mitarbeiters befindet und dieser sich nicht zu einem ortsfest installierten Monitor wenden muss, um Informationen zu erfassen und beide Hände frei zur Ausübung der Montagetätigkeiten hat (Krieger, 2014). Des Weiteren verfügen HMD modellabhängig über diverse Zusatzfunktio-

nen, wie Bildaufnahme, Tonausgabe, Gestenerkennung oder das Lesen/Scannen von 1D- und 2D-Barcodes.

Vergleichende Studien der deutschen Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) verweisen jedoch auf steifere Bewegungsabläufe, erhöhte Anspannung der Nackenmuskulatur, erhöhtes Risiko zu Kopfschmerzen und schnellere visuelle Ermüdung (Wille et al., 2013). Lediglich für einzelne Vorgänge entlang eines typischen Montageprozesses geeignet ist die Projektion von Informationen direkt auf das Werkstück oder das Material durch leistungsstarke Beamer oder Laserprojektoren. Mittels dieser Technologien können unter anderem Positionier- oder auch Schraubstellen sequenziell angezeigt werden. Beamer und Laserprojektoren erfordern jedoch eine freie Sichtverbindung zu dem Werkstück oder dem Material. Zusatzinformationen lassen sich hierbei sehr beschränkt einbinden.

Informationstiefe: Darstellungsmedien sind entsprechend des betrachteten Montageschritts adäquaten in Abhängigkeit der benötigten Informationstiefe auszuwählen. An dieser Stelle werden vier Tiefenklassen unterschieden (Wiesbeck, 2015):

- Informationen zum Prozess (was)
- Informationen zur Geometrie (wo)
- Informationen zum Operation (womit und mit welchen Parametern)
- Informationen zur manipulativen Methode (wie)

Dabei ist zu berücksichtigen, dass nicht jedes Medium geeignet ist, jede Informationstiefe abzubilden. Studien der RWTH Aachen belegen, insbesondere in Anlauf- und Anlernphasen, eine schnellere Ausführung von Montageschritten bei Instruktion über animierte Darstellungen im Vergleich zu statischen zu erzielen.

Bei animierten Arbeitsinstruktionen sind im Wesentlichen zwei Formate zu unterscheiden: Videos wie der Utility Film werden im direkten Arbeitsumfeld gefilmt und erfordern damit besonders wenig Abstraktionsfähigkeit vom Mitarbeiter, da das Arbeitsumfeld und die tatsächliche Handhabung eines jeden Montageschritts mitaufgenommen werden. Alle Informationstiefenklassen werden hier mit einem einzigen Medium bedient. Sie erfordern bei ihrer Erstellung jedoch einen hohen Aufwand und müssen bei Produkt-, Anlagen- oder Prozessänderung neu produziert werden. 3D-Animationen, die direkt aus den CAD-Konstruktionsdaten des zu montierenden Produkts abgeleitet werden können, sind hingegen aufwandsarm erstellbar und entsprechen bei Vorhandensein einer Manufacturing Bill of Material (MBOM) direkt dem tatsächlichen Montageprozess. Konstruktive und prozessuale Änderungen lassen sich aufgrund der Datendurchgängigkeit mit dem PLM-System schnell

durchführen. Auch die im ERP-System hinterlegten, variantenspezifischen Vorgangsfolgen können zur Sequenzierung der Informationen des Assistenzsystems verwendet werden. Untersuchungen in der Industrie zeigen allerdings, dass in typischen Montageprozessen nur rund die Hälfte aller Einzelvorgänge tatsächliche Fügevorgänge sind. Reinigungs-, Prüf-, Schmier- oder Handhabungsvorgänge müssen in diesen Animationen in aller Regel separat über die Verwendung von Texten, Symbolen, Bildern visualisiert werden (Hold et al., 2015). Zur Sicherung der Nutzerakzeptanz und gleichzeitig der Systemziele, wie unter anderem der Vorgabezeiteinhaltung und Fehlervermeidung, ist auf schnelle Erfassbarkeit und intuitive Verständlichkeit der Informationen zu achten.

Taktsynchronität: Hoher Mengendurchsatz bei kurzen Taktzeiten in der Fließmontage fordern von digitalen Assistenzsysteme eine Unterstützung des Mitarbeiters ohne den Verlust von Prozesszeit. Aufgrund dessen ist eine manuelle Interaktion der Mitarbeiter mit dem System idealerweise zu vermeiden. Entsprechend der Zergliederung des Gesamtmontageprozesses in einzelne Vorgänge sind die Informationen und Instruktionen in einzelne Sequenzen zerlegt, die synchron zum Montagefortschritt aufgerufen und visualisiert werden. Ein idealer Workflow, im Gegensatz zu bislang verbreiteten Lösungen, meldet durchgeführte Vorgänge automatisiert an die Applikationsebene zurück. Eindeutig zuordenbare binäre Sensorsignale von Werkzeugen, Mess- und Betriebsmitteln, eine kameragestützte Montagefortschrittserkennung, Materialentnahme-Quittierungen eines Pick-Systems oder die Erkennung der räumlichen Position eines Werkstücks können hierzu beispielhaft verwendet werden.
Bei Einsatz eines ERP- bzw. ME-Systems im Anwenderunternehmen können diese automatisierten Rückmeldungen aus der Feldebene der Montage nicht nur zur Taktsynchronisation des Assistenzsystems verwendet werden, sondern gleichzeitig als Bewegungsdaten zum einzelnen Auftrag dokumentiert werden, wodurch im selben Schritt eine durchgängige Traceability auf Werkstück- und Vorgangsebene in Echtzeit realisiert wird.

2.2 Berücksichtigung digitaler Assistenzsysteme in der Montageplanung

Erste grundlegende Gestaltungsparadigmen der Montageplanung finden sich unter anderem bei der von Henry Ford eingeführten Fließmontage wieder, welche der stringenten Arbeitsteilung nach Erkenntnissen des Taylorismus folgte. Dem Taylorismus folgten Gestaltungsparadigmen, getrieben vor allem durch Unzufriedenheit der Montagemitarbeiter seit den 1970-iger Jahren, welche die „Humanisierung des Arbeitslebens" fokussierten. Dabei wurden neben der ergonomischen Gestaltung von Arbeitsplätzen und -bedingungen auch wirtschaftliche Ziele, wie die Steigerung der Produktivität angestrebt, welche jedoch nicht durchgängig erreicht wurden, wie verschiedene Beispiele vor allem der Automobilindustrie verdeutlichen. Vor diesen Erkenntnissen wurden ab den 1980-iger Jahren dem Gestaltungskonzept des Computer-Intergrated Manufacturing (CIM) - auch bekannt unter dem Begriff des rechnerintegrierten Produktentstehungsprozesses - vor allem in deutschsprachigen Raum gefolgt. Die in diesem Konzept unzureichende Berücksichtigung des Menschen, als auch die zum damaligen Zeitpunkt unflexible und teure Informations- und Kommunikations- sowie Produktionstechnologie gelten dabei als Hauptursache für die wenig erfolgrei-

che Umsetzung dieses Gestaltungsparadigmas. Als ein weiterer und aktuell am weit verbreitetes Gestaltungsparadigma ist der organisationszentrierte Ansatz des Lean Managements zu nennen. Ziel des Lean Managements ist die Vermeidung jeglicher Form von Verschwendung, ungeplanter Variabilität und Überlastung von Mitarbeitern und Betriebsmitteln (Kuhlang, P., 2015; Deuse et al., 2014; Lotter/Wiendahl, 2006). Die dargestellten Gestaltungsparadigmen verdeutlichen, dass zur erfolgreichen Begegnung der aktuellen Herausforderungen in Montagesystemen eine ganzheitliche Betrachtung der Faktoren Mensch, Technik und Organisation von Nöten ist, um eine nachhaltige Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen zu erzielen und intelligente Produktionssysteme zu realisieren (Kuhlang et al., 2015; Bokranz/Landau, 2012).

Der Vergleich unterschiedlicher Vorgehensmodelle verdeutlicht, dass die klassische Montageplanung entlang fünf wesentlicher Phasen verläuft (Spillner, 2015; Wiesbeck, 2015; Bullinger, 1986; Lotter, 1992; Konaold/Reger, 2003): Vorbereitung, Grobplanung, Feinplanung, Umsetzung und Betrieb. SPILLNER (2015) zeigt weiter auf, dass die unterschiedlichen Vorgehensmodelle vor allem in der Schwerpunktsetzung der Anwendung und des Einsatzes unterschiedlicher Werkzeuge und Methoden differenzieren, wobei ein Top-Down-Vorgehen von einer ganzheitlichen Planung des Montagesystems hin zur Planung einzelner Montagestation sowie ein iteratives Vorgehen in der Lösung der Planungsaufgaben charakteristisch ist. WIESBECK (2015) zeigt in einem Vergleich der Vorgehensmodelle im Hinblick auf die Berücksichtigung von Montageassistenz ein vergleichbares Ergebnis auf. Ferner zeigt WIESBECK auf, dass die geringe Einbeziehung der Situation des Mitarbeiters und der Montageumgebung in den grundlegenden Verfahren der Montageplanung ein Defizit in bestehenden Ansätze zur Montageassistenz aufweist. Das Thema digitale Assistenz findet keine explizite Berücksichtigung.

