

Daniel Roesmann

***Menschenzentrierte Montageplanung
und -steuerung***

***Human centered assembly planning
and control***

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Band 418 der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

© Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn – Paderborn – 2024

ISSN (Online): 2365-4422

ISBN: 978-3-947647-37-8

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

Als elektronische Version frei verfügbar über die Digitalen Sammlungen der Universitätsbibliothek Paderborn.

Satz und Gestaltung: Daniel Roesmann

Hersteller: Dreambox publishing GmbH
Dortmund

Printed in Germany

Menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)
der Fakultät Maschinenbau
der Universität Paderborn

genehmigte
DISSERTATION

von
M.Sc. Daniel Roesmann
aus Münster

Tag des Kolloquiums:
Referent:
Korreferent:

12.03.2024
Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung am Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn. Sie ist das Ergebnis meiner wissenschaftlichen Arbeit in Forschungs- und Industrieprojekten.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler, die mich stets unterstützte. Die mir übertragene Verantwortung als Gruppenleiter und die damit verbundene Möglichkeit die Gruppe für Informations- und Produktionsmanagement aufzubauen, habe ich als außerordentliche Chance wahrgenommen.

Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Burkhard Corves von der Rheinisch-Westfälischen Technische Hochschule Aachen (RWTH).

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr.-Ing. Jens Pottebaum für die freundschaftliche und vertrauensvolle Zusammenarbeit in den vergangenen Jahren. In der gemeinsamen Zeit in Projekten, Vorlesungen und Seminaren habe ich sehr viel gelernt. Dein Feedback war mir immer sehr wertvoll. Ich blicke auf eine wunderbare Zeit mit dir zurück!

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen im Lehrstuhl danke ich für die hervorragende und kollegiale Zusammenarbeit. Der außergewöhnliche Teamgeist und das offene Feedback haben wesentlich zum Erfolg meiner Promotion beigetragen. Hervorheben möchte ich Dominik Wiechel, Daniel Preuß, Henrik Thiele und Michael Hieb. Ich danke euch für die gemeinsame Zeit und die schönen Momente! Ein besonderer Dank gilt den studentischen Hilfskräften, die tatkräftig am Lehrstuhl mitwirken. Ausdrücklich erwähnen möchte ich Timo Heidloff und Levi Kletetzka für ihren Einsatz und Unterstützung. Weiterhin möchte ich mich ausdrücklich bei Ullrich Huesken bedanken, der guten Seele des Lehrstuhls.

Von ganzem Herzen danke ich meiner Familie und meiner Freundin Ann-Christin. Danke für die vielfältige Unterstützung. Ihr habt mich über die gesamte Zeit verständnisvoll bestärkt, motiviert und mir den Freiraum zur Erstellung der Dissertation gegeben. Vielen Dank für alles!

Münster, im März 2024

Daniel Roesmann

Vorveröffentlichungen

- [GRP20] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Entwicklung eines Prüfstands für die Bewertung von kompetenzbildenden Assistenzsystemen in Cyber-physischen Produktionssystemen. In: Frühjahrskongress 2020 - Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch? 16. - 18. Mrz. 2020. Berlin: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V., Dortmund; 2020: B.6.4.
- [GRP20] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Traceable learning effects by use of digital adaptive assistance in production. In: Procedia Manufacturing - Proceedings of the 10th Conference on Learning Factories, CLF2020, Vol 45. Graz, Austria: Elsevier; 2020:479-484.
- [GRP20] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Model based Integration of Human Characteristics in Production Systems: A Literature Survey. In: 14th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering; 15. - 17. Jul. 2020. Elsevier B. V.; 2020:57-62.
- [GRC+21] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; CAPPELLO, C.; STEFFEN, E.: Skill-based worker assignment in a manual assembly line. In: Lutters, E. (Hrsg.): Procedia CIRP Design. Elsevier; 2021:433-438.
- [GRW21] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; WIECHEL, D.; PREUß, D.; POTTEBAUM, J.: Determine similarity of assembly operations using semantic technology. In: 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems; Elsevier; 2021:1245-1250.
- [GWR21] GRÄßLER, I.; WIECHEL, D.; ROESMANN, D.: Integrating human factors in the model based development of cyber-physical production systems. In: Procedia CIRP Design. Elsevier; 2021:518-523.
- [GRP23] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Human Factors in der integrierten Produktentwicklung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 3, 2023.
- [WRE+23] WELLER, J.; ROESMANN, D.; EGGERT, S.; VON ENZBERG, S.; GRÄßLER, I.; DUMITRESCU, R.: Identification and prediction of standard times in machining for precision steel tubes through the usage of data analytics. In: Procedia CIRP, 2023.
- [GSM+23] GRÄßLER, I.; STEFFEN, E.; MAIER, G.W.; ROESMANN, D.: Introduction – The Digital Twin of Humans. In: GRÄßLER, I.; MAIER, G.W.; STEFFEN, E.; ROESMANN, D.: The Digital Twin of Humans. An Interdisciplinary Concept of Digital Working Environments in Industry 4.0, Springer, 2023.
- [RG23] ROESMANN, D.; GRÄßLER, I.: Integration of Human Factors for Assembly Systems of the Future. In: GRÄßLER, I.; MAIER, G.W.; STEFFEN, E.; ROESMANN, D.: The Digital Twin of Humans. An Interdisciplinary Concept of Digital Working Environments in Industry 4.0, Springer, 2023.

Zusammenfassung

Der Aufbau und die Entwicklung von Fähigkeiten der Mitarbeiter ist ein entscheidender Wettbewerbsvorteil produzierender Unternehmen. In menschenzentrierten Montagesystemen passen sich die Mitarbeiter auf der Grundlage von Lernprozessen an neue und sich ändernde Aufgaben der Montage an. Entsprechend müssen bei der Montageplanung und -steuerung die Fähigkeiten der Mitarbeiter berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Dissertationsmanuskripts wird eine neue Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung entwickelt. Durch die (Teil-)Automatisierung von Schritten der Montageplanung auf Basis von mathematischer Modellierung und semantischen Technologien wird der Aufwand für die Anwendung der Montageplanung und -steuerung reduziert. Durch eine explizite Modellierung der Fähigkeiten der Mitarbeiter über das Lern-Vergessenskurven-Modell, die Integration von Echtzeitdaten und deren Berücksichtigung bei der Personaleinsatzplanung ermöglicht die Anwendung der Methodik objektive quantitative Entscheidungen bei der Planung und Steuerung von Montagesystemen. Die Methodik wurde an vier verschiedenen Prüfständen in der Laborumgebung des Heinz Nixdorf Instituts validiert. Simulation und Prüfung zeigen, dass durch die Anwendung der entwickelten Methodik eine Steigerung der Ausbringungsrates von 13,4 % und des Nutzungsgrades von 11,34 % bei heterogener Belegschaft in der Montage erreicht wird. Damit liefert vorliegende Dissertation einen Beitrag zum Forschungsfeld der menschenzentrierten Produktionsplanung und -steuerung in der Industrie 4.0 und somit einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil für produzierende Unternehmen.

Abstract

Building and developing the skills of employees will be a key competitive advantage for producing companies. In people-centered assembly systems, employees adapt to new and changing assembly tasks based on learning processes. For this purpose, the reference to the employees' skills must be provided within the assembly planning and control. In the context of this dissertation manuscript, a novel methodology for human-centered assembly planning and control through skill-oriented task assignment is developed. By means of (partial) automation of assembly planning steps based on mathematical modeling and semantic technologies, the application effort of assembly planning and control is reduced. By explicitly modeling the skills of the employees via the learning-forgetting-curve model, the integration of real-time data and their consideration in personnel scheduling, the application of the methodology enables objective quantitative decisions in the planning and control of assembly systems. The methodology was validated using four different test benches in the laboratory environment of the Heinz Nixdorf Institute. Simulation and test prove that by applying the developed methodology an increase of the output rate of 13.4 % and a utilization rate of 11.34 % is achieved with heterogeneous occupancy in the assembly. Thus, this dissertation provides a contribution to the research field of human-centered production planning and control in Industry 4.0 and therefore a crucial competitive advantage for manufacturing companies.

Menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation & Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	4
1.3	Wissenschaftliches Vorgehen.....	5
2	Grundlagen und Festlegung des Betrachtungsbereichs	9
2.1	Begriffsabgrenzungen.....	9
2.2	Montageplanung & Fließbandabstimmung	11
2.3	Humanfaktoren in der Montage	26
3	Stand der Forschung.....	31
3.1	Integration von Humanfaktoren in die Montageplanung	31
3.2	Integration von Humanfaktoren in die Montagesteuerung	35
3.3	Forschungslücke und Handlungsbedarf	39
4	Anforderungen an die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung	43
5	Entwicklung der Methodik	49
5.1	Übersicht über die Methodik	49
5.2	Automatisierte Bestimmung des Montagevorranggraphen	51
5.3	Fließbandabstimmung	54
5.4	Ableitung des Fähigkeitsgraphen	56
5.5	Prognose der Mitarbeiterfähigkeiten	63

5.6	Entscheidungsunterstützung zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung	77
5.7	Integration von echtzeitnahen Daten	79
6	Implementierung in der Laborumgebung	83
6.1	Software-Werkzeug	83
6.2	Umsetzung im Smart Automation Laboratory	87
6.3	Beispielhafte Anwendung der Methodik.....	89
7	Validierung der Methodik.....	93
7.1	Simulationsstudie	94
7.2	Probandenstudie	106
7.3	Experteninterview	109
7.4	Usertests	112
7.5	Verifizierung der Anforderungen.....	115
7.6	Zusammenfassung & kritische Reflexion der Verifizierung.....	127
7.7	Fazit der Forschungsergebnisse	128
8	Zusammenfassung & Ausblick	131
	Literaturverzeichnis	135
	Anhang.....	163

Abkürzungsverzeichnis

ALB	Assembly Line Balancing
ALBHP	Assembly Line Balancing with Hierarchical Worker Assignment
ALWABP	Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem
API	Application Programming Interface
APS	Advanced Planning and Scheduling
AWIBP	Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem
BDE	Betriebsdatenerfassung
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAPP	Computer Aided Process Planning
CIRP	College International pour la Recherche en Productique
CPS	cyber-physisches System
csv	Comma Separated Values
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
EAWS	European Assembly Worksheet
Ergo	Ergonomics
ERP	Enterprise Resource Planning
GALB	General Assembly Line Balancing
GUI	Graphical User Interface
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IBD	Internal Block Diagram
IEA	International Ergonomics Association
IEC	International Electrotechnical Commission
IFAC	International Federation of Automatic Control
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik

IP	Internetprotokoll
ISO	International Organization for Standard
KMU	Kleinere und mittlere Unternehmen
KomPEP	Kompetenzorientierte Personalplanung in der Fertigung produzierender KMU mittels MES
LFCM	Learn-Forget Curve Model
MAG	Metallschweißen mit aktiven Gasen
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MAS	Manufacturability Analysis System
MES	Manufacturing Execution System
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MLFCM	Modified Learn-Forget Curve Model
MOST	Maynard Operations Sequence Technique
MTM	Methods Time Measurement
MTM-AUS	Methods Time Measurement with Universal Analyzer System
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NASA TLX	NASA Task Load Index
NIOSH	National Institute of Occupational Safety and Health
OCRA	Occupational Repetitive Actions
OPC UA	Open Platform Communication United Architecture
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
REFA	Reichsausschuß für Arbeitszeitermittlung
Req	Requirement
RQ	Research Question
SALBP	Simple Assembly Line Balancing Problem
SOAP	Simple Object Access Protocol
SUS	System Usability Scale
SWAT	Subjective Workload Assessment Technique

TCP	Transmission Control Protocol
TecKompAss	Integrierte technologie- und kompetenzorientierte Arbeitsplanung in soziotechnischen Systemen
TMS	Transportation Management System
UML	Unified Modeling Language
VBA	Visual Basic for Applications
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
WF	Work Factor
WiGeP	Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung
WIP	Work in Process
WMS	Warehouse Management System

Symbolverzeichnis

α	Gewichtungsfaktor für die Montagewerkzeuge
a, b, c	Gewichtungsfaktoren für die Ermittlung der Übereinstimmung der Fähigkeiten an Montagearbeitsplatz p_j ; $a, b, c \in [0,1]$
$b_{w_k p_j}$	Lernexponent von Mitarbeiter w_k am Montagearbeitsplatz p_j
c	Taktzeit des Montagesystems
cor_{ST}	Übereinstimmung der ausgeführten Montageschritte am Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
cor_{TE}	Übereinstimmung der verwendeten Fügetechnologie am Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
cor_{TO}	Übereinstimmung des verwendeten Werkzeugs am Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
$cor(S_x, S_y)$	Übereinstimmung der Fähigkeiten am Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
$c_{w_k p_j}$	Kosten für die Zuordnung von Mitarbeiter w_k zum Montagearbeitsplatz p_j
$d_{w_k p_j, max}$	Unterbrechungsdauer des totalen Vergessens von Mitarbeiter w_k am Montagearbeitsplatz p_j
$f_{w_k p_j}$	Vergessensrate von Mitarbeiter w_k am Montagearbeitsplatz p_j
i	Zykluszahl
k_{w_k}	Alter des Mitarbeiters w_k
n	Anzahl der montierten Baugruppen
N_x, N_y, N_{cp}	Abstände zwischen den Technologien in der Taxonomie der DIN 8593
P	Set von Arbeitsplätzen im Montagesystem, die mit j indiziert werden
S_{p_j}	Benötigte Fähigkeiten am Montagearbeitsplatz p_j
S_{w_k}	Fähigkeitsniveau von Mitarbeiter w_k für das gesamte Montagesystem
$S_{w_k p_j}$	Fähigkeitsniveau von Mitarbeiter w_k an Montagearbeitsplatz p_j
ST_{p_j}	MTM-Code-Zeichenkette am Montagearbeitsplatz p_j

T_i	Zykluszeit $\triangleq$ maximale Zeit aller Mitarbeiter w im Zyklus i
t_{min,p_j}	Mindestzeit für die Montage am Arbeitsplatz p_j
t_o	Ausführungszeit der Operation o
$t_{w_k p_j}(n, i)$	Zeit, die von Mitarbeiter w_k benötigt wird, um n -te Einheit am Arbeitsplatz p_j im i -ten Zyklus zu montieren
$\hat{t}_{w_k p_j}(n, i)$	Zeit für die n -te Einheit in der Vergessenskurve am Arbeitsplatz p_j im i -ten Zyklus zu montieren
$t(V_{p_j})$	Summe der Ausführungszeiten der Montageoperationen, die an dem Montagearbeitsplatz p_j ausgeführt werden
$t(v_{w_k p_j i})$	Benötigte Zeit zur Montage von $v_{w_k p_j i}$ -Einheiten unter Berücksichtigung der Lernkurve
T_{w_k, p_j}	Zykluszeit für Mitarbeiter w_k am Montagearbeitsplatz p_j
TE_{cp}	Kleinstes gemeinsames Elternkonzept der Fügetechnologien p_x und p_y innerhalb der Taxonomie der DIN 8593
$TE_x TE_y$	Fügetechnologie am Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
TO_{p_j}	Montagewerkzeug am Montagearbeitsplatz p_j
$u_{i w_k p_j}$	Erinnerte Wiederholungen von Mitarbeiter w_k am Montagearbeitsplatz p_j nach der Unterbrechung im Zyklus i
$v_{w_k p_j i}$	Anzahl der Einheiten, die in der Unterbrechung von Mitarbeiter w_k am Montagearbeitsplatz p_j bearbeitet werden können
V_{p_j}	Menge an Montageoperationen, die am Montagearbeitsplatz p_j erfolgen
V_r	Verlustrate aufgrund des Alters
W	Set von Mitarbeiter, $ W = P $, die indiziert werden mit k
$x_{w_k p_j}$	Zuordnung von Mitarbeiter w_k zum Montagearbeitsplatz p_j

1 Einleitung

“[...] careful application of Human Factors principles in the design of operations can improve productivity, quality, technology implementation, and have intangible benefits for operations while also securing well being and working conditions for employees.” [ND10]

In dem vorliegenden Dissertationsmanuskript wird die Entwicklung einer Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung vorgestellt. Gemäß dem Zitat von NEUMANN UND DUL [ND10] wird der Mensch in den Mittelpunkt der Gestaltung des Montagesystems gestellt. Hierzu werden seine Fähigkeiten personenindividuell abgebildet und sowohl in der Fähigkeitsentwicklung als auch in der kurzfristigen Personaleinsatzplanung bei der Aufgabenzuordnung berücksichtigt. In der Methodik wird hierzu eine soziotechnische Betrachtung unter der Verwendung neuer technologischer Entwicklungen der Informations- und Kommunikationstechnologie in der industriellen Produktion verfolgt.

1.1 Motivation & Problemstellung

Aufgabe der Montage ist es, aus produzierten Einzelteilen und Baugruppen ein System höherer Komplexität mit vorgegebenen Funktionen in einem definierten Zeitraum zusammenzubauen [Eve89]. Nach LOTTER [Lot12] liegt der Kostenanteil des Montageprozesses an der Produktion bei bis zu 70 %, was die enorme Bedeutung der Montage im produzierenden Gewerbe aufzeigt. Die Montage ist im Vergleich zu anderen Produktionsbereichen oftmals nur gering automatisiert. Aufgrund der Anforderungen lassen sich die meisten Montagen nur mit den flexiblen, kognitiven und motorischen Fähigkeiten des Menschen wirtschaftlich sinnvoll betreiben [Gro15b, SWS08]. Je nach Produkt nehmen manuelle Montagetätigkeiten bis zu 70 % der Gesamtproduktionszeit in Anspruch [RK19]. Im Maschinenbau liegt der Montagezeitanteil, je nach Komplexität des Objektes, zwischen 20 % und 45 %. Im Fahrzeugbau beträgt er, abhängig von der Fertigungstiefe, 30 % bis 50 %. Der höchste Montagezeitanteil mit 40 % bis 70 % findet sich in der Elektro- und Feinwerktechnik [Lot12].

Das produzierende Gewerbe sieht sich durch kundenindividuelle Produkte mit zunehmender Produktkomplexität und kürzeren Entstehungszeiten konfrontiert [LNF18]. Um sich diesen Veränderungen anzupassen, muss die Montage flexibel und wandlungsfähig gestaltet sein (siehe Bild 1-1) [BFK14, Nyh10]. Studien [ATM14, LFK19, MBN15, SPH96, SWS08] empfehlen als Lösung ein menschenzentriertes Vorgehen der Montageplanung. Außer in den Studien wird auch in den *Sustainable Development Goals* [UN15] die Menschenzentrierung der Planung von Arbeitssystemen betont. Das Forschungsgebiet Human Factors gewinnt an Interesse. Es befasst sich mit der Anwendung des Wissens über Humanfaktoren in der Entwicklung von Produkten, Arbeitssystemen und Aufgaben.

Humanfaktoren stellen psychische, kognitive und soziale Einflussgrößen in soziotechnischen Systemen dar.

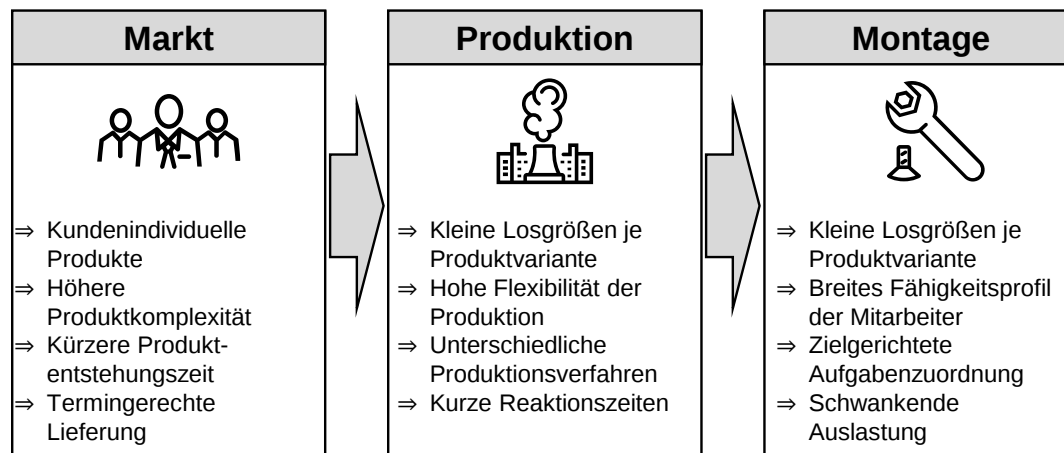


Bild 1-1: Einflüsse und Herausforderungen der menschenzentrierten Montage, aufbauend auf [Wie14a]

In der manuellen Montage stellt die Mitarbeiter-Leistung einen entscheidenden Faktor für die Leistung des gesamten Montagesystems dar. Im Wesentlichen hängt die Mitarbeiter-Leistung von den Fähigkeiten, der Motivation und der Verfügbarkeit der Mitarbeiter¹ ab. Dabei stellen Fähigkeiten die Gesamtheit des zur Ausführung einer bestimmten Aufgabe bereitgestellten Könnens dar. Sie basieren im Kern auf der Kombination aus Erfahrungen und Wissen [ATM14]. Sogenannte multi-skilled Mitarbeiter² können sich nach einem Lernprozess an die Ausführung neuer und wechselnder Aufgaben anpassen. In herkömmlichen Ansätzen erfolgt die Erfassung der Fähigkeiten zu bestimmten Zeitpunkten durch Dokumentenanalysen, direkte mündliche Befragungen, Beurteilung durch Vorgesetzte, Verfahren zur Verhaltensbeobachtung und -beurteilung, messtheoretisch fundierte Fragebögen und Tests [DIN 33430]. Hinsichtlich der Montage ist das Modell des arbeitsintegrierten Lernens von besonderer Bedeutung. Die Fähigkeitsentwicklung findet im täglichen Arbeitsprozess statt und ist durch die Zuordnung von Mitarbeiter zu unterschiedlichen Aufgaben beeinflussbar. Nach MARKS [Mar19] ist für die bedarfsgerechte und effiziente Qualifikation ein kontinuierliches arbeitsintegriertes Lernen notwendig. Im Gegensatz zum klassischen Anlernen, durch beispielsweise Weiter- und Fortbildungen, ist der finanzielle und zeitliche Aufwand vergleichsweise gering und sind die Lerneffekte hoch. Darüber hinaus können Überlagerungen und Veränderungen in der Montage durch klassisches Anlernen nicht abgebildet werden. Dies zeigt ein Spannungsfeld zwischen der auf Langfristigkeit ausgerichteten Personalentwicklung und dem kurzfristigen Streben nach Leistungssteigerung [WHG18b]. Die Aufgabenzuordnung und Fließbandabstim-

¹ Zugunsten der Verständlichkeit der wissenschaftlichen Inhalte wird in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten für alle Geschlechter.

² Multi-skilled Mitarbeiter besitzen die Fähigkeit, unterschiedliche Tätigkeiten an mehr als einem Arbeitsplatz auszuführen.

mung in einem Montagesystem haben Einfluss auf die Gesamtleistung des Montagesystems [GRC21]. Bei der Fließbandabstimmung erfolgt die Zuordnung von Montageaufgaben zu Montagestationen. Die Bearbeitungszeit in der Montage wird häufig als die Zeit definiert, die benötigt wird, um einen Zyklus mit einer definierten Menge an Aufträgen durchzuführen. Nach EGHESADIFARD ET AL. [EKK20] ist die Entwicklung der entsprechenden Fähigkeiten der Mitarbeiter eine entscheidende Herausforderung bei der Planung von Montagesystemen. Zukünftig müssen, wie bereits in Lean-Management-Ansätzen gefordert [AJ08], Mitarbeiter durch eine adäquate Aufgabenzuordnung in der Montage flexibel und vielseitig befähigt werden [MKN13].

In der Produktion werden zur Steigerung der Transparenz und Verbesserung der Produktivität Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), wie Manufacturing-Execution-Systeme (MES) und Systeme der Betriebsdatenerfassung (BDE), eingesetzt [HPE10]. Der Anwendungsfall Learning Analytics verfügt durch den Einsatz von IKT über ein hohes Potenzial für die Integration der Fähigkeitsentwicklung in die Montageplanung. Dies kann durch die Erstellung von digitalen Repräsentationen der Mitarbeiter erfolgen, wird jedoch zum aktuellen Zeitpunkt nicht praktiziert. Durch die kontinuierliche Aufnahme und Analyse personenbezogener Daten können digitale Repräsentationen [Eng20, JYE19] erstellt und daraus geeignete Strategien der Zuordnung der Mitarbeiter in das Montagesystem abgeleitet werden. Das Marktforschungsunternehmen Gartner Inc. erkennt in dem Einsatz digitaler Repräsentationen von Mitarbeiter innerhalb des Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies 2020 [Gar20], 2021 [Gar21] und 2022 [Gar22] ein hohes Potenzial und listet sie als aufstrebende Technologie. Ein Zuordnungsproblem ist ein diskretes Optimierungsproblem aus der Graphentheorie, einem Teilgebiet der diskreten Mathematik. Zur Lösung des Zuordnungsproblems werden in der Literatur Algorithmen aus dem Bereich der Linearen Optimierung, wie der Simplex-Algorithmus und die Ungarische Methode, vorgeschlagen [Pen07]. Zum jetzigen Zeitpunkt ist das Wissen über die Mitarbeiter, das in den Systemen vorliegt, weitestgehend noch ungenutzt und die Individualität der Mitarbeiter wird nur unzureichend in der Montageplanung berücksichtigt [Eng20]. Lediglich Schichtleiter haben – subjektive – Kenntnisse von den Fähigkeiten der Mitarbeiter. Nach einer empirischen Studie von DENKINA ET AL. [DCW13] mit 43 produzierenden KMU bietet die fähigkeitsorientierte Planung unterschiedliche Möglichkeiten für produzierende Unternehmen. Diese Potenziale wurden im Rahmen dieses Dissertationsmanuskripts anhand von Interviews mit Industrievertretern aus den Bereichen Produktions- und Montageplanung sowie mit CAM- und PPS-Software-Anbietern diskutiert und hinsichtlich ihrer Relevanz bewertet, um praxisrelevante Probleme zu erfassen und zu typisieren. Die folgenden Potenziale besitzen die höchste Relevanz für die befragten Industrievertreter: 1) bessere Kapazitätsauslastung, 2) langfristige Verbesserung der Produktionsergebnisse, 3) bessere Kalkulationsbasis, 4) höhere Produktivität, 5) Kostenreduktion durch den Wegfall aufwendiger Zeitstudien sowie 6) einfacher Nachweis eines ordentlichen Qualifikationsmanagements gemäß der DIN EN ISO 9001 [DIN9001] durch die Einführung von dynamisierten Qualifikationsmatrizen. Um diese Potenziale der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung zu erschließen, ist

eine methodische Grundlage zur Integration der Humanfaktoren in die Aufgabenzuordnung in einem Montagesystem notwendig.

1.2 Zielsetzung

Aus der skizzierten Problemstellung lässt sich die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit ableiten:

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methodik zur Integration von Humanfaktoren in die Aufgabenzuordnung in cyber-physischen Montagesystemen mit dem Ziel der Maximierung der Mitarbeiterfähigkeiten und der Minimierung der Zykluszeit.

Durch eine digitale Repräsentation der Fähigkeiten der Mitarbeiter und durch Prognosen ihrer Entwicklung kann die Wahl einer optimalen Mitarbeiterzuordnung erleichtert werden. Arbeitsintegriertes Lernen der Durchführung einer Montageoperation führt zu einer dynamischen Leistungssteigerung, welche durch die Zuordnung der Mitarbeiter zu bestimmten Montageoperationen beeinflussbar ist. Für die Zuordnung der Mitarbeiter sollen die beiden folgenden Koordinationsansätze entwickelt werden:

Die **langfristig fähigkeitsorientierte Montageplanung** verfolgt das Ziel, die Fähigkeiten der Mitarbeiter durch eine geeignete Zuweisung zu Aufgaben zu maximieren. Dabei kann es zu einer Erhöhung der Zykluszeit kommen. Langfristiges Ziel sind multi-skilled Mitarbeiter, die vielseitig und flexibel einsetzbar sind.

Die **kurzfristig zeitorientierte Montageplanung** verfolgt das Ziel, die Zykluszeit des Montageprozesses zu minimieren, und dadurch eine hohe Produktivität zu erreichen. Diese Anwendung ist angemessen bei zeitkritischen Fertigungsaufträgen oder Terminverzögerungen. Hierbei wird die Fähigkeitsentwicklung zunächst nicht berücksichtigt.

Gemäß KUBICEK [Kub76] wird zur Lösung des Forschungsziels die folgende grundlegende Forschungsfrage gestellt:

Wie kann in der menschenzentrierten Montageplanung unter Einbeziehung relevanter Humanfaktoren eine geeignete Mitarbeiterzuordnung gestaltet werden?

Zur Strukturierung des weiteren Lösungsvorgehens lassen sich aus der handlungsleitenden Forschungsfrage weitere Forschungsfragen ableiten:

- RQ1) Welche Humanfaktoren haben den größten Einfluss auf die Leistung eines Montagesystems?
- RQ2) Welche Ansätze eignen sich, um Prognosen der menschlichen Leistung innerhalb eines Montagesystems auf Basis von Humanfaktoren mathematisch zu berechnen?

- RQ3) Wie können echtzeitnahe Daten der Ausführung in das mathematische Modell zur Prognose zukünftiger Ausführungen integriert werden?
- RQ4) Wie sehen Optimierungsalgorithmen aus, die die Mitarbeiterzuordnung langfristig fähigkeitsorientiert sowie kurzfristig zeitorientiert auf Basis der Prognosen verbessern?

Zielsetzung ist die Entwicklung einer Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung. Hierbei werden Humanfaktoren in Bezug auf die Leistung analysiert. Für die relevanten Humanfaktoren werden bestehende mathematische Modelle zur Prognose der Fähigkeitsentwicklung zu einem integrierten Modell zusammengeführt. Dies wird um Besonderheiten der Montage sowie die Integration von echtzeitnahen Daten erweitert. Die Zuordnung erfolgt anwenderspezifisch nach unterschiedlich entwickelten Zielfunktionen. Die Validierung der entwickelten Methodik erfolgt in vier schrittweise durchgeführten Testszenarien. Zunächst erfolgt eine rechnergestützte Simulation. Anschließend wird die Methodik in einer realen Laborumgebung mit Probanden geprüft. Weiterhin werden Interviews mit Experten aus der Produktionsplanung und -steuerung sowie mit Anbietern von Softwaretools für den Shopfloor durchgeführt. Abschließend erfolgt die Validierung anhand von Usertests.

1.3 Wissenschaftliches Vorgehen

Die angewandten Handlungswissenschaften verfolgen das pragmatische Ziel, Probleme des praktisch handelnden Menschen zu lösen, für die es keine Lösungen oder kein ausreichendes Wissen gibt. In den Ingenieur- und Betriebswissenschaften wurden verschiedene wissenschaftliche Vorgehensweisen entwickelt, wie z. B. die Design Research Methodology nach BLESSING & CHAKRABARTI [BC09], der Design-Research-in-Information-Systems-Ansatz von HEVNER & CHATTERJEE [HC10, HMP04] sowie der systemtheoretische Ansatz nach ULRICH [ULR82]. Aufgrund des praxisnahen, offenen und integrativen Charakters und des Bezugs sowohl zu den Ingenieur- als auch den Betriebswissenschaften wird der vorliegenden Arbeit der Systemansatz nach ULRICH (siehe A1.1) zugrunde gelegt. Als Lösungsansatz wird ein interdisziplinäres Vorgehen vorgeschlagen. Berücksichtigt werden neben der Montageplanung und -steuerung die Disziplin der Human Factors und Zuordnungsprobleme aus der diskreten Optimierung. Entsprechend ist das Vorgehen des Dissertationsmanuskripts nach der *Strategie der angewandten Forschung* von ULRICH strukturiert (siehe Bild 1-2):

In **Kapitel 1** wird die Problemstellung und damit die Ausgangssituation der Arbeit dargestellt. Basierend auf einer Literaturanalyse sowie einer empirischen Studie mit kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) von DENKENA ET AL. werden Interviews mit Industrievertretern aus den Bereichen Produktions-, Montageplanung sowie mit CAM- und PPS-Software-Anbietern durchgeführt, um praxisrelevante Probleme zu erfassen und

zu typisieren. Daraus wird die konkrete Zielsetzung der Arbeit abgeleitet. Nach der Einordnung der Arbeit in den Betrachtungsbereich wird das wissenschaftliche Vorgehen vorgestellt.

Um ein einheitliches Verständnis für das Dissertationsmanuskript zu schaffen, werden in **Kapitel 2** zentrale Begriffe definiert. Im Anschluss werden die Grundlagen der *Montageplanung und der Fließbandabstimmung* sowie der *Human Factors in der Montage* analysiert. Hierzu wurde eine systematische Literaturrecherche durchgeführt, um die menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung zu analysieren und Defizite zu erörtern. Nach der Einordnung der Arbeit in das Themengebiet wird das wissenschaftliche Vorgehen vorgestellt.

In **Kapitel 3** werden spezifische problemrelevante Vorarbeiten aus der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung untersucht, die für die Zielsetzung dieser Arbeit relevant sind. Hierzu werden die aus den Grundlagen des Betrachtungsbereichs abgeleiteten Anforderungen mit den Vorarbeiten verglichen. Zum Zweck einer argumentativ-deduktiven Analyse des Methodenspektrums wird eine systematische Literaturrecherche nach BRINER & DENYER [BD12] durchgeführt. Aus der Analyse bestehender Ansätze resultiert ein konkreter wissenschaftlicher Handlungsbedarf, auf den diese Arbeit abzielt.

Entsprechend dem Handlungsbedarf werden in **Kapitel 4** Anforderungen an die Methodik formuliert. Dies erfolgt systematisch durch Interviews mit Industrievertretern sowie einer Literaturanalyse. Hierzu werden auf Basis einer empirischen Untersuchung Use Cases für das Zielsystem definiert. Aus diesen werden unter Einbeziehung der Industrievertreter Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik abgeleitet.

In **Kapitel 5** wird die Methodik für die menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung entwickelt. Ausgangspunkt sind die Ergebnisse der Produktentwicklung. Zunächst werden verschiedene Ansätze der automatisierten Bestimmung der Montagereihenfolge systematisch paarweise verglichen. Daraus wird der geeignetste Ansatz ausgewählt. Darauf aufbauend erfolgen die mathematische Modellierung und Methodenauswahl zur Fließbandabstimmung. Um die Ähnlichkeit von Montageoperationen mathematisch abzubilden, werden semantische Technologien angewendet. Ergebnis ist die Entwicklung eines Fähigkeits-(Multi)graphen zur Beschreibung der Fähigkeiten in einem Montagesystem. Bei einer systematischen Literaturrecherche nach BRINER & DENYER [BD12] werden Humanfaktoren, die den größten Einfluss auf die Performance haben, identifiziert. Anschließend werden für die ermittelten Humanfaktoren mathematische Modelle analysiert, um die Leistung über den Zeitverlauf zu prognostizieren. Die Modelle werden paarweise verglichen, bewertet und anschließend ausgewählt und erweitert, um ein integriertes Prognosemodell zu erstellen. Dieses Modell dient als Ausgangsbasis für die mathematische Modellierung von Zuordnungsalgorithmen. Die Algorithmen besitzen je nach Koordinationsansätze unterschiedliche Zielfunktionen.

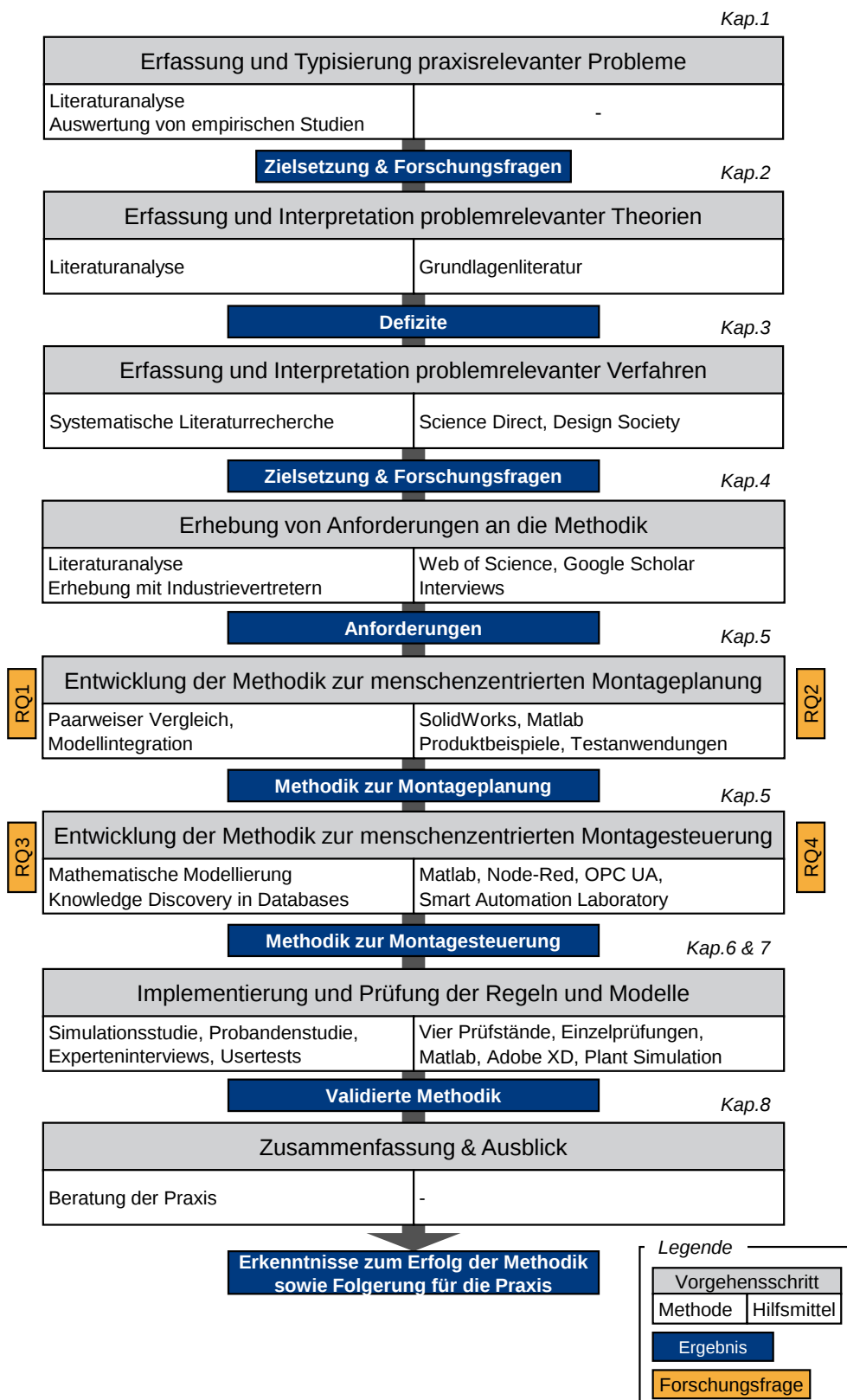


Bild 1-2: Wissenschaftliches Vorgehen der Arbeit gemäß ULRICH [ULR82]

Zur Lösung werden eine geeignete Modellierung entwickelt sowie Zuordnungsalgorithmen ausgewählt. Anschließend wird die Integration von echtzeitnahen Daten in das Prognosemodell dargestellt. Die Integration in das Prognosemodell orientiert sich an dem Knowledge Based Discovery im Databases-Prozess von FAYYAD ET AL. [FPS96]. Die Datenintegration erfolgt mittels einer Datenbank, die analog zum Prozess nach KEMPER & EICKLER [KE06] entwickelt wird.

In **Kapitel 6** erfolgt die Darstellung der prototypischen Implementierung im Smart Automation Laboratory des Lehrstuhls für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts. Zur technischen Umsetzung werden die Software-Werkzeuge *Dassault Systèmes SolidWorks*, *MathWorks Matlab*, *IBM Node-Red* und *Microsoft Excel* genutzt.

Das entwickelte Vorgehen wird an einer praktischen Validierung im Anwendungszusammenhang am Beispiel der Montage einer Drosselklappe, eines Knickarmroboters, einer Standbohrmaschine, eines RC-Car und eines Greifers in **Kapitel 7** verifiziert. Aufgrund unterschiedlicher Betrachtungsbereiche der Anforderungen aus Kapitel 4 und unterschiedlicher Anwendungsbereiche werden die Teilmethoden separat untersucht. Die Verifikation erfolgt in vier Testszenarien mit jeweiliger Messmetrik. Die vier Testszenarien sind Simulationsstudie, Probandenstudie, Experteninterviews sowie Usertests. Für jeden Schritt wird ein geeigneter Prüfstand mit etablierter Methode zur Datenerhebung aufgebaut. Nach einer kritischen Reflexion der Ergebnisse der Validierung werden die Forschungsfragen beantwortet.

In **Kapitel 8** werden die Ergebnisse und Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst, die Folgerungen für die industrielle Praxis formuliert und ein Fazit hinsichtlich der Zielerreichung gezogen. Das Kapitel gibt Empfehlungen für die Praxis, einen Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen und auf künftigen Forschungsbedarf, der sich aus den gewonnenen Erkenntnissen ergibt.

2 Grundlagen und Festlegung des Betrachtungsbereichs

Um ein einheitliches Verständnis für diese Arbeit zu schaffen, werden in Abschnitt 2.1 zunächst die zentralen Begriffe der Arbeit definiert und für den Zusammenhang dieser Arbeit erläutert. In den Abschnitten 2.2-2.3 werden die Grundlagen und bestehende Defizite des Betrachtungsbereichs dargestellt.

2.1 Begriffsabgrenzungen

Im Folgenden werden die für den Betrachtungsbereich zentralen Begriffe Lean Production und Digitale Fabrik definiert.

2.1.1 Lean Production

Der Begriff „Lean Production“ wurde erstmals 1990 von WOMACK ET AL. [WJR90] in „*The Machine That Changed The World*“ verwendet, um das Toyota-Produktionssystem von der bestehenden Massenproduktion in der Automobilindustrie zu unterscheiden. Daher wird der Begriff „Toyota-Produktionssystem“ oftmals als Deonym zu Lean Production verwendet [CLR19]. Jedoch ist Lean Thinking nicht nur auf die Produktionspraxis zu beziehen, sondern auch als eine Denkweise und ein Managementsystem zu verstehen. Der Fokus des vorliegenden Dissertationsmanuskripts liegt auf der Montage sowie den dazugehörigen Querschnittsfunktionen, auf der Vermeidung von Verschwendung, der Befähigung der Mitarbeiter sowie der kontinuierlichen Verbesserung zur nachhaltigen Sicherstellung des Erfolgs [MPF16]. Der Begriff Verschwendung wird häufig aus dem japanischen Begriff *Muda* übersetzt. Nach OHNO [Ohn93] ist Verschwendung die Differenz zwischen gegenwärtiger Kapazität und der notwendigen Arbeit. Neben *Muda* sind auch *Muri* (Überlastung) und *Mura* (Unausgeglichenheit) zu vermeiden. Überlastung entsteht bei Mitarbeitern und Maschinen, wenn beispielsweise Fehler oder Betriebsmittelstörungen auftreten. Unausgeglichenheit tritt auf, wenn Produktionskapazität und -bedarf nicht genügend aufeinander abgestimmt sind [VDI2870]. Nach OHNO [Ohn93] treten sieben Arten von Verschwendung auf: Überproduktion, Wartezeiten, Transport, unnötige Bearbeitungsschritte, Bestände, Bewegungen, Ausschuss und Nacharbeit.³ Zur Verbesserung der Produktion werden nach VDI 2870 [VDI2870] acht Gestaltungsprinzipien unterschieden: Standardisierung, Null-Fehler-Prinzip, Fließprinzip, Pull-Prinzip, kontinuierliche Verbesserungsprozesse, Mitarbeiterorientierung und zielorientierte Führung, visuelles Management sowie Vermeidung von Verschwendung.

³ Die Spezifizierung der Verschwendungen auf den Untersuchungsgegenstand der manuellen Fließmontage erfolgt in Abschnitt 2.2.

2.1.2 Digitale Fabrik

Die Digitale Fabrik ist mit allen Schritten der Fabrik- und Produktionsplanung kein homogenes Instrument. Vielmehr steht der Begriff Digitale Fabrik für eine heterogene Systemlandschaft und Interoperabilität [ZSC+05]. Die Digitale Fabrik ist ein Ansatz der frühzeitigen Parallelisierung und digitalen Bearbeitung von Produktentwicklung und Produktionsplanung bei integriertem Datenmanagement [BGW18]. VDI 4499 definiert den Begriff wie folgt⁴:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u.a. der Simulation und 3D-Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ [VDI4499]

Die Digitale Fabrik ermöglicht die frühzeitige Absicherung der Produktionsplanung und -steuerung, beispielsweise durch Simulationen. Mit der Einführung und dem Einsatz der Digitalen Fabrik werden nach VDI 4499 Ziele in den Dimensionen Wirtschaftlichkeit, Qualität, Kommunikation, Standardisierung sowie Wissenserwerb und -erhalt erreicht. Nach SCHADY [Sch08] ist das *„Leitmotiv der Digitalen Fabrik die durchgängige Unterstützung im Lebenszyklus einer Fabrik unter Wiederverwendung von Daten und Modellen, von der Planung, über die Inbetriebnahme bis hin zum Betrieb der Fabrik und zukünftigen Änderungsplanungen.“* Modelle helfen dabei, Informationen allgemeinverständlich abzubilden und ihre Durchgängigkeit (z. B. bei der Produkt- oder Prozessmodellierung) zu gewährleisten [Küh06]. Modelliert werden beispielsweise Maschinen und Anlagen, Logistik, Organisationsabläufe und Mitarbeiter. Die Methoden und Werkzeuge der Digitalen Fabrik (siehe A1.2) werden bei spezifischen Problemstellungen eingesetzt [Sch08].

2.1.3 Montage

In der CIRP Encyclopedia of Production Engineering [CLR19] wird der Begriff Produktion wie folgt definiert: *„The pure act or the process (or the connected series of acts or processes) of physically making a product from its material constituents, is distinct from designing the product, planning and controlling its production, by assuring its quality.“* Einen Teilbereich der Produktion stellt die Montage dar. Die Montage ist oftmals der letzte wertschöpfende Schritt im industriellen Produktionsprozess. Die VDI 2860 [VDI2860] definiert den Begriff Montage wie folgt: *„[...] ist die Gesamtheit aller Vorgänge, die dem Zusammenbau von geometrisch bestimmten Körpern dienen. Dabei kann zusätzlich formloser Stoff (z.B. Gleit- und Schmierstoffe, Kleber usw.) zur Anwendung*

⁴ HIMMLER & AMBERG [HA13] stellen eine detaillierte Analyse verschiedener Definitionen der Digitalen Fabrik bereit.

kommen.“ Der Grundgedanke der Montage bezieht sich somit darauf, ein Produkt höherer Komplexität nach vorgegebenen Anforderungen in einer bestimmten Zeit aus Körpern (Bauteile und Baugruppen) unter gegebenen Restriktionen zusammenzubauen [BSW09, Rei17]. Die Montage besteht im Kern aus Füge- und Handhabungs-Operationen (siehe Bild 2-1). Die Operationen des Fügens sind in DIN 8593⁵ [DIN8593] und der Handhabung in VDI 2860 [VDI2860] spezifiziert. Zusätzlich umfasst die Montage Nebentätigkeiten, wie Justieren [DIN8580] und Kontrollieren [VDI2860], sowie Sonderoperationen, wie das Markieren, Reinigen und Entgraten.

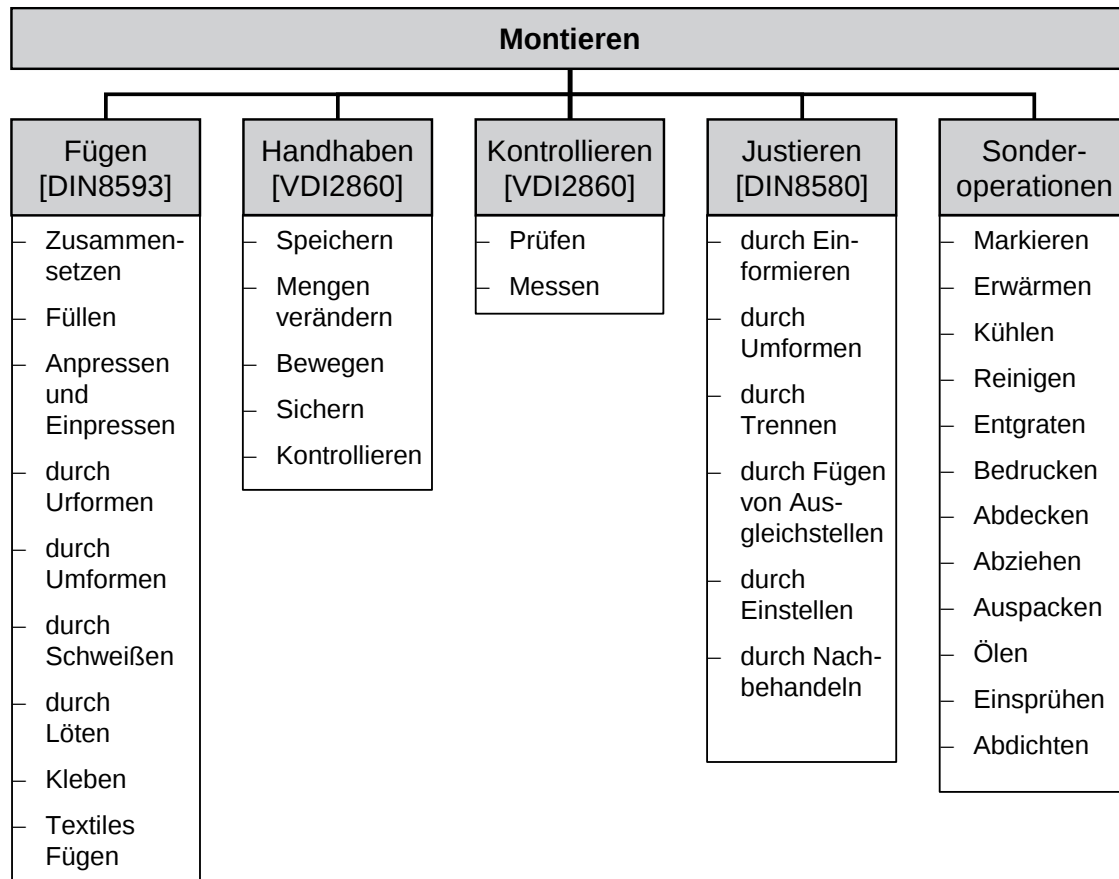


Bild 2-1: Funktionen der Montage nach [VDI2860]

2.2 Montageplanung & Fließbandabstimmung

Die Montageplanung spielt eine entscheidende Rolle für die Produktqualität und die Systemproduktivität [GHR22b]. Logistische Fragestellungen, Lieferkettenmanagement, Produktarchitektur, kundenindividuelle Massenproduktion und Variantenmanagement werden bei der Montageplanung berücksichtigt und auf dem Shopfloor umgesetzt [CLR19]. Im Folgenden werden die relevanten Grundlagen der manuellen Montage und Fließbandabstimmung beschrieben.

⁵ Eine Übersicht über alle in der DIN erfassten Fügeverfahren finden Sie in A6.

2.2.1 Montageplanung

Die Montageplanung ist ein Teilbereich der Arbeitsvorbereitung. Die Arbeitsvorbereitung „stellt das Bindeglied zwischen der funktionalen, geometrisch orientierten Festlegung des Produktes durch die Konstruktion und der schrittweisen Realisierung durch die Fertigung und Montage dar“ [ES96]. Die Arbeitsvorbereitung umfasst alle Maßnahmen der methodischen Arbeitsplanung und -steuerung. Die eingesetzten Methoden haben das Ziel, ein Optimum aus Aufwand und Nutzen zu erreichen [Eve97, FG13, SS12]. Die Arbeitsplanung „umfasst alle einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen, welche unter ständiger Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit die produktionsgerechte Herstellung eines Erzeugnisses sichern“ [ES96]. Wohingegen die Arbeitssteuerung „alle Maßnahmen, die für eine der Arbeitsplanung entsprechende Auftragsabwicklung erforderlich sind“ [ES96] beinhaltet. Im Zusammenspiel mit der Fertigungs- und Materialplanung bildet die Montageplanung einen Teilbereich der Arbeitsvorbereitung, wird aber organisatorisch häufig separat betrachtet. Die Ausgangslage stellen die Ergebnisse der Produktentwicklung dar. Verfahren für die Planung der manuellen Montage sind die 6-Stufen-Methode nach REFA [REFA90], die Richtlinien VDI/VDE 2206 [VDI/VDE2206], VDI 2221 [VDI2221], die Methode nach BULLINGER & AMMER [BA86], die Methode nach LOTTER [Lot92], die Methode nach FELDMANN [Fel97], die Methode nach GRUNWALD [Gru02] und die Methode nach PATRON [Pat04]. Die 6-Stufen-Methode nach REFA ist die Grundlage der nachfolgend entwickelten Verfahren und wird daher als Referenz genutzt (siehe Bild 2-2):

Auf der ersten Stufe Ausgangssituation wird der Planungsgegenstand analysiert. Diese Analyse umfasst die Bestimmung und einheitliche Beschreibung aller Aufgaben. Darauf aufbauend werden die Eingangsinformationen für die Montageplanung gesammelt und analysiert. Es handelt sich dabei um Produktdaten aus der Produktentwicklung, um unternehmens- und projektspezifizierte Restriktionen sowie die Ist-Situation.

Im Anschluss daran werden die Ziele festgelegt. Dabei werden mittels Informationsanalyse die Anforderungen an das Montagesystem definiert. Hierbei werden zunächst die Gestaltungsaufgaben festgelegt. Dabei muss die Montagegerechtigkeit der Produktgestalt und -struktur überprüft werden. Da die montagegerechte Konstruktion nicht Teil der Montageplanung ist, erfolgt an dieser Stelle eine Rückkopplung mit der Produktentwicklung.

Auf der dritten Stufe der Montageplanung werden die *Grobplanungen entworfen*. Diese sind maßgeblich von dem konstruktiven Aufbau des Produkts bestimmt. Der Zusammenbau der Einzelteile und Baugruppen ist aufgrund von geometrischen Beschränkungen, die sich aus der Produktgestalt und -struktur ergeben, nur in einer bestimmten Zwangsreihenfolge möglich. Die Montagestationen werden ausgelegt, wobei Belastungen und Gefährdungen abgeschätzt sowie notwendige Betriebsmittel und Werkzeuge vorgeklärt werden. Weiterhin erfolgt die Ermittlung des Kapazitätsbedarfs.

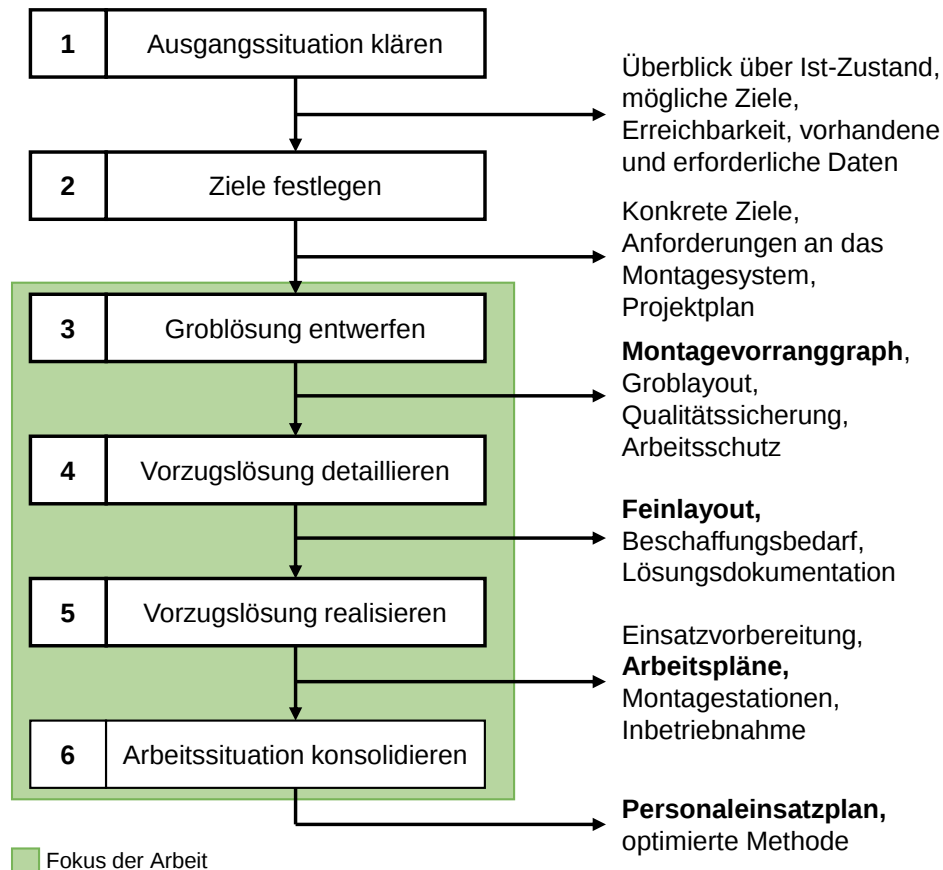


Bild 2-2: 6-Stufen-Methode nach REFA am Beispiel der Planung eines Montagesystems nach [REFA21]

Anschließend wird die *Vorzugslösung* ausgewählt und *detailliert*. In der Feinplanung werden die expliziten Aufgaben und Abläufe festgelegt, Montagestationen sowie Betriebsmittel und Werkzeuge ausgewählt und angeordnet. Die Lösung wird gegebenenfalls simuliert und bewertet. Zudem wird das Montagesystem aus wirtschaftlicher, technischer und ergonomischer Sicht spezifiziert.

Bei der *Realisierung der Vorzugslösung* werden alle Unterlagen (Arbeitspläne) und Programme zur Durchführung der Montage zusammengestellt. Die Informationen werden weitergegeben und Betriebsmittel beschafft. Notwendige Qualifizierungsmaßnahmen werden durchgeführt und Lösungen installiert und abgenommen.

Ein entscheidender Schritt in dieser Methode ist die *Konsolidierung der Arbeitssituation*. Die Ergebnisse werden dokumentiert und kontinuierliche Verbesserungsprozess-Maßnahmen bestimmt. Hierzu werden Erfolgskontrollen und die Ergebnisqualität gesichert. Weiterhin erfolgt die Personaleinsatzplanung.

Der Fokus des vorliegenden Dissertationsmanuskripts liegt auf den Schritten 3 bis 6 und ist in Abgrenzung von anderen Tätigkeiten in den Schritten in Bild 2-2 dargestellt.

Es existiert eine Vielzahl verschiedener Ansätze zur Unterstützung der Gestaltung von Montagesystemen. Vorgehensmodelle der Montageplanung betrachten den gesamten Planungsprozess, wie beispielsweise REFA [REFA90] und PATRON [Pat04]. Dahingegen fokussieren rechnergestützte Ansätze spezifische Schritte des Vorgehens. Für eine vernetzte, adaptive Montage und somit die vorgeschlagene menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung ist eine **Datendurchgängigkeit** im Sinne der Digitalen Fabrik notwendig.

2.2.2 Organisationsformen der Montage

Ein Montagesystem ist ein soziotechnisches System. In der Montage wirken Menschen, Maschinen, Betriebsmittel und Montageobjekte zusammen, um eine Wertsteigerung für das Unternehmen zu erzielen [Wes13]. LANDHERR [Lan14] fordert, dass Mitarbeiter nicht lediglich unter der Perspektive der technischen Fähigkeiten, die zur Erzeugung der Verbindung oder Bedienung einer Maschine benötigt werden, berücksichtigt werden [BC20]. Je nach Art des Zusammenwirkens der Montagestationen können Organisationsformen der Montage unterschieden werden. Unter dem Begriff Organisationsform wird die räumliche, zeitliche und sachliche Zusammenfassung von Mitarbeitern, Maschinen, Betriebsmitteln und Montageobjekten zu einem organisatorischen Montagesystem verstanden [NRK21, Wie14b].

In der industriellen Produktion hat sich aufgrund von Stückzahl und Variantenvielfalt eine Vielzahl unterschiedlicher Organisationsformen herausgebildet [Wie14b]. Nach LOTTER [LW12], EVERSHEIM [Eve02] und WIENDAHL [Wie14b] gibt es fünf klassische Formen der Montage:

Für unbewegte Montageobjekte gibt es die Einzelplatzmontage und die Baustellenmontage. *Einzelplatzmontage* ist ein Montagesystem, bei dem der Arbeitsplatz ortsfest vorgegeben ist. Im Vergleich zu einer Baustellenmontage erfolgt die Montage eines Produkts komplett durch einen Mitarbeiter [LW12]. Bei großvolumigen Montageobjekten werden bei der *Baustellenmontage* Mitarbeiter und Betriebsmittel zur Montage hinzugezogen [ES96, FSS14, MRS99, Sch12]. Bei bewegten Montageobjekten wird zusätzlich zur Bewegung der Mitarbeiter hinsichtlich der zeitlichen Verkettung des Materialflusses unterschieden [Prö15]. Dies bedeutet auch, dass bei allen instationären Montagesystemen der Montageprozess auf unterschiedliche Montagestationen aufgeteilt wird. In der *Reihenmontage* sind die Stationen zeitlich nicht verkettet und können übersprungen werden. Bei der *Taktstraßenmontage* wird das Montageobjekt ohne Pufferung in dem fest verketteten Montagesystem weitergegeben. Analog zur Taktmontage erfolgt die Montage in der *Fließmontage*. Jedoch bewegen sich sowohl die Montageobjekte als auch Mitarbeiter in dieser Organisationsform periodisch [MRS99, Sch12]. In Abschnitt 2.2.6 wird hierzu die Fließbandabstimmung detailliert dargestellt.

Aufgrund der Zielsetzung und des gewählten Betrachtungsbereichs werden die instationären Organisationsformen – Reihenmontage, Taktstraßenmontage und Fließmontage – fokussiert und in Abgrenzung von den anderen Verfahren in Bild 2-3 illustriert.

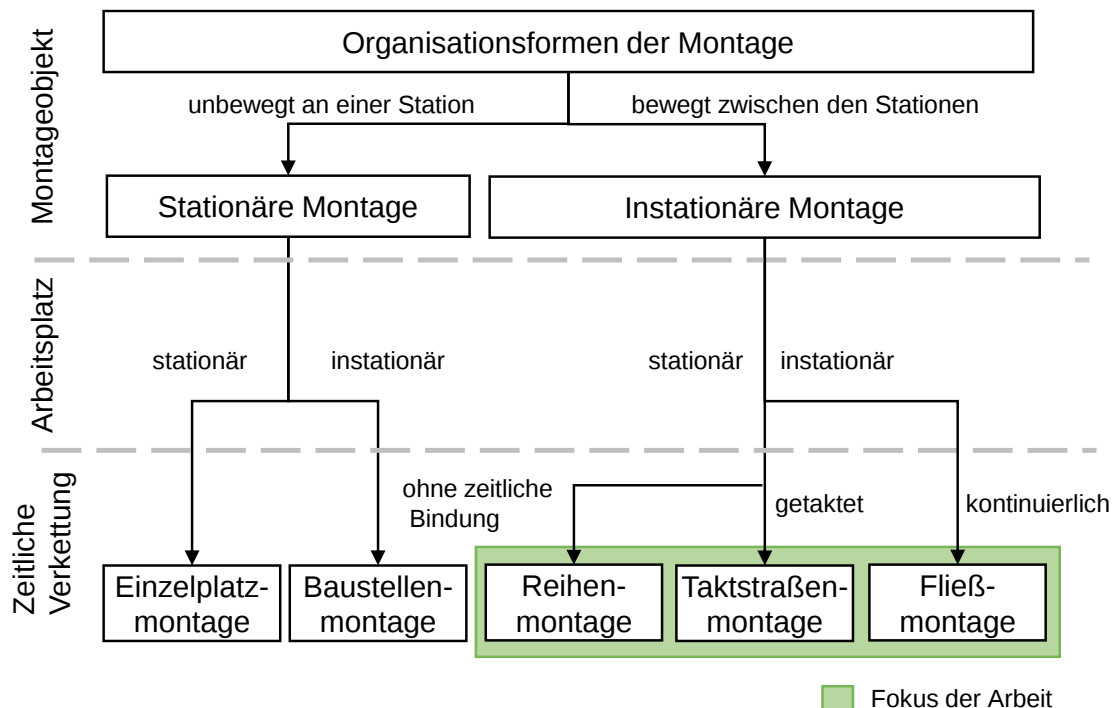


Bild 2-3: Organisationsformen in der Montage nach [ES96]

2.2.3 Personaleinsatzplanung

In der Montage befasst sich die **Personaleinsatzplanung** mit zukünftigen, quantitativen, qualitativen, örtlichen und zeitlichen Zuordnungen von verfügbaren Mitarbeitern zum Allokationsobjekt innerhalb des Leistungsprozesses des Unternehmens unter Berücksichtigung der Unternehmensziele [ES99]. Ein Allokationsobjekt kann eine Abteilung bis hin zu einer einzelnen Tätigkeit darstellen [PKS+11]. Innerhalb dieser Arbeit sind dies Montagestationen mit zugehörigen Montagewerkzeugen. Die Personaleinsatzplanung umfasst zwei Problemstellungen: Bei der **Anpassungsplanung** wird die Arbeitstätigkeit an die Mitarbeiter oder die Fähigkeiten der Mitarbeiter an die Arbeit beispielsweise durch Schulungen angepasst. Eine weitere zentrale Aufgabe der Personaleinsatzplanung in der Montage besteht in der Lösung des **Zuordnungsproblems**, also in der optimalen Zuordnung von Mitarbeitern zu Montagestationen. Ziel ist es, die Montagestationen sowohl qualitativ wie auch quantitativ mit dem Personaleinsatz abzudecken [Sch06]. Dies bedeutet, dass sowohl den zu erfüllenden Aufgaben Mitarbeiter zugewiesen als auch die qualitativen Anforderungen durch ausreichend geschulte Mitarbeiter erfüllt werden [PKS+11]. Nach EVERSHEIM [ES99] ist eine möglichst gleichmäßige Auslastung der Mitarbeiter das Ziel. In Abhängigkeit vom zeitlichen Planungshorizont ergeben sich unterschiedliche Aktivitäten der Personaleinsatzplanung. Nach ZÜLCH [Zül05] und EGBERS [Egb13] lassen sich vier grundsätzliche Aktivitäten unterscheiden (siehe Bild 2-4):

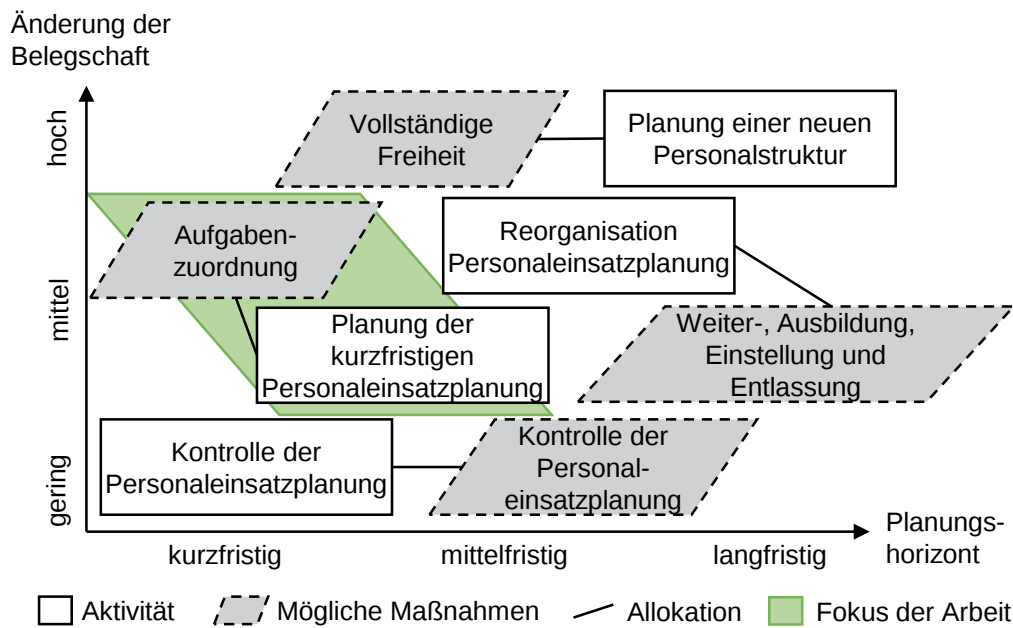


Bild 2-4: Aktivitäten der Personaleinsatzplanung in Abhängigkeit vom Planungshorizont nach [Zül05] und [Egb13]

- **Planung einer neuen Personalstruktur:** Die größte Bandbreite an Möglichkeiten für die Zuordnung von Mitarbeitern zu Montagestationen besteht in der langfristigen Planung oder bei der Planung einer neuen Fabrik. In diesem Fall können die Anzahl der Mitarbeiter sowie deren Fähigkeiten ohne Berücksichtigung der bestehenden Personalstruktur bestimmt werden.
- **Reorganisation der Personaleinsatzplanung:** In der mittelfristigen Reorganisation der Personaleinsatzplanung muss die bestehende Personalstruktur berücksichtigt werden. Eine Veränderung kann sich durch Weiter- und Ausbildung, Einstellung und Entlassung ergeben.
- **Planung der kurzfristigen Personaleinsatzplanung:** In der mittel- bis kurzfristigen Planung sind die Anzahl der Mitarbeiter sowie deren Fähigkeiten festgelegt. Durch eine geeignete Zuordnung der Mitarbeiter zu Montagestationen kann Einfluss auf die Entwicklung der Fähigkeiten sowie die Montagezeit und -kosten genommen werden.
- **Kontrolle der Personaleinsatzplanung:** In einem sehr kurzfristigen Planungshorizont ist nur eine Reaktion auf Störungen im Montagesystem möglich. Dies kann die kurzfristige Neubesetzung einer Montagestation aufgrund eines krankheitsbedingten Ausfalls von Mitarbeitern sein.

Die Aufgabenzuordnung im Rahmen der Personaleinsatzplanung in einem Montagesystem hat Einfluss auf die Gesamtleistung des Montagesystems [GRC21]. Eine geeignete Zuordnung führt zu einer Verbesserung des Gesamtsystems. Das Zuordnungsproblem folgt der klassischen Modellierung eines Optimierungsproblems. Die Zielstellung des

Optimierungsmodells ist die Maximierung oder Minimierung eines Zielfunktionswerts unter Einhaltung von Nebenbedingungen. Die Aufgabenzuordnung hat das Ziel, die Menge an Mitarbeiter $W = \{w_1, \dots, w_N\}$ zu einer gleichgroßen Menge an Montagestationen $P = \{p_1, \dots, p_M\}$ mit minimalen Kosten für die Zuordnung $c_{w_i p_j}$, mit $w_i \in W$ und $p_j \in P$ optimal zuzuweisen. Seit der ersten Modellierung eines Zuordnungsproblems von VOTAW & ORDEN [VO52] im Jahr 1952 entstand eine Vielzahl an Forschungen zur Optimierung des Zuordnungsproblems. In „Assignment Problem: A Golden Anniversary Survey“ [Pen07] von PENTICO und in „Assignment Problems“ von BURKARD ET AL. [BDM09] werden unterschiedliche Modellierungs- und Optimierungsvorgehen vorgestellt. Bei dem Zuordnungsproblem in der Personaleinsatzplanung in der menschenzentrierten Montage handelt es sich um ein lineares, gemischt-ganzzahliges Optimierungsproblem (MILP). Zur Lösung werden exakte und heuristische Verfahren genutzt. Mit exakten Lösungsverfahren wird eine beweisbar optimale Lösungsmenge in endlich vielen Schritten identifiziert. Dies benötigt jedoch häufig eine hohe Rechenleistung und Laufzeit. Bei der Verwendung von heuristischen Verfahren sind Anwender bereit, von der optimalen Lösung abzuweichen, um das Problem in einer praktikablen Laufzeit zu lösen [Pen07].

Aktuelle Vorgehen der kurzfristigen Personaleinsatzplanung berücksichtigen das arbeitsintegrierte Lernen und somit die Fähigkeitsentwicklung der Mitarbeiter nicht ausreichend. Durch die Verwendung **unterschiedlicher Koordinationsansätze** und somit verschiedener Zielfunktionen können in der Aufgabenzuordnung neben der Minimierung der Montagezeit auch weitere Ziele verfolgt werden. Durch eine geeignete Aufgabenzuordnung kann der Umgang mit Fügetechnologien sowie -werkzeugen erlernt werden. Hierzu sind zudem Wechselbeziehungen der Montageoperationen zu berücksichtigen (**Interdependenzen**).

2.2.4 Zeitwirtschaft in der Montage

Nach DEUSE & BUSCH [DB12] ist die Zeitwirtschaft eine elementare Funktion im Unternehmen, welche den Rahmen für die Montageplanung bildet. Erst die Zeitwirtschaft sorgt für eine Absicherung der Entscheidungen, wie Kapazitätsplanung, Kostenberechnung, Angebotskalkulation und Entlohnungsberechnung [BNK21]. SACKERMANN [Sac09] sowie PETZELT [Pet10] betonen, dass für die moderne Zeitwirtschaft die Analyse und Verbesserung von Montageprozessen eine wesentliche Aufgabe ist.

Insbesondere bei der manuellen Montage hat die Bearbeitungszeit einen bedeutenden Einfluss auf die Montagekosten und dadurch auf die Stückkosten pro Einheit. Während die Fertigungskosten automatisierter Prozesse vergleichsweise einfach berechnet werden, besitzen manuelle Montagesysteme deutlich mehr variable Einflussgrößen [DB12]. Nach REFA [REFA93] hängt die Ausführungszeit des Mitarbeiters, dem Montageverfahren, der Montagemethode und den geltenden Bedingungen ab. Daher sind für die Verwendung

von Zeitdaten immer die geltenden Bedingungen und deren Abhängigkeit, wie Bauteilgröße und Weglänge, zu erfassen. Nach REFA [REFA93] ist die Reproduzierbarkeit der Zeitdaten elementar. Die Reproduzierbarkeit umfasst die Nachvollziehbarkeit, die Wiederholbarkeit zu einem späteren Zeitpunkt sowie statische Anforderungen. Zeitdaten gliedern sich nach PETZELT [Pet10] in Ist-Zeit, Normal-Zeit, Soll-Zeit und Vorgabe-Zeit (siehe Bild 2-5): Ist-Zeiten stellen die in der Realität benötigte Zeit für den Montagevorgang dar. Sie bilden den Zeitbedarf in der Realität. Normal-Zeiten sind auf den Leistungsgrad von 100 % normierte Zeiten, die einer durchschnittlichen Leistung von erfahrenen, eingearbeiteten Mitarbeitern entsprechen. Soll-Zeiten basieren auf der Analyse der Ist-Zeiten und/oder Normal-Zeiten unter Berücksichtigung von Einflussgrößen. Durch Addition von Zuschlägen aufgrund der Verteilzeit (Zeitaufwand durch Tätigkeiten zusätzlich zur Arbeitsaufgabe) und Erholungszeit (resultierend aus der Belastung und der körperlichen Anstrengung) ergeben sich die Vorgabezeiten [Pet10].