Während aktuell verwendete Methoden und Werkzeuge der Arbeitssystemplanung, vor allem im Kontext des Lean Managements, zur Verbesserung und wirtschaftlichen Bewertung von Arbeitssystemen geeignet sind, zeigen sie im Kontext der technischen Planung signifikante Schwächen auf. Notwendige informations- sowie kommunikationstechnische Anforderungen werden im Kontext eines produktivitätsorientieren Zusammenwirkens von Mensch, Technik und Organisation ungenügend adressiert.

2.3. Ansätze und Modelle zur Planung digitaler Assistenzsysteme

Ansätze und Modelle zur Bestimmung digitaler Assistenzbedürfnisse finden sich vor allen in Forschungs- und Entwicklungsarbeiten im Kontext der kognitiven Fabrikplanung und -gestaltung wieder. Zur Bestimmung und Ableitung von kognitiver bzw. digitaler Assistenz in Montagesystemen wird dabei häufig auf multidimensionale Berechnungsmodelle zur Quantifizierung von Komplexitätsgraden zugegriffen. Die Schwerpunktsetzung der Faktoren zur Bestimmung der Komplexitätsgrade variiert dabei.

Bei ZAEH ET AL. (2009) wird angeführt, dass die aus einer Tätigkeitsaufgabe resultierende Belastung für den Mitarbeiter durch drei wesentliche Beanspruchungsfaktoren beeinflusst wird:

- Physischer Beanspruchungsfaktor einer Arbeitsaufgabe ($d_t(task_i)$),
- Kognitiver Beanspruchungsfaktor ($d_c(task_i)$) und
- Wissensbasierter Beanspruchungsfaktor ($d_k(task_i)$).

Der physische Beanspruchungsfaktor einer Arbeitsaufgabe repräsentiert hierbei die im Hinblick auf eine betrachtete Tätigkeit determinierte Ausführungszeit, basierend auf den mechanischen und geometrischen Eigenschaften einer Fügeaufgabe und folgt der Systematik eines ausgewählten Systems vorbestimmter Zeiten - spezifisch der Methode „Methods-Time-Measurement" (MTM). In Abhängigkeit des mentalen Verarbeitungsaufwands fasst der kognitive Beanspruchungsfaktor die kognitiven Elemente der Wahrnehmung, der Auswahl und Verarbeitung einer Arbeitsaufgabe zusammen. Der wissensbasierte Beanspruchungsfaktor basiert auf mittel- und langfristigem Wissen der Belegschaft oder einzelner Mitarbeiter über das Produkt und den Montageprozess und adressiert Bekanntheit und Ähnlichkeit. Der Faktor fasst die individuellen Gleichheiten bzw. Ähnlichkeiten einer Arbeitsaufgabe und der Produktbedingungen zusammen. Die aus diesen betrachteten Beanspruchungsfaktoren determinierte Komplexität einer Arbeitsaufgabe wird als dreidimensionaler Vektor dargestellt (Zaeh et al,.2009). Die Zusammenhänge der drei Faktoren werden in folgender Grafik verdeutlicht.

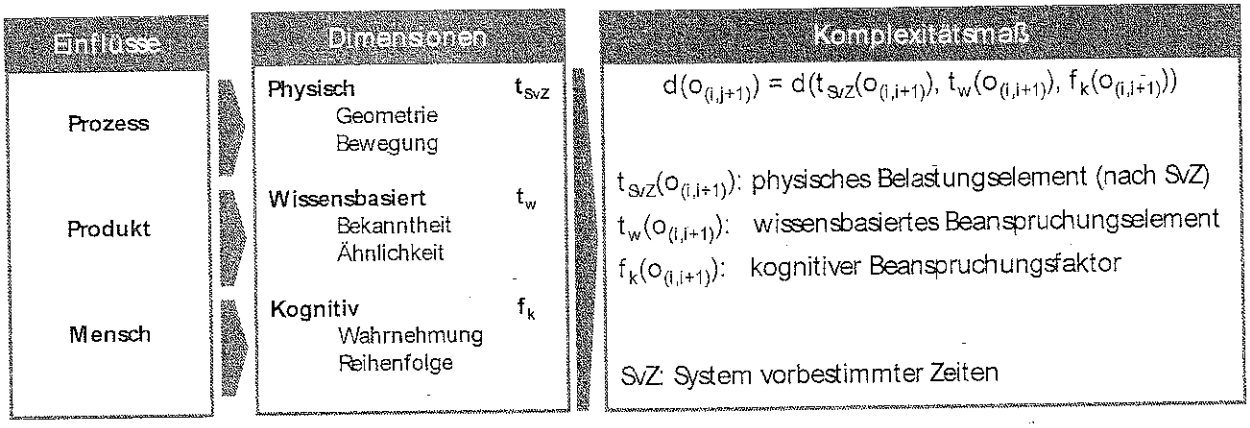


Abbildung 3: Belastungseinflüsse und daraus resultierende Belastungs- und Beanspruchungselemente des Komplexitätsmaßes für einen Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ (Wiesbeck, 2014)

WIESBECK (2014) nutzt dieses Modell zur Entwicklung einer graphenbasierten Strukturbeschreibung von Arbeitsanweisungen. Es wird veranschaulicht, wie eine situationsorientierte Werkerführung, anpassbar an die Bedürfnisse der Mitarbeiter sowie an die produktionstechnische Umwelt, erfolgt. Die entwickelte Struktur garantiert dabei, dass der

Mitarbeiter durch Anweisungsdruck weder überlastet noch durch einen zu hohen Detaillierungsgrad der Informationen in der Ausführung seiner Tätigkeit behindert wird. Eine technische und wirtschaftliche Betrachtung der Werkerführung ist in diesem Modell nicht integriert und erfolgt retrospektiv.

Zur Erörterung der Frage, welchen Einfluss digitale bzw. kognitive Assistenz auf die Leistungsfähigkeit und -fertigkeit eines Montagemitarbeiters sowie welchen Einfluss die Assistenz auf die Gesamtproduktivität eines Montagesystems haben, zeigen CLAEYS ET AL. (2015) innerhalb eines grundlegendes Regelwerks auf, welches auf einer Betrachtung der Produktkomplexität, der Arbeitsplatzkomplexität und den Bedürfnissen der Mitarbeiter aufbaut. Zur Bestimmung der Produktkomplexität greifen CLAEYS ET AL. (2015) die Definition von SAMY und ELMARAGHY (2010) auf, welche Produktkomplexität ($CI_{Produkt}$) als das Ausmaß der Schwierigkeit der Tätigkeitsausführung definieren. Die Produktkomplexität ($CI_{Produkt}$) stellt nach SAMY und ELMARAGHY (2010) die Summe der Komplexität der Handhabung und Montage der innerhalb einer Montageaufgabe adressierten Teilen, Baugruppen, multipliziert mit dem Prozentsatz (x) der Gleichheit der Teile und Baugruppen, wobei n die Anzahl der eindeutigen Teile und Baugruppen repräsentiert, dar.

$$CI_{Produkt} = \sum_{i=1}^{n} x_i \, C_{Teil}$$

Die Komplexität der Teile und Baugruppen (C_{Teil}) wird durch den gewichteten Durchschnitt der durchschnittlichen Handhabungskomplexität (C_h), welche durch das Formteildesign determiniert ist und der durchschnittlichen Montagekomplexität (C_i), determiniert durch die Aufgabe und die Werkzeughandhabung, nach SAMY und ELMARAGHY (2010) bestimmt.

$$C_{Teil} = \frac{C_h \sum_{h=1}^{J} C_{h,f} + C_i \sum_{i=1}^{K} C_{i,f}}{\sum_{h=1}^{J} C_{h,f} + \sum_{i=1}^{K} C_{i,f}}$$

Zur Bestimmung der Komplexität eines Arbeitsplatzes zeigen ZELTZER ET AL. (2012) einige Beispiele für Komplexitätstreiber eines Arbeitsplatzes auf (vgl. Abbildung).

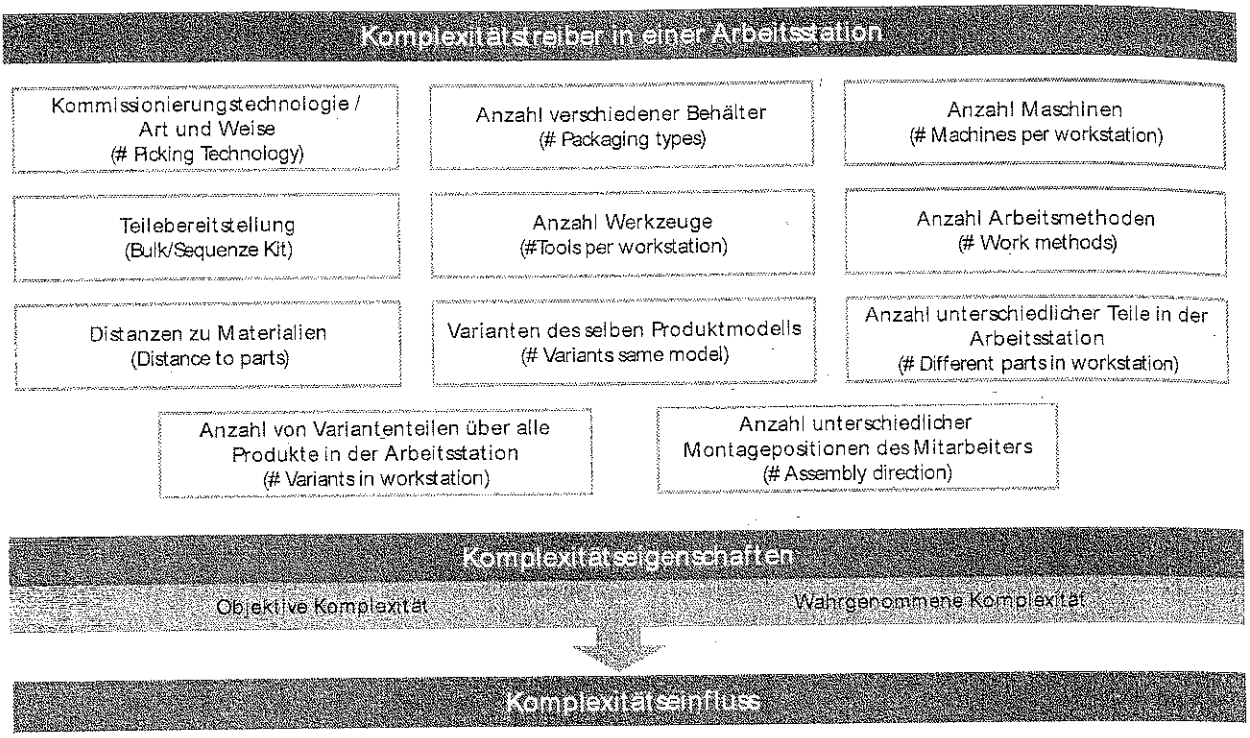


Abbildung 4: Komplexitätstreiber eines Arbeitsplatzes (Zetzler et al., 2012)

In Bezug auf die dargestellten Komplexitätstreiber haben *ZELTZER ET AL.* (2012) ein spezifisches Skalenmodell entwickelt, mit deren Hilfe die Komplexität eines Arbeitsplatzes bestimmt werden kann. Im Folgenden wird ein Auszug des Skalenmodells dargestellt.

Variablen	Beschreibung	Likert Skalierung			
Picking Technology	Festgelegt (F): Operator nimmt Teil immer von der selben Position in einem Großlager. Signal (S): Operator greift Teil von einer Position die mit einem Signal angezeigt wird (Licht, Display). Vergleichen (V): Operator muss simple Informationen vergleichen (Symbole, Farben). Manuell (M): Operator muss umfangreiche Informationen aus einem Ladungsverzeichnis lesen.	F	D	C	M
		1	2	3	4
Bulk/Sequence KIT	Sequenziert (S): Die Teile sind in der Packung in Abhängigkeit ihrer Montagefolge hinterlegt. KIT(K): Teile werden in Kits geliefert. Diese stellen einen Satz Teile für genau eine Montagetätigkeit dar. Bulk/Schüttgut(K): Teile sind je nach Type in Packungen enthalten.	S	K	B	
		1	2	3	
# Packaging types	Die Gesamtzahl unterschiedlicher Verpackungstypen, mit spezifischem Layout. Somit sind zwei identische Boxen mit unterschiedlichem Inhalt zwei verschiedene Typen.	1	2 - 4	5 - 8	>8
		1	2	3	4
# Tools per workstation	Anzahl der Werkzeuge, exklusive automatischer Werkzeuge, die ein Operator braucht, um alle Montagetätigkeiten und Montagevarianten an seiner Station durchführen zu können.	1	2 - 4	5 - 8	>8
		1	2	3	4
# Machines per workstation	Alle automatischen Tätigkeiten die Maschinen ohne Assistenz eines Operators, nach einem automatischen oder manuellen Start, durchführen können.	0	1	2	>2
		0	1	2	3
# Work methods	Jeder spezifische Satz an Arbeitsmethoden den ein Operator an seinem Arbeitsplatz zu meistern hat. Eine Methode enthält mehrere kleine Arbeitsschritte.	0 - 2	3 - 5	6 - 8	>8
		1	2	3	4
Distance to parts	Weiteste Distanz zwischen der Position des Operators (oder dem Zentrum der Arbeitsplätze) und den Teilen (Materialien).	0 - 1	1, 1 - 2	2, 1 - 4	>4
		1	2	3	4
# Variants same model	Größte Anzahl an Varianten die einem Modell zugehörig sind, bezogen auf alle Modelle deren Teile an diesem Arbeitsplatz montiert werden.	1	2 - 3	4 - 5	>5
		1	2	3	4
# Variants in workstation	Gesamtanzahl der Teilevarianten aufsummiert über alle Modelle die an diesem Arbeitsplatz montiert werden.	1	2 - 4	5 - 10	>10
		1	2	3	4
# Different parts in workstation	Gesamtzahl der einzelnen Teilereferenzen die an diesem Arbeitsplatz montiert werden, inklusive aller Varianten und Modelle, die typischer Weise innerhalb eines Jahres anfallen.	1 - 4	5 - 10	11 - 20	>20
		1	2	3	4
# Assembly directions	Anzahl aller unterschiedlichen Positionen, die ein Operator einnehmen muss um einen kompletten Zyklus an seinem Arbeitsplatz durchführen zu können. Hierfür werden sowohl Positionsänderungen des Oberkörpers und der Füße, nicht jedoch kleine Handbewegungen, berücksichtigt.	1	2 - 3	4 - 5	>5
		1	2	3	4

Abbildung 5: Ausgewählte Komplexitätstreiber und Skalierung für Montagestationen mit geringer Komplexität (Zeltzer et al., 2012)

Die Arbeitsplatzkomplexität hat dabei einen wesentlichen Einfluss auf die mentale Beanspruchungssituation der Mitarbeiter. Zur weiteren Bestimmung der Arbeitsplatzkomplexität wird auf ZHU ET AL. (2008) verwiesen, welche innerhalb einer Produktmatrix entsprechende Produktinformationen einer „Mixed-Modell Montage" in strukturieren. Dabei stellt P_{ij} die Nachfrage nach der Variante j in Bezug auf ein Produkt i dar.

$$\begin{bmatrix} pij & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}$$

Entsprechend jeder Zeile kann das Verhältnis Produkt zu Variante wie folgt beschrieben werden:

$$\sum_j pij = 1, \ \forall \text{ i}$$

Die Höhe des Verhältnisses von Produkt zu Variante determiniert die mentale Beanspruchung des Mitarbeiters. Die kognitive Beanspruchung definiert ZHU ET AL. (2008) dabei als Entropie H. Diese dient der Quantifizierung der kognitiven Belastungssituation des Mitarbeiters, welche durch die Auswahl- und Entscheidungskomplexität in Bezug auf alternative Aufgabentätigkeiten bspw. zur Auswahl der richtigen Teile und Baugruppen, der Verwendung der richtigen Werkzeuge und der Durchführung der richtigen Reihenfolge der Aufgabentätigkeit resultiert. Der Faktor p_m stellt dabei den prozentuellen Anteil entsprechend der aufgestellten Produktmatrix dar.

$$H(p_1, p_2, \dots, p_m) = -\sum_{m=1}^{M} p_m log_2 p_m$$

Die für eine Arbeitsstation spezifische Auswahl- und Entscheidungskomplexität wird nach ZHU ET AL. (2008) wie folgt berechnet.

$$C_j = \sum_{k=1}^{K} \alpha_j^k H_j^k, \alpha_j^k > o, k = 1,2, \dots, K$$

Hierbei steht K für die Anzahl der sequenziellen Montagetätigkeiten; α_j^k für die Ausprägung der Montageschwierigkeit der k^{th} Montagetätigkeiten in Arbeitsstation j; H für die Entropie kumuliert über K Montagetätigkeiten an Arbeitsstation j.