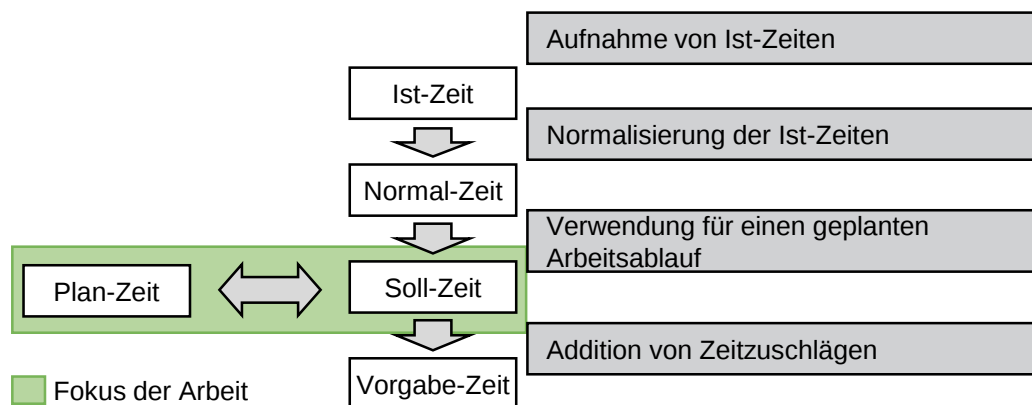


Bild 2-5: Zeitarten in der Montage nach PETZELT [Pet10]

Die ermittelten Vorgabezeiten dienen anschließend in soziotechnischen Montagesystemen zur Arbeitsplatzgestaltung, Fließbandabstimmung und Aufgabenzuordnung. In der REFA [REFA90] werden bei der Arbeitsablaufanalyse die Tätigkeiten in acht Ablaufarten differenziert: Haupttätigkeit, Nebentätigkeit, zusätzliche Tätigkeit, ablaufbedingtes Unterbrechen, störungsbedingtes Unterbrechen, Erholung, persönlich bedingtes Unterbrechen und nicht erkennbare Unterbrechung. Aus der Zusammensetzung der Zeiten der einzelnen Ablaufarten ergibt sich die Vorgabezeit.

Zur Bestimmung von Ist- und Soll-Zeiten existieren nach SACKERMANN [Sac09], REFA [REFA90], BURGGRAF ET AL. [BNK21] sowie DEUSE & BUSCH [DB12] unterschiedliche Methoden: Ist-Zeiten können unter anderem durch Videoaufzeichnungen, Multimoment-Häufigkeitsverteilungen, Selbstaufschreibung/Befragung, automatisierte Zeitregistrierung, REFA-Zeitaufnahme und Multimoment-Zeitmessverfahren erfasst werden. Soll-Zeiten können auf folgenden Wegen ermittelt werden: Zeitaufnahme mit Leistungsgrad, Planzeitermittlung, System vorbestimmter Zeiten, Zeitbausteinkatalog, Vergleich und Schätzen, Schätzen mit Zeitklassen, Prozesszeitformeln, Nomogramme, Berechnung bei Unschärfe, Simulationswerkzeuge.

Von besonderer Bedeutung für die industrielle Anwendung sind die Systeme der vorbestimmten Zeiten, die auf umfangreichen arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen mit definierten Einflussgrößen basieren [WRE23]. Sie lassen sich in einer branchen- und unternehmensübergreifenden Soll-Zeiten-Tabelle darstellen, die universell einsetzbar ist [DB12]. Bei der Verwendung von Systemen der vorbestimmten Zeiten sind keine eigene Erfassung der Ist-Zeiten sowie kein reales Montagesystem zur Bestimmung von Soll-Zeiten erforderlich [BNK21]. Innerhalb der Systeme werden manuelle Montageoperationen in einzelne Bewegungselemente gegliedert und ihnen anschließend Normzeiten zugeordnet, die durch die Auswahl von Einflussgrößen (beispielsweise der Entfernung zum Montagewerkzeug) vorbestimmt sind. Verbreitete Systeme sind nach DEUSE & BUSCH [DB12] das Methods Time Measurement (MTM), Work Factor (WF) und Maynard Operations Sequence Technique (MOST). Grundlagen für diese Systeme haben Taylor und das Ehepaar GILBRETH & GILBRETH geliefert. Taylor zerlegte in umfangreichen Zeitstudien die Tätigkeiten der Mitarbeiter in elementare Grundbewegungen und GILBRETH & GILBRETH analysierten in Bewegungsstudien mithilfe von Filmaufnahmen die Bewegungsabläufe [DB12]. Das MTM-System unterteilt beispielsweise eine Montageoperation in die Grundbewegungen Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen [BLB06]. Jedoch werden die spezifischen Fähigkeiten der Mitarbeiter innerhalb dieser Systeme nicht berücksichtigt.

Innerhalb der bestehenden Soll- und Plan-Zeiten, die zur Planung der Montage genutzt werden, sowie in den Systemen der vorbestimmten Zeiten, werden einheitliche Montagezeiten von durchschnittlichen Mitarbeitern genutzt. **Individuelle Charakteristika der Mitarbeiter werden nicht berücksichtigt.** Dies führt dazu, dass die Prognose der Montagezeiten für die Montageplanung Ungenauigkeiten und Unsicherheiten besitzt. Daher ist eine systematische Auswahl relevanter Humanfaktoren für die menschenzentrierte Planung und Steuerung notwendig.

2.2.5 Cyber-physische Montagesysteme

Cyber-physische Montagesysteme bestehen aus autonomen und kooperativen Elementen und Subsystemen, die situationsabhängig über alle Ebenen der Produktion, von Prozessen über Maschinen bis hin zu Produktions- und Logistiknetzwerken, interagieren [NHP08]. Cyber-physische Montagesysteme sind dadurch gekennzeichnet, dass in ihnen cyber-physische Systeme agieren [GHP19, SBC12]. Nach der VDI/VDE 2206 [VDI/VDE2206] ist ein cyber-physisches System ein „*System, das auf einem mechatronischen Kern basiert, der durch seine Vernetzung mit dem Internet der Dinge und Dienste gekennzeichnet ist, wodurch beispielsweise Verhaltens- oder Eigenschaftsänderungen während des Betriebs ermöglicht werden*“. Der Einsatz von cyber-physischen Systemen in Montageumgebungen ermöglicht den Aufbau von sogenannten cyber-physischen Montagesystemen [Gal19]. Das Modell eines cyber-physischen Montagesystems umfasst neben Produkten, Prozessen, Ressourcen und Werkern auch Montagestationen, einzelne Montagemaschinen und Anlagen [BMW21, GP17, GRP21, HR18, MHS19, Str16]:

- Das **Produktmodell** besteht aus den Produktstammdaten und der Produktstruktur sowie den Dokumenten und Dokumentstrukturen. Die Stücklisten erfassen die Zuordnung von Produktkomponenten (Materialien, Einzelteile, Baugruppen, Produkte) zueinander.
- Das **Prozessmodell** stellt den logischen bzw. chronologischen Ablauf des Montageprozesses dar. Dazu werden u. a. Montageprioritätsgraphen verwendet. Diese Graphen listen die Montageprozesse mit entsprechenden Vorgänger-/Nachfolger-Beziehungen auf.
- Das Modell der **Montageressourcen** umfasst alle Ressourcen des Montagesystems, die zur Montage des Produkts verwendet werden. Hierzu gehören zum Beispiel Arbeitsstationen, Montagewerkzeuge und Maschinen.
- Das **Mitarbeitermodell** enthält Informationen über die beschäftigten Mitarbeiter im Montagesystem. Es beinhaltet zum einen allgemeine Informationen sowie die Identifikationsnummer der Mitarbeiter und die Verfügbarkeit. Zum anderen gibt die Darstellung Informationen über spezifische menschliche Faktoren an. Nach GROSSE ET AL. [GGJ15] lassen sich die menschlichen Faktoren in wahrnehmungsbezogene, mentale, physische und psychosoziale Aspekte sowie in Aspekte der Arbeitsumgebung unterteilen.

In einem cyber-physischen Montagesystem werden statische Daten des Montagesystems mit Echtzeitdaten verbunden. Diese Systemelemente werden um geeignete Sensoren, Kommunikationsschnittstellen und Aktoren erweitert, die die Verknüpfung von digitaler und physischer Welt ermöglichen. An jedem Element werden relevante Daten über Produkt, Prozess, Ressourcen und Werker maschinenlesbar erfasst. Dazu gehören aktuelle Zustände, wie z. B. die Anzahl der Baugruppen, der Verschleiß von Betriebsmitteln oder die Erfahrung der Werker [MBC11]. Diese Daten werden über eine Kommunikationsschnittstelle ausgetauscht. Die Informationsverarbeitung erhält den Dateninput. Die Verbindung des cyber-physischen Montagesystems mit dem Internet der Dinge und Dienste ermöglicht die Integration von Künstlicher Intelligenz für vorausschauende Analysen. Optimierungsmaßnahmen für die Anlage können in Echtzeit ermittelt und über Akteure weitergegeben werden [SCL17].

Digitaler Zwilling der Mitarbeiter

Der Ursprung der Idee des Digitalen Zwillings geht zurück auf das Apollo-Programm der NASA (National Aeronautics and Space Administration) in den 1970er-Jahren. Im Rahmen dieses Programms wurden zwei identische Raumfahrzeuge entwickelt, um den Zustand während einer Weltraummission zu simulieren [BR16]. Der Begriff „Digitaler Zwilling“ wurde erstmals 2004 von GRIEVERS in der Vorlesung Product Lifecycle Management an der University of Michigan in den Vereinigten Staaten verwendet [Gri14]. Der Digitale Zwilling wird bei der Produkt- und Produktionssystementwicklung entwor-

fen. So können Daten aus bisherigen Produkten und Produktionssystemen genutzt werden. Die Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung (WiGeP) definiert den Digitalen Zwilling wie folgt:

„Ein Digitaler Zwilling ist eine digitale Repräsentation einer Produktinstanz oder einer Instanz eines Produkt-Service-Systems. Diese digitale Repräsentation umfasst ausgewählte Merkmale, Zustände und Verhaltensweisen der Produkt-Instanz oder des Systems. Gleichzeitig werden verschiedene Modelle, Informationen und Daten innerhalb dieser digitalen Repräsentation während verschiedener Lebenszyklusphasen miteinander verknüpft. [...] Der Digitale Zwilling enthält Verknüpfungen zwischen dem digitalen Master und dem digitalen Schatten.“
[SAT20]

Produktklassen werden im Digitalen Zwilling anhand von Daten aus der Entwicklung beschrieben. Mithilfe dieser Daten können entsprechende Rückschlüsse und Vorhersagen über individuelle Instanzen gemacht werden. Grundlage ist die geeignete Modellierung und Auswahl der Sensorik. Grundsätzlich kann der Großteil der Aktivität in einem cyberphysischen System durch geeignete Sensorik automatisch erfasst, gespeichert und als Grundlage für zukünftige Entscheidungen genutzt werden. Beim NRW-Forschungskolleg *„Gestaltung von flexiblen Arbeitswelten – Menschenzentrierte Nutzung von Cyber-Physical Systems in Industrie 4.0“* wurde der Einsatz von Digitalen Zwillingen zur Abbildung menschlicher Eigenschaften erforscht. Das Land Nordrhein-Westfalen förderte insgesamt über acht Jahre die inter- und transdisziplinäre Forschung an der Universität Paderborn und der Universität Bielefeld mit über sechs Millionen Euro. Das Forschungskolleg verknüpft Ingenieurwissenschaften mit Geistes- und Gesellschaftswissenschaften. Wissenschaftler aus den Disziplinen Ingenieurwissenschaft, Wirtschaftswissenschaft, Mathematik, Informatik, Erziehungswissenschaft, Soziologie, Arbeitswissenschaft sowie Psychologie kooperierten. Weiterhin arbeitete das Forschungskolleg transdisziplinär mit Personen aus der Zivilgesellschaft. Aufgrund des breiten Anwendungsbereichs und der Potenziale der Digitalen Zwillinge des Menschen sind sie in den GARTNER HYPE CYCLE FOR EMERGING TECHNOLOGIES 2020, 2021 und 2022 [Gar20, Gar21, Gar22] als aufstrebende Technologie gelistet. Sie finden Anwendung in verschiedenen Bereichen, wie zum Beispiel bei der Arbeitsplatzgestaltung, Montageplanung und -steuerung. Wie der Digitale Zwilling der technischen Systemelemente benötigt auch der Digitale Zwilling des Menschen ein Gegenstück in der realen Welt. Die digitale Repräsentation wird durch verschiedene Attribute eines Menschen modelliert [GSM23]. Der Digitale Zwilling des Menschen beinhaltet mindestens eines der folgenden Attribute [Eng20, GGN17, GRH22, GRP21, MS22, SGN20, She21]:

- **Physische Attribute:** z. B. anthropometrische Attribute, biomechanische Attribute, Augenbewegungen, Verletzungen

- **Physiologische Attribute:** z. B. Herzfrequenz, Muskelspannung, elektrophysiologische Signale des Gehirns, Blinzelrate und -zeit
- **Psychosoziale Merkmale:** z. B. Motivation, Stress
- **Mentale Attribute:** z. B. Erfahrung, Fertigkeiten, Fähigkeiten, Arbeitsbelastung, intuitive Voreingenommenheit
- **Wahrnehmungsmerkmale:** z. B. auditive Empfindlichkeit, visuelle Empfindlichkeit, Temperatur-Empfindlichkeit
- **Emotionale Merkmale:** z. B. Ärger, Angst, Schamgefühl
- **Verhaltensattribute:** z. B. Interaktionen mit dem System

Basierend auf MILLER UND SPATZ [MS22], GROSSE ET AL. [GGN17], SGARBOSSA ET AL. [SGN20] GRÄBLER ET AL. [GRH22, GRP21], SHENGLI [She21] und ENGELS [Eng20] wird der Digitale Zwilling des Menschen definiert als ein integriertes Modell, das deskriptive Analytik, diagnostische Analytik, prädiktive Analytik und präskriptive Analytik ermöglicht. Der Digitale Zwilling des Menschen enthält verschiedene Elemente und Informationen zur individualisierten Beschreibung und Auswertung mit dem Ziel, ein oder mehrere Merkmale zu untersuchen. Zu diesem Zweck werden in dem Modell etablierte Modelle, z. B. aus der Arbeitswissenschaft, wie Lernkurven [GRC21, GWR21], mit Echtzeitdaten aus dem physischen Zwilling kombiniert. In der industriellen Anwendung muss der Umgang mit personengebunden Daten vertraulich geschehen. Hierzu sind geeignete Rollen verbunden mit gestaffelten Zugriffsrechten in Unternehmen zu etablieren. Dies ist jedoch nicht Bestandteil der vorliegenden Dissertation.

Bestehende Informationssysteme (siehe A1.2) in der Montage sind zum aktuellen Zeitpunkt aufgrund der fehlenden Datendurchgängigkeit nicht auf den Betrieb von cyber-physischen Montagesystemen ausgerichtet. Weiterhin werden in aktuellen Ansätzen von cyber-physischen Montagesystemen keine **Digitalen Zwillinge des Menschen** verwendet. Informationssysteme wie die Betriebsdatenerfassungen auf dem Shopfloor bieten hierfür eine Grundlage. In die zu entwickelnde Methodik müssen hierzu die **historischen Daten in die Fähigkeitsprognose** integriert werden.

2.2.6 Fließbandabstimmung

Ein zentraler Schritt bei der Montageplanung sind die Terminierung und Balancierung. Dies beinhaltet die Zuordnung von begrenzten Kapazitäten (wie Mitarbeiter) zu einer Anzahl von Montageoperationen in Bezug auf Zeit und Menge. In getakteten Montagesystemen werden die Montageoperationen auf unterschiedliche Stationen aufgeteilt. Das Montageobjekt wird von Station zu Station bewegt. An jeder Montagestation werden bestimmte Montageoperationen unter Berücksichtigung der Taktzeit durchgeführt [KP07]. Die zeitliche Abfolge der Montagevorgänge erfolgt nach technischen Vorgaben, d. h.

chronologisch, parallel oder nacheinander [Ste77]. Bei der Fließbandabstimmung⁶ erfolgt nach FISEL [Fis19] die Zuordnung aller Montageoperationen zu Stationen unter Berücksichtigung des Montagevorranggraphen sowie weiterer Restriktionen mit definierter Zielsetzung. Restriktionen sind nach PRÖPSTER [Prö15] Arbeitsgangrestriktionen, Stationsrestriktionen, Positionsrestriktionen und Mitarbeiterrestriktionen. Bild 2-6 zeigt den Prozess der Fließbandabstimmung am Beispiel von vier Montagestationen. Definierte Zielsetzungen können nach BOYSEN ET AL. [BFS07] folgende sein: 1) Minimierung der Anzahl an Stationen für einen gegebenen Output, 2) Minimierung der Taktzeit bei gegebener Anzahl an Stationen, 3) Maximierung der Effizienz des Montagesystems, 4) Minimierung der Kosten für einen gegebenen Output, 5) Maximierung des Profits, der sich als Differenz aus Einnahmen und Personalkosten ergibt, sowie 6) Balancierung der Stationszeiten im Montagesystem.

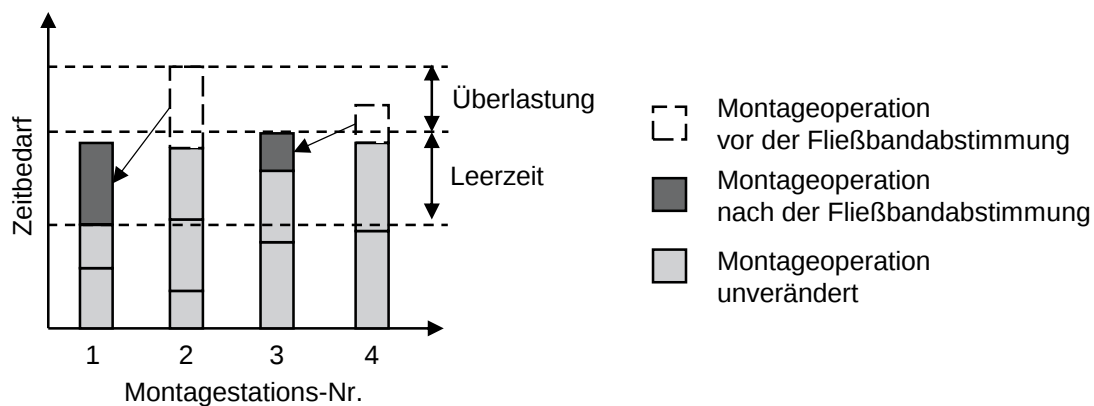


Bild 2-6: Leitidee der Fließbandabstimmung nach [Prö15]

Eine erste mathematische Formulierung des Problems der Fließbandabstimmung stammt von SALVESON [Sal55] im Jahr 1955. In der nachfolgenden Forschung wurden Rahmenbedingungen und Restriktionen variiert, Modellierungen des Montagesystems erweitert und Optimierungsalgorithmen verfeinert.

BAYBARS [Bay86] führt eine grundlegende Kategorisierung der Fließbandabstimmung ein. Demnach existieren das Basisproblem des Simple-Assembly-Line-Balancing-Problems (SALBP) und verschiedene Abwandlungen des Basisproblems, die als General Assembly Line Balancing (GALB) bezeichnet werden. Nach SCHOLL [Sch95] sowie SCHOLL & BECKER [SB06] werden grundsätzlich vier Varianten des SALBP unterschieden (siehe Tabelle 2-1). Diese variieren hinsichtlich ihrer Zielfunktion:

⁶ Synonym zum Begriff Fließbandabstimmung (u. a. Fis19, Kha14) werden die Begriffe Austaktung (u. a. Ros08, Wey10, Prä15), Abtaktung (u. a. Lut73, Dan17, Kro09), Bandabgleich (u. a. Dec93, KS01, Sch91), Leistungsabstimmung (u. a. Kra00, Wei00) und Kapazitätsabstimmung (u. a. Alt09, Krü04) verwendet. In der englischsprachigen Wissenschaft hat sich der Begriff (Assembly) Line Balancing (u. a. BFS08, MBB17, SB06) durchgesetzt.

Tabelle 2-1: Varianten der Fließbandabstimmung nach SCHOLL & BECKER [SB06]

	Taktzeit	
	Gegeben	Minimieren
Anzahl an Stationen		
Gegeben	SALBP-F	SALBP-2
Minimieren	SALBP-1	SALBP-E

- **SALBP-1:** Ziel dieser Variante ist die Minimierung der Anzahl der Montagestationen eines Montagesystems bei einer gegebenen Taktzeit.
- **SALBP-2:** Ziel dieser Variante ist die Minimierung der Taktzeit bei gegebener Anzahl an Montagestationen eines Montagesystems.
- **SALBP-E:** Ziel dieser Variante ist die Maximierung der Effizienz durch parallele Minimierung der Anzahl m an Montagestationen und der Taktzeit c . Hierdurch soll eine möglichst hohe Auslastung des gesamten Montagesystems erreicht werden.
- **SALBP-F:** Innerhalb dieser Variante wird bei gegebener Taktzeit c und Anzahl m an Montagestationen eine geeignete Lösung unter Berücksichtigung der Randbedingungen ermittelt.

Das SALBP ergibt sich aus den zugrunde liegenden Annahmen: homogenes Produkt, serielle Anordnung der Montagearbeitsplätze, feste Taktzeit, deterministische Bearbeitungszeit t_{w_i} der n Montageoperationen $T = \{1, \dots, n\}$ und Mitarbeiter w_i der Menge der Mitarbeiter*innen $W = \{w_1, \dots, w_N\}$, Präzedenzrelation über Montageoperationen. Im Forschungsbereich GALBP werden allgemeinere Formen der Modellierung des Optimierungsproblems betrachtet. Dies umfasst unter anderem parallele Montagestationen, parallele Montagelinien, U-förmige Montagelinien und Montagesysteme mit Springern. Eine Übersicht über Forschungsbeiträge zum Thema GALBP zeigen BOYSEN ET AL. [BSS22] in ihrem Beitrag „*Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years?*“ sowie BOYSEN ET AL. [BFK23] auf ihrer Website „*www.assembly-line-balancing*“.

Verschwendung bei der manuellen Fließmontage

Nachfolgend sollen die sieben Ausprägungsformen der Verschwendung (siehe Abschnitt 2.1.1) am Untersuchungsgegenstand der manuellen Fließmontage spezifiziert werden. Das Auftreten von Verschwendung weist auf Ineffizienz oder nicht wertschöpfende Prozessschritte innerhalb der Montage hin:

Überproduktion tritt ein, wenn die produzierte Menge die Nachfrage übersteigt. Dies liegt vor, wenn entweder zu viel oder zu schnell produziert wird. Eine Ursache ist der Einsatz einer zu hohen Anzahl an Mitarbeiter. Eine andere mögliche Ursache ist die ungenaue Modellierung der Mitarbeiter und die daraus resultierende fehlerhaften Prognose

der Montagezeiten. *Aufgrund von langjähriger Erfahrung benötigt ein Mitarbeiter weniger Bearbeitungszeit für die Montage eines Produkt und montiert daher in einer Schicht mehr als geplant.*

Durch Verzögerungen im Arbeitsablauf entstehen **Wartezeiten**, also das Warten auf ein Werkstück, das Warten auf Hilfsmaterial und Werkzeug oder eine Störung [Eis18]. Dies entsteht unter anderem durch unzureichende Planung der auszuführenden Montageoperationen und falsche Einschätzung der heterogenen Montageleistungen der Mitarbeiter. *Ein Mitarbeiter wartet auf ein Werkstück, da die vorgelagerte Montageoperation länger als prognostiziert dauert.*

Transport ist die Bewegung von Materialien im Montagesystem. Nach FEIBICHLER [FS13] und TAKEDA [Tak14] stellt das eine Nebentätigkeit für Monteure und eine Verschwendung dar, die vermieden werden muss. Notwendige Materialien, wie Hilfsstoffe und Werkzeuge, müssen den Mitarbeitern mit möglichst wenig Verschwendung zugeführt werden. *Bei einer ungeeigneten räumlichen Gestaltung des Montagesystems müssen die Mitarbeiter bei jedem Fügevorgang die notwendigen Schrauben aus einem separaten Zwischenlager holen.*

Die Verschwendungsart **Bewegungen** bezieht sich auf unnötige Bewegungsabläufe der Mitarbeiter. Dies ist bei der Montagesystemgestaltung zu beachten. Verschwendung tritt auf, wenn Materialien nicht im Greifbereich der Mitarbeiter liegen und eine aufwendige Ausrichtung vor dem Fügen notwendig ist. *Wenn bei der Planung des Montagesystems die ergonomischen Aspekte der Mitarbeiter nicht berücksichtigt wurden, müssen Mitarbeiter aufgrund schlechter Zugänglichkeit zusätzliche, nicht wertschöpfende Bewegungen ausführen.*

Bearbeitungsschritte am Produkt, die aus Kundensicht keinen Mehrwert leisten, stellen nach YAGYU [Yag09] eine weitere Verschwendung dar. Ausgangspunkte dieser Verwendung liegen in der Produktentwicklung oder in der Montageplanung. In der Montageplanung führen der falsche Automatisierungsgrad des Montagesystems und das Fehlen beziehungsweise die Auswahl von ungeeigneten Werkstückträgern zur Verschwendung. *Bei einer ungeeigneten Gestaltung in der Produktentwicklung müssen die Mitarbeiter in der Montage Hilfsstrukturen für die Montage schaffen.*

Bestände (Lagerung) binden Kapital, erfordern logistische Prozesse und benötigen Flächen. Hohe Bestände führen zu viel Verschwendung, die zu vermeiden ist. Bei den Beständen kann es sich um Endprodukt-Bestand, Work-in-Process-(WIP-)Bestand sowie Ausgangsmaterial-Bestand handeln. Eine mögliche Ursache ist die ungenaue Modellierung der Fähigkeiten der Mitarbeiter und die daraus resultierende fehlerhafte Prognose der Montagezeiten. *Bei einer schlechten Prognose werden Hilfsstoffe frühzeitig beschafft. Falls jedoch Novizen in der Montage arbeiten, werden die Hilfsstoffe erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt benötigt und binden somit unnötig Kapital.*

Ausschuss wird von ERLACH [Erl10] als kritischste Verwendungsart bezeichnet. Der gesamte Wertschöpfungsprozess wird vernichtet. Werden die entstandenen Schlechteile nicht erkannt, sind auch die nachgelagerten Prozesse nicht wertschöpfend. *Diese Verschwendung tritt auf, wenn Mitarbeiter erforderliche Fähigkeiten nicht besitzen, überlastet sind und/oder eine ungeeignete Assistenz erhalten.*

Eine andere Möglichkeit, mit Schlechteilen umzugehen ist die *Nacharbeit*. Das ist sinnvoll, wenn die entstehende Verschwendung den Mehraufwand der Mitarbeiter rechtfertigt. Durch geeignete Anwendung von Poka Yoke und Six Sigma kann das Aufkommen dieser Verschwendung reduziert werden.

Bestehende grundlegende Methoden der Fließbandabstimmung stellen eine gute Grundlage für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung in der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung dar. Jedoch führen die **unzureichende Modellierung der Mitarbeiter** und eine fehlende Berücksichtigung der Fähigkeitsentwicklung zu einer ungenauen Prognose der Montagezeiten, welche wiederum unterschiedliche Verschwendungen in dem Montagesystem zur Folge hat, wie Überproduktion und vor allem Wartezeiten.

2.3 Humanfaktoren in der Montage

In der manuellen Montage stellen üblicherweise Personalkosten den größten Kostenanteil dar, sodass hier ein großes Kostensenkungspotenzial in der Arbeitseffizienz besteht. Wie in Abschnitt 1.1 dargestellt, ist auch in Zukunft die Montage überwiegend von manuellen Tätigkeiten geprägt. Um unter diesen Bedingungen eine wettbewerbsfähige Produktion zu erreichen, ist bei der Gestaltung der Montagesysteme ein besonderes Augenmerk auf den Faktor Mensch zu legen [Gan09]. Die Leistung des Montagesystems wird nicht nur durch die technische Ausgestaltung des Systems beeinflusst, sondern auch durch die Eigenschaften der Mitarbeiter, die an den Montagestationen tätig sind [WHG18b, WZ13]. Die Disziplin, die sich damit beschäftigt, ist die Disziplin Human Factors. Die International Ergonomics Association (IEA) definiert Human Factors wie folgt [IEA00]:

„scientific discipline concerned with the understanding of interactions among humans and other elements of a system, and the profession that applies theory, principles, data, and methods to design in order to optimize human well-being and overall system performance.“

Demnach versteht sich die Disziplin als interdisziplinäre Wissenschaft, welche sich mit der Beziehung zwischen Mitarbeiter, Technik und Organisation befasst und auf unterschiedlichen Basisdisziplinen aufbaut. Nach der Erweiterung von ROESMANN & GRÄBLER [RG23] und von BADKE-SCHAUB ET AL. [BHL12] handelt es sich um Ingenieurwissenschaft, Wirtschaftswissenschaft, Mathematik, Informatik, Erziehungswissenschaft, Ergonomie, Recht, Soziologie, Arbeitswissenschaft und Psychologie. Ziel ist es, das mensch-

liche Wohlbefinden und die Verbesserung der Produktivität, die Sicherheit des soziotechnischen Systems sowie die Funktion und Produktivität des Systems zu gewährleisten [Ras97]. Nach SALVENDY [Sal12] hat die Berücksichtigung von Humanfaktoren viele Vorteile, z. B. die Verringerung von Fehlern, die Erhöhung der Flexibilität und Leistung des Systems und die Erhöhung der menschlichen Sicherheit. Nach BADKE-SCHAUB ET AL. [BHL12] sowie STERN [Ste20] bedeutet dies, dass

- „negative Folgen vermieden oder verringert werden,
- das Wohlbefinden der Mitarbeiter gesichert sowie
- die Sicherheit und Funktionsfähigkeit des Systems verbessert wird.“

Weiterhin wird der Begriff Humanfaktoren als Oberbegriff aller Eigenschaften der Mitarbeiter verwendet, die einen Einfluss auf das soziotechnische System haben [NKG16]. Nach GROSSE [Gro15a] können diese in physische Faktoren (z. B. Körperhaltung), mentale Faktoren (z. B. Fähigkeiten), psychosoziale Faktoren (z. B. Motivation) und wahrnehmende Faktoren (z.B. Sehstärke) unterteilt werden.

Der Erkenntnisgewinn zu Humanfaktoren wird hauptsächlich durch arbeitswissenschaftliche und psychologische Forschungen erzielt [NWG21]. Durch die Übertragung dieses Wissens können neue Methoden und Modelle für ingenieurwissenschaftliche Forschungen (z. B. menschenzentrierte Montageplanung) gewonnen werden. Die Integration von Humanfaktoren in bestehende Werkzeuge der Entscheidungsunterstützung bei der Montageplanung ist somit sehr bedeutsam, wobei aktuell individuelle Charakteristika größtenteils vernachlässigt werden. Dies ermöglicht die frühzeitige und durchgängige Berücksichtigung in der Montageplanung und -steuerung [SGN20].

In der Arbeitsgruppe „*Human factors and ergonomics in industrial and logistic system design and management*“ als Teil der IFAC TC 5.2 „*Manufacturing Modelling for Management and Control*“ sowie im NRW-Forschungskolleg „*Gestaltung von flexiblen Arbeitswelten – Menschenzentrierte Nutzung von Cyber-Physical Systems in Industrie 4.0*“ werden Ansätze zur Integration von Humanfaktoren in die Planung und Steuerung von Produktions- und Logistiksystemen erforscht und entwickelt. Ziel beider Forschergruppen ist die Entwicklung von Systemen zur Entscheidungsunterstützung in der Industrie 4.0 bzw. Arbeit 4.0. In Bild 2-7 ist der Aufbau einer menschenzentrierten Entscheidungsunterstützung für die Personaleinsatzplanung in cyber-physischen Montagesystemen aufbauend auf ROESMANN & GRÄBLER [RG23], SGARBOSSA ET AL. [SGN20] sowie PANETTO ET AL. [PII19] dargestellt. Die menschenzentrierten Entscheidungsunterstützung in cyber-physischen Montagesystemen unterteilt sich in die folgenden drei Kernforschungsbereiche:

- 1) **Automatisierte Fließbandabstimmung:** Entscheidend ist es, die Mitarbeiter bereits in den frühen Planungsphasen des Montagesystems zu integrieren. Ein zentraler Aspekt in der Reihen-, Takt- und Fließmontage ist die Fließbandabstimmung. Aufgrund der verbesserten Datendurchgängigkeit kann dies mit einer geeigneten Modellierung

bereits automatisiert geschehen. Hierzu sind Human-Factor-Aspekte bereits als menschenzentrierte Anforderungen bei der Systemplanung zu berücksichtigen.

- 2) **Prognose der Mitarbeiterfähigkeiten:** Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien führt zu einer Steigerung der Transparenz und Verbesserung der Produktivität. Dabei handelt es sich auch um die Aufnahme und Analyse von personenbezogenen Daten. Das sind beispielsweise Ermüdung, Lerneffekt, Alterung sowie Produktivität und Qualität. Hierzu müssen neue integrierte Modellierungsansätze entwickelt werden, die diese Informationen der Mitarbeiter integrieren.
- 3) **Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung:** Die Erweiterungen der Modellierung des Montagesystems müssen auch in die Operations-Research-Methode integriert werden. Die Integration ermöglicht eine geeignete Auswahl und Unterstützung der Mitarbeiter durch neue Technologien. Die Anwendung von Data Analytics wird die Prognose des Verhaltens des Montagesystems verbessern. Dies ermöglicht eine adaptive und intelligente fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung bei der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung.

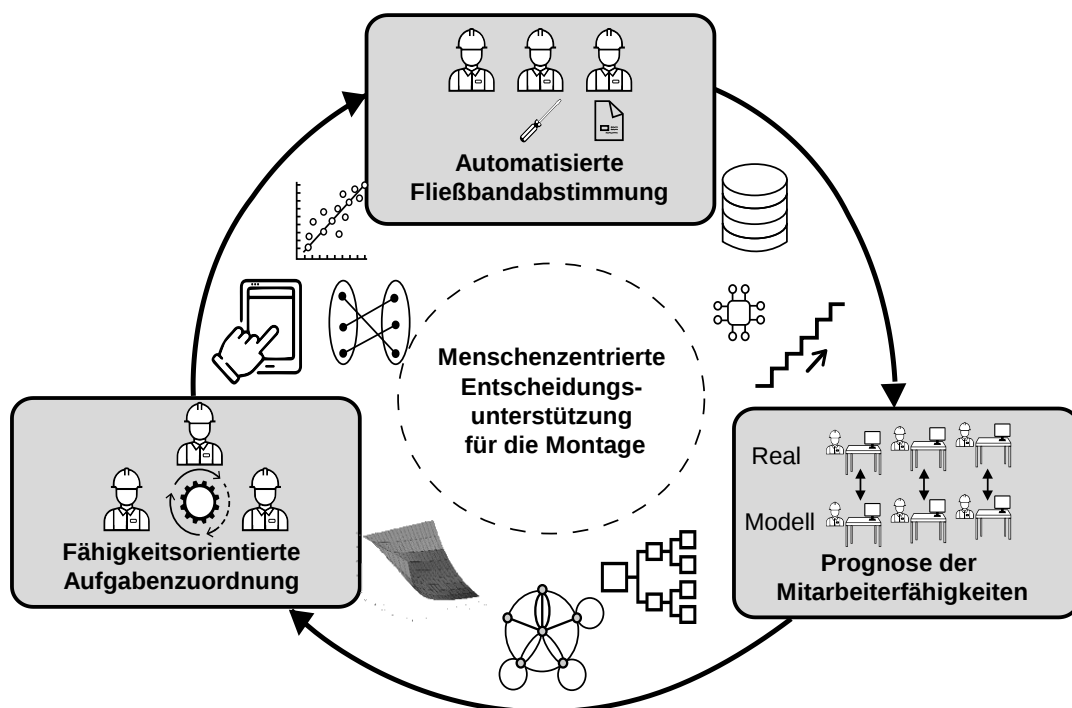


Bild 2-7: Menschenzentrierte Entscheidungsunterstützung für die Montage, aufbauend auf SGARBOSSA ET AL. [SGN20] sowie PANETTO ET AL. [PII19]

2.3.1 Humanfaktoren in der Planung von Montagesystemen

Innerhalb der Planung von Montagestationen nehmen Humanfaktoren eine entscheidende Rolle ein. Die Berücksichtigung kann sowohl zu einer Steigerung der Arbeitsleistung als auch zum Wohlbefinden bei der Arbeit führen. Grundsätzlich sind menschenzentrierte

Montagesysteme nach STERN [Ste20] so zu gestalten, dass sie kompatibel mit der Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter, den Erwartungen der Mitarbeiter und mit der Montageoperation sind. Die Arbeitsgestaltungen folgen unterschiedlichen Zielsetzungen [Ste20]: 1) Das wirtschaftliche oder ingenieurwissenschaftliche Ziel ist die Verbesserung der Leistung sowie Effizienz der Prozesse innerhalb des Montagesystems. 2) Aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive zielt die Arbeitsgestaltung auf die Gestaltung einer sicheren und weder physisch noch mental erschöpfenden Arbeit ab [WWD19].

Aus arbeitswissenschaftlicher Perspektive müssen Montagestationen ergonomische und arbeitspsychologische menschliche Bedürfnisse berücksichtigen. Hierzu haben unter anderem WEGGE ET AL. [WWD19] und MARCUS [Mar11] Kriterien aufgestellt. Ergonomische Kriterien sind beispielsweise die Förderung einer natürlichen Körperhaltung sowie Vermeidung andauernder statischer und belastender Positionen. Arbeitspsychologische Kriterien sind unter anderem Angemessenheit, Persönlichkeitsförderlichkeit und Lernförderlichkeit. Bei der ergonomischen und arbeitspsychologischen Gestaltung von Montagestationen bestehen Grundsätze und eine Herangehensweise, die einzelne Aspekte beachten. Relevant für die menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung sind:

- 4) *DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen [DIN6385],*
- 5) *DIN EN 894: Sicherheit von Maschinen – Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen [DIN894-1],*
- 6) *DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme [DIN9241-210] und*
- 7) *VDI/VDE-MT 7100: Lernförderliche Arbeitsgestaltung. Ziele, Nutzen, Begriffe [VDI7100].*

2.3.2 Humanfaktoren bei der Fließbandabstimmung

Nicht nur bei der Montagestationsgestaltung nehmen Humanfaktoren in der Arbeitsgestaltung eine zentrale Rolle ein. Durch die geeignete Berücksichtigung von Humanfaktoren wird sowohl die Arbeitsleistung als auch das Arbeitsempfinden der Mitarbeiter und des gesamten Montagesystems gesteigert. Bei der Fließbandabstimmung von Montagesystemen besteht in den letzten zehn Jahren ein gesteigertes Interesse an der Integration von Humanfaktoren mit dem Fokus auf Bearbeitungsgeschwindigkeit, Qualifikationsniveau und Ergonomie. Für die folgenden vier Erweiterungen des Problems der Fließbandabstimmung werden Lösungen erforscht:

Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem (ALWABP): MIRALLES ET AL. [MGA07] stellen in Montagesystemen mit leistungsgewandelten Mitarbeitern eine große Heterogenität der Leistung der Mitarbeiter fest. Darauf aufbauend entstand die Er-

weiterung Assembly Line Worker Assignment and Balancing, die unterschiedliche Montagezeiten der Mitarbeiter für die gleiche Montageoperation berücksichtigt. Hierzu wurden die Annahmen des SALBP ergänzt: Jeder Mitarbeiter wird nur genau einem Montagearbeitsplatz zugeordnet, jede Montageoperation wird nur genau einem Montagearbeitsplatz zugeordnet. Montageoperationen und Mitarbeiter werden gleichzeitig den Montagestationen zugeordnet. Exakte und heuristische Lösungsverfahren für dieses Problem stellen BLUM & MIRALLES [BM11], MIRALLES ET AL. [MGA07], MIRALLES ET AL. [MGA08], MOREIRA ET AL. [MRC12], MUTLU ET AL. [MPS13], POLAT ET AL. [PKM16], BORBA & RITT [BR14] und PEREIRA [Per18] vor.

Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem (AWIBP): Eine weitere Problemstellung verfolgt die AWIBP-Erweiterung der Fließbandabstimmung. Hierbei wird zwischen zwei Gruppen von Mitarbeitern unterschieden. Bei der Problemstellung müssen leistungsgewandelte Mitarbeiter und nicht-leistungsgewandelte Mitarbeiter Stationen zugeordnet werden. Unter anderem präsentieren MOREIRA ET AL. [MMC15] sowie MOREIRA ET AL. [MPC17] hierzu geeignete Ansätze.

Assembly Line Balancing with Hierarchical Worker Assignment (ALBHWP): Bei dieser Erweiterung werden unterschiedliche Fähigkeitsniveaus der Mitarbeiter bei der Fließbandabstimmung berücksichtigt. Dabei wird an jeder Montagestation ein spezifisches Fähigkeitsniveau verlangt und Mitarbeiter mit höherem Fähigkeitsniveau erhalten einen höheren Lohn. Beim Optimierungsproblem wird eine kostenminimale Montagestationen-Montageoperationen-Mitarbeiter-Zuordnung gesucht. Ein Lösungsverfahren wird von SUNGUR & YAVUZ [SY15] aufgezeigt.

Ergonomics (Ergo): Alternde Mitarbeiter (speziell in Industrieländern) führen dazu, dass das Interesse der Forschung an ergonomischen Aspekten in der Fließbandabstimmung steigt. OTTO & BATTALIA [OB17] stellen bestehende Forschungsergebnisse zur Integration ergonomischer Aspekte in die Fließbandabstimmung und Jobrotation vor. Basierend auf Methoden zur Erhebung des ergonomischen Risikos, z. B. *National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH)*, *Occupational Risk Assessment of Repetitive Movements and Exertions of the Upper Lim (OCRA)* und *European Assembly Worksheet (EAWS)*, wird die Ergonomie modelliert. Lösungsansätze werden unter anderem von KARA ET AL. [KAG14], OTTO & SCHOLZ [OS11], STERNATZ [Ste14], BATTINI ET AL. [BCO16] und BATTINI ET AL. [BCO17] vorgestellt.

Die Verwendung von Humanfaktoren in der Montageplanung und -steuerung ermöglicht die Berücksichtigung der individuellen Charakteristika der Mitarbeiter. Jedoch erfolgt zum einen keine systematische Auswahl von relevanten Humanfaktoren für die Leistung von Montagesystemen. Zum anderen werden weder in den bestehenden Ansätzen zur Planung von Montagestationen noch bei der Fließbandabstimmung **Fähigkeitsentwicklungen der Mitarbeiter sowie variierende Montagezeiten berücksichtigt**. Weiterhin werden in keinem der Ansätze historische Daten zur Verbesserung der Beschreibung der individuellen Mitarbeiter genutzt.

3 Stand der Forschung

In der vorangegangenen Analyse des Betrachtungsbereichs wurden Defizite aufgezeigt und der Bedarf nach einer Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung verdeutlicht. Die Fähigkeiten der Mitarbeiter müssen in der Montageplanung und -steuerung individuell berücksichtigt werden.

Dieses Kapitel befasst sich mit bestehenden Ansätzen und Arbeiten, die im Kontext der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung relevant sind⁷. Sie werden diskutiert und hinsichtlich der in Kapitel 2 herausgearbeiteten Defizite bewertet. In Kapitel 3.1 werden bestehende Vorgehensweisen für die Integration von Humanfaktoren in die Montageplanung vorgestellt und analysiert. Kapitel 3.2 stellt Ansätze und Methoden für die Berücksichtigung von Humanfaktoren in der Produktions- und Montagesteuerung mit Fokus auf die Aufgabenzuordnung dar. Das Ergebnis dieser Bewertung wird in Kapitel 3.3 zusammengefasst und der resultierende Handlungsbedarf für die menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung abgeleitet. Zur Identifizierung relevanter Ansätze und Arbeiten wurde eine systematische Literaturrecherche nach BRINER & DENYER [BD12] durchgeführt. Hierzu wurden die Literaturdatenbanken ScienceDirect, Scopus und Google Scholar unter der Verwendung deutscher und englischer Suchbegriffe durchsucht. Anschließend wurden alle Artikel ausgeschlossen, die nicht aus den Forschungsgebieten *Ingenieurwissenschaften*, *Produktion* und *Human Factors* stammen. Die Suchergebnisse wurden anhand des Titels und des Abstracts für eine Detailbetrachtung ausgewählt.

3.1 Integration von Humanfaktoren in die Montageplanung

Im Folgenden werden Vorgehensweisen vorgestellt und analysiert, die eine Integration von Humanfaktoren in die Montageplanung fokussieren. Sie folgen der Prämisse, dass die Fähigkeiten von Mitarbeitern individuell sind und während der Planung von Montagesystemen berücksichtigt werden müssen.

3.1.1 Integration der Humanfaktoren in cyber-physische Produktionssysteme nach STERN

STERN [Ste20] integriert Erkenntnisse und Methoden von Human Factors in die Planung von cyber-physischen Produktionssystemen. Hierzu entwickelt STERN am BIBA (Bremer Institut für Produktion und Logistik) der Universität Bremen eine Methode zur menschenorientierten Evaluation von Gestaltungselementen. Diese Methode hat die Analyse und Bewertung spezifischer Elemente der Arbeitsgestaltung zum Ziel, welche einen signifikanten Einfluss auf die Arbeitsleistung in cyber-physischen Produktionssystemen haben. Bei der Analyse des gestalteten Arbeitssystems wird das cyber-physische Arbeitssystem

⁷ Die Visualisierung der bestehenden Ansätze und Arbeiten finden Sie in A2.

in eine repräsentative Arbeitsaufgabe übersetzt und wesentliche Mensch-Maschine-Schnittstellen werden erfasst. Anschließend werden Hypothesen für die entscheidenden Gestaltungselemente vorgenommen und innerhalb eines Prüfstands mit in die repräsentative Arbeitsaufgabe integriert, um eine Human-Factors-Studie durchzuführen. Die Ergebnisse werden anschließend statistisch ausgewertet. Aus den ermittelten signifikanten Effekten werden Gestaltungsregeln für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle entwickelt.

Die Methode von STERN stellt ein systematisches Vorgehen zur Planung von Montagesystemen dar. Mithilfe des Regelkatalogs können systematisch relevante Humanfaktoren abgeleitet werden. In dem Vorgehen werden jedoch Humanfaktoren hinsichtlich der Wahrnehmung und nicht hinsichtlich der Fähigkeiten der Mitarbeiter fokussiert. Zudem werden die Möglichkeiten der Aufgabenzuordnung nicht explizit betrachtet.

3.1.2 Framework für die Entwicklung von menschenzentrierten Entscheidungsunterstützungen der Arbeitsgruppe 7 des IFAC – TC 5.2

Im Jahr 2015 wurde die Arbeitsgruppe 7 „Human Factors and Ergonomics in Industrial and Logistic System Design and Management“ von SGOARBOSSA als Teil des International Federation of Automatic Control – Technical Committees 5.2 „Manufacturing Modelling for Management and Control“ gegründet. Ziel der Arbeitsgruppe ist die Erforschung und Entwicklung innovativer Ansätze für die Integration von Humanfaktoren in die Gestaltung von Produktions- und Logistiksystemen. SGARBOSSA ET AL. [SGN20] entwickeln ein Framework für die Entwicklung von menschenzentrierten Entscheidungsunterstützungen in Produktions- und Logistiksystemen. Das Framework besteht aus den Kernforschungsbereichen: menschenzentrierte wirtschaftliche Systementwicklung, menschenzentrierte Modellierung sowie menschenzentriertes Management. Der Fokus der menschenzentrierten wirtschaftlichen Systementwicklung ist die frühzeitige Integration von Humanfaktoren in die Planung des Montagesystems. Hierzu dienen direkte Human-Factors-Anforderungen, die während der Entwicklung durch geeignete Prototypen und den Einsatz digitaler Technologien getestet werden, wie z. B. Ergonomie-Untersuchungen in Virtual Reality [GHR21, GRH22, GRU23]. Bei der menschenzentrierten Modellierung sind datengetriebene Ansätze zur Modellierung des soziotechnischen Systems zu verwenden. Dies umfasst neben etablierten Modellierungen von Prozessen und Maschinen auch die Verwendung von Humanfaktoren, wie z. B. Ermüdung, Arbeitsbelastung und Lernzuwachs. Der dritte Forschungsbereich verwendet Operation-Research-Techniken, um auf Managementebene menschenzentrierte Entscheidungen treffen zu können.

Das Framework von SGARBOSSA ET AL. stellt ein Handlungsrahmen für die Entwicklung von Systemen zur menschenzentrierten Entscheidungsunterstützung dar. Es werden jedoch keine für die Montage spezifischen Methoden, Modelle und Werkzeuge bereitgestellt. Aufgrund seines hohen Abstraktionsgrades ist jedoch eine aufwändige Anpassung an die menschenzentrierte Montageplanung notwendig.

3.1.3 Framework der Integration von Humanfaktoren nach VIJAYAKUMAR, SGARBOSSA, NEUMANN & SOBHANI

VIJAYAKUMAR ET AL. [VSN22] entwickeln an der NTNU (Norwegian University of Science and Technology) ebenfalls ein Framework zur Integration von Humanfaktoren in Produktions- und Logistiksysteme. Innerhalb dieses Frameworks werden die vier Sichten Entwicklungs-Level, Human-Factors-Charakteristika, Operations-Level und Leistung berücksichtigt. Das Entwicklungs-Level umfasst die Festlegung der Prozesse, die Systembeschaffenheit und die verwendete Technologie. Darauf aufbauend werden die Auswirkungen auf die Human-Factors-Charakteristika hinsichtlich der physischen Aspekte, der mentalen Aspekte, der Wahrnehmungsaspekte und der psychosozialen Aspekte in experimentellen Studien untersucht. Vijayakumar et al. empfehlen hierzu etablierte Fragebögen, wie den NASA Task Load Index (NASA TLX) und den Subjective Workload Assessment Technique (SWAT). Im Anschluss kann das Operations-Level mit den Aspekten Aufgaben, operationelle Strategien und Werkzeuge definiert werden. Hier werden spezifische Entscheidungen über Arbeitsabläufe und verwendete Hilfsmittel getroffen. Abschließend wird die Leistung des Systems gemessen. Dies erfolgt hinsichtlich der drei Größen Produktivität, Qualität und Wohlbefinden der Mitarbeiter.

Das Framework von VIJAYAKUMAR ET AL. stellt gut die Wechselwirkungen zwischen Montageplanung, Humanfaktoren, Montagesteuerung und Leistung des Montagesystems dar und kann so als Grundlage für die systematische Auswahl von Humanfaktoren genutzt werden. Im Gegensatz zu SGARBOSSA ET AL. schlagen sie zudem explizite Methoden vor. Diese beschränken sich jedoch auf die Evaluation eines Montagesystems.

3.1.4 Wirtschaftliche Mitarbeiterqualifizierung durch die lernorientierte Montagesystemgestaltung nach MARKS

MARKS [Mar19] entwickelt an dem WZL der RWTH Aachen (Werkzeugmaschinenlabor der Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen) eine Methodik zur wirtschaftlichen Mitarbeiterqualifizierung durch die lernorientierte Montagesystemgestaltung. Hierbei werden die manuelle Montage sowie eine lernförderliche Gestaltung des Montagearbeitsplatzes fokussiert. Es wird das Ziel verfolgt, dass Mitarbeiter sich selbstständig einarbeiten und anschließend die Montagevorgänge durchführen können. Die Methodik wird den Planungsprozess nach EVERSHEIM [Eve81] integriert und gliedert sich in drei Phasen. In der ersten Phase von MARKS erfolgt die Situationsanalyse. Diese umfasst die Ermittlung der Rahmenbedingungen, die Bestimmung der Intensitätsfaktoren der Mitarbeiteranlernung und die Ermittlung der Häufigkeitsfaktoren für das betrachtete Montagesystem. Ein entscheidender Faktor nach Marks ist hierbei die Anzahl unterschiedlicher Montagevorgänge. Hierzu werden in Interviews mit Experten die Komponenten und einzusetzenden Betriebsmittel bestimmt und mittels MTM-UAS (Methods-Time Measurement Universelles Analysiersystem) definiert. In der zweiten Phase der Methode erfolgt die Festlegung passender Maßnahmen zur Mitarbeiteranlernung. Dafür werden mögliche

Maßnahmen für den Betrachtungs- und Gestaltungsbereich erzeugt und im Rahmen der Vorauswahl bewertet. In der dritten Phase erfolgt die Umsetzungsplanung. Hierbei werden Spezifikationen der zu beschaffenden Hardware und Entwicklungsleistung sowie die Auswahl der Lieferanten bestimmt. Abschließend erfolgt die Operationalisierung mit einer konkreten Roadmap sowie der klaren Zuordnung von Verantwortlichkeiten.

Der Ansatz von MARKS berücksichtigt explizit die Humanfaktoren Lernen und Vergessen. Zudem werden Wechselbeziehungen von Montagevorgängen mithilfe der drei Variablen Vorgangsfolgen, enthaltene Komponenten und einzusetzende Betriebsmittel berücksichtigt. Der Lernzuwachs und das Vergessen werden jedoch nicht modelliert, wodurch eine Fließbandabstimmung nicht möglich ist. Der Fokus des Ansatzes liegt nicht auf der Aufgabenzuordnung, sondern auf der Gestaltung des Assistenzsystems am Montagearbeitsplatz.

3.1.5 Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen nach GLONEGGER

Der Ansatz von GLONEGGER [Glo15] vom iwv der TUM (Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München) zur Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen strukturiert sich in zwei aufeinander aufbauende Methodenteile. Grundlage für den Ansatz sind reale Ausführungszeiten des Montagesystems. Beim ersten Methodenteil erfolgen die Erhebung und Aufbereitung der realen Ausführungszeiten in der Montage. Zunächst wird mittels eines relationalen Datenbankmodells eine Datenstruktur beschrieben. Anschließend erfolgt die statistische Aufbereitung der Bearbeitungszeiten und Bereinigung der Daten durch die Eliminierung von variantenhäufigkeits-, zeitpunkt- und bearbeitungszeitenbasierten Datensätzen. Im zweiten Methodenteil wird die Berücksichtigung der Leistungsschwankungen fokussiert und in die Spezifizierung, Analyse und Auswertung unterteilt. Zunächst werden Untersuchungsmerkmale klassifiziert, welche sich in Leistungs-, Tätigkeits- und Zeitmerkmale differenzieren lassen. Anschließend erfolgt die Analyse der bestehenden Daten. Die Analyse erfolgt sowohl einzeln für ein Untersuchungsmerkmal als auch in der Kombination. Durch die Analyse ergeben sich methodische Handlungsempfehlungen für ein Variantenfließmontagesystem. Diese kann beispielsweise die Umverteilung von Montagevorgängen auf andere Montagestationen sein.

Der Ansatz von GLONEGGER integriert Leistungsschwankungen von Mitarbeitern in die Montageplanung. Hierzu werden reale Produktionsdaten genutzt, um ein digitales Abbild des Systems zu schaffen. Jedoch wird die Leistungsänderung der Mitarbeiter lediglich als Störgröße berücksichtigt und es findet keine geeignete Modellierung der Mitarbeiter statt.

3.2 Integration von Humanfaktoren in die Montagesteuerung

Die Personaleinsatzplanung erfolgt innerhalb der Montagesteuerung. Im Folgenden werden Ansätze analysiert, die neuartige Methoden der Aufgabenzuordnung bei der Steuerung von Produktionssystemen vorstellen und bei der Modellierung von Humanfaktoren berücksichtigen.

3.2.1 Dynamische, adaptive Mitarbeiterzuordnung nach STRANG ET AL.

STRANG, GALASKE & ANDERL [SGA16] entwickeln an der Technischen Universität Darmstadt eine Methode zur adaptiven, dynamischen und individualisierten Aufgabenzuordnung in cyber-physischen Produktionssystemen. Zur Integration der Mitarbeiter wurde aufbauend auf GALASKE ET AL. [GCA14] ein erweitertes Profildatenmodell entwickelt. Das Profildatenmodell umfasst die drei Teilmodelle Authentifizierungsprofil, Kompetenzprofil sowie Ergonomieprofil und ist mit der Digitalen Fabrik verbunden [Gal19]. Innerhalb des Kompetenzprofils werden sowohl Hard- als auch Soft-Skills der Mitarbeiter, wie z. B. Qualifikation und Erfahrung, in Kompetenzmatrizen hinterlegt. Diese Informationen sind quantifiziert und dienen zum Abgleich mit den Anforderungen der Arbeitsstationen. Die adaptive, dynamische und individualisierte Aufgabenzuordnung erfolgt bedarfsorientiert. Das bedeutet, dass Arbeitsstationen nach dem Bedarf an Mitarbeitern mit spezifischen Kompetenzen und ergonomischen Eigenschaften fragen. Das Kommunikationsszenario der adaptiven, dynamischen und individualisierten Aufgabenzuordnung in cyber-physischen Produktionssystemen verläuft folgendermaßen: Die Komponenten sind die Träger eines Prozessplans, der die einzelnen Arbeitsvorgänge spezifiziert. Diese Arbeitsvorgänge besitzen Anforderungen an Arbeitsstationen. Basierend auf den Anforderungen wird eine Arbeitsstation ausgewählt. Die Kombination der Anforderungen der Komponenten mit den Anforderungen der Arbeitsstation bildet die Grundlage für eine Entscheidung über die Zuteilung der Mitarbeiter. Die Mitarbeiter werden nur zugewiesen, wenn ihre Qualifikationen und persönlichen Eigenschaften den Anforderungen entsprechen. Anderenfalls gibt das System dem Nutzer eine Meldung aus. In einem kommunikationsgesteuerten cyber-physischen Montagemodell erfolgt eine Optimierung nach den Optimierungskriterien Produktivität und Mitarbeiter-Zufriedenheit [Str16].

In der Methode von STRANG ET AL. werden die Fähigkeiten der Mitarbeiter in der Aufgabenzuordnung in einem cyber-physischen Produktionssystem berücksichtigt. Jedoch werden die Fähigkeiten lediglich über eine Kompetenzmatrix abgebildet und keine Änderungen der Fähigkeiten berücksichtigt. Weiterhin sind die Besonderheiten einer Fließproduktion nicht Bestandteil der Modellierung.

3.2.2 Kompetenzmodellierung zur Optimierung der Produktionsplanung nach WANG ET AL.

WANG, HU & GONG [WHG18a, WHG18b] entwickeln an der SJTU (Shanghai Jiao Tong University) einen Ansatz zur Optimierung der Aufgabenzuordnung in der Produktion auf Basis von Prognosen der Fähigkeiten der Mitarbeiter. Der Ansatz verknüpft die Produktionsterminplanung mit der Mitarbeiterzuordnung. Zur Modellierung der Fähigkeiten wird ein selbstentwickeltes Lernkurven-Modell genutzt. Die Fähigkeiten der Mitarbeiter bestehen aus beruflichen und erlernten Fähigkeiten. Die beruflichen Fähigkeiten stellen die Kenntnisse dar, die bei der Ausbildung und technischen Schulungen vor der Arbeit erworben werden. Die erlernten Fähigkeiten werden durch die tägliche Arbeit und frühere Erfahrungen aufgebaut. Die beruflichen Fähigkeiten werden als konstant angenommen und die erlernten Fähigkeiten werden mithilfe einer Exponentialfunktion beschrieben. Die Optimierung der Aufgabenzuordnung erfolgt mithilfe eines zweistufigen Modells zur Optimierung der Zeitplanung. In der ersten Stufe werden auf Basis der spezifischen Inputs, wie Auftragsinformationen und Informationen zu Arbeitsstationen, die Fähigkeiten der Mitarbeiter und ihr Einfluss auf die Durchlaufzeit bestimmt. Anschließend werden die resultierenden individuellen Fähigkeiten der Mitarbeiter sowie die Durchlaufzeit berechnet. Anschließend werden zur Optimierung zwei unterschiedliche Koordinationsansätze verwendet. Das kurzfristige Ziel ist es, die Durchlaufzeit zu minimieren, um eine hohe Produktivität zu erreichen. Das langfristige Ziel ist die Fähigkeitssteigerung der Mitarbeiter. In der zweiten Hierarchie-Ebene dienen die Aufgabenzuordnung, die prognostizierten Prozesszeiten aus der ersten Hierarchie-Ebene sowie die Auftragsinformationen als Input für die Terminplanung der Produktion.

WANG ET AL. stellen ein systematisches Vorgehen zur Aufgabenzuordnung in der Produktion dar und nutzen hierzu unterschiedliche Koordinationsansätze. Jedoch beruht ihre Modellierung der Fähigkeiten der Mitarbeiter nicht auf etablierten arbeitswissenschaftlichen Studienergebnissen. Weiterhin ist der Ansatz in einem cyber-physischen Montagesystem nur bedingt anwendbar, da keine Fließbandabstimmung berücksichtigt wird. Daten eines cyber-physischen Montagesystems werden nicht genutzt.

3.2.3 Kompetenzbasierte Aufgabenzuordnung nach MALACHOWSKI & KORYTKOWSKI

MALACHOWSKI & KORYTKOWSKI [MK16, MK19] entwickeln an der ZUT (West Pomeranian University of Technology in Szczecin) eine Methodik für kompetenzbasierte Aufgabenzuordnung in einer manuellen Montagelinie in U-Form. Diese basiert auf der Prognose der Leistungen der multi-skilled Mitarbeiter. Zur Modellierung der Fähigkeiten der Mitarbeiter nutzen sie zum einen bestehende log-lineare Lernkurven nach ANZANELLO & FOGLIATTO [AF06] und zum anderen das Learn-Forget Curve Model von JABER & BONNEY [JB97]. Die Besonderheit des Ansatzes ist, dass Abhängigkeiten der Montage-

stationen in ihrer Prognose berücksichtigt werden. Der Ansatz basiert auf dem hierarchischen Kompetenzmodell, das wiederum auf dem Kompetenzgraph von KORYTKOWSKI [Kor17] fußt. Im hierarchischen Kompetenzmodell besitzen die erforderlichen Fähigkeiten eine hierarchische Struktur und werden durch einen einfach gewichteten, azyklischen Digraphen dargestellt. Der Graph ist gekennzeichnet dadurch, dass die Kanten zwischen den Knoten, eine Richtung sowie ein Gewicht besitzen und Schleifen ausgeschlossen sind. Die Knoten des Graphen sind Fähigkeiten mit zugewiesenen Erfahrungen. Innerhalb der Fähigkeiten wird zwischen elementaren Fähigkeiten (Blattknoten) und zusammengesetzten Fähigkeiten (andere Knoten) unterschieden. Die Kanten des Graphen sind die Beziehungen zwischen den einzelnen Fähigkeiten, wobei das Gewicht die Beziehungsstärke ausdrückt. Die Optimierung erfolgt nach dem klassischen Vorgehen der Austaktung nach Jackson für eine U-förmige Montagelinie. Aufbauend auf den Informationen über die erforderlichen Fähigkeiten an den Montagestationen sowie Informationen über die vorhandenen Fähigkeiten aller Mitarbeiter erfolgt die mathematische Optimierung. MALACHOWSKI & KORYTKOWSKI [MK16, MK19] schlagen hierzu die beiden unterschiedlichen Koordinationsansätze Maximierung der Fähigkeitsverbesserung und Optimierung der Leistung des Montagesystems vor.

MALACHOWSKI & KORYTKOWSKI entwickeln eine Methode zur Aufgabenzuordnung in der Montage, die auf bestehenden etablierten Lernkurven basiert. Anhand von Fähigkeitsbäumen werden die Wechselbeziehungen zwischen den Montageoperationen geeignet modelliert und ein Übertrag an Erfahrungen von einer Montageoperation auf eine andere ermöglicht. Jedoch sind die Erstellung der Fähigkeitsbäume, die Gewichtung der Kanten und die Einordnung der einzelnen Montageoperationen mit hohem manuellem Aufwand verbunden und von MALACHOWSKI & KORYTKOWSKI nicht methodisch unterstützt. Weiterhin beschränken sie sich auf U-förmige Montagelinien.

3.2.4 Kompetenzorientierte Fertigungsplanung und -steuerung nach WINTER

Innerhalb der zwei DFG-Projekte *KomPEP – Kompetenzorientierte Personalplanung in der Fertigung produzierender KMU mittels MES* sowie *TecKompAss – Integrierte technologie- und kompetenzorientierte Arbeitsplanung in soziotechnischen Systemen* wurde an den Instituten IFW (Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen) und IFA (Institut für Fabrikanlagen und Logistik) der Leibniz Universität Hannover das individuelle Lernverhalten in die Arbeitsplanung einbezogen. Zunächst untersucht CHARLIN [Cha14] die Herausforderungen und Potenziale einer kompetenzorientierten Fertigungsplanung und bindet individuelle Lernkurven bei der Aufgabenzuordnung in der Produktion mit ein. WINTER [Win17] baut auf diesen Erkenntnissen auf und entwickelt eine Methode zur kompetenzorientierten Fertigungsplanung und -steuerung mit dem Ziel, den Einfluss und die Entwicklung der Fähigkeiten der Mitarbeiter in der Produktion abzubilden. Die Methode von Winter umfasst sieben Schritte, die sequenziell ablaufen. In Schritt

1 werden die Systemgrenze, der Abstraktionsgrad sowie der Betrachtungszeitraum festgelegt. Hierzu sind Elemente wie Produktionsschritte, Anforderungen von Arbeitsstationen, Mitarbeiter-Fähigkeiten sowie Fertigungsaufträge und Prozesszeiten zu erfassen. Im zweiten Schritt werden die Entwicklung und der Einfluss der Fähigkeiten der Mitarbeiter analysiert und modelliert. Die Analyse erfolgt anhand von Erfahrungswissen sowie historischen Betriebsdaten. In Schritt 3 wird das Optimierungsziel festgelegt. Winter unterscheidet zwischen den zwei Koordinationsansätzen kompetenzorientierte Fertigungsplanung und kompetenzorientierte Fertigungssteuerung. Die kompetenzorientierte Fertigungsplanung verfolgt primär die Minimierung der Fertigungskosten, wohingegen die kompetenzorientierte Fertigungssteuerung die kurzfristige Umsetzbarkeit der Aufträge und die Glättung der Mitarbeiterauslastung fokussiert. In Schritt 4 werden sämtliche relevante Stellgrößen der Planungsmethode unter Beachtung der Restriktionen festgehalten. Dies ist beispielsweise die Verfügbarkeit von Mitarbeiter. Anschließend erfolgt im fünften Schritt die rechnergestützte mathematische Optimierung des Problems. Die Ergebnisse werden in Schritt 6 grafisch aufbereitet und visualisiert, um Entscheidungsträgern eine Entscheidungsgrundlage bereitzustellen. Das Ergebnis wird abschließend in Schritt 7 in einen Personaleinsatzplan überführt.

CHARLIN und WINTER stellen umfangreiche Ansätze zur Integration der Mitarbeiter in die Produktionsplanung und -steuerung vor. Jedoch beruht die Modellierung der Fähigkeiten der Mitarbeiter auf überholten Lernkurven-Modellen. Weiterhin berücksichtigt der Ansatz nicht die Besonderheiten der Fließbandabstimmung. Auch werden die Daten, die in einem cyber-physischen Montagesystem anfallen, nur unzureichend genutzt.

3.2.5 Kurzfristige Fließbandabstimmung nach PRÖPSTER

PRÖPSTER [Prö15] entwickelt am iwB der TUM (Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München) eine Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien. Die Methodik gliedert sich in die drei Kerninhalte Fließbandabstimmung nach Taktzeitszenarien, variantenabhängige Fließbandabstimmung und die Simulationsunterstützung. Die Methode beginnt mit der Bestimmung der Taktzeitszenarien. Bei diesem vorbereitenden Schritt werden die mögliche Werkerdichte unter Berücksichtigung der vorherrschenden Linien- und Produktrahmenbedingungen und die Basistaktzeit unter Einbeziehung des Stückzahlkorridors bestimmt. Im zweiten Kerninhalt erfolgt die manuelle Fließbandabstimmung. Dies erfolgt mittels Planungsrichtlinien innerhalb von Workshops. In diesen Workshops werden in Probierverfahren Arbeitsinhalte Montagestationen zugeordnet. Die ausgeplanten Austaktungsszenarien werden anschließend im dritten Schritt durch Simulation des Mitarbeiterereinsatzes visualisiert und für die Vielzahl an unterschiedlichen Varianten bestätigt.

PRÖPSTER stellt einen geeigneten zweistufigen Ansatz zur Fließbandabstimmung unter Berücksichtigung des Mitarbeiterverhaltens auf. Aufbauend auf einer ersten Fließbandabstimmung erfolgen die Integration des Einflusses der Mitarbeiter und eine Adaption. Allerdings werden bei dem Ansatz die Änderungen der Fähigkeiten nicht modelliert. Dies führt dazu, dass die Prognose für die Fließbandabstimmung fehlerhaft ist und nur eine reaktive Anpassung ermöglicht.

3.2.6 Job-Rotation unter Berücksichtigung ergonomischer und fähigkeitsbezogener Aspekte nach HOCHDÖRFFER ET AL.

HOCHDÖRFFER ET AL. [HHL18] von dem KIT (Karlsruher Institut für Technologie) der stellen eine Methodik zur kurzfristigen Personaleinsatzplanung innerhalb einer Arbeitsplatzrotationsplanung vor. Dadurch werden Arbeitsplatzrotationspläne erstellt, die die Fähigkeiten der Mitarbeiter, wie die ergonomischen Belastungen an den einzelnen Arbeitsplätzen, die Anwesenheiten der Mitarbeiter und die letzten Einsätze der einzelnen Mitarbeiter, berücksichtigen. Die Modellierung der Fähigkeiten erfolgt mittels einer binären Fähigkeitsmatrix. Zur Ermittlung der ergonomischen Belastung wird das European Assembly Worksheets [SCB13] genutzt. Zur Aufgabenzuordnung wird eine ganzzahlige lineare Programmierung verwendet. Als Lösungsverfahren wird von HOCHDÖRFFER ET AL. [HHL18] eine Heuristik vorgeschlagen.

Die Methodik von HOCHDÖRFFER ET AL. stellt ein geeignetes Vorgehen für die kurzfristige Aufgabenzuordnung dar, die auch auf die Montagesteuerung übertragen werden kann. Jedoch werden weder die Entwicklung von Fähigkeiten der Mitarbeiter noch die Besonderheiten einer Fließmontage berücksichtigt.

3.3 Forschungslücke und Handlungsbedarf

Aus der Analyse des aktuellen Forschungsstands im Bereich der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch eine fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung ergeben sich die folgenden Forschungslücken (siehe Tabelle 3-1). Zur Visualisierung der Forschungslücke wird die Harvey-Ball-Logik verwendet. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass der Ansatz der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung im Rahmen von cyber-physischen Montagesystemen noch keine hohe Durchdringung aufweist. Erste Ansätze wurden von FREITAG und ANDERL entwickelt. Speziell die Abbildung von den Ergebnissen der Produktentwicklung bis zur Steuerung des Systems erfolgt dokumentenbasiert. Im vorliegenden Dissertationsmanuskript wird auf den Erkenntnissen von ANDERL aufgebaut. Positive Effekte auf die Leistung von Montagesystemen und das Wohlbefinden der Mitarbeiter sind bereits nachgewiesen. Das Prinzip des arbeitsintegrierten Lernens wurde in der Forschung bereits vielfach betrachtet. Demnach fehlt eine Datendurchgängigkeit im Rahmen der Digitalen

Fabrik, welche die Fähigkeiten und Fähigkeitsentwicklungen der Mitarbeiter bei der Modellierung berücksichtigt. Hierzu fehlt es zudem an einer systematischen Auswahl der relevanten Humanfaktoren für die Modellierung derartiger cyber-physischer Montagesysteme. Ansätze hierzu gibt es von FREITAG, IFAC TC5.2 WC7 und SGARBOSSA, welche die Ausgangssituation der zu entwickelnden Methodik darstellen. Weiterhin ist festzustellen, dass keine Methode existiert, die eine quantitative Ermittlung der Wechselbeziehungen zwischen den Montagevorgängen ohne großen Aufwand ermöglicht. Dadurch sind die Lerneffekte zwischen ähnlichen Montagevorgängen in Lernkurven nicht zu berücksichtigen. Einen ersten aufwendigen Ansatz stellt KORYTKOWSKI vor.

Tabelle 3-1: Abgrenzungsmatrix und Forschungslücke

		Bestehende Forschungsansätze ⁸											
		PROF. M. FREITAG (BIBA) [SB19, Ste20]	IFAC TC 5.2 WG7 [SGN20]	PROF. F. SGARBOSSA (Norwegen – NTNU) [BFS08, BS06, VSN22]	PROF. KAMPKER (WZL) [KDM15, Mar19]	PROF. G. REINHART (IWB) [Glo15, GR15]	PROF. R. ANDERL (TUD) [Gal19, SGA16, Str16]	PROF. H. Hu (China – SJTU) [WHG18a, WHG18b]	PROF. KORYTKOWSKI (Polen – ZUT) [MK16, MK19]	PROF. B. DENKENA (IFW) [CHA14, DCW13, DWP17, Win17]	PROF. G. REINHART (IWB) [Prö15]	PROF. G. LANZA (KIT) [HHL18]	Eigenes Vorhaben
Abgrenzungskriterien	Kernthema ●												
	Teilweise behandelt ◐												
	Randthema ○												
	Nicht behandelt –												
	Datendurchgängigkeit (siehe 2.2.1)	◐	–	–	–	○	◐	○	–	–	–	–	●
	Systematische Auswahl relevanter Humanfaktoren (siehe 2.2.4 & 2.2.6)	◐	◐	◐	–	–	–	○	○	○	–	○	◐
	Optimierung der Fließbandabstimmung von Montagesystemen (siehe 2.2.3 & 2.2.6)	–	–	–	–	–	◐	◐	○	◐	◐	–	◐
	Berücksichtigung von Wechselbeziehungen der Montageoperationen (siehe 2.2.3)	–	–	–	◐	–	–	–	◐	–	–	–	●
	Optimierung nach Fähigkeitsentwicklung und Zeitminimierung (siehe 2.3.2 & 2.2.5)	–	–	–	–	–	–	●	◐	◐	○	◐	◐
	Integration historischer Daten in die Fähigkeitsprognose (siehe 2.2.5)	–	–	–	–	◐	–	–	–	○	–	–	●

⁸ Bei den in Kapitel 3 vorgestellten Ansätzen wird die organisatorische Verankerung der wissenschaftlichen Mitarbeiter benannt.

Dieser Ansatz wird um den Einsatz semantischer Technologien erweitert. Für die Optimierung nach Fähigkeitsentwicklung und Zeitminimierung wird der Ansatz von HU genutzt. Des Weiteren werden in bestehenden Prognosemodellen echtzeitnahe Daten vernachlässigt. Eine Integration ermöglicht auf Basis individueller personenbezogener Daten eine passgenauere Prognose der Leistung des Montagesystems. Von REINHART wird hierzu ein Ansatz vorgeschlagen. Dieser fokussiert jedoch nur kurzfristige Leistungsschwankungen und keine Fähigkeitsentwicklungen der Mitarbeiter. Insgesamt fehlen Forschungserkenntnisse in der Datendurchgängigkeit, Berücksichtigung von Wechselbeziehungen der Montageoperationen sowie der Integration historischer Daten in die Fähigkeitsprognose in der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung. Diese Forschungslücke soll mit dieser Dissertation geschlossen werden.

4 Anforderungen an die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung

Nachfolgend werden die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch eine fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung dargestellt. Basierend auf der Analyse der in Kapitel 2 und Kapitel 3 dargestellten Grundlagen sowie des Stands der Forschung wird ein initiales Anforderungsset bestimmt. Hierzu werden Interviews mit zwei Industrievertretern aus dem Bereich *Produktionsplanung der Automobilindustrie* geführt. Die Interviews werden digital unter Zuhilfenahme der Software miro durchgeführt. Eine sprachliche Beschreibung des ausgewählten Zielsystems dient als Grundlage zur Bestimmung von Anwendungsfällen. Bei der Beschreibung werden die vier Akteure Montageplaner, Projektplaner, Datenbank und Assistenzsystem sowie grundsätzliche Nutzungen und Verknüpfungen vorgestellt. Hierbei stellen die empirischen Untersuchungen von DENKENA & NYHUIS innerhalb des DFG-Projekts „Integrierte technologie- und kompetenzorientierte Arbeitsplanung in soziotechnischen Systemen“ [DCW13, MMD13, NDZ09] die Ausgangsbasis dar. Die Untersuchung gibt die Erfahrungen von 43 produzierenden klein- und mittelständischen Unternehmen wieder. Die Ergebnisse der Untersuchung stellen die Ausgangssituation für die Anforderungsdefinition des vorliegenden Dissertationsmanuskripts dar. Aus der Betrachtung der Industrievertreter werden die Anforderungen abgeleitet, die sich in Anlehnung an HAMRAZ ET AL. [HCW13] in die vier Anforderungsbereiche 1) Input-orientierte Anforderungen, 2) Anforderungen an Modell & Modellierung, 3) Anwendungsorientierte Anforderungen und 4) Output-orientierte Anforderungen unterteilen lassen. Zur Sicherstellung der Qualität der Anforderungsspezifikation wurden die Anforderungsschablonen von SOPHISTEN [Sop16] sowie die Gütekriterien nach POHL & RUPP [PR21] verwendet. Die Vorgehensweise zur Anforderungsermittlung entspricht hierbei dem Vorgehen nach ROBERTSON und ROBERTSON [RR13].

Anwendungsfälle

Zur Klärung der gewünschten Funktionalität der prototypischen Implementierung werden Anwendungsfälle für die menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung innerhalb der Interviews mit den Industrievertretern spezifiziert. Die Anwendungsfälle dienen anschließend als Grundlage für die Ableitung der Anforderungen. In der Softwareentwicklung hat sich das Use-Case-Diagramm der Unified Modeling Language (UML) [OMG17] zur Problemdefinition etabliert. Dieses wird zur Verdeutlichung des Systemverhaltens aus Anwendersicht sowie zur Kommunikation zwischen den beteiligten Personengruppen eingesetzt. Das Use-Case-Diagramm für das System zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung ist in Bild 4-1 dargestellt. Im vorliegenden Dissertationsmanuskript werden die notwendigen Prozesse Aufgabenvorbereitung, Montageplanung und -steuerung für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung betrachtet. Der Hauptanwendungsfall ist die Aufgabenzuordnung und somit die **Erstellung des Personaleinsatzplans** für das Montagesystem.

Dem System werden gemäß dem Use-Case-Diagramm Informationen über das zu montierende Produkt, über Aufträge, die Organisationsform und bestehende Montageoperationen bereitgestellt. Weiterhin werden relevante Mitarbeiter-Informationen an das System übermittelt. Der Montageplaner ist der Hauptanwender des Vorgehens. Industrievertreter haben sich gewünscht, dass das er mithilfe des entwickelten Systems den geeigneten **Montagevorranggraphen** ableiten kann. Dieser Montagevorranggraph gibt mögliche Montageprozesse an. Darauf aufbauend soll der Montageplaner eine **Austaktung** des Montagesystems durchführen können. Für die Aufgabenzuordnung sind dem Montageplaner **unterschiedliche Zielgrößen** für die Optimierung zu ermöglichen. Auf der Grundlage des Montagevorranggraphen, der Austaktung und der ausgewählten Zielgrößen erfolgt eine **automatisierte Aufgabenzuordnung** der Mitarbeiter. Der erstellte Personaleinsatzplan kann anschließend **editiert** werden. Im Anschluss an die Entscheidung werden den Mitarbeitern die jeweiligen Aufgaben **zugewiesen** und sie führen die entsprechenden Montageoperationen an dem definierten Montagearbeitsplatz aus.

Grundlage für die lernende Steuerung der Aufgabenzuordnung ist die **Kommunikation zwischen Assistenzsystemen** an den Montagearbeitsplätzen und dem System zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung. Dies geschieht auf Basis der gesammelten und strukturierten Daten im Datenbankmodell. Assistenzsysteme nehmen **Echtzeitdaten** und **Mitarbeitereingaben** am Montagearbeitsplatz auf. In Kombination mit den Mitarbeiter-Informationen wird darauf aufbauend eine digitale Repräsentation der Mitarbeiter erstellt und der Aufgabenzuordnung bereitgestellt.

Zusammengefasst besteht das System zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung aus zwei Subsystemen: In dem Planungs-Subsystem des Montagesystems werden die Informationen aus der Produktentwicklung in die Montageprozessplanung überführt. Dadurch wird die Grundstruktur des Montagesystems festgelegt. Innerhalb des Steuerungs-Subsystems wird eine Entscheidungsunterstützung für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung auf Basis der digitalen Repräsentation der Mitarbeiter bestimmt.

Aus der Analyse der Anwendungsfälle ergeben sich Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik. Im Nachfolgenden werden die erhobenen Anforderungen zusammenfassend dargelegt.

Input-orientierte Anforderungen

Diese Methodik wird bei der Arbeitsvorbereitung angewendet. Die Arbeitsvorbereitung nutzt die Ergebnisse der Produktentwicklung zur Vorbereitung der Montage. Die Input-orientierten Anforderungen resultieren aus der Zielsetzung der Methodik sowie den Interviews mit Industrievertretern.

Req-1: Automatische Ableitung des Montagevorranggraphen

Mithilfe der Methodik soll eine fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung der Mitarbeiter in einem Montagesystem ermittelt werden. Ausgangslage für die Montageplanung sind

CAD-Modelle aus der Produktentwicklung. Die Methodik muss CAD-Modelle automatisiert in Montagevorranggraphen überführen können.

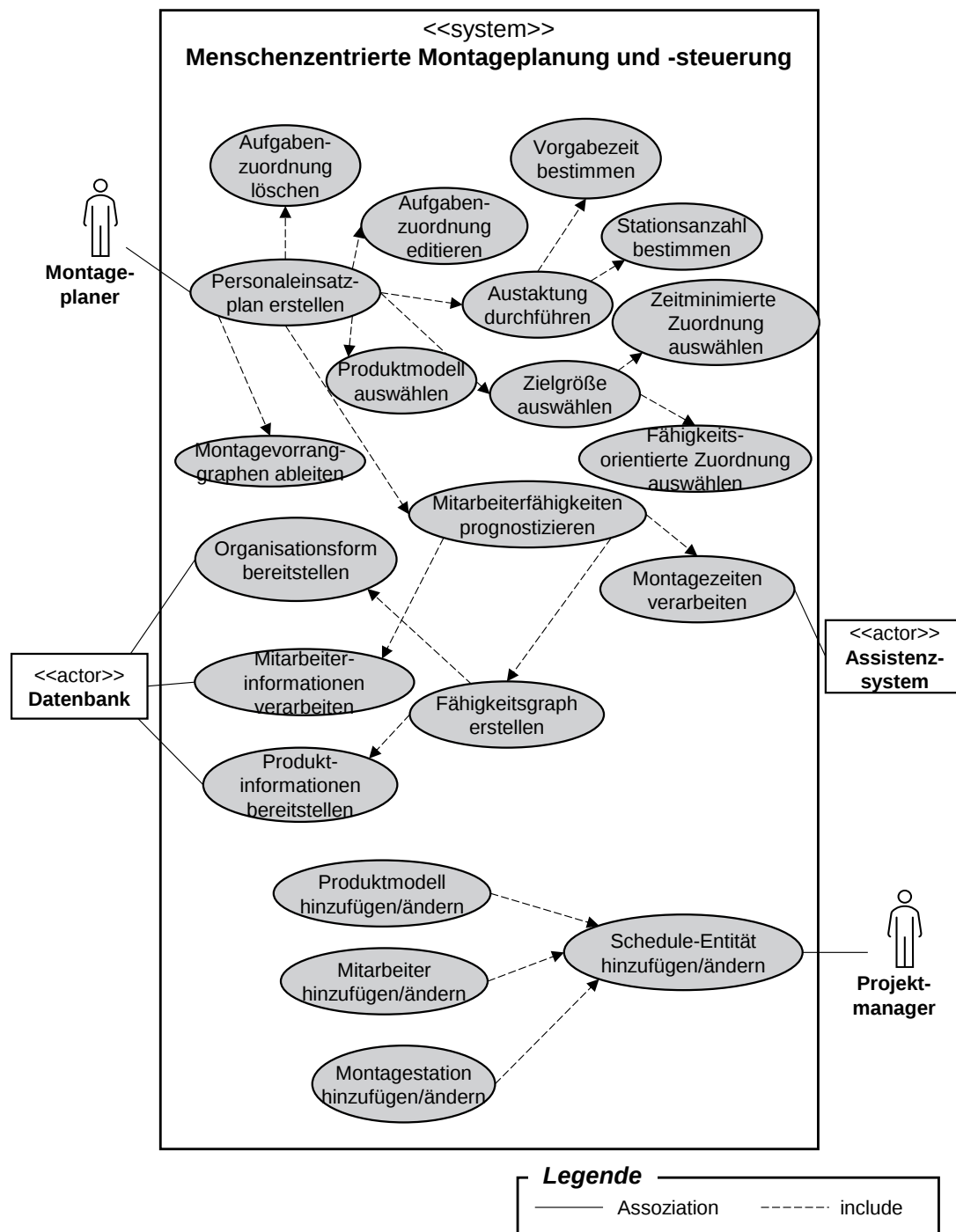


Bild 4-1: Use Case Diagram der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung

Req-2: Integration von Echtzeitdaten

Entscheidend für eine exakte Prognose ist die Verwendung eines geeigneten Modells. Um eine gute Entscheidungsgrundlage zu bieten, sind Echtzeitdaten in der Aufgabenzuordnung zu berücksichtigen. Zur Verifikation wird die Definition von Echtzeit der [ISO/IEC

2382] zugrunde gelegt. *Das System muss über eine geeignete Schnittstelle verfügen, um Daten aus dem realen Montagesystem aufzunehmen und zu verarbeiten.*

Req-3: Verknüpfung mit etablierten Softwaresystemen

Klein- und mittelständische Unternehmen nutzen sowohl bei der Konstruktion als auch in der Montageplanung und -steuerung unterschiedliche IT-Systeme. Für die breite Anwendung der Methodik in unterschiedlichen Industrien ist eine Verknüpfung mit etablierten Softwaresystemen im Maschinen- und Anlagenbau erforderlich. *Neben der Entwicklungsumgebung (MathWorks Matlab) sollen zur Anwendung der Methodik nur ein etabliertes Software-Werkzeuge notwendig sein.*

Anforderungen an die Modellierung

Grundlage für eine gute Entscheidungsunterstützung stellt eine geeignete Modellierung dar. Die Erfüllung der Anforderungen an Modell & Modellierung soll dies sicherstellen. Die Anforderungen wurden aus der Zielsetzung der Methodik sowie der literaturbasierten Anforderungsrecherche zu ähnlichen Ansätzen abgeleitet.

Req-4: Berücksichtigung der Montagereihenfolge

Für eine geeignete Aufgabenzuordnung ist die Fließbandabstimmung des Montagesystems entscheidend. Hierbei wird die Montageoperation in einer geeigneten Reihenfolge den Montagearbeitsplätzen zugewiesen. *Die Methodik muss bei der Aufgabenzuordnung die Reihenfolge berücksichtigen, in denen eine Montage des Produkts möglich ist.*

Req-5: Integration von Prognosen der Fähigkeitsentwicklung

Im Gegensatz zu den Fähigkeiten von Maschinen und Anlagen entwickeln sich die Fähigkeiten der Mitarbeiter dynamisch. Zur geeigneten Fließbandabstimmung und Aufgabenzuordnung sind Prognosemodelle der Fähigkeitsentwicklung zu erstellen und in die Aufgabenzuordnung der Mitarbeiter einzubinden. *Die Methodik muss geeignete Prognosemodelle der Fähigkeitsentwicklung beinhalten.*

Req-6: Berücksichtigung der Ähnlichkeit von Montageoperationen

Die Dauer einer Montageoperation hängt unter anderem von den Erfahrungen der Mitarbeiter ab. Erfahrungen können sowohl in derselben Montageoperation als auch in ähnlichen Operationen gewonnen werden. Somit ist es entscheidend, dies auch in die Prognose der Fähigkeitsentwicklung zu integrieren. *Das System muss die Ähnlichkeit von Montageoperationen bestimmen und in den Prognosemodellen berücksichtigen.*

Req-7: Auswahl von Optimierungszielen

Um den Entscheidungsträgern die Möglichkeit zu geben, die beiden unterschiedlichen Koordinationsansätze – kurzfristige zeitorientierte Aufgabenzuordnung und langfristige kapazitätsorientierte Aufgabenzuordnung – zu berücksichtigen, sind geeignete Zielfunktionen zu entwickeln. *Die Methodik muss die Anwendung der unterschiedlichen Koordinationsansätze ermöglichen, welche zu verschiedenen Aufgabenzuordnungen führen.*

Anwendungsorientierte Anforderungen

Die anwendungsorientierten Anforderungen dienen dazu, die spätere Anwendbarkeit der Methodik in der industriellen Praxis sicherzustellen. Hierzu muss die Methodik einen einfachen und verständlichen Umgang vorsehen und das Software-Werkzeug einfach anwendbar sein. Die Bewertung der Anwendbarkeit wurden in den Interviews mit Industrievertretern erhoben.

Req-8: Verständlicher Workflow

Die entwickelte Methodik ist eine Entscheidungsunterstützung, welche den Montageplaner bei ihrer Arbeit hilft. *Der Workflow der Methodik muss von Nutzern als verständlich bewertet werden.*

Req-9: Einfache Anwendung

Entscheidend für die Nutzung in der industriellen Praxis ist die einfache Anwendung der Methodik. *Die Methodik sowie die Nutzung des Software-Prototyps müssen unter Bereitstellung einer Anleitung ohne zusätzliche Unterstützung anzuwenden sein.*

Output-orientierte Anforderungen

Die Output-orientierten Anforderungen sollen wiederum die Qualität, Aussagekraft und Verständlichkeit der Ergebnisse für die industrielle Praxis garantieren. Die Methodik muss eine geeignete und verständliche Ausgabe vorsehen. Diese Anforderungen wurden überwiegend in den Interviews mit Industrievertretern erhoben.

Req-10: Verständlicher Vorschlag für den Arbeitseinsatz

Damit Montageplaner das System nutzen können, muss das System den Vorschlag für die Aufgabenzuordnung der Mitarbeiter verständlich darstellen. *Der Vorschlag der Methodik für den Arbeitseinsatz muss von den Nutzern als verständlich und nachvollziehbar bewertet werden.*

Req-11: Ausreichende Genauigkeit für die vorhergesehenen Anwendungsfälle

Die entwickelte Entscheidungsunterstützung soll die Anwender durch eine geeignete Datengrundlage bei der Aufgabenzuordnung unterstützen. *Die entwickelte Methodik muss eine höhere Genauigkeit als das in der Industrie etablierte System von REFA besitzen.*

Req-12: Leistungssteigerung der Montage

Die verbesserte Modellierung der Mitarbeiter führt dazu, dass bessere Entscheidungen bei der Zuordnung getroffen werden. *Die Methodik muss eine höhere Fließbandabstimmung-Effizienz, gemessen an der Ausbringungsrate und dem Nutzungsgrad, als das in der Industrie etablierte System von REFA aufweisen.*

Req-13: Langfristige Verbesserung

Im Gegensatz zu etablierten Methodiken liegt der Fokus der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung auf der kontinuierlichen Verbesserung der Montage. *Das System muss für eine langfristige Anwendung eine höhere Zuwachsrate und Fähigkeitsentwicklung als das in der Industrie etablierte System von REFA aufweisen.*

Tabelle 4-1 Übersicht über die Anforderungen an die Methodik zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Montage

Kategorie	Anforderung	Quelle	
		Lit	Int
1. Input-orientierte Anforderungen	Req-1: Automatische Ableitung des Montagevorranggraphen	X	X
	Req-2: Integration von Echtzeitdaten	X	
	Req-3: Verknüpfung mit etablierten Softwaresystemen		X
2. Anforderungen an Modell & Modellierung	Req-4: Berücksichtigung der Montagereihenfolge	X	X
	Req-5: Integration von Prognosen der Fähigkeitsentwicklung	X	
	Req-6: Berücksichtigung der Ähnlichkeit von Montageoperationen	X	X
	Req-7: Auswahl von verschiedenen Optimierungszielen	X	
3. Anwendungsorientierte Anforderungen	Req-8: Verständlicher Workflow		X
	Req-9: Einfache Anwendung		X
4. Output-orientierte Anforderungen	Req-10: Verständlicher & nachvollziehbarer Vorschlag für den Arbeitseinsatz		X
	Req-11: Genauigkeit für die vorgesehenen Anwendungsfälle	X	X
	Req-12: Leistungssteigerung der Montage	X	X
	Req-13: Langfristige Verbesserung	X	X

Legende: Lit – Literatur, Int – Interviews mit Industrievertretern

5 Entwicklung der Methodik

In diesem Kapitel wird eine teilautomatisierte Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung entwickelt. Die Methodik soll dem dargelegten Handlungsbedarf (Kapitel 3) sowie den Anforderungen (Kapitel 4) gerecht werden. In Abschnitt 5.1 wird die Struktur der Methodik⁹ im Überblick beschrieben. In den nachfolgenden Abschnitten 5.2 bis 5.7 erfolgt die detaillierte Beschreibung der Methodik Elemente.

5.1 Übersicht über die Methodik

Ausgehend von den erhobenen Anforderungen wird die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung entwickelt. Grundlage für die Entwicklung sind analog zur Input-Process-Output Systematik die Input-orientierten Anforderungen, die Anforderungen an das Modell und die Modellierung sowie die Gestaltung der Entscheidungsunterstützung. Um eine Datendurchgängigkeit ausgehend von dem CAD-Modell des Produkts bis zur Integration von Echtzeitdaten sicherzustellen, umfasst die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung analog zur Arbeitsvorbereitung eine Planungs- und eine Steuerungssicht. Innerhalb der Planungssicht sind der Montagegraph abzuleiten (Req-1), unterschiedliche Montagereihenfolgen zu berücksichtigen (Req-4), sowie die Ähnlichkeit von Montageoperationen zu beachten (Req-6). In der Steuerungssicht erfolgt die Entscheidungsunterstützung durch verschiedenen Optimierungsziele (Req-7), der Berücksichtigung von Prognosen der Fähigkeitsentwicklung (Req-5) sowie der Integration von Echtzeitdaten (Req-2). Daraus ergeben sich sechs Vorgangsschritten der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung, die sich in eine Planungs- und eine Steuerungssicht unterteilen (siehe Bild 5-1): automatisierte Bestimmung des Montagevorranggraphen, Fließbandabstimmung, Ableitung des Fähigkeitsgraphen, Prognose der Mitarbeiterfähigkeiten, Entscheidungsunterstützung für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung und Integration von Echtzeitdaten. Die **Planung des Montagesystems (Schritt 1-3)** erfolgt einmalig für ein Produkt. **Schritt 1:** Ausgangspunkt der Montageplanung bilden die Ergebnisse der Produktentwicklung. Hierzu wird zunächst aus dem CAD-Modell der Produktentwicklung ein *Montagevorranggraph automatisch* abgeleitet. **Schritt 2:** Aufbauend auf weiteren Inputgrößen, wie z. B. der Linienform der Montage und den MTM-Zeiten pro Arbeitsschritt, und auf Basis der etablierten Methode (siehe Abschnitt 2.3) der Fließbandabstimmung wird die Feinplanung des cyber-physischen Montagesystems durchgeführt. Diese umfasst beispielsweise die Anzahl der Arbeitsplätze und Mitarbeiter sowie die Taktzeit. **Schritt 3:** Die Methoden wurden um die Be-

⁹ „Eine Methodik ist eine Sammlung von Modellen, Methoden und Hilfsmitteln zur Lösung einer Aufgabenstellung. Vereinfacht gesprochen ist eine Methodik der Werkzeugkasten und eine Methode eines der Werkzeuge“ [Grä00].

rücksichtigung der Interdependenzen zwischen den Arbeitsplätzen durch einen Schritt erweitert. Hierzu wurde eine Methode entwickelt, die auf Grundlage der semantischen Beschreibung der benötigten Fähigkeiten die Interdependenzen in einem orientierten (*Fähigkeits-*)*Multigraph* beschreibt. Die **Steuerung des Montagesystems (Schritt 4-6)** erfolgt pro Zyklus. **Schritt 4:** Zur menschenzentrierten Gestaltung werden bei der Steuerung digitale Repräsentationen der Mitarbeiter unter Verwendung relevanter Humanfaktoren genutzt, die individuelle Prognosemodelle beinhalten. Aufbauend auf der Analyse bestehender *Prognosemodelle* wurde ein integriertes Lern- und Vergessenskurven-Modell entwickelt. **Schritt 5:** Die individuellen Prognosen dienen als Datenbasis für die *Entscheidungsunterstützung der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung*. Die Aufgabenzuordnung kann sowohl kurzfristig zeitorientiert als auch langfristig fähigkeitsorientiert erfolgen. In Kooperation mit der Arbeitsgruppe „Diskrete Mathematik – Graphentheorie“ der Universität Paderborn wurde ein Zuordnungsmodell entwickelt. **Schritt 6:** Das Ergebnis dieses Steuerungsprozesses ist eine Zuordnung von Mitarbeitern zu definierten Arbeitsplätzen in dem Montagesystem. Während der Durchführung der Montageoperationen werden mithilfe von digitalen Assistenzsystemen Echtzeitdaten, wie z. B. die Durchführungszeiten von Montageoperationen, aufgezeichnet. Zur Verbesserung der Prognose werden *Echtzeitdaten aus dem cyber-physischen Montagesystem* mithilfe der Regressionsanalyse in das Prognosemodell überführt.

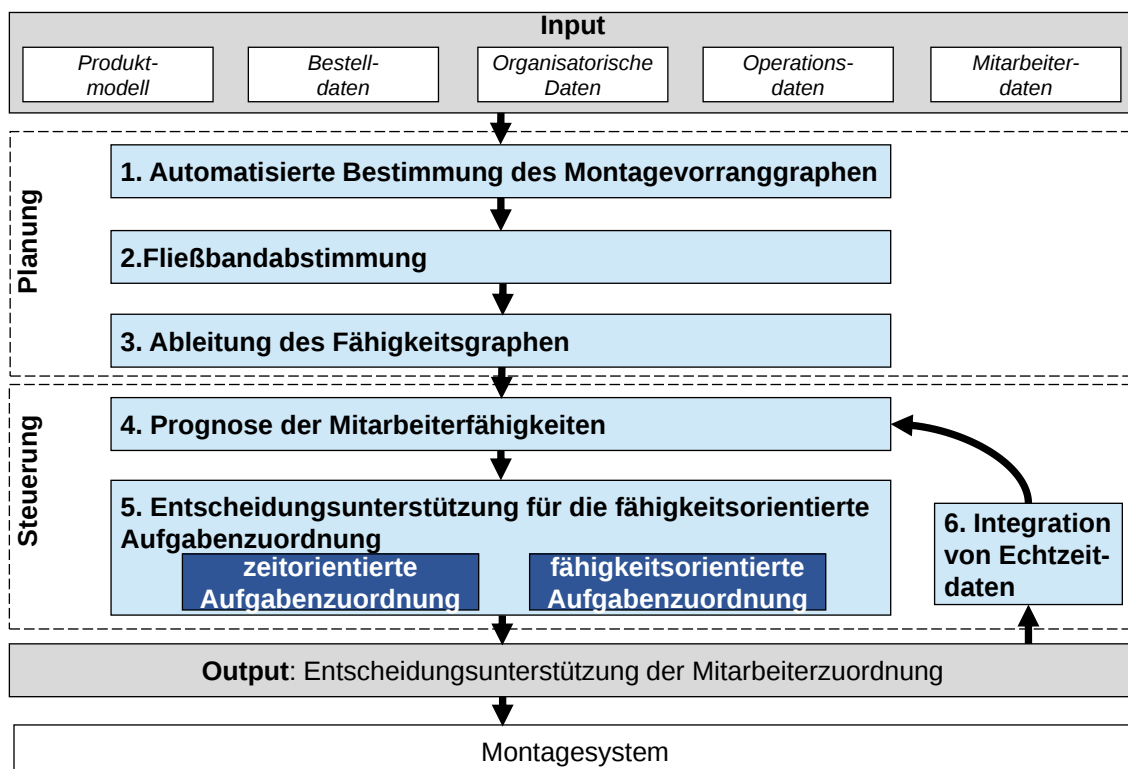


Bild 5-1: Methodik zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Montage

5.2 Automatisierte Bestimmung des Montagevorranggraphen

Eine Grundlage der Montageplanung ist das CAD-Modell aus der Produktentwicklung. Ausgehend von diesem Modell werden die auszuführenden Montageoperationen in Form eines Montagevorranggraphen abgeleitet.¹⁰ Um eine geeignete Methode zur automatischen Ableitung eines Montagegraphen zu ermitteln, wurde eine systematische Literaturrecherche nach MACHI & MCEVOY [MM12] durchgeführt. Auf den Plattformen Science Direct und Web of Science wurden mithilfe der Scanning- und Skimming-Technik acht vielversprechende Ansätze ermittelt. Diese wurden anschließend mit der Mapping-Technik strukturiert und in logische Gruppen eingeteilt.

Grundsätzlich lassen sich die Methoden in fünf Gruppen einteilen: matrixbasierter Ansatz, graphenbasierter Ansatz, lernender Montagevorranggraph, Kollisionsanalyse und Montagefelder. Bei den *matrixbasierten Ansätzen* wird aus dem CAD-Modell eine Verknüpfungsmatrix abgeleitet, die nach der Weiterverarbeitung mithilfe von Demontagesequenzen alle möglichen Montagesequenzen aufzeigt. *Graphenbasierte Ansätze* verwenden aufbauend auf einer Verknüpfungsmatrix Methoden aus der Graphentheorie zur Ableitung einer Montagereihenfolge. *Lernende Montagevorranggraphen* kombinieren die Bestimmung des Vorranggraphen mit der Fließbandabstimmung und basieren auf drei Graphen (Ziel-, Maximal- und Minimalgraph), die sich in ihrem Besetzungsgrad unterscheiden. Ansätze der *Kollisionsanalyse* leiten die Prioritätsbeziehungen durch Kollisionsanalyse basierend auf der virtuellen Übersetzung der Bauteile und Module ab. Bei der Methode der *Montagefelder* werden mithilfe der OLE-Technologie Richtungsbeschränkungen von Komponenten und Gruppen durch Anwender definiert. Diese definieren Richtungsbeschränkungen für die Montage in Form von Winkelbereichen, anhand derer die Montagereihenfolge festgelegt wird. Innerhalb eines Workshops mit vier wissenschaftlichen Mitarbeitern des Lehrstuhls für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts wurden die fünf Gruppen anhand der Bewertungskategorien Input, Automatisierungsgrad, Qualität des Outputs und Hardwareanforderungen bewertet (siehe Tabelle 5-1¹¹). Die Methodengruppe mit dem höchsten Nutzwert ist die Kollisionsanalyse. Speziell der wahrgenommene Automatisierungsgrad ist von dieser Methodengruppe am höchsten. Die Kollisionsanalyse kommt weitestgehend ohne Informationen des Montageplaners aus und ermöglicht zudem auch den Umgang mit komplexen Produkten. Da die Kollisionsanalyse für jedes Bauteil bzw. alle Baugruppen durchgeführt wird, stellt sie hohe Anforderungen an die Hardware. Weil die Kollisionsanalyse mit Ausnahme der Bewertungskategorie „5 Rahmenbedingungen“ in allen Kategorien den höchsten Punktwert aufweist, wird sie weiterverfolgt. Anschließend werden die Methoden der Kollisionsanalyse mithilfe eines paarweisen Vergleichs gegenübergestellt (siehe Tabelle 5-2). Hierbei werden die vier Kollisionsanalysen von BEN HADJ ET AL. [BTA15], von PINTZOS ET AL. [PTP16], von NEB & GÖKE [NG21] sowie von ALFADHLANI ET AL. [AMT19] paarweise

¹⁰ Die Analyse und Auswahl von Methoden zur automatisierten Bestimmung des Montagevorranggraphen erfolgen nach der Studienarbeit von Timo Heidloff [Hei21].

¹¹ Die Tabelle zur gesamten Nutzwertanalyse zur Methodenauswahl befindet sich in A4 dieser Arbeit.

verglichen. Beim Expertenworkshop im Heinz Nixdorf Institut erreicht die Methode nach BEN HADJ ET AL. den höchsten Punktwert und wird ausgewählt.

Tabelle 5-1: Ausschnitt aus der Nutzwertanalyse zur Auswahl der Methodengruppe

#	Bewertungskriterium	Matrix-basiert			Graph-basiert		Lernender Graph		Montage-felder		Kollisions-analyse	
		G	B	G*B	B	G*B	B	G*B	B	G*B	B	G*B
1	Input	20		47,5		67,5		127,5		27,5		172,5
1.1	Komplexität der Prod.	12.5	2	25	3	38	9	113	1	13	9	113
...												
4	Automatisierung	30		52,5		67,5		112,5		60		262,5
4.1	manu. Arbeitsaufwand	7.5	1	7,5	2	15	4	30	2	15	9	67,5
...												
Summe		100		358		373		553		390		718

G – Gewichtung in [%]; B – Bewertung von 1 (sehr schlecht) bis 10 (sehr gut)

Der Ansatz gliedert sich in vier Schritte. Im ersten Schritt werden die notwendigen Informationen aus dem CAD-Modell extrahiert. Dies sind Daten zu den montierenden Einzelteilen, wie Masse, Volumen, Position sowie geometrische Beziehungen. Diese Beziehungen können zum Beispiel konzentrisch, kongruent oder parallel sein. Anschließend werden die extrahierten Informationen in einer quadratischen Matrix dargestellt.

Tabelle 5-2: Paarweiser Vergleich zur Auswahl der Methode zur Kollisionsanalyse

	BEN HADJ ET AL. [BTA15]	PINTZOS ET AL. [PTP16]	NEB & GÖKE [NG21]	ALFADHLANI ET AL. [AMT19]	Summe	Rang
BEN HADJ ET AL. [BTA15]	-	2	2	2	6	1
PINTZOS ET AL. [PTP16]	0	-	0	0	0	4
NEB & GÖKE [NG21]	0	2	-	2	4	2
ALFADHLANI ET AL. [AMT19]	0	2	0	-	2	3

2 – dominiert; 1 – ausgeglichen; 0 – untergeordnet

Im nächsten Schritt wird die Kollisionsanalyse genutzt, um kollisionsfreie Montage- oder Demontagepfade zu identifizieren. Dazu werden die Teile im Programm *Dassault Systèmes SolidWorks* in definierte Richtungen bewegt und parallel dazu auf Kollisionen mit anderen Teilen geprüft (siehe Bild 5-2).

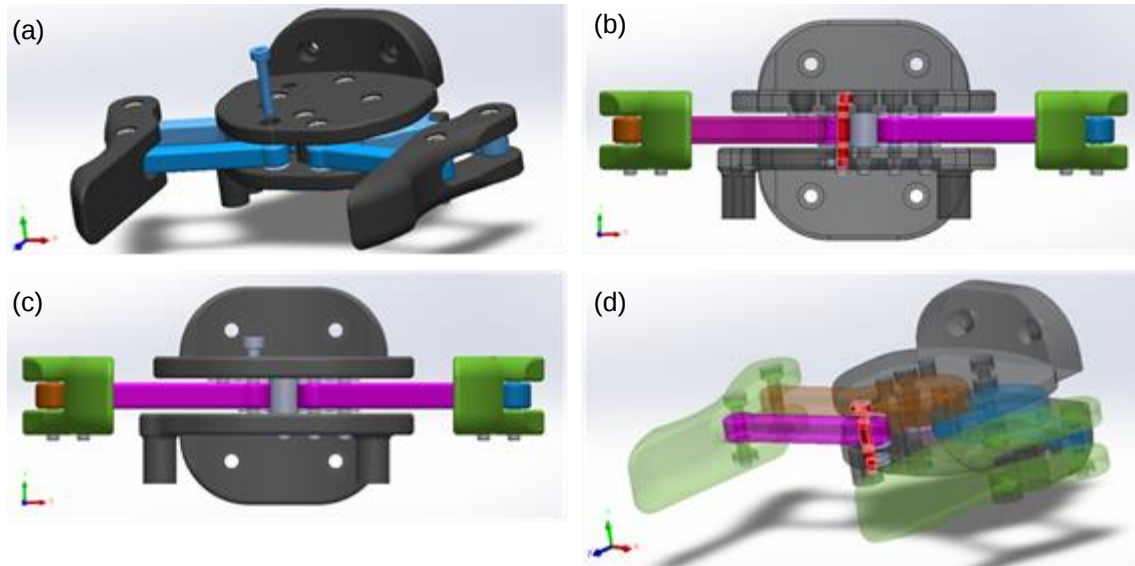
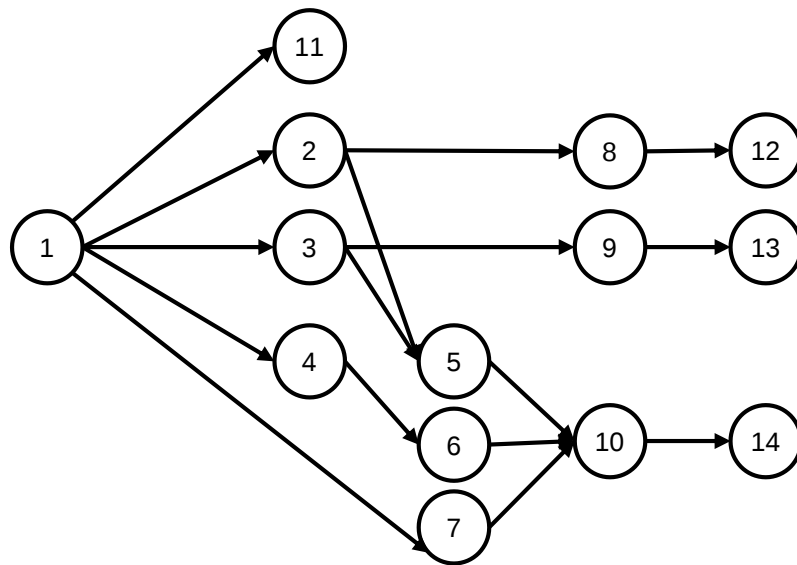


Bild 5-2: Kollisionsanalyse am Beispiel einer „M3x16“-Schraube am Greifer des Zortrax Knickarmroboters: a) Explosionsdarstellung, b) Schraube nach Translation in +X-Richtung, c) Schraube nach Translation in +Y-Richtung, d) Schraube nach Translation in +Z-Richtung [Hei21]

Die Bewegungsrichtungen werden auf der Grundlage der im ersten Schritt gesammelten Informationen bestimmt. So wird beispielsweise bei einem zylindrischen Kontakt die Drehachse als mögliche Demotagerichtung identifiziert. Mithilfe der resultierenden Transformationsmatrix werden die Teile in einem automatisierten Prozess Schritt für Schritt übersetzt. Nach jedem Schritt wird eine Interferenzprüfung durchgeführt. Während der Übersetzung werden Kollisionen gespeichert und Vorrangbeziehungen in Abhängigkeit von den Bewegungsrichtungen dokumentiert. Im nächsten Schritt werden die Teile nach Gewicht, Volumen und deren Beziehungen bewertet. Das Teil mit der höchsten Bewertung ist der Startpunkt für die Montage. Im letzten Schritt des Ansatzes werden die Teile schrittweise zusammengefügt. Dabei werden mögliche Montagereihenfolgen gespeichert. In Bild 5-3 wird der Montagevorranggraph am Beispiel des Greifers des Knickarmroboters visualisiert.

Auf Basis des CAD-Modells wird im ersten Schritt der Methodik der Montagevorranggraph nach dem Vorgehen von BEN HADJ ET AL. automatisch abgeleitet. Dies erfolgt mithilfe von Kollisionsanalysen.



Legende:

1 = Bodenplatte; 2 = Zahnrad; 3 = Schwenkarm-2; 4 = Schwenkarm-1; 5 = ULS M3-1;
 6 = ULS M3-2; 7 = Zylinder; 8 = Greifer links; 9 = Greifer rechts; 10 = Oberplatte;
 11 = 4 x M3Mutter-1; 12 = 4 x M3Mutter-2; 13 = 4xM3Mutter-3; 14 = 4xM3Mutter-4

Bild 5-3: Visualisierung des Montagevorranggraphs am Beispiel des Greifers des Knickarmroboters

5.3 Fließbandabstimmung

Ziel des zweiten Schritts der Methodik ist die Zuordnung der Montageoperationen zu Montagestationen. Dies beruht zum einen auf dem Montagevorranggraph, der sich aus dem ersten Schritt ergibt, und zum anderen auf dem notwendigen Zeitaufwand für die Ausführung der Montageoperationen. In der Planungsphase liegen noch keine Erfahrungswerte zu der Ausprägung der Humanfaktoren der Mitarbeiter vor. Der Zeitaufwand einer Montageoperation ist abhängig von der Komplexität der Aufgabe. Bestehende Vorgehen zur Bestimmung der Aufgabenkomplexität in der manuellen Montage beziehen sich meist auf die physikalischen Eigenschaften der Montageobjekte, die die Schwierigkeit ihrer Montage beeinflussen. Die praxisrelevantesten Ansätze dieses Vorgehens sind die Systeme der Vorgabezeiten. Vorgabesysteme dienen der Beschreibung manueller Arbeitsabläufe und ermöglichen die rechnerische Ermittlung von Planzeiten. Anerkannte Methoden und Verfahren sind die *Methoden-Zeit-Messung (MTM)*, der *Work-Factor (WF)* und die *Maynard Operation Sequence Technique (MOST)* [SBL10]. Das Grundprinzip dieser Systeme ist es, die Montageoperationen in Bewegungselemente zu unterteilen. Diesen Bewegungselementen werden vorgegebene Zeiten zugeordnet und deren Summe ergibt die Sollzeit der gesamten Montageoperation (siehe Abschnitt 2.2).

Im Gegensatz zu Zeiterfassungsmethoden, die auf Messungen im Betrieb beruhen, kann die Dauer von manuellen Montagevorgängen bereits bei der Montageplanung ermittelt werden. Vorgabesysteme dienen der Beschreibung manueller Arbeitsabläufe und ermöglichen die rechnerische Ermittlung von Planzeiten. Anerkannte Methoden und Verfahren

sind die *Methoden-Zeit-Messung (MTM)*, der *Work-Factor (WF)* und die *Maynard Operation Sequence Technique (MOST)* [SBL10]. Das Grundprinzip dieser Systeme ist es, die Montageoperationen in Bewegungselemente zu unterteilen. Diesen Bewegungselementen werden vorgegebene Zeiten zugeordnet und deren Summe ergibt die Sollzeit der gesamten Montageoperation (siehe Abschnitt 2.2). Im Gegensatz zu Zeiterfassungsmethoden, die auf Messungen im Betrieb beruhen, kann die Dauer von manuellen Montagevorgängen bereits bei der Montageplanung ermittelt werden. Das MTM-System ist die weltweit verbreitetste Methode [HRS16]. Nach Angaben des Deutschen MTM-Verbandes basieren mehr als 80 Prozent aller Systeme der Zeitvorgabe auf dem MTM-System [BL12]. Aufgrund der großen Verbreitung und damit des Potenzials zur Übertragung und Weiterverwendung wird das MTM-System als Vorgabezeitsystem eingesetzt. Bei der Fließbandabstimmung wird zunächst ohne Berücksichtigung der individuellen Eigenschaften der Mitarbeiter die Taktzeit des cyber-physischen Montagesystems minimiert. Demnach erfolgt die Modellierung als SALBP-2 mit der Zielfunktion *Minimiere die Taktzeit* unter den folgenden Nebenbedingungen: Die Taktzeitrestriktion stellt sicher, dass die Summe der Zeiten für die zugeordneten Montageoperationen die zu bestimmende Taktzeit nicht überschreitet. Dabei muss jede Montageoperation genau einer Arbeitsstation zugeordnet sein. Entscheidend ist zudem die Berücksichtigung der Montagevorranggraphen mit ihren Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen. Der Wertebereich der Entscheidungsvariablen ist binär.

Nach SIVASANKARAN & SHAHABUDEEN [SS14], SCHOLL & BECKER [SB06], BOYSEN ET AL. [BFS07, BFS08] sowie BATTALIA & DOLGUI [BD13] lassen sich die bestehenden Lösungsverfahren in die zwei Kategorien exakte Methode und approximierende Methode unterteilen. Exakte Methoden suchen nach einer beweisbar optimalen Lösung. Im Gegensatz dazu ist durch den Einsatz von approximierenden Methoden die Bestimmung der optimalen Lösungen nicht garantiert. Diese Methoden bestimmen eine gute Lösung in einer zulässigen Zeit. Da das SALBP-2, welches in dieser Dissertation betrachtet wird, auch mit exakten Methoden in einer zulässigen Zeit lösbar ist, werden approximierende Methoden nicht weiter betrachtet. Exakte Methoden lassen sich nach ihrem Vorgehen in zwei Klassen unterteilen: Verwendung eines Standard-Solvers (wie ILOG Cplex, ILOG Solver, Dash Xpress MP, LINGO und OSL) und eigene Lösungsmethoden. Bei der Verwendung von Standard-Solvern ist es das Ziel, ein geeignetes mathematisches Modell zu definieren und die Solver-Parameter geeignet anzupassen, um es schnell zu lösen. Da Solver darauf ausgelegt sind, eine große Klasse von Optimierungsproblemen zu lösen, ist ihre Ausführung teilweise nicht ausreichend effizient [BD13]. Neben den Standard-Solvern werden exakten Methoden eingesetzt. Diese exakten Methoden nutzen das Branch-and-Bound-Verfahren, wie z. B. FABLE [Joh88], EUREKA [Hof92], SALOME [SK97], oder eine dynamische Programmierung basierend auf dem kürzesten Pfad, wie von DOLGUI ET AL. [DGL06], GUNGOR & GUPTA [GG01]). BOCK [Boc00] und LI ET AL. [LKT20] zeigen, dass die exakte Methode SALOME-2 die besten Resultate im Sinne der Ergebnisqualität und Rechenzeit für das SALBP-2 erzielt. Daher wird SALOME-2 als Lösungsmethode für die Fließbandabstimmung ausgewählt.

Bei der Fließbandabstimmung werden die einzelnen Montageoperationen unter Berücksichtigung der Ausführungszeit den Montagestationen zugeordnet. Dies geschieht auf Basis des ermittelten Montagevorranggraphen sowie des MTM-Systems. Bei der Modellierung des cyber-physischen Montagesystems wird von einer fixen Anzahl an Stationen ausgegangen. Bei diesen wird die Taktzeit des Montagesystems mithilfe der SALOME-2-Methode minimiert.

5.4 Ableitung des Fähigkeitsgraphen

Entscheidend für die Bestimmung der Fähigkeitsentwicklung ist die Ableitung der gewonnenen Erfahrungen aus vorherigen Aufgaben. Grundsätzlich werden Erfahrungen sowohl mit derselben Aufgabe als auch mit anderen ähnlichen Aufgaben gesammelt. Maßgeblich für die Ermittlung der gewonnenen Erfahrungen sind die Wechselbeziehungen zwischen den benötigten Fähigkeiten. Fähigkeiten werden dabei als semantische und funktionsorientierte Beschreibungen des von Mitarbeitern bereitgestellten Könnens zur Erfüllung einer Aufgabe verstanden (in Abschnitt 5.4.1). Aufbauend auf dieser Definition wird eine Methode zur Bestimmung der Wechselwirkungen zwischen Montagestationen entwickelt, die die Übereinstimmung von Montagevorgängen auf Basis ihrer semantischen Beschreibung bestimmt (siehe 5.4.2 & 5.4.3). Hierzu werden in einem ersten Schritt die Montagevorranggraphen um bestehende Beschreibungen von Montagevorgängen erweitert. Anschließend werden Methoden zur Ähnlichkeitsbestimmung auf ihre Anwendbarkeit analysiert. Die Formalisierung erfolgt dabei innerhalb von Fähigkeitsgraphen.

5.4.1 Erweiterung der Montagevorranggraphen

Den Ausgangspunkt der Erweiterung der Montagevorranggraphen stellen Grundlagen des erfahrungsbasierten Lernens dar. Erfahrung innerhalb der Produktion sind nach KATIRAE ET AL. [KBB19] wie folgt definiert: „*Experience can be defined as the knowledge or skill to be gained over time by using a given manufacturing equipment, a given technology or through involvement in a specific task.*“ Spezifiziert für den Anwendungsbereich der Montage bedeutet dies, dass Erfahrungen durch den Einsatz des verwendeten Montagewerkzeugs, der Fügetechnologie und der ausgeführten Montageschritte im Zeitverlauf entstehen. Mitarbeiter, die beispielsweise in der vorherigen Aufgabe Pressverbindungen durch Einpressen (DIN 8593-3 4.3.4.1) erzeugt haben, können die gewonnenen Erfahrungen auch in der nachfolgenden Aufgabe zur Herstellung einer Schraubverbindung einsetzen. Um den Übertragungsumfang des Fähigkeitszuwachses aufgrund von Erfahrungen zwischen zwei Montagevorgängen zu bestimmen, werden die Übereinstimmungen paarweise gerichtet bestimmt. Dies geschieht auf Basis der Berechnung der semantischen Ähnlichkeit in den drei Dimensionen Fügetechnologie (siehe Bild 5-4), Montageschritte (siehe Bild 5-5) und Montagewerkzeug (siehe Bild 5-6).

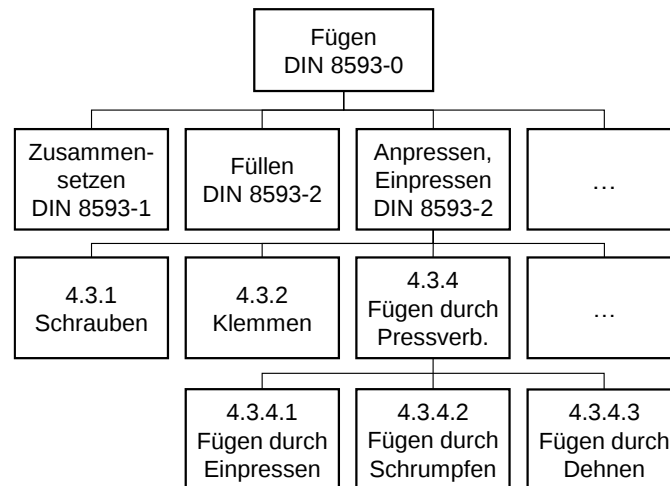


Bild 5-4: Verwendete Wissensbasis: Fügetechnologie DIN 8593

Um die Ähnlichkeit von Montagevorgängen berechnen zu können, müssen die Dimensionen geeignet formalisiert sein. Zur Formalisierung des Wissens über Montagevorgänge werden praxisrelevante und in der Industrie standardisierte Wissensquellen herangezogen. Im Rahmen der systematischen Betrachtung der Fertigungstechnik formuliert die Normung in DIN 8580 das Fügen als eine von sechs Hauptgruppen. In DIN 8593 [DIN8593] werden bestehende Fügeverfahren in einer Taxonomie abgebildet. Das Fügen ist nur ein Teilschritt des Montierens. Die Montage schließt verbundene Handhabungs- und Hilfsprozesse einschließlich Messen und Prüfen ein. Dazu gehören unter anderem Transport- und Richtungsbewegungen. Eine Methode zur Zerlegung eines Montagevorgangs in Grundbewegungen ist das bereits beschriebene Methods Time Measurement (MTM). Die MTM-Codes stellen hierzu die Grundbewegungen als Zeichenkette (String) dar. In Bild 5-5 ist exemplarisch der MTM-Code für das Aufnehmen und Ablegen eines Gehäuses einer Drosselklappe dargestellt. Für die Ausführung von Fügevorgängen existieren verschiedene Montagewerkzeuge, von Maulschlüssel und Schraubendreher bis zu MAG-Schweißgeräten.

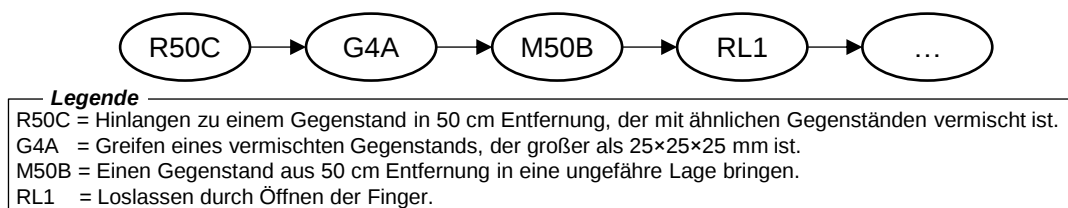


Bild 5-5: Verwendete Wissensbasis: Montageschritte in MTM

Um die Ähnlichkeit der Werkzeuge zu bestimmen, wird ihre Handhabung betrachtet. In der Literatur gibt es zum aktuellen Zeitpunkt kein etabliertes Modell zur Beschreibung der Handhabung von Montagewerkzeugen. Daher wurde mithilfe von Experteninterviews eine Taxonomie zur Beschreibung der Werkzeuge entwickelt [GRW21].

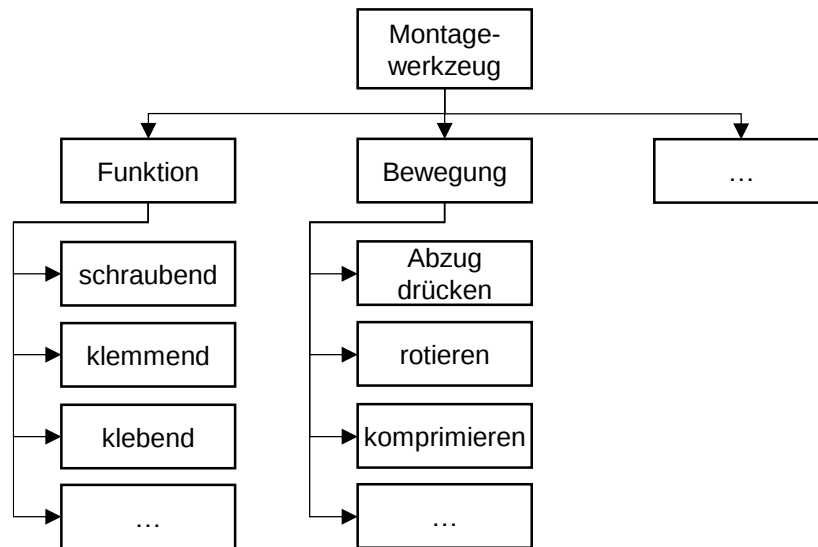


Bild 5-6: Verwendete Wissensbasis: Taxonomie für den Umgang mit Montagewerkzeugen, aufbauend auf [GRW21]

Die Handhabung der Werkzeuge kann unter anderem durch Attribute wie Gewicht, Funktion, ausgeführte Bewegung und Antrieb beschrieben werden. Ausgeführte Bewegungen der Mitarbeiter können beispielsweise „Taster betätigen“, „Werkzeug drehen“ und „Werkzeug zusammendrücken“ sein.

5.4.2 Analyse bestehender Ähnlichkeitsmetriken

Auf der Grundlage der vorgestellten semantischen Beschreibung von Montagevorgängen werden im nächsten Schritt Methoden zur Bestimmung der Ähnlichkeit von Montagevorgängen auf ihre Anwendung analysiert und geeignete ausgewählt. BAUMANN [Bau18] definiert die Ähnlichkeitsmetrik als eine Funktion $sim : I \times I \rightarrow \mathbb{R}$, wobei I eine beliebige Eingabemenge ist. Dabei muss die Funktion vier Eigenschaften für $A, B, C \in I$ erfüllen: Nicht-Negativität: $sim(A, B) \geq 0$, Symmetrie: $sim(A, B) = sim(B, A)$, Identität $A = B \Rightarrow sim(A, B) = 1$ und Dreiecksungleichung: $sim(A, C) \geq sim(A, B) + sim(B, C) - 1$. Zur Messung der Ähnlichkeiten wird zumeist die Distanzmetrik herangezogen. Hohe Werte (nahe 1) deuten auf eine große Ähnlichkeit der zu vergleichenden Konzepte (im Anwendungsfall Montagevorgänge) hin, während Werte nahe null Unähnlichkeit ausdrücken. Nach SLIMANI [SLI13] und GRÄBLER ET AL. [GRW21] lassen sich die Ähnlichkeitsmetriken in strukturbasierte, informationsbasierte, featurebasierte, syntaktische und hybride kategorisieren:

In *strukturbasierten Ähnlichkeitsmetriken* werden die Strukturinformationen der Ontologie-/Taxonomie-Hierarchie (is-a, part-of) genutzt. In diesen Ansätzen werden mathematische Funktionen verwendet, die die Länge des Pfades zwischen zwei Konzepten und die Tiefe der Einbettung innerhalb der Struktur berücksichtigen. Sie basieren auf der Grundannahme, dass Konzepte, die enger in einer Ontologie/Taxonomie angeordnet sind, eine

höhere Ähnlichkeit besitzen. Etablierte strukturbasierte Ähnlichkeitsmetriken werden unter anderem von RADA ET AL. [RMB89], RICHARDSON ET AL. [RSM94], HIRST & St-ONGE [HS95], WU & PALMER [WP94], SLIMANI ET AL. [SYM04], LI ET AL. [LBM03] sowie LEACOCK & CHODOROW [LC94] vorgestellt.

In informationsbasierten Ähnlichkeitsmetriken wird der Informationsgehalt von Konzepten verwendet, um deren semantische Ähnlichkeit zu messen. Der Informationsgehalt wird mithilfe der Häufigkeit der Nennung des Konzepts in einer Dokumentensammlung bestimmt, die für einen bestimmten Anwendungsbereich spezifiziert ist. Unter anderem wurden von RESNIK [RES99], LORD ET AL. [LSB03], LIN ET AL. [Lin93] sowie JIANG UND CORATH [JC97] informationsbasierte Ähnlichkeitsmetriken entwickelt.

Bei *featurebasierten Ähnlichkeitsmetriken* wird die Ähnlichkeit auf Basis von zugeordneten Features bestimmt. Diese Features beschreiben über Begriffe die Merkmale und Eigenschaften der Konzepte. Die Ähnlichkeit wird berechnet mit einer Funktion der Ähnlichkeiten der Features. Derartige Ähnlichkeitsmetriken werden unter anderem von TVERSKY [TVE77], PETRAKIS ET AL. [PVH06] und RODRIGUEZ ET AL. [RE03] dargestellt.

In syntaktischen Ähnlichkeitsmetriken wird die Ähnlichkeit auf der Basis der Zeichenkette zweier Konzepte bestimmt. Hierbei erfolgt die Berechnung rein syntaktisch, ohne weitergehende Interpretation. Etablierte Vorgehen sind die HAMMING-DISTANZ [LST11], die LEVENSHTAIN-DISTANZ [LEV96], die DAMERAN-LEVENSHTAIN-DISTANZ [SKK15], die JARO-WINKLER-DISTANZ [HSA06] sowie die N-GRAM [AO09].

In *Hybride Ähnlichkeitsmetriken* werden Merkmale der beschriebenen Ansätze kombiniert. Hierzu werden Parameter zur Gewichtung der Merkmale genutzt. Diese verlangen häufig eine manuelle Anpassung an das Anwendungsgebiet und die Wissensbasis. Unter anderem schaffen KNAPPE ET AL. [KBA08] sowie ZHOU ET AL. [ZWG08] hybride Ähnlichkeitsmetriken. Die unterschiedlichen Ansätze weisen spezifische Eigenschaften auf. Ein Hauptunterschied sind die erforderlichen Eingabedaten. Während beispielsweise eine strukturbasierte Ähnlichkeitsmetrik zur Messung der Pfadlänge und Tiefe der Einbettung von Konzepten eine Ontologie oder Taxonomie benötigt, erfordert eine informationsbasierte Ähnlichkeitsmetrik einen Korpus von Dokumenten des Anwendungsbereichs.

5.4.3 Methode zur Berechnung der Übereinstimmung von Montagevorgängen

Die Berechnung der Übereinstimmung von Montagevorgängen erfolgt anhand der drei Ähnlichkeiten in den drei Dimensionen verwendetes **Montagewerkzeug**, **Fügetechnologie** und ausgeführte **Montageschritte** unter Verwendung der in Abschnitt 5.4.1 vorgestellten Wissensbasen. Im Gegensatz zur Ähnlichkeit wird jedoch die Eigenschaft der Symmetrie gelöst. Bei einer Ähnlichkeit von 1 müssen beide Montagevorgänge aus identischen Montageschritten bestehen. Wenn ein Montagevorgang S_x eine Teilmenge eines

anderen Montagevorgangs S_y bildet, ist die Ähnlichkeit $\text{sim}(S_x, S_y) < 1$. Die Übereinstimmung (*correspondence*) $\text{cor}(S_x, S_y) = 1$. $\text{cor}(S_x, S_y)$ gibt somit an, wie viele der Erfahrungen von Montagevorgang S_x an Montagevorgang S_y genutzt werden können. Mitarbeiter sammeln die Erfahrungen von S_x , auch wenn sie zusätzliche Montageschritte bei S_y ausführen. Die Übereinstimmung $\text{cor}(S_x, S_y)$ der benötigten Fähigkeiten der Montagevorgänge S_x und S_y wird als gewichtete Summe der Übereinstimmung des verwendeten Werkzeugs (cor_{TO}), der Fügetechnologie (cor_{TE}) und der ausgeführten Montageschritte (cor_{ST}) definiert. Durch ein Experteninterview [GRW21] wurde festgelegt, dass die Übereinstimmung der Fügetechnologie ein doppelt so hohes Gewicht ($a = 0,5$) wie die Übereinstimmung des verwendeten Montagewerkzeugs und die Übereinstimmung der ausgeführten Montageschritte besitzt ($b = c = 0,25$). Die größte Übereinstimmung wird laut Experten bei der Verwendung derselben Fügetechnologie erzielt.

$$\text{cor}(S_x, S_y) = a * \text{cor}_{TE} + b * \text{cor}_{ST} + c * \text{cor}_{TO}$$

with $a + b + c = 1$ and $a, b, c \in [0,1]$

Gleichung 5-7: Übereinstimmung von Montagevorgängen

Die Auswahl der Ähnlichkeitsmetrik erfolgt anhand der vorhandenen Wissensbasen je Dimension sowie der Verbreitung im Anwendungsfeld Industrial Engineering in einem Experteninterview mit zwei Experten im den Bereichen Montageplanung und semantischer Technologie aus der Forschung. Hierbei handelt es sich um einen Laboringenieur sowie einen wissenschaftlichen Mitarbeiter des Lehrstuhls für Produktentstehung am Heinz Nixdorf Institut.

Fügetechnologie: Die Taxonomie der DIN 8593 [DIN8593] stellt die Wissensbasis zur Berechnung der Ähnlichkeit in der Dimension Fügetechnologie dar. Ausschließlich strukturbasierte und syntaktische Ähnlichkeitsmetriken sind hierbei anzuwenden. Auf Basis der weiten Verbreitung der Metrik fällt die Entscheidung für die strukturbasierte Ähnlichkeitsmetrik nach WU UND PALMER [WP94]. Die Übereinstimmung der Fügetechnologien TE_x und TE_y wird über folgende Gleichung bestimmt:

$$\text{cor}_{TE}(TE_x, TE_y) = \frac{2 * N_{cp}}{N_x + N_y + 2 * N_{cp}},$$

Gleichung 5-8: Übereinstimmung von Fügetechnologien

wobei N_x , N_y und N_{cp} die Abstände zwischen den Technologien TE_x , TE_y und TE_{cp} in der Taxonomie darstellen. TE_{cp} stellt dabei das kleinste gemeinsame Elternkonzept der Fügetechnologien innerhalb der Taxonomie dar. Elternkonzepte sind in einer Taxonomie übergeordnete Konzepte. Beispielsweise besitzen die beiden Fügetechnologien 4.3.4.1 *Fügen durch Einpressen* und 4.3.2 *Klemmen* das nächstgelegene Hyperonym 4.3 *Anpressen Einpressen* (vgl. Bild 5-4). N_{cp} stellt die Tiefe dar und ist definiert als der Abstand vom Wurzelknoten der Taxonomie zum Konzept TE_{cp} . N_x und N_y stellen die jeweilige Distanz zwischen den Fügetechnologien TE_x und TE_y zu TE_{cp} dar.

Montagewerkzeug: Die Dimension Montagewerkzeuge basiert wiederum auf einer Taxonomie als Wissensbasis. Die Werkzeuge werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften für die Handhabung beschrieben. Aufgrund der vorliegenden Wissensbasis wird die etablierte featurebasierte Ähnlichkeitsmetrik nach TVERSKY genutzt, um die Übereinstimmungen zu berechnen:

$$cor_{TO}(TO_x, TO_y) = \frac{TO_x \cap TO_y}{|TO_x \cap TO_y| + \alpha |TO_x - TO_y| + (\alpha - 1) |TO_y - TO_x|}$$

Gleichung 5-9: Übereinstimmung von Montagewerkzeugen

$TO_x \cap TO_y$ ist die Menge an Attributen, die die beiden Montagewerkzeuge TO_x und TO_y gemeinsam haben. $|TO_x - TO_y|$ beschreibt die Anzahl an Attributen, die nur TO_x , $|TO_y - TO_x|$ die Anzahl an Attributen, die nur TO_y besitzt. Um eine gleichmäßige Berücksichtigung der Attribute beider Montagewerkzeuge zu erhalten, wird α auf 0,5 gesetzt.

Montageschritte: Die MTM-Codes sind eine Zeichenkette von Beschreibungen der Montageschritte von Montagevorgängen. Zur Berechnung der Übereinstimmung der Zeichenkette eignen sich nur syntaktische Ähnlichkeitsmetriken. Aufgrund der weiten Verbreitung wird eine modifizierte Version der Levenshtein-Distanz ausgewählt:

$$cor(ST_x, ST_y) = 1 - \frac{mLevDst(ST_x, ST_y)}{\max(|ST_x|, |ST_y|)}$$

Gleichung 5-10: Übereinstimmung von Montageschritten

$mLevDst(ST_x, ST_y)$ steht für die minimale Anzahl von Bearbeitungsschritten, um eine gegebene MTM-Zeichenkette ST_x in eine zweite MTM-Zeichenkette ST_y umzuwandeln. Bearbeitungsschritte sind hierbei das Einfügen sowie das Ersetzen von MTM-Codes.¹²

Formalisiert wird die Übereinstimmung beim Fähigkeitsgraphen. Der Fähigkeitsgraph ist definiert als orientierter Multigraph $G = (S, R, cor)$, wobei S die Menge der Knoten ist, welche die geforderten Fähigkeiten darstellen, und $R \subseteq S \times S$ die Menge der Kanten, die die Wechselwirkungen der Fähigkeiten repräsentieren. Jede Kante (S_x, S_y) besitzt ein entsprechendes Gewicht $cor(S_x, S_y)$, das die Stärke der Wechselwirkungen zwischen den Fähigkeiten S_x und S_y darstellt. Die Wechselwirkungen sind nicht symmetrisch, das bedeutet, dass $cor(S_x, S_y) \neq cor(S_y, S_x)$ ist. In dem gerichteten Graph ist jede Kante r als geordnetes Paar mit einem Ursprung S_x und einem Ziel S_y dargestellt. Dies bedeutet, $cor(S_x, S_y)$ stellt die Übereinstimmung der Fähigkeiten dar, die der Vorgänger S_x auf den Nachfolger S_y besitzt. Jede Fähigkeit besitzt die Wechselwirkungen $cor(S_x, S_y) = 1$

¹² Im Gegensatz zur ursprünglichen Levenshtein-Distanz wird hierbei das Löschen von MTM-Codes nicht als Bearbeitungsschritt gezählt. Der Grund ist, dass nicht die Ähnlichkeit, sondern die Übereinstimmung der Zeichenketten bestimmt wird.

zu sich selbst. Bild 5-7 zeigt einen Ausschnitt des Prozessmodells der Montage einer Drosselklappe in BPMN2.0. Der zugehörige Fähigkeitsgraph ist in Bild 5-8 visualisiert.

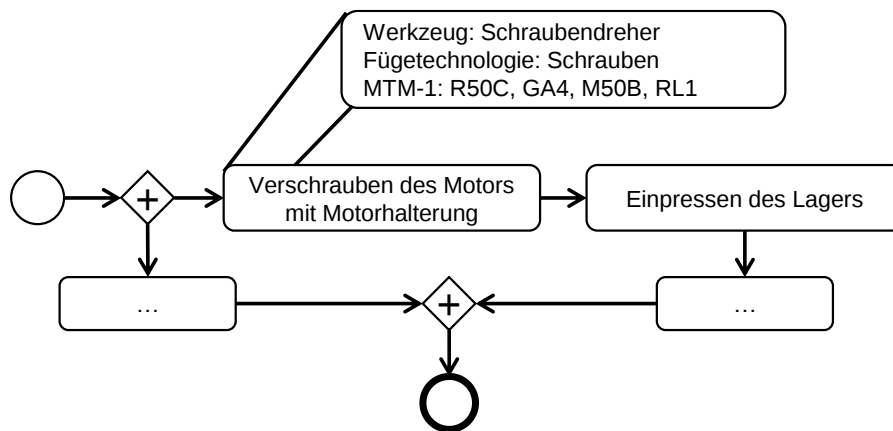


Bild 5-7: Prozessmodell der Gehäusemontage einer Drosselklappe in BPMN2.0, aufbauend auf [GRW21]

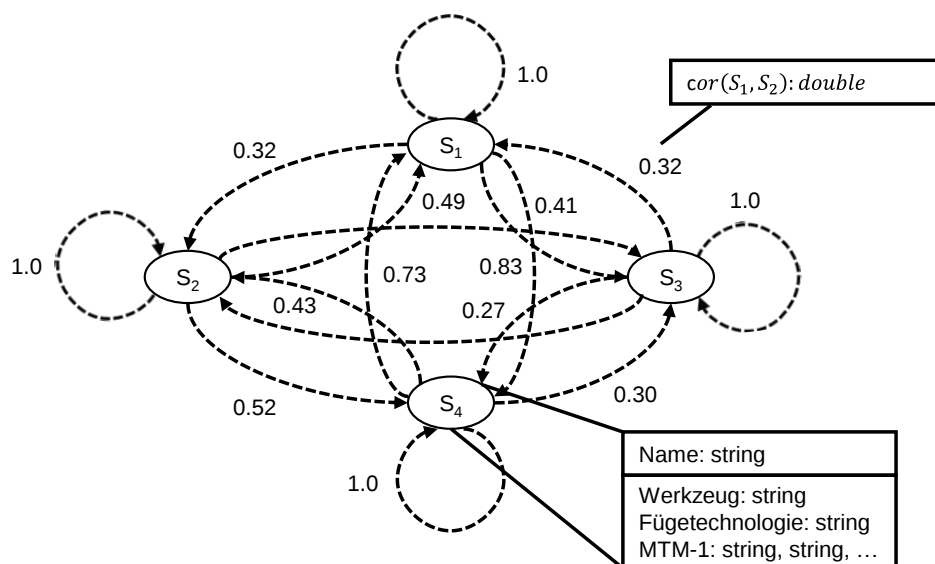


Bild 5-8: Fähigkeitsgraph am Beispiel der Gehäusemontage einer Drosselklappe, aufbauend auf [GRW21]

Die Methoden der Fließbandabstimmung wurden um die Berücksichtigung der Interdependenzen zwischen den Arbeitsplätzen erweitert. Aufbauend auf der Definition der Erfahrungen im Rahmen der Montage von KATIRAE ET AL. wurde eine Methode entwickelt, welche die Übereinstimmung und somit den Übertrag der Erfahrungen von unterschiedlichen Montageaufgaben berechnen kann. Grundlage der Methode ist die semantische Beschreibung der benötigten Fähigkeiten. Die Beschreibung erfolgt in einem orientierten (Fähigkeits-)Multigraph. Die Bestimmung der Übereinstimmung erfolgt mithilfe der drei Dimensionen verwendetes Montagewerkzeug, Fügetechnologie und ausgeführte Montageschritte.

5.5 Prognose der Mitarbeiterfähigkeiten

Bei diesem Schritt erfolgt die menschenzentrierte Modellierung von cyber-physischen Montagesystemen, indem ein mathematisches Prognosemodell für die Fähigkeitsentwicklung aufgestellt wird. Hierzu werden in Abschnitt 5.5.1 mithilfe einer systematischen Literaturrecherche nach BRINER & DENYER [BD12] Humanfaktoren ermittelt, die den größten Einfluss auf die Leistung der Mitarbeiter und damit auf die System-Performanz in einem manuellen Montagesystem haben. Es besteht noch kein Prognosemodell, das die ermittelten Humanfaktoren integriert berücksichtigt. Daher erfolgt in diesem Abschnitt zudem die Einbindung unterschiedlicher wissenschaftlicher Untersuchungen in ein integriertes mathematisches Prognosemodell für die Fähigkeitsentwicklung für die manuelle Montage.

5.5.1 Festlegung relevanter Humanfaktoren

Manuelle Montagesysteme sind durch die unterschiedlichen Fähigkeiten der Mitarbeiter gekennzeichnet. Diese Fähigkeiten werden durch eine Vielzahl von Humanfaktoren bestimmt. Humanfaktoren sind Elemente wie Erfahrung, Alter, Geschlecht und anthropometrische Merkmale. Diese besitzen einen entscheidenden Einfluss auf die Performanz der Mitarbeiter und somit auch auf die Performanz des manuellen Montagesystems in Bezug auf Zeit, Kosten, Durchsatz und Gesundheit der Mitarbeiter. Daher ist es entscheidend, die für die Problemstellung relevanten Humanfaktoren zu bestimmen. Hierzu erfolgt eine systematische Metaanalyse arbeitswissenschaftlicher und -psychologischer Studien nach BRINER & DENYER [BD12].

Schritt 1 – Bestimmung der Untersuchungsfrage: *Welche Studien untersuchen den Einfluss der Unterschiede zwischen Mitarbeitern auf die Systemperformanz von manuellen Montagesystemen? Welche Humanfaktoren haben den größten Einfluss auf die Systemperformance eines Montagesystems?*

Schritt 2 – Suche und Auswahl relevanter Studien: Hierzu werden die Plattformen *Web of Science* und *Google Scholar* genutzt, wobei *Web of Science* zunächst für die strukturierte Suche nach Beiträgen dient. Anschließend erfolgt eine Überprüfung ausgelassener Beiträge mit *Google Scholar*. Es wurden Beiträge im Zeitraum von 1999 und 2022 analysiert. Ausgangslage für die Bestimmung einer geeigneten Suchstrategie ist die Analyse existierender Metanalysen, die den Einfluss von Humanfaktoren berücksichtigen. Auf Basis vorheriger Forschungsergebnisse am Lehrstuhl für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts [GP19, GRP20b, GRP21] sowie weiterer Forscher im Bereich menschenzentrierter Produktionsplanung [AW19b, GGN17, KCF21, MSA21, Ost20, SKP19] wurden die Humanfaktoren *Erfahrung*, *Alter*, *Geschlecht*, *Lernen* und *Arbeitszufriedenheit* ausgewählt. Zusätzlich zu den Humanfaktoren wurden anwendungsfallspezifische Suchbegriffe verwendet. Die gesamte Suchstrategie ist in Tabelle 5-3 dargestellt. Die Suche resultiert in Beiträgen bei Web of Science, welche um weitere 18 zusätzliche Beiträge von Google Scholar ergänzt werden.

Tabelle 5-3: Suchstrategie der Festlegung relevanter Humanfaktoren

	Web of Science	Google Scholar
Such-Strategie	1. Advanced Search 2. Daten: Web of Science Core Collection 3. Titel: experience OR age OR gender OR learning OR satisfaction 4. Themenfeld: assembly AND production AND worker* AND model* 5. Sprache: Englisch 6. Zeitspanne: 1999-2022	1. Advanced Search 2. assembly AND production AND worker* AND model* mit allen Wörtern 3. experience OR age OR gender OR learning OR satisfaction mit irgendeinem der Wörter 4. Sprache: Englisch 5. Zeitspanne: 1999-2022
Auswahl-kriterien	1. Eingeschlossen werden Beiträge aus den Bereichen Ingenieurwissenschaften, Industrial Engineering und Human Factors. 2. Ausgeschlossen werden nicht verwandte Beiträge durch das Lesen der Titel und der Zusammenfassungen. 3. Analyse relevanter Beiträge (inklusive ausgewählter Beiträge aus den Referenzen)	

Schritt 3 – Kritische Würdigung der Studien: In die kritische Würdigung werden nur Beiträge eingeschlossen, die unter die Disziplinen *Ingenieurwissenschaften*, *Industrial Engineering* und *Human Factors* fallen. Ausgewählte Referenzen der relevanten Arbeiten werden mit in die Analyse aufgenommen. Weiterhin werden nach dem Lesen des Titels und der Zusammenfassung nicht verwandte Beiträge ausgeschlossen. Dadurch werden 78 Arbeiten ausgeschlossen.

Schritt 4 – Analyse und Synthese der Ergebnisse aus den Studien: Insgesamt werden 62 Arbeiten bestehend aus Journal- und Konferenzbeiträgen analysiert. In Tabelle 5-4 ist eine Übersicht über die Suchergebnisse dargestellt. Nachfolgend werden Beiträge hinsichtlich der untersuchten Humanfaktoren strukturiert, analysiert und in Beziehung gesetzt.

Tabelle 5-4: Übersicht über die Suchergebnisse

Suchterme	Web of Science		Google Scholar
	Gesamt	Auswahl	Auswahl
TI = ("human factor*") AND TS = (manufacturing AND worker* AND model*)	23	14	4
TI = (experience) AND TS = (manufacturing AND worker* AND model*)	22	7	5
TI = (age*) AND TS = (manufacturing AND worker* AND model*)	31	6	3
TI = (gender) AND TS = (manufacturing AND worker* AND model*)	11	2	1
TI = (satisfaction) AND TS = (manufacturing AND worker* AND model*)	16	5	1
TI = (learning) AND TS = (manufacturing AND worker* AND model*)	48	15	4
Gesamt	140	44	18

5.5.1.1 Alter

Für den Zusammenhang zwischen alternder Belegschaft und Performanz des Montagesystems finden sich in der Literatur zwei grundlegende Theorien. Auf der einen Seite hat die zunehmende Erfahrung der älteren Mitarbeiter einen positiven Einfluss, jedoch kommt es auf der anderen Seite zu altersbedingten Einschränkungen der Fähigkeiten. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse von Studien vorgestellt, die den altersbedingten Einfluss untersuchen.

ZWICK UND GOBEL [ZG09] stellen fest, dass die durchschnittliche Muskelkraft einer Person im Alter von 20 bis 60 Jahren um etwa 10 % pro Jahrzehnt abnimmt. Danach nimmt sie zwischen 60 und 80 Jahren um 15 % ab und um 30 % nach 80 Jahren. Sie führen dies zurück auf die aerobe Kapazität, die im Alter von 20 Jahren ihren Höhepunkt erreicht und danach um etwa 1 % pro Jahr abnimmt. SHEPHARD [She00] berichtet ebenfalls, dass sich das Alter auf die berufliche Leistungsfähigkeit durch die Abnahme der aeroben Kapazität auswirkt. NARDOLILLO ET AL. [NBC17] weisen anhand der Herzfrequenzvariabilität auf statistische Unterschiede zwischen den Altersgruppen in Bezug auf körperliche und gesundheitliche Probleme hin.