Während sich Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität vor allem auf die extrinsische Belastungssituation eines Mitarbeiters auswirkt, ist die Leistungsfähigkeit eines Mitarbeiters in der Montage und dadurch die Produktivität des Arbeitssystems auch von intrinsischen Faktoren determiniert. Dabei sind drei wesentliche Faktoren zu nennen – Mitarbeitereigenschaften, wie beispielsweise Alter, Körpergröße und physische Eigenschaften, Erfahrungsfaktoren, wie beispielsweise Wissen über die Arbeitstätigkeit etc., sowie konditionelle Faktoren. Der Einsatz bzw. der Bedarf kognitiver und digitaler Assistenzsysteme adressiert beide Perspektiven und ist sowohl in Bezug auf die entsprechende Systemkomplexität, als auch auf die spezifischen Mitarbeiteranforderungen zu konzipieren (Claeys et al. 2015). Die folgende Grafik verdeutlicht diese Zusammenhänge.

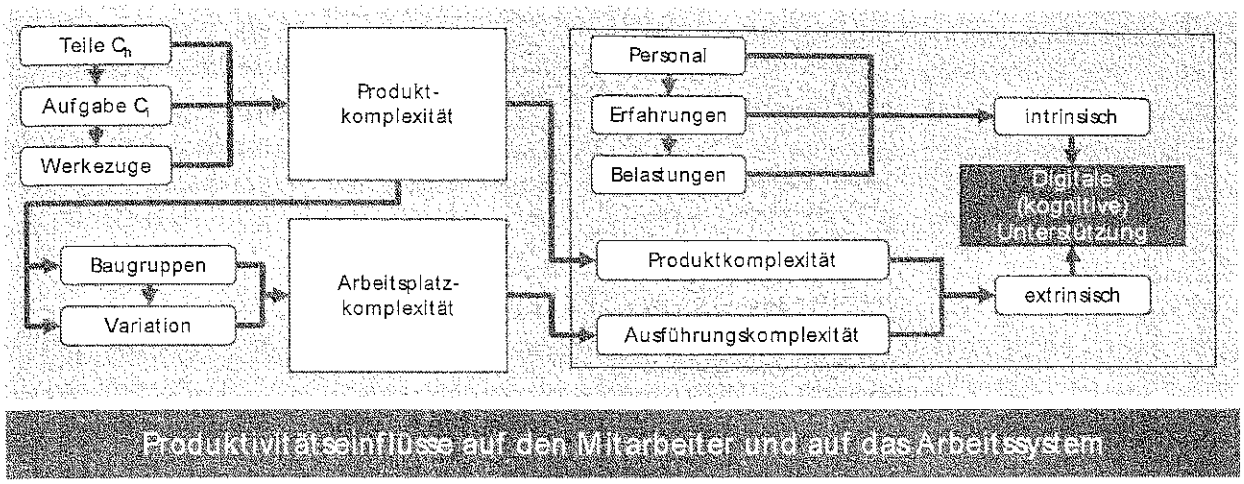


Abbildung 6: Zusammenhänge von digitalem (kognitivem) Unterstützungsbedarf (Claeys et al. 2015)

Den Einfluss von extrinsischen und intrinsischen Faktoren auf die Produktivität δ eines Mitarbeiters sowie der Prozessqualität Q und dem resultierenden Gesamtdurchsatzes (Output) eines Arbeitssystems TH beschrieben durch das Verhältnis zwischen Q und der dafür benötigten Zeit CT, zeigt ADAB ET AL. (2011) innerhalb eines weiteren schematischen Modells auf (vgl. Abbildung).

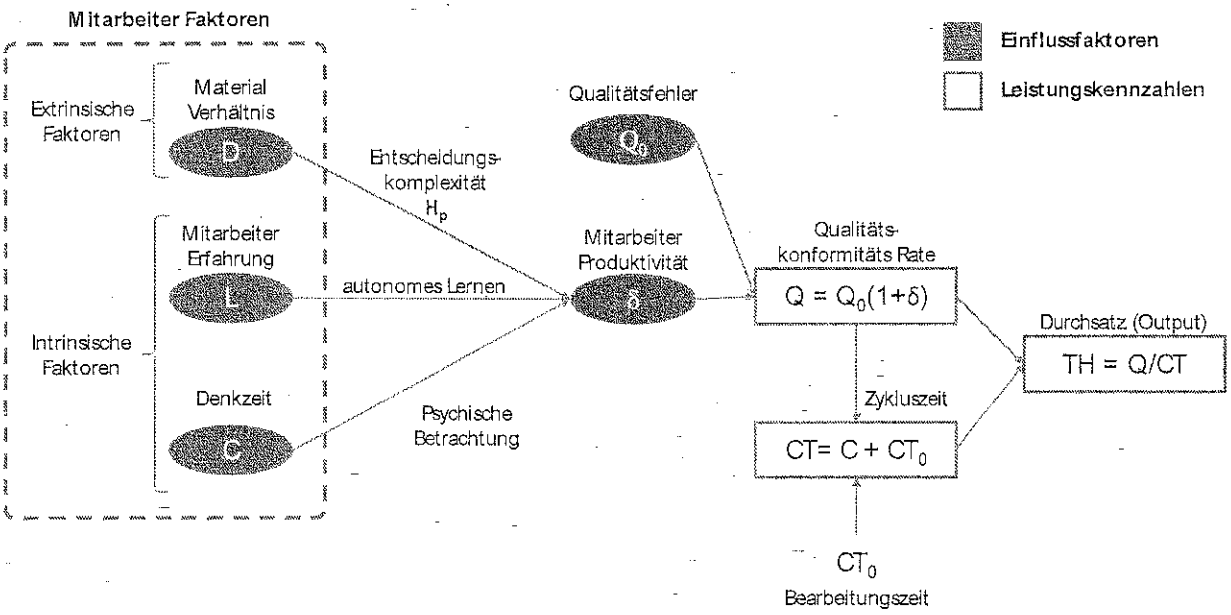


Abbildung 7: Mitarbeitereinfluss auf Prozessqualität und Durchsatz (Abad et al. 2011)

Die beschriebenen Modelle und Ansätze bauen auf evaluierten Architekturen zur allgemeinen Identifikation von kognitivem Assistenzbedarf mit Fokus auf die Montage auf. Dabei

ist festzustellen, dass die Identifikation des Bedarfs für kognitive Assistenz erst nach den wesentlichen Planungsschritten des Arbeitssystems erfolgt. Die dargestellten Funktionen und technischen Komponenten moderner digitaler Assistenzsysteme werden in Bezug auf Ihren Beitrag zur Produktivität des Mitarbeiters und des Arbeitssystems jedoch unzureichend betrachtet. Die wirtschaftliche Evaluierung des Einsatzes zumeist statisch konzipierter Assistenzsysteme erfolgt retrospektiv.

Die Beantwortung der Fragen, welche spezifischen (Sensor-) Informationen das System aus dem realen Shop-Floor in Bezug auf die Unterstützung einer individuellen Arbeitstätigkeit benötigt und welche spezifischen (Steuerungs-) Informationen sowie Schnittstellen das Assistenzsystem mit dem Arbeitssystem aufzuweisen hat, um einen effizienten Beitrag zur Produktivität des Mitarbeiters und des Arbeitssystems zu liefern, erfolgt nicht. Der hohe Abstraktionsgrad der Modelle und Ansätze ermöglicht eine integrative und für die Arbeitsvorbereitung operativ anwendbare Vorgehensweise zur Bedarfsanalyse und zur konzeptionellen Planung des Assistenzsystems nur unzureichend. Zwei wesentliche Gründe sind hierbei zu nennen: Der erste Grund besteht darin, dass gegenwärtig nur wenige praxiserprobte Forschungsergebnisse über die Zusammenhänge von spezifischen Merkmalen von Montagetätigkeiten und deren komplexitätsbedingten Einflüsse auf die Produktivität des Mitarbeiters und eines Arbeitssystems (ElMaraghy/Urbanic, 2004; Bokranz/Landau, 2006) sowie über die Anforderungen an die technische Konzeption von digitalen Assistenzsysteme vorliegen (Wiesbeck et al., 2006; Reinhart/Spillner, 2010; Spillner et al., 2010; Reinhard et al., 2012). Ein weiterer Grund besteht in der Schwäche aktuell verwendeter Methoden und Werkzeuge, adäquat informations- und kommunikationstechnische Anforderungen in Planungs- und Analyseschritten zu adressieren.

3 Konzeption eines MTM-basierten Vorgehensmodell

3.1 Zielsetzung und konzeptioneller Aufbau des Vorgehensmodells

Die Zielsetzung des im Folgenden dargestellten Vorgehensmodells fokussiert die Analyse und Planung von digitalem Assistenzbedarf für Mitarbeiter innerhalb einer komplexen Montageumgebung bzw. -situation unter Berücksichtigung technischer Anforderungen sowie Konzepten für den Einsatz entsprechender Assistenzsysteme bei gleichzeitiger Betrachtung des Einflusses von Produktivitätseffekten auf Mensch und Arbeitssystem, um eine adäquate Unterstützung für eine Investitionsentscheidung zu realisieren. Dabei wird ein integrativer Ansatz gewählt, indem das Modell auf der Methode MTM ansetzt.