HUNTER [29] argumentiert, dass einige kognitive Fähigkeiten mit dem Alter abnehmen, während sich andere über den Lebenszyklus hinweg stabilisieren, obwohl Fähigkeiten, logisches Denken und das Arbeitsgedächtnis mit dem Alter abnehmen können. BELBASE UND SANZENBACHER [BS16] zeigen, dass auch Arbeitnehmer mit geringerer Fähigkeit zur Informationsverarbeitung mit zunehmendem Alter produktiv bleiben können. OAKMAN ET AL. [OCJ19] und LANDAU ET AL. [LRM08] bestätigen die altersbedingten Veränderungen der körperlichen Fähigkeiten. Sie schlagen vor, die körperlichen Aufgaben an diese Veränderungen anzupassen. EFE ET AL. [EKK18B] schlagen Modelle für Fließbandarbeit und Job-Rotation vor, um die Beziehung zwischen Alter und den Fähigkeiten und der Gesundheit der Arbeitnehmer am Fließband aufzuzeigen. ZÜLCH UND BECKER [ZB10] stellen eine Möglichkeit zur Vorhersage der Entwicklung der Produktivität der körperlichen Fähigkeiten mithilfe des Simulators ESPE-AS vor. BOTTI ET AL. [BCM20] entwickeln ein bi-objektives, ganzzahliges Programm-Modell für das Management älterer Mitarbeiter, die einem Risiko durch repetitives Arbeiten ausgesetzt sind.

5.5.1.2 Erfahrungen

Arbeitswissenschaftliche Studien können jedoch nicht bestätigen, dass ältere Mitarbeiter in der Montage weniger produktiv sind als jüngere [BW16]. Ein Grund dafür ist die zunehmende Erfahrung. Erfahrungen können als das Wissen oder die Fähigkeiten verstanden werden, die im Laufe der Zeit durch die Verwendung eines spezifischen Werkzeugs, einer Technologie oder der Ausübung von bestimmten Prozessschritten erworben werden (vgl. 5.4.1) [CCF14, GCG17]. Ergebnisse aus der Forschung im Bereich Arbeitspsychologie zeigen, dass Mitarbeiter, die mehr Erfahrungen mit einer Aufgabe besitzen, weniger Zeit für die Erledigung benötigen und weniger Fehler machen [RAB05]. Beispielsweise

untersuchen GINIGER ET AL. [GDE83] und AVOLIO ET AL. [AWM90] die Auswirkungen von Alter und Erfahrung auf Arbeitsleistung, Fehlzeiten, Sicherheit und Fluktuation. Sie legen nahe, dass Berufserfahrung einen großen Einfluss auf die Arbeitsleistung besitzt. ILMARINEN [Ilm01] stellt fest, dass sich Erfahrung positiv auf kognitive Fähigkeiten auswirkt und die Arbeitsleistung direkt beeinflusst. Schmidt et al. [SHO86] bestimmen ein Modell mithilfe des Pfadanalyseansatzes, um den zugrunde liegenden Einfluss von Berufserfahrung und Berufswissen zu untersuchen. Die Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass die Erfahrung der Mitarbeiter die Arbeitsleistung am stärksten beeinflusst. Die Studie von MCDANIEL ET AL. [MSH88] zeigt, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Berufserfahrung und Arbeitsleistung unabhängig von der Komplexität der Arbeit besteht. ZWICK & GOBEL [ZG09] stellen fest, dass die menschliche Leistung möglicherweise stärker von der Erfahrung als vom Alter beeinflusst wird. FONG BOH ET AL. [FSE07] stellen fest, dass spezialisierte Erfahrung den größten Einfluss auf die individuelle Produktivität hat. LAZZERINI & PISTOLESI [LP18] beziehen die Erfahrung der Mitarbeiter in die Zuweisung von Aufgaben ein. Ziel ist es, eine Verbesserung der Arbeitssicherheit durch eine geeignete Zuweisung auf der Grundlage des Einflusses der Erfahrung auf das Verhalten zu erreichen. Zu diesem Zweck wurden ein neuronales Modul, ein evolutionäres Modul und ein Entscheidungsmodul eingesetzt. BOENZI ET AL. [BDM15] integrieren eine auf Erfahrung basierende Leistungssteigerung in ihre altersbezogene ganzzahlige lineare mathematische Programmierung, um Job-Rotationspläne zu verbessern.

5.5.1.3 Lernen & Vergessen

Obwohl das Phänomen des arbeitsintegrierten Lernens seit Jahrzehnten von Arbeitspsychologen erforscht wird, ist es noch immer schwierig zu definieren. Nach Arbeitspsychologen wie HOVLAND [Hov51] beruht die Veränderung der Arbeitsleistung auf wiederholten Erfahrungen, die mit der Aufgabe einhergeht. WIEGAND [Wie95] definiert Lernen als „eine relativ überdauernde Veränderung von Fähigkeiten durch Erfahrung“. GOTTFREDSON & MOSHER [GM16] unterteilen den Lernprozess in *Five Moments of Need*, welche mit spezifischen Lernbedürfnissen verbunden sind: Erlernen neuen Wissens, Vertiefung des Wissens, Anwenden des gelernten Wissens, Lösen von Problemen und Veränderungen von Verhaltensmustern. In der Regel hängt der Lernzuwachs von einer Reihe von Durchführungen ab, die besonders auf dem Erinnern basieren. Das Lernen und die Fähigkeitsentwicklung hängen nach JABER [Jab06] von drei Faktoren ab: (1) Die Länge, (2) die Bedeutung und (3) die Schwierigkeit des Lernstoffs. Der Fokus dieser Dissertation liegt auf dem handlungsorientierten Lernen. Die meisten derartigen Lernprozesse werden in einer spezifischen Reihenfolge gelernt. Ausgehend von der Handlungsregulationstheorie versteht sich die Fähigkeitsentwicklung als ein selbstverantworteter Lernprozess, der von einem individuellen Fähigkeitsniveau zu einem anderen Niveau führt. EBBINGHAUS (NACH [HJ71]) betont das Gesetz der Häufigkeit als wichtiges Prinzip der Assoziation, welches besagt, je häufiger eine verbale oder motorische Fähigkeit erlebt wird, umso

leichter wird das Gelernte abgerufen. Das Gedächtnis wird durch Wiederholungen gestärkt. Nach HASELOFF & JORSWIECK [HJ71] zeigt eine Vielzahl von Studien, dass das Lernen verbessert wird, wenn die Menschen motiviert sind. HOVLAND [Hov51] zeigt wiederum auf, dass das Lernen neuer Aufgaben nicht unabhängig von früherem Lernen ist, sondern auf früherem Erwerb aufbaut. Das frühere Lernen kann das neue Lernen verbessern (positiver Transfer) oder verzögern (negativer Transfer). Ein negativer Lerntransfer tritt auf, wenn die Bedingungen nicht ähnlich genug sind.

5.5.1.4 Geschlecht

Das Geschlecht kann ebenso die Arbeitstätigkeit beeinflussen. Nach Messing et al. [MLS21] kann dies durch (1) geschlechtsspezifische Arbeits- und Aufgabenzuweisung, (2) biologische Unterschiede zwischen Frauen und Männern, (3) geschlechtsspezifische menschliche Beziehungen am Arbeitsplatz und (4) Erscheinungsformen der Work-Family-Artikulation geschehen.¹³ NORDANDER ET AL. [NOB08] untersuchten die Haltung, Bewegung und Muskelaktivität von Männern und Frauen, die identische repetitive Arbeiten in einer Gummifabrik und einem mechanischen Montagesystem verrichten. Die Autoren stellten fest, dass die Arbeitshaltung und die Bewegungen von Männern und Frauen ähnlich waren. Dahingegen stellten HIRSCH ET AL. [HKK19] geschlechtsspezifische Unterschiede der Fähigkeiten in Bezug auf das Gedächtnis, die Verarbeitungsgeschwindigkeit, die räumliche Wahrnehmung und die fluide Intelligenz fest. GARBIE [Gar14] untersucht die geschlechtsspezifischen Unterschiede der Arbeitsleistung bei der Montage. Untersuchungsgegenstand ist die Produktivität der Mitarbeiter bei der Montage an einem adaptiven Arbeitsplatz. Die Ergebnisse der kleinen Stichprobe zeigen, dass die weiblichen Mitarbeiter eine höhere Produktivität haben, ergonomisch gesünder arbeiten, jedoch eine geringere Arbeitszufriedenheit besitzen. Da der Stichprobenumfang lediglich bei zehn Probanden (fünf weibliche und fünf männliche Probanden) liegt, müssen die Ergebnisse aus arbeitswissenschaftlicher Sicht kritisch reflektiert werden. EFE ET AL. [EKK18a] untersuchen insbesondere die Auswirkungen am Fließband. Sie berücksichtigen in ihrem Modell neben dem Alter auch das Geschlecht der Mitarbeiter. Auf Basis der Ergebnisse ihrer Studie besitzen Frauen eine geringere physische Arbeitsbelastbarkeit. Grundlage hierzu ist eine Analyse der Daten von LYNCH ET AL. [LML99]. In ihrem Modell der Aufgabenzuordnung berücksichtigen sie daher eine geschlechtsspezifisch körperliche Belastbarkeit der Mitarbeiter. Nach derzeitigen Erkenntnisstand ist daher der Einfluss des Humanfaktor Geschlecht unklar.

¹³ In der vorliegenden Untersuchung werden Geschlechterunterschiede nur in Bezug auf die biologische, physische und allgemeine Arbeitsfähigkeit betrachtet, die einen direkten Zusammenhang mit der Arbeitsfähigkeit im Produktionskontext besitzen.

5.5.1.5 Arbeitszufriedenheit

Die Arbeitszufriedenheit ist ein Maß dafür, wie zufrieden die Mitarbeiter mit ihrer Arbeit sind. KAYA [Kay95] zeigt, dass die Arbeitszufriedenheit eines der wichtigsten Kriterien für die Schaffung eines gesunden organisatorischen Umfelds in einem Unternehmen ist. DAWAL & TAHA [DT09] kommen anhand einer Regressionsanalyse zu dem Schluss, dass die wichtigsten Faktoren für die Arbeitszufriedenheit in der Produktion die Vielfalt der Fähigkeiten, der Lärm, die Arbeitsplatzrotation und die Arbeitsmethode sind. Außerdem fanden JUN ET AL. [JCS06] heraus, dass die Fähigkeiten der Mitarbeiter, die Teamarbeit und die Vergütung einen signifikanten und positiven Einfluss auf die Zufriedenheit der Mitarbeiter haben. CHEN ET AL. [CWH10] untersuchen die Beziehung zwischen Person und Umfeld (P-E). Sie entdecken eine signifikante positive Korrelation zwischen P-E-Fit¹⁴ und organisatorischem Engagement und Arbeitszufriedenheit. OZTURKOGLU ET AL. [OSO16] zeigen auf, dass die Personalpolitik, die Sicherheit, die Ergonomie, die Luftqualität, der thermische Komfort und die störenden Geräte einen entscheidenden Einfluss auf die Arbeitszufriedenheit besitzen. Durch eine Regressionsanalyse wurde festgestellt, dass die Ergonomie für die Mitarbeiter die wichtigste Rolle spielt. LIU & LIU [LL19] untersuchen ein zufriedenheitsgesteuertes bi-objektives Personaleinsatzplanungsproblem. Dabei werden die Zufriedenheit der Belegschaft und die Anzahl der pünktlichen Aufträge maximiert.

5.5.1.6 Humanfaktoren in Montagesystemen

Die vorgestellten Ergebnisse der arbeitswissenschaftlichen Studien zeigen, dass die Modellierung des Einflusses von Ausprägungen einzelner Humanfaktoren auf die Systemleistung schwierig ist. Humanfaktoren besitzen Beziehung untereinander und sind mehrdeutig zu auszulegen. Um eine geeignete Auswahl der Humanfaktoren mit dem höchsten Einfluss zu bestimmen, wurden die Vernetzung und gegenseitige Beeinflussung der Humanfaktoren analysiert (siehe Bild 5-9). Hierzu wurden bestehende Modellierungen aus den arbeitswissenschaftlichen Studien betrachtet, die mehrere Humanfaktoren berücksichtigen. Mit einem paarweisen Vergleich wurden die Humanfaktoren in jeder Studie verglichen. Dies bedeutet, ein Humanfaktor kann 0 = weniger einflussreich, 1 = gleich einflussreich oder 2 = einflussreicher als ein anderer Humanfaktor auf die Leistung eines Montagesystems sein. Sowohl die Menge der Forschungsbeiträge als auch die Ergebnisse der arbeitswissenschaftlichen Studien zeigen, dass die Humanfaktoren Alter, Erfahrung, Lernen und Vergessen den größten Einfluss besitzen.

¹⁴ P-E-Fit ist ein übergreifendes Konzept zur Veranschaulichung der Interaktion von Personen mit ihrem Umfeld. Das Konzept geht davon aus, dass, je mehr ähnliche Faktoren Person und Umfeld haben, desto positiver die Ergebnisse für die Personen sind [CWH10].

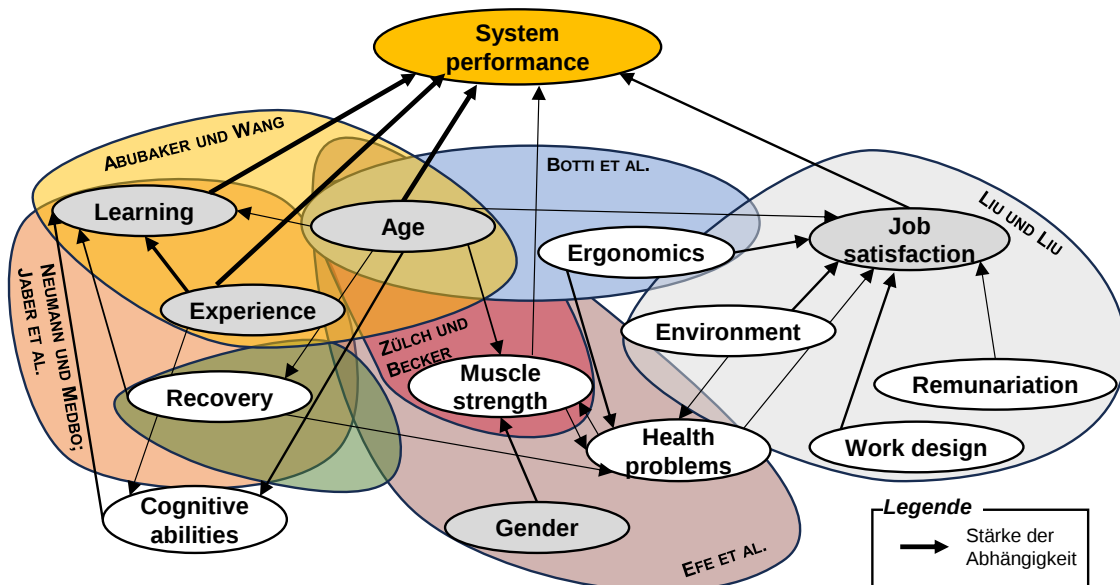


Bild 5-9: Auszug von arbeitswissenschaftlichen Studien, die den Einfluss von Humanfaktoren auf die Arbeitsleistung in Montagesystemen untersuchen

Arbeitswissenschaftlichen Studien zeigen, dass die Unterschiede zwischen Mitarbeitern einen großen Einfluss auf die Performanz des Montagesystems haben. Dieser Unterschied wird allerdings in aktuellen Ansätzen der Aufgabenzuordnung in Montagesystemen nicht hinreichend berücksichtigt. Aus diesem Grund werden Humanfaktoren für den vorgestellten Ansatz in der Steuerung und Planung von Montagesystemen zugrunde gelegt. Die Untersuchung zeigt, dass die Humanfaktoren Alter, Erfahrung, Lernen und Vergessen den größten Einfluss besitzen.

5.5.2 Mathematisches Modell zur Prognose der Fähigkeitsentwicklung

In der Montage führt ein Lernprozess dazu, dass sich die benötigte Zeit zur Ausführung eines Montagevorgangs reduziert. Im Gegensatz dazu führt eine Unterbrechung zu einem Vergessen, was längere Montagezeiten zur Folge hat (siehe Bild 5-10). Weiterhin nehmen mit steigendem Alter die Montagezeiten wiederum zu. Die Schwankungen der Montagezeiten sind nicht rein zufällig, sondern lassen sich bis zu einem gewissen Grad mithilfe von mathematischen Modellen approximieren. Für die mathematische Beschreibung des Einflusses der Humanfaktoren *Alter*, *Lernen* und *Vergessen* gibt es bereits Modelle, die aus arbeitswissenschaftlichen Untersuchungen resultieren.

5.5.2.1 Lernkurven-Modelle

Lernen kann mithilfe der Integration des Konzepts der Lernkurven-Modelle in Montageplanungsmodelle berücksichtigt werden. Lernkurven ermöglichen die Modellierung von Leistungsverbesserungen menschlicher Arbeitskräfte im Laufe der Zeit. Durch die Wiederholungen von Montagevorgängen findet ein informeller Lernprozess statt.

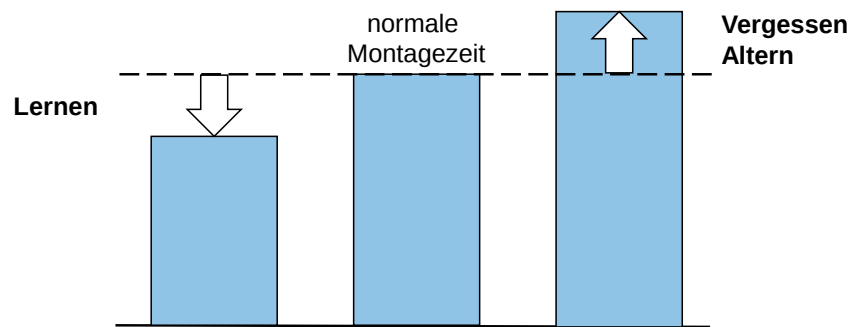


Bild 5-10: Schematische Darstellung des Einflusses ausgewählter Humanfaktoren auf die Montagezeit, in Anlehnung an [Ost20]

Dies führt zu steigender Erfahrung und sinkenden Montagezeiten [AF06]. WRIGHT [WRI36] hat 1936 erstmals das Zeitreduktionspotenzial bei steigender Anzahl von zu montierenden Produkten in der Flugzeugproduktion erforscht. Empirische Forschungen konzentrierten sich auf die Messung des Lernens durch die Erhebung empirischer Daten in Laborumgebungen und in Feldstudien. Lerneffekte wurden in unterschiedlichen Bereichen der industriellen Produktion untersucht, wie zum Beispiel in der manuellen Kommissionierung [GGJ13, GGJ15, SMK16], im Verkauf [TS12], im Qualitätsmanagement [WWL97] und in der manuellen Montage [GRP20a]. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Lernkurven, die sich in multivariate Lernkurven oder univariate Lernkurven einteilen lassen. Tabelle 5-5 gibt eine Übersicht über bestehende Arten von Lernkurven-Modellen und ihre mathematische Beschreibung der Fähigkeitsentwicklung der Mitarbeiter.¹⁵ Am häufigsten werden log-lineare, exponentielle und hyperbolische Lernkurven-Modelle im Kontext der Produktion eingesetzt [AF11]:

- *Log-lineare Lernkurven-Modelle* sind die klassischen Lernkurven-Modelle. Sie gehen davon aus, dass bei einer Verdopplung der kumulierten montierten Menge die Montagezeit um eine konstante Rate sinkt. Aufbauend auf dem Lernkurven-Modell von Wright hat sich in den letzten Jahrzehnten eine Vielzahl unterschiedlicher log-linearer Lernkurven-Modelle etabliert. Tabelle 5-5 zeigt eine Übersicht über etablierte log-lineare Lernkurven-Modelle: das Modell von WRIGHT [Wri36], das Modell von YELLE [Yel79], das Stanford-B-Modell [Ash56], das Modell von DEJONG [DeJ57], das Plateau-Modell [Bal71], das S-Kurven-Modell [Car46] und das Modell von ULLRICH [Ull95].
- *Exponentielle Lernkurven-Modelle* stützen sich auf einen großen Satz von Parametern. Durch die Integration zusätzlicher Informationen wird die Vorhersage der benötigten Montagedauer verbessert. Beispiele für die Parameter sind die Vorerfahrung der Mitarbeiter und ihre maximale Fähigkeit. Etablierte exponentielle Lernkurven-

¹⁵ Eine detaillierte Übersicht über bestehende etablierte Lernkurven-Modelle befindet sich im A3 dieser Dissertation.

Modelle sind das Modell von WOEBER [Woe83], das Modell von LEVY [Lev65], das Modell von KNECHT [Kne74] und das Modell von TOWILL [TK78].

- *Hyperbolische Lernkurven-Modelle* nutzen keinen reduzierenden Exponentialwert. Grundsätzlich wird hierbei zwischen 2-Parameter-Hyperbolischen und 3-Parameter-Hyperbolischen Lernkurven-Modellen unterschieden. Etablierte Hyperbolische Lernkurven-Modelle sind die von Mazur & Hastie entwickelte 2-Parameter-Hyperbolische Lernkurve sowie die 3-Parameter-Hyperbolische Lernkurve

Tabelle 5-5: Auswahl etablierter Arten von Lernkurven-Modellen

Lernkurve	Bezeichnung	Gleichung
Log-linear	Modell von WRIGHT [WRI36]	$t = t_1 \cdot x^{-b}$
	Stanford-B-Modell [Ash56]	$t = t_1 \cdot (x + B)^{-b}$
	Modell von DEJONG [DEJ57]	$t = t_1 \cdot [M + (1 - M) \cdot x^{-b}]$
	Plateau-Modell [Bal71]	$t = C + y_1 \cdot x^{-b}$
	S-Kurven-Modell [Car46]	$t = C[M + (1 - M) \cdot (x + B)^b]$
	Modell von ULLRICH [ULL95]	$t = k + s \cdot (x + B)^{-b}$
Exponential	Modell von WOEBER [Woe83]	$t = a - a \cdot e^{-cx}$
	Modell von LEVY [Lev65]	$t = (a - c) \cdot e^{-k(x-1)} + c$
	Modell von KNECHT [Kne74]	$t = a \cdot x^{-b} \cdot e^{cx}$
	Modell von TOWILL [TK78]	$t = t_1 + y_f \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$
Hyperbolisch	2-Parameter-Hyperbolisches Modell [MH78]	$t = k \cdot \left(\frac{s}{s+r}\right)$
	3-Parameter-Hyperbolisches Modell [MH78]	$t = k \cdot \left(\frac{s+p}{s+p+r}\right)$

Legende:

t = zeitlicher Aufwand für die x - te Einheit; t_1 = zeitlicher Aufwand für die erste Einheit;
 x = zu fertigende Einheit ; b = Degressionsfaktor (berechenbar aus Lernrate);
 B = Erfahrungsfaktor ; M = Inkompressibilitätsfaktor ; C = Grenzwert;
 k = minimale Ausführungszeit s = normierte Montagezeit für die erste Einheit;
 a = Arbeitsergebnis einer vollständig ausgebildeten Person ; c = Grenzwert;
 y_f = Maximaler Anstieg der Produktivität ; t = Lernzeitpunkt; τ = Lernzeitkonstante;
 r = Lernrate ; p = Parameter der Vorerfahrung; s = Anzahl konformer Einheiten;

5.5.2.2 Lern- und Vergessenskurven-Modelle

Im Bereich des Produktionsmanagements haben Lernen und Vergessen an Bedeutung gewonnen. Darauf aufbauend wurden unterschiedliche theoretische, experimentelle und empirische mathematische Vergessensmodelle entwickelt. Es existieren drei unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Beschreibung des Vergessens [JS04]. Eine Gruppe von Forschern fokussiert die mathematische Modellierung ohne einen direkten Vergleich mit empirischen Daten (z. B. CARLSON & ROWE [CR76], ELMARAGHY ET AL. [ENE08], JABER

UND BONNEY [JB97]). Weitere Forscher nutzen Laborexperimente mit studentischen Probanden (z. B. BAILEY [BAI89], GLOBERSON ET AL. [GLS89], HEWITT ET AL. [HSY92]). Des Weiteren nutzen Forscher empirische Daten aus Unternehmen zur Modellierung (z. B. BADIRU [Bad95], NEMBARD & UZUMERI [NU00]).

Bei den experimentell modellierten Vergessenskurven bestehen zwei entscheidende Einschränkungen [JS04]: Zum einen werden häufig nur einzelne anstatt mehrerer Produktionsunterbrechungen betrachtet. Dadurch wird das Vergessen jedoch nicht ausführlich betrachtet. Zum anderen leiten sich die Modelle nur aus den experimentellen Aufgaben und nicht aus den industriellen Montageaufgaben ab. Da es eine direkte Verbindung zwischen dem Lernen und Vergessen von Montageprozessen gibt, gibt es unterschiedlich integrierte Modelle, sogenannte Lern- und Vergessenskurven-Modelle (siehe Bild 5-11).

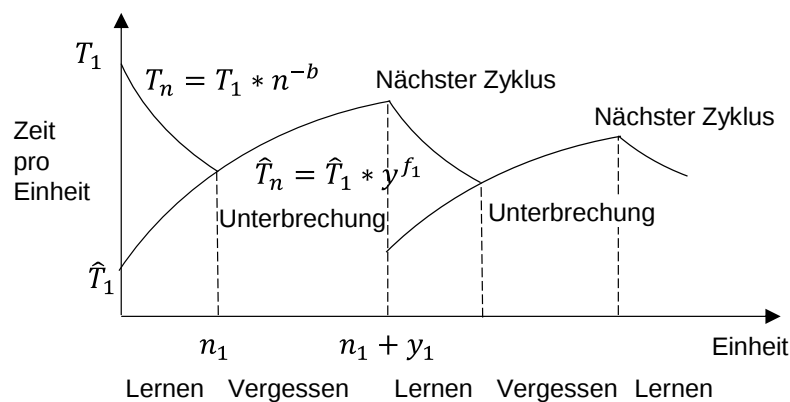


Bild 5-11: Lernkurven-Modell nach Learn-Forget Curve Model [JB96]

Lern- und Vergessenskurven sind spezielle Arten von Lernkurven. Nach Einschätzungen unterschiedlicher Forscher (z. B. [AF11, HCA20, JB97, JS04, PJ22]) existieren aktuell vier vielversprechende Modelle, die nachfolgend genauer untersucht werden: Learn-Forget Curve Model [JB96], Recency Model [NO01], Power Integration Diffusion [SJ02], Modified Learn-Forget Curve Model [JK04].

Learn-Forget Curve Model (LFCM)

Das erste dieser Modelle stammt von JABER UND BONNEY [JB96]. JABER UND BONNEY erweitern das Lernkurven-Modell von WRIGHT um den Vergessenseffekt. Das Vergessen wird analog zum Lernen als Funktion in Abhängigkeit von der Dauer der Unterbrechung und der Durchführungszeit vor der Unterbrechung modelliert. Dadurch wird ein Modell geschaffen, dass die Durchführungszeiten auch nach einer Unterbrechung prognostiziert. Im Learn-Forget Curve Model wird davon ausgegangen, dass der Vergessensexponent f von dem Lernexponent b , den äquivalent kumulativen Einheiten q , die ohne Unterbrechung produziert worden wären, und der Zeit C bis zum vollständigen Vergessen anhängt:

$$f(i) = \frac{b \cdot (1 - b) \cdot \log(q)}{\log \cdot (C + 1)}$$

Gleichung 5-11: Zusammenhang zwischen Lern- und Vergessensexponent im LFCM

Weiterhin werden bei den Lernkurven auch Erfahrungen aus vorherigen Produktionszyklen betrachtet. Die Ausführungszeit t der Durchführung n im Zyklus i ist abhängig von der Durchführungszeit der ersten Ausführung t_1 sowie den Erfahrungen im Zyklus n_i sowie aus dem vorherigen Zyklus u_i . Wie in der Lernkurve von WRIGHT wird die Ausführungszeit von dem Degressionsfaktor b bestimmt.

$$t(n, i) = t_1 \cdot (u_i + n_i)^{-b}$$

*Gleichung 5-12: Berechnung der Durchführungszeit im LFCM*Recency Model (RC)

Das Recency Model wurde von NEMBARD UND OSOTHSILP [NO01] vorgestellt. Dabei wird wiederum das Lernkurven-Modell von WRIGHT verwendet. Es prognostiziert die Durchführungszeit nach einer Unterbrechung abhängig von der Rezenz R . Die Rezenztheorie geht davon aus, dass sich Arbeiter an die letzten Durchführungen erinnern und nicht an die Durchführungen zu einem früheren Zeitpunkt. Im Gegensatz zu dem LFCM geht das Recency Model nicht davon aus, dass jede Wiederholung sich auf gleiche Weise auswirkt. Weiterhin berücksichtigt das Modell über den Parameter α , wie einfach Arbeiter die Aufgabe vergessen. Der Rezenzeffekt wird bestimmt über das Verhältnis zwischen der durchschnittlich verstrichenen Zeit und der verstrichenen Zeit der zuletzt produzierten Einheit. Der Rezenzeffekt (R_n^α) ist begrenzt durch 0 und 1, wobei 0 für die Erfahrungen der fernen Vergangenheit und 1 für die Erfahrung, die der aktuellen Einheit unmittelbar vorausgeht, steht:

$$t_n = t_1 \cdot (R_n^\alpha \cdot n)^{-b}$$

$$R_n^\alpha = 2 \frac{\sum_{i=1}^n (t_i - t_0)}{n \cdot (t_n - t_0)}$$

*Gleichung 5-14: Berechnung der Durchführungszeit und des Rezenzeffekts im RC Model*Power Integration Diffusion (PID)

SIKSTRÖM UND JABER [SJ02] stellen einige Einschränkungen, wie die Nicht-Beachtung der Gedächtnisgesetze von JOST [Jos97] im Recency Models fest. Darauf aufbauend entwickeln sie das Power-Integration-Diffusion-Modell. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei jeder Durchführung einer Operation eine Erinnerungsspur gebildet wird. Die Stärke der Spur nimmt als Potenzfunktion über die Zeit ab. Bei identischen Wiederholungen erfolgt die Summierung zu einer stärkeren Erinnerungsspur. Die Gleichung zur Prädiktion der zukünftigen Durchführungszeiten zum Zeitpunkt t_r ist wie folgt:

$$t_x = \frac{S'_0}{\sum_{i=1}^N (t_r \cdot t_{i.1})^{a'} - (t_r - t_{i.2})^{a'}} + t_A,$$

Gleichung 5-15: Berechnung der Durchführungszeit im PID

wobei $t_{i,1}$ die Startzeit und $t_{i,2}$ der Endzeitpunkt des i -ten Zyklus ist. Der Parameter t_A ist fest und zeigt, wie lange die Durchführungszeit für komplett trainierte Mitarbeiter ist. Die Beziehung von S'_0 und a' stimmen mit dem Lernkurven-Modell von WRIGHT überein.

Modified Learn-Forget Curve Model (MLFCM)

Experimentelle Ergebnisse von HEWITT ET AL. [HSY92] zeigen, dass die Annahme einer festen Zeit für das totale Vergessen, wie es das Learn-Forget Curve Model von JABER UND BONNEY vorschlägt, nicht richtig ist. Darauf aufbauend modifizieren JABER UND KHER [JK04] das Learn-Forget Curve Model so, dass die Zeit bis zum vollständigen Vergessen variabel modelliert wird. Die Vergessenskurve lautet demnach wie folgt:

$$\tilde{t}(n, i) = \beta_{0i} \cdot t_1 \cdot (u_i + n_i)^{-b} + \beta_{1i} \cdot d$$

Gleichung 5-16: Vergessenskurven-Modell im MLFCM

$\tilde{t}(n, i)$ ist die Durchführung zu Beginn (für die erste Wiederholung) des nächsten Zyklus. Der Faktor β_{1i} beschreibt die Steigung der Vergessensgeraden und d ist die Länge der Vergessensphase. Die Faktoren β_{0i} und β_{1i} sind folgendermaßen definiert:

$$\beta_{0i} = \left(1 + \frac{1}{u_i + n_i}\right)^{-b}$$

$$\beta_{1i} = t_1 \cdot (u_i + n_i - j)^{-b} - t_1 \cdot (u_i + n_i)^{-b}$$

Gleichung 5-17: Bestimmung der Faktoren β_{0i} und β_{1i} im MLFCM

Der Wert j gibt eine Zeitspanne an, in der eine Anzahl von j Durchführungen absolviert wird, während derer eine Einheit an Erfahrung vergessen wird. Der Wert ist abhängig von der jeweiligen Anwendung des Modells.

Alter

Im Gegensatz zum Lernen und Vergessen bestehen für den Einfluss des Alters auf die Leistungsfähigkeit der Mitarbeiter in der manuellen Montage keine etablierten mathematischen Modelle. Daher führten ABUBAKER & WANG [AW19b] 2019 eine Analyse über die Untersuchungsergebnisse der 17 arbeitswissenschaftlichen Studien durch. Darauf aufbauend entwickeln sie mithilfe einer Regression eine mathematische Modellierung der Fähigkeiten von Mitarbeitern in der Montage als Funktion des Alters. Das Ergebnis ist, dass das höchste Niveau der funktionalen Fähigkeiten der Mitarbeiter bis zu einem Alter von 38 Jahren erreicht ist und danach eine konstante Verlustrate (V_r) abhängig vom Alter

(k) stattfindet. Die verbleibenden Fähigkeiten (S_{rm}) sind die Differenz aus den Fähigkeiten mit 38 Jahren subtrahiert um den Verlust. Die resultierenden Gleichungen lauten wie folgt:

$$V_r = 0,57 + 0,012k$$

$$S_{rm} = S_{38} - V_r \cdot (k - 38)$$

Gleichung 5-19: Bestimmung der Verlustrate und der verbleibenden Fähigkeiten aufgrund des Alters nach ABUBAKER & WANG [AW19b]

Vorstudien [GRC21] zeigen das große Potenzial für die Anwendung im Kontext der Produktion des Modified learn-forget curve model (MLFCM) von JABER UND KHER [JKD03]. Deshalb stellt es die Basis für die nachfolgende mathematische Modellierung dar. Zur Beschreibung des Lerneffekts wird analog zum MLFCM das klassische Lernkurvenmodell von WRIGHT [Wri36] genutzt. Dieses wird wiederum um die Erkenntnisse von Plateau-Modellen (wie z. B. von ULLRICH [Ull95] für die Montageplanung vorgestellt) einer minimalen Montagezeit erweitert. Dies bedeutet, dass die Montagezeit gegen eine definierte Mindestausführungszeit läuft. Darüber hinaus wird das Modell um die Resultate von ABUBAKER UND WANG [AW19a] bezüglich altersbedingter Veränderung der Fähigkeiten erweitert. Um neben den Erfahrungen aus derselben Aufgabe auch ähnliche Aufgaben zu berücksichtigen, wird der Faktor *Übereinstimmung von Montagevorgängen* (siehe Unterkapitel 5.4) bei der Modellierung berücksichtigt. Hieraus ergibt sich die folgende Lernkurve:

$$t(n, i) = t_{\min} + \left((t(1, 1) - t_{\min}) \cdot \left(n + \sum_{x=1}^X \text{cor}_x \cdot u_{ip_j} \right) \right)^{-b} \cdot (1 - V_r \cdot (k - 38)),$$

Gleichung 5-20: Berechnung der Durchführungszeit im integrierten Modell zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Montage¹⁶

wobei $t(n, i)$ die Zeit zur Montage der n -ten Einheit im i -ten Zyklus, n die Anzahl der montierten Baugruppen, b der Lernexponent, $\text{cor}_x(S_x, S_y)$ die Übereinstimmung der Fähigkeit S_x von einer Montagestation mit den Fähigkeiten S_y von einer anderen Montagestation, u_{ip_j} die erinnerten Wiederholungen an den Montagestationen nach der Unterbrechung im i -ten Zyklus, V_r die Verlustrate und k das Alter sind. Die Vergessenskurve wird in ähnlicher Weise dargestellt:

$$\hat{t}(n, i) = \hat{t}(1, i) \cdot n^{f(i)},$$

Gleichung 5-21: Vergessenskurven-Modell im integrierten Modell zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Montage

¹⁶ Grau hinterlegte Gleichungen sind Erweiterung der mathematischen Modellierung im Rahmen der vorliegenden Dissertation.

wobei $\hat{t}(n, i)$ die Zeit für die n -te Einheit in der Vergessenskurve ist. n stellt die Anzahl der Einheiten dar, die ohne die Unterbrechung montiert worden wären. $f(i)$ ist die Vergessensrate des Zyklus i . Analog zum MLFCM wird die Beziehung zwischen Lernen und Vergessen durch die folgende Gleichung ausgedrückt:

$$f(i) = \frac{b \cdot (1 - b) \cdot \log(v_i)}{\log(1 + \frac{d_{\max}}{t(v_i)})},$$

Gleichung 5-22: Zusammenhang zwischen Lern- und Vergessensrate im integrierten Modell zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Montage

wobei $d_{\max}$ die Unterbrechungsdauer für das totale Vergessen beschreibt. v_i ist die Anzahl an Einheiten, die in der gesamten Zeit montiert worden wäre, wenn keine Unterbrechung stattgefunden hätte. $t(v_i)$ ist die benötigte Zeit zur Montage von v_i Einheiten unter Berücksichtigung der Lernkurve. Die erforderliche Zeit für die erste Einheit nach einer Unterbrechung berechnet sich in der Lernkurve mit der Gleichung:

$$t(1, i + 1) = t_1 \cdot \left(\sum_{x=1}^X cor_x \cdot u_{ip_j} + 1 \right)^{-b},$$

Gleichung 5-23: Berechnung der Durchführungszeit im integrierten Modell zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Montage in Zyklus $i+1$

Wie in Gleichung 5-23 steht u_{is_x} für die erinnerten Wiederholungen der Fähigkeit an Montagestation p_j Zyklus i . $\sum cor$ ist die Summe aller Übereinstimmungen der beeinflussenden Fähigkeiten. In der menschenzentrierten Montageplanung ist nicht nur die Zykluszeit, sondern auch die Fähigkeitsentwicklung entscheidend. Hierzu wird das Fähigkeitsniveau $S_{w_k}(n)$ eines Mitarbeiters w_k für ein Montagesystem nach der Montage von n -Einheiten als Wert im Intervall $[0,1]$ beschrieben durch die folgende Gleichung:

$$S_{w_k}(n) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J S_{w_k p_j}(n) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{t_{\min, p_j}}{t_{w_k p_j}(n, i)}$$

Gleichung 5-24: Berechnung des Fähigkeitsniveaus von Mitarbeitern im integrierten Modell zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Montage

J ist die Anzahl der unterschiedlichen Arbeitsplätze im Montagesystem (dies entspricht der Anzahl unterschiedlicher Montagevorgänge im Montagesystem). $t_{\min, p_j}$ beschreibt die Mindestausführungszeit, die am Arbeitsplatz p_j benötigt wird. $t_{w_k p_j}(n, i)$ ist die Zeit, die von einem Mitarbeiter w_k benötigt wird, um die n -te Einheit am Arbeitsplatz p_j zu erledigen. Die Bearbeitungszeit und der Fähigkeitswert der Mitarbeiter hängen sowohl von dem Lernexponenten als auch von den gewonnenen Erfahrungen ab.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl unterschiedlicher Modelle zur Repräsentation menschlicher Performanz in der Produktion. Auf Basis der ermittelten Humanfaktoren in Abschnitt 5.5.1 wurden bestehende Modelle verglichen und ein integriertes Modell aus den etablierten Modellen MLFCM, dem Modell von ULLRICH sowie dem Modell von ABUBAKER & WANG entwickelt. Weiterhin werden in dem Modell die Interdependenzen (vgl. Abschnitt 5.4) berücksichtigt.

5.6 Entscheidungsunterstützung zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung

Auf der Grundlage der beschriebenen Modellierung der Fähigkeiten und Montageoperationen erfolgt die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung der Mitarbeiter zu bestimmten Arbeitsplätzen. In der Literatur gibt es bereits eine große Menge unterschiedlicher Algorithmen für Zuordnungsprobleme. PENTICO [Pen07] sowie BURKARD ET AL. [BDM09] stellen umfangreiche Übersichten über bestehende Algorithmen vor. In Kooperation mit Wissenschaftlern vom Lehrstuhl für Diskrete Mathematik/Graphentheorie der Universität Paderborn wurden die vorgestellten Algorithmen hinsichtlich ihrer Anwendung für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung analysiert und diskutiert. Auswahlkriterien waren die Qualität der Ergebnisse, die einfache Implementierung und die Verständlichkeit für die Nutzer [GRC21a]. In A7 wird eine Übersicht über die genutzte Notation gegeben. Die Zuordnung wirkt sich auf die Gesamtleistung des cyber-physischen Montagesystems aus. Deshalb ist eine passend gewählte Aufgabenzuordnung von entscheidender Bedeutung. Die Zuweisung kann unter verschiedenen Gesichtspunkten erfolgen:

- **Die langfristige fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung** verfolgt das Ziel der Maximierung der Verbesserung der Fähigkeiten aller Mitarbeiter des Montagesystems.
- **Die kurzfristige zeitorientierte Aufgabenzuordnung** verfolgt das Ziel der Minimierung der Zykluszeit, um die geforderten Produkte zu montieren.

Zuerst entwickelten VOTAW & ORDEN [VO52] einen Algorithmus, der zwei Mengen $W = \{w_1, \dots, w_K\}$ und $P = \{p_1, \dots, p_J\}$ verwendet und die Kosten $c_{w_k p_j}$ für die Zuordnung von $w_k \in W$ zu $p_j \in P$ betrachtet. Das Ziel ist die Bestimmung der Zuordnung $x_{w_k p_j}$ für:

$$x_{w_k p_j} = \begin{cases} 1, & \text{wenn } w_k \text{ zu } p_j \text{ zugeordnet ist,} \\ 0, & \text{wenn } w_k \text{ nicht zu } p_j \text{ zugeordnet ist,} \end{cases} \text{ so dass}$$

$$p_j \in P, \sum_{k=1}^K x_{w_k p_j} = 1 \text{ gilt}$$

Gleichung 5-25: Grundsätzliche Zuordnung von zwei Mengen nach VOTAW & ORDEN

Und die Summe über alle zugeordneten Elemente

$$\sum_{k=1}^K \left(\sum_{j=1}^J c_{w_k p_j} \cdot x_{w_k p_j} \right)$$

Gleichung 5-26: Grundsätzliche Zielfunktion des Zuordnungsproblems nach VOTAW & ORDEN

wird entweder minimiert oder maximiert.

Für die **langfristige fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung** wurde dies wie folgt umgesetzt: Die Mengen W und P stellen die Menge der Mitarbeiter bzw. der Arbeitsplätze des Montagesystems dar. Die Kosten $c_{w_k p_j}$ definieren die Entwicklung der Fähigkeiten, die durch den Einsatz des Mitarbeiters w_k an dem Arbeitsplatz p_j für den i -ten Zyklus erreicht werden können. Das bedeutet $S_{w_k} = S_{w_k}(n) - S_{w_k}(t(1, i))$, wobei n_i die Anzahl der Wiederholungen im i -ten Zyklus ist, die die Mitarbeiter am Ende des Zyklus geleistet haben. Ziel ist die Maximierung der Entwicklung der Fähigkeiten der Mitarbeiter. Auf dieser Grundlage wird die etablierte Ungarische Methode [Kuh55] angewandt.

Für die **kurzfristige zeitorientierte Aufgabenzuordnung** wird eine andere Methode angewendet, die die Balancierung des Montagesystems fokussiert. Ziel ist es, die Zykluszeit bei einer gegebenen Anzahl von Arbeitsplätzen im Montagesystem zu minimieren. Deshalb werden die Mitarbeiter gezielt dort eingesetzt, wo sie bereits hohe Fähigkeiten und Erfahrung besitzen. Durch die Abhängigkeit zwischen den Arbeitsplätzen ist die Zeit abhängig von dem langsamsten Arbeitsplatz. Die Zykluszeit T_i ist die maximale Zeit über alle Mitarbeiter im Zyklus $T_{w_k p_j}$, wobei

$$T_{w_k p_j}(i) = \sum_{n=1}^N x_{w_k p_j} \cdot t_{w_k p_j}(n, i)$$

Gleichung 5-27: Berechnung der Zykluszeit eines manuellen Montagesystems für die kurzfristige zeitorientierte Aufgabenzuordnung

gilt. Das daraus resultierende Ziel ist es, $x_{w_k p_j}$ so zu bestimmen, dass die Zykluszeit $T_{w_k p_j}(i)$ minimiert wird. Zur Lösung wird der Algorithmus für das Engpasszuordnungsproblem von PUNDIR ET AL. [PPS+15] angewandt. Die wiederholte Anwendung desselben Algorithmus für aufeinanderfolgende Zyklen führt zu einer einheitlichen Zuweisung für jeden Zyklus. Das hat zur Folge, dass die Mitarbeiter keine Erfahrungen an den anderen Arbeitsstationen sammeln. Um dieses Szenario zu vermeiden, wird zudem eingeschränkt, dass die Mitarbeiter mindestens an 50 % der verschiedenen Arbeitsplätze im Montagesystem arbeiten müssen, bevor sie wieder am ersten Arbeitsplatz arbeiten dürfen. Das führt dazu, dass ein Wechsel der Montagestationen zwischen den Zyklen erfolgt.

Aufbauend auf der Modellierung, die in den Abschnitten 5.2 bis 5.7 beschrieben wird, wird in diesem Abschnitt eine Entscheidungsunterstützung für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung in einem manuellen Montagesystem konzipiert. Dabei werden zwei Koordinationsansätze mit unterschiedlichen Zielfunktionen und Lösungsalgorithmen verfolgt. Bei der langfristigen zeitorientierten Aufgabenzuordnung wird die Ungarische Methode und bei der kurzfristigen zeitorientierten Aufgabenzuordnung wird der Algorithmus für das Engpasszuordnungsproblem nach PUNDIR ET AL. genutzt.

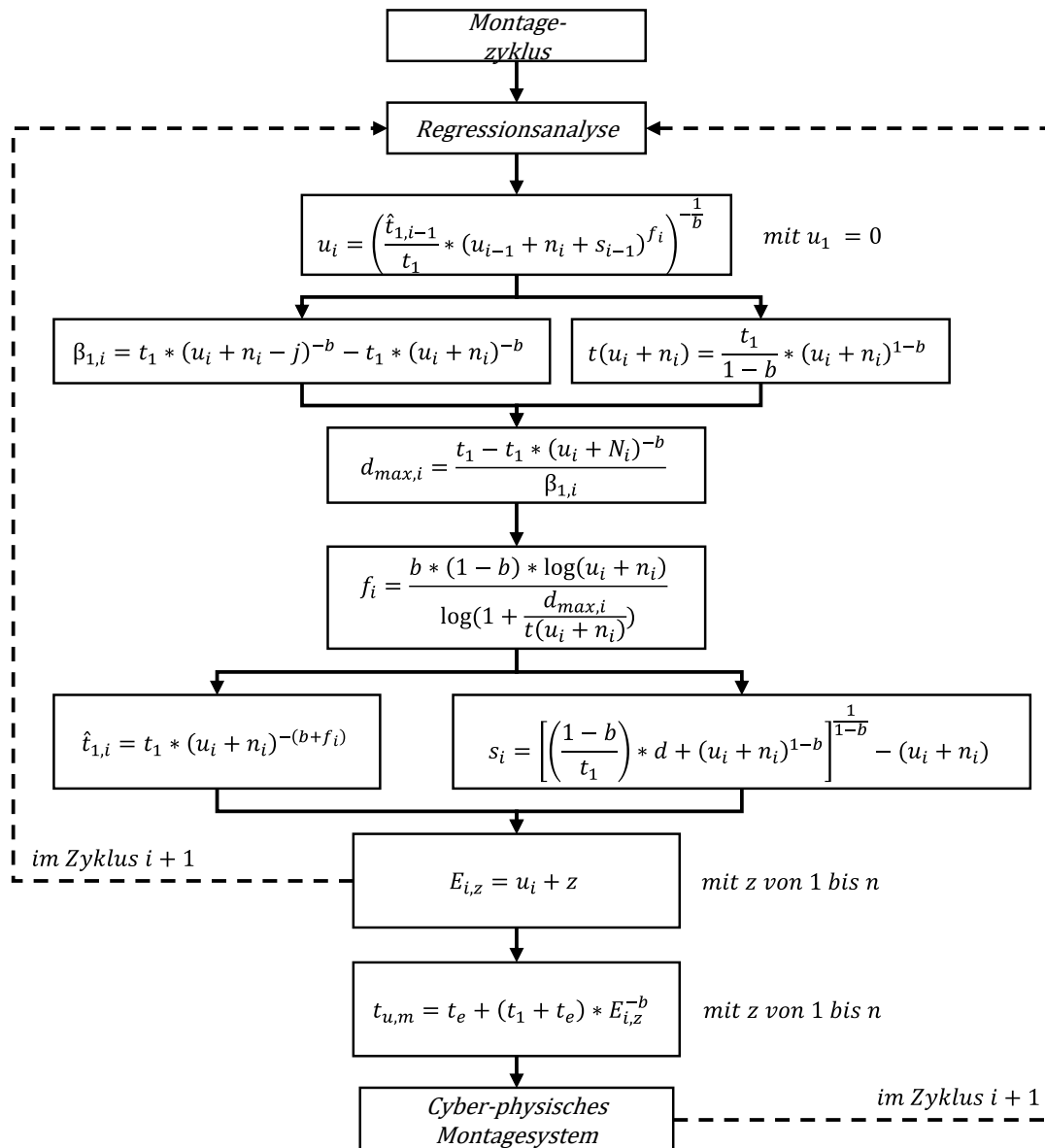
5.7 Integration von echtzeitnahen Daten

Bei der Durchführung der Montagezyklen ermöglicht der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien in cyber-physischen Montagesystemen die Erfassung und Verwaltung von Daten, um das Verständnis für die Mitarbeiter zu verbessern. Bei diesem Schritt erfolgen die Auswertung und Integration von echtzeitnahen Daten aus der Betriebsdatenerfassung. Hierzu wird eine verkürzte Form des Knowledge Discovery in Databases-Prozesses von FAYYAD ET AL. [FPS96] angewandt. Der Prozess umfasst die Schritte Selection, Data Mining und Interpretation/Evaluation. Aufgrund der technischen Umsetzung innerhalb einer Forschungsinfrastruktur werden die Daten für den spezifischen Anwendungsfall erfasst und ein Preprocessing sowie Transforming der Daten sind nicht notwendig. Die Verwendung des Ansatzes ermöglicht die Bestimmung digitaler Repräsentationen der Mitarbeiter zur adaptiven, individuellen Prognose von Fähigkeitsentwicklungen. Das selbstlernende System passt die Modellierung der Mitarbeiter bei der Entscheidungsunterstützung nach jedem Zyklus an.

Als Ausgangsbasis werden die Daten des cyber-physischen Montagesystems (*Selection*) verwendet. Die Daten, die die Assistenzsysteme an den Montagearbeitsplätzen erfassen, werden in einen gemeinsamen Datensatz zusammengeführt. Zur Analyse der Daten existieren unterschiedliche Methoden des *Data Minings*. Zur Vorhersage numerischer Werte eignen sich spezielle Regressionsanalysen. Bei Regressionsverfahren wird die funktionale Beziehung zwischen abhängiger und unabhängiger Variablen mithilfe eines Regressors ausgedrückt [EKD02]. Hierbei gibt es wiederum eine Vielzahl von Methoden, wie Lineare Regression, Lasso Regression, Ridge Regression, K-nächste-Nachbarn-Regression, Klassifikationsbäume, Regressionsbäume und künstliche neuronale Netze. Bei der *linearen Regression* wird die Beziehung zwischen statistischen Variablen quantifiziert. Hierbei wird der Regressand mit einem Regressor durch einen formelmäßigen Zusammenhang spezifiziert und mithilfe einer Regressionsgeraden ermittelt [EKD02]. Die lineare Regression wird wegen der einfachen Verständlichkeit oftmals als Benchmark für andere Methoden genutzt. Mit der Methode der kleinsten Quadrate werden die Parameter der Geradengleichung bestimmt. Dabei wird der quadrierte Fehler der Einzelabweichungen zur Regressionsgeraden minimiert [EKD02]. Die *Lasso Regression* (oder auch L1-Regularisierung) und *Ridge Regression* (oder auch L2-Regularisierung) ähneln dieser Methode, jedoch wird die Formel der Geradengleichung um eine Regularisierung erwei-

tert. Die Idee hierbei ist, dass eine künstliche Ungenauigkeit in die Regression eingebunden wird, mit dem Ziel, eine Überanpassung des Modells an die gegebenen Daten zu verhindern [Gru09]. Der *K-nächste-Nachbarn-Regressor* beruht auf der Distanzmetrik und der Annahme, dass nahe aneinander liegende Punkte ähnlich sind. Zur Bestimmung der Prognose wird eine durch eine Abstandsbestimmung festgelegte Menge an Nachbarn in die Betrachtung miteinbezogen. Weiter weg liegende Punkte werden bewusst aus der Betrachtung ausgeschlossen. Der Algorithmus zeigt besonders gute Ergebnisse in niedrigdimensionalen Räumen [Gru09]. *Klassifikations- und Regressionsbäume* sind modellbasierte Methoden, die auf Basis der Inputdaten Regeln aufstellen und Klassenlabels vergeben [Hud20]. Weitere Möglichkeiten zur Regressionsanalyse bieten künstlich neuronale Netze. In einer oder mehreren Schichten sind Neuronen angeordnet, wobei die Eingangssignale in Abhängigkeit von einer Aktivierungsfunktion in Ausgangssignale überführt werden. Je nach Ausgestaltung des neuronalen Netzes kann der Aufbau der Schichten und Neuronen variieren. Künstlich neuronale Netze gehören aufgrund der großen Anzahl an beeinflussbaren Parametern zu den komplexesten Regressionsalgorithmen [DM21]. Aufgrund der einfachen Anwendungen, der Verständlichkeit sowie der guten Resultate wird die Methode der kleinsten Quadrate als lineare Regressionsanalyse ausgewählt. Liegen Zeitdaten der vorherigen Montagezyklen vor, werden die Parameter $t(1,1)$ und b des Prognosemodells auf Basis der historischen Daten individuell für den Mitarbeiter berechnet. Unter Berücksichtigung der Pausenlänge werden die erinnerten Wiederholungen $u_{i w_k p_j}$ für den zukünftigen Zyklus bestimmt. Dies wiederum dient zur Bestimmung des totalen Vergessens jedes Mitarbeiters w_k an jeder Montagestation p_j , was mit $d_{w_k p_j, max}$ beschrieben wird. Mithilfe des Zusammenhangs zwischen Vergessensexponenten und Lernexponenten können darauf aufbauend die Vergessenskurven- und Lernkurven-Modelle der Mitarbeiter individuell adaptiert werden. Der genaue Prozess der Berechnung der adaptierten Modelle durch die Integration von Echtzeitdaten wird in Bild 5-12 dargestellt. Daraus ergeben sich digitale Zwillinge der Mitarbeiter. Diese beinhalten den digitalen Schatten der Mitarbeiter an der Montagestation sowie individuelle Prognosemodelle der Fähigkeitsentwicklung. Die digitalen Zwillinge der Mitarbeiter werden in nachfolgenden Zyklen genutzt, um die Prognose der Fähigkeitsentwicklung und daraus resultierend die Aufgabenzuordnung zu verbessern. Montagezeiten der Mitarbeiter werden im realen cyber-physischen Montagesystem durch die Verwendung von digitalen Assistenzsystemen aufgenommen. Anschließend erfolgt durch die Verwendung der Regressionsanalyse „Methode der kleinsten Quadrate“ die Adaption und Individualisierung der Prognosemodelle der Fähigkeitsentwicklung der Mitarbeiter.

Mithilfe des Knowledge Discovery in Databases-Prozesses von FAYYAD ET AL. werden echtzeitnahen Daten des cyber-physischen Montagesystems in die Prognose integriert. Das Data Mining erfolgt mittels der „Methode der kleinsten Quadrate“ eine Regressionsanalyse durchgeführt. Daraus ergeben sich digitale Zwillinge der Mitarbeiter. Die digitalen Zwillinge der Mitarbeiter werden für eine bessere Prognose in den nachfolgenden Zyklen genutzt.

**Legende**

b_i = Lernrate im i-ten Zyklus	$d_{max,i}$ = Unterbrechungsdauer des totalen Vergessens im i-ten Zyklus	$E_{i,z}$ = Erfahrungen nach dem nächsten Zyklus	f_i = Vergessensrate im i-ten Zyklus
i = Zykluszahl	j = Einheit für die minimale Unterbrechung beim Vergessen	n_i = Anzahl der Einheit in i-ten Zyklus	s_{i-1} = Anzahl an Einheiten, die ohne Unterbrechung produziert werden
$t(u_i + n_i)$ = benötigte Zeit zur Montage von u_i und n_i	t_1 = Zeit für die erste Einheit in der Lernkurve	$\hat{t}_{1,i}$ = Zeit für die erste Einheit in der Vergessenskurve im i-ten Zyklus	t_e = Mindestausführungszeit
$t_{u,m}$ = prognostizierte Dauer für nächsten Zyklus	u_i = Erinnernte Wiederholungen	z = Einheiten im nächsten Zyklus	$\beta_{1,i}$ = Faktor des totalen Vergessens

Bild 5-12: Integration von Echtzeitdaten in die Prognosemodelle¹⁷

¹⁷ Das Prozessmodell zur Integration von Echtzeitdaten erfolgt aufbauend auf der Studienarbeit von Paul Wied [Wie21].

In Bild 5-13 ist eine abschließende detaillierte zusammenfassende Darstellung der entwickelten Methodikelemente visualisiert.

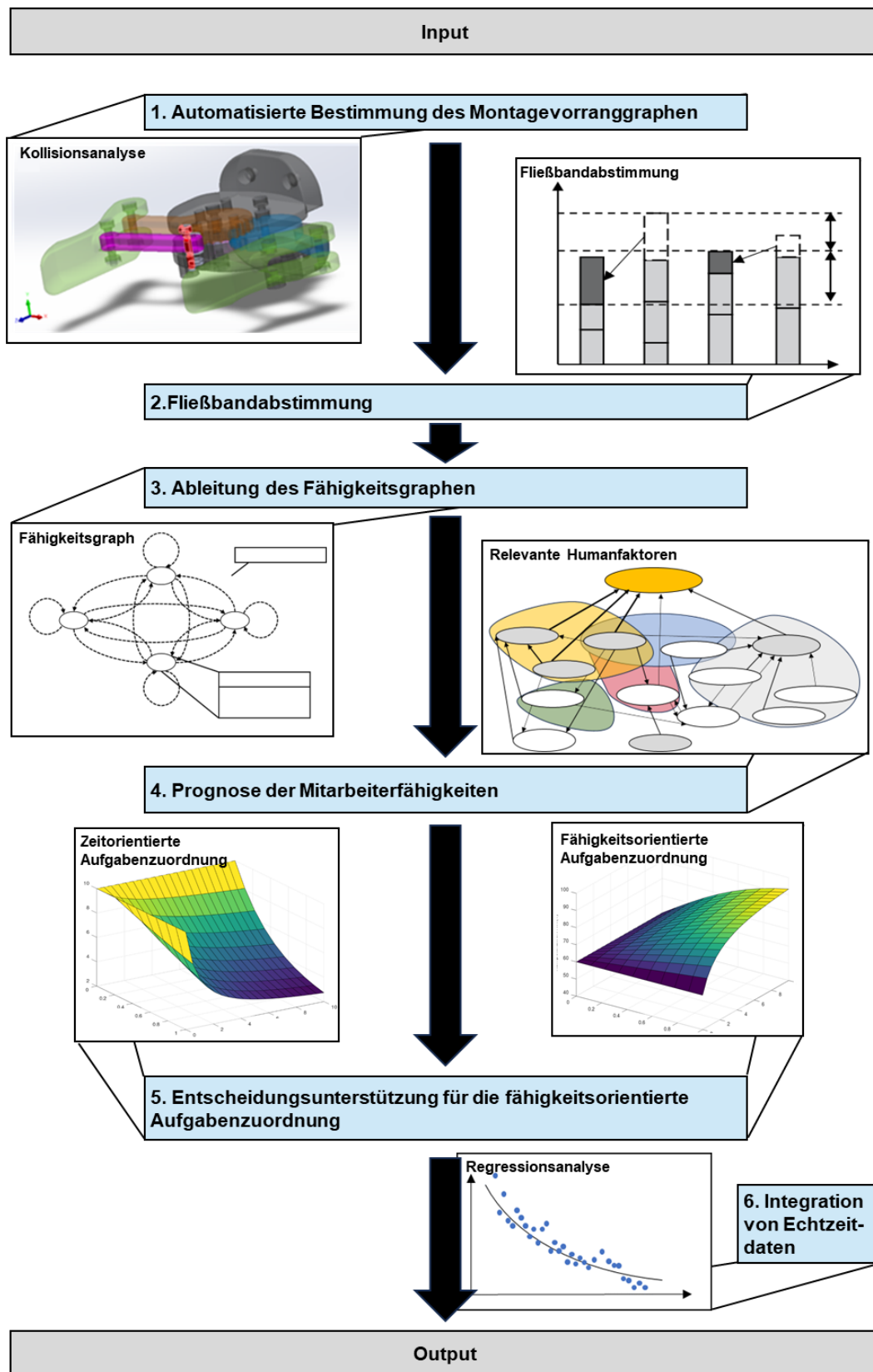


Bild 5-13 Zusammenfassende Darstellung der entwickelten Methodikelemente

6 Implementierung in der Laborumgebung

Zur Validierung und Überprüfung der Realisierbarkeit wird die entwickelte Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung prototypisch implementiert. Die Implementierung umfasst sowohl die technische Umsetzung der Methodik als Software-Prototyp (siehe Abschnitt 6.1) als auch die Integration in ein cyber-physisches Montagesystem (siehe Abschnitt 6.2). Das cyber-physische Montagesystem wird im Smart Automation Laboratory realisiert. Das Smart Automation Laboratory ist Teil der Forschungsumgebung des Lehrstuhls für Produktentstehung im Heinz Nixdorf Institut zur Untersuchung der Produktionssysteme der Zukunft [GHR22a].

6.1 Software-Werkzeug

Um die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung industriell anwendbar zu machen, erfolgt eine Umsetzung in einem Software-Werkzeug. Dieses umfasst alle angewendeten Methoden und verwendeten Modelle in einem nutzerfreundlichen Interface. Die einzelnen Methoden der Methodik werden mit unterschiedlichen Software-Programmen umgesetzt: *Dassault Systèmes SolidWorks*, *MathWorks Matlab* und *Microsoft Excel*. In Bild 6-1 wird der Aufbau des Software-Werkzeugs in einem Internal Block Diagram (IBD) dargestellt. Der Großteil der Methodik wird im Software-Programm *MathWorks Matlab* umgesetzt. *Microsoft Excel* dient vornehmlich zur Datenspeicherung und -bereitstellung. Zur Verarbeitung der CAD-Modelle wird das CAD-Programm *Dassault Systèmes SolidWorks* verwendet. Diese Programme wurden aufgrund ihrer Verfügbarkeit am Smart Automation Laboratory des Lehrstuhls ausgewählt. Zudem handelt es sich um weit verbreitete Software-Programme mit einer Marktdurchdringung im Maschinen- und Anlagenbau. Nachfolgend wird die softwaretechnische Umsetzung anhand der Reihenfolge der Methoden beschrieben.

Für die **automatisierte Bestimmung des Montagevorranggraphen** werden in der Software *Dassault Systèmes SolidWorks* und ihrem Application Programming Interface¹⁸ (API) die drei Makros *DataExtraction*, *BoundingBox* und *CollisionAnalysis* implementiert. Die Makros enthalten die entsprechenden Aufrufe an die API-Funktionen und sind mit Visual Basic for Applications (VBA) programmiert worden. Die Makros enthalten die entsprechenden Aufrufe an die API-Funktionen und sind mit Visual Basic for Applications (VBA) programmiert worden. Die automatisierte Bestimmung des Vorranggraphen basiert, wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, auf einer Kollisionsanalyse. Mit dem Makro *DataExtraction* werden zunächst alle Bauteile, deren Verknüpfungen und weitere Informationen in einer txt-Datei erfasst. Die Kollisionsanalyse besteht aus drei Haupt-

¹⁸ Das API ist eine COM-Programmierschnittstelle für SolidWorks und erlaubt direkten Zugriff auf die Funktionalitäten der Software.

konzepten: Bestimmung der Bewegungsrichtung, Definition der Schrittweite und Entwicklung der Transformations- und Positionsmatrix. Die Bewegungsrichtung wird durch definierte Entscheidungsregeln bestimmt. Zum Beispiel stellt bei einer Rotationsfläche die Symmetrieachse eine mögliche Bewegungsrichtung dar. Die Schrittweite wird mit dem Makro „BoundingBox“ bestimmt. Dazu wird ein Quader mit der minimalen Breite aller Bauteile verwendet. Dies geschieht, um z. B. bei der Interferenzprüfung keine Einzelteile, wie Unterlegscheiben, zu überspringen. Das Makro „BoundingBox“ wird zudem auf das gesamte Produkt angewendet, um bei der Kollisionsanalyse die Endposition der Bewegungen zu bestimmen. Anschließend werden mit dem Makro „CollisionAnalysis“ die Bauteile automatisch in den angegebenen Bewegungsrichtungen mit der definierten Schrittweite bewegt und eine Interferenzprüfung durchgeführt. Das Ergebnis der Analyse sind die Prioritätsbeziehungen der Bauteile in Abhängigkeit von den Bewegungsrichtungen. Ausgehend von der definierten Ausgangskomponente werden nun alle möglichen Bauteile (keine Interferenz in einer Richtung) vorgeschlagen. Die Kollisionsanalyse wird dann Schritt für Schritt durchgeführt, um den Montagevorranggraphen zu erhalten. Das Ergebnis stellt den Montagevorranggraphen dar. Dieser wird in einer Matrix in einer csv-Datei festgehalten und an Microsoft Excel weitergegeben. Hier wird er sowohl graphisch als auch in einer Matrix dargestellt.

Die **Fließbandabstimmung** baut auf dem Montagevorranggraphen auf und wurde in dem Software-Programm *Mathworks Matlab* umgesetzt. Neben dem Montagevorranggraphen werden weitere Nutzereingaben benötigt (siehe Abschnitt 5-3). Hierzu wurde ein Graphical User Interface sowie eine Schnittstelle zu einer csv-Datei implementiert. Zur Fließbandabstimmung wurde der Salome-2 in *Mathworks Matlab* implementiert.

Die **Ableitung des Fähigkeitsgraphen** erfolgt komplett im Software-Programm *Microsoft Excel*. Mithilfe der VBA-Programmierung wird der Fähigkeitsgraph durch Vergleich mit den vorbereiteten Daten ermittelt. Die Arbeitsmappe *Fähigkeitsgraph* besteht aus vier Tabellenblättern. Tabellenblatt *Eingabe* dient zur Eingabe für Nutzer. Die anderen drei Tabellenblätter dienen als Referenz für die drei Dimensionen. Im Tabellenblatt *MTM* erfolgt die Referenz auf die MTM-Codes sowie die Berechnung der Levenshtein-Distanz in einer Matrixstruktur. In den Zeilen und Spalten werden die MTM-Codes gegenübergestellt. Die Zellen umfassen die berechneten Levenshtein-Distanzen. Im Tabellenblatt *Fügetechnologie* erfolgt die tabellarische Umsetzung des verwendeten Ansatzes von WU & PALMER in einer Matrix. In den Zeilen und Spalten werden die Fügetechnologien verglichen. Die Zellen umfassen die berechneten Ähnlichkeiten nach WU&PALMER. Mit dem Tabellenblatt *Werkzeug* wird die Ähnlichkeit nach TVERSKY bestimmt. In den Zeilen und Spalten werden die Werkzeuge gegenübergestellt. Die Zellen umfassen die berechneten Ähnlichkeiten nach TVERSKY.

Die Implementierung der **Prognose der Mitarbeiterfähigkeiten** erfolgt in den Software-Programmen *Mathworks Matlab* sowie *Microsoft Excel*. In *Mathworks Matlab* erfolgt die mathematische Beschreibung des entwickelten modifizierten Lern-Vergessenskurven

Modells. Dieses besteht grundsätzlich aus den drei Modulen Vorerfahrungen, Lern-Prognose und Vergessen. Im Modul *Vorerfahrungen* werden zunächst die Vorerfahrungen der Mitarbeiter bestimmt. Dies basiert auf Basis der Ausprägungen der Humanfaktoren der Mitarbeiter. Innerhalb des ersten Zyklus werden diese Daten aus der Excel-Arbeitsmappe „Mitarbeiterliste“ gezogen. In nachfolgenden Zyklen werden die gewonnenen sowie verlorenen Erfahrungen in die Bestimmung einbezogen (siehe Gleichung 5-23). Im Modul *Lern-Prognose* werden auf Basis der Eingaben individuelle Lern-Prognosen der Mitarbeiter bestimmt. Dies geschieht über die Lernkurve in Gleichung 5-20. Im Modul *Vergessen* wird die Phase des Vergessens für die Mitarbeiter je Station prognostiziert. Dies erfolgt mit der Gleichung 5-22. Nach einem Zyklus wird ein neues Microsoft-Excel-Tabellenblatt erzeugt mit z. B. dem Namen „Mitarbeiterliste_zyklus1“. Diese umfasst die aktualisierten Ausprägungen der Humanfaktoren der Mitarbeiter.

Die Implementierung der **Entscheidungsunterstützung für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung** erfolgt im Software-Programm *Mathworks Matlab*. Das Modul berechnet die optimale Aufgabenzuordnung der Mitarbeiter auf Basis der Nutzereingabe sowie Prognosen der Fähigkeitsentwicklung. Die Implementierung besteht aus den drei Modulen: Datenvorbereitung, kurzfristig zeitorientierte Optimierung und langfristig fähigkeitsorientierte Optimierung. Das Modul Datenvorbereitung dient zur Vorbereitung der Daten für die Optimierungsalgorithmen. Nutzereingaben, z. B. die zu montierende Stückzahl, werden mit den Prognosen in Verbindung gesetzt. Ergebnis ist eine Matrix, die die individuellen Prognosen der Montagezeiten je Mitarbeiter und je Montagestation umfasst. Die Implementierung der Optimierungsalgorithmen geschieht wie im Pseudo-Code im Anhang A5 dargestellt. Für eine simulative Überprüfung hat der Nutzer die Möglichkeit, sich die prognostizierten Daten für jede Ausführung über einen xlsx-Export ausgeben zu lassen.

Die **Integration von Echtzeitdaten** erfolgt in den Software-Programmen *Mathworks Matlab* sowie Microsoft Excel. Eingangsdaten sind die Montagezeiten pro Mitarbeiter und Montagestation, welche im cyber-physischen Montagesystem durch digitale Assistenzsysteme erfasst und an den Leitrechner gesendet werden. Die Daten liegen in einem gemeinsamen Logbuch vor. Die Durchführung der Regressionsanalyse wurde mithilfe eines Matlab-Skripts unter Verwendung der *fit*-Funktion umgesetzt. Dadurch werden die Parameter für den nachfolgenden Zyklus aktualisiert. Die Ausführung durch den Nutzer führt zur Aktualisierung des Microsoft-Excel-Tabellenblattes „Mitarbeiterliste“ des Zyklus.

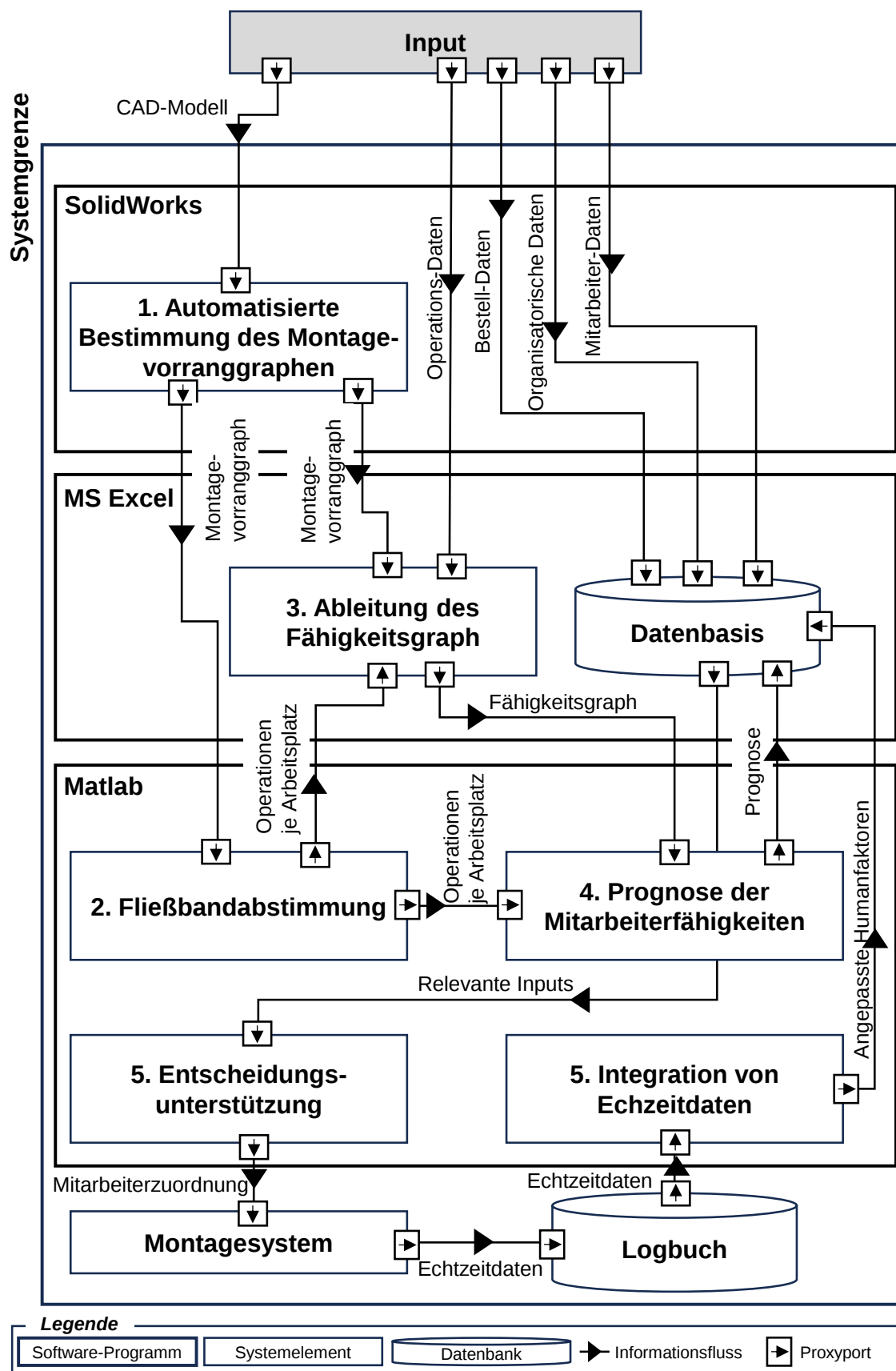


Bild 6-1: Internal Block Diagramm des entwickelten Prototyps

6.2 Umsetzung im Smart Automation Laboratory

Zur Prüfung der Realisierbarkeit sowie Analyse des Potenzials der Methodik erfolgt die technische Umsetzung. Hierzu wird ein reales Montage-Szenario innerhalb der Forschungsinfrastruktur des Lehrstuhls für Produktentstehung im Heinz Nixdorf Instituts technisch umgesetzt. Neben den bereits beschriebenen Software-Programmen wird zusätzlich das Programm *IBM Node-RED* sowie das Kommunikationsprotokolls Open Platform Communication Unified Architecture (OPC UA) genutzt. Das aufgebaute cyber-physische Montagesystem besteht aus Montagestationen, einer drahtlosen Datenkommunikation sowie einem Leitsystem mit dem entwickelten Software-Werkzeug. Eine systematische Darstellung des Aufbaus im Smart Automation Laboratory wird in Bild 6-2 gezeigt. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung der drei Elemente:

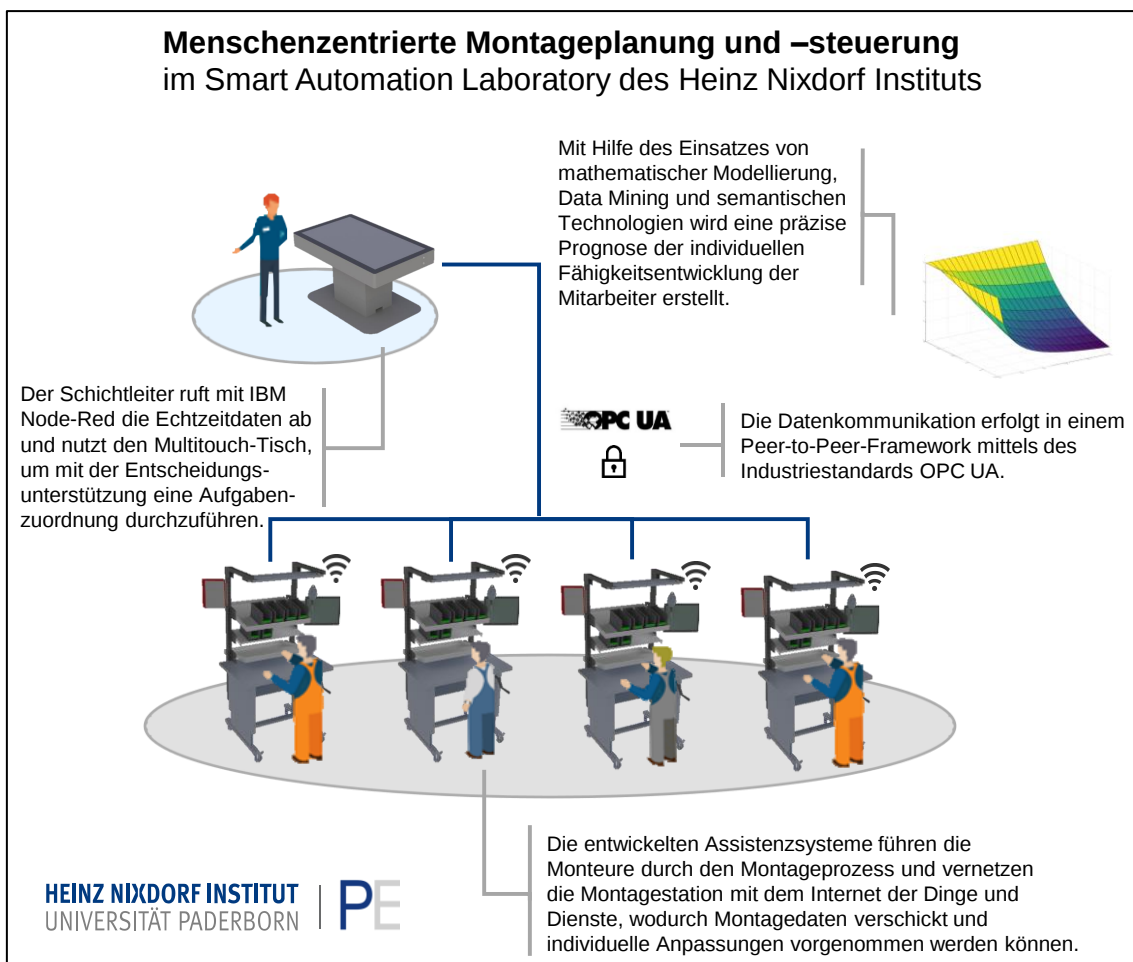


Bild 6-2 Systematische Darstellung des Aufbaus der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung im Smart Automation Laboratory des Heinz Nixdorf Instituts

Elementare Elemente des cyber-physische Montagesystems sind die einzelnen **Montagestationen**. Die Montagestationen besitzen eine höhenverstellbare Arbeitsfläche für ergonomisches Arbeiten sowie die notwendigen Bauteile und Baugruppen in entsprechend

markierten Greifschalen in Griffweite in ausreichender Anzahl. Das notwendige Montagewerkzeug befindet sich wiederum am Arbeitsplatz. Die Montagestationen werden mit einem selbst entwickelten Montage-Assistenzsystem erweitert. Das Assistenzsystem, bestehend aus einem Bildschirm und einem Raspberry Pi, führt die Monteure durch den entsprechenden Montageprozess. Hierzu wurde eine geeignete Montageanleitung entwickelt (siehe A9.4). Die Steuerung erfolgt mithilfe eines Fußtasters (siehe Bild 6-3a). Neben der Ausgabe der Montageinstruktionen nimmt das Assistenzsystem Daten von den Probanden auf. Dies umfasst neben der Mitarbeiter-ID speziell die Zeiten je Montageschritt.

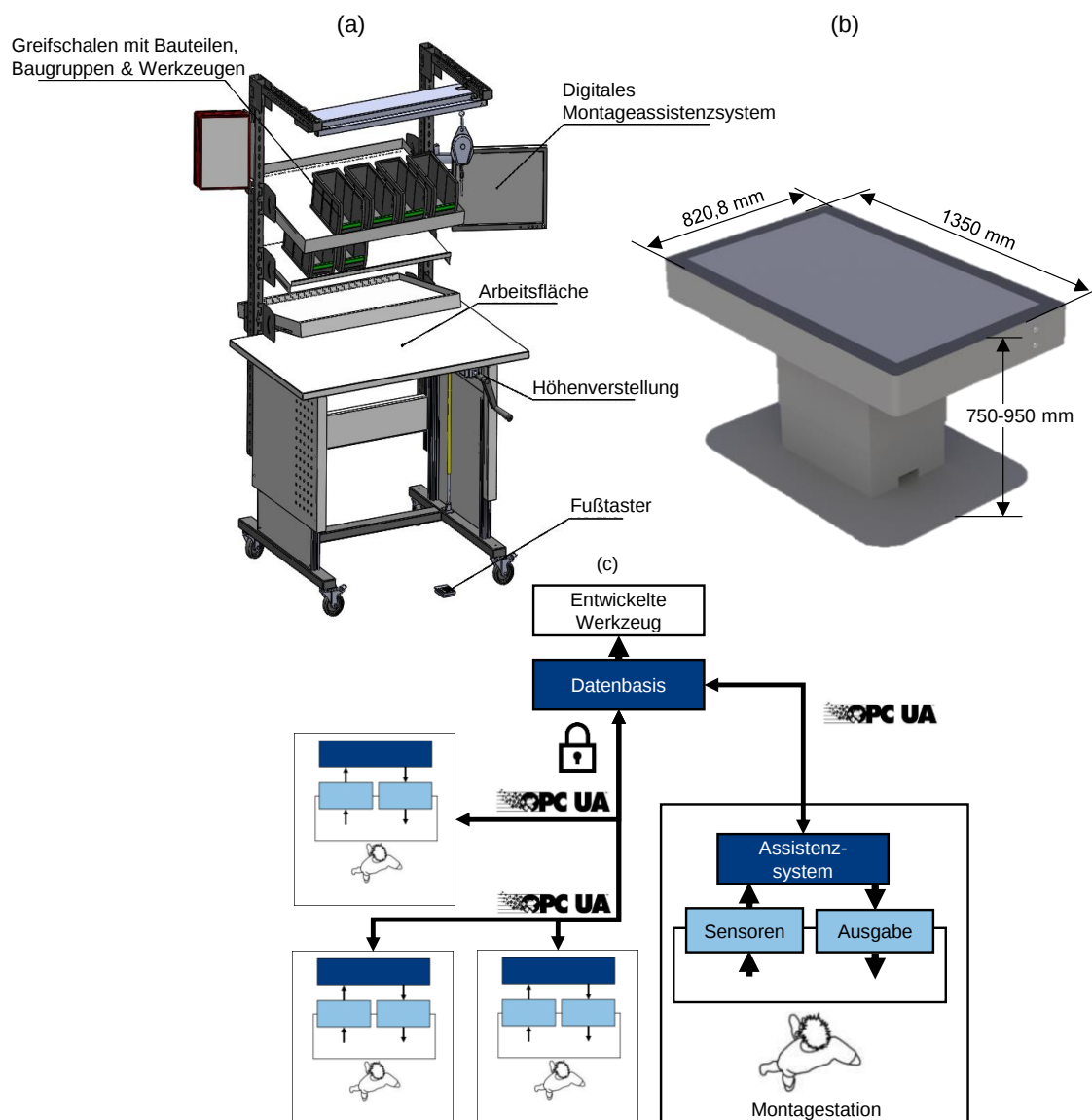


Bild 6-3: (a) Montagestation des cyber-physischen Montagesystems des Smart Automation Laboratory; (b) Multitouch-Tisch als Leitsystem des cyber-physischen Montagesystems; (c) Datenkommunikation innerhalb des cyber-physischen Montagesystems

Für die **Datenkommunikation** wird innerhalb des Labornetzwerks „Labor-PE_5G“ ein Peer-to-Peer-Framework mithilfe des Kommunikationsprotokolls OPC UA aufgebaut. Der Industriestandard OPC UA transportiert Daten über Firewall-freundliche Web-Services (SOAP/HTTP) oder über optimierte TCP/IP-basierte Protokolle. Dies ermöglicht, Daten interoperabel und plattformunabhängig von Sensoren bis hin zu MES, ERP-Systemen sowie Cloud-Anwendungen zu übermitteln. OPC UA verwendet grundlegend die Client-Server-Architektur. Anwendungen, die Informationen an andere Anwendungen transferieren, werden als UA Server gekennzeichnet. UA Clients nutzen diese Daten und werten sie aus. Das Assistenzsystem einer Montagestation stellt einen OPC-UA-Server dar. Die an einer Montagestation aufgenommenen Daten werden in einer CSV-Datei gespeichert und mithilfe des OPC UA von dem übergeordneten Leitsystem abgerufen (siehe Bild 6-3c).

Das **Leitsystem** des cyber-physischen Montagesystems stellt den OPC-UA-Client dar. Am Leitsystem können nach einem Montagezyklus die Daten der einzelnen Stationen abgerufen werden. Der Abruf der Daten erfolgt über das Programm IBM Node-Red. Nach dem Empfang der Daten der einzelnen Montagestationen werden die Daten mit IBM Node-Red in ein gemeinsames Logbuch überführt. Dieses Logbuch ist wiederum eine csv-Datei und enthält die Spalten *Mitarbeiter-ID*, *Montagestation*, *Montageschritt*, *Bearbeitungszeit*. Anschließend erfolgt die Durchführung der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung am Multitouch-Tisch (siehe Bild 6-3b).

6.3 Beispielhafte Anwendung der Methodik

Zum einfacheren und besseren Verständnis der Anwendung der Methodik wird ein beispielhafter Durchlauf im Smart Automation Laboratory vorgestellt. Die entwickelte Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung wird in sechs Schritten angewendet, die sich analog zur Arbeitsvorbereitung in Planungs- sowie Steuerungskomponenten gliedern. Die **Planung des Montagesystems** erfolgt einmalig für ein Produkt:

Im ersten Schritt öffnet der Montageplaner das CAD-Modell des zu montierenden Produkts in *Dassault Systèmes SolidWorks* und führt die drei Makros „DataExtraction“, „BoundingBox“ und „CollisionAnalysis“ nacheinander aus. Die Durchführung der Kollisionsanalyse wird dem Montageplaner durchgehend visualisiert, sodass gegebenenfalls Änderungen vorgenommen werden können. Das System gibt nach der Durchführung der Kollisionsanalyse eine csv-Datei mit dem Montagevorranggraphen aus. Dieser wird in Microsoft Excel in einer Matrix sowie als Graph visualisiert. Die Fließbandabstimmung baut auf dem Montagevorranggraphen sowie weiteren Eingaben des Montageplaners auf und erfolgt in dem Software-Programm *MathWorks Matlab*. Der Montageplaner gibt die MTM-Codes, die Anzahl der Montagestationen sowie das Optimierungsziel des SALBP

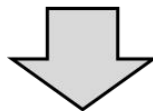
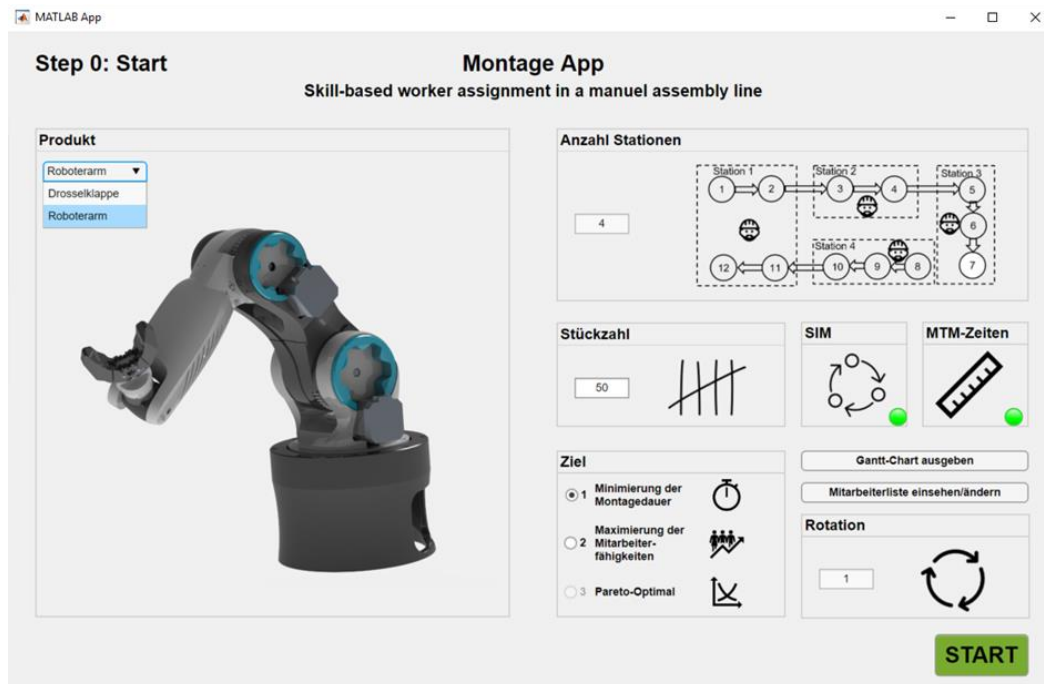
in einem Graphical User Interface (GUI) an. Das System gibt dem Montageplaner zunächst Rückmeldung, ob alle benötigten Informationen vorhanden sind. Anschließend wird Salome-2 automatisch ausgeführt. Das Ergebnis des Schritts ist die Definition der Arbeitsplätze mit den dazugehörigen Aufgaben. Im dritten Schritt gibt der Montageplaner in Microsoft Excel die Fügetechnologie sowie die Werkzeuge der definierten Montagestationen an. In Tabellenblatt *Eingabe* gibt der Montageplaner die Daten ein. Durch Relation zu den anderen Tabellenblättern werden Ausfüllmöglichkeiten vorgegeben. Nachdem alle Felder ausgefüllt sind, kann der Montageplaner durch Ausführung der VBA-Programmierung sich den Fähigkeitsgraphen ausgeben und visualisieren.

Mit diesen Schritten schließen die Planungsschritte der Methodik ab. Die nachfolgenden Schritte der **Steuerung des Montagesystems** werden bei jedem Zyklus auftragsbezogen durchgeführt. Zur Umsetzung eines cyber-physischen Montagesystems im Smart Automation Laboratory muss sichergestellt werden, dass die Randbedingungen der Datenkommunikation initialisiert sind. Dies umfasst speziell das Peer-to-Peer-Framework im Netzwerk.

Zunächst öffnet der Schichtleiter die Montage-App in *MathWorks Matlab*. Der Ausgangsbildschirm ist in Bild 6-4a dargestellt. Hier können Eingaben zu dem zu montierenden Produkt, Anzahl an Stationen, Anzahl an montierenden Einheiten erfolgen sowie der Koordinationsansatz ausgewählt werden.

Weiterhin hat der Schichtleiter die Möglichkeit, sich hier die Ergebnisse der Planungsschritte anzeigen zu lassen. Im nächsten Schritt (Bild 6-4b) gibt der Montageplaner die verfügbaren Monteure an und startet die Aufgabenzuordnung. Auf Basis der Eingaben wird eine Prognose der Fähigkeitsentwicklung der Mitarbeiter bestimmt und automatisch eine fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung berechnet und dem Schichtleiter vorgeschlagen (siehe Bild 6-5c). Weiterhin wird die Zuordnung des vorherigen Zyklus visualisiert (mit Ausnahme des ersten Zyklus). Es können zudem manuelle Änderungen vorgenommen werden. Zur simulativen Absicherung können die Ergebnisse auch als Export im xlsx-Format für Siemens Plant Simulation ausgegeben werden. Anschließend erfolgt der Montagezyklus. Der Schichtleiter weist die Monteure den Montagestationen zu. Die Mitarbeiter melden sich an den digitalen Assistenzsystemen an und nutzen diese zur Unterstützung. Nach Abschluss des Zyklus fragt der Schichtleiter die Daten der Montagestationen an (siehe A8.1) und überführt diese in einem gemeinsamen Logbuch zusammen. Vor dem nächsten Zyklus führt der Schichtleiter durch die Auswahl des Logbuchs (siehe Bild 6-5d) die Regressionsanalyse durch. Dies aktualisiert die Mitarbeiterliste. Weiterhin gibt der Schichtleiter die Pausenzeit an. Zur Unterstützung visualisiert das Software-Werkzeug die Prognose der Fähigkeitsentwicklung über Lern-Vergessenskurven. Anschließend kann der Schichtleiter die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung erneut in gleicher Weise durchführen.

(a) Start der Montage App mit der Auswahlmöglichkeit des Produkts, der Anzahl der Stationen und Stückzahl sowie des Koordinationsansatzes



(b) Input mit der Auswahlmöglichkeit der Mitarbeiter sowie der Definition der Pausenlänge (erst relevant ab Rotation > 1)

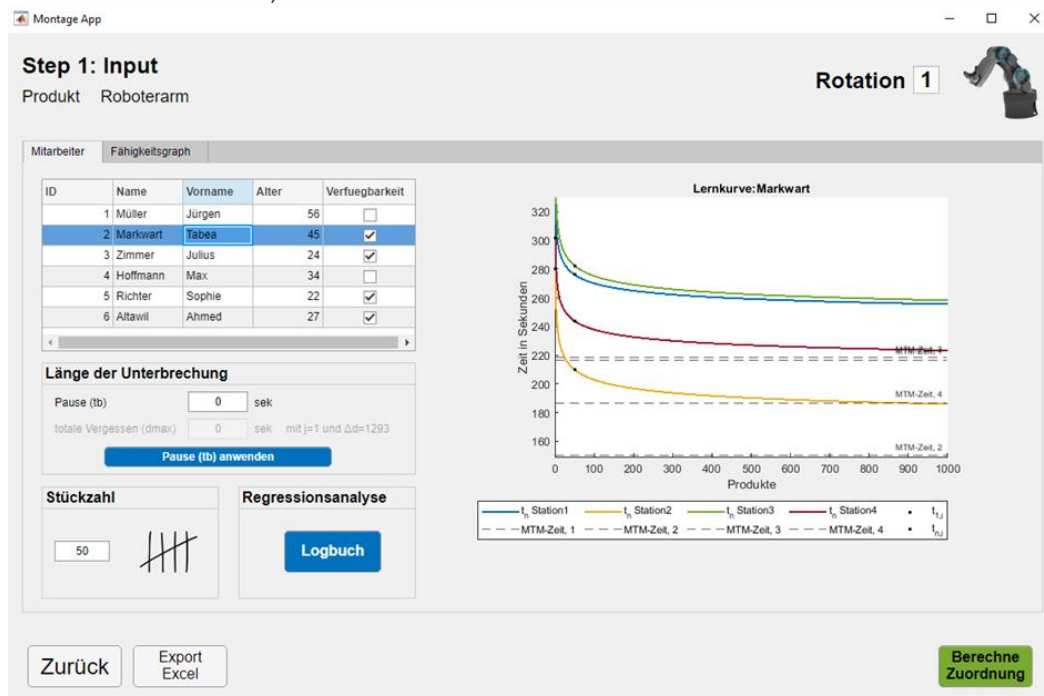
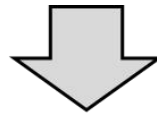
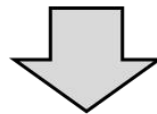
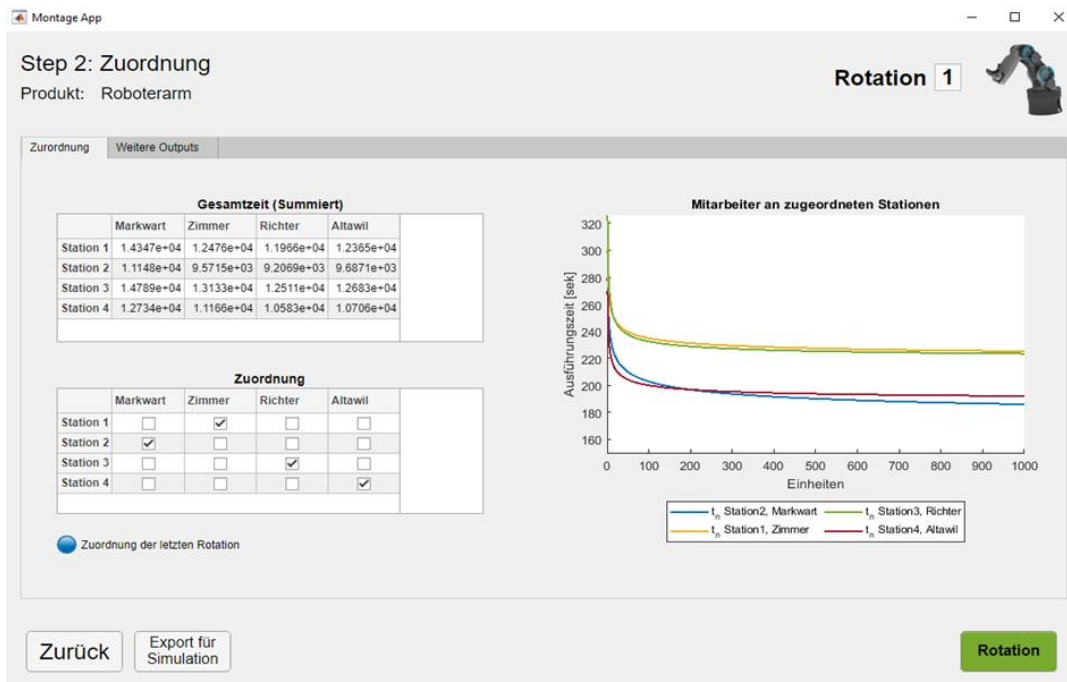


Bild 6-4: GUI der Matlab-App für die fähigkeitsorientierte Mitarbeiterzuordnung in einem manuellen cyber-physischen Montagesystem: (a) Step 0: Start; (b) Step 1: Input in Zyklus 1



(c) Vorschlag der Entscheidungsunterstützung mit den prognostizierten Lernkurven



(d) Nach der Durchführung der Montage werden die prognostizierten Lernkurven mithilfe einer Regressionsanalyse von Echtzeitdaten geupdated. Anschließend folgt wieder Schritt (b)

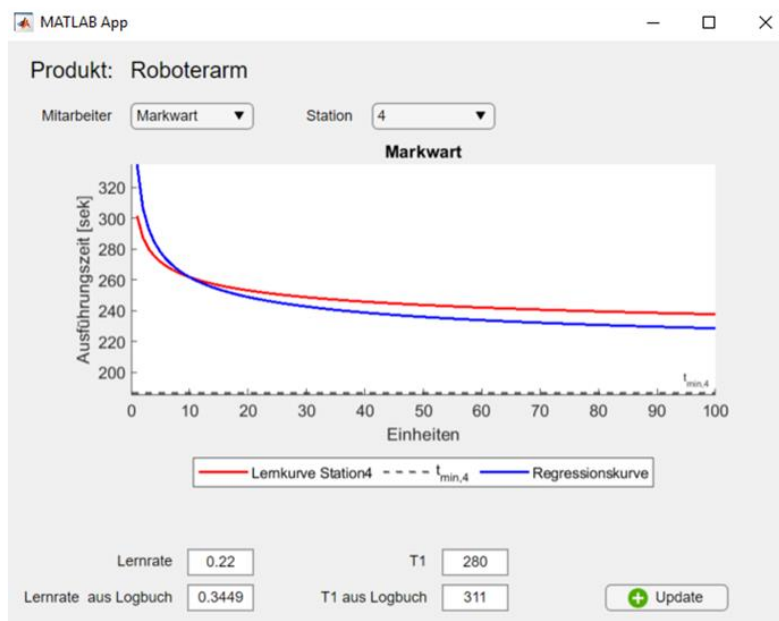


Bild 6-5: GUI der Matlab-App für die fähigkeitsorientierte Mitarbeiterzuordnung in einem manuellen cyber-physischen Montagesystem: (c) Entscheidungsunterstützung; (d) Regressionsanalyse

7 Validierung der Methodik

Im Folgenden wird Verifikation und Validierung dargestellt, um die Methodik hinsichtlich ihrer Anforderungserfüllung zu beurteilen. Die Verifikation umfasst die Überprüfung der Methodik in Bezug auf die erhobenen Anforderungen in Kapitel 0. Wohingegen die Validierung die Überprüfung der vordefinierten Forschungsfragen in Kapitel 1 darstellt. Aufgrund unterschiedlicher Betrachtungsbereiche der Anforderungen und Anwendungsbereiche sowie der Umsetzbarkeit in dem Smart Automation Laboratory werden die Teilmethoden separat untersucht. Die Verifikation und Validierung teilt sich grundsätzlich in vier Testszenarien mit jeweiliger Messmetrik (siehe Tabelle 7-1): Simulationsstudie, Probandenstudie, Interviews, Usertests. Dies ermöglicht die passgenaue Definition von Prüfständen mit Datenerhebungstechniken und Probanden. Weiterhin kann Expertenwissen von Industrievertretern einbezogen sowie Durchführungen mit Probanden umgesetzt werden, ohne zu viel Zeit zu beanspruchen. Innerhalb der **Simulationsstudie (1)** werden vorwiegend die Funktionalitäten der Methodik überprüft und die folgenden Anforderungen adressiert: *Req-1, Req-3, Req-4, Req-5, Req-6, Req-7, Req-12, Req-13*. Die **Probandenstudie (2)** mit Studenten der Fakultät Maschinenbau zeigt die reale technische Umsetzung der Methodik-Anwendung in der Laborumgebung des Smart Automation Laboratory des Lehrstuhls für Produktentstehung im Heinz Nixdorf Institut. Hierbei werden im Wesentlichen die Anforderungen *Req-2, Req-3, Req-10, Req-12* betrachtet. Für die industrielle Perspektive sowie die Überprüfung der Nutzerfreundlichkeit werden zum einen **Experteninterviews (3)** in Form von Think-Aloud-Tests mit vier Industrievertretern aus den Bereichen Produktions- und Montageplanung sowie CAM- und PPS-Software-Anbietern und zum anderen **Usertests (4)** mit Studenten der Fakultät Maschinenbau durchgeführt. Dies adressiert die Anforderungen *Req-8, Req-9, Req-10, Req-11*. In den Versuchsreihen werden, wie in Abschnitt 6, die Software-Programme *Dassault Systèmes SolidWorks, MathWorks Matlab, IBM Node-Red* und *Microsoft Excel* genutzt. Innerhalb der Simulationsstudie wird zusätzlich für die Modellierung des realen cyber-physischen Montagesystems das Softwareprogramm *Siemens Plant Simulation* genutzt. In der Probandenstudie sowie den Usertests werden zudem die Softwarewerkzeuge *Viso* und *The Observer XT* des Unternehmens *Noldus* eingesetzt.¹⁹ Die Interviews werden in Videokonferenzen mit den Programmen *Adobe XD* und *Microsoft Teams* durchgeführt.

Um den Nachweis der Eignung der vorgestellten Methodik hinsichtlich der Anforderungen beziehungsweise Restriktionen zu bestimmen, werden in allen vier Testszenarien Praxisbeispiele aus mechatronischen Kleinsystemen gewählt. Die übliche Gestaltung (teil-)manueller Fließmontagen ermöglicht die Übertragung auf unterschiedliche Fließmontagen. In den folgenden Abschnitten werden die jeweiligen Versuchsreihen vorgestellt (Abschnitt 7.1-7.4). Hierzu werden der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung

¹⁹ Das Unternehmen Noldus stellt Software-Lösungen zur Verhaltensforschung bereit. Mit der Anbindung an Kamerasysteme bieten die Software-Programme die Möglichkeit, die Interaktion von Probanden in einer Laborumgebung zu beobachten und zu analysieren.

und die Versuchsergebnisse beschrieben. Im Anschluss an die vier Versuchsreihen werden die Versuchsergebnisse kritisch betrachtet (Abschnitt 6.5) und in Bezug auf die Anforderungen geprüft (Abschnitt 6.6).

Tabelle 7-1: Testszenarien und Messwerkzeuge der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Test-szenario	Messwerkzeug
Input	Req-1: Automatische Ableitung des Montagevorranggraphen	E	Testszenarien mit fünf Produktmodellen
	Req-2: Integration von Echtzeitdaten	2	Testszenarien mit fünf Durchführungen
	Req-3: Verknüpfung mit etablierten Softwaresystemen	1,2	CAD, MS Office
Modell & Modellierung	Req-4: Berücksichtigung der Montagereihenfolge	E, 1	Testszenarien mit fünf Produktmodellen
	Req-5: Integration von Prognosen der Fähigkeitsentwicklung	E,1	Testszenarien mit fünf Mitarbeiterlisten
	Req-6: Berücksichtigung der Ähnlichkeit von Montageoperationen	1,2	Testszenarien mit zwei ähnlichen Produktmodellen
	Req-7: Auswahl von verschiedenen Optimierungszielen	1,3	Anzahl >1
Anwendung	Req-8: Verständlicher Workflow	3	Walkthrough
	Req-9: Einfache Anwendung	4	SUS > 50
	Req-10: Verständlicher & nachvollziehbarer Vorschlag für den Arbeitseinsatz	4	Fragebogen, Anzahl an Irritationen
Output	Req-11: Genauigkeit für die vorgesehenen Anwendungsfälle	1,2	$MAPE > MAPE_{MTM}$
	Req-12: Leistungssteigerung der Montage	1	$N_S > N_{SMTM}$ $A > A_{MTM}$
	Req-13: Langfristige Verbesserung	1	$\Delta A > \Delta A_{MTM}$ $S_{wkent} > S_{wkent,MTM}$

E = Einzelprüfung; 1 = Simulationsstudie; 2 = Probandenstudie; 3 = Experteninterview, 4 = Usertest

7.1 Simulationsstudie

Nachfolgend wird die Simulationsstudie als erster Teil der Validierung der Methodik vorgestellt. In der Simulationsstudie werden die Funktionalitäten der Methodik überprüft. Dies dient zur anschließenden Überprüfung der Anforderungen Req-1, Req-3, Req-4, Req-5, Req-6, Req-7, Req-12, Req-13.

7.1.1 Versuchsaufbau

In der Simulationsstudie wird ein cyber-physisches Montagesystem betrachtet. Das Montagesystem ist als Fließmontage gestaltet und besteht aus den vier Montagestationen mit entsprechenden Puffern zwischen den Stationen. Die Simulation der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung erfolgt in einer ereignisorientierten Simulationsumgebung mithilfe des Software-Programms *Siemens Plant Simulation* und der systemeigenen Programmiersprache SimTalk (siehe Bild 7-1). Bei der Simulation wird die langfristige fähigkeitsorientierte und die kurzfristige zeitorientierte Aufgabenzuordnung evaluiert. Vergleichsobjekt stellt ein klassisches Rotationsmodell nach REFA auf Basis von MTM-Zeiten dar. Der Vergleich erfolgt anhand von fünf Kennzahlen (siehe Tabelle 7-2):

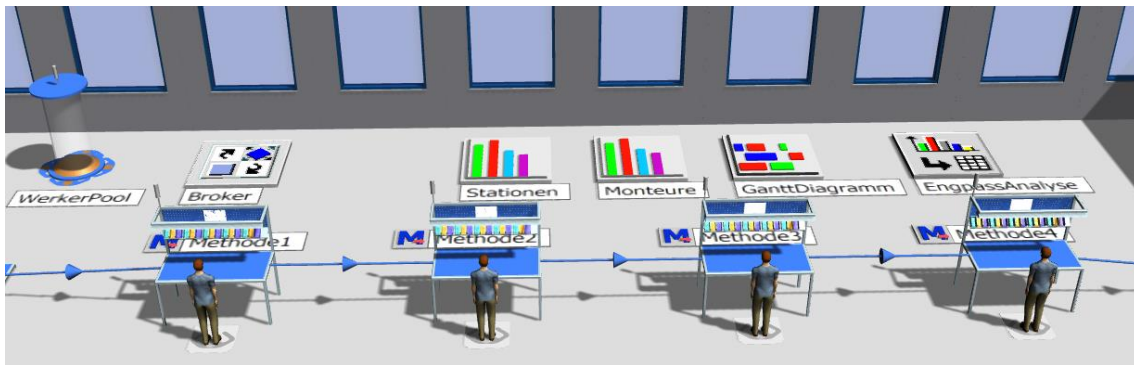


Bild 7-1: Ausschnitt aus dem Simulationsmodell in Plant Simulation

Kernbestandteile der Methodik stellt das neuartige Prognosemodell der Fähigkeiten von Mitarbeitern dar. Dieses soll die Genauigkeit der Vorhersage verbessern. Die Vorhersage wird mit der Dimension **Prognosegüte** geprüft. Hierbei wird die Abweichung der prognostizierten Montagezeit von der realen Montagezeit ins Verhältnis gesetzt. Die Kennzahl Mean Absolute Percentage Error (MAPE) beschreibt den relativen Fehler in Prozent. Die Aufteilung der unterschiedlichen Betriebszeitanteile der Stationen wird betrachtet. Hierbei gibt es die drei Betriebszustände „arbeitend“, „wartend“, „blockiert“.

Tabelle 7-2: Kennzahlen zur Bewertung der Koordinationsansätze der Methodik

Bezeichnung	Gleichung
Prognosegüte	$MAPE = 100 * \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left \frac{\hat{y}_{n+t} - y_{n+t}}{y_{n+t}} \right $
Nutzungsgrad	$N_S = 1 - \frac{T_o + T_T + T_W + T_{FS}}{T_{Nutz,S}} = \frac{\sum_i TBF_{i,S}}{T_{Nutz,S}}$
Ausbringungsrate	$A = \frac{A_{Aus}}{t_{Unterzeit}}$
Zuwachsrate	$\Delta A = \frac{A_{t_i+1}}{A_{t_i}}$
Fähigkeitsentwicklung	$S_{w_{kent}} = \frac{S_{w_{kt_i+1}}}{S_{w_{kt_1}}}$

Dies ermöglicht den Vergleich der **Nutzungsgrade** der Montagestationen in den drei Varianten. Aufgabe der Montage ist es, produzierte Einzelteile und Baugruppen zu einem System in einem definierten Zeitraum zusammenzubauen. Die Koordinationsansätze verfolgen unterschiedliche Zielsetzungen, vor dem Hintergrund, das Montagesystem zu verbessern. Entscheidend für die Bewertung eines Montagesystems ist die **Ausbringungsrates**, die durch die Ausbringungsmenge je Zeiteinheit definiert ist. Entscheidend für die Zukunftsfähigkeit eines Montagesystems ist die zeitliche Entwicklung der Ausbringungsmenge. Diese kann mithilfe der Zuwachsrates bestimmt werden. Die **Zuwachsrates** beschreibt die Steigerung der Ausbringungsmenge pro Zeiteinheit. Für die Zukunftsrobustheit des Montagesystems ist die Entwicklung der Fähigkeiten der Mitarbeiter bestimmend. Die **Fähigkeitsentwicklung** wird definiert als die Steigerung der Fähigkeiten der Mitarbeiter pro Zeiteinheit.

In einer ereignisorientierten Simulation wird eine Drosselklappe (siehe Bild 7-2) montiert. In jedem Zyklus werden 100 Drosselklappen (insgesamt: 5.000) montiert. Insgesamt erfolgt die Montage in 50 Zyklen, wobei zwischen jedem Zyklus eine Unterbrechung von 22 Stunden (79.200 Sekunden) besteht. Nach dem 20-ten bzw. 40-ten Zyklus beträgt die Unterbrechungsdauer 1 Woche (604.800 Sekunden) bzw. 2 Wochen (1.209.600 Sekunden).

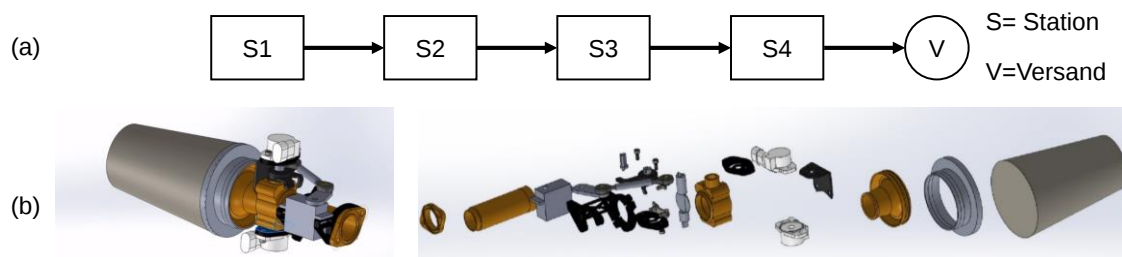


Bild 7-2: (a) Schematischer Aufbau des Montagesystems; (b) Drosselklappe

In dem Montagesystem werden fünf unterschiedliche Personalstrukturen betrachtet, wobei die vier Mitarbeiter jeweils individuelle Ausprägungen der Humanfaktoren besitzen (siehe Tabelle 7-3, in A9.6 sind alle Übersichten zu finden). Betrachtet werden die folgenden fünf Personalstrukturen²⁰:

- 1) **Zwei-Gruppen-Personal:** Die Mitarbeiter besitzen unterschiedliche Lernraten. Hierbei wird davon ausgegangen, dass es sich um zwei Mitarbeiter mit hoher Lernrate (90 % *beziehungsweise* Degressionsfaktor 0,152) und zwei Mitarbeiter mit normaler Lernrate (80 % *beziehungsweise* Degressions – faktor 0,3219) handelt. Die Vorerfahrungen der Mitarbeiter sind exakt gleich.

²⁰ Die genutzten Lernraten innerhalb der Testszenarien der Simulationsstudie basieren auf den Ergebnissen von FESSIA ET AL. [FRK06]. FESSIA ET AL. stellen aufbauend auf einer Literaturrecherche eine Übersicht über die Lernraten von Mitarbeitern in der Montage für unterschiedliche Branchen dar. Für Kleinelektronik liegen typische Werte der Lernrate zwischen 75 % und 85 %. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen anderer Forscher, wie beispielsweise WRIGHT.

- 2) **Homogenes Personal & heterogene Stationen:** Innerhalb dieses Testszenarios besitzen die Mitarbeiter dieselben Lernraten und Vorerfahrungen. Lediglich die Montagestation vier ist deutlich schwieriger (*Lernrate* = 60 % *beziehungsweise* Degressionsfaktor 0,74) als die anderen Stationen (*Lernrate* = 80 % *beziehungsweise* Degressionsfaktor 0,3219).
- 3) **Homogenes Personal & homogene Stationen:** Innerhalb dieses Testszenarios besitzen die Mitarbeiter dieselben Lernraten (*Lernrate* = 80 % *beziehungsweise* Degressionsfaktor 0,3219) und die gleichen Vorerfahrungen.
- 4) **Homogenes Personal mit Vorerfahrungen:** Innerhalb dieses Testszenarios besitzen die Mitarbeiter dieselben Lernraten (*Lernrate* = 80 % *beziehungsweise* Degressionsfaktor 0,3219) und unterschiedliche Vorerfahrungen (ein Novize, ein Mitarbeiter mit ersten Erfahrungen, zwei Mitarbeiter mit viel Erfahrungen).
- 5) **Heterogenes Personal:** Die Lernrate sowie die Vorerfahrungen der Mitarbeiter dieses Testszenarios basieren auf einer ersten Durchführung mit studentischen Probanden im Smart Automation Laboratory. Die Mitarbeiter besitzen unterschiedliche Lernraten für alle Montagestationen sowie unterschiedliche Vorerfahrungen.

Tabelle 7-3: Ausschnitt der Daten der Personalstruktur „Heterogenes Personal“ über die Mitarbeiter zu Beginn der Simulation am Beispiel der Station 1

Station 1	l_1	$T_{1,1}$	K
Mitarbeiter 1	0,32	120	56
Mitarbeiter 2	0,22	121	45
Mitarbeiter 3	0,33	126	24
Mitarbeiter 4	0,45	105	34

Die Umsetzung der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung in der Montageplanung und -steuerung erfolgt in einer ereignisorientierten Simulationsumgebung mit der Software Siemens Plant Simulation und der systemeigenen Programmiersprache SimTalk. Das Simulationsmodell bildet das entsprechende Montagesystem und die Montageschritte des Anwendungsszenarios durch einen Materialfluss, Werkerpool und Montagestationen ab. Für die Durchführungszeiten je Montageoperation jedes Mitarbeiters werden in der Simulation synthetisch generierte Testdaten genutzt. Damit können Abweichungen von der Prognose sichergestellt und mit realistischen Daten simuliert werden. Zur Erstellung der synthetischen Datensätze muss ein geeigneter Datengenerator entwickelt werden. Dabei wird angenommen, dass die bestehenden validierten Lernkurven (siehe Abschnitt 5.5.2) grundsätzlich realitätsgetreu sind. Diese Daten werden mithilfe eines *Störfaktors* modifiziert. Hierzu werden die Daten mit einem Störfaktor multipliziert. Dieser Faktor ist *normalverteilt* im Wertebereich von 0,85 bis 1,15. In der Gleichung 6-1 ist der Datengenerator zur Ermittlung realistischer Montagezeiten der Mitarbeiter dargestellt.

$$t_{sim}(n, i) = \alpha * t(n, i),$$
$$\alpha \in [0,85; 1,15]$$

Gleichung 6-1: Datengenerator zur Ermittlung realistischer Montagezeiten

Die Beurteilung der Planungs- und Simulationsergebnisse wird mithilfe von Kennzahlen gefällt. Dieses *Kennzahlensystem* dient vorrangig zur Bewertung und zum Vergleich der drei Koordinationsansätze in der Montage, kann aber auch für das Monitoring im Betrieb genutzt werden.

7.1.2 Versuchsdurchführung

Nachdem der Prüfstand und der Versuchsaufbau dargestellt wurden, wird die Anwendung der Methodik in verkürzter Form dargestellt. Im ersten Schritt der Methodik erfolgt die automatisierte Ableitung des Montagevorranggraphen. Hierzu wird die CAD-Datei der Drosselklappe im SLDASM-Format in *Dassault Systèmes SolidWorks* geöffnet und es werden drei Makros ausgeführt. Die Durchführungsdauer zur Ableitung des Montagevorranggraphen beträgt 170 Minuten. Die Ausgabe erfolgt im csv-Format und kann beispielsweise mit *Microsoft Excel* geöffnet werden. Anschließend werden für die abgeleiteten Montageoperationen MTM-Codes mit den jeweils zugehörigen Zeiten der csv-Datei hinzugefügt. Mithilfe der in *MathWorks Matlab* implementierten SALMONE-2 erfolgt die automatische Fließbandabstimmung. Dies geschieht in wenigen Sekunden. Im dritten Schritt werden die verwendeten Fügeverfahren und notwendigen Montagewerkzeuge in einer weiteren csv-Datei hinterlegt. Dies ermöglicht die automatisierte Ableitung des Montagevorranggraphen. Anschließend erfolgt die Durchführung der Montagesteuerung mit den fünf beschriebenen Personalstrukturen. Je nach Personalstruktur und Koordinationsansatz wurde die Montagesteuerung der Methodik mit dem MTM-basierten Ansatz der REFA einzeln durchgeführt. Dies entspricht fünf Durchführungen (für jede Personalstruktur), die jeweils 50 Zyklen umfassen, für die drei Koordinationsansätze. Die Ansätze ergeben unterschiedliche Ergebnisse, die nachfolgend einzeln dargestellt werden.

7.1.3 Versuchsergebnisse

In diesem Abschnitt werden nun die Simulationsergebnisse vorgestellt. Die Ergebnisse werden immer als Vergleich der zwei Koordinationsansätze mit dem MTM-basierten Ansatz der REFA vorgestellt. Zunächst wird grundsätzlich auf die bestimmten Aufgabenzuordnungen eingegangen und anschließend auf die fünf beschriebenen Kennzahlen.²¹

²¹ Die ausführlichen Ergebnisse der Simulationsstudie finden Sie in 0.

Aufgabenzuordnung: Verteilung der Mitarbeiter auf Montagestationen

Durch den Einsatz der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung ergeben sich in Abhängigkeit von der Personalstruktur unterschiedliche Aufgabenzuordnungen. Beide Koordinationsansätze der Methodik berücksichtigen die individuellen Ausprägungen der relevanten Humanfaktoren der Mitarbeiter und beziehen diese in ihre Entscheidungsunterstützung ein. Da die Humanfaktoren in dem MTM-basierten Ansatz nach REFA nicht ausreichend berücksichtigt werden, ergeben sich bei dieser Art der Aufgabenzuordnung für jede betrachtete Personalstruktur dieselben Zuordnungen. In Tabelle 7-4 und Tabelle 7-5 werden die Ergebnisse der Aufgabenzuordnung für zwei Personalstrukturen dargestellt. Für die Koordinationsansätze ergeben sich in den 50 Durchläufen folgenden Aufgabenzuordnungen:

Durch die Verwendung des *kurzfristigen, zeitorientierten Koordinationsansatzes* bilden sich strikte Zuordnungsregeln aus. Mitarbeiter arbeiten bei jeder Personalstruktur fast nur an zwei Montagestationen. Dadurch prägen sich in jeder Personalstruktur Experten für spezifische Montagestationen aus. Dies hat den Vorteil, dass Erfahrungen aus vorherigen Zyklen in hohem Maße in den nachfolgenden Montageschritten genutzt werden. Allerdings führt das zu dem Nachteil, dass eine Abhängigkeit des Montagesystems von den Experten und den verwendeten Fügetechnologien und -werkzeugen auch für andere Produkte entsteht. Bei einer homogenen Personalstruktur werden auf Basis des Fähigkeitsgraphen Montagestationen mit hohen Übereinstimmungen ausgewählt, deren Kombination für Mitarbeiter geeignet sind. Dies sind für das Produktbeispiel der Drosselklappe Montagestation 1 mit Montagestation 3 mit $cor(S_1, S_3) = 0,4089$; $cor(S_3, S_1) = 0,3155$ sowie Montagestation 2 mit Montagestation 4 mit $cor(S_2, S_4) = 0,5166$; $cor(S_4, S_2) = 0,4273$. In heterogenen Strukturen erfolgt die Kombination der Montagestationen in Abhängigkeit vom Fähigkeitsgraphen sowie von der individuellen Ausprägung der Humanfaktoren der Mitarbeiter. Bei den individuellen Ausprägungen ist die Lernrate der Mitarbeiter von besonderer Relevanz.

Tabelle 7-4: *Anzahl der Zuordnungen der Mitarbeiter in den 50 Zyklen in der homogenen Personalstruktur und in homogenen Montagestationen*

		<i>Fähigkeitsorientiert</i>				<i>Zeitorientiert</i>				<i>REFA</i>			
		Montagestation				Montagestation				Montagestation			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Mitarbeiter	1	12	12	13	13	25	0	0	25	13	13	12	12
	2	13	13	12	12	0	24	1	25	12	13	13	12
	3	13	13	12	12	0	26	24	0	12	12	13	13
	4	12	12	13	13	25	0	25	0	13	12	12	13

Anzahl der Zuordnungen in den 50 Zyklen

Durch die Verwendung des *langfristigen, fähigkeitsorientierten Koordinationsansatzes* lassen sich keine ähnlichen Regeln erkennen. In Anhängigkeit von der Homogenität der Personalstruktur und der Montagestationen ergeben sich unterschiedliche Verteilungsmöglichkeiten. So ergibt sich bei einer homogenen Personalstruktur und homogenen Montagestationen dieselbe Verteilung wie bei der Verwendung des Ansatzes von REFA. Die Mitarbeiter arbeiten gleichermaßen an jeder Montagestation (siehe Tabelle 7-4). Aufgrund des Zusammenspiels von Lernen und Vergessen ergibt sich, dass der höchste Fähigkeitszuwachs an der Montagestation erreicht werden kann, an der der Mitarbeiter am längsten nicht gearbeitet hat. Aufgrund steigender Heterogenität der Personalstruktur sowie der Montagestationen ergeben sich dahin gehend andere Zuordnungen. Zunächst werden Mitarbeiter zu Aufgaben zugewiesen, bei denen sie durchschnittlich die höchste Lernrate besitzen. Bei dem Erreichen des Plateaus werden sie der Montagestation mit der nächsthöheren Lernrate zugewiesen. Dies führt dazu, dass die Fähigkeitsentwicklung der Mitarbeiter je Zyklus maximiert wird (siehe Tabelle 7-5).

Tabelle 7-5: Anzahl der Zuordnungen der Mitarbeiter in den 50 Zyklen in der heterogenen Personalstruktur

		<i>Fähigkeitsorientiert</i>				<i>Zeitorientiert</i>				<i>REFA</i>			
		Montagestation				Montagestation				Montagestation			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Mitarbeiter	1	8	14	10	18	24	0	1	25	13	13	12	12
	2	18	12	9	11	0	25	0	25	12	13	13	12
	3	22	9	12	7	25	1	24	0	12	12	13	13
	4	2	15	19	14	1	24	25	0	13	12	12	13

Anzahl der Zuordnungen in den 50 Zyklen

Prognosegüte

Ein entscheidender Vorteil der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung ist die Modellierung der Fähigkeit der Mitarbeiter. Im Gegensatz zu dem etablierten MTM-basierten Ansatz von REFA werden Mitarbeiter mit ihren individuellen Fähigkeiten berücksichtigt. Das führt dazu, dass bei der Planung bereits das Leistungsniveau sowie die Entwicklung der Mitarbeiter prognostiziert werden. Dies liegt auch daran, dass die synthetisch erzeugten Testdaten auf Lern-Vergessenskurven-Modellen beruhen. Eine etablierte Kennzahl zur Bestimmung der Prognosegüte ist der Mean Absolute Percentage Error (MAPE). MAPE beschreibt den relativen Fehler der Prognose in Prozent. Bei beiden Koordinationsansätzen sowie jeder Personalstruktur besitzt die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung eine hohe Prognosegüte (geringere MAPE) für alle Zyklen im gleichen Maße. Im Gegensatz dazu sind die MTM-Zeiten speziell in der Lernphase sehr ungenau. Mitarbeiter mit wenig Erfah-

nung an einer Montagestation benötigen mehr Zeit zur Ausführung der Operationen. Dieser Umstand wird jedoch von den MTM-Zeiten nicht berücksichtigt. Im Verlauf der Zeit nehmen die Erfahrungen zu und die Durchführungszeiten der Mitarbeiter nähern sich den MTM-Zeiten an, was dazu führt, dass die Prognosegüte des Ansatzes von REFA mit der Zunahme der Zyklen steigt und der MAPE abnimmt. Tabelle 7-6 zeigt exemplarisch den Vergleich der Kennzahl MAPE der drei Prognosen mit einem heterogenen Personal.²²

Im Gesamten zeigt sich, dass durch den Einsatz der Methodik mit den Lernkurven eine deutlich höhere Prognosegenauigkeit erzielt wird.

Tabelle 7-6: MAPE der drei unterschiedlichen Koordinationsansätze

	Arithmetisches Mittel	Median
<i>Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung</i>	8.24	7.80
<i>Zeitorientierte Aufgabenzuordnung</i>	8.15	7.73
<i>MTM-basierte Aufgabenzuordnung</i>	33.53	32.58
<i>MAPE in Prozent (Prozentuale Abweichung der Prognose vom Ist-Wert)</i>		

Nutzungsgrad

Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen, dass der Nutzungsgrad des Montagesystems je nach Personalstruktur und Koordinationsansatz stark variiert. Bild 7-3 zeigt den Vergleich zwischen der Kennzahl Nutzungsgrad in den zwei Koordinationsansätzen der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung sowie dem Ansatz von REFA für die fünf unterschiedlichen Personalstrukturen. In homogenen Personalstrukturen ist der Nutzungsgrad sowohl bei dem Einsatz der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung als auch dem Ansatz nach REFA hoch. Dies ändert sich bei den anderen Personalstrukturen. Bei der Verwendung des Einsatzes nach REFA gibt es Schwankungen des Nutzungsgrades bei den Personalstrukturen „Zwei-Gruppen-Personal“ sowie „homogenes Personal & heterogene Stationen“. Bei der zufälligen Zuweisung von Mitarbeitern mit einer geringeren Lernrate zu einer neuen Station führt dies zu einem Anstieg seiner Durchführungszeit, wodurch bei den Mitarbeitern mit einer hohen Lernrate die Wartezeit steigt und somit der Nutzungsgrad abnimmt. Bei heterogenen Personalstrukturen lässt sich eine ähnliche Wirkung vermuten, jedoch überlagern sich die Effekte aufgrund der hohen Heterogenität. Beim Zeitverlauf ist hierbei kein klarer Trend zu erkennen. Bei der Verwendung des kurzfristigen zeitorientierten Koordinationsansatzes ist auch in den weiteren Personalstrukturen bereits zu Beginn der höchste Nutzungsgrad des Montagesystems festzustellen. Aufgrund von unterschiedlichen Lernraten bei heterogenen Testszenarien gibt es kleinere Schwankungen. Jedoch lässt sich im Vergleich feststellen, dass bei diesem Koordinationsansatz der Nutzungsgrad am höchsten ist. Die Verwendung des langfristigen fähigkeitsorientierten Koordinationsansatzes führt dazu, dass

²² Da die Personalstruktur keinen Einfluss auf die Prognosegüte besitzt, sind die Verläufe der anderen Personalstrukturen identisch.

Montagesysteme mit Mitarbeitern mit einem hohen Fähigkeitsniveau und einer hohen Lernrate in heterogenen Personalstrukturen einen geringeren Nutzungsgrad besitzen.

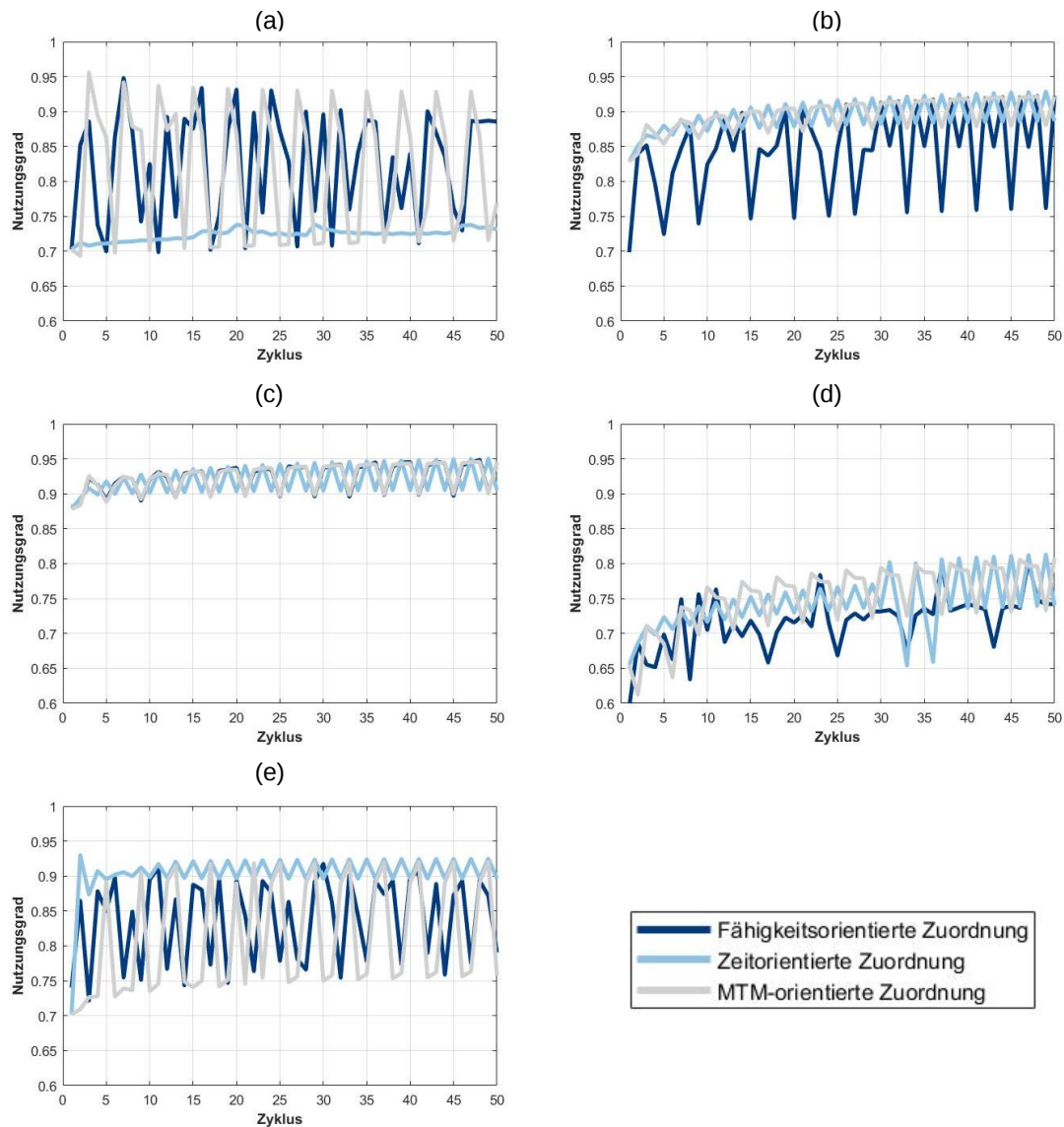


Bild 7-3: Nutzungsgrad innerhalb der Simulationsstudie der fünf unterschiedlichen Personalstrukturen: (a) Zwei-Gruppen-Personal, (b) homogenes Personal & heterogene Stationen, (c) homogenes Personal & homogene Stationen (d) homogenes Personal mit Vorerfahrung sowie (e) heterogenes Personal

Sie „warten“ auf den Lernprozess der anderen Mitarbeiter. Aufgrund des Lernprozesses nimmt das Fähigkeitsniveau der Mitarbeiter im Zeitverlauf zu und der Nutzungsgrad des Montagesystems steigt.

Der Nutzungsgrad ist durchschnittlich bei beiden Koordinationsansätzen der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung höher als bei dem Ansatz von REFA. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Methodik speziell bei der heterogenen Personalstruktur höhere Systemleistungen der Montage erzielt.

Ausbringungsrate

Entscheidend für die Bewertung eines Montagesystems ist die Ausbringungsrate, die durch die Ausbringungsmenge je Zeiteinheit definiert ist. In Bild 7-4 ist der Vergleich der beiden Koordinationsansätzen der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung mit dem Ansatz nach REFA hinsichtlich der Ausbringungsrate dargestellt. In jeder Personalstruktur besitzt der kurzfristige zeitorientierte Koordinationsansatz die höchste Ausbringungsrate. Sie nimmt in jedem Testszenario sukzessive über den Zeitverlauf ab. Eindeutige Unterschiede in diesem Koordinationsansatz zwischen den Personalstrukturen lassen sich lediglich aufgrund der Vorerfahrungen in den ersten Zyklen erkennen. Die weiteren beiden Koordinationsansätze weisen bei homogenen Personalstrukturen aufgrund derselben Verteilung der Mitarbeiter eine gleiche Ausbringungsrate auf. In heterogenen Personalstrukturen unterscheiden sie sich jedoch.

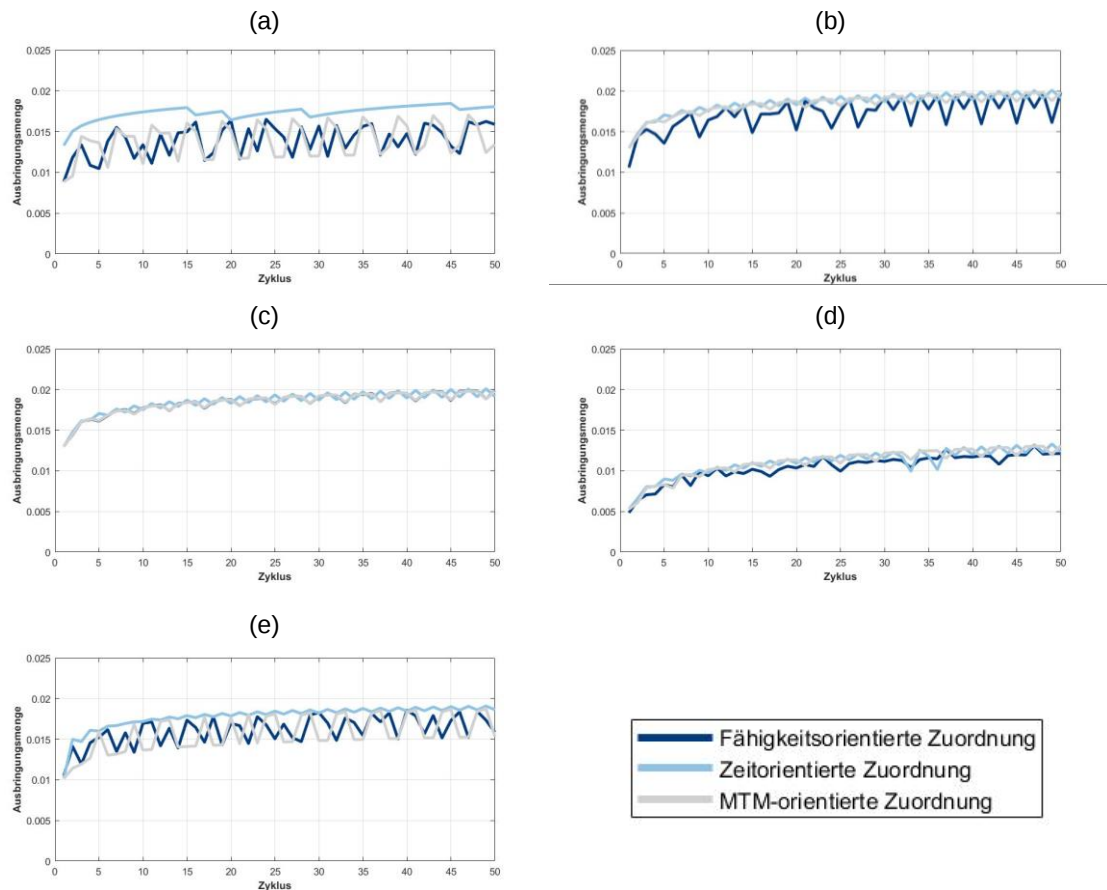


Bild 7-4: Ausbringungsrate innerhalb der Simulationsstudie der fünf unterschiedlichen Personalstrukturen: (a) Zwei-Gruppen-Personal, (b) homogenes Personal & heterogene Stationen, (c) homogenes Personal & homogene Stationen (d) homogenes Personal mit Vorerfahrung sowie (e) heterogenes Personal

Bei der Verwendung des Ansatzes nach REFA nimmt die Ausbringungsrate im Zeitverlauf in jedem Testszenario zu. Jedoch liegen aufgrund der zufälligen Zuweisungen Schwankungen vor. Dies lässt sich speziell in dem Testszenario heterogenes Personal

erkennen. Bei der Zuweisung von Mitarbeitern mit geringerem Leistungsniveau zu schwierigeren Montageaufgaben nimmt die Ausbringungsrate ab. Bei der Verwendung des langfristigen fähigkeitsorientierten Ansatzes ist zunächst festzustellen, dass die Ausbringungsrate durchschnittlich am geringsten ist. Dies lässt sich damit begründen, dass das Ziel der Fähigkeitsentwicklung auf Kosten der Ausbringungsrate verfolgt wird. Auch bei diesem Koordinationsansatz lassen sich Schwankungen erkennen. Zunächst nehmen auch bei heterogenen Personalstrukturen die Durchführungszeiten ab und somit die Ausbringungsrate zu. Wenn ein Plateau der Fähigkeitsentwicklung erreicht wird, kommt es zu einer Neuzuweisung der Aufgaben. Dies hat die Auswirkung, dass an dieser Stelle zunächst die Ausbringungsleistung abnimmt, bevor sie wie zunimmt.

In der Gesamtbetrachtung lässt sich festhalten, dass kurzfristige, zeitorientierte Ansätze bei jeder Personalstruktur eine höhere Ausbringungsrate als der Ansatz der REFA erzielen. Dies gilt jedoch nicht für den fähigkeitsorientierten Ansatz. Bei diesem Koordinationsansatz treten deutliche Schwankungen je Zyklus auf. Speziell lässt sich feststellen, dass der Ansatz nach REFA in den frühen Zyklen eine deutlich höhere Ausbringungsrate besitzt. Dies trifft vor allem bei homogenen Personalstrukturen mit ähnlich schwierigen Aufgaben je Montagestation zu.

Zuwachsrate

Die Zuwachsrate beschreibt die Steigerung der Ausbringungsmenge pro Zeiteinheit. Die Ergebnisse der Simulationsstudie zeigen, dass in jedem Ansatz die Fähigkeiten der Mitarbeiter über den Zeitverlauf ansteigen. Der Anstieg ist jedoch je nach Koordinationsansatz unterschiedlich stark (siehe Bild 7-5). In der Simulationsstudie der fünf unterschiedlichen Personalstrukturen weisen die drei Koordinationsansätze durchschnittliche Zuwachsraten im Bereich von 0,91 bis 2,93 % auf. Speziell in den heterogenen Personal- und Aufgabenstrukturen zeigt die entwickelte Methodik der menschenzentrierten Aufgabenzuordnung höhere Zuwachsraten. Dies ist darin begründet, dass die Entwicklung von Fähigkeiten der Mitarbeiter explizit fokussiert wird.

In allen fünf Personalstrukturen weist die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung die höchsten Zuwachsraten auf, wohingegen die zeitorientierte Aufgabenzuordnung und der Ansatz nach REFA in homogenen Strukturen ähnliche Zuwachsraten besitzen.

Fähigkeitsentwicklung

Die Fähigkeitsentwicklung beschreibt die Steigerung der Fähigkeiten der Mitarbeiter pro Zeiteinheit. Der Verlauf der Fähigkeitsentwicklung in Bild 7-6 zeigt, dass in jedem Ansatz die Fähigkeiten der Mitarbeiter mit der Durchführungshäufigkeit ansteigen. Jedoch besitzen die unterschiedlichen Koordinationsansätze je nach Personal- und Aufgabenstruktur verschiedene Verläufe der Fähigkeitsentwicklung. Die Fähigkeitsentwicklung innerhalb der zeitorientierten Montageplanung und -steuerung verläuft bei allen Strukturen

ähnlich. Beim Koordinationsansatz werden Experten für einzelne Montagestationen ausgebildet, was dazu führt, dass die Fähigkeitsentwicklung am frühesten abgeschlossen ist.

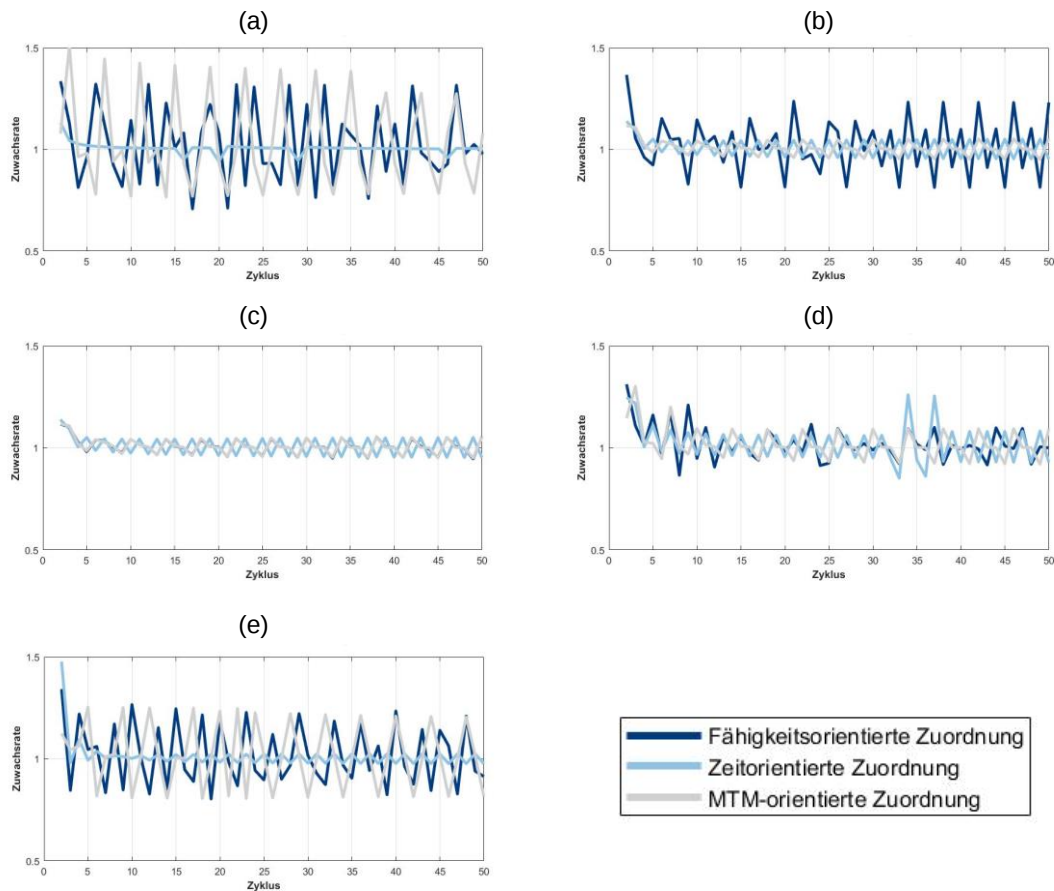


Bild 7-5: Zuwachsrates innerhalb der Simulationsstudie der fünf unterschiedlichen Personalstrukturen: (a) Zwei-Gruppen-Personal, (b) homogenes Personal & heterogene Stationen, (c) homogenes Personal & homogene Stationen (d) homogenes Personal mit Vorerfahrung sowie (e) heterogenes Personal

Im Gegensatz zu den anderen beiden Ansätzen arbeiten die Mitarbeiter nur an zwei Montagestationen. Dies ist daran zu erkennen, dass hier als erstes von den drei Einsätzen ein Plateau erreicht wird. Bei beiden anderen Koordinationsansätzen sind die Verläufe bei einer homogenen Struktur ähnlich. In heterogenen Strukturen unterscheiden sie sich jedoch. Das höchste Fähigkeitsniveau der Mitarbeiter wird bei dem fähigkeitsorientierten Ansatz erreicht. Bei diesem Ansatz wird die Fähigkeitsentwicklung je Zyklus fokussiert. Dies ist speziell in den ersten Zyklen zu erkennen. Aufgrund einer Fokussierung auf die Fähigkeitsentwicklung steigt das Fähigkeitsniveau zunächst stärker an als bei dem Ansatz nach REFA. Aufgrund der gleichmäßigen Verteilung wird innerhalb des MTM-basierten Ansatzes auch ein hohes Fähigkeitsniveau erreicht, dies benötigt jedoch mehr Zyklen.

In der Gesamtbetrachtung lässt sich festhalten, dass durch die Anwendung des Koordinationsansatzes der langfristig fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung durchschnittlich das nächste Fähigkeitsniveau der Mitarbeiter erreicht wird. Besonders in heterogenen Personalstrukturen ergibt sich ein deutlicher Unterschied zu den anderen beiden Ansätzen.

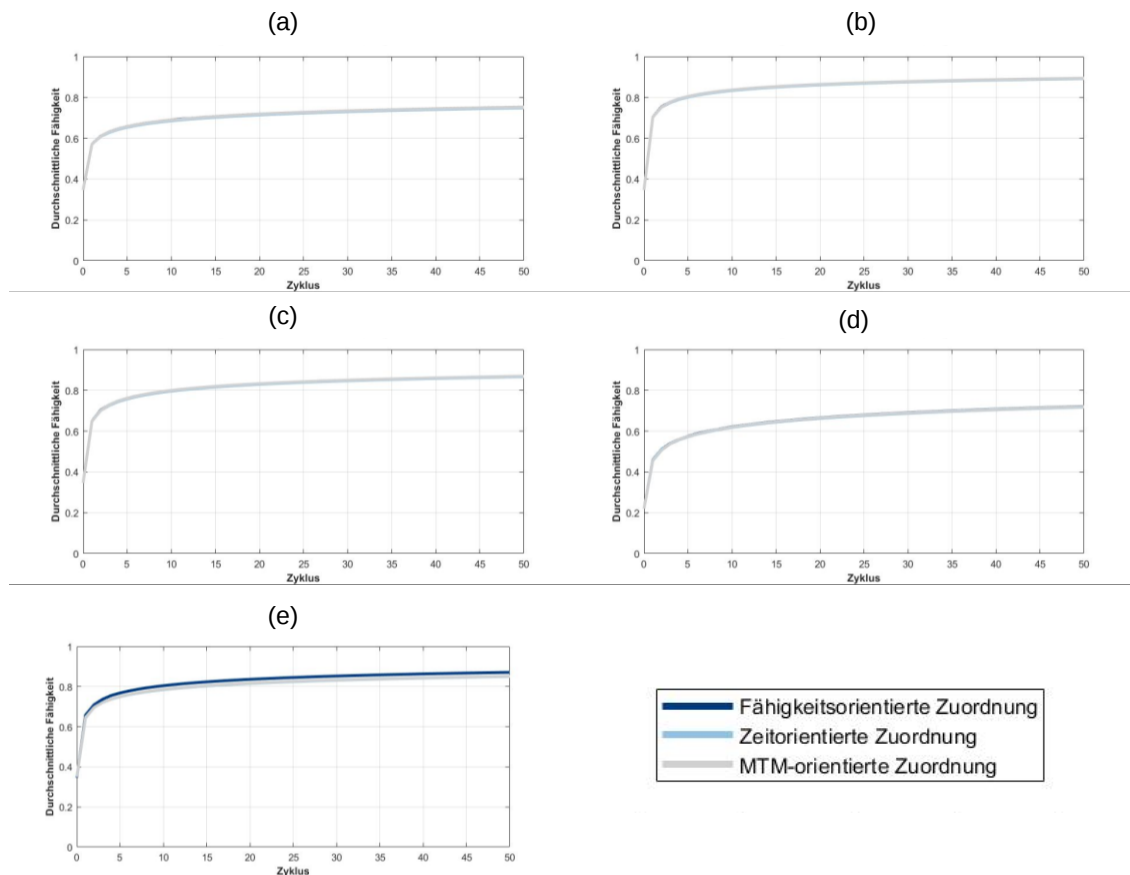


Bild 7-6: *Fähigkeitsentwicklung innerhalb der Simulationsstudie der fünf unterschiedlichen Personalstrukturen: (a) Zwei-Gruppen-Personal, (b) homogenes Personal & heterogene Stationen, (c) homogenes Personal & homogene Stationen (d) homogenes Personal mit Vorerfahrung sowie (e) heterogenes Personal*

7.2 Probandenstudie

Aufbauend auf den Ergebnissen der Simulationsstudie wurde die Methodik in einem realitätsnahen Szenario umgesetzt.