MTM ist das in der Industrie weitverbreitetste „System vorbestimmter Zeiten". Die Methode erklärt, dass die bei der Durchführung einer bestimmten Tätigkeit beanspruchte Zeit von der gewählten Arbeitsmethode abhängt. Mittels MTM ist es möglich, durch Analyse des menschlichen Bewegungsablaufes in Bezug auf eine Ist-Situation aber auch in Bezug auf eine Plan-Situation auf die für die Durchführung einer Tätigkeit benötigte Zeit zu schließen.

Das Ergebnis einer MTM Analyse sind strukturierte Bewegungsabläufe, welche auf Grundbewegungen basieren, wie beispielsweise Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen, Loslassen, Blicken. Jeder Grundbewegung sind Normzeiten zugeordnet, die einem einheitlichen und international anerkannten Leistungsstandard unterliegen. Die beanspruchte Zeit, die für die Ausführung der Arbeitsaufgabe benötigt wird, ist dabei von der Positionierung, der Greifweite (Orientierung) sowie durch das Gewicht der zu handhabbaren Objekte (Materialien, Werkzeuge, Hilfs- und Betriebsmitteln, etc.) beeinflusst.

Die Verwendung von MTM stellt eine valide Basis zur Identifikation von Mängeln in manuell geprägten Ablaufprozessen dar und zielt im Sinne der Philosophie des Lean Managements auf die Identifikation, Bewertung, Verringerung und Beseitigung von Verschwendungen ab (Bokranz/Landau, 2012; Maynard, 1948). Zur Planung und Analyse digitaler Assistenzsysteme ist MTM gegenwärtig nur bedingt geeignet (Zaeh et al., 2009), da Anforderungen an Informations- und Kommunikationstechnologien nicht berücksichtigt werden. Dennoch wird für dieses Vorgehensmodell MTM als Grundlagenbasis verwendet, der Annahme folgend, dass durch den Einsatz von statistischer Datenanalyse sowie durch Einsatz von Data-Mining Algorithmen implizierte Informationen aus einer MTM Analyse zur adäquaten Analyse und Planung von digitalem Assistenzbedarf verwendet werden können. Diese Annahme stützt sich auf den sehr detaillierten Beschreibungsgrad einer Arbeitstätigkeit mittels MTM sowie darauf, dass weitere implizite Informationen, bspw. aus CAD-Daten oder aus Manufacturing Bill of Materials (MBOM) zu einem Produkt vorliegen und verwendet werden können. In ersten Studien konnte bereits gut auf die eine Komplexitätsbestimmung des Arbeitsplatzes mittels einer MTM-Analyse geschlossen werden.

Beschreibung	Montage eines Spielzeug-LKWs				
Start	Mitarbeiter steht an Arbeitsstation				
Ende	Mitarbeiter steht an Arbeitsstation				
Einschränkung	-				
Nr.	Beschreibung	MTM-Code	Anzahl x Häufigkeit	TMU (total) (Time Measurement Unit)	Zeit in Sekunden
1	Gehen zu Supermarkt und zurück	KA	7	175	6
2	Aufnehmen und Abstellen eines Transportbehälters	AB1	1	30	1
3	Sammelgriff in Behälter mit Reifen (4 Reifen)	AG2	2	130	5
4	Sammelgriff in Behälter mit Felgen (4 Felgen)	AG2	2	130	5
5	Eine Fahrerkabine aus Behälter aufnehmen und ablegen	AB1	2	30	1
6	Drei Fenster aus Behälter aufnehmen	AG2	2	130	5
7	Reifen in Vorrichtung A einlegen	PC1	8	120	4
8	Felgen in Vorrichtung A einlegen	PC1	8	120	4
9	Manuell Verpressen und weglegen	ZD	8	160	6

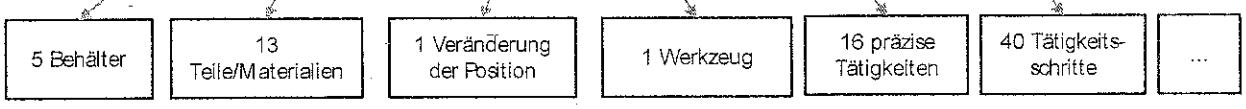


Abbildung 8: Schematisches Beispiel impliziter Informationen einer MTM-Analyse

Die in dem folgenden Beispiel angeführte Berechnung basiert auf einer von ZELTZER (2015) evaluierten Formel zu Bestimmung der Arbeitsplatzkomplexität mit geringer Ausprägung. Die folgende Formel berücksichtigt dabei die Anzahl verschiedener Teile im Arbeitssystem (PWL), die Anzahl von Behältern im Arbeitssystem (PTL), die Anzahl unterschiedlicher Montagepositionen des Mitarbeiters (ADL) sowie die Anzahl verschiedener Werkezuge am Arbeitsplatz (TWL) (Zeltzer, 2015).

$$P(LOW) = \frac{e^{18.164-3173PWL-2326PTL-2182ADL-0.344TWL}}{1+e^{18.164-3173PWL-2326PTL-2182ADL-0.344TWL}}$$

Beschreibung	Gehäuse montieren								
Start	Gehäuse an Arbeitsplatz holen								
Ende	Ablegen der Baugruppe								
Einschränkung	-								
Nr.:	Beschreibung:	MTM-Code	Anzahl x Häufigkeit	TMU (total) (Time Measurement Unit)	Zeit in Sekunden	PWL	PTL	ADL	TWL
1	Zum Transportwagen und zurück	KA	2x2	100	4			2	
2	Verpacktes Gehäuse auf Tisch	AH1	1	25	1	1	1		
3	Gehäuse auspacken	M-AHC	1	310	11				
4	Messer	M-EH2	1	40	1				1
5	Gehäuse in Vorrichtung	AJ2	1	65	2				
6	Abdeckung auf Gehäuse	AB2	1	45	2	1	1		
7	Abdeckung auf Bohrungen ausrichten	PB1	1	20	1				
8	Schraube paarweise andrehen von Hand	M-SBA	2	250	9	1	1		
9	Schraube festziehen	M-SHS	4	240	9				
10	Schrauber	M-EH3	1	55	2				1
11	Baugruppe aus Vorrichtung auf Tisch	AH3	1	55	2				
						3	3	2	2
						1	2	2	2

Modell:	E-Fkt.	197,749287
LOGIT-SAMPLE (P(low))	[illegible]	[illegible]

Abbildung 9: Bestimmung der Arbeitsplatzkomplexität auf Basis von Informationen einer MTM-Analyse

Die gewonnenen Informationen werden anschließend genutzt, um entlang der kognitiven Architektur die Einsatzbedarfe digitaler Assistenzsysteme und deren tätigkeitsspezifische Einsatzbereiche zu ermitteln. Die Komplexitätsgrade aus den Perspektiven von Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität werden dabei zunächst für einen einzelnen produktspezifischen Tätigkeitsschritt und anschließend für eine produktspezifische Tätigkeitssequenz ermittelt. Entsprechend dem Konzept der „Mixed-Model Montage" werden anschließend die Komplexitätsgrade über verschiedene Produkte summiert betrachtet. Auf Grundlage des gelösten „Line-Balancing Problem" (McMullen und Frazier, 1997) erfolgt schließlich eine entsprechende Summierung auf Arbeitsplatzebene. Über das Ergebnis sind erste Rückschlüsse auf den potenziellen Bedarf und die tätigkeitsspezifischen Einsatzbereiche digitaler Assistenzsysteme zu ziehen.

In Ergänzung zu den auf diese Art gewonnen Erkenntnissen zu „extrinsischen" Einsatzbedarfen digitaler Assistenzsysteme erfolgt schließlich eine Betrachtung der „intrinsischen" Einsatzbedarfe digitaler Assistenzsysteme (Claeys et al., 2015; Zeltzer et al, 2012). Die vorliegenden Ergebnisse werden dabei in Bezug auf Mitarbeiterprofile, in Hinblick auf

Erfahrungen, Fähigkeiten, Know-how, Geschicklichkeit, etc. sowie in Bezug auf physische Belastungssituationen korreliert. Zur Quantifizierung der physischen Belastungssituation wird dabei unteranderem auf bestehende Methoden, wie beispielsweise auf die Leitmerkmalmethode „Manuelle Arbeitsprozesse" zurückgegriffen (Richter, 2010). Zur Quantifizierung des Produktivitätseffektes durch den Einsatz digitaler Assistenzsysteme wird synchron zum Faktor Zeit basierend auf der vorliegenden MTM-Analyse die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines menschenbedingten Fehlers mittels der Methode „Human Error Probability" (Khan et al., 2006) ermittelt. Hierbei erfolgt die Analyse ebenso zunächst für einen einzelnen produktspezifischen Tätigkeitsschritt und anschließend für eine produktspezifische Tätigkeitssequenz. Entsprechend dem Konzept der „Mixed-Model Montage" werden anschließend die Ergebnisse über verschiedene Produkte summiert betrachtet. Die ermittelten Ergebnisse werden darauffolgend im Hinblick auf die Ermittlung einer ganzheitlichen Darstellung der potenziellen Bedarfe und Einsatzbereichen von digitaler Assistenz zusammengefasst. Die Zusammenfassung erfolgt an dieser Stelle zunächst für einen einzelnen produktspezifischen Tätigkeitsschritt und anschließend für eine produktspezifische Tätigkeitssequenz produktübergreifend und unter Berücksichtigung der Arbeitsplatzstruktur.