7.2.1 Versuchsaufbau

Neben der simulativen Prüfung wird die entwickelte Methodik mithilfe einer Probandenstudie evaluiert. Zielsetzung der Probandenstudie ist die Überprüfung der technischen Realisierbarkeit innerhalb eines cyber-physischen Montagesystems. Hierzu wurde die

vorgestellte Methodik im Rahmen einer Versuchsdurchführung in der Laborumgebung des Smart Automation Laboratory angewendet. Die Untersuchung wird von einer Gruppe mit vier Studenten der Fakultät Maschinenbau der Universität Paderborn (Rolle: Monteur) und zwei versuchsbegleitenden Mitarbeiter des Lehrstuhls für Produktentstehung (Rolle: Schichtleiter) vorgenommen. Neben der Beurteilung der technischen Realisierbarkeit erfolgt die Verwendung desselben Kennzahlensystems aus Abschnitt 7.1.1. Zur Analyse ist das Smart Automation Laboratory mit Kameras und Mikrofonen ausgestattet. Durch die Verwendung der Softwareprodukte Viso und *The Observer XT* der Firma Noldus BV ist die softwaregestützte, zeitlich synchronisierte Erfassung und Aufzeichnung von Video-Datenströmen ermöglicht.

7.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgt im Januar 2023. Sie besteht aus drei grundsätzlichen Schritten (siehe Bild 7-7). Zunächst wird der Versuchsablauf vorgestellt.

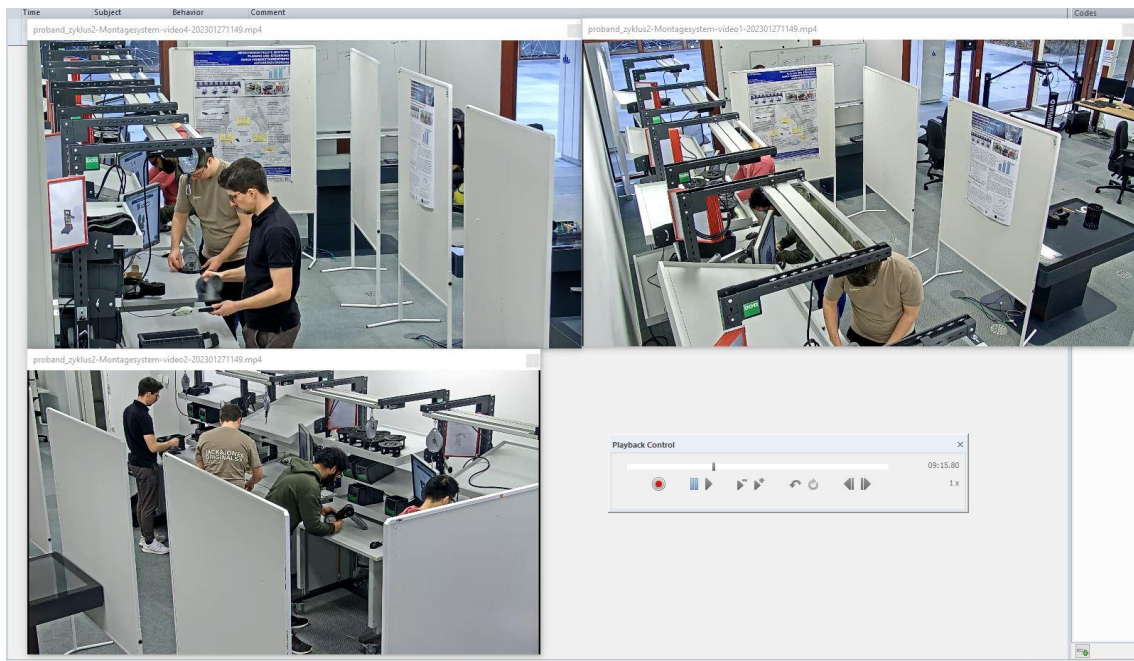


Bild 7-7: Screenshot aus der Beobachtung der Probandenstudie mit „The Observer XT“ der Firma Noldus BV

Die anschließende Versuchsdurchführung erfolgt anhand des Beispielszenarios mit kontinuierlicher Datenerhebung: *In dem Montagesystem werden Knickarmroboter montiert. In jedem Zyklus werden 5 Knickarmroboter montiert. Insgesamt erfolgt die Montage innerhalb von 3 Zyklen, wobei zwischen den Zyklen eine Unterbrechung von 112 Minuten (6.720 Sekunden) bzw. 198 Minuten (11.880 Sekunden) liegt. An den Montagestationen arbeiten vier Mitarbeiter*innen. Innerhalb der Probandenstudie wird die kurzfristige zeitorientierte Aufgabenzuordnung evaluiert. Im Anschluss erfolgt eine Nachbesprechung des Versuchs mit den Probanden.*

Für die Probandenstudie wurde der Demonstrator „Knickarmroboter“ vereinfacht. Bestehende Fügeverbindungen wurden angepasst. Bei der Probandenstudie werden ausschließlich lösbare Verbindungen genutzt. Damit entsteht weder eine unwirtschaftliche Produktion noch Verschwendung von Material. Die Montage des Knickarmroboters umfasst unter anderem die Erzeugung von Steckverbindungen zwischen den Achsen des Knickarmroboters sowie das Verschrauben der Achsen mit dem Support. In A9.4 ist die verwendete Montageanleitung dargestellt.

7.2.3 Versuchsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Probandenstudie dargestellt. Fokus der Testszenarios war die Überprüfung einer technischen Umsetzung innerhalb eines Gesamtsystems eines cyber-physischen Montagesystems. Innerhalb jedes Zyklus wurden insgesamt 160 Daten (Montagestation 1:60; Montagestationen 2:50; Montagestation 3:20; Montagestation 4:60) erfolgreich mithilfe von OPC UA versendet. Lediglich bei drei Zeitdaten wurden aufgrund von Fehlern (zu früh weitergedrückt) manuell innerhalb des Protokolls Anpassungen vorgenommen. Alle zwölf Protokolle (4 Protokolle je Zyklus) wurden fehlerfrei verschickt. Die am Leitsystem empfangenen Protokolle stimmen mit den Protokollen an den Montagestationen überein. Der Dauer des Datentransfers je Zyklus lag unter einer Sekunde. Die Zusammenführung der Datei in ein gemeinsames Logbuch im csv-Format geschah auch bei allen drei Zyklen fehlerfrei. Alle 160 Daten wurden richtig im System gespeichert. Die Überführung der Zeitdaten in das Software-Werkzeug für die Regressionsanalyse geschah fehlerfrei. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse stimmen mit einer durchgeführten separaten Analyse in *IBM SPSS* überein.

Weiterhin wurden bei der Probandenstudie analog zur Simulationsstudie ermittelte Aufgabenzuordnungen sowie die Kennzahlen *Nutzungsgrade*, *Ausbringungsleistung*, *Zuwachsrates*, *Fähigkeitsentwicklung* bestimmt. Durch die Verwendung des *kurzfristigen, zeitorientierten Koordinationsansatzes* bildet sich eine strikte Zuordnungsregel, wie auch in der Simulationsstudie gezeigt. Alle Probanden arbeiten innerhalb der drei Zyklen an genau zwei Montagestationen. Dadurch lässt sich folgern, dass sich bei mehr Durchläufen Experten für die einzelnen Montagestationen herausbilden werden. In Bild 7-8 werden die Verläufe der Zykluszeit sowie der vier Kennzahlen dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Zykluszeit bereits im zweiten Zyklus deutlich und anschließend nur leicht abfällt. Der Einsatz von digitalen Zwillingen der Mitarbeiter führt dazu, dass die Prognosen über den Zeitverlauf deutlich genauer werden. Die besseren Prognosen führen zu einer besseren Ausbalancierung der einzelnen Montagestationen und damit einer höheren Aussagekraft über die Entwicklung des Montageprozesses.

Dadurch steigt sowohl der Nutzungsgrad als auch die Ausbringungsrate beim Einsatz der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung an. Die Fähigkeiten jedes Probanden sowie die durchschnittlichen Fähigkeiten der Probanden steigen zudem im Zeitverlauf an. Die Zuwachsrates ist vom ersten Zyklus zum zweiten Zyklus sehr hoch

und nimmt anschließend ab. Aufgrund der begrenzten Stichprobengröße sowie des begrenzten Zeitrahmens lassen sich zukünftige Entwicklungen der Kennzahlen nur vermuten.

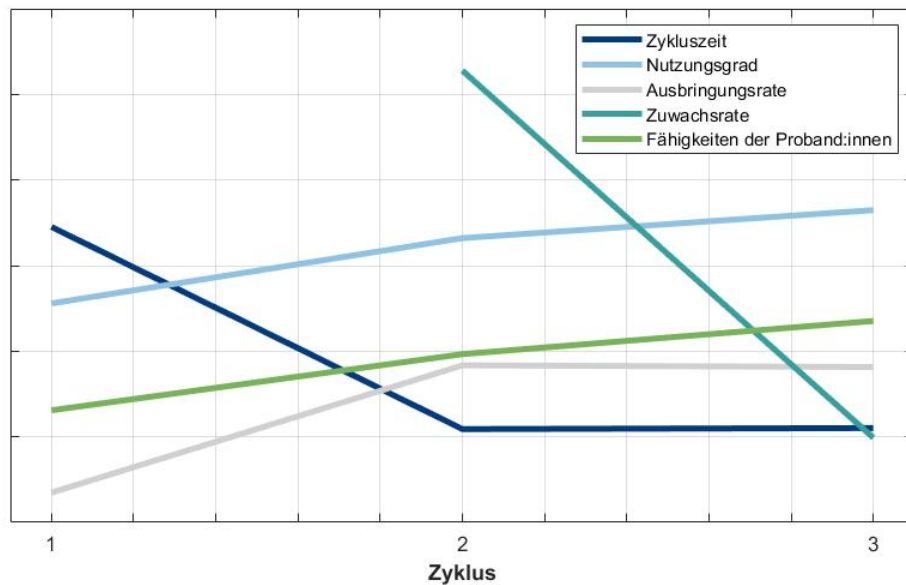


Bild 7-8: Verlauf der erhobenen Kennzahlen in der Probandenstudie

7.3 Experteninterview

Neben der technischen Leistungsfähigkeit ist auch die Anwendung der Methodik entscheidend.

7.3.1 Versuchsaufbau

Der Fokus der Experteninterviews liegt auf der Anwendung der Methodik hinsichtlich der Anforderungen der Industrie durch spätere Nutzer. Hierzu werden Interviews mit vier Industrievertretern aus den Bereichen Produktions-, Montageplanung sowie CAM- und PPS-Software-Anbietern durchgeführt. Diese sind in unterschiedliche Funktionen in der Industrie tätig (siehe Tabelle 7-7).

Tabelle 7-7 Übersicht über die Industrievertreter

	Rolle	Unternehmensgröße	Qualifikation
#1	CEO	Kleines Unternehmen	Staatlich geprüfter Informatiker
#2	Projektmanager	Großunternehmen	M. Sc. Wirtschaftsingenieur Maschinenbau
#3	Projektingenieur	Großunternehmen	M. Sc. Wirtschaftsingenieur Maschinenbau
#4	CTO	Mittleres Unternehmen	Ingenieur für physikalische Technik

Die Interviews werden mit Microsoft Teams beziehungsweise Zoom durchgeführt. Für dieses Testszenario wird die prototypische Umsetzung der Methodik mit dem Software-

Werkzeug *Adobe XD* in einen digitalen MockUp überführt²³. Dieses Vorgehen ermöglicht die direkte Interaktion des Experten mit dem Prototyp, wobei er sich in seiner üblichen Arbeitsumgebung befindet.

7.3.2 Versuchsdurchführung

Die Experteninterviews wurden zwischen November 2022 und Januar 2023 online per *Microsoft Teams* durchgeführt. Die Interviews umfassten zwischen 30:00 und 45:00 Minuten. Der Ablauf erfolgt in vier aufeinander aufbauenden Schritten. Nach einer kurzen Einführung in das „*NRW Forschungskolleg: Gestaltung von flexiblen Arbeitswelten – Menschenzentrierte Nutzung von Cyber-Physical Systems in Industrie 4.0*“ erfolgt die Beschreibung der entwickelten Methodik anhand der prototypischen Umsetzung mit dem Software-Werkzeug *Adobe XD* (siehe Bild 7-9). Dies geschieht anhand eines fiktiven Beispielszenarios I (siehe A9.2). Dadurch werden die Methode sowie die Interaktion mit dem Werkzeug verdeutlicht.

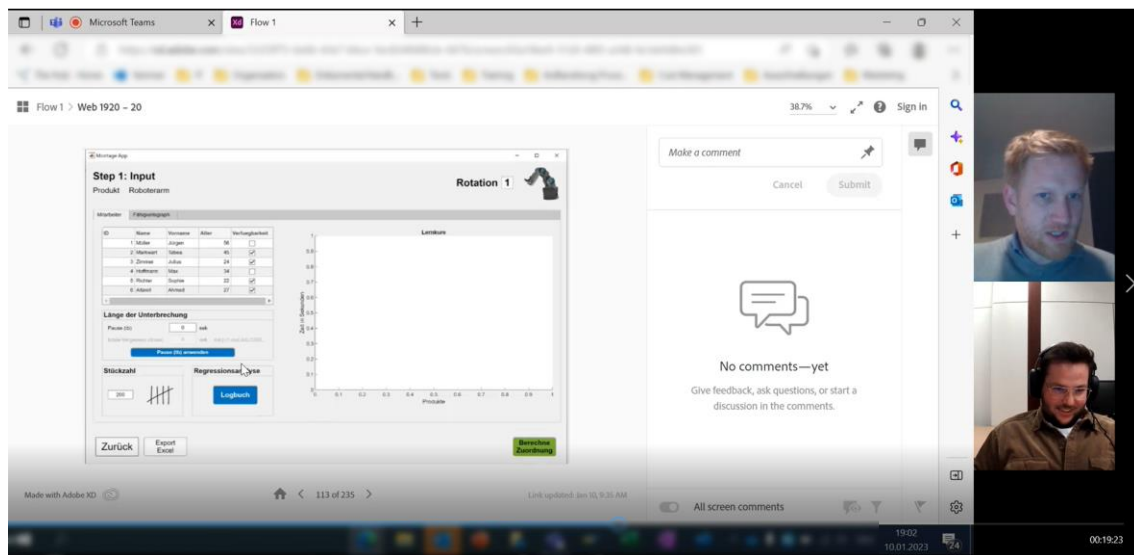


Bild 7-9: Aufnahme während der Think-Aloud-Methode innerhalb des Experteninterviews mit *Microsoft Teams*

Um Probanden nicht zu stark zu beeinflussen, werden die Einführung und weitere Hilfestellungen bewusst kurzgehalten (siehe hierzu [Nie07]). Industrievertreter dürfen explizit Fehler machen, denn das ermöglicht wichtige Erkenntnisse über das Nutzerverhalten und/oder Schwächen. Nach Vorstellung des Werkzeugs erfolgt die direkte Interaktion des Industrievertreters im Rahmen eines Thinking-Aloud-Tests mit dem Prototyp. Hierzu erhält der Industrievertreter ein weiteres Beispielszenario mit der Aufgabe, eine fähigkeitsorientierte Montageplanung und -steuerung unter Verwendung der entwickelten Metho-

²³ Weiterhin sind die Software-Werkzeuge *Dassault Systèmes SolidWorks*, *MathWorks Matlab* und *Microsoft Excel* kostenpflichtig und nicht bei den Industrievertretern vorhanden.

dik mit dem bereitgestellten Werkzeug durchzuführen. Beim Thinking-Aloud-Test sprechen die Probanden während der gesamten Nutzung alle Gedanken laut aus. Das umfasst speziell ihr Vorgehen, die Entscheidungsfindung, ihre Erwartungen und Kommentare. Im Anschluss daran werden in einer Nachbesprechung mit Leitfragen einzelne Sachverhalte und im Thinking-Aloud-Test offen gebliebene Fragen diskutiert (siehe A9.1.3). Das gesamte Interview wird in Abstimmung mit dem Industrievertreter zur späteren Auswertung aufgezeichnet.

7.3.3 Versuchsergebnisse

In den Experteninterviews bewerten alle vier Industrievertreter den Workflow der Methodik als innovativ und zugleich chronologisch logisch sowie nachvollziehbar. Dies zeigen auch die guten Ergebnisse der Testanwendung anhand des Beispielszenarios 2. Die vier Industrievertreter haben die gestellte Aufgabe mit dem bereitgestellten MockUp eigenständig gelöst. Der Zeitrahmen beträgt 3:03 Minuten bis 04:26 Minuten für die Durchführung des Szenarios. Mit Ausnahme von Anmerkungen zur Visualisierung sowie Interaktionsformen mit dem MockUp gab es während der Durchführung der Think-Aloud-Methode keine kritischen Anmerkungen der Industrievertreter. Bei zwei Industrievertretern gab es kurze Irritationen bei dem Button „Rotationen“ in *Step 0: Start* sowie eine Irritation bei der Ausgabe des bestimmten Personaleinsatzplans. Weiterhin bewerten alle vier Industrievertreter die Notwendigkeit einer technischen Unterstützung der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung als sehr hoch und die technische Umsetzung im MockUp als gut. Die wesentlichen Vorteile der Anwendung der Methodik werden in der Transparenz, der Steigerung der Flexibilität des Montagesystems sowie der Integration des arbeitsintegrierten Lernens gesehen. Demnach ermöglicht die Anwendung der Methodik die Generierung einer dynamisierten Qualifikationsmatrix. Diese Qualifikationsmatrix kann weiterhin als Teil des Qualitätsmanagements angesehen werden. Normen, wie die DIN EN ISO 9001 [DIN9001] sowie die IATF 16949 [IATF16949], fordern ein ordentliches Qualifikationsmanagement. Diese Normen schreiben vor, dass für Montageoperationen erforderliche Fähigkeiten bestimmt und dokumentiert werden. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass die Mitarbeiter die erforderlichen Fähigkeiten, die zur Durchführung der Montageoperation notwendig sind, besitzen oder erlangen. Weiterhin werden als großer Vorteil die Zeit- und Kostenersparnis sowie die Genauigkeit der Erhebung der Fähigkeiten gesehen. Zeit- und kostenintensive Zeitstudien, wie die REFA-Zeitaufnahme sowie Multimoment-Zeitmessverfahren, werden obsolet. Somit wird durch die konsistente Anwendung der Methodik die geforderte Nachweispflicht der Normen eingehalten. Des Weiteren wurde die Objektivität der Entscheidung auf der Grundlage etablierter Lernkurven als entscheidender Vorteil angesehen. Einflüsse durch subjektive Parameter der Schichtleitung werden somit gemindert, es kann wertfreier über die Leistung des Montagesystems diskutiert und emotionale Aspekte können herausgefiltert werden. Darauf aufbauend können laut den Experten durch die Produktionsleitung

einfacher standardisierte Methoden eingeführt und durchgesetzt werden. Sehr hohe Potenziale einer fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung werden von allen Industrievertretern in einer besseren Kapazitätsauslastung, besseren Kalkulationsbasis sowie einer höheren Produktivität gesehen (siehe A10). Kritisch wurde von Industrievertreter 3 die Nutzung von personengebundenen Daten im industriellen Kontext für Großkonzerne gesehen. Die unverschlüsselte Anwendung und Nutzung der personengebundenen Daten schätzt er als schwierig ein. Laut Industrievertreter 3 wird zur Umsetzung eine ausführliche Einbindung der Mitarbeiter in den Einführungsprozess notwendig. Industrievertreter 2 wünscht sich die Kollaborationsmöglichkeiten für Freigabeprozesse. Die weiteren Industrievertreter halten den Zuschnitt sowie den Umfang des Workflows für zweckmäßig und sehen eine Erweiterung als nicht sinnvoll an.

7.4 Usertests

Zusätzlich zu den Experteninterviews wird die Anwendung der Methodik in der Labormgebung überprüft.

7.4.1 Versuchsaufbau

Mithilfe der Usertests wird die Anwendung der Methodik geprüft. Im Gegensatz zu den Experteninterviews liegt hierbei der Fokus verstärkt auf der Nutzung des entwickelten Werkzeugs durch spätere Nutzer. Die Versuchsdurchführung erfolgt innerhalb der Forschungsinfrastruktur des Lehrstuhls für Produktentstehung im Heinz Nixdorf Institut. Hierzu ist der entwickelte digitale MockUp der Methodik auf einem Multitouch-Tisch installiert. Die Versuchsdurchführung umfasst einen Zeitumfang von circa 30 Minuten. Probanden für die Versuchsdurchführung sind sieben Studenten der Fakultät Maschinenbau der Universität Paderborn und zwei versuchsbegleitende Mitarbeiter des Lehrstuhls für Produktentstehung. Zur Analyse ist das Smart Automation Laboratory mit Kameras und Mikrofonen ausgestattet. Durch die Verwendung der Softwareprodukte *Viso* und *The Observer XT* der Firma Noldus BV wird die softwaregestützte, zeitlich synchronisierte Erfassung und Aufzeichnung von Video-Datenströmen ermöglicht. Die Beurteilung der Usertests erfolgt anhand der Anzahl an Irritationen der Probanden, des Systems Usability Scale und eines selbstentwickelten Fragebogens (siehe A9.1.2). Irritationen treten auf, wenn sich Probanden bezüglich der Funktionalität des Software-Werkzeugs äußern oder für einen Prozessschritt ungewöhnlich lange benötigen. Die Analyse erfolgt mittels der Software *The Observer XT*. Das System Usability Scale (SUS) von BROOKE [Bro96] ist eine etablierte, einfache und technologieunabhängige Methode zur Bewertung der Nutzerfreundlichkeit eines technischen Systems (siehe A9.1.1).

7.4.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchsdurchführung erfolgt in vier aufeinander aufbauenden Schritten. Bild 7-10 zeigt den Ausschnitt einer Durchführung im Smart Automation Laboratory. Zunächst wird den Probanden der Versuchsablauf vorgestellt. Anschließend erfolgt analog zum Experteninterview die Beschreibung der entwickelten Methodik anhand der prototypischen Umsetzung und eine Bedienungsanleitung gegeben (siehe A8.3). Dadurch werden die Methode sowie die Interaktion mit dem Werkzeug direkt verdeutlicht. Im Anschluss soll der Proband die menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung in Beispielszenario I und Beispielszenario II selbstständig durchführen. Bei der Versuchsdurchführung erfolgt eine videobasierte Überwachung der Bewegungen, Gesichtsausdrücke und Interaktionen der Probanden. Daraufhin füllen die Probanden den SUS-Fragebogen aus und haben die Möglichkeit, offen gebliebene Fragen anzusprechen.

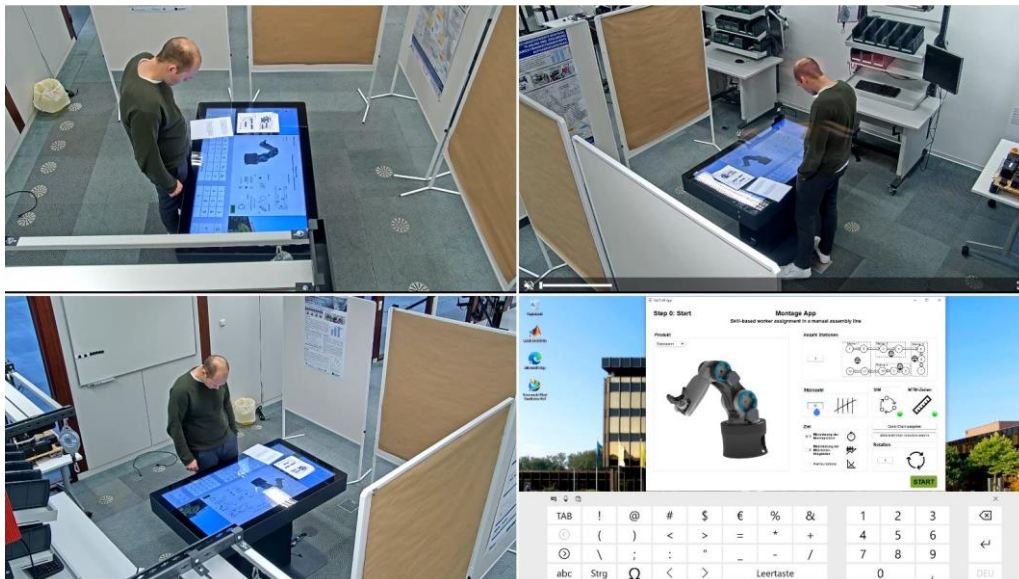


Bild 7-10: Durchführung des Usertests am Multitouch-Tisch im Smart Automation Laboratory

7.4.3 Versuchsergebnisse

Die sieben Probanden haben die gestellte Aufgabe mit dem bereitgestellten Software-Werkzeug eigenständig gelöst. Lediglich ein Proband (*Proband VI*) hat die Aufgabe nicht richtig gelöst. Der Zeitrahmen beträgt 4:28 Minuten bis 13:42 Minuten für die Durchführung beider Szenarien. Da das für die Probanden eine neue Arbeitsaufgabe ist, liegt dies absolut im Zeitrahmen. Die Ergebnisse des SUS-Fragebogens weisen auf eine hohe Nutzerfreundlichkeit hin. Der durchschnittliche SUS-Score beträgt 82,1 und der Median liegt bei 87,5, was bedeutet, dass die Nutzerfreundlichkeit von den Probanden als „gut“ beziehungsweise „exzellent“ (Schwellenwert 85,0) bewertet wurde. Bild 7-11 zeigt die ausführliche Zusammenfassung der Ergebnisse der Untersuchung der Nutzerfreundlichkeit.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Software-Werkzeug in jeder Kategorie des SUS-Fragebogens überdurchschnittlich gut abschneidet.

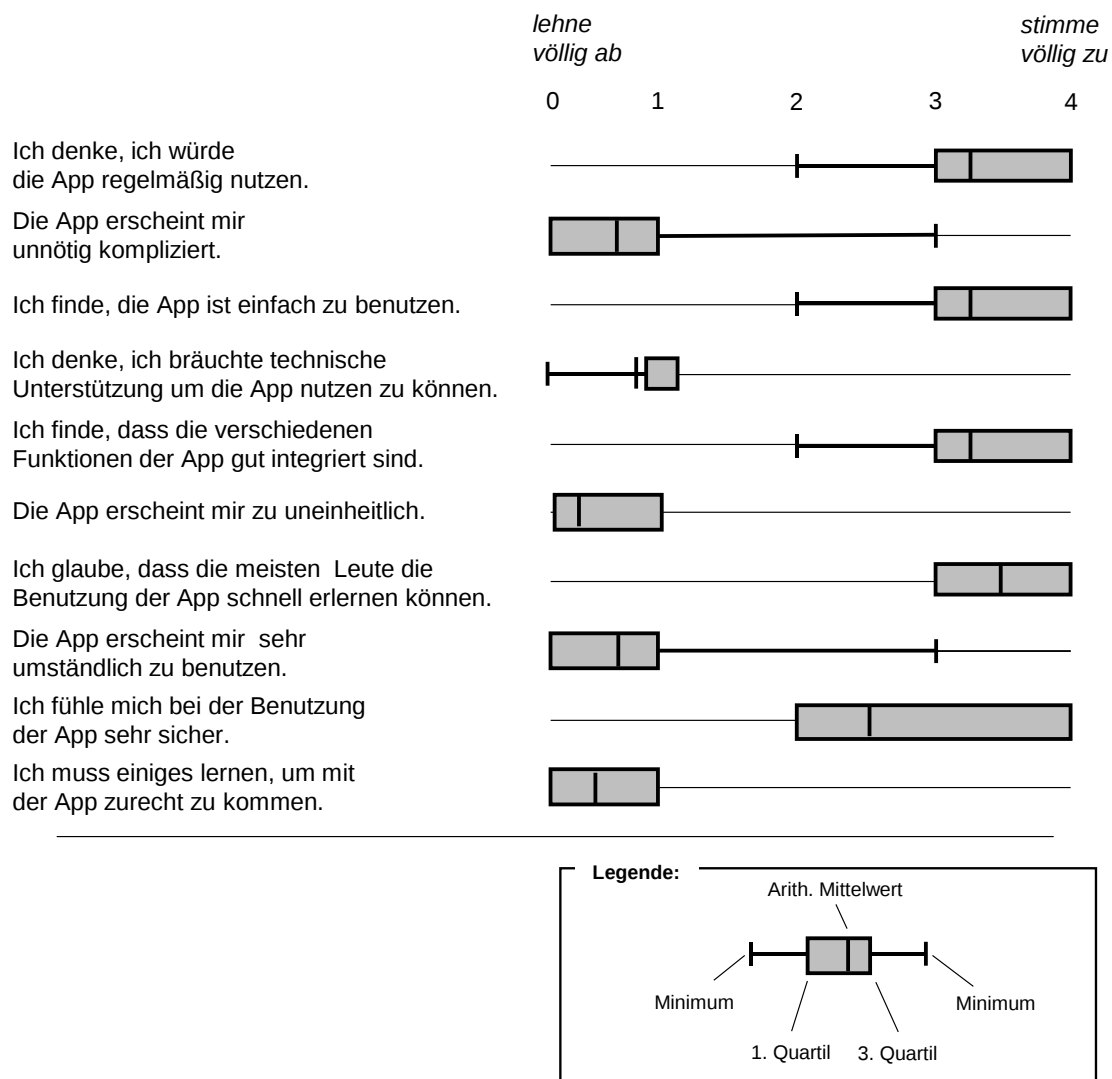


Bild 7-11: Ergebnisse des SUS-Fragebogens innerhalb des Usertests

Die positiven Fragen werden durchschnittlich mit über 3 („stimme der Aussage zu“) und negative Fragen mit unter 1 („lehne ab“) bewertet. Zudem liegen die jeweiligen Quantile (75 % der Antworten) innerhalb dieser Schranken. Eine Ausnahme bildet Frage 9 „Ich fühle mich bei der Benutzung der App sicher“. Diese Aussage wird nur leicht überdurchschnittlich beantwortet. Hier besteht also Verbesserungspotenzial innerhalb des Software-Werkzeugs (siehe A11). Weiterhin ergeben sich Erkenntnisse aus der Betrachtung der Videos und Anmerkungen der Probanden. Generell lässt sich festhalten, dass lediglich bei drei der sieben Probanden Irritationen bei der Anwendung aufgefallen sind. Hierbei waren es jeweils eine beziehungsweise zwei Irritationen. Irritationen sind an folgenden Stellen des Tests aufgetreten:

- *Finale Ausgabe des Personaleinsatzes*: Den Probanden war der mathematisch optimierte Personaleinsatzplan als finales Ergebnis nicht eindeutig genug kommuniziert (zwei Nennungen).
- *Felder, die auf vorherige Schritte der Montageplanung verweisen*: Felder, die auf die Montageplanung zurückgreifen (beispielsweise Fähigkeitsgraph) irritieren die Probanden (zwei Nennungen).
- *Umgang mit der Tastatur auf dem Multitouch-Tisch*: Das Öffnen der Windows-Tastatur ist für einen Probanden ein unnötiger Mehraufwand (eine Nennung).

Mit Ausnahme der „*Finalen Ausgabe des Personaleinsatzes*“ sind diese Irritationen nicht kritisch und werden durch die Nutzung und das Sammeln von Erfahrungen mit dem Software-Werkzeug abgebaut. Dennoch ergeben sich folgende Verbesserungspotenziale des Software-Werkzeugs, die leicht umzusetzen sind:

- Generierung einer *eindeutigeren Kommunikation des finalen Personaleinsatzplans*. Dies könnte beispielsweise durch eine Ausleitung einer PDF-Datei geschehen.
- *Verdeutlichung der Kennzeichnung von aktuell relevanten Buttons und Grafiken*. Dies kann beispielsweise durch ein Ausgrauen erfolgen.
- *Automatisiertes Öffnen der Windows-Tastatur* bei der Verwendung des Software-Werkzeugs.

7.5 Verifizierung der Anforderungen

Nach Abschluss der vier Testszenarien sowie Einzelprüfungen können die Anforderungen aus Kapitel 0 verifiziert werden. Dafür werden die Anforderungen analysiert und danach bewertet, ob sie im Rahmen der entwickelten Methodik umgesetzt und eingehalten werden. Die Analyse erfolgt nach einem einheitlichen Schema. Aufbauend auf der *Nennung der Anforderung*, werden *Erfüllungskriterium & Messmetrik* beschrieben. Abschließend erfolgt die *Bewertung* der durchgeführten Testszenarien (siehe Tabelle 7-1). Die Anforderungen werden jeweils im Rahmen der vier Anforderungsbereiche 1) Input-orientierte Anforderungen, 2) Anforderungen an Modell & Modellierung, 3) Anwendungsorientierte Anforderungen und 4) Ergebnisorientierte Anforderungen vorgestellt.

Input-orientierte Anforderungen

Req-1: Automatische Ableitung des Montagevorranggraphen

Anforderung: *Die Methodik muss fähig sein, CAD-Modelle automatisch in Montagevorranggraphen zu überführen.*

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Als „vollständig erfüllt“ gilt die Anforderung, wenn das Software-Werkzeug (siehe Abschnitt 5.8) ohne Einschränkung CAD-Modelle

verarbeiten und in Montagevorranggraphen überführen kann. Zur Überprüfung der Anforderung dienen die Testszenarien 1 & 2, in denen die CAD-Modelle der Beispielprodukte Zortrax Knickarmroboter und Drosselklappe verarbeitet und in Montagevorranggraphen überführt werden. Weiterhin wird ein separater Funktionstest im Smart Automation Laboratory des Lehrstuhls durchgeführt. Hierbei werden die Funktionen anhand der CAD-Modelle der Beispielprodukte Knickarmroboter, Drosselklappe, Standbohrmaschine, RC-Car und Greifer (siehe A9.3) überprüft. Die Montagevorranggraphen werden mit manuell erstellten Graphen verglichen.

Bewertung: Die Durchführung der Tests erfolgt auf einem Hochleistungslaptop des Lehrstuhls mit folgenden Daten: *Core i710850H/2,7GHz* sowie *RTX 300/ UHD Graphics*. Die Schrittweite der Kollisionsanalyse wird an das jeweilige Produkt angepasst. Die Laufzeiten des Rechners liegen zwischen 45 Minuten und 285 Minuten (siehe Tabelle 7-8). Man erhält deutlich geringere Ausführungszeiten, wenn die Visualisierung von *Dassault Systèmes SolidWorks* unterbunden wird. Bei vier der fünf Beispielprodukte wurde automatisch derselbe Montagevorranggraph erstellt, wie manuell erzeugt. Lediglich bei dem Beispielprodukt Greifer stimmen die Graphen nicht überein. Der Unterschied liegt bei einer Biegeverbindung (siehe Bild 7-12). Diese Umformungen, die beim Montageprozess entstehen, werden durch die genutzte Kollisionsanalyse nicht abgedeckt.

Tabelle 7-8: Laufzeiten der Kollisionsanalyse für die unterschiedlichen Produktmodelle

Produktmodell	Laufzeit
Knickarmroboter	285 min
Drosselklappe	170 min
Standbohrmaschine	110 min
RC-Car	45 min
Greifer	135 min

Das Ergebnis zeigt, dass die Kollisionsanalyse für Produkte mit Fügeverbindungen der Gruppe 4.5 Fügen durch Umformen DIN 8593-5 nur bedingt geeignet ist. Für die anderen Fügeverbindungen der Produkte gibt die Kollisionsanalyse die richtigen Montagevorranggraphen aus. Da diese Verbindungen für die betrachteten Industriebereiche entscheidend sind **wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

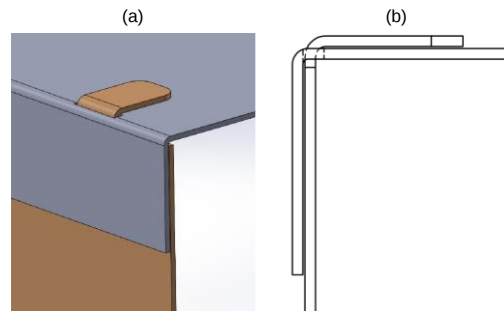


Bild 7-12: Biegeverlappung dünner Bleche als Beispiel für 4.5.2.9 Verlappen (a) 3-D-Ansicht; (b) technische Zeichnung der Seitenansicht

Req-2: Integration von Echtzeitdaten

Anforderung: Die Methodik muss über eine geeignete Schnittstelle Echtzeitdaten aus dem realen Montagesystem aufnehmen und verarbeiten können.

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn Echtzeitdaten korrekt in die Datenbank importiert und verarbeitet werden können. Echtzeit wird hierzu nach [ISO/IEC 2382] definiert als „pertaining to the processing of data by a computer in connection with another process outside *the computer according to time* requirements imposed by the outside process“. Zur Überprüfung der Anforderung dienen zum einen die Testszenarien 1 & 2, in denen Echtzeitdaten in die Datenbank hinzugefügt wurden. Zum anderen wurde ein separater Funktionstest im Smart Automation Laboratory des Lehrstuhls durchgeführt. Hierbei wurden in zehn Testszenarien Daten am Montagetisch erzeugt und mittels OPC UA verschickt. Dies geschieht mit der mobilen Lösung der entwickelten Applikation in IBM Node-Red. Die Montagetische (mit den Raspberry Pis), der Multitouch-Tisch (mit der *MathWorks-Matlab*-Applikation) sowie das mobile Endgerät (mit der *IBM Node-Red*-Applikation siehe A8.1) befinden sich im gleichen Netzwerk (Labor-PE_5G). Bei den Testszenarien wurden Datenmengen an den jeweiligen Tischen generiert und anschließend verschickt. Tabelle 7-9 zeigt die unterschiedlichen Mengen der Einträge je Montagestation für die Testszenarien. Innerhalb der Szenarien wurde die Montage eines Knickarmroboters (Testszenario 1) und von bis zu 50 Knickarmrobotern (Testszenario 10) betrachtet.

Tabelle 7-9: Übersicht über die Testszenarien zur Echtzeitfähigkeit des cyber-physischen Montagesystems

		Testszenario									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Montage- station	1	6	60	90	120	150	180	210	240	270	300
	2	10	100	150	200	250	300	350	400	450	500
	3	4	40	60	80	100	120	140	160	180	200
	4	12	120	180	240	300	360	420	480	540	600

Anzahl an Einträgen je Montagestation

Bewertung: Bei allen durchgeführten Testszenarien wurden die Daten in Echtzeit mittels OPC UA an den Multitouch-Tisch geschickt und zusammengeführt. Dies geschah in < 1 Sekunde, was für den Anwendungsfall einer Echtzeit entspricht. Aufgrund der geringen Dateigrößen von maximal $> 12,58$ KB (Montagestation 4 bei Testszenario 10) ist dies auch nicht verwunderlich. **Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Req-3: Verknüpfung mit etablierten Softwaresystemen

Anforderung: *Die Methodik darf neben der eigenen Entwicklungsumgebung nur etablierte Softwaresysteme von Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau nutzen.*

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn lediglich Softwaresysteme verwendet werden, die etabliert sind, sodass davon ausgegangen werden kann, dass Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau sie nutzen. Als Bewertungsgrundlage werden Lizenzbedingungen, Produktkosten sowie die Marktdurchdringung im Maschinen- und Anlagenbau herangezogen.

Bewertung: Bei der prototypischen Umsetzung der Methodik kommen die vier Softwarelösungen *Dassault Systèmes SolidWorks*, *MathWorks Matlab*, *IBM Node-Red* und *Microsoft Excel* zum Einsatz. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass jedes Unternehmen im Maschinen- und Anlagenbau ein CAD-System nutzt. Die umgesetzten Markos sind in ähnlicher Weise in vergleichbaren CAD-Systemen umzusetzen. Bei *MathWorks Matlab* handelt es sich um eine kommerzielle Software zur Lösung mathematischer Probleme. Es ist mit über acht Millionen Nutzern weit verbreitet. *IBM Node-Red* ist kostenlos und unterliegt einer Open-Source-Lizenz. Für die Nutzung spezifischer Online-Dienste können Kosten anfallen, jedoch nicht für die beschriebene Anwendung. *Microsoft Excel* ist kostenpflichtig, besitzt jedoch eine sehr hohe Marktdurchdringung. Dies bestätigen auch die Experteninterviews mit den Industrievertretern. Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.

Anforderungen an Modell & Modellierung

Req-4: Berücksichtigung der Montagereihenfolge

Anforderung: *Die Methodik muss in der Aufgabenzuordnung die Reihenfolge berücksichtigen, in der eine Montage des Produkts möglich ist.*

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Fließbandabstimmung nur eine zulässige Reihenfolge der Montage bestimmt. Hierzu wird die Funktion mittels der Montagevorranggraphen der Beispielprodukte Knickarmroboter, Drosselklappe, Standbohrmaschine, RC-Car und Greifer überprüft. Zu diesem Zweck werden die Montagevorranggraphen in Matrizen (Ausgabeform der Kollisionsanalyse) abgespeichert. Es werden unterschiedlich viele Montagestationen (von zwei bis sechs) getestet. Die Lösungen werden mit der jeweiligen Montageanleitung verglichen.

Bewertung: Diese Anforderung zielt auf das Systemelement „Fließbandabstimmung“ des Systemmodells (siehe Bild 6-1). Für alle 25 Beispielszenarien ergibt der Salmone-2 eine zulässige Lösung. Jede mögliche Zuordnung von Montageoperationen zu Montagestationen ist zulässig und das Produkt ist in der bestimmten Reihenfolge montierbar. **Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Req-5: Integration von Prognosen der Fähigkeitsentwicklung

Anforderung: Die Methodik muss die Fähigkeitsentwicklung von Mitarbeitern prognostizieren und in die Aufgabenzuordnung integrieren.

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Prognosen der Fähigkeitsentwicklung in der Aufgabenzuordnung der Methodik berücksichtigt werden. Zur Bewertung werden Ergebnisse aus dem Testszenario 1 Simulationsstudie genutzt. Hierbei werden vier unterschiedliche Personalstrukturen mit unterschiedlichen Erfahrungen und Lernraten der Mitarbeiter als Input für die Aufgabenzuordnung gegeben. Es wird geprüft, inwieweit die Methodik aufgrund der unterschiedlichen Inputs unterschiedliche Aufgabenzuordnungen vorschlägt.

Bewertung: Aus den vier unterschiedlichen Personalstrukturen ergeben sich im ersten Zyklus acht verschiedene Testszenarien (je Koordinationsansatz ein Testszenario). Die Ergebnisse des ersten Zyklus zeigen, dass sich innerhalb der acht Testszenarien sechs unterschiedliche Aufgabenzuordnungen in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Personalstrukturen ergeben. Dies macht deutlich, dass die Prognose der Fähigkeitsentwicklung innerhalb der Aufgabenzuordnung berücksichtigt ist. **Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Tabelle 7-10: Zuordnung der Mitarbeiter innerhalb der acht Testszenarien zur Integration von Prognosen der Fähigkeitsentwicklung

		Montagestation			
		1	2	3	4
Testszenario	1	3	4	1	2
	2	3	1	4	2
	3	2	3	1	4
	4	3	1	4	2
	5	2	4	3	1
	6	4	1	3	2
	7	2	3	1	4
	8	3	1	4	2

ID der zugeordneten Mitarbeiter je Station

Req-6: Berücksichtigung der Ähnlichkeit der Montageoperationen

Anforderung: Die Methodik muss Ähnlichkeiten von Montageoperationen bestimmen und bei der Fähigkeitsentwicklung der Mitarbeiter berücksichtigen.

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Ähnlichkeiten der Montageoperationen in der Fähigkeitsentwicklung der Methodik berücksichtigt werden. Zur Bewertung werden Simulationen genutzt. Es erfolgt ein weiterer separater Funktionstest, in dem eine Durchführung der Montage von zwei ähnlichen Knickarmrobotern verglichen wird. Es werden die gleichen Mitarbeiter für die Montage der Knickarmroboter eingesetzt. Bei dem Knickarmroboter₂ werden drei Montageoperationen an der vierten Montagestation (S_4) von Schraubverbindungen (4.3.1) in Klebeverbindungen (4.8.1) geändert, wodurch sich ein anderer Fähigkeitsgraph ergibt. Bild 7-13 zeigt die beiden unterschiedlichen Fähigkeitsgraphen der Knickarmroboter. Es wird geprüft, inwieweit die Methodik aufgrund der unterschiedlichen Fähigkeitsgraphen unterschiedliche Fähigkeitsentwicklungen prognostiziert.

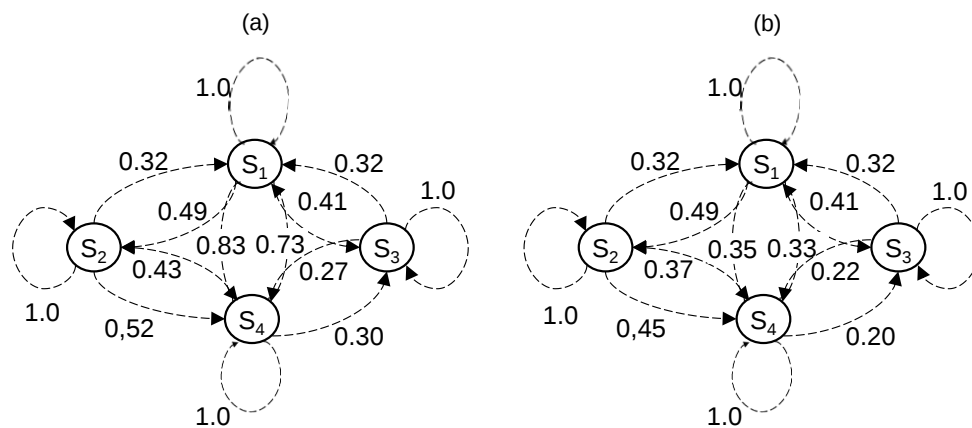


Bild 7-13: Fähigkeitsgraphen zwei ähnlicher Knickarmroboter (a) Knickarmroboter₁ und (b) Knickarmroboter₂

Bewertung: In Bild 7-14 sind beispielhaft die Lernkurven der Mitarbeiter für die Zyklen zwei bis vier an Montagestation 4 in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Fähigkeitsgraphen dargestellt. Die Ergebnisse zeigen deutlich den Einfluss der Ähnlichkeit der Montageoperationen auf die Lernkurven der Mitarbeiter. Da die Montageoperationen bei dem Knickarmroboter₁ eine höhere Übereinstimmung als beim Knickarmroboter₂ besitzt, können Erfahrungen besser genutzt werden und die Leistung des Montagesystems verbessert sich. Die Ergebnisse der Ähnlichkeit wurden bereits in einem Experteninterview als valide beurteilt, siehe hierzu [GRW21]. **Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

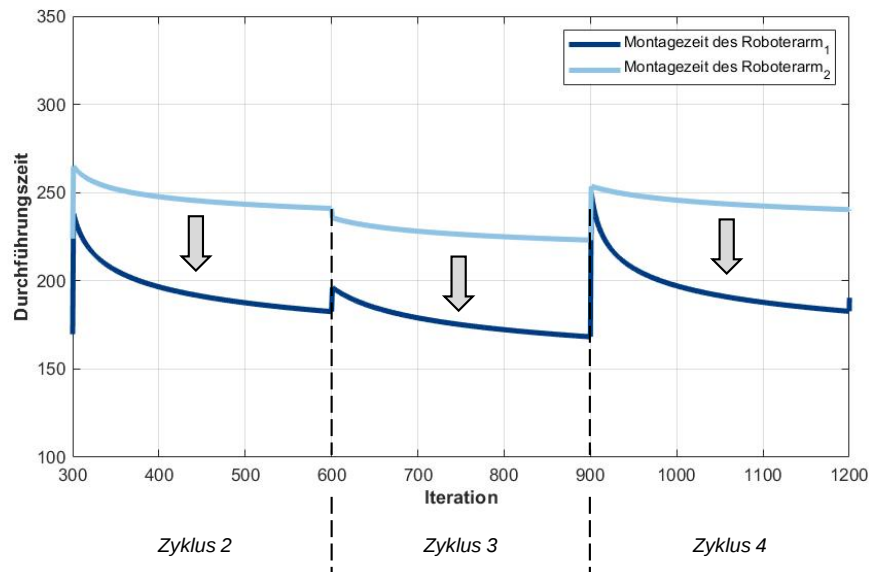


Bild 7-14: Einfluss der Fähigkeitsgraphen auf die Ausführungszeit

Req-7: Verschiedene Optimierungsziele

Anforderung: Die Anwendung der Methodik muss die Auswahl aus unterschiedlichen Optimierungszielen ermöglichen.

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn Nutzer die Möglichkeit besitzen, aus einer Anzahl > 1 von Koordinationsansätzen auszuwählen und mit diesen Möglichkeiten unterschiedliche Optimierungsziele zu verfolgen.

Bewertung: Mit der langfristigen fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung sowie der kurzfristigen zeitorientierten Aufgabenzuordnung besitzt die entwickelte Methodik zwei unterschiedliche Koordinationsansätze. Beide Ansätze besitzen unterschiedliche Optimierungsziele. Zum einen wird die Verbesserung der Fähigkeiten der Mitarbeiter maximiert und zum anderen die Zykluszeit der geforderten Produkte minimiert. Beide Optimierungen besitzen unterschiedliche Optimierungsalgorithmen (Ungarische Methode und Engpassproblem nach PUNDIR ET AL.) und führen, wie in Testszenario 1 Simulationsstudie dargestellt, zu unterschiedlichen Aufgabenzuordnungen. **Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Anwendungsorientierte Anforderungen

Req-8: Verständlicher Workflow

Anforderung: Der Workflow der Methodik muss als verständlich und intuitiv empfunden werden.

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn Industrievertreter den Workflow der Methodik als nachvollziehbar und verständlich bewerten. Zur Bewertung werden wiederum Ergebnisse aus dem Testszenario 3 Experteninterview genutzt. Innerhalb der Durchführung der Methode Thinking-Aloud wird

festgestellt, ob der Workflow der Methodik nachvollziehbar und verständlich ist. Die Kommentare der Industrievertreter, die auf Verständlichkeitsprobleme hinweisen, werden hierzu in die drei Stufen *grün = unproblematisch*, *gelb = teilweise problematisch* und *rot = kritisch* eingeteilt. Die durchschnittliche Anzahl von problematischen Kommentaren (gelbe Stufe) muss ≤ 2 und die Anzahl der kritischen Kommentare der roten Stufe muss ≤ 1 je Industrievertreter sein.

Bewertung: Innerhalb des Testszenarios 3 Experteninterview haben fünf Industrievertreter den Workflow der Methodik mithilfe der Methode Thinking-Aloud beurteilt (siehe Tabelle 7-11). Die fünf Industrievertreter bewerten den Workflow als nachvollziehbar und sinnvoll.

Tabelle 7-11: Ausschnitt relevanter Kommentare der Industrievertreter zum Walkthrough der Methodik

Teilweise problematisch Situation		Kritische Situation
1) Button „Rotation“ bei Step 0 : Start	(2)	--
2) Eindeutige Kommunikation des ausgewählten Personaleinsatzes“	(1)	--
In Klammern die Anzahl an Nennungen		

Sowohl bei der angeleiteten Nutzung des digitalen MockUps als auch in dem selbstständig durchgeführten Testszenario haben die Probanden die Ihnen gestellte Aufgabe gelöst. Hierzu benötigten Sie zwischen 3:03 Minuten bis 04:26 Minuten. Tabelle 7-11 zeigt einen verkürzten Ausschnitt der relevanten Kommentare der Industrievertreter. Lediglich bei einer Durchführung wurde eine Situation als kritisch beurteilt. Ansonsten sind den Industrievertretern insgesamt zwei teilweise problematische Elemente der Methodik aufgefallen. **Die Anforderung wird als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Req-9: Einfache Anwendung

Anforderung: *Die Anwendung der Methodik muss als einfach empfunden werden.*

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn Nutzer die Anwendung der Methode sowie die Bedienung des Software-Prototypen als einfach bewerten. Zur Bewertung wird das Testszenario 4 *Usertest* genutzt. Berücksichtigt werden die Ergebnisse des System-Usability-Scale(SUS)-Fragebogens. Ein SUS-Score von größer 50 steht nach BANGOR ET AL. [BKM09] für eine Nutzerfreundlichkeit von „O. K.“.

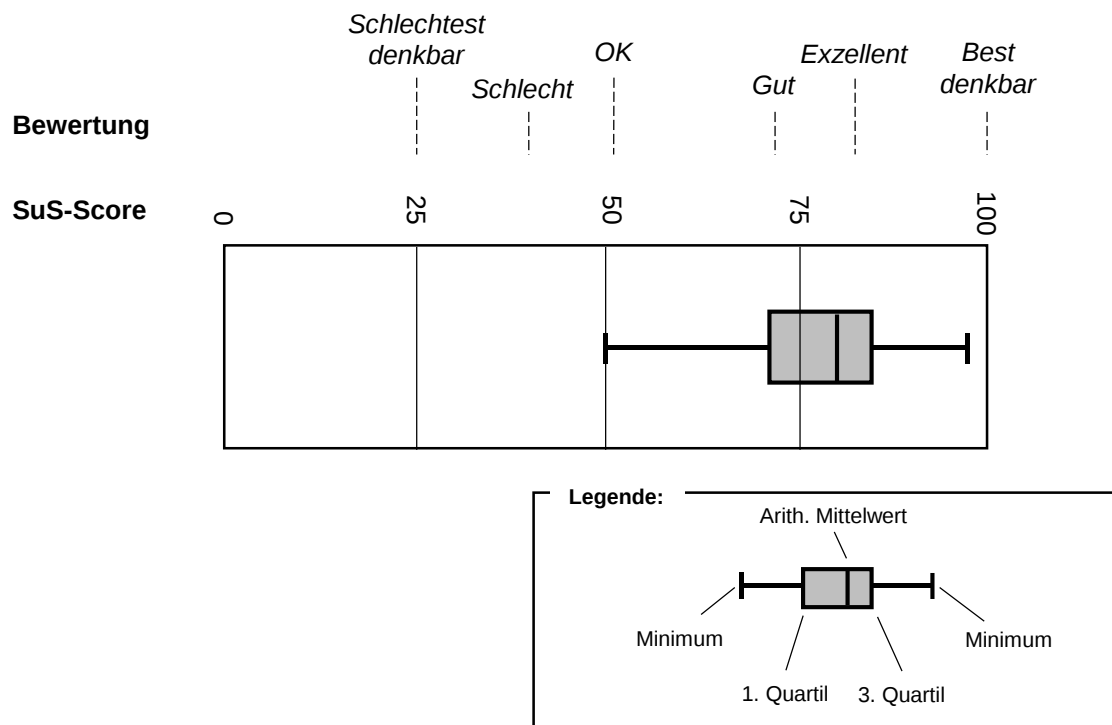


Bild 7-15: SUS-Score des Usertests

Bewertung: Innerhalb des Testszenarios 4 Usertest haben sieben Probanden die Benutzerfreundlichkeit anhand des SUS-Fragebogens bewertet. Durchschnittlich wurde das Software-Werkzeug mit einem SUS-Score von 82,1 bewertet. Die Bewertung liegt deutlich über dem definierten Schwellenwert. Mit einem durchschnittlichen SUS-Score von 82,1 und einem Median von 87,5 kann die Nutzerfreundlichkeit als „gut“ beziehungsweise „exzellent“ (Schwellenwert 85,0) bezeichnet werden. Bild 7-15 zeigt zusammenfassend die Verteilung der SUS-Scores über die Probanden. **Die Anforderung wird als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Req-10: Verständlicher Vorschlag für den Arbeitseinsatz

Anforderung: Der Vorschlag für den Arbeitseinsatz muss als verständlich und nachvollziehbar wahrgenommen werden.

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Nutzer den Arbeitseinsatz verständlich finden. Zur Bewertung dieser Anforderung wird wiederum das Testszenario 4 Usertest herangezogen. Die Anzahl der Iterationen je Proband muss durchschnittlich ≤ 2 sein.

Bewertung: Innerhalb des Testszenarios 4 Usertest wurde die Verständlichkeit der Methode sowie deren technische Umsetzung geprüft. Generell lässt sich festhalten, dass lediglich bei drei der sieben Probanden Irritationen bei der Anwendung aufgefallen sind. Es entstanden einmal eine sowie zweimal zwei Irritationen. Dies entspricht einer durch-

schnittlichen Irritation von 0,71. Mit Ausnahme der Irritation „*Finale Ausgabe des Personaleinsatzes*“, die bei zwei von sieben Probanden entstand (vergleiche hierzu 7.4.3), sind die Irritationen unkritisch. **Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Output-orientierte Anforderungen

Req-11: Ausreichende Genauigkeit für die vorgesehenen Anwendungsfälle

Anforderung: *Das Ergebnis der Prognosemodelle muss für die primär unterstützte Entscheidungssituation hinreichend genau sein.*

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Mithilfe der Kennzahl Mean Absolute Percentage Error (MAPE) wird die Prognosegüte der entwickelten Methodik überprüft. Hierzu wird sie in Vergleich zu den etablierten Ansätzen, die sich auf MTM-Zeiten berufen, gesetzt. Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Prognose der entwickelten Methodik eine höhere Genauigkeit als die etablierten Ansätze besitzt.

Bewertung: Die Ergebnisse innerhalb des Testszenarios 1 Simulationsstudie zeigen, dass durch die Integration der Fähigkeiten der Mitarbeiter durch das Lern-Vergessenskurven-Modell die Prognosegenauigkeit deutlich steigt. Die Prognosen besitzen mit den Ergebnissen der Langzeitstudien von JABER & KHER [JK04] eine deutlich höhere Genauigkeit. Speziell in den frühen Zyklen, in denen die Mitarbeiter noch wenig Erfahrung in der Station gesammelt haben, sind die MTM-Zeiten sehr ungenau und spiegeln nicht die realen Montagezeiten wider. Tabelle 7-6 zeigt den Vergleich der Kennzahl MAPE der drei Prognosen mit einem heterogenen Personal. Innerhalb des Testszenarios 2 hat sich herausgestellt, dass dies auch auf die reale Durchführung innerhalb des Montagesystems zutrifft. **Daher wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Req-12: Leistungssteigerung der Montage

Anforderung: *Die Anwendung der Methodik muss zu einer Leistungssteuerung des Montagesystems führen.*

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Die Leistungssteuerung der Montage wird über die beiden etablierten Kennzahlen Nutzungsgrad und Ausbringungsrate definiert. Der Nutzungsgrad gibt den Zeitanteil der wertschöpfenden Arbeit an. Hingegen definiert die Ausbringungsrate die Ausbringungsmenge je Zeiteinheit. Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Montage durch die Anwendung der Methodik einen höheren Nutzungsgrad sowie eine höhere Ausbringungsrate als bei einer Anwendung eines etablierten MTM-basierten Ansatzes der REFA besitzt.

Bewertung: Mithilfe des Testszenarios 1 Simulationsstudie lässt sich die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung über einen ausreichend langen Zeitraum mit dem Ansatz der REFA vergleichen. Die Simulationsstudie umfasst den Umfang von 50 Zyklen á 100 montierte Einheiten für fünf unterschiedliche Personalstrukturen. In Tabelle 7-12 und Tabelle 7-13

werden die beiden Koordinationsansätze der entwickelten Methodik mit dem Ansatz der REFA anhand der beiden Kennzahlen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistung der Montage je nach Koordinationsansatz variiert. Dies trifft speziell auf die Ausbringungsleistung zu. Der kurzfristige zeitorientierte Ansatz erzielt bei jeder Personalstruktur durchgehend eine höhere Ausbringungsrate als der Ansatz der REFA, was aber nicht für den fähigkeitsorientierten Ansatz gilt. Hierbei treten deutliche Schwankungen je Zyklus auf. Speziell lässt sich feststellen, dass der Ansatz nach REFA in den frühen Zyklen eine deutlich höhere Ausbringungsrate besitzt. Dies trifft vor allem bei homogenen Personalstrukturen mit ähnlich schwierigen Aufgaben je Montagestation zu.

Tabelle 7-12: Mittelwerte der Ausbringungsleistung je Koordinationsansatz für die fünf unterschiedlichen Personalstrukturen in der Simulationsstudie

	Fähigkeitsorientiert		Zeitorientiert		MTM-basiert	
	Arith. Mittel	Median	Arith. Mittel	Median	Arith. Mittel	Median
Zwei-Gruppen-Personal	0.0139	0.0145	0.0134	0.0142	0.0133	0.0141
Homogenes Personal & heterogene Stationen	0.0172	0.0175	0.0185	0.0188	0.0184	0.0187
Homogenes Personal & homogene Stationen	0.0170	0.0170	0.0185	0.0188	0.0184	0.0187
Homogenes Personal mit Vorerfahrungen	0.0105	0.0108	0.0112	0.0115	0.0111	0.0115
Heterogenes Personal	0.0161	0.0164	0.0178	0.0182	0.0157	0.0152

Der Nutzungsgrad der entwickelten Methodik ist durchschnittlich bei beiden Koordinationsansätzen der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung höher als bei dem Ansatz von REFA. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Methodik speziell bei der heterogenen Personalstruktur höhere Systemleistungen der Montage erzielt. **Aufgrund der Ergebnisse der Simulationsstudie wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.**

Req-13: Langfristige Verbesserung

Anforderung: Die Anwendung der Methodik muss zu einer langfristigen Verbesserung des Montagesystems führen.

Tabelle 7-13: Mittelwerte des Nutzungsgrads je Koordinationsansatz für die fünf unterschiedlichen Personalstrukturen in der Simulationsstudie

	Fähigkeitsorientiert		Zeitorientiert		MTM-basiert	
	Arith. Mittel	Median	Arith. Mittel	Median	Arith. Mittel	Median
Zwei-Gruppen-Personal	0.8236	0.8470	0.8135	0.8149	0.8160	0.8643
Homogenes Personal & heterogene Stationen	0.8529	0.8689	0.8935	0.8855	0.8749	0.8707
Homogenes Personal & homogene Stationen	0.8581	0.8700	0.9200	0.9056	0.9239	0.9317
Homogenes Personal mit Vorerfahrungen	0.7168	0.7253	0.7437	0.7372	0.7534	0.7682
Heterogenes Personal	0.8371	0.8639	0.9043	0.9008	0.8122	0.7589

Erfüllungskriterium & Messmetrik: Neben der kurzfristigen Verbesserung der Leistung des Montagesystems sind auch die langfristige Verbesserung der Montage sowie die Entwicklung von Fähigkeiten der Mitarbeiter des Montagesystems von entscheidender Bedeutung. Die Anforderung an die langfristige Verbesserung wird mit den Kennzahlen Zuwachsrates und Fähigkeitsentwicklung validiert. Die Zuwachsrates beschreibt die Steigerung der Ausbringungsmenge pro Zeiteinheit. Die Fähigkeitsentwicklung wird definiert als die Steigerungen der Fähigkeiten der Mitarbeiter pro Zeiteinheit. Die Anforderung gilt als „vollständig erfüllt“, wenn die Mitarbeiter durch die Anwendung der Methodik ein höheres Fähigkeitsniveau erreichen als bei der Anwendung eines etablierten MTM-basierten Ansatzes der REFA.

Bewertung: Wiederum lässt sich mit dem Testszenario 1 Simulationsstudie die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung über einen ausreichend langen Zeitraum mit dem Ansatz der REFA vergleichen. Der Verlauf der Entwicklung ist jedoch je nach Koordinationsansatz unterschiedlich. Innerhalb der zeitorientierten Montageplanung und -steuerung erreicht das Fähigkeitsniveau der Mitarbeiter früher ein Plateau. Dies liegt daran, dass der Koordinationsansatz in der Simulationsstudie Experten für einzelne Montagestationen ausbildet. Im Gegensatz zu den anderen beiden Ansätzen arbeiten die Mitarbeiter nur an zwei Montagestationen. Bei homogenen Personalstrukturen führt der Ansatz nach REFA zu ähnlich guten Ergebnissen wie die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung, jedoch wird in heterogenen Strukturen in der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung ein höheres Fähigkeitsniveau der Mitarbeiter erreicht. Die Ergebnisse verdeutlichen wiederum die unterschiedlichen Ziele der beiden Koordinationsansätze. Besonders der langfristige, fähigkeitsorientierte Ansatz verfolgt das Ziel der Fähigkeitsentwicklung. In Tabelle 7-14 werden die beiden Koordinationsansätze der entwickelten Methodik mit dem Ansatz der REFA anhand der Zuwachsrates verglichen.

Tabelle 7-14: Mittelwerte der Zuwachsrates je Koordinationsansatz für die fünf unterschiedlichen Personalstrukturen in der Simulationsstudie

	Fähigkeitsorientiert		Zeitorientiert		MTM-basiert	
	Arith. Mittel	Median	Arith. Mittel	Median	Arith. Mittel	Median
Zwei-Gruppen-Personal	2.98	0.73	0.80	0.54	1.13	1.03
Homogenes Personal & heterogene Stationen	2.30	4.83	0.91	4.33	0.94	0.37
Homogenes Personal & homogene Stationen	1.99	0.81	0.91	4.33	0.94	0.37
Homogenes Personal mit Vorerfahrungen	2.23	1.00	2.16	0.50	2.14	0.40
Heterogenes Personal	1.94	1.00	1.45	1.00	2.02	1.00

Zuwachsrates in [%]

Zunächst weisen die drei Koordinationsansätze innerhalb der Simulationsstudie Zuwachsrates im Bereich von 0,91 % bis 2,93 % auf. Weiterhin fällt bei der Betrachtung der Zuwachsrates auf, dass die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung die höchsten Zuwachsrates aufweist, wohingegen die anderen beiden Koordinationsansätze innerhalb der

Simulation ähnliche Zuwachsraten erzielen. Bei der Betrachtung der Mediane fallen zwei Ausschläge innerhalb der zeitorientierten Aufgabenzuordnung auf. Diese sind bei Betrachtung der Ergebnisse (siehe Abschnitt 7.1.3) aufgrund der klaren Ausprägung mit Expertentum zu erklären. Die Ergebnisse der Fähigkeitsentwicklung zeigen, dass in jedem Ansatz die Fähigkeiten der Mitarbeiter im Zeitverlauf ansteigen. ***Aufgrund der Ergebnisse der Simulationsstudie wird die Anforderung als „vollständig erfüllt“ betrachtet.***

7.6 Zusammenfassung & kritische Reflexion der Verifizierung

Die vier Testszenarien sowie die Verifizierung der Anforderungen zeigen, dass die entwickelte Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung die 13 Anforderungen vollständig erfüllt. In Tabelle 7-15 ist die Anforderungserfüllung dargestellt. Hierzu haben ein klares wissenschaftliches Vorgehen mit einer systematischen Erhebung der Anforderungen auf Basis von Use Cases sowie Validierungskriterien und Messmetriken beigetragen. Die breit aufgestellte Verifizierung mit vier entwickelten Prüfständen hat eine umfassende Prüfung der Methodik sowie Prüfung der Anwendung von späteren Nutzern ermöglicht. Auf diesem Weg konnte ein wesentlicher Beitrag zur Forschung menschenzentrierter Montageplanung und -steuerung geleistet werden. Nachfolgend werden zunächst die Forschungsfragen (siehe Kapitel 1) beantwortet und anschließend Verbesserungspotenziale bei der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung beschrieben.

Limitation der Verifizierungsergebnisse

Die Aussagekraft der Ergebnisse der Verifizierung ist beschränkt. Grund sind die Beschränkungen der Diversität der Beispielprodukte und Probanden sowie die Limitation der Anzahl an Versuchsdurchführungen und der Beobachtungszeiträume. Die Durchführung der Testszenarien erfolgte anhand der beiden Beispielprodukte Knickarmroboter und Drosselklappe. Daher ist die **Repräsentativität der Beispielprodukte** limitiert. Mithilfe von Experteninterviews aus den Branchen Automobilindustrie und Luftfahrt sowie Vorstudien im Bereich der zivilen Sicherheit wurden erste Hinweise auf eine Übertragbarkeit der entwickelten Methodik auf andere Branchen erfasst. Die **Diversität der Probanden** in Testszenarien ist begrenzt. In der Probandenstudie dienten Studenten als Probanden. Auch wenn sie sich in einer technischen Ausbildung befinden, sind sie nur begrenzt repräsentativ für Mitarbeiter in der Montage. Weiterhin ist die **Anzahl der Versuchsdurchführungen** und **der Beobachtungszeiträume** für die Probandenstudie begrenzt. Eine Langzeitstudie im industriellen Kontext ist notwendig, um das Potenzial der entwickelten Methodik gesamtheitlich zu bestimmen. Um der genannten Einschränkung entgegenzuwirken, wurde parallel eine Simulationsstudie mit Daten aus vorherigen Studien durchgeführt. Um unterschiedliche Anwendungsfälle abzudecken, wurden zudem die Input-Variablen des Simulationsmodells variiert. Für die Experteninterviews wurden Personen aus unterschiedlichen Arbeitsbereichen der industriellen Praxis ausgewählt, um

Diversität zu gewährleisten. Die Usertests erfolgten wiederum mit Studenten. Weiterhin ist zu beachten, dass dies im Kontext der Lehrveranstaltung „Digitale Fabrik“ erfolgt ist.

Tabelle 7-15: Erfüllungsgrad der Anforderungen

Kategorie	Anforderung	Erfüllungsgrad
Input	Req-1: Verarbeitung von CAD-Daten	●
	Req-2: Integration von Echtzeitdaten	●
	Req-3: Verknüpfung mit etablierten Softwaresystemen	●
Modell & Modellierung	Req-4: Berücksichtigung der Montagereihenfolge	●
	Req-5: Integration von Prognosen der Fähigkeitsentwicklung	●
	Req-6: Berücksichtigung der Ähnlichkeit von Montageoperationen	●
	Req-7: Auswahl von verschiedenen Optimierungszielen	●
Anwendung	Req-8: Verständlicher Workflow	●
	Req-9: Einfache Anwendung	●
	Req-10: Verständlicher & nachvollziehbarer Vorschlag für den Arbeitseinsatz	●
Output	Req-11: Genauigkeit der vorgesehenen Anwendungsfälle	●
	Req-12: Leistungssteigerung der Montage	●
	Req-13: Langfristige Verbesserung	●

7.7 Fazit der Forschungsergebnisse

In diesem Abschnitt wird der Beitrag der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung für die Wissenschaft und Praxis aufgezeigt. Dies erfolgt anhand der Beantwortung der Forschungsfragen aus Abschnitt 1.2.

RQ1) Welche Humanfaktoren haben den größten Einfluss auf die Systemleistung eines Montagesystems?

Die entwickelte Methodik nutzt zur Modellierung der Mitarbeiter die Humanfaktoren Alter, Erfahrung, Lernen und Vergessen. Grundlage für die Auswahl ist eine systematische Literaturrecherche bestehender arbeitswissenschaftlicher Studien. Die Erkenntnisse aus der Analyse der Studienergebnisse wurden in den Interviews mit Industrievertretern bestätigt.

RQ2) Welche Ansätze eignen sich, um Prognosen der menschlichen Leistung innerhalb eines Montagesystems auf Basis von Humanfaktoren mathematisch zu berechnen?

Die Methodik bietet erstmals ein Prognosemodell, das alle relevanten Humanfaktoren in der Montage berücksichtigt. Seine Grundlage ist die mathematische Modellierung. Hierzu werden Erkenntnisse aus unterschiedlichen bestehenden Lernkurven-Modellen und weiteren arbeitswissenschaftlichen Studien in den Anwendungsfall der Montage integriert. Ausgangsbasis ist das Modified-Learning-Curve-Modell nach JABER & KHER, das um montagespezifische Erkenntnisse von ULLRICH erweitert wird. Weiterhin werden die Erkenntnisse der altersbedingten Änderungen der Montageleistung von ABUBAKER & WANG bei der Modellierung berücksichtigt. Eine zusätzliche Erweiterung stellen die Interdependenzen zwischen den Montageoperationen dar. Sowohl die Berücksichtigung als auch die Bestimmung der Interdependenzen ist neu. Die Bestimmung der Interdependenzen basiert auf der Anwendung von drei unterschiedlichen Methoden zur Bestimmung der semantischen Ähnlichkeiten auf Basis produktionspezifischer Ontologien. Die Probandenstudie im Rahmen der Validierung hat gezeigt, dass das entwickelte Prognosemodell für das ausgewählte Fallbeispiel einen deutlichen Nutzen hat.

RQ3) Wie können echtzeitnahe Daten der Ausführung in das mathematische Modell zur Prognose zukünftiger Ausführungen integriert werden?

Ein Alleinstellungsmerkmal der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung ist die Einbindung von echtzeitnahen Daten in die Prognose der Fähigkeitsentwicklung der Mitarbeiter. Dadurch entstehen individuelle Mitarbeiter-Lernkurven-Modelle, die die Prognose verbessern. Zur Aufnahme der Daten wird ein cyber-physisches Montagesystem benötigt, das eine Kommunikation, z. B. über OPC UA, zwischen Montagestationen und Leitsystem ermöglicht. Die echtzeitnahen Daten werden über den Einsatz von Data-Mining-Verfahren in das Prognosemodell der Leistung der Mitarbeiter eingebunden. Aufgrund der einfachen Anwendungen, der Verständlichkeit sowie der guten Resultate wurde die Methode der kleinsten Quadrate als lineare Regressionsanalyse zur Adaption ausgewählt. Dies bildet den digitalen Zwilling der Mitarbeiter für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung in der Montage.

RQ4) Wie sehen Optimierungsalgorithmen aus, die die Mitarbeiterzuordnung langfristig fähigkeitsorientiert sowie kurzfristig zeitorientiert auf Basis der Prognosen verbessern?

Die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung besitzt zwei Koordinationsansätze mit unterschiedlichen Zielfunktionen. Zur Optimierung wurden bestehende Algorithmen aus dem Bereich Operations Research analysiert und hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit für die gegebene Mo-

dellierung bewertet. Darauf aufbauend wurden etablierte Lösungsalgorithmen ausgewählt. Es handelt sich bei der langfristigen zeitorientierten Aufgabenzuordnung um die Ungarische Methode und bei der kurzfristigen zeitorientierten Aufgabenzuordnung um den Algorithmus für das Engpasszuordnungsproblem nach PUNDIR ET AL. [PPS+15].

Verbesserungsvorschlag für die entwickelte Methodik

Durch die umfangreiche Validierung der entwickelten Methodik haben sich Verbesserungspotenziale der Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung ergeben:

Der Vorgehensschritt **automatisierte Bestimmung des Montagevorranggraphen** der Methodik ist aufgrund der Visualisierung sehr rechenintensiv. In Abhängigkeit von den zu montierenden Bauteilen und -gruppen nimmt die erforderliche Rechenzeit zu. Daher ist für die Montageplanung von komplizierten und komplexen Produkten der Einsatz von Hochleistungsrechnern empfohlen. Dies kann durch die Verwendung von Cloud-Computing, Co-Simulation und eigenen Hochleistungsrechnern erfolgen. Bei der Verwendung von Cloud-Computing und Co-Simulation ist aufgrund der sensiblen Unternehmensdaten die IT-Security explizit zu berücksichtigen. Ein weiterer Verbesserungsvorschlag des Vorgehensschritts liegt in der Erweiterung um weitere Fügeverfahren. Aufgrund der Verwendung einer Kollisionsanalyse sind spezifische Fügeverfahren (wie beispielsweise 4.5.2.9 *Biegeverlappen*) ausgeschlossen. Für die Erweiterung sind zum Beispiel Kombinationen aus Kollisionsanalyse und lernendem Graph zu erforschen. Innerhalb der **Entscheidungsunterstützung für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung** erfolgt die Optimierung für jeden Zyklus einzeln. Speziell für die langfristige fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung erscheint eine zyklusübergreifende Optimierung sinnvoll. Die bestehenden Optimierungsalgorithmen können in leicht adaptierter Form genutzt werden. Der zyklusübergreifende Einsatz benötigt jedoch die Erforschung geeigneter Lern- und Trainingskonzepte bei der manuellen Montage.

8 Zusammenfassung & Ausblick

In der zukünftigen manuellen Montage werden der Aufbau und die Entwicklung der Fähigkeiten der Mitarbeiter ein entscheidender Wettbewerbsvorteil von Unternehmen sein. In menschenzentrierten Montagesystemen passen sich die Mitarbeiter auf der Grundlage von Lernprozessen an neue und sich ändernde Aufgaben an. Dazu muss der Bezug zu den Fähigkeiten der Mitarbeiter bei der Montageplanung vorgesehen werden. Die Personaleinsatzplanung ist das wesentliche Bindeglied zwischen der Personal- und der Montageplanung. Durch die Berücksichtigung der Fähigkeiten der Mitarbeiter kann die Flexibilität und Produktivität der manuellen Montage langfristig gesteigert werden.

Im vorliegenden Dissertationsmanuskript wird eine Methodik zur Integration von Humanfaktoren in die Aufgabenzuordnung in einem Montagesystem mit dem Ziel der Maximierung der Mitarbeiterfähigkeiten und der Minimierung der Zykluszeit vorgestellt. Hierzu wurden vier Forschungsfragen aufgestellt. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde das wissenschaftliche Vorgehen nach dem Forschungsprozess zur angewandten Wissenschaft nach ULRICH [Ulr82] angewendet. Aufbauend auf der Untersuchung des Betrachtungsbereichs wurden Defizite der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung ermittelt. Darunter fallen eine fehlende Datendurchgängigkeit sowie eine nicht hinreichende Berücksichtigung der Fähigkeiten der Mitarbeiter und deren Entwicklung. Diese wurden systematisch mit dem aktuellen Stand der Forschung in dem Bereich abgeglichen, wodurch sich der Handlungsbedarf des Forschungsvorhabens ergab. Dieser umfasst die unter anderen die Notwendigkeit einer Modellierung der Fähigkeitsentwicklung eines Mitarbeiters unter Berücksichtigung unterschiedlicher Montageoperationen sowie die Integration von historischen Daten in die Fähigkeitsprognose. Unter Einbindung von zwei Industrievertretern wurden darauf aufbauend 13 Anforderungen an die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung abgeleitet. Zur Erfüllung der Anforderungen wurden sechs Schritte sowie ein Software-Prototyp entwickelt. Die Schritte unterteilen sich in Planungs- und Steuerungskomponenten und umfassen eine automatisierte Bestimmung des Montagevorranggraphen, eine automatisierte Fließbandabstimmung, eine Ableitung des Fähigkeitsgraphen, eine Prognose der Mitarbeiterfähigkeiten, eine Entscheidungsunterstützung für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung sowie eine Integration von Echtzeitdaten. Die Anforderungen wurden anschließend anhand von vier Testszenarien mit vier unterschiedlichen Prüfständen validiert. Die vier Schritte sind eine Simulationsstudie, eine Probandenstudie, Experteninterviews und Usertests. Die Validierung zeigt, dass die entwickelte Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung zur fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung die 13 Anforderungen vollständig erfüllt. Hierdurch werden die vier Forschungsfragen praxistauglich beantwortet. Die Dissertation zeigt, dass eine derartige menschenzentrierte Montageplanung und -steuerung durch die systematische Integration von Humanfaktoren erreichbar wird. Genutzt wird dazu eine mathematische Modellierung in Form von Lern-Vergessen-Kurven mit der Berücksichtigung der Ähnlichkeit von Montageoperationen. Die Simulation und Prüfung zeigen, dass

dadurch eine Steigerung der Ausbringungsrates von 13,4 % bei einem Nutzungsgrad von 11,34 % bei heterogener Belegschaft in der Montage erreicht wird.

Folgerungen für die Praxis

Die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung führt die Forschungsergebnisse systematisch zusammen und erfüllt damit die Zielsetzung der Arbeit. Aufgrund ihres interdisziplinären Vorgehens und der Berücksichtigung von unterschiedlichen Koordinationsansätzen besitzt sie ein hohes Anwendungspotenzial für unterschiedliche Zielgruppen in produzierenden Unternehmen sowie für Entwickler von PPS-Systemen. In produzierenden Unternehmen bietet die entwickelte Methodik Anwendungspotenziale für die **integrierte Produktentwicklung**. Die Methodik zur menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung stellt ein Bindeglied zwischen Produktentwicklung, Montageplanung/ -steuerung und Personaleinsatzplanung dar. Aufbauend auf digitalen Produktmodellen aus der Entwicklung kann die Planung von neuen Montagesystemen frühzeitig erfolgen. Durch die simulationsgestützte Absicherung werden Unternehmen befähigt, die Planung ohne reale Montagesysteme sowie ohne Eingriff in den betrieblichen Ablauf zuverlässig durchzuführen. Weiterhin berücksichtigt die Methodik die Fähigkeitsentwicklung von Mitarbeitern innerhalb der Personaleinsatzplanung. Dadurch können geeignete Fähigkeiten der Mitarbeiter für das Unternehmen strategisch aufgebaut werden. Dies führt zu einer Steigerung der Produktivität und Flexibilität von produzierenden Unternehmen mit heterogener Belegschaft in der Montage. Die vorgestellte Methodik erzielt einen höheren Nutzungsgrad (durchschnittlich von 13,4 % bei einer heterogenen Belegschaft), eine höhere Ausbringungsrates (durchschnittlich von 11,34 % bei einer heterogenen Belegschaft) sowie eine systematische Fähigkeitsentwicklung als bei dem Ansatz nach REFA. Die Zuwachsrates der Fähigkeit der Mitarbeiter liegt zudem um 23,15 % höher. Dies lässt sich vor allem durch die höhere Prognosegüte der entwickelten Methodik im Vergleich zu einem MTM-basierten Ansatz begründen. Die Prognose besitzt innerhalb der Untersuchung eine um 25,34 % geringeren mittleren absoluten prozentualen Fehler. Weiterhin besitzt die Methodik Anwendungspotenziale für die **operative Montagesteuerung** in cyber-physischen Montagesystemen. Die Methodik ermöglicht die rechnergestützte Entscheidungsunterstützung von Schichtleitern und Meistern für die Personaleinsatzplanung. Dies kann hinsichtlich der Zielsetzung nach unterschiedlichen Koordinationsansätzen erfolgen. Bei hoher Auftragslage erfolgt die Personaleinsatzplanung mithilfe des kurzfristigen, zeitorientierten Koordinationsansatzes, wohingegen im Falle einer geringen Auslastung der Mitarbeiter der langfristige und fähigkeitsorientierte Koordinationsansatz verfolgt wird. Weiterhin können durch die Verknüpfung zum ERP-System Aufträge mit einer hohen Genauigkeit geplant und gesteuert werden. Dadurch sind exaktere Planungen von Start- und Endterminen möglich. Der Einsatz der Betriebsdatenerfassung und die Entwicklung von individuellen digitalen Zwillingen der Mitarbeiter führt wiederum zu einer verbesserten Genauigkeit der Planung. Zur industriellen Anwendung dieses Elements der Methodik sind jedoch die rechtlichen Grundlagen für die

Erfassung zu beachten. Ein weiterer Anwendungsbereich stellt die **Entwicklung von PPS-Systemen** dar. Diese können die entwickelte Methodik in ein MES-System integrieren. Hierdurch können neben der Planung von Maschinenbelegungen auch Aufgabenzuweisungen der Mitarbeiter in einem System erfolgen. Dies führt zu ganzheitlicher Betrachtung des Shopfloors. Durch die Verknüpfung mit Assistenzsystemen und die Betriebsdatenerfassung wird ein neues Niveau der Digitalisierung des Shopfloors und somit von Industrie 4.0 geschaffen.

Ein aussichtsreiches Feld für zukünftige Forschungen stellt die Übertragung der Methodik auf manuelle und teilautomatisierte Fertigungsschritte. Hierzu ist eine neue Form der mathematischen Modellierung der Fähigkeitsentwicklung der Mitarbeiter nötig. Besonders die Ableitung des Fähigkeitsgraphen innerhalb der Fertigung benötigt weitergehende Forschung. Dahingegen besitzt die Modellierung der Fähigkeiten der Maschinen nicht die gleiche Dynamik. Erkenntnisse aus Produktion können über die Verwendung eines ontologiebasierten Ansatzes in die Produktentwicklung zurückgeführt werden. Dies ermöglicht den Aufbau einer fähigkeitsgerechten Produktentstehung. Hierbei werden die Fähigkeiten von Mitarbeitern und Maschinen bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung berücksichtigt [GRP23] und bei der Definition von Produktmerkmalen berücksichtigt. Aufgrund der Vielzahl an Daten, die auf dem Shopfloor zu berücksichtigen sind, ist hierzu eine hybride Entscheidungsunterstützung erforderlich. Eine weitere Forschungsperspektive stellt die Übertragung der fähigkeitsorientierten Aufgabenzuordnung auf die Sicherheitsforschung dar. Durch die systematische Modellierung der Fähigkeiten von Rettungskräften können Verläufe von Rettungseinsätzen vorausgesagt und eine Einbindung eines Rettungsroboters ermöglicht werden. Erste Forschungsergebnisse zeigen ein hohes Potenzial für den Bereich der Sicherheitsforschung [GMH21, GPR21, GRP22].

Literaturverzeichnis

- [AF06] ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S.: Learning curve modelling of work assignment in mass customized assembly lines. In *International Journal of Production Research*, 45 2006 13; S. 2919–2938.
- [AF11] ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S.: Learning curve models and applications: Literature review and research directions. In *International Journal of Industrial Ergonomics*, 41 2011 5; S. 573–583.
- [AJ08] ALONY, I.; JONES, M.: Lean Supply Chains, JIT and Cellular Manufacturing – The Human Side. In Cohen, E. B.: *The Journal of Issues in Informing Science and Information Technology*, 2008; S. 165–175.
- [Alt09] ALTEMEIER, S.: Kostenoptimale Kapazitätsabstimmung in einer getakteten Variantenfließlinie – Unter expliziter Berücksichtigung des Unterstützereinsatzes und unterschiedlicher Planungszeiträume. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn 2009.
- [AMT19] ALFADHLANI, A. et al.: Automatic Precedence Constraint Generation for Assembly Sequence Planning using a Three-Dimensional Solid Model. In *International Journal of Technology*, 10 2019 2; S. 339–350.
- [AO09] ANDONI, A.; ONAK, K.: Approximating Edit Distance in Near-Linear Time. In Mitzenmacher, M.: *Proceedings of the forty-first annual 2009. Association for Computing Machinery*, New York; S. 199–204.
- [Ash56] ASHER, H.: Cost-quantity relationships in the airframe industry. The RAND Corporation, Santa Monica 1956.
- [ATM14] ADOLPH, S.; TISCH, M.; METTERNICH, J.: Challenges and Approaches to Competency Development for Future Production. In *Educational Alternatives*, 12 (1) 2014 12; S. 1001–1010.
- [AW19a] ABUBAKAR, M. I.; WANG, Q.: Integrating Human Factor Decision Components into A DES Model: IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 2019a; S. 562–566.
- [AW19b] ABUBAKAR, M. I.; WANG, Q.: Key human factors and their effects on human centered assembly performance. In *International Journal of Industrial Ergonomics*, 69 2019b; S. 48–57.
- [AWM90] AVOLIO, B. J.; WALDMAN, D. A.; MCDANIEL, M. A.: Age and work performance in nonmanagerial jobs – The effects of experience and occupational type. In *Academy of Management Journal*, 33 1990 2; S. 407–422.
- [BA86] BULLINGER, H.-J.; AMMER, D.: Systematische Montageplanung – Handbuch für die Praxis. Hanser, München 1986.
- [Bad95] BADIRU, A. B.: Multivariate analysis of the effect of learning and forgetting on product quality. In *International Journal of Production Research*, 33 1995 3; S. 777–794.
- [Bai89] BAILEY, C. D.: Forgetting and the Learning Curve: A Laboratory Study. In *Management Science*, 35 1989 3; S. 340–352.

- [Bal71] BALOFF, N.: Extension of the Learning Curve — Some Empirical Results. In *Journal of the Operational Research Society*, 22 1971 4; S. 329–340.
- [Bau18] BAUMANN, M.: Über die Anwendung, Klassifizierung und Übertragbarkeit von Methoden für einen Ähnlichkeitsabgleich von Geschäftsprozessen. Dissertation, Universität Bayreuth, Bayreuth 2018.
- [Bay86] BAYBARS, İ.: A Survey of Exact Algorithms for the Simple Assembly Line Balancing Problem. In *Management Science*, 32 1986 8; S. 909–932.
- [BC09] BLESSING, L. T.M.; CHAKRABARTI, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Springer London, London 2009.
- [BC20] BEZRUCAV, S. O.; CORVES, B.: Improved AI Planning for Cooperating Teams of Humans and Robots: Association for the Advancement of Artificial Intelligence, 2020; S. 1–10.
- [BCM20] BOTTI, L.; CALZAVARA, M.; MORA, C.: Modelling job rotation in manufacturing systems with aged workers. In *International Journal of Production Research*, 10 2020 4; S. 1–15.
- [BCO16] BATTINI, D. et al.: The Integrated Assembly Line Balancing and Parts Feeding Problem with Ergonomics Considerations. In *IFAC-PapersOnLine*, 49 2016 12; S. 191–196.
- [BCO17] BATTINI, D. et al.: Preventing ergonomic risks with integrated planning on assembly line balancing and parts feeding. In *International Journal of Production Research*, 55 2017 24; S. 7452–7472.
- [BD12] BRINER, R. B.; DENYER, D.: *Systematik Review and Evidence Synthesis as a Practice and Scholarship Tool*. Oxford University Press, 2012.
- [BD13] BATTALIA, O.; DOLGUI, A.: A taxonomy of line balancing problems and their solution approaches. In *International Journal of Production Economics*, 142 2013 2; S. 259–277.
- [BDM09] BURKARD, R. E.; DELL'AMICO, M.; MARTELLO, S.: *Assignment problems*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa., 2009.
- [BDM15] BOENZI, F. et al.: Modelling Workforce Aging in Job Rotation Problems. In *IFAC-PapersOnLine*, 48 2015 3; S. 604–609.
- [BFK14] BRETTEL, M. et al.: How Virtualization, Decentralization and Network Building Change The Manufacturing Landscape: An Industry 4.0 Perspective 2014 8; S. 37–44.
- [BFK23] Boysen, N.; Fliedner, M.; Klein, R.; Scholl, A.: Assembly Line Balancing – Data sets & Research topics. <https://assembly-line-balancing.de/>, 18.01.2023.
- [BFS07] BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A.: A classification of assembly line balancing problems. In *European Journal of Operational Research*, 183 2007 2; S. 674–693.

- [BFS08] BOYSEN, N.; FLIEDNER, M.; SCHOLL, A.: Assembly line balancing: Which model to use when? In *International Journal of Production Economics*, 111 2008 2; S. 509–528.
- [BGW18] BRACHT, U.; GECKLER, D.; WENZEL, S.: *Digitale Fabrik: Methoden und Praxisbeispiele – Methoden und Praxisbeispiele. Basis für Industrie 4.0.* Springer, Berlin 2018.
- [BHL12] BADKE-SCHAUB, P.; HOFINGER, G.; LAUCHE, K.: *Human Factors.* Springer, Dordrecht 2012.
- [BKM09] BANGOR, A.; KORTUM, P.; Miller James: Determining what individual SUS scores mean: Adding an adjective rating scale: *Jorunal of Usability Studies*, 2009; S. 114–123.
- [BL12] BOKRANZ, R.; LANDAU, K.: *Handbuch Industrial Engineering – Produktivitätsmanagement mit MTM.* Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2012.
- [BLB06] Bokranz, R.; Landau, K.; Becks, C. (Hrsg.): *Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen – MTM-Handbuch.* Schäffer-Poeschel, Stuttgart 2006.
- [BLV19] BESHARATI-FOUMANI, H.; LOHTANDER, M.; VARIS, J.: Intelligent process planning for smart manufacturing systems: a state-of-the-art review. In *Procedia Manufacturing*, 38 2019; S. 156–162.
- [BM11] BLUM, C.; MIRALLES, C.: On solving the assembly line worker assignment and balancing problem via beam search. In *Computers & Operations Research*, 38 2011 1; S. 328–339.
- [BMW21] BUCKHORST, A. F. et al.: Holarchy for line-less mobile assembly systems operation in the context of the internet of production. In *Procedia CIRP*, 99 2021; S. 448–453.
- [BNK21] BURGGRÄF, P. et al.: Dimensionierung und Strukturierung der Produktion. In Burggräf, P.: *Fabrikplanung. Handbuch Produktion und Management 4.* Springer, Berlin, Heidelberg 2021; S. 123–163.
- [Boc00] BOCK, S.: *Einsatz verteilter Algorithmen zur Lösung von SALBP-Modellen.* Deutscher Universitäts-Verlag GmbH, Wiesbaden 2000.
- [BR14] BORBA, L.; RITT, M.: A heuristic and a branch-and-bound algorithm for the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem. In *Computers & Operations Research*, 45 2014; S. 87–96.
- [BR16] BOSCHERT, S.; ROSEN, R.: Digital Twin—The Simulation Aspect. In: Hehenberger, P.: *Mechatronic Futures. Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and Their Designers.* Springer International Publishing AG, Cham, 2016; S. 59–74.
- [Bro96] BROOKE, J.: SUS: A 'Quick and Dirty' Usability Scale: Usability Evaluation In *Industry.* CRC Press, 1996; S. 207–212.

- [BS06] BECKER, C.; SCHOLL, A.: A survey on problems and methods in generalized assembly line balancing. In *European Journal of Operational Research*, 168 2006 3; S. 694–715.
- [BS16] BELBASE, A.; SANZENBACHER, G. T.: Cognitive Aging and Ability to Work. In *Center for Retirement Research*, Boston 2016.
- [BSS22] BOYSEN, N.; SCHULZE, P.; SCHOLL, A.: Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? In *European Journal of Operational Research*, 301 2022 3; S. 797–814.
- [BSW09] BULLINGER, H.-J. et al.: *Handbuch Unternehmensorganisation – Strategien, Planung, Umsetzung*. Springer-Verlag, s.l., 2009.
- [BTA15] BEN HADJ, R.; TRIGUI, M.; AIFAOU, N.: Toward an integrated CAD assembly sequence planning solution. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 229 2015 16; S. 2987–3001.
- [BW16] BÖRSCH-SUPAN, A.; WEISS, M.: Productivity and age: Evidence from work teams at the assembly line. In *The Journal of the Economics of Ageing*, 7 2016; S. 30–42.
- [Car46] CARR, G. W.: Peacetime cost estimating requires new learning curves. In *Aviation* 1946 45 (4); S. 76–77.
- [CCF14] COSTA, A.; CAPPADONNA, F. A.; FICHERA, S.: Joint optimization of a flow-shop group scheduling with sequence dependent set-up times and skilled workforce assignment. In *International Journal of Production Research*, 52 2014 9; S. 2696–2728.
- [Cha14] CHARLIN, F.: *Kompetenzorientierte Fertigungsplanung – Herausforderung, Potenzial und Strategie für die wissensintensive Produktion*. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, Hannover 2014.
- [CLR19] CHATTI, S.; LAPERRIÈRE, L.; REINHART, G.: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, Berlin, Heidelberg 2019.
- [CR76] CARLSON, J. G.; ROWE, A. J.: How much does forgetting cost?: *Industrial Engineering*; S. 40–47.
- [CWH10] CHEN, W.-Y.; WENG, C. S.; HSU, H.-Y.: Person-Environment Congruence as a Predictor of Organizational Commitment and Job Satisfaction: Evidence from a Transnational Manufacturing Company: *Proceedings of the PICMET*, 2010.
- [Dan17] DANGELMAIER, W.: *Produktionstheorie 2 – Statische Konstruktionen*. Springer, Berlin, Heidelberg 2017.
- [DB12] DEUSE, J.; BUSCH, F.: Zeitwirtschaft in der Montage. In Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: *Montage in der Industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*. Springer, Berlin Heidelberg 2012; S. 79–107.

- [DCW13] DENKENA, B. et al.: Kompetenzorientierung in der Fertigungsplanung – Studie zum Potenzial einer systematischen Berücksichtigung von Mitarbeiterkompetenzen in Planungssystemen. In *Productivity Management. Kompetenz in Produktion und Logistik*, 18 2013 2; S. 25–28.
- [Dec93] DECKER, M.: *Variantenfließfertigung*. Physica-Verlag, Heidelberg 1993.
- [DeJ57] DEJONG, J. R.: The effect of increased skills on cycle time and its consequences for time standards: *Ergonomics*, 1957; S. 51–60.
- [DGL06] DOLGUI, A.; GUSCHINSKY, N.; LEVIN, G.: A special case of transfer lines balancing by graph approach. In *European Journal of Operational Research*, 168 2006 3; S. 732–746.
- [DIN 33430] Deutsche Industrienorm: DIN 33430: 2016-06 Anforderungen an berufsbezogene Eignungsdiagnostik. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [DIN6385] Deutsche Industrienorm: DIN EN ISO 6385: Ergonomics principles in the design of work systems. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [DIN8580] Deutsche Industrienorm: DIN 8580:2003-09, *Fertigungsverfahren_ - Begriffe, Einteilung*. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2003.
- [DIN8593] Deutsche Industrienorm: DIN 8593: *Fertigungsverfahren Fügen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [DIN894-1] Deutsche Industrienorm: DIN EN 894-1:2009-01: *Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [DIN9001] Deutsche Industrienorm: DIN EN ISO 9001: 2015-11 *Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Germany.
- [DIN9241-210] Deutsche Industrienorm: DIN EN ISO 9241-210: 2011-01, *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion_- Teil_210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme (ISO_9241-210:2010)*. Beuth Verlag GmbH, Berlin 2011.
- [DM21] D'Onofrio, S.; Meier, A. Hrsg.: *Big Data Analytics – Grundlagen, Fallbeispiele und Nutzungspotenziale*. Springer Vieweg, Wiesbaden 2021.
- [DPS06] DOMBROWSKI, U.; PALLUCK, M.; SCHMIDT, S.: Strukturelle Analyse Ganzheitlicher Produktionssysteme. In *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 101 2006 3; S. 114–118.
- [DT09] DAWAL, S. Z. M.; TAHA, Z.: Job satisfaction model for manufacturing industry: Focus on ergonomics and human factors in work design: *IEEE Toronto International Conference Science and Technology for Humanity*. IEEE, Piscataway, NJ, 2009; S. 239–243.
- [DWP17] DENKENA, B.; WINTER, F.; PISCHKE, D.: Personaleinsatz zielgerichtet planen und steuern. In *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112 2017 6; S. 406–409.

- [Egb13] EGBERS, J.: Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses. Dissertation, Technische Universität München, München 2013.
- [Eis18] EISELE, M.: Ein Verfahren zur Planung von verschwendungsarmen getakteten Fließmontagen. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 2018.
- [EKD02] ECKEY, H.-F.; KOSFELD, R.; DREGER, C.: Statistik. Gabler Verlag, Wiesbaden 2002.
- [EKK18a] EFE, B.; KREMER, G. E. O.; KURT, M.: Age and gender-based Workload constraint for assembly line worker assignment and balancing problem in a textile firm. In International Journal of Industrial Engineering 2018a, Vol. 25; S. 1–17.
- [EKK18b] EFE, B. et al.: Age and gender-based workload constraint for assembly line worker assignment and balancing problem in a textile firm. In International Journal of Industrial Engineering, 25(1) 2018b; S. 1–17.
- [EKK20] EGHTEADIFARD, M.; KHALIFEH, M.; KHORRAM, M.: A systematic review of research themes and hot topics in assembly line balancing through the web of science within 1990–2017. In Computers & Industrial Engineering, 139 2020; S. 106182.
- [ENE08] ELMARAGHY, W. H.; NADA, O. A.; ELMARAGHY, H. A.: Quality prediction for reconfigurable manufacturing systems via human error modelling. In International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 21 2008 5; S. 584–598.
- [Eng20] ENGELS, G.: Der digitale Fußabdruck, Schatten oder Zwilling von Maschinen und Menschen. In Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO), 51 2020 3; S. 363–370.
- [Erl10] ERLACH, K.: Wertstromdesign – Der Weg zur schlanken Fabrik. Springer, Berlin, Heidelberg 2010.
- [ES13] EIGNER, M.; STELZER, R.: Product Lifecycle Management – Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Springer, Berlin, Heidelberg 2013.
- [ES96] Eversheim, W.; Schuh, G. Hrsg.: Hütte – Produktion und Management; Betriebshütte. Springer, Berlin 1996.
- [ES99] EVERSHEIM, W.; SCHUH, G.: Produktion und Management 3 – Gestaltung von Produktionssystemen. Springer, Berlin, Heidelberg 1999.
- [Eve02] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3 – Arbeitsvorbereitung. Springer, Berlin, Heidelberg 2002.
- [Eve81] EVERSHEIM, W.: Fertigung und Montage. VDI-Verl., Düsseldorf 1981.
- [Eve89] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik – 4. Fertigung und Montage. VDI-Verl., Düsseldorf 1989.
- [Eve97] EVERSHEIM, W.: Organisation in der Produktionstechnik. Springer, Berlin 1997.

- [Fel97] FELDMANN, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Springer, Berlin, Heidelberg 1997.
- [FG13] FELDHUSEN, J.; GROTE, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre – Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer, Berlin, Heidelberg 2013.
- [Fis19] FISEL, J.: Veränderungsfähigkeit getakteter Fließmontagesysteme: Planung der Fließbandabstimmung am Beispiel der Automobilmontage. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe 2019.
- [FPS96] FAYYAD, U.; PIATETSKY-SHAPIO, G.; SMYTH, P.: From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases. In AI Magazine, 17 1996 3; S. 37–54.
- [FRK06] FESSIA, P.; ROSSI, L.; KROG-PEDERSEN, S. S.: Application of the Learning Curve Analysis to the LHC Main Dipole Production: First Assessment. In IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 16 2006 2; S. 242–247.
- [FS13] FREIBICHLER, W.; STIEHL, A.: Praxishandbuch Operative Wertsteigerung – Wie Top-Entscheider Potenziale zur Optimierung erkennen und nutzen. Springer, Berlin, Heidelberg 2013.
- [FSE07] FONG BOH, W.; SLAUGHTER, S. A.; ESPINOSA, J. A.: Learning from Experience in Software Development: A Multilevel Analysis. In Management Science, 53 2007 8; S. 1315–1331.
- [FSS14] FELDMANN, K.; SCHÖPPNER, V.; SPUR, G.: Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. Hanser, München 2014.
- [Gal19] GALASKE, N. R.: Modellierung von Zusammenbaubedingungen zur Reihenfolgebildung im cyber-physischen Montagesystem. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 2019.
- [Gan09] GANS, J. E.: Neu- und Anpassungsplanung der Struktur von getakteten Fließproduktionssystemen für variantenreiche Serienprodukte in der Montage. Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2008. Univ. Heinz Nixdorf Inst, Paderborn 2009.
- [Gar14] GARBIE, I. H.: An experimental investigation on ergonomically designed assembly workstation. In International Journal of Industrial and Systems Engineering, 16 2014 3; S. 296.
- [Gar20] Gartner: 5 Trends bestimmen den Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies 2020. <https://www.gartner.de/de/artikel/5-trends-bestimmen-den-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2020>, 01.08.2022.
- [Gar21] Gartner: Gartner Identifies Key Emerging Technologies Spurring Innovation Through Trust, Growth and Change – NFT, Quantum ML, Generative AI, Homomorphic Encryption and Composable Applications and Networks Among Key Technologies to Watch. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-08-23-gartner-identifies-key-emerging-technologies-spurring-innovation-through-trust-growth-and-change>, 01.08.2022.

- [Gar22] Gartner: What's New in the 2022 Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies – Emerging technologies for 2022 fit into three main themes: evolving/expanding immersive experiences, accelerated artificial intelligence automation, and optimized technologist delivery. <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2022-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies>.
- [GCA14] GALASKE, N.; CHRIST, A.; ANDERL, R.: Integration von Menschen in Smart Factories: Ein individualisierbares Profildatenmodell für Industrie 4.0: DFX 2014: Proceedings of the 24th Symposium Design for X: Bamberg, Germany 1-2 Oktober 2014, 2014.
- [GCG17] GROSSE, E. H. et al.: Incorporating human factors into decision support models for production and logistics: current state of research. In IFAC-PapersOnLine, 50 2017 1; S. 6900–6905.
- [GDE83] GINIGER, S.; DISPENZIERI, A.; EISENBERG, J.: Age, experience, and performance on speed and skill jobs in an applied setting. In Journal of Applied Psychology, 68 1983 3; S. 469–475.
- [GG01] GUNGOR, A.; GUPTA, S. M.: A solution approach to the disassembly line balancing problem in the presence of task failures. In International Journal of Production Research, 39 2001 7; S. 1427–1467.
- [GGJ13] GROSSE, E. H.; GLOCK, C. H.; JABER, M. Y.: The effect of worker learning and forgetting on storage reassignment decisions in order picking systems. In Computers & Industrial Engineering, 66 2013 4; S. 653–662.
- [GGJ15] GROSSE, E. H. et al.: Incorporating human factors in order picking planning models: framework and research opportunities. In International Journal of Production Research, 53 2015 3; S. 695–717.
- [GGN17] GROSSE, E. H.; GLOCK, C. H.; NEUMANN, W. P.: Human factors in order picking: a content analysis of the literature. In International Journal of Production Research, 55 2017 5; S. 1260–1276.
- [GHP19] GRÄßLER, I.; HENTZE, J.; PÖHLER, A.: Self-organizing production systems: Implications for product design. In Procedia CIRP, 79 2019; S. 546–550.
- [GHR21] GRÄßLER, I. et al.: Design Review of Assembly Workstations using Virtual Prototypes: ETI - The European Technology Institute, 2021; S. 29–36.
- [GHR22a] GRÄßLER, I.; HIEB, M.; ROESMANN, D.: Gestaltung einer Forschungsinfrastruktur für die Anwendung digitaler Werkzeuge in Cyber Physischen Produktionssystemen: Automation 2022. 23. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik automation creates sustainability. VDI Verlag, Düsseldorf 2022a; S. 667–678.
- [GHR22b] GRÄßLER, I. et al.: Creating Synthetic Training Data for Machine Vision Quality Gates: Bildverarbeitung in der Automation. Springer, Berlin Heidelberg 2022b.

- [Glo15] GLONEGGER, M.: Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2014. Utz Herbert, München 2015.
- [GLS89] GLOBERSON, S.; LEVIN, N.; SHTUB, A.: The Impact of Breaks on Forgetting When Performing A Repetitive Task. In IIE Transactions, 21 1989 4; S. 376–381.
- [GM16] GOTTFREDSON, C.; MOSHER, B.: Innovative performance support – Strategies and practices for learning. In: CIRP Community: Proceeding CIRP, 2016; S. 512–517.
- [GMH21] GÜRTLER, M. et al.: Ein reaktiver Modellierungsansatz für Mensch-Roboter-Kollaboration in Rettungs- und Brandszenarien der Feuerwehr. In 7. IFToMM D-A-CH Konferenz 2021, 18./19. Februar 2021. Online-Konferenz 2021.
- [GP17] GRÄßLER, I.; PÖHLER, A.: Integration of a digital twin as human representation in a scheduling procedure of a cyber-physical production system: IEEE International Conference on Industrial Engineering & Engineering Management. IEEE, Piscataway, NJ 2017; S. 289–293.
- [GP19] GRÄßLER, I.; PÖHLER, A.: Human-centric design of cyber-physical production systems. In Procedia CIRP, 84 2019; S. 251–256.
- [GPR21] Gürtler, I. et al.: Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung für die Mensch-Roboter-Kollaboration in sicherheitskritischen Einsatzsituationen. In Wienrich, C.; Wintersberger, P.; Weyers, B.: Mensch und Computer, 2021.
- [GR15] GLONEGGER, M.; REINHART, G.: Planning of synchronized assembly lines taking into consideration human performance fluctuations. In Production Engineering, 9 2015 2; S. 277–287.
- [Grä00] GRÄßLER, I.: Informations- und zeitbasiertes Controlling einer integrierten Konstruktion und Arbeitsplanung. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen 2000.
- [GRC21] GRÄßLER, I. et al.: Skill-based worker assignment in a manual assembly line. In Procedia CIRP, 100 2021; S. 433–438.
- [GRH22] GRÄßLER, I. et al.: Information Model for Hybrid Prototyping in Design Reviews of Assembly Stations: Procedia CIRP, 2022; S. 489–494.
- [Gri14] GRIEVERS, M.: Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication, 2014.
- [Gro15a] GROSSE, E. H.: Human factors in order picking systems. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 2015a.
- [Gro15b] GROSSE, E. H.: Human factors in order picking systems – A framework for integrating human factors in order picking planning models with an in-depth analysis of learning effects. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 2015b.

- [GRP20a] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Entwicklung eines Prüfstands für die Bewertung von kompetenzbildenden Assistenzsystemen in Cyber-physischen Produktionssystemen: Digitale Arbeit, digitaler Wandel, digitaler Mensch? 66. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, TU Berlin, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systeme/HU Berlin, Professur Ingenieurpsychologie, 16.-18. März 2020, Berlin. GfA-Press, Dortmund 2020a; B.6.4.
- [GRP20b] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Traceable learning effects by use of digital adaptive assistance in production: Proceedings of the 10th Conference on Learning Factories. Elsevier, 2020b; S. 479–484.
- [GRP21] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Model based integration of human characteristics in production systems: a literature survey: Procedia CIRP. Elsevier, 2021; S. 57–62.
- [GRP22] GRÄßLER, I. et al.: Mensch-Tracking zur Identifizierung des Voranschreitens von Roboterunterstützten Rettungseinsätzen der Feuerwehr: Tagungsband der VDI Mechatronik, 2022; S. 151–156.
- [GRP23] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Human Factors in der integrierten Produktentwicklung. In Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 2023 3.
- [Gru02] GRUNWALD, S.: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2001. Utz, München 2002.
- [Gru09] GRUNDIG, C.-G.: Fabrikplanung – Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. Hanser, München 2009.
- [GRU23] GRÄßLER, I. et al.: Virtual Test Scenarios for Human-Centered Design with Virtual Measurement Systems. In Schmid, U.; Heizmann, M. Sommer, K.-D.: Sensor and Measurement Science International, 2023.
- [GRW21] GRÄßLER, I. et al.: Determine similarity of assembly operations using semantic technology: Procedia CIRP, 2021; S. 1245–1250.
- [GSM23] GRÄßLER, I. et al.: Introduction – The Digital Twin of Humans. In Gräßler, I. et al.: The Digital Twin of Humans. An Interdisciplinary Concept of Digital Working Environments in Industry 4.0. Springer, London 2023.
- [GWR21] GRÄßLER, I.; WIECHEL, D.; ROESMANN, D.: Integrating human factors in the model based development of cyber-physical production systems. In Procedia CIRP, 100 2021; S. 518–523.
- [HA13] HIMMLER, F.; AMBERG, M.: Die Digitale Fabrik – eine Literaturanalyse: International Conference on Wirtschaftsinformatik, 2013; S. 165–179.
- [HC10] HEVNER, A.; CHATTERJEE, S.: Design Research in Information Systems – Theory and Practice. Springer Science+Business Media LLC, Boston, MA, 2010.

- [HCA20] HOEDT, S. et al.: Real Time Implementation of Learning-Forgetting Models for Cycle Time Predictions of Manual Assembly Tasks after a Break. In Sustainability, 12 2020 14; S. 5543.
- [HCW13] HAMRAZ, B. et al.: Requirements-based development of an improved engineering change management method. In Journal of Engineering Design, 24 2013 11; S. 765–793.
- [Hei21] HEIDLOFF, T.: Automatisierte Bestimmung eines Montagevorranggraphen auf Basis von CAD-Daten. Unveröffentlichte Studienarbeit, Universität Paderborn, Paderborn. Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D. 2021.
- [HHL18] HOCHDÖRFFER, J.; HEDLER, M.; LANZA, G.: Staff scheduling in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications. In Journal of Manufacturing Systems, 46 2018; S. 103–114.
- [HJ71] HASELOFF, O. W.; JORSWIECK, E.: Psychologie des Lernens – Methoden, Ergebnisse, Anwendungen. Walter De Gruyter, Berlin, New York 1971.
- [HKK19] HIRSCH, P.; KOCH, I.; KARBACH, J.: Putting a stereotype to the test: The case of gender differences in multitasking costs in task-switching and dual-task situations. In PLoS ONE, 14 2019 8; e0220150.
- [HMP04] HEVNER, A. R. et al.: Design Science in Information Systems Research. In MIS Q, 28 2004 1; S. 75–105.
- [Hof92] HOFFMANN, T. R.: Eureka: A Hybrid System for Assembly Line Balancing. In Management Science, 38 1992 1; S. 39–47.
- [Hov51] HOVLAND, C. I.: Human learning and retention. In: Stevens, S. S.: Handbook of experimental psychology. Wiley, New York 1951; S. 613–689.
- [HPE10] HEINEN, T. et al.: Zukunftsthemen der Fabrikplanung. In ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 105 2010 5; S. 405–409.
- [HR18] Hammerstingl, V.; Reinhart, G.: Skills in assembly. <https://mediatum.ub.tum.de/1428286>.
- [HRS16] HOLD, P.; RANZ, F.; SIHN, W.: Konzeption eines MTM-basierten Bewertungsmodells für digitalen Assistenzbedarf in der cyber-physischen Montage. In Schlick, C. M.: Megatrends Digitalisierung. Potenziale der Arbeits- und Betriebsorganisation. Gito mbH Verlag, Berlin 2016; S. 295–322.
- [HS95] HIRST, G.; St-Onge David: Lexical chains as representation of context for the detection and correction of malapropisms. In Fellbaum, C.: WordNet: An Electronic LEXical database. MIT Press, Cambridge, MA, 1995; S. 305–332.
- [HSA06] HARIRI, B. B.; SAYYADI, H.; ABOLHASSANI, H.: Combining Ontology Alignment Metrics Using the Data Mining Techniques, 2006.
- [HSY92] HEWITT, D. et al.: The effects of unequal relearning rates on estimating forgetting parameters associated with performance curves. In International Journal of Industrial Ergonomics, 10 1992 3; S. 217–224.

- [Hud20] HUDE, M. von der: Predictive Analytics und Data Mining – Eine Einführung mit R. Springer Fachmedien, Wiesbaden 2020.
- [HWC18] HSU, T.-H.; WANG, L.-C.; CHU, P.-C.: Development of a Cloud-based Advanced Planning and Scheduling System. In *Procedia Manufacturing*, 17 2018; S. 427–434.
- [IATF16949] International Automotive Task Force: IATF 16949: 2016-10. Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie. Beuth Verlag, Berlin.
- [IEA00] IEA Council: The Discipline of Ergonomics. International Ergonomics Society. www.iea.cc.
- [Ilm01] ILMARINEN, J. E.: Aging workers. In *Occupational and environmental medicine*, 58 2001 8; S. 546–552.
- [ISO/IEC 2382] ISO (the International Organization for Standardization) and IEC (the International Electrotechnical Commission): ISO/ IEC 2382:2015: Information technology – Vocabulary.
- [Jab06] JABER, M.: Learning and Forgetting Models and Their Applications. In Badiru, A. B.: *Handbook of industrial and systems engineering*. CRC Taylor & Francis, Boca Raton, 2006; 30-1-30-27.
- [JB96] JABER, M. Y.; BONNEY, M.: Production breaks and the learning curve: The forgetting phenomenon. In *Applied Mathematical Modelling*, 20 1996 2; S. 162–169.
- [JB97] JABER, M. Y.; BONNEY, M.: A comparative study of learning curves with forgetting. In *Applied Mathematical Modelling*, 21 1997 8; S. 523–531.
- [JC97] JIANG, J.; CONRATH, D.: Semantic similarity based on corpus statistics and leixcal taxonomy: Proc. of the Int'l Conf. on Research in Computational Ligustics, 1997, 1997; S. 19–33.
- [JCS06] JUN, M.; CAI, S.; SHIN, H.: TQM practice in maquiladora: Antecedents of employee satisfaction and loyalty. In *Journal of Operations Management*, 24 2006 6; S. 791–812.
- [JK04] JABER, M. Y.; KHER, H. V.: Variant versus invariant time to total forgetting: the learn-forget curve model revisited. In *Computers & Industrial Engineering*, 46 2004 4; S. 697–705.
- [JKD03] JABER, M. Y.; KHER, H. V.; DAVIS, D. J.: Countering forgetting through training and deployment. In *International Journal of Production Economics*, 85 2003 1; S. 33–46.
- [JKM+17] JOST, J. et al.: Der Mensch in der Industrie – Innovative Unterstützung durch Augmented Reality. In Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten: *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1. Produktion*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2017; S. 153–174.
- [Joh88] JOHNSON, R. V.: Optimally Balancing Large Assembly Lines with “Fable”. In *Management Science*, 34 1988 2; S. 240–253.

- [Jos97] JOST, A.: Die Assoziationsfestigkeit in ihrer Abhängigkeit von der Verteilung der Wiederholungen. In *Psychological Review*, 4 1897 6; S. 682–684.
- [JS04] JABER, M. Y.; SIKSTRÖM, S.: A numerical comparison of three potential learning and forgetting models. In *International Journal of Production Economics*, 92 2004 3; S. 281–294.
- [JYE19] JOSIFOVSKA, K.; YIGITBAS, E.; ENGELS, G.: Reference Framework for Digital Twins within Cyber-Physical Systems: IEEE/ACM 5th International Workshop on Software Engineering for Smart Cyber-Physical Systems. IEEE, Piscataway, NJ, 2019; S. 25–31.
- [KAG14] KARA, Y. et al.: An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing. In *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 27 2014 11; S. 997–1007.
- [Kay95] KAYA, E.: Job satisfaction of the librarians in the developing countries.: 61st IFLA General Conference 1995, 1995.
- [KBA08] KNAPPE, R.; BULSKOV, H.; ANDREASEN, T.: On Similarity Measures for Concept-based Querying, 2008.
- [KBB19] KATIRAEI, N. et al.: Human diversity factors in production system modelling and design: state of the art and future researches. In *IFAC-PapersOnLine*, 52 2019 13; S. 2544–2549.
- [KCF21] KATIRAEI, N. et al.: Consideration of workers’ differences in production systems modelling and design: State of the art and directions for future research. In *International Journal of Production Research*, 59 2021 11; S. 3237–3268.
- [KDM15] KAMPKER, A.; DEUTSKENS, C.; MARKS, A.: Die Rolle von lernenden Fabriken für Industrie 4.0. In: Botthof, A.; Hartmann, E.: *Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0*. Springer Vieweg, Berlin 2015; S. 77–88.
- [KE06] KEMPER, A.; EICKLER, A.: *Datenbanksysteme – Eine Einführung*. Oldenbourg, München 2006.
- [Kha14] AL KHATEEB, A.: *Planung und Optimierung von Fließmontagesystemen – Ein Beitrag unter Berücksichtigung sich ändernder Anforderungen an Prozesszuverlässigkeit, Produktqualität und Flexibilität*. Dissertation, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau 2014.
- [Kle15] KLETTI, J.: *MES - Manufacturing Execution System – Moderne Informationstechnologie unterstützt die Wertschöpfung*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2015.
- [Kle22] KLETETZKA, L.: *Methode für das Assembly Line Worker Assignment und Balancing Problem*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Paderborn, Paderborn. Betreuer: Peitz, S.; Gräßler, I.; Roesmann, D. 2022.
- [Kne74] KNECHT, G. R.: Costing, Technological Growth and Generalized Learning Curves. In *Operational Research Quarterly (1970-1977)*, 25 1974 3; S. 487.

- [Kor17] KORYTKOWSKI, P.: Competences-based performance model of multi-skilled workers with learning and forgetting. In Expert Systems with Applications, 77 2017; S. 226–235.
- [KP07] KRIENGKORAKOT, N.; PIANTHONG, N.: The Assembly Line Balancing Problem Review articles. In Engineering and Applied Science Research, 34 2007 2; S. 133–140.
- [Kra00] KRATZSCH, S.: Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2000.
- [Kro09] KROPIK, M.: Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung. Springer, Berlin, Heidelberg 2009.
- [Krü04] KRÜGER, A.: Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme. Dissertation, Technische Universität München, München 2004.
- [KS01] KISTNER, K.-P.; STEVEN, M.: Produktionsplanung. Physica-Verlag HD, Heidelberg, s.l., 2001.
- [Kub76] KUBICEK, H.: Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesign als Elemente einer Konstruktionsstrategie empirischer Forschung. Inst. für Unternehmensführung, Berlin 1976.
- [Küh06] KÜHN, W.: Digitale Fabrik – Fabriksimulation für Produktionsplaner. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 2006.
- [Kuh55] KUHN, H. W.: The Hungarian method for the assignment problem. In Naval Research Logistics Quarterly, 2 1955 1-2; S. 83–97.
- [Lan14] LANDHERR, M. H.: Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 2014.
- [LBM03] LI, Y.; BANDAR, Z. A.; MCLEAN, D.: An approach for measuring semantic similarity between words using multiple information sources. In IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 15 2003 4; S. 871–882.
- [LC94] LEACOCK, C.; CHODOROW, M.: Filling in a sparse training space for word sense identification. In Mathematics 1994.
- [Lev65] LEVY, F. K.: Adaptation in the Production Process. In Management Science, 11 1965 6; B-136-B-154.
- [Lev96] LEVENSHTAIN, V. I.: Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. In Soviet Physics-Doklady, 10 1996 8; S. 707–710.
- [LFK19] LANZA, G. et al.: Global production networks: Design and operation. In CIRP Annals, 68 2019 2; S. 823–841.
- [Lin93] LIN, D.: Principle-based parsing without overgeneration. In: Schubert, L.: Proceedings of the 31st annual meeting on Association for Computational Linguistics -. Association for Computational Linguistics, Morristown, NJ, USA 1993; S. 112–120.

- [LKT20] LI, Z.; KUCUKKOC, I.; TANG, Q.: A comparative study of exact methods for the simple assembly line balancing problem. In *Soft Computing*, 24 2020 15; S. 11459–11475.
- [LL19] LIU, M.; LIU, X.: Satisfaction-driven bi-objective multi-skill workforce scheduling problem. In *IFAC-PapersOnLine*, 52 2019 13; S. 229–234.
- [LML99] LYNCH, N. A. et al.: Muscle quality. I. Age-associated differences between arm and leg muscle groups. In *Journal of applied physiology*, 86 1999 1; S. 188–194.
- [LNF18] Lanza. G. et al.: Wandlungsfähige, menschenzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0 (acatech Studie). Herbert Utz Verlag, München 2018.
- [Lot12] LOTTER, B.: Einführung. In Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012; S. 1–8.
- [Lot92] LOTTER, B.: *Wirtschaftliche Montage – Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik*. VDI-Verl., Düsseldorf 1992.
- [LP18] LAZZERINI, B.; PISTOLESI, F.: An Integrated Optimization System for Safe Job Assignment Based on Human Factors and Behavior. In *IEEE Systems Journal*, 12 2018 2; S. 1158–1169.
- [LRM08] LANDAU, K. et al.: Musculoskeletal disorders in assembly jobs in the automotive industry with special reference to age management aspects. In *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38 2008 7-8; S. 561–576.
- [LSB03] LORD, P. W. et al.: Investigating semantic similarity measures across the Gene Ontology: the relationship between sequence and annotation. In *Bioinformatics (Oxford, England)*, 19 2003 10; S. 1275–1283.
- [LST11] LIU, A. X.; SHEN, K.; TORNG, E.: Large scale Hamming distance query processing: IEEE 27th International Conference on Data Engineering (ICDE), 2011. 11 - 16 April 2011, Hannover. IEEE, Piscataway, NJ, 2011; S. 553–564.
- [Lut73] LUTZ, L.: *Abtakte von Montagelinien*. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 1973.
- [LW12] Lotter, B.; Wiendahl, H.-P. Hrsg.: *Montage in der industriellen Produktion – Ein Handbuch für die Praxis*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2012.
- [Mar11] MARCUS, B.: *Arbeitspsychologie*. In Marcus, B.: *Einführung in die Arbeits- und Organisationspsychologie*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden 2011; S. 45–68.
- [Mar19] MARKS, A. F.: *Wirtschaftliche Mitarbeiterqualifizierung durch lernorientierte Montagesystemgestaltung*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen 2019.

- [MBB17] MARTIGNAGO, M.; BATTALIA, O.; BATTINI, D.: Workforce management in manual assembly lines of large products: a case study. In IFAC-PapersOnLine, 50 2017 1; S. 6906–6911.
- [MBC11] MÜLLER, R. et al.: Self-optimization as an Enabler for Flexible and Reconfigurable Assembly Systems. In: Jeschke, S.: Intelligent Robotics and Applications. 4th International Conference, ICIRA 2011, Aachen, Germany, December 6-8, 2011, Proceedings, Part II. Springer, Berlin, Heidelberg 2011; S. 179–188.
- [MBN15] MEYER, G.; BRÜNIG, B.; NYHUIS, P.: Employee competences in manufacturing companies – Employee competences in an expert survey. In Journal of Management Development, 34 2015 8; S. 1004–1018.
- [MGA07] MIRALLES, C. et al.: Advantages of assembly lines in Sheltered Work Centres for Disabled. A case study. In International Journal of Production Economics, 110 2007 1-2; S. 187–197.
- [MGA08] MIRALLES, C. et al.: Branch and bound procedures for solving the Assembly Line Worker Assignment and Balancing Problem: Application to Sheltered Work centres for Disabled. In Discrete Applied Mathematics, 156 2008 3; S. 352–367.
- [MH78] MAZUR, J. E.; HASTIE, R.: Learning as accumulation: A reexamination of the learning curve. In Psychological Bulletin, 85 1978 6; S. 1256–1274.
- [MHS19] MÜLLER, R. et al.: Communication and Knowledge Management Platform for Concurrent Product and Assembly System Development. In Procedia Manufacturing, 28 2019; S. 107–113.
- [MK16] MAŁACHOWSKI, B.; KORYTKOWSKI, P.: Competence-based performance model of multi-skilled workers. In Computers & Industrial Engineering, 91 2016; S. 165–177.
- [MK19] MALACHOWSKI, B.; KORYTKOWSKI, P.: Competence-Based Workforce Allocation for Manual Assembly Lines. In: Burduk, A. et al.: Intelligent systems in production engineering and maintenance. Springer, Cham 2019; S. 442–451.
- [MKN13] MEYER, G.; KLEWER, M.; NYHUIS, P.: Integrating Competences into Work Planning – The Influence of Competence-Based Parameters on Strategic Business Objectives. In World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Industrial and Systems Engineering, Vol: 7 2013 No: 11.
- [MLS21] MESSING, K.; LEFRANÇOIS, M.; SAINT-CHARLES, J.: Observing Inequality: Can Ergonomic Observations Help Interventions Transform the Role of Gender in Work Activity? In Computer Supported Cooperative Work (CSCW), 30 2021 2; S. 215–249.
- [MM12] MACHI, L. A.; McEVOY, B. T.: The literature review – Six steps to success. Corwin Press, Thousand Oaks, Calif. 2012.

- [MMC15] MOREIRA, M. C. O.; MIRALLES, C.; COSTA, A. M.: Model and heuristics for the Assembly Line Worker Integration and Balancing Problem. In *Computers & Operations Research*, 54 2015; S. 64–73.
- [MMD13] MEYER, G. et al.: Kompetenzorientierte Arbeitsplanung. In *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 108 2013 10; S. 709–714.
- [MPC17] MOREIRA, M. C. O. et al.: The multi-objective assembly line worker integration and balancing problem of type-2. In *Computers & Operations Research*, 82 2017; S. 114–125.
- [MPF16] MOURTZIS, D.; PAPATHANASIOU, P.; FOTIA, S.: Lean Rules Identification and Classification for Manufacturing Industry. In *Procedia CIRP*, 50 2016; S. 198–203.
- [MPS13] MUTLU, Ö.; POLAT, O.; SUPCILLER, A. A.: An iterative genetic algorithm for the assembly line worker assignment and balancing problem of type-II. In *Computers & Operations Research*, 40 2013 1; S. 418–426.
- [MRC12] MOREIRA, M. C. O. et al.: Simple heuristics for the assembly line worker assignment and balancing problem. In *Journal of Heuristics*, 18 2012 3; S. 505–524.
- [MRS99] MILBERG, J. et al.: Produktionssystemplanung. In: Eversheim, W.; Schuh, G.: *Produktion und Management 3*. Springer, Berlin, Heidelberg 1999; S. 118–244.
- [MS22] MILLER, M. E.; SPATZ, E.: A unified view of a human digital twin. In *Human-Intelligent Systems Integration*, 4 2022 1-2; S. 23–33.
- [MSA21] MOURTZIS, D. et al.: An intelligent model for workforce allocation taking into consideration the operator skills. In *Procedia CIRP*, 97 2021; S. 196–201.
- [MSH88] MCDANIEL, M. A.; SCHMIDT, F. L.; HUNTER, J. E.: Job experience correlates of job performance. In *Journal of Applied Psychology*, 73 1988 2; S. 327–330.
- [NBC17] NARDOLILLO, A. M.; BAGHDADI, A.; CAVUOTO, L. A.: Heart Rate Variability During a Simulated Assembly Task; Influence of Age and Gender. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 61 2017 1; S. 1853–1857.
- [ND10] NEUMANN, P. W.; DUL, J.: Human factors: spanning the gap between OM and HRM. In *International Journal of Operations & Production Management*, 30 2010 9; S. 923–950.
- [NDZ09] NYHUIS, P. et al.: Integrierte technologie- und kompetenzorientierte Arbeitsplanung in soziotechnischen Systemen. In *ERP-Management* 5(4) 2009; S. 37–40.
- [NG21] NEB, A.; GÖKE, J.: Generation of assembly restrictions and evaluation of assembly criteria from 3D assembly models by collision analysis. In *Procedia CIRP*, 97 2021; S. 33–38.

- [NHP08] NYHUIS, P. et al.: Wandlungsfähige Produktionssysteme – Fit sein für die Produktion von morgen. In ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 103 2008 5; S. 333–337.
- [Nie07] NIELSEN, J.: Usability engineering. Kaufmann, Amsterdam, Heidelberg 2007.
- [NKW16] NEUMANN, W. P.; KOLUS, A.; WELLS, R. W.: Human Factors in Production System Design and Quality Performance – A Systematic Review. In IFAC-PapersOnLine, 49 2016 12; S. 1721–1724.
- [NO01] NEMBHARD, D. A.; OSOTHSILP, N.: An empirical comparison of forgetting models. In IEEE Transactions on Engineering Management, 48 2001 3; S. 283–291.
- [NOB08] NORDANDER, C. et al.: Gender differences in workers with identical repetitive industrial tasks: exposure and musculoskeletal disorders. In International archives of occupational and environmental health, 81 2008 8; S. 939–947.
- [NRK21] NYHUIS, P. et al.: Organisationsformen der Produktion. In Journal of Production Systems and Logistics 2021; 1-36.
- [NU00] NEMBHARD, D. A.; UZUMERI, M. V.: Experiential learning and forgetting for manual and cognitive tasks. In International Journal of Industrial Ergonomics, 25 2000 4; S. 315–326.
- [NWG21] NEUMANN, W. P. et al.: Industry 4.0 and the human factor – A systems framework and analysis methodology for successful development. In International Journal of Production Economics, 233 2021; S. 107992.
- [Nyh10] Nyhuis, P. Hrsg.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. GITO-Verl., Berlin 2010.
- [OB17] OTTO, A.; BATTALIA, O.: Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey. In Computers & Industrial Engineering, 111 2017; S. 467–480.
- [Obe19] OBERMAIER, R.: Handbuch Industrie 4. 0 und Digitale Transformation – Betriebswirtschaftliche, Technische und Rechtliche Herausforderungen. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden 2019.
- [OCJ19] OAKMAN, J. et al.: Are occupational physical activities tailored to the age of cleaners and manufacturing workers? In International archives of occupational and environmental health, 92 2019 2; S. 185–193.
- [Ohn93] OHNO, T.: Das Toyota-Produktionssystem. Campus Verlag, Frankfurt am Main, New York 1993.
- [OMG17] OMG Standards Development Organization: Unified Modeling Language – A specification defining a graphical language for visualizing, specifying, constructing, and documenting the artifacts of distributed object systems. <https://www.omg.org/spec/UML/2.5.1/About-UML/>, 08.08.2022.

- [OS11] OTTO, A.; SCHOLL, A.: Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. In *European Journal of Operational Research*, 212 2011 2; S. 277–286.
- [OSO16] OZTURKOGLU, O.; SAYGILI, E. E.; OZTURKOGLU, Y.: A manufacturing-oriented model for evaluating the satisfaction of workers – Evidence from Turkey. In *International Journal of Industrial Ergonomics*, 54 2016; S. 73–82.
- [Ost20] OSTERMEIER, F. F.: The impact of human consideration, schedule types and product mix on scheduling objectives for unpaced mixed-model assembly lines. In *International Journal of Production Research*, 58 2020 14; S. 4386–4405.
- [Pat04] PATRON, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Dissertation, Technische Universität München, München 2004.
- [Pen07] PENTICO, D. W.: Assignment problems: A golden anniversary survey. In *European Journal of Operational Research*, 176 2007 2; S. 774–793.
- [Per18] PEREIRA, J.: The robust (minmax regret) assembly line worker assignment and balancing problem. In *Computers & Operations Research*, 93 2018; S. 27–40.
- [Pet10] PETZELT, D.: Konzept zur rechnerunterstützten Bestimmung von Sollzeiten in der Montageplanung. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Dortmund 2010.
- [PII19] PANETTO, H. et al.: Challenges for the cyber-physical manufacturing enterprises of the future. In *Annual Reviews in Control*, 47 2019; S. 200–213.
- [PJ22] PELTOKORPI, J.; JABER, M. Y.: Interference-adjusted power learning curve model with forgetting. In *International Journal of Industrial Ergonomics*, 88 2022; S. 103257.
- [PKM16] POLAT, O. et al.: A two-phase variable neighbourhood search algorithm for assembly line worker assignment and balancing problem type-II: an industrial case study. In *International Journal of Production Research*, 54 2016 3; S. 722–741.
- [PKS+11] PUTTKAMMER, K. et al.: Simultane Maschinenbelegungs- und Personaleinsatzplanung in KMUs anhand eines Fallbeispiels aus der Druckereibranche. FEMM Working Papers 10, Otto-von-Guericke University Magdeburg, Magdeburg 2011.
- [Pot22] POTTEBAUM, J.: Vorlesung 2: Digitale und Virtuelle Produktentstehung 2 – Einführung. Vorlesung, Universität Paderborn, Paderborn 2022.
- [PPS+15] PUNDIR, P. S.; PORWAL, S. K.; SINGH, B. P.: A New Algorithm for Solving Linear Bottleneck Assignment Problem. In *Journal of Institute of Science and Technology*, 20 2015 2; S. 101–102.

- [PR21] POHL, K.; RUPP, C.: Basiswissen Requirements Engineering – Aus- und Weiterbildung nach IREB-Standard zum Certified Professional for Requirements Engineering Foundation Level. dpunkt.verlag, Heidelberg 2021.
- [Prö15] PRÖPSTER, M. H.: Methodik zur kurzfristigen Austaktung variantenreicher Montagelinien am Beispiel des Nutzfahrzeugbaus. Dissertation, Technische Universität München, München 2015.
- [PTP16] PINTZOS, G. et al.: Assembly precedence diagram generation through assembly tiers determination. In International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 29 2016 10; S. 1045–1057.
- [PVH06] PETRAKIS, E. et al.: X-Similarity: Computing Semantic Similarity between Concepts from Different Ontologies: Journal of Digital Information Management 4(4), 2006; S. 233–237.
- [RAB05] REAGANS, R.; ARGOTE, L.; BROOKS, D.: Individual Experience and Experience Working Together: Predicting Learning Rates from Knowing Who Knows What and Knowing How to Work Together. In Management Science, 51 2005 6; S. 869–881.
- [Ras97] RASMUSSEN, J.: Risk management in a dynamic society: a modelling problem. In Safety Science, 27 1997 2-3; S. 183–213.
- [RE03] RODRIGUEZ, M. A.; EGENHOFER, M. J.: Determining semantic similarity among entity classes from different ontologies. In IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 15 2003 2; S. 442–456.
- [REFA21] REFA: REFA-Grundausbildung 4.0 - Begriffe und Formeln. Hanser, München 2021.
- [REFA90] REFA: Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme. Hanser, München 1990.
- [REFA93] REFA: Ausgewählte Methoden der Planung und Steuerung. Hanser, München 1993.
- [Rei17] REINHART, G.: Handbuch Industrie 4.0 – Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. Carl Hanser Verlag, München 2017.
- [Res99] RESNIK, P.: Semantic Similarity in a Taxonomy: An Information-Based Measure and its Application to Problems of Ambiguity in Natural Language. In Journal of Artificial Intelligence Research, 11 1999; S. 95–130.
- [RG23] ROESMANN, D.; GRÄßLER, I.: Integration of Human Factors for Assembly Systems of the Future. In Gräßler, I. et al.: The Digital Twin of Humans. An Interdisciplinary Concept of Digital Working Environments in Industry 4.0. Springer, London 2023.
- [RK19] REFFLINGHAUS, R.; KERN, C.: Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit für manuelle Montagetätigkeiten. In Sträter, O.: Risikofaktor Mensch? Zuverlässiges Handeln gestalten. Beuth Verlag, Berlin, Wien, Zürich 2019; S. 191–211.

- [RMB89] RADA, R. et al.: Development and application of a metric on semantic nets. In IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 19 1989 1; S. 17–30.
- [Ros08] ROSCHER, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart 2008.
- [RR13] ROBERTSON, S.; ROBERTSON, J.: Mastering the requirements process – Getting requirements right. Addison-Wesley, Upper Saddle River, N.J. 2013.
- [RSM94] RICHARDSON, R.; SMEATON, A. F.; MURPHY, J.: Using WordNet as as Knowledge Base for Measuring Semantic Similarity between Words. In Proceedings of ACIS Conference 1994.
- [SA09] SHUKOR, S. A.; AXINTE, D. A.: Manufacturability analysis system: issues and future trends. In International Journal of Production Research, 47 2009 5; S. 1369–1390.
- [Sac09] SACKERMANN, R.: Eine wissensbasierte Methode zur Zeitermittlung in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Dortmund 2009.
- [Sal07] SALVENDY, G.: Handbook of industrial engineering – Technology and operations management. J. Wiley & sons, New York 2007.
- [Sal12] SALVENDY, G.: Handbook of human factors and ergonomics. Wiley, Hoboken, NJ 2012.
- [Sal55] SALVESON, M. E.: The assembly line balancing problem. In The Journal of Industrial Engineering, 3 1955 6; S. 18–25.
- [SAT20] STARK, R. et al.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. In ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 115 2020 s1; S. 47–50.
- [SB06] SCHOLL, A.; BECKER, C.: State-of-the-art exact and heuristic solution procedures for simple assembly line balancing. In European Journal of Operational Research, 168 2006 3; S. 666–693.
- [SB19] STERN, H.; BECKER, T.: Concept and Evaluation of a Method for the Integration of Human Factors into Human-Oriented Work Design in Cyber-Physical Production Systems. In Sustainability, 11 2019 16; S. 4508.
- [SBC12] SCHMITT, R. H. et al.: Self-optimising Production Systems. In Brecher, C.: Integrative Production Technology for High-Wage Countries. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012; S. 697–986.
- [SBL10] SCHLICK, C. M.; BRUDER, R.; LUCZAK, H.: Arbeitswissenschaft. Springer, Berlin, Heidelberg 2010.
- [SCB13] SCHAUB, K. et al.: The European Assembly Worksheet. In Theoretical Issues in Ergonomics Science, 14 2013 6; S. 616–639.
- [Sch06] SCHROLL, A.: Bedarfs- und mitarbeitergerechte Dienstplanung mit Fuzzy-Control. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Magdeburg 2006.

- [Sch08] SCHADY, R.: Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg. Betreuer: Schenk, Michael, 2008.
- [Sch12] SCHUH, G.: Produktionsplanung Und -Steuerung 1 – Grundlagen der PPS. Springer, Berlin, Heidelberg 2012.
- [Sch91] SCHNEEWEIß, C.: Kapazitätsplanung bei moderner Fließfertigung. Physica-Verlag, Heidelberg 1991.
- [Sch95] SCHOLL, A.: Balancing and sequencing of assembly lines. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 1995.
- [SCL17] SCHMITT, R. H. et al.: Cognition-Enhanced, Self-optimizing Assembly Systems. In Brecher, C.; Özdemir, D.: Integrative Production Technology. Theory and Applications. Springer, Cham, 2017; S. 877–990.
- [SGA16] STRANG, D.; GALASKE, N.; ANDERL, R.: Dynamic, Adaptive Worker Allocation for the Integration of Human Factors in Cyber-Physical Production Systems. In Schlick, C.; Trzecieliński, S.: Advances in Ergonomics of Manufacturing: Managing the Enterprise of the Future. Springer International Publishing, 2016; S. 517–529.
- [SGN20] SGARBOSSA, F. et al.: Human factors in production and logistics systems of the future. In Annual Reviews in Control, 49 2020; S. 295–305.
- [She00] SHEPHARD, R. J.: Aging and productivity: some physiological issues. In International Journal of Industrial Ergonomics, 25 2000 5; S. 535–545.
- [She21] SHENGLI, W.: Is Human Digital Twin possible? In Computer Methods and Programs in Biomedicine Update, 1 2021; S. 100014.
- [SHO86] SCHMIDT, F. L.; HUNTER, J. E.; OUTERBRIDGE, A. N.: Impact of job experience and ability on job knowledge, work sample performance, and supervisory ratings of job performance. In Journal of Applied Psychology, 71 1986 3; S. 432–439.
- [SJ02] SIKSTRÖM, S.; JABER, M. Y.: The power integration diffusion model for production breaks. In Journal of Experimental Psychology: Applied, 8 2002 2; S. 118–126.
- [SK97] SCHOLL, A.; KLEIN, R.: SALOME: A Bidirectional Branch-and-Bound Procedure for Assembly Line Balancing. In INFORMS Journal on Computing, 9 1997 4; S. 319–334.
- [SKK15] SUMATHI, V. P.; KOUSALYA, K.; KALAISELVI, R.: A Comparative study on Syntax Matching Algorithms in Semantic Web: WSEAS Transactions on computers, 2015.
- [SKP19] SILVA, V. L. et al.: Human Factor in Smart Industry: A Literature Review. In Future Studies Research Journal: Trends and Strategies, 12 2019 1; S. 87–111.

- [Sli13] SLIMANI, T.: Description and Evaluation of Semantic Similarity Measures Approaches. In International Journal of Computer Applications, Vol 80 2013 10; S. 25–33.
- [SMK16] Stinson, M. R.; Müller, F. H.; Korte, D.; Wehking, K.-H.: Lernkurven in manuellen Person-zur-Ware-Kommissioniersystemen (LeiKom) – Abschlussbericht. https://www.bvl.de/files/1951/2125/2131/2133/Abschlussbericht_LeiKom.pdf.
- [SOB13] STICH, V.; OEDEKOVEN, D.; BROSE, T.: Informationssysteme für das Logistikmanagement. In: Schuh, G.; Stich, V.: Logistikmanagement. Handbuch Produktion und Management 6. Springer, Berlin, Heidelberg 2013; S. 257–304.
- [Sop16] Sophisten: Schablone für alle Fälle. https://www.sophist.de/fileadmin/user_upload/Bilder_zu_Seiten/Publikationen/Wissen_for_free/MAS-TeR_Broschuere_3-Auflage_interaktiv.pdf, 29.07.2022.
- [SPH96] SHALIN, V. L.; PRABHU, G. V.; HELANDER, M. G.: A cognitive perspective on manual assembly. In Ergonomics, 39 1996 1; S. 108–127.
- [SS12] Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg 2012.
- [SS14] SIVASANKARAN, P.; SHAHABUDEEN, P.: Literature review of assembly line balancing problems. In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73 2014 9-12; S. 1665–1694.
- [Ste14] STERNATZ, J.: Enhanced multi-Hoffmann heuristic for efficiently solving real-world assembly line balancing problems in automotive industry. In European Journal of Operational Research, 235 2014 3; S. 740–754.
- [Ste20] STERN, H.: Integration der Human Factors in die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen in cyber-physischen Produktionssystemen. Dissertation, Universität Bremen, Bremen 2020.
- [Ste77] STEFFEN, R.: Produktionsplanung bei Fließbandfertigung. Gabler Verlag, Wiesbaden 1977.
- [Str16] STRANG, D.: Kommunikationsgesteuerte cyber-physische Montagemodelle. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt 2016.
- [SWS08] STOESSEL, C. et al.: Towards Optimal Worker Assistance: Investigating Cognitive Processes in Manual Assembly: Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier. Springer, London, 2008; S. 245–250.
- [SY15] SUNGUR, B.; YAVUZ, Y.: Assembly line balancing with hierarchical worker assignment. In Journal of Manufacturing Systems, 37 2015; S. 290–298.
- [SYM04] SLIMANI, T.; YAGHLANE, B. B.; MELLOULI, K.: A New Similarity Measure based on Edge Counting: World Academy of Science, Engineering and Technology, 2004; S. 34–38.

- [Tak14] TAKEDA, H.: Das synchrone Produktionssystem – Just-in-time für das ganze Unternehmen. Franz Vahlen, München 2014.
- [TK78] Towill; KALOO, U.: Productivity drift in extended learning curves. In Omega, 6 1978 4; S. 295–304.
- [TS12] TSAO, Y.-C.; SHEEN, G.-J.: Effects of promotion cost sharing policy with the sales learning curve on supply chain coordination. In Computers & Operations Research, 39 2012 8; S. 1872–1878.
- [Tve77] TVERSKY, A.: Features of similarity. In Psychological Review, 84 1977 4; S. 327–352.
- [Ull95] ULLRICH, G.: Wirtschaftliches Anlernen in der Serienmontage - Ein Beitrag zur Lernkurventheorie. Dissertation, Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Duisburg 1995.
- [Ulr82] ULRICH, H.: Anwendungsorientierte Wissenschaft. In Die Unternehmung, 36 1982; S. 1–10.
- [UN15] United Nation: Department of Economic and Social Affairs: Sustainable Development: The 17 Goals. <https://sdgs.un.org/goals>.
- [VDI/VDE2206] Verein Deutscher Ingenieure: VDI/VDE 2206:2021-11 Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [VDI2221] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2221: Design of technical products and systems - Model of product design. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [VDI2860] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2860: Montage- und Handhabungstechnik – Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole (zurückgezogen 06/2016). Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [VDI2870] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2870: Ganzheitliche Produktionssysteme – Grundlagen, Einführung und Bewertung. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [VDI7100] Verein Deutscher Ingenieure: VDI/VDE-MT 7100 - Entwurf. Lernförderliche Arbeitsgestaltung - Ziele, Nutzen, Begriffe. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [VO52] VOTAW, D. F.; ORDEN, A.: The Personnel Assignment Problem: Symposium on Linear Inequalities and Programming, SCOOP 10,, 1952; S. 155–193.
- [VSN22] VIJAYAKUMAR, V. et al.: Framework for incorporating human factors into production and logistics systems. In International Journal of Production Research, 60 2022 2; S. 402–419.
- [Wei00] WEIß, C.: Methodengestützte Planung und Analyse von Endmontagelinien in der Automobilindustrie. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe 2000.

- [Wes13] WESTKÄMPER, E.: Integration in der digitalen Produktion. In Westkämper, E.: Digitale Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg 2013; S. 133–143.
- [Wey10] WEYAND, L.: Risikoreduzierte Endmontageplanung am Beispiel der Automobilindustrie. Dissertation, Universität des Saarlandes, Saarland 2010.
- [WHG18a] WANG, Z.; HU, H.; GONG, J.: Competence Based Worker Assignment and Impacts on Production Scheduling in Precast Construction: IEEE Technology and Engineering Management Conference (TEMSCON). 28 June-1 July 2018. IEEE, 2018a; S. 1–6.
- [WHG18b] WANG, Z.; HU, H.; GONG, J.: Modeling Worker Competence to Advance Precast Production Scheduling Optimization. In Journal of Construction Engineering and Management, 144 2018b 11; S. 40180981–401809814.
- [Wie14a] WIESBECK, M.: Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. Dissertation, Technische Universität München, München 2014a.
- [Wie14b] WIENDAHL, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. Hanser, München 2014b.
- [Wie95] WIEGAND, M.: Prozesse organisationalen Lernens. Dissertation, Freie Universität Berlin, Berlin 1995.
- [Win17] WINTER, F.: Kompetenzorientierte Fertigungsplanung und -steuerung – Herausforderung, Potenzial und Strategie für die wissensintensive Produktion. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover 2017.
- [WJR90] WOMACK, J. P.; JONES, D. T.; ROOS, D.: The machine that changed the world – The Story of Lean Production. How Japan's secret weapon in the global auto wars will revolutionize western industry. HarperPaperbacks, New York 1990.
- [Woe83] WOEBER, W.: Die Anwendung von Lernkurven in der Fertigungsindustrie. In Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 1983 Vol. 128; S. 9–12.
- [WP94] WU, Z.; PALMER, M.: Verbs semantics and lexical selection: ACL '94: Proceedings of the 32nd annual meeting on Association for Computational Linguistics, 1994; S. 133–138.
- [WRE23] WELLER, J. et al.: Identification and prediction of standard times in machining for precision steel tubes through the usage of data analytics: Procedia CIRP, 2023.
- [Wri36] WRIGHT, N.: Factors affecting the cost of airplanes: Journal of the Aeronautical Sciences, 1936; S. 122–128.
- [WWD19] WEGGE, J.; WENDSCHE, J.; DIESEL, S.: Arbeitsgestaltung. In Schuler, H.; Moser, K.: Lehrbuch Organisationspsychologie. Hogrefe, Bern, 2019; S. 643–695.