Auf Basis der ermittelten Bedarfsfelder digitaler Assistenzsysteme wird anschließend durch Verwendung von statistischer Datenanalyse und von Data-Mining Algorithmen eine Korrelationsausprägung zu den unterschiedlichen Anforderungskategorien in Bezug auf die Art von digitalen Assistenten (Anweisung, Produkt-Informationsdarstellung, usw.), in Bezug auf die Zeit (auf Wunsch des Bedieners oder automatisch) und in Bezug auf die Form (mobil, semi-mobil oder statisch) (vgl. Kapitel 2.1) ermittelt. Aus diesem Weg entsteht eine systematische und der individuell betrachteten Tätigkeit entsprechende Strukturierung der Anforderungen entlang der betrachteten MTM-Analysen.

In einem weiteren Schritt gilt es, diese Anforderungen sowie deren Ausprägung mit verschiedenen technischen Komponenten und deren Merkmalen von digitalen Assistenzsystemen in Zusammenhang zu bringen. Das Vorgehensmodell sieht hierbei eine entsprechende Korrelationsanalyse entlang der Bereiche

- Sensorkomponenten zur Informationsermittlung (bspw. Sensorkomponenten für die lokale Positionierung von Mensch, Hilfs- und Betriebsmitteln, Werkzeugen und Mensch, etc.),
- Informationswiedergabe und -nutzung (bspw. Anweisungsdarstellung, Warnungssignalen, Werkzeugsteuerung und -konfiguration, etc.) sowie
- Informationsrepräsentation (bspw. Monitore, mobile Divices, Projektion, etc.) vor.

Dabei bedient sich das Vorgehensmodell der Methode des „Quality Function Deployments" (QFD). QFD ist eine Methode zur Unterstützung einer kundenorientierten und systematischen Produktentwicklung. Entlang einer variierenden Reihe von Matrizen werden kontinuierlich Anforderungen mit Produktmerkmalen in Bezug auf deren Einfluss- und Bedeutungsfaktor verglichen, ähnlich einer Nutzwertanalyse (Saatweber, 2011). Das dieser Methode zu Grunde gelegte Schema kann nicht nur zur Produktentwicklung angewandt werden, sondern kann auch auf unterschiedliche Entwicklungsprozesse umgelegt werden. Auf diese Weise eignet sich die Methode auch um Technologieentscheidungen zu unterstützen (Spath, 2004). Diesbezüglich interagiert das Vorgehensmodell mit einer hinterlegten Technologie-Datenbank, in welcher die technischen Komponenten und deren Merkmale sowohl im Hinblick auf den Einflussfaktor zur Erreichung der oben dargestellten Anforderung, deren Investitionskosten sowie im Hinblick auf den Einflussfaktor zu Absicherung von menschlichen Qualitätsfehlern hinterlegt sind. Das Modell ist auf diesem Wege in der Lage einen Vorher-/Nachher-Vergleich im Hinblick auf den Einfluss digitaler Assistenzsysteme auf die Fehlerwahrscheinlichkeit, basierend auf Studienerkenntnissen, durchzuführen und in diesem Sinne den Einfluss auf die Produktivität des Menschen aber auch des Arbeitssystems zu ermitteln. Benötigte Investitionskosten können auf diese Weise mit Kostensätzen zur Behebung der jeweiligen Fehler verglichen werden. Dadurch wird eine Unterstützung zur Investition ermöglicht. Der konzeptionelle Aufbau des Modells wird in folgender Grafik dargestellt.

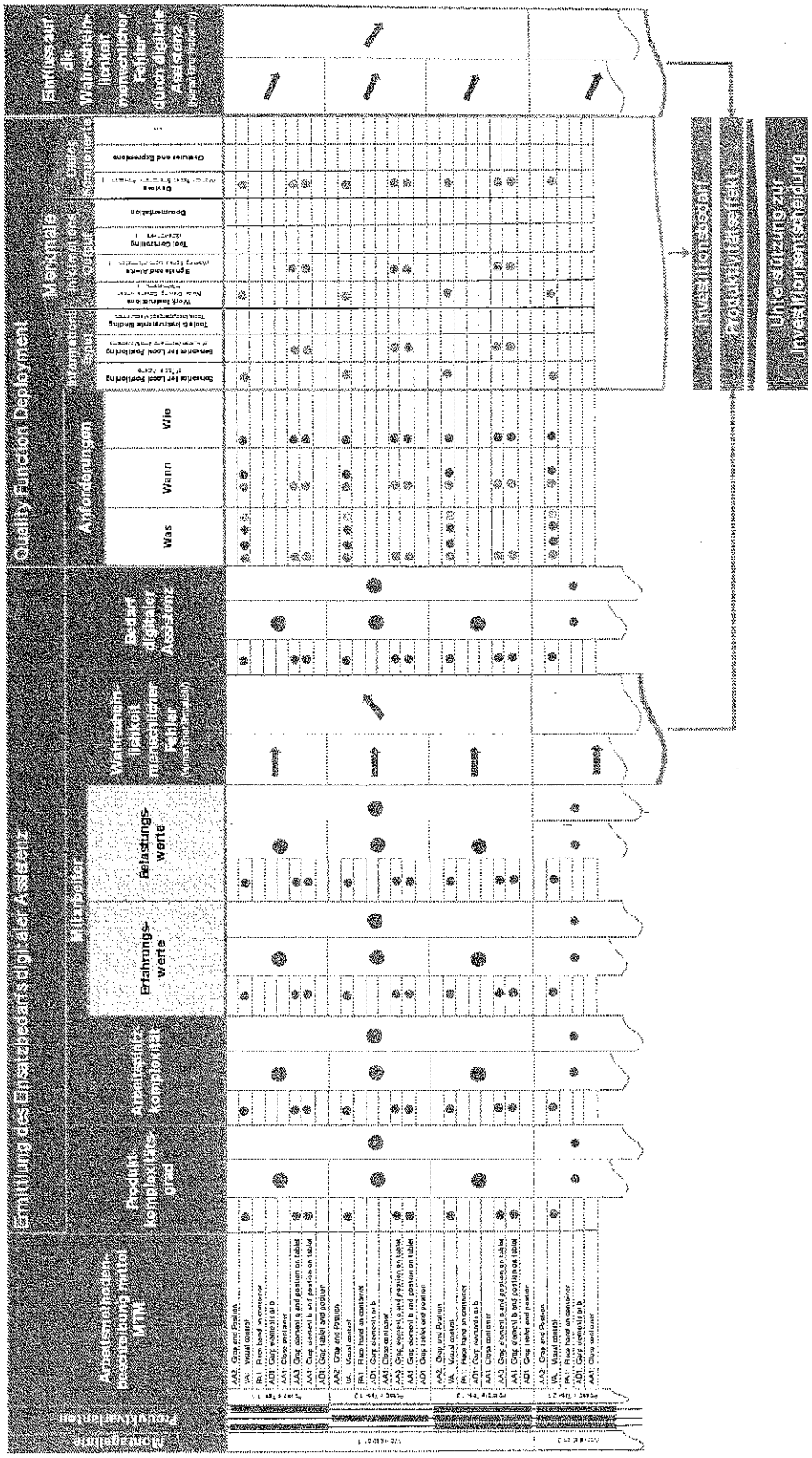


Abbildung 10: Konzeptioneller Aufbau des Vorgehensmodells

3.2 Vorstudien zur Evaluierung der Bewertungszusammenhänge

Ein Hersteller von komplexen Antriebssystemen für den Non-Automotive-Sektor möchte in einem „Mixed Modell Montage"-Konzept zukünftig unterschiedliche Komponenten zur selben Zeit auf derselben Linie montieren, was bislang nur separat und in Arbeitsteilung durchgeführt wurde. Auf Basis einer MTM-Analyse konnte ermittelt werden, dass rund 90% der Vorgabezeiten sich aus den generischen Vorgängen „Zusammensetzen", „Verschrauben" und „Prüfen" in Abhängigkeit der Produktspezifikation zusammensetzen. Die Analyse der Montagefehlerhistorie sowie mittels der Methode „Human Error Probability" zeigt, dass im künftigen Variantenmix an einer Station ein besonders hohes Fehlerpotenzial vorliegt. An jener Station werden an allen Werkstücken mehrere filigrane, variantenspezifisch unterschiedliche Dichtungen an ebenso variantenspezifisch wechselnden Positionen auf den Werkstücken positioniert.

Vertiefenden Analysen dieses Anwendungsfalls ergaben im Hinblick auf extrinsische Belastungen des Mitarbeiters, dass auf Grundlange von vier grundsätzlich unterschiedlichen Produkten (zwei Motoren und zwei Getrieben) in jeweils acht Varianten, die Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität stark ausgeprägt ist vor allem eine hohe „choice task complexity" aufweist. Die komplementäre, intrinsische Belastung ergibt sich durch die notwendige Auswahl der richtigen Komponenten und Fügepositionen, welche Entscheidungszeiten verursachen und statistisch belegtes Fehlerpotenzial bergen. Sowohl die Zykluszeit CT als auch die Gutteilrate Q sind somit aufgrund der ex- und intrinsischen Belastungsfaktoren D und C nach ABAD ET AL. (2011) negativ beeinflusst und indizieren einen grundsätzlichen Assistenzbedarf. Aufgrund der optisch schwer zu unterscheidenden Verbauteile und der nach optischen Kriterien im jeweiligen Moment nicht zu identifizierenden vorliegenden Produktvariante ist eine nennenswerte Mitarbeitererfahrung und -routinierung L in positivem Bezug zur extrinsische Arbeitsplatzkomplexität kaum zu erzielen.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde empfohlen, die Arbeit an dieser Station besonders zu instruieren und zu überwachen. Besondere Anforderungen an die digitale Assistenz wurde vor dem Hintergrund gestellt, dass sich die Mitarbeiter frei bewegen können, und jeder Prüfschritt (lt. Kundenauftrag) im ERP-System zu dokumentierten ist. Mittels der Methode QFD wurden die ermittelten Anforderungen mit auf dem Markt verfügbaren Assistenzsystemen, deren Merkmalen und technischen Fähigkeiten und Funktionen verglichen. Diese Vorgehensweise führte zu einer effizienten Eingrenzung des Lösungsraums.

Zur Absicherung der Dichtungsmontage wurde neben einem Pick-to-Light-System zur Unterstützung der korrekten Teileauswahl eine Projektion der Platzierpositionen auf das Werkstück und eine zusätzliche kameragestützte Prüfung des Vorhandenseins der Dichtungen vorgesehen. Aufgrund der Mobilität der Mitarbeiter im Arbeitssystem wurden an allen anderen Stationen, die nach Analyse keinen gesteigerten Assistenzbedarf erkennen lassen, monokulare Datenbrillen zum Einsatz empfohlen, auf welchen Varianteninformationen textuell, Fügevorgänge über 3D-Animationen und Prüfvorgänge statisch über Bilder instru-

iert werden können. Fügevorgänge werden über Schraubersignale rückgemeldet, Prüfvorgänge über die Messwertgeber. Rein visuelle Prüfungen sollen vom Werker sprachgesteuert quittiert werden.

Keiner der identifizierten Technologieanbieter erfüllt diese Anforderungen zum Zeitpunkt vollends. Letztlich wird ein marktverfügbares Assistenzsystem auf der Basis von Datenbrillen zunächst pilothaft unter Einbeziehung der Montagemitarbeiter und der Arbeitsvorbereiter zur Sicherung der Nutzerakzeptanz eingeführt und nach Feststellung der Eignung auf die gesamte Linie ausgerollt. Die Lösung zur Unterstützung der Dichtungsmontage wird zunächst separat durch einen zusätzlichen Partner entwickelt und dann in die Gesamtapplikation integriert. Durch die strukturierte Vorgehensweise zur Ermittlung des konkreten Assistenzbedarfs können Hinweise zur adäquaten Ausgestaltung und -skalierung des Assistenzsystems und damit eine den tatsächlichen prozessualen Anforderungen genügende Einführungsentscheidung getroffen werden. Im Umkehrschluss werden Fehlinvestitionen in nicht erforderliche Unterstützungslösungen von vornherein vermieden.

3.3 Ausblick

Ein weiteres Teilziel des in Kapitel 3.2 dargestellten konzeptionellen Vorgehensmodells ist es, quantifizierbare und nach Möglichkeit automatisierte Aussagen zur Planung und Analyse von digitalem Assistenzbedarf und dessen Einflussfaktor auf die Produktivität des Menschen und des Arbeitssystems zu gewinnen. Während heute bereits in Pilotstudien qualitative Zusammenhänge entsprechend des Konzeptansatzes ermittelt werden können (vgl. Kapitel 3.1), ist in weiteren Forschungs- und Entwicklungsschritten zum einen durch vertiefende Studien zu ermitteln, welche implizierten Informationen aus MTM-Arbeitsmethodenbeschreibungen und weiterführenden Informationsgrundlagen wie CAD-Modellen, Stück- und Materiallisten zur Berechnung von Produkt- und Arbeitsplatzkomplexität ableitbar sind – welche Lücken in Hinblick auf eine mathematische Beschreibung bestehen und welche spezifischen Informationen zu ergänzen sind. Des Weiteren gilt es, in Hinblick auf eine mathematische Beschreibung, vertiefende Erkenntnisse über die Wirk- und Funktionszusammenhänge zwischen dem Einfluss von digitaler Assistenz und der einzelnen technischen Funktionen und Konzeptionen in Hinblick auf individuelle Tätigkeiten und deren Sequenzen zu gewinnen. Vor diesem Hintergrund wird gegenwärtig im Rahmen des oben dargestellten Projekts „Industrie 4.0 Pilotfabrik" an der Technischen Universität eine entsprechende Forschungs- und Evaluierungsumgebung entwickelt. Innerhalb des in Kapitel 1 beschriebenen Montagekonzepts werden unterschiedliche Funktionsweisen und technische Komponenten von digitalen Assistenzsystemen installiert und getestet. Die jeweiligen digitalen Assistenzsysteme können frei aktiviert und deaktiviert werden. Parallel hierzu werden so genannte „Human Motion Capture" Systeme zur echtzeitnahen Analyse von Belastungssituationen der Mitarbeiter installiert. Auf diese Weise ist es möglich, für spezifische Tätigkeiten und unterschiedliche Formen der digitalen Assistenz vertiefende Erkenntnisse über Wirk- und Funktionszusammenhänge des oben dargestellten Vorgehensmodells zu identifizieren. Parallel werden gegenwärtig bei zwei österreichischen Unternehmen entlang verschiedener Test- und Versuchsreihen innerhalb eines „Mixed-Modell

Montagesystems" gemäß einem entwickelten Fragebogen mitarbeiterindividuelle Erfahrungen zum Umgang als auch zur spezifischen Unterstützung verschieden technisch ausgestatteter digitaler Assistenzsysteme in Bezug auf unterschiedliche Montagetätigkeiten durchgeführt und ausgewertet.

4 Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt die Potenziale und Möglichkeiten digitaler Assistenzsysteme im Kontext stetig wechselnder und kurzzyklischer Arbeitsinhalte in Montagesystemen der Zukunft und verdeutlicht die Problematik einer effizienten Planung und Analyse entsprechender Systeme in Hinblick auf eine Investitionsentscheidung. Ferner stellt der Beitrag einen konzeptionellen Ansatz für ein MTM-basiertes Planungs- und Analysemodell dar. Das dargestellte Vorgehensmodell basiert dabei auf einem entwickelten kognitiven Modellierungsregelwerk zur Bedarfsidentifikation digitaler Assistenz, welches mathematisch beschrieben werden kann. Dabei folgt das Vorgehensmodell der Annahme, dass für die entsprechende Berechnung benötigte Informationen mittels Methoden der statistischen Datenanalyse und Mittels Methoden des Data-Mining aus vorliegenden MTM-Arbeitsmethodenbeschreibung, identifiziert werden können. Für individuelle MTM-Arbeitsmethoden kann auf diese Weise produktspezifisch, aber auch produktübergreifend für spezifische Montagearbeitsplätze auf den potenziellen Einsatzbedarf von digitalen Assistenzsystemen geschlossen werden. Der Detaillierungsgrad einer MTM-Arbeitsmethodenbeschreibung ermöglicht es dabei, Anforderungen an digitale Assistenzsysteme zu spezifizieren und mittels der Methode „Quality Function Deployment" Korrelationsbeziehungen zwischen den identifizierten Anforderungen und bekannten technischen Komponenten und Merkmalen digitaler Assistenzsysteme abzuleiten. Auf diese Weise gelingt es, im Hinblick auf die Ausführung einer Montagetätigkeit benötigte Komponenten digitaler Assistenzsysteme zu identifizieren, worüber verbundene Investitionskosten ermittelt werden können. Die benötigten Investitionskosten werden mit durch die Bereitstellung einer entsprechenden digitalen Assistenz zu erzielenden Produktivitätseffekten verglichen. Hierzu wird entsprechend der vorliegenden MTM-Arbeitsmethodenbeschreibung die Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler mittels Modellberechnungen zur „Human Error Probability" berechnet, welche mit Aufwandkosten zu hinterlegen ist. Über einen Vergleich dieser Wahrscheinlichkeiten mit und ohne Einsatz eines digitalen Assistenzsystems kann eine Investitionsentscheidung für einen Montagebetrieb unterstützt werden. Das beschriebene Konzept wird gegenwärtig in dem Projekt „Industrie 4.0 Pilotfabrik" an der technischen Universität Wien weiterentwickelt und evaluiert.

Danksagung

Der Beitrag wurde durch Forschungsmittel der Technischen Universität Wien unterstützt. Dieser finanziellen Unterstützung sind die Autoren dankbar.

Literatur

Abad, A.G., Paynabar, K., Jin, J.J., 2011.
Modeling and analysis of operator effects on process quality and thoughput in mixed model assembly systems. Journal of manufacturing science and engineering, 133 (2), 2011

Bokranz, R., Landau, K., 2012.
Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM. Schäfer-Peschel, 2012

Bullinger, H. J., 1986.
Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis. München, Hanser, 1986

Claeys, A., Hoedt, S., Soete, N. , Landeghem, H. Van, Cottyn, J., 2015.
Framework for Evaluating Cognitive Support in Mixed Model Assembly Systems. IFAC-Pap., Bd. 48, Nr. 3, S. 924–929, 2015

Deuse, J., Weisner, K., Hengstebeck, A., Busch, F., 2014.
Gestaltung von Produktionssystemen im Kontext von Industrie 4.0. In: Botthof, A./ Hartman, E. A. (Ed.). Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Springer, Berlin. 2014

Dombrowski, U., Riechel, C., Evers, M., 2014.
Industrie 4.0 - Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution. In: Kersten, W./ Koller, H./ Lödding, H. (Ed.). Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. GITO mbh Verlag, Berlin, 2014

Dombrowski, U., Wagner, T., Riechel C., 2013.
Concept for a Cyber Physical Assembly System. In: IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM), 2013, S. 293-296

ElMaraghy, W. H., Urbanic, R. J., 2004.
Assessment of Manufacturing Operational Complexity. Annals of the CIRP 53 (2004) 1, S. 401-406.

Erol, S., Jäger, A., Hold, P., Ott, K., 2016.
Tangible Industry 4.0: A scenario-based learning factory approach for future production. Procedia CIRP (Paper accecpted), 2016

Fast-Berglund, A., Fässberg, T., Hellman, F., Davidsson, A., Stahre, J., 2013.
Relations between complexity, quality and cognitive automation in mixed-model assembly. Journal of manufacturing systems, 32 (3). 2013. S. 449 – 455

Geisberger, E., Broy, M., Cengarle, M. V., Keil, P., Niehaus, J., Thiel, C., Thönnißen-Fries, H., 2012.
agendaCPS. Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems. Hg. v. Eva Geisberger und Manfred Hans Bertold Broy. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. München, Berlin (acatech Studie). 2012

Hirsch-Kreinsen, H., 2014.
Entwicklungsperspektiven von Produktionsarbeit. In: Botthof, A., Hartman, E. A. (Ed.).: Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Springer, Berlin, 2014

Hold, P., Ranz, F., Hummel, V., Sihn, W., 2015
Durchblick im Variantendschungel - Visuelle Assistenzsysteme als Flexibilitätshebel auf dem Shop Floor. Wing Business. 48. Jahrgang, 2/2015, 2015

Hollnagel, E., 1987.
Information and reasoning in intelligent decision support systems. In: International Journal of Man-Machine Studies, 27 (5), S. 665-678

Khan, F. I., Amyotte, P. R., DiMattia, D. G., 2006.
HEPI: A new tool for human error probability calculation for offshore operation. Saf. Sci., Bd. 44, Nr. 4, S. 313–334, 2006

Konold, P., Reger, H., 2003.
Praxis der Montagetechnik. Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg. 2003

Krieger, C., 2014.
Voller Durchblick – Datenbrillen im Produktionsprozess. Vortrag, Tag der Wissenschaft, 18.06.2014, HTWK Leipzig

Kuhlang, P., 2015.
Modellierung menschlicher Arbeit im Industrial Engineering. Grundlagen, Praxiserfahrungen und Perspektiven, Ergonomia Verlag Stuttgart, 2015

Kuhlang, P., Finsterbusch, T., Busenbach, M., Britzke, B., Mühlbrandt, T., Kille, K., 2014.
Die Arbeit (auch) vom Menschen her denken: Modellierung produktiver Arbeit - Eine Kernaufgabe bei Industrie 4.0. In: Kersten, W., Koller, H., Lödding, H. (Ed.): Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. GITO mbh Verlag. Berlin. 2014

Lotter, B., 1992.
Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992

Lotter, B., Wiendahl, H.-P., 2006.
Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis. Oberderdingen: Springer, 2006.

Zaeh, M. F., Wiesbeck, M., Stork, S., Schubö, A., 2009.
A multi-dimensional measure for determining the complexity of manual assembly operations. Prod. Eng., Bd. 3, Nr. 4–5, S. 489–496, 2009

Maynard, H.B., Stegemerten, G.J., Schwab, J.L., 1948.
Methods-time Measurement, McGraw Hill, New York.

McMullen, P. R., Frazier, G.V., 1997.
A heuristic for solving mixed-model line balancing problems with stochastic task durations and parallel stations. In: Int. J. Prod. Econ., Bd. 51, Nr. 3, S. 177–190, 1997.

Reinhart, G., Spillner, R., 2010.
Assistenzroboter in der Produktion. In: Intelligente Mechatronische Systeme. Tagungsband : Winterthur 3.-4. November 2010. Internationales Forum Mechatronik. Winterthur: IMS Institut für Mechatronische Systeme, 2010

Reinhart, G., Spillner, R., Shen, Y., 2012.
Approaches of Applying Human-Robot-Interaction-Technologies to Assist Workers with Musculoskeletal Disorders in Production. In: Chun-Yi Su, Subhash Rakheja und Honghai Liu (Hrsg.): Intelligent robotics and applications. 5th In-ternational Conference, ICIRA 2012, Montreal, QC, Canada, October 3-5, 2012, proceed-ings, Bd. 2. Heidelberg, New York: Springer 2012, SS. 74–85.

Richter, G., 2010.
Toolbox Version 1.2 - Instrumente zur Erfassung psychischer Belastungen. 1. Auflage. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2010

Saatweber, J., 2011.
Kundenorientierung durch Quality Function Deployment: Produkte und Dienstleistungen mit QFD systematisch entwickeln. Symposion Publishing GmbH, 2011

Samy, S., ElMaraghy, H., 2010.
A model for mea-suring products assembly complexity. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 23 (11), S. 1015–1027, 2010

Sarissa, 2016.
Sarissa GmbH, Onlinequelle http://www.sarissa.de/produkte-leistungen.html. Eingesehen am 05.04.2016

Spath, D., 2004.
Forschungs- und Technologiemanagement. Potenziale nutzen - Zukunft gestalten. München, Hanser, 2004

Spillner, R., 2015.
Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion. Dissertation. Herbert Utz Verlag. München. 2015

Wiesbeck, M., 2015.
Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. Dissertatio,. Herbert Utz Verlag, München, 2015

Wiesbeck, M., Zaeh, M. F., Rudolf, H., Vogl, W., 2006.
New Media and Technology Support in Manual Assembly. In: Fischer, X. et al. (Hrsg.): Research in Interactive Design: Proceed-ings of Virtual Concept 2006. Playa Del Carmen / Mexiko, 26. November - 1. Dezember 2006. Paris / Frankreich: Springer 2006

Wille, M., Grauen, B., 2013.
Head-Mounted Displays – Beanspruchung im Langzeiteinsatz. Vortrag, 3. Experten-Workshop Datenbrillen, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 03.06.2013

Zeltzer, L., Limère, V., Aghezzaf, E. H., 2012.
Measureing the objective complexity of assembly workstations. In: ICCGI, 2012, The seventh International Multi-Conference on Computing in the Global Information technology, S. 341-346, 2012

Zeltzer, L., 2015.
Analysing and Levelling Manufacturing Complexity in Mixed-Model Assembly Lines. Dissertation, Universität Gent, 2015

Zhu, X., Hu, S.J., Koren, Y., Marin, S.P., 2008.
Modeling of manufacturing complexity in mixed-model assembly lines. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 130(5), 2008