- [WWL97] WESTKÄMPER, E.; WAHLE, T.; LÜCKE, O.: Qualitätsmanagement und Lernkurven. In Eversheim, W.: Prozeßorientiertes Qualitätscontrolling. Qualität Meßbar Machen. Springer, Berlin, Heidelberg 1997; S. 71–104.
- [WZ13] WILKOWSKA, W.; ZIEFLE, M.: User Diversity as a Challenge for the Integration of Medical Technology into Future Smart Home Environments. In Management Association, I. R.: User-driven healthcare. Concepts, methodologies, tools, and applications, Hershey, Pa, 2013; S. 95–126.
- [Yag09] YAGYU, S.: Das synchrone Managementsystem – Wegweiser zur Neugestaltung der Produktion auf Grundlage des synchronen Produktionssystems. mi-Wirtschaftsbuch, München 2009.
- [Yel79] YELLE, L. E.: The learning curve – Historical review and comprehensive survey. In Decision Sciences, 10 1979 2; S. 302–328.
- [ZB10] ZÜLCH, G.; BECKER, M.: Impact of ageing workforces on long-term efficiency of manufacturing systems. In Journal of Simulation, 4 2010 4; S. 260–267.
- [ZG09] ZWICK, T.; GOBEL, C.: Age and Productivity-evidence from Link Employee Data. – Zewcenter for European Economic Research Discussion Paper No. 09-020, 2009.
- [ZSC+05] ZÄH, M. F. et al.: Ansatz zur Projektierung der Digitalen Fabrik. In ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 100 2005 5; S. 286–290.
- [Zül05] ZÜLCH, G.: Integrating Human Aspects into the Digital Factory. In: Zülch, G.; Jagdev, H. S.; Stock, P.: Integrating Human Aspects in Production Management. IFIP TC5 / WG5.7 Proceedings of the International Conference on Human Aspects in Production Management. International Federation for Information Processing, Boston, MA, 2005; S. 85–99.
- [ZWG08] ZHOU, Z.; WANG, Y.; GU, J.: New model of semantic similarity measuring in wordnet: International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering, 2008; S. 256–261.

Zitation aus studentischen Arbeiten

Die nachstehend aufgeführten studentischen Arbeiten wurden im Rahmen der Tätigkeit am Lehrstuhl für Produktentstehung der Universität Paderborn betreut. Die Definition der Zielsetzung, die Bearbeitung sowie die Auswertung, Interpretation und Visualisierung von Ergebnissen erfolgten unter wissenschaftlicher Anleitung der Betreuenden Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler und Daniel Roesmann. Die erzielten Ergebnisse sind zum Teil in die Dissertation eingeflossen.

- [Dis20] DISSELKAMP, J.-P. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Entscheidungsmodells zur Aufgabenzuordnung in der Produktion. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2020.
- [Kif20] KIFFMEIER, K. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Entwicklung eines fähigkeitsorientierten Rotationsmodells für leistungsgewandelte Mitarbeiter in der manuellen Montage. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Masterarbeit, 2020.
- [Lem20] LEMPERLE, P. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Mathematisches Modell zur fähigkeitsbasierten Zuordnung von Mitarbeitern in der Montage. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2019.
- [Özc20] ÖZCAN, D. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Untersuchung des Einflusses von adaptiven Assistenzsystemen auf die Lernkurve in der Montage. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020.
- [Ren20] RENSMANN, C. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Methode zur Bewertung der Ähnlichkeit von Operationen in der Montage. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020.
- [Hua20] HUANG, Y. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Entwicklung eines Dashboards zur Visualisierung der Produktivität von Montagesystemen. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2020.
- [Hin21] HINSKEN, M. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Datenbank zur Speicherung und zum Austausch von Daten zur fähigkeitsorientierten Montageplanung. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2021.
- [Som21] SOMMER, C. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Entwicklung eines Simulationsmodells für manuelle Montagelinien. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2021.

- [Wie21] WIED, P. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Prognose von manuellen Montageprozessen mithilfe von echtzeitnahen Tätigkeitsdaten. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2021.
- [Wel21] WELLER, J. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Nutzung von Data Analytics für die Bestimmung von Vorgabewerten in der Fertigungsplanung. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2021.
- [Hei21] HEIDLOFF, T. (Betreuer: Gräßler, I.; Roesmann, D.): Automatisierte Bestimmung eines Montagevorranggraphen auf Basis von CAD-Daten. Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut – Lehrstuhl für Produktentstehung, unveröffentlichte Studienarbeit, 2021.
- [Kle22] KLETETZKA, L. (Betreuer: Peitz, S.; Gräßler, I.; Roesmann, D.): Methode für das Assembly Line Methode für das Assembly Line Worker Assignment und Balancing Problem mit Lerneffekt. Universität Paderborn, Data Science for Engineering, unveröffentlichte Bachelorarbeit, 2022.

Anhang

A1	Grundlagen des Betrachtungsbereichs.....	166
A1.1	Forschungsprozess nach ULRICH.....	166
A1.2	Informationssysteme in der Montage.....	166
A2	Stand der Forschung.....	169
A2.1	Integration der Humanfaktoren in cyber-physische Produktionssysteme nach Stern	169
A2.2	Framework für die Entwicklung von menschenzentrierten Entscheidungsunterstützungen der Arbeitsgruppe 7 des IFAC – TC 5.2	170
A2.3	Framework der Integration von Humanfaktoren nach VIJAYAKUMAR ET AL.....	171
A2.4	Wirtschaftliche Mitarbeiterqualifizierung durch die lernorientierte Montagesystemgestaltung nach MARKS.....	171
A2.5	Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen nach GLONEGGER.....	172
A2.6	Dynamische, adaptive Mitarbeiterzuordnung nach STRANG ET AL.	173
A2.7	Kompetenzmodellierung zur Optimierung der Produktionsplanung nach WANG ET AL.....	174
A2.8	Kompetenzbasierte Aufgabenzuordnung nach MALACHOWSKI & KORYTKOWSKI	175
A2.9	Kompetenzorientierte Fertigungsplanung und -steuerung nach WINTER.....	175
A2.10	Kurzfristige Fließbandabstimmung nach PRÖPSTER	176
A2.11	Job-Rotation unter Berücksichtigung ergonomischer und fähigkeitsbezogener Aspekte nach HOCHDÖRFFER ET AL.	177
A3	Steckbriefe zu etablierten Lernkurven-Modellen	178
A3.1	Modell von WRIGHT	178
A3.2	Stanford-B Modell	179
A3.3	S-Kurven Modell	179
A3.4	Modell von Ullrich	180

A3.5	Modell von Woeber	180
A3.6	Modell von Levy	181
A3.7	Modell von Knecht	181
A3.8	Modell von Towill	182
A3.9	Modell von DeJong	182
A3.10	Modell von Baloff	183
A3.11	2-Parameter-Hyperbel, 3-Parameter-Hyperbel	183
A4	Nutzwertanalyse der Auswahl am besten geeigneten Ansatzes zur automatisierten Bestimmung von Montagevorranggraphen.....	184
A5	Pseudo-Code der genutzten Optimierungsalgorithmen	185
A6	Übersicht über Fügetechnologien.....	186
A7	Notation für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung	187
A8	Software-Werkzeug zur menschenzentrierten Montageplanung und Montagesteuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung	189
A8.1	Mobile App.....	189
A8.2	Mock-Up in Adobe-XD	190
A8.3	Bedienungsanleitung	195
A9	Validierung	201
A9.1	Verwendete Fragebögen	201
A9.1.1	System Usability Scale nach BROOKE	201
A9.1.2	Fragebogen zur Verschwendung	202
A9.1.3	Leitfrageninterview des Experteninterviews	203
A9.2	Fiktive Beispielszenarien	204
A9.2.1	Fiktives Beispielszenario I	204
A9.2.2	Fiktives Beispielszenario II	204
A9.3	Verwendete Produktbeispiele	205
A9.3.1	Knickarmroboter	205

A9.3.2	Drosselklappe	207
A9.3.3	Standbohrmaschine	209
A9.3.4	RC-Car	211
A9.3.5	Greifer	213
A9.4	Montageanleitung der Probandenstudie	215
A9.5	Aufgabenzuordnung Probandenstudie	223
A9.1	Ergebnisse der Simulationsstudie	224
A9.1.1	Zwei-Gruppen-Personal	226
A9.1.2	Homogenes Personal & heterogene Stationen	232
A9.1.3	Homogenes Personal & homogene Stationen	238
A9.1.4	Homogenes Personal mit Vorerfahrungen	244
A9.1.5	Heterogenes Personal	250
A10	Bewertung innerhalb des Experteninterviews	256
A11	User Test: Ausgefüllte Fragebögen	258

A1 Grundlagen des Betrachtungsbereichs

A1.1 Forschungsprozess nach ULRICH

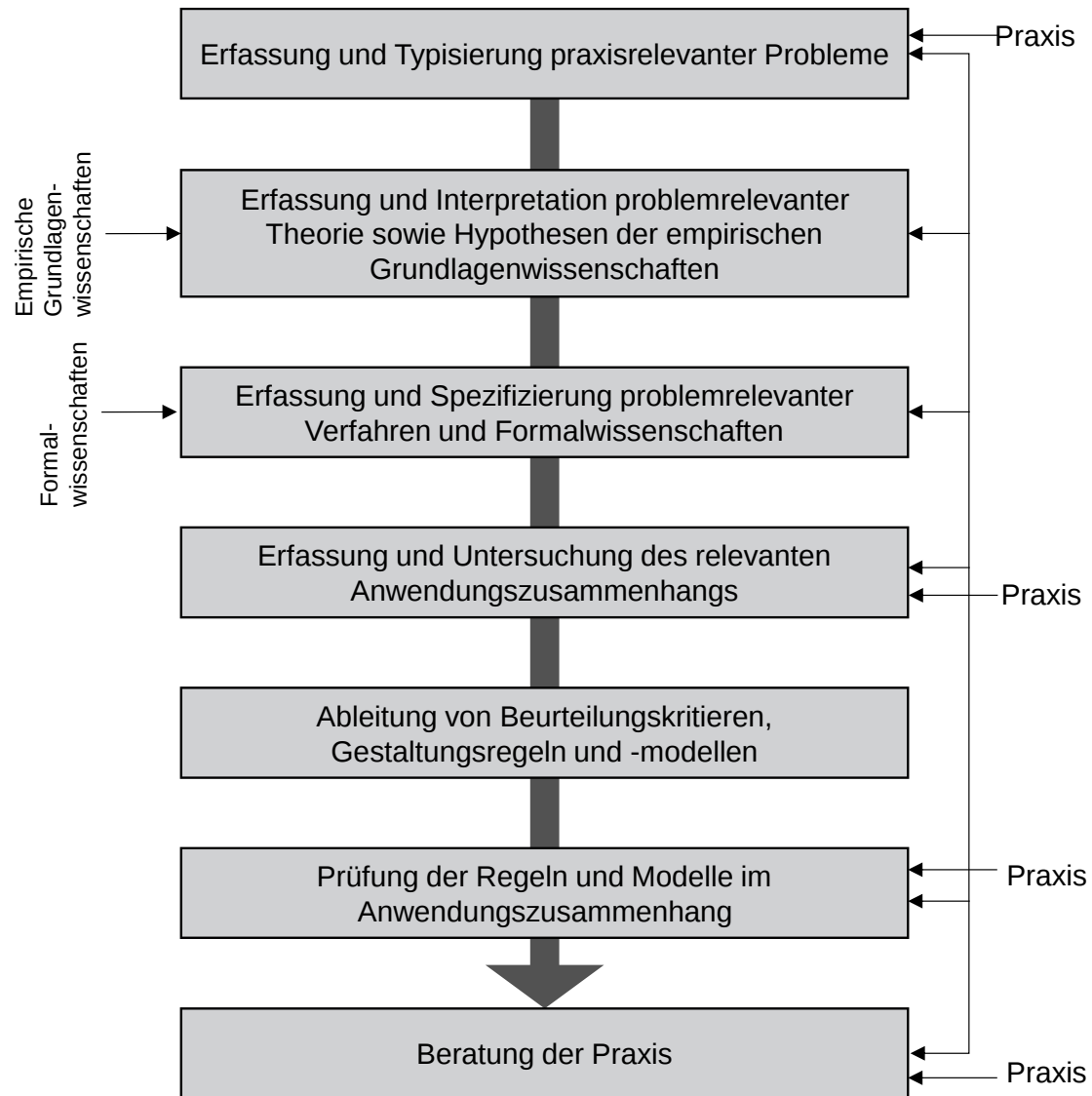


Bild A-1: Angewandte Wissenschaft in Theorie- und Praxisbezug [Ulr82]

A1.2 Informationssysteme in der Montage

Innerhalb der Montageplanung muss eine ganzheitliche Betrachtung des Produktentstehungsprozesses eingenommen werden. Eine gezielte Abstimmung der Geschäfts- und Produktionsprozesse ist notwendig. Hierbei unterstützen vermehrt Informationssysteme. STICH ET AL. [SOB13] unterteilen Informationssysteme aufgabenspezifisch in operative Systeme und Planungssysteme. Operative Systeme greifen in den gesamten Auftragsabwicklungsprozess ein und verarbeiten die anfallenden Massendaten. Planungssysteme un-

terstützen Entscheidungsträger bei der Lösungsfindung und -vorbereitung. Informationssysteme können Informationen sowohl horizontal (entlang der Wertschöpfungskette) als auch vertikal (im Übergang von Planung zu Kontrolle) integrieren [Obe19]. In A1.2 sind für die Montage relevante Informationssysteme (Applikationssoftware) entlang des relevanten Ausschnitts des Produktentstehungsprozesses dargestellt:

Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (**PPS**) dienen zur organisatorischen Planung, Steuerung und Überwachung der Produktionsprozesse unter Berücksichtigung von Mengen-, Termin- und Kapazitätsrestriktionen [Sal07].

Enterprise-Resource-Planning-Systeme (**ERP**) sind umfangreiche, integrierte Software-systeme, die sich mit sämtlichen Aufgabenfeldern betriebswissenschaftlicher Fragestellungen eines Unternehmens befassen [SOB13].

Advanced-Planning-and-Scheduling-Systeme (**APS**) dienen der Planung, Verwaltung und Überwachung der Supply Chain. Auf dem Shopfloor werden sie speziell zur Kapazitätsplanung und Abstimmung eingesetzt. Der Schwerpunkt von APS-Systemen liegt im Gegensatz zu ERP-Systemen in der umfangreichen mathematischen Modellierung und Optimierung in der restriktions- und engpassorientierten Planung [HWC18, SOB13].

Product-Lifecycle-Management-Systeme (**PLM**) sind rechnergestützte Systeme zur Speicherung und Verwaltung von Produktdaten über den gesamten Produktlebenszyklus [ES13].

Manufacturing-Execution-Systeme (**MES**) planen auf Basis der Ressourcen und Prozessmodelle eine Reihenfolge der Aufträge je nach Anlage. Kapazitätsauslastungen werden direkt berücksichtigt, um flexibel auf die tatsächlichen Zustände in der Produktion zu reagieren [Kle15].

Warehouse-Management-Systeme (**WMS**) dienen der Verwaltung, Steuerung und Optimierung des betrieblichen Lagersystems und bilden den innerbetrieblichen Materialfluss auf dem Shopfloor ab [SOB13].

Transport-Management-Systeme (**TMS**) dienen innerhalb der inner- und außerbetrieblichen Logistik zur Planung, Steuerung und Verwaltung von Transportvorgängen und Touren [SOB13].

Systeme der Betriebsdatenerfassung (**BDE**) werden eingesetzt, um Daten auf dem Shopfloor in maschinenlesbarer Form zu erfassen und auszugeben. Dies geschieht manuell oder automatisch und ist notwendige Voraussetzung für die Automatisierung [JKM+17].

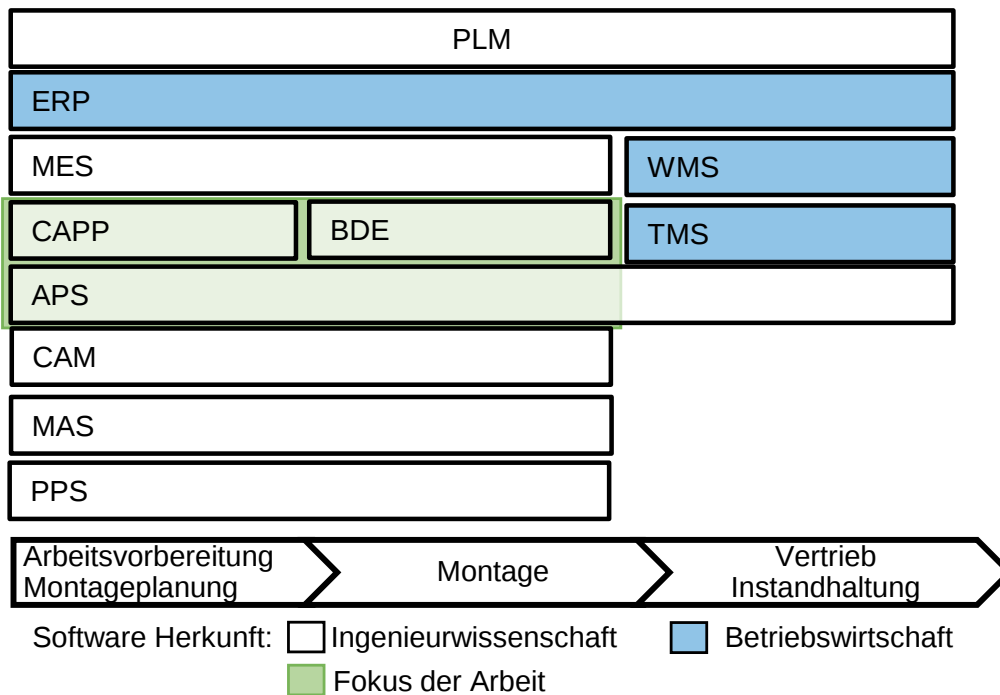


Bild A-2: Übersicht über Informationssysteme in der Montage in Anlehnung an [Pot22]

Computer Aided Process Planning (**CAPP**) vereinigt das Produkt-, Ressourcen- und Mitarbeitermodell zur Bestimmung eines geeigneten Prozessmodells in einem gegebenen Produktionsumfeld [BLV19].

Manufacturability Analysis Systeme (**MAS**) dienen zur Prüfung der Herstellbarkeit eines Produkts in einem gegebenen Produktionssystem, indem sie die Herstellbarkeitseinschätzung berechnen [SA09].

A2 Stand der Forschung

A2.1 Integration der Humanfaktoren in cyber-physische Produktionssysteme nach Stern

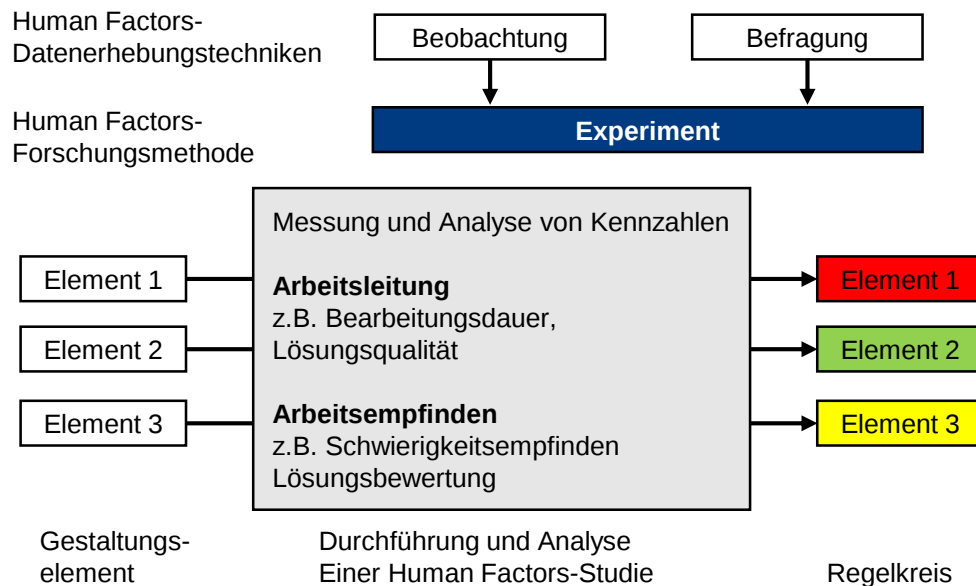


Bild A-3: Grundidee der entwickelten Methode zur Bestimmung der Effekte von Arbeitsgestaltungselementen nach STERN [STE20]

A2.2 Framework für die Entwicklung von menschenzentrierten Entscheidungsunterstützungen der Arbeitsgruppe 7 des IFAC – TC 5.2

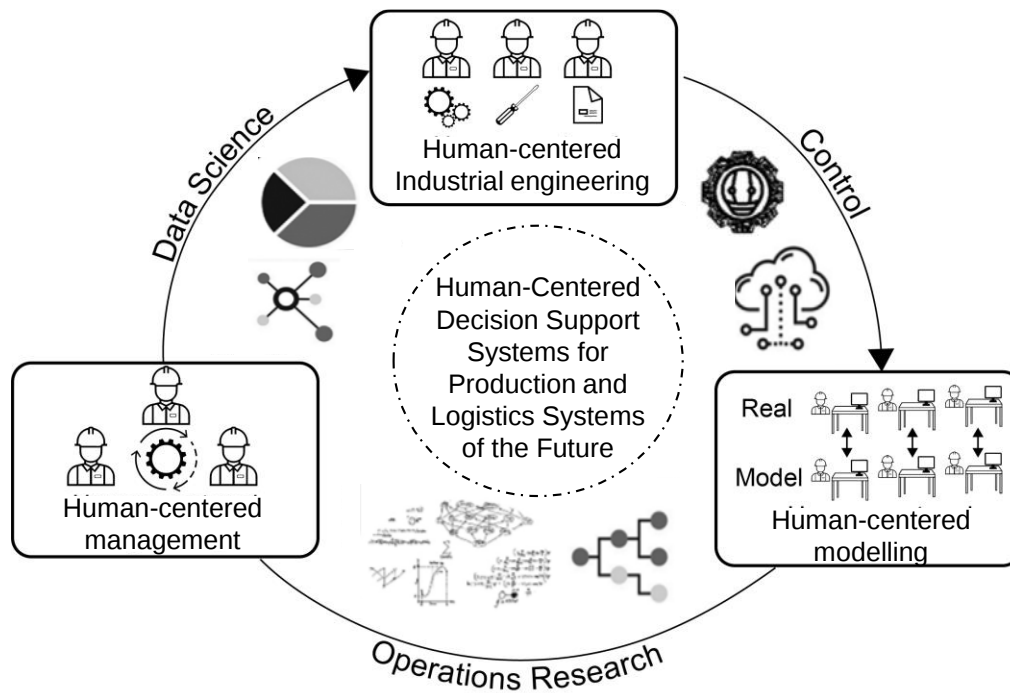


Bild A-4: Framework für die Entwicklung von menschenzentrierten Entscheidungsunterstützungen der Arbeitsgruppe 7 des IFAC – TC 5.2 [SGN20]

A2.3 Framework der Integration von Humanfaktoren nach VIJAYAKUMAR ET AL.

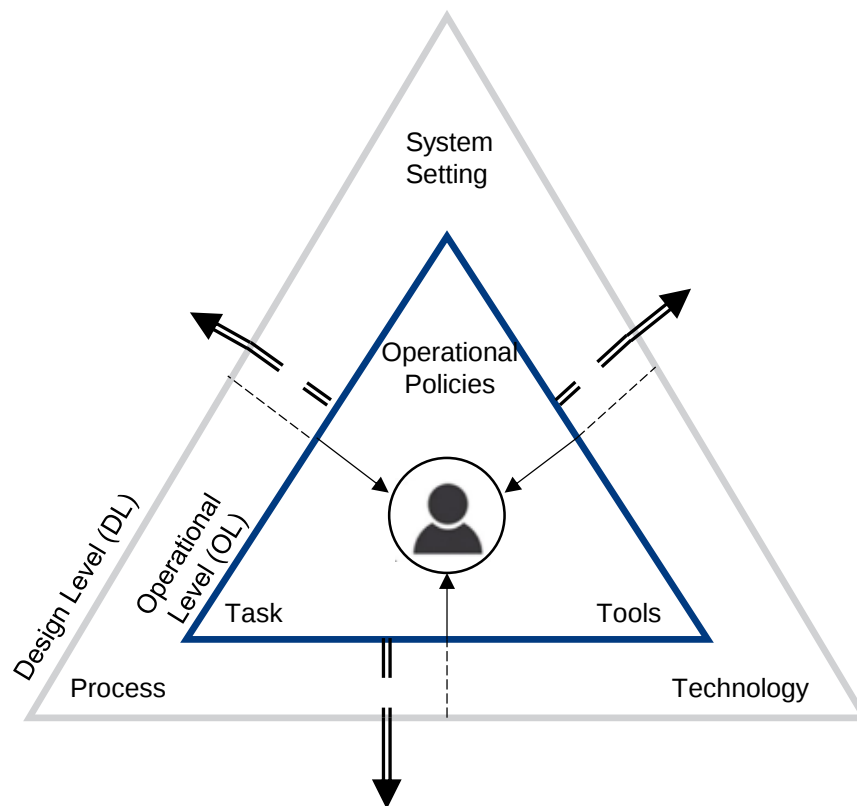


Bild A-5: Framework der Integration von Humanfaktoren nach VIJAYAKUMAR ET AL. [VSN22]

A2.4 Wirtschaftliche Mitarbeiterqualifizierung durch die lernorientierte Montagesystemgestaltung nach MARKS

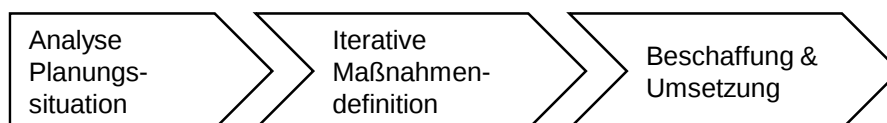


Bild A-6: Vorgehen zur wirtschaftlichen Mitarbeiterqualifizierung durch lernorientierte Montagesystemgestaltung nach MARKS [MAR19]

A2.5 Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen nach GLONEGGER

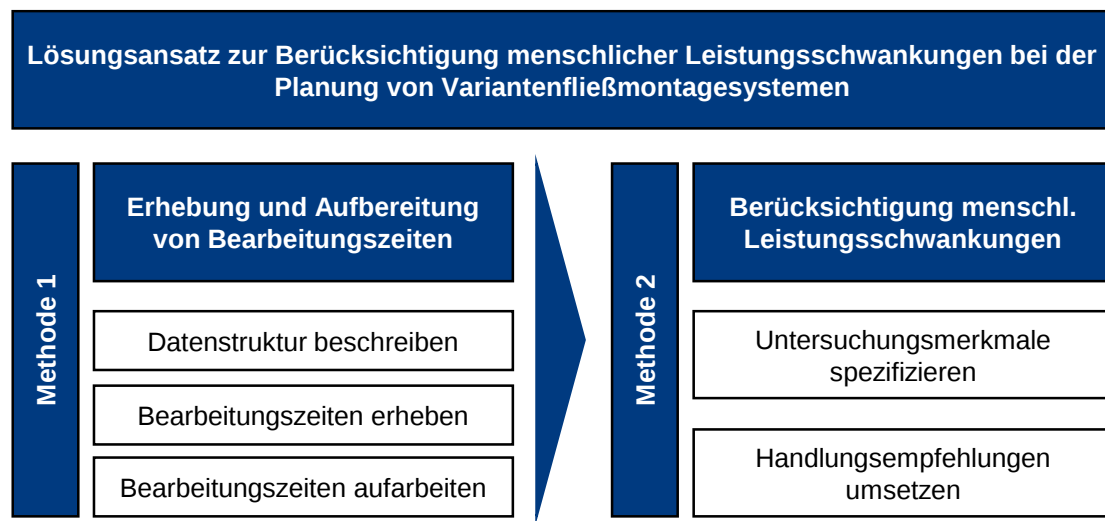


Bild A-7: Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen nach Glonegger [Glo15]

A2.6 Dynamische, adaptive Mitarbeiterzuordnung nach STRANG ET AL.

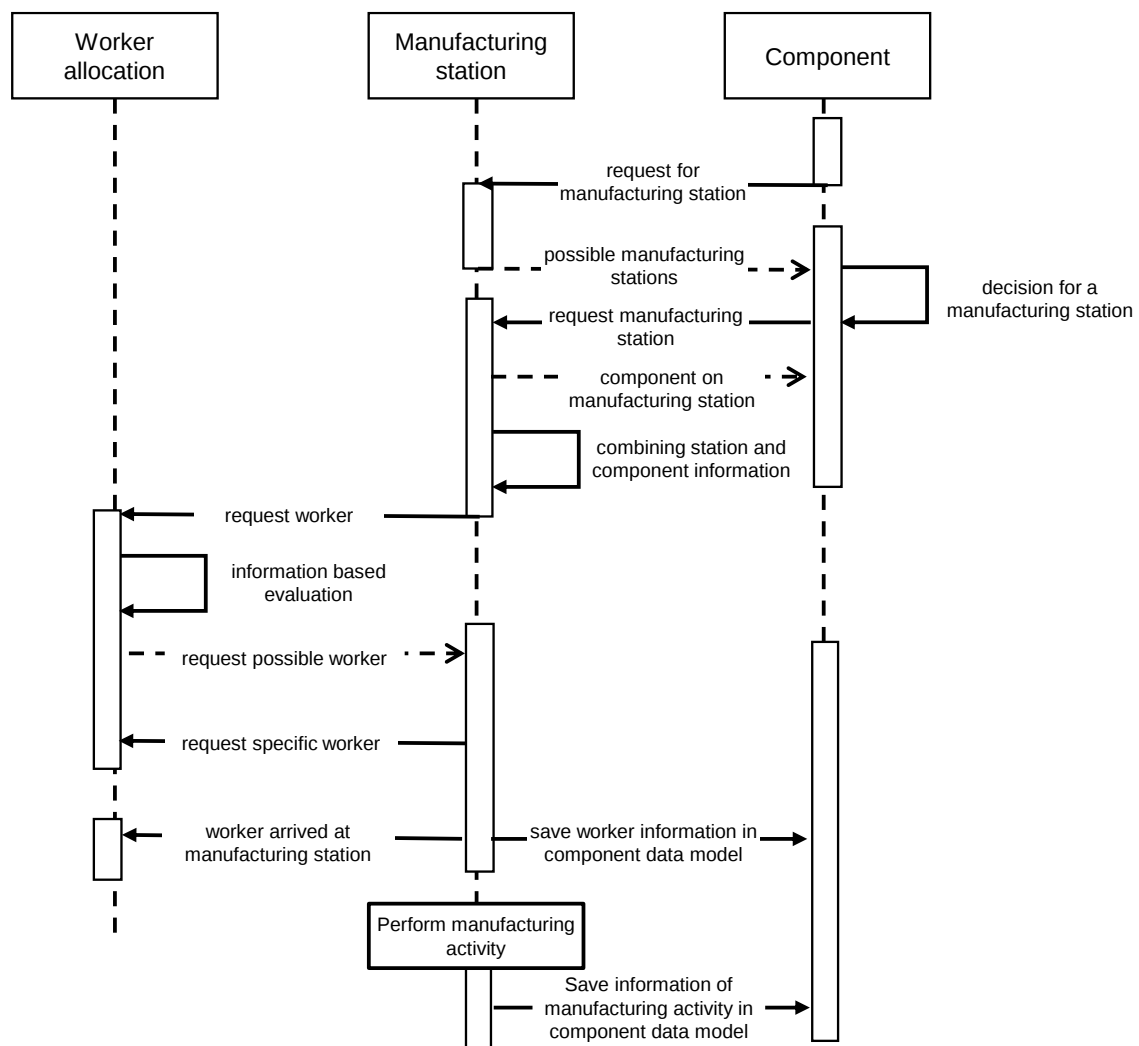


Bild A-8: Kommunikationsszenario für die dynamische, adaptive Aufgabenzuordnung nach STRANG ET AL. [SGA16]

A2.7 Kompetenzmodellierung zur Optimierung der Produktionsplanung nach WANG ET AL.

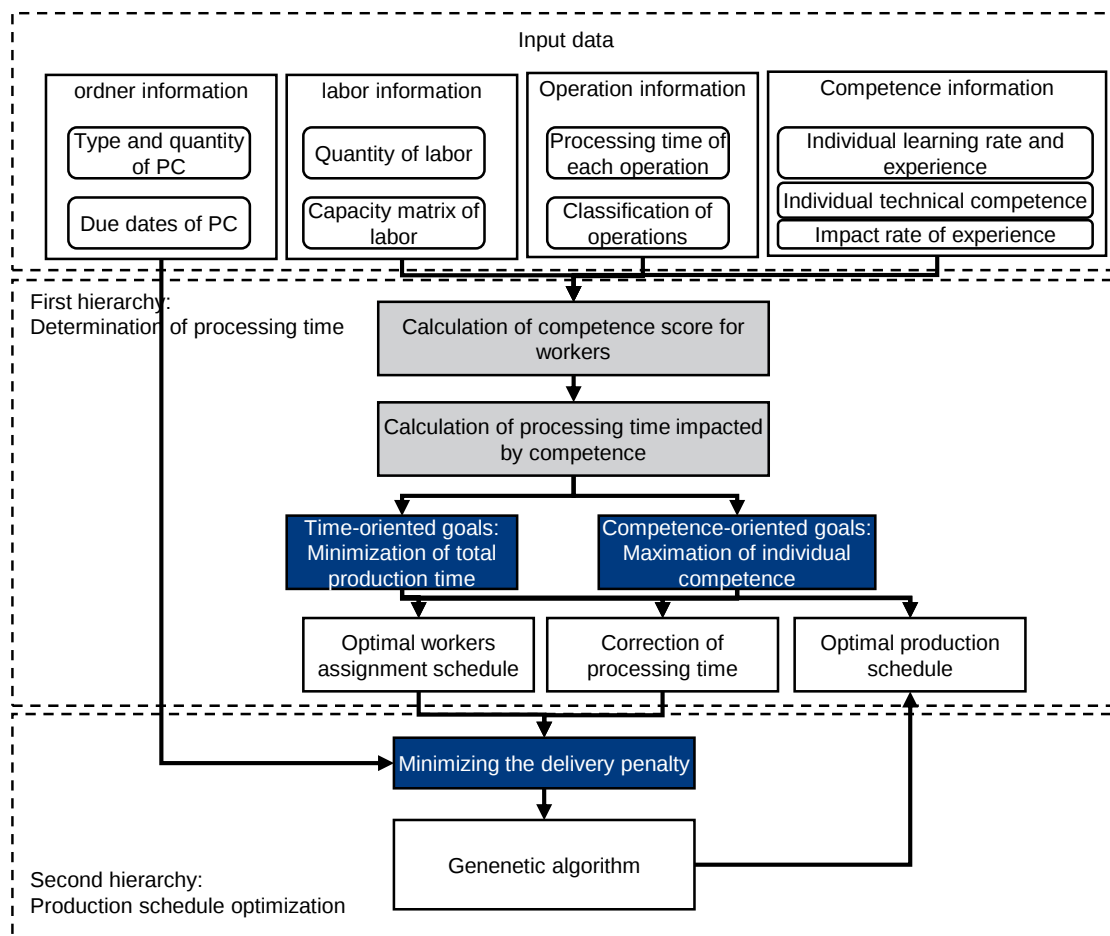


Bild A-9: Kompetenzorientierte Optimierung der Produktionsplanung nach Wang et al. [WHG18a]

A2.8 Kompetenzbasierte Aufgabenzuordnung nach MALACHOWSKI & KORYTKOWSKI

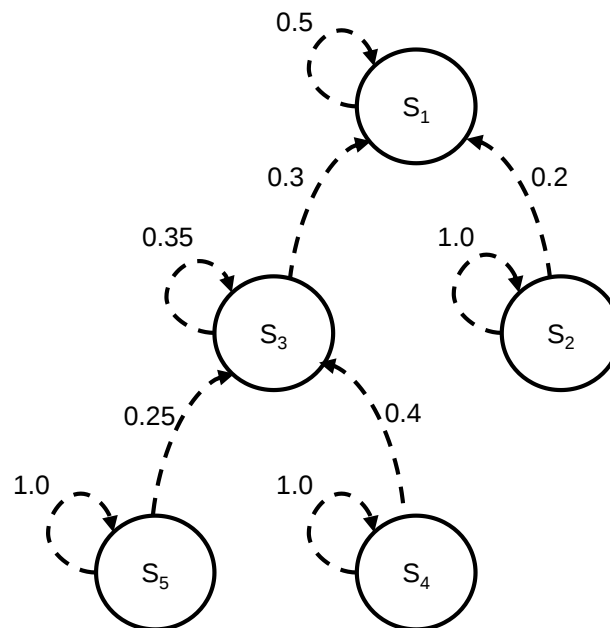


Bild A-10: Fähigkeitsbaum nach Malachowski & Korytkowski [MK19]

A2.9 Kompetenzorientierte Fertigungsplanung und -steuerung nach WINTER

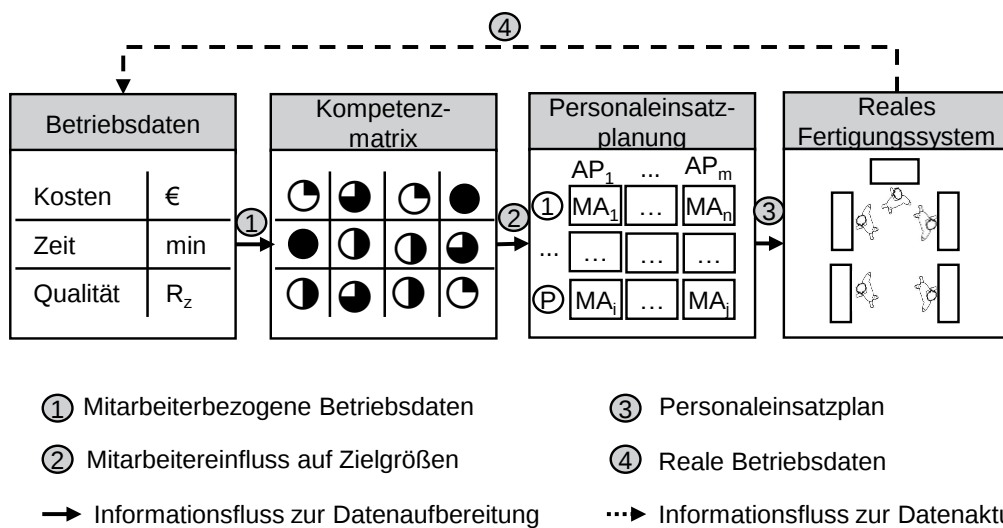


Bild A-11: Methode zur kompetenzorientierten Fertigungsplanung und -steuerung nach WINTER [Win17]

A2.10 Kurzfristige Fließbandabstimmung nach PRÖPSTER

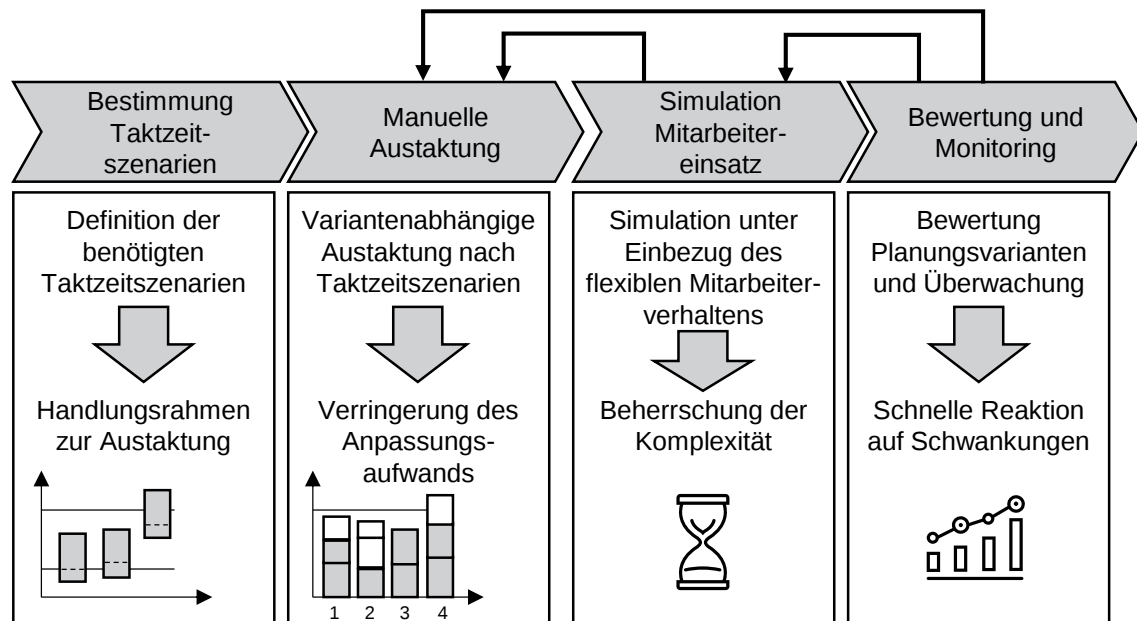


Bild A-12: Methode zur kurzfristigen Fließbandabstimmung nach PRÖPSTER [Prö15]

A2.11 Job-Rotation unter Berücksichtigung ergonomischer und fähigkeitsbezogener Aspekte nach HOCHDÖRFFER ET AL.

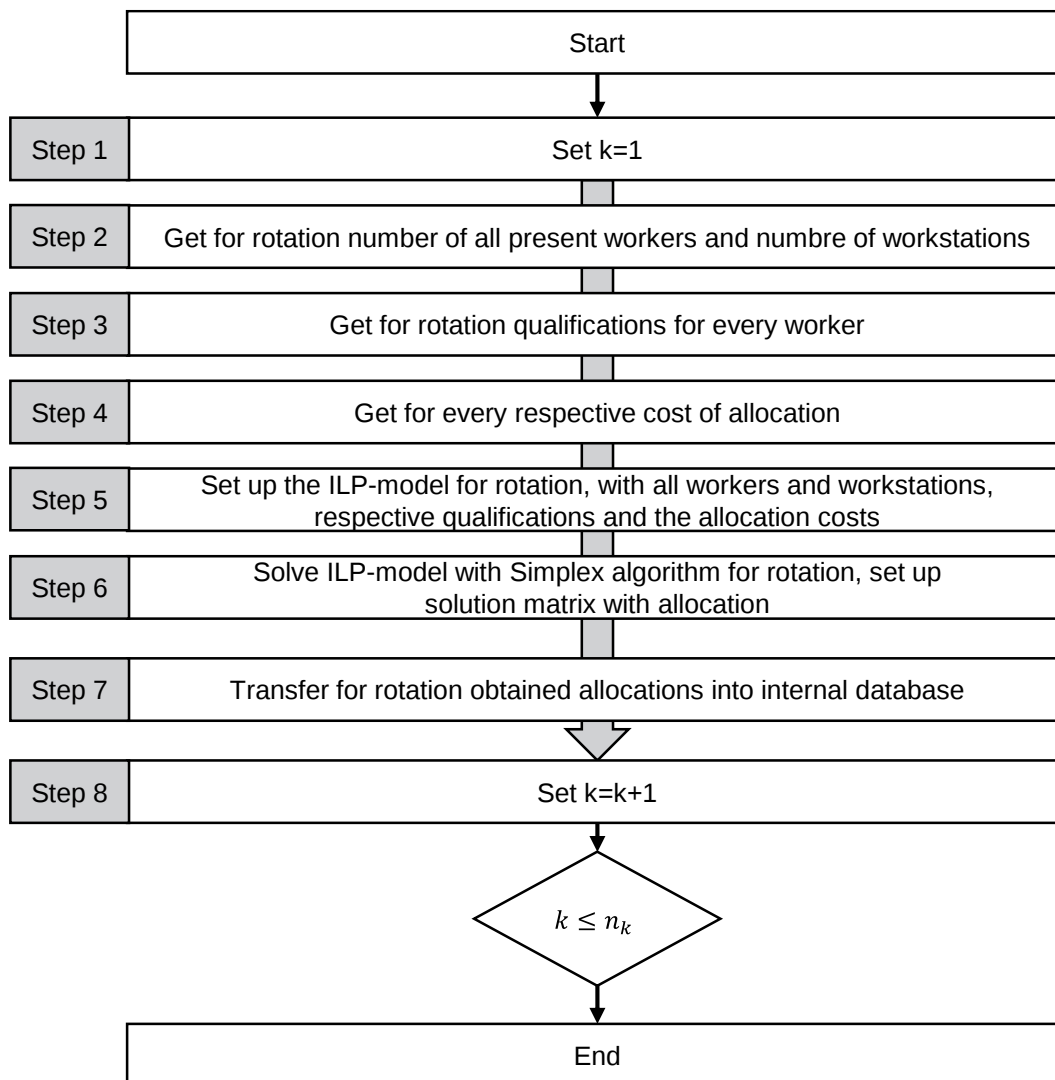


Bild A-13: "Balanced Ergonomic Qualification preserving job Rotation" Methode nach HOCHDÖRFFER ET AL. [HHL18]

A3 Steckbriefe zu etablierten Lernkurven-Modellen

A3.1 Modell von WRIGHT

Wright: Lernkurven-Modelle

Wright, T. P.: *Factors Affecting the Cost of Airplanes. Journal of the Aeronautical Sciences*, 3,1936, p.122 – 128.

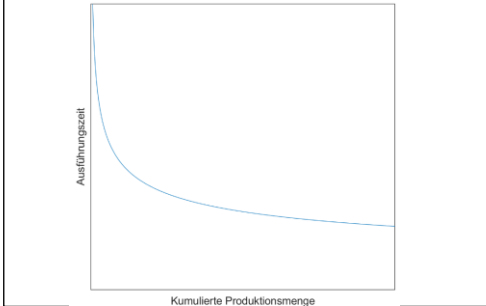
Beschreibung

Wrights Lernkurve ist nach wie vor eine der am häufigsten verwendeten Lernkurven, was vor allem auf ihre einfache Struktur und die Tatsache zurückzuführen ist, dass sie in der Praxis häufig validiert wurde. Für jeden der Arbeiter sind die Anzahl der bearbeiteten Montageaufgaben und die durchschnittliche Montagezeit pro Aufgabe verfügbar. Häufig wird eine Lernrate von 80% angenommen.

Mathematische Beschreibung

$$y = y_1 * x^{-b}$$

Grafische Darstellung



Legende

y = Aufwand für die x -te Einheit

B = Degressionsfaktor (berechenbar aus Lernrate)

x = Anzahl der zu fertigenden Einheiten

y_1 = Aufwand für die erste Einheit

Bild A-14: Steckbrief: Modell von Wright [Wri36]

A3.2 Stanford-B Modell

Stanford-B: Lernkurven-Modelle

H. Asher, "Cost-quantity relationships in the airframe industry," Rep. No. R-291, The Rand Corporation, Santa Monica, CA, July 1, 1956.

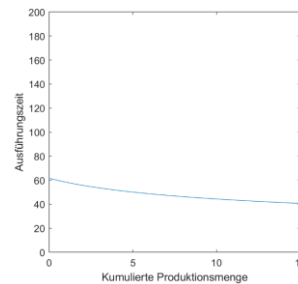
Beschreibung

Basierend auf Wrights log-linearem Modell berücksichtigt das Stanford-B Modell Vorerfahrungen der Arbeiterschaft. Diese wird mit dem sogenannten B-Faktor modelliert. Vorerfahrungen können gesammelt werden durch wiederholte Ausführung gleicher oder zumindest ähnlicher Aufgaben.

Mathematische Beschreibung

$$y = y_1 * (x + B)^{-b}$$

Grafische Darstellung



Legende

y = Aufwand für die x -te Einheit B = Erfahrungsfaktor
 x = Anzahl der zu fertigenden Einheiten y_1 = Aufwand für die erste Einheit
 b = Lernrate

Bild A-15: Steckbrief: Stanford-B [Ash56]

A3.3 S-Kurven Modell

S-Kurven Modell: Lernkurven-Modelle

G. W. Carr, "Peacetime cost estimating requires new learning curves," Aviation, vol. 45, April 1946.

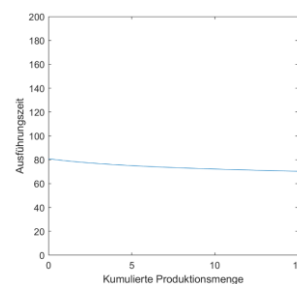
Beschreibung

Das von Carr entwickelte S-Kurvenmodell kombiniert die Modellierung der Vorerfahrung aus dem Stanford-B Modell mit der Kombination aus maschineller und menschlicher Arbeit aus dem Dejong-Modell. Dies geschieht durch den Erwartungsfaktor B und den Inkompressibilitätsfaktor M .

Mathematische Beschreibung

$$y = y_1 [M + (1 - M)(x + B)^b]$$

Grafische Darstellung



Legende

y = Aufwand für die x -te Einheit b = Lernrate
 x = Anzahl der zu fertigenden Einheiten y_1 = Aufwand für die erste Einheit
 M = Inkompressibilitätsfaktor B = Erfahrungsfaktor

Bild A-16: Steckbrief: S-Kurven Modell [Car46]

A3.4 Modell von Ullrich

Ullrichs Modell: Lernkurven-Modelle

Ullrich G. Wirtschaftliches Anlernen in der Serienmontage. Ein Beitrag zur Lernkurventheorie. Dissertation Gerhard-Mercator-Universität Duisburg. Aachen: Shaker Verlag; 1995

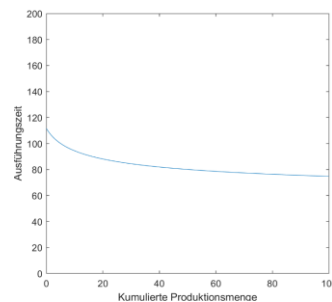
Beschreibung

Ullrichs Modell ist eine Mischung des Modells von Ballof und dem Stanford-B Modell. Es kombiniert die asymptotische Annäherung an eine stationäre Zeit (in diesem Fall k) mit der Berücksichtigung von Vorerfahrungen, wie es auch im Stanford-B Modell passiert.

Mathematische Beschreibung

$$y = k + s * (x + B)^{-b}$$

Grafische Darstellung



Legende

y = Aufwand für die x -te Einheit

b = Lernrate

x = Anzahl der zu fertigenden Einheiten

k = Asymptote der Kurve / Minimale Ausführungszeit

s = normierte Montagezeit für die erste Einheit

B = Faktor zur Berücksichtigung von Vorerfahrung

Bild A-17: Steckbrief: Modell von ULLRICH [Ull95]

A3.5 Modell von Woeber

Woebers Modell: Lernkurven-Modelle

Woeber, W., 1983. Die Anwendung von Lernkurven in der Fertigungsindustrie. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, Vol. 128, o. l., pp. 9-12.

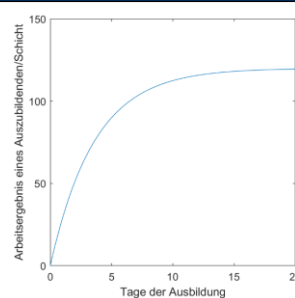
Beschreibung

Woebers Modell basiert nicht auf dem log-linearen Modell von Wright, sondern stellt eine modifizierte negative Exponentialfunktion da. Mit Verlauf der Ausbildung nähert sich die Produktivität des Auszubildenden immer weiter der Produktivität des voll ausgebildeten Mitarbeiters an. Die Produktivität des voll ausgebildeten Mitarbeiters stellt eine obere Schranke da.

Mathematische Beschreibung

$$y = a - a * e^{-cx}$$

Grafische Darstellung



Legende

y = Arbeitsergebnis eines Auszubildenden pro Schicht

a = Arbeitsergebnis eines vollausgebildeten Arbeiters pro Schicht

x = Tage der Ausbildung

c = Ablaufvariable.

Bild A-18: Steckbrief: Modell von Woeber [Woe83]

A3.6 Modell von Levy

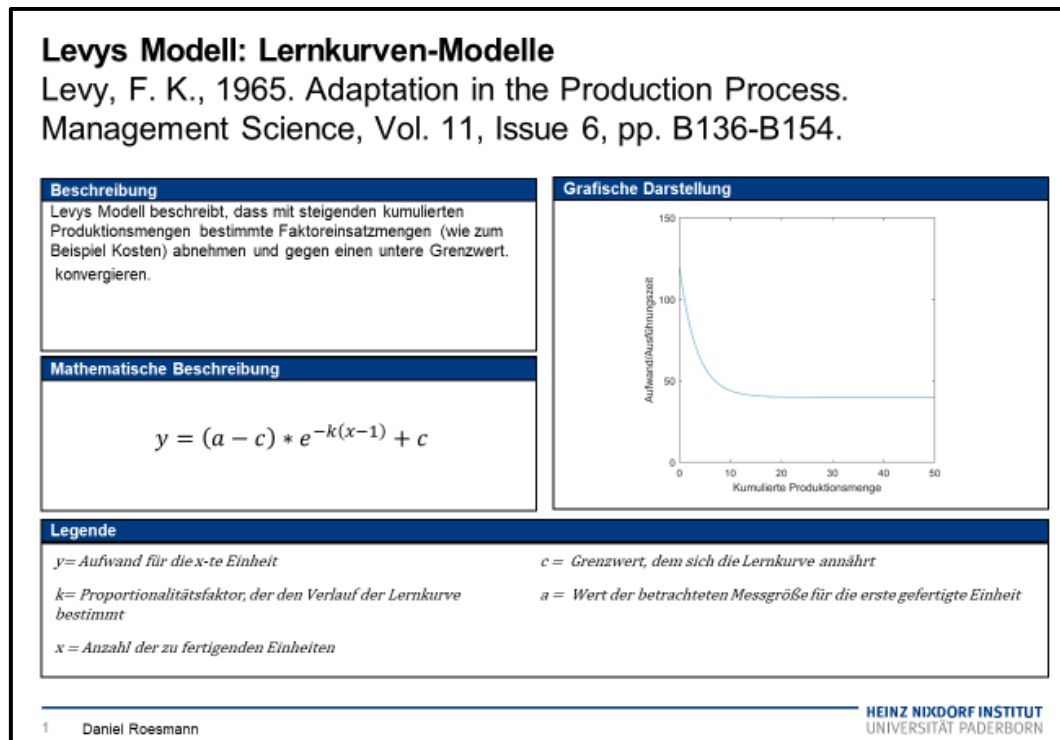


Bild A-19: Steckbrief: Modell von LEVY [Lev65]

A3.7 Modell von Knecht

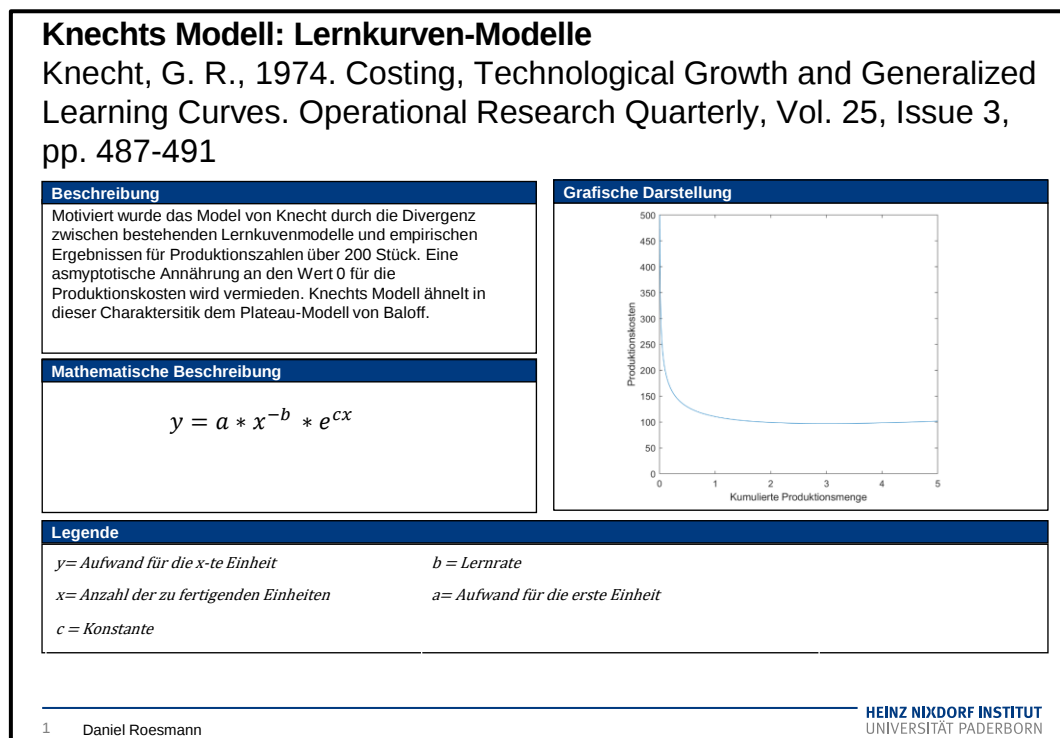


Bild A-20: Steckbrief: Modell von KNECHT [Kne74]

A3.8 Modell von Towill

Towills Modell: Lernkurven-Modelle

D. R. Towill and U. Kaloo, "Productivity drift in extended learning curves," Omega, vol. 6, no. 4, pp. 295-304, 1978

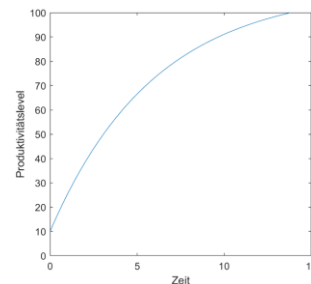
Beschreibung

Towills Modell beschreibt das Produktivitätslevel in Abhängigkeit der Zeit (sonst: kumulierte Produktionsmenge). Die Gleichung modelliert die Produktivität in der „Lern-“ oder auch „Anlaufphase“. Die Länge der Anlaufphase wird durch den Parameter τ festgelegt.

Mathematische Beschreibung

$$y = y_1 + y_f(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Grafische Darstellung



Legende

y = Produktivitätslevel zum Zeitpunkt t

y_f = Maximaler Anstieg der Produktivität

t = Zeitpunkt

y_1 = Produktivität bei Zeitpunkt $t = 0$

τ = Lernzeitkonstante

Bild A-21: Steckbrief: Modell von TOWILL [TK78]

A3.9 Modell von DeJong

DeJong: Lernkurven-Modelle

J. R. DeJong, "The effects of increasing skill on cycle time and its consequences for time standards," Ergonomics, pp. 5 1-60, Nov. 1957

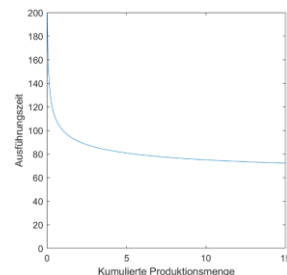
Beschreibung

DeJongs Modell, das auf Wrights log-linearen Modell basiert, modelliert in welchem Verhältnis der manuelle und maschinelle Anteil einer Aufgabe steht. Ist $M = 0$ so reduziert sich die Formel zu benanntem log-linearem Modell. Dies ist der Fall bei einer vollständig manuellen Aufgabe. Ist $M=1$, kann kein Lerneffekt mehr stattfinden. Dies ist bei einer Aufgabe der Fall, die vollkommen maschinell durchgeführt wird

Mathematische Beschreibung

$$y = y_1 * [M + (1 - M) * x^{-b}]$$

Grafische Darstellung



Legende

y = Aufwand für die x -te Einheit

y_1 = Aufwand für die erste Einheit

x = Anzahl der zu fertigenden Einheiten

M = Inkompressibilitätsfaktor

b = Lernrate

Bild A-22: Steckbrief: Modell von DeJong [DeJ57]

A3.10 Modell von Baloff

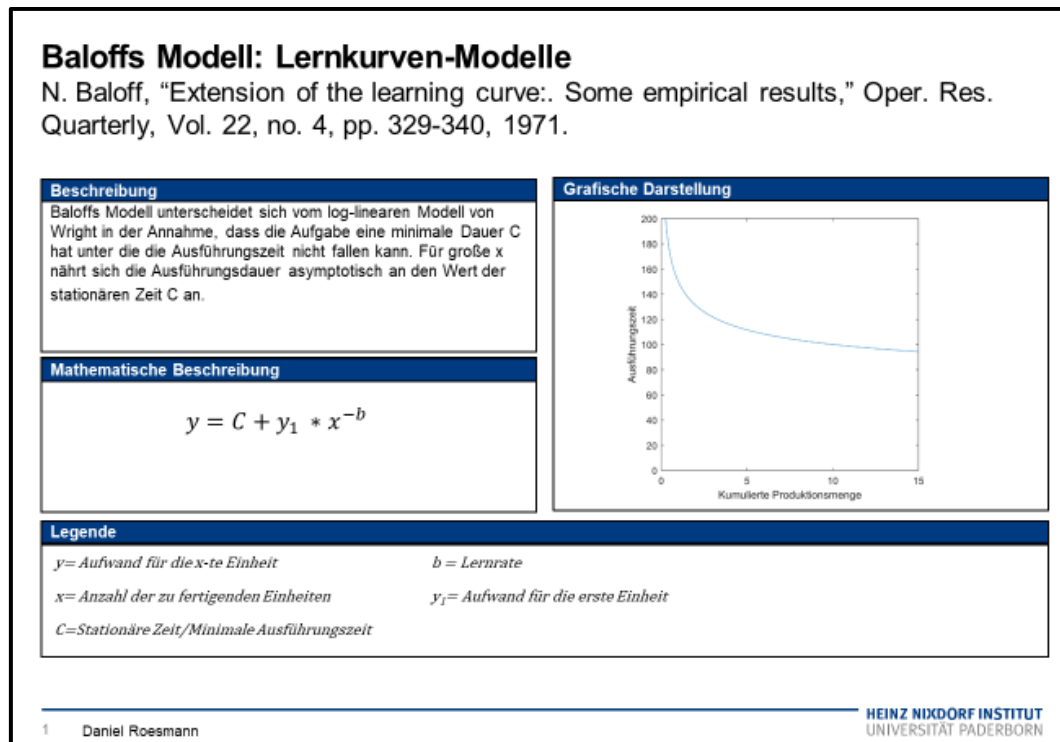


Bild A-23: Steckbrief: Modell von BALOFF [Bal71]

A3.11 2-Parameter-Hyperbel, 3-Parameter-Hyperbel

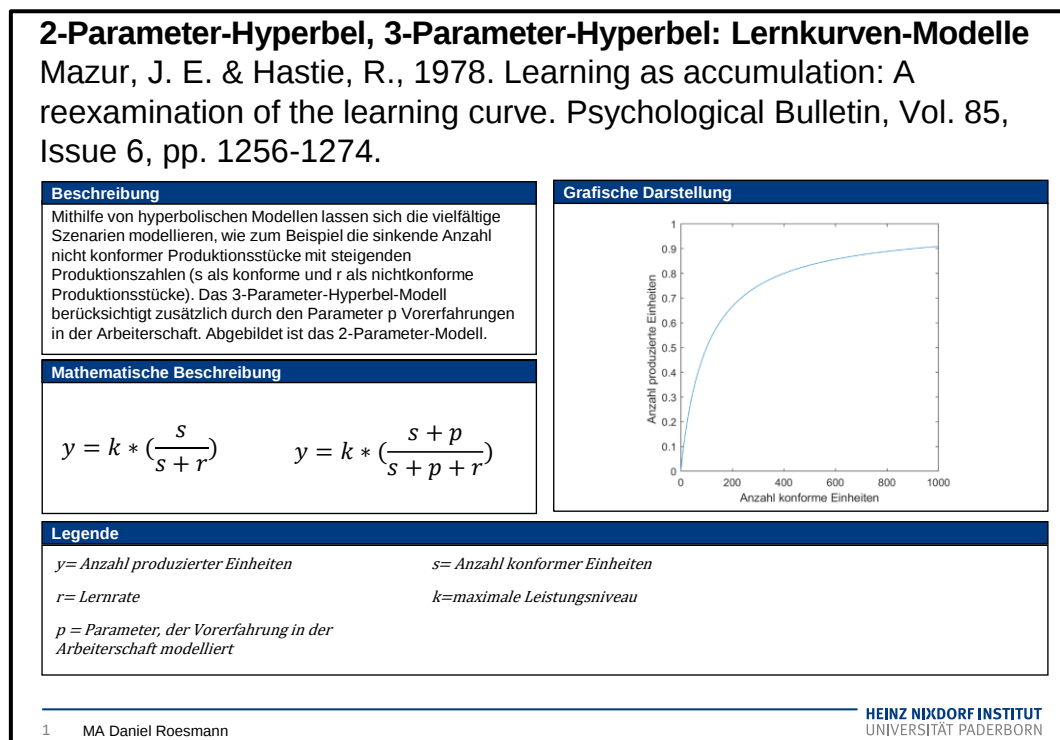


Bild A-24: Steckbrief: 2-Parameter-Hyperbel, 3-Parameter-Hyperbel [MH78]

A4 Nutzwertanalyse der Auswahl am besten geeigneten Ansatzes zur automatisierten Bestimmung von Montagevorranggraphen

ID	Bewertungskriterien	Gewichtung in [%]	Matrix-basierter Ansatz Bewertung	Gew. x Bew.	Graphen-basierter Ansatz Bewertung	Gew. x Bew.	Lernender Vorranggraph Bewertung	Gew. x Bew.	Montagefelder Bewertung	Gew. x Bew.	Kollisionsanalyse Bewertung	Gew. x Bew.
1	Input	(20)		(47,5)		(67,5)		(127,5)		(27,5)		(172,5)
1.1	Komplexität der Produkte	12,5	2	25	3	37,5	9	112,5	1	12,5	9	112,5
1.2	zusätzlich notwendige Inputs	7,5	3	22,5	4	30	2	15	2	15	8	60
2	Automatisierungsgrad	(30)		(52,5)		(67,5)		(112,5)		(60)		(262,5)
3.1	Quantität der Nutzerinteraktionen	7,5	2	15	3	22,5	5	37,5	2	15	8	60
3.2	manueller Arbeitsaufwand	7,5	1	7,5	2	15	4	30	2	15	9	67,5
3.3	notwendige Kompetenz des Nutzers	15	2	30	2	30	2	30	2	30	9	135
4	Qualität des Outputs	(30)		(107,5)		(107,5)		(167,5)		(177,5)		(222,5)
4.1	Eindeutigkeit der Lösung	7,5	7	52,5	7	52,5	2	15	6	45	7	52,5
4.2	Fehleranfälligkeit	12,5	2	25	2	25	5	62,5	3	37,5	8	100
4.3	zusätzlicher Arbeitsaufwand zur Ableitung des Vorranggraphen	10	3	30	3	30	9	90	7	70	7	70
5	Rahmenbedingungen	(20)		(150)		(130)		(160)		(150)		(60)
5.1	Hardwareanforderungen	5	8	40	7	35	7	35	7	35	3	15
5.2	Rechenzeit	10	8	80	7	70	8	80	8	80	2	20
5.3	Unabhängigkeit von kommerzieller Software	5	6	30	5	25	9	45	7	35	5	25
Summe		100		357,5		372,5		552,5		390		717,5

Bewertung von 1 (sehr schlecht) bis 10 (sehr gut)

Bild A-25: Nutzwertanalyse zur Auswahl des geeignetsten Ansatzes zur automatisierten Bestimmung von Montagevorranggraphen [Hei21]

A5 Pseudo-Code der genutzten Optimierungsalgorithmen

Tabelle A-1 Pseudo-Code der genutzten Optimierungsalgorithmen

Ungarische Methode	Engpasszuordnungsproblem
1: Input: Kostenmatrix $C = c_{ij}$ der Größe $n \times n$ 2: Output: Lösung S für das LBAP 3: for each $c_i \in C$ do 4: for each $c_{ji} \in c_i$ do $c_{ji} = c_{ji} - \min(c_i)$ 5: for each $c_{ij} \in C$ do 6: if $c_{ji} == 0$ then 7: Kennzeichne c_{ji} mit einem * 8: if n * wurden gesetzt then 9: Die gesetzten * kennzeichnen eine optimale Lösung. Die Berechnung ist abgeschlossen. 10: for each $c_j \in C$ do 11: if c_j enthält eine * Markierung then 12: Kennzeichne c_j mit einem + als Randmarkierung 13: Ermittle das Minimum h der nicht randmarkierten Elemente 14: if $h > 0$ then 15: Addiere h zu allen doppelt randmarkierten Elementen und subtrahiere h von allen nicht randmarkierten Elementen 16: Kennzeichne eine nicht randmarkierte 17: Null mit einem Strich. 18: if In der Zeile der Null ein * steht then 19: Lösche die Randmarkierung des Sterns, setze für die Zeile eine Randmarkierung und gehe zu Schritt 5 20: Kennzeichne die Null mit einem * 21: if In der Spalte der Null steht ein anderer * then 22: Sei i die Zeile, die den anderen Stern enthält. Wähle die in Zeile i mit Strich versehene Null und gehe zu Schritt 9. 23: Lösche sämtliche Striche und Zeilenmarkierungen und gehe zu Schritt 3	1: Input: Kostenmatrix $C = c_{ij}$ 2: Output: Lösung S für das LBAP 3: Definiere $\hat{c} = \max(\min_i c_{ij}, \min_j c_{ij})$ 4: for each $c_{ij} \in C$ do 5: if $c_{ij} > \hat{c}$ then 6: $c_{ij} = \infty$ 7: Erzeuge Lösung mit der Ungarischen Methode 8: if S existiert then 9: S ist optimal für das LBAP 10: else 11: Sortiere $C = c_{ij}$ aufsteigend 12: Nimm den nächstgrößeren Wert zu $\hat{c}$ als verbessertes $\hat{c}$. 13: Wiederhole Schritte 3-7 bis die Lösung erzeugt wurde.

A6 Übersicht über Fügetechnologien

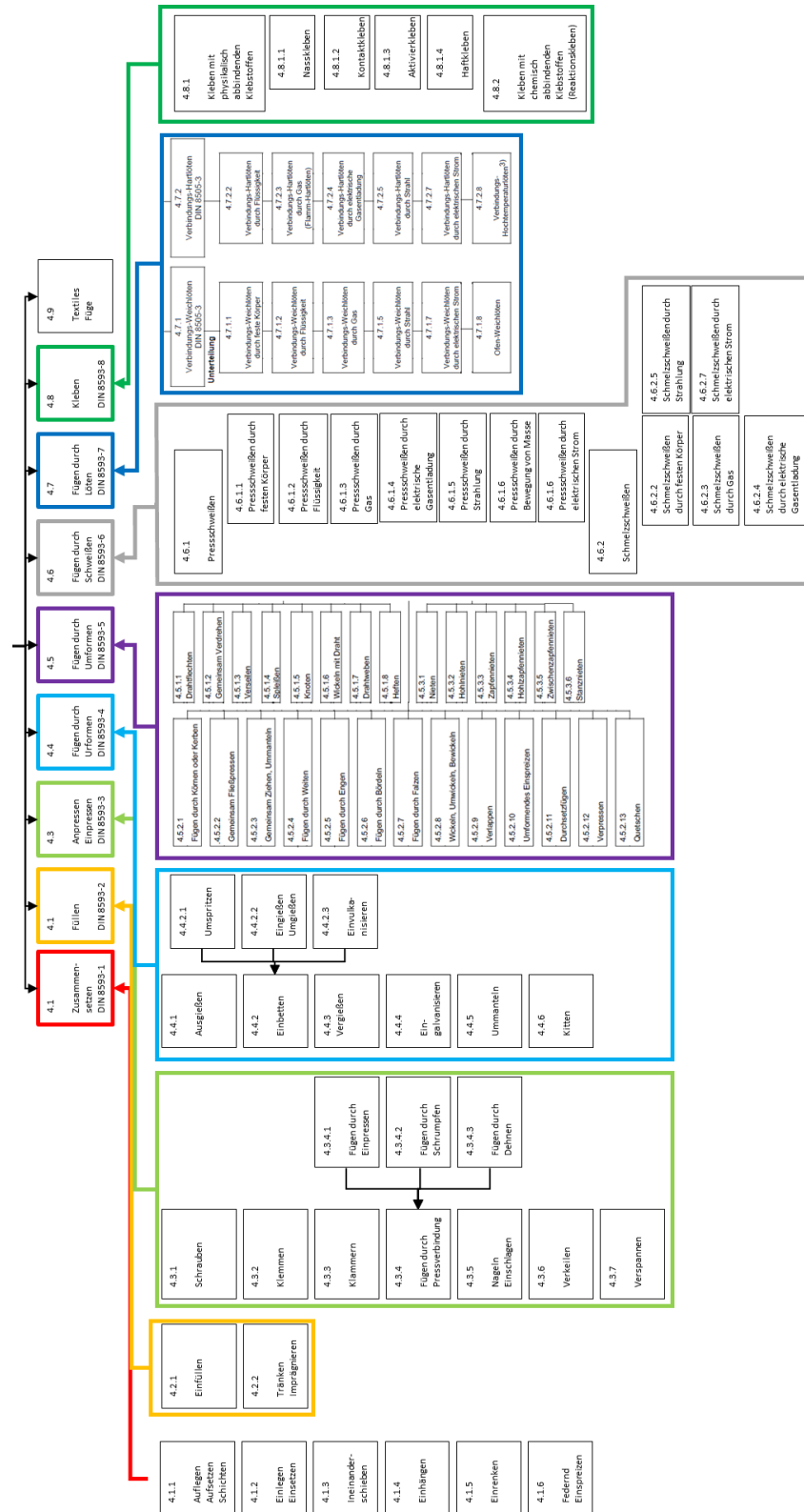


Bild A-26: Übersicht über Fügetechnologien nach [DIN8593]

A7 Notation für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

Tabelle A-2: Notation für die fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

Allgemein	P	Set von Arbeitsplätzen im Montagesystem, die indiziert werden mit j
	W	Set von Mitarbeiter, $ W = P $, die indiziert werden mit k
	S_{p_j}	Benötigte Fähigkeiten an Montagearbeitsplatz p_j
	$S_{w_k p_j}$	Fähigkeitsniveau von Mitarbeiter w_k an Montagearbeitsplatz p_j
	S_{w_k}	Fähigkeitsniveau von Mitarbeiter w_k für das gesamte Montagesystem
Fließband- Abstimmung	t_o	Ausführungszeit der Operation o
	c	Taktzeit des Montagesystems
	V_{p_j}	Menge an Montageoperationen, die an dem Montagearbeitsplatz p_j erfolgen
	$t(V_{p_j})$	Summe der Ausführungszeiten der Montageoperationen, die an dem Montagearbeitsplatz p_j ausgeführt werden.
Übereinstimmung vom Montagevorgängen	$cor(S_x, S_y)$	Übereinstimmung der Fähigkeiten an Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
	cor_{TE}	Übereinstimmung der verwendeten Fügetechnologie an Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
	cor_{ST}	Übereinstimmung der ausgeführten Montageschritte an Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
	cor_{TO}	Übereinstimmung des verwendeten Werkzeugs an Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
	a, b, c	Gewichtungsfaktoren für die Ermittlung der Übereinstimmung der Fähigkeiten an Montagearbeitsplatz p_j ; $a, b, c \in [0,1]$
	$TE_x TE_y$	Fügetechnologie an Montagearbeitsplatz p_x sowie Montagearbeitsplatz p_y
	TE_{cp}	Kleinstes gemeinsame Elternkonzept der Fügetechnologien p_x und p_y innerhalb der Taxonomie der DIN 8593
	N_x, N_y, N_{cp}	Abstände zwischen den Technologien in der Taxonomie der DIN 8593
	TO_{p_j}	Montagewerkzeug an Montagearbeitsplatz p_j
	α	Gewichtungsfaktor der Montagewerkzeuge
	ST_{p_j}	MTM-Code-Zeichenkette an Montagearbeitsplatz p_j
Prognose der Fähig-	n	Anzahl der montierten Baugruppen
	i	Zykluszahl
	$t_{w_k p_j}(n, i)$	Zeit, die von Mitarbeiter w_k benötigt wird, um n -te Einheit am Arbeitsplatz p_j im i -ten Zyklus zu montieren

	t_{min,p_j}	Mindestzeit für die Montage an Arbeitsplatz p_j
	$u_{iw_k p_j}$	Erinnerte Wiederholungen von Mitarbeiter w_k an Montagearbeitsplatz p_j nach der Unterbrechung in Zyklus i
	$b_{w_k p_j}$	Lernexponent von Mitarbeiter w_k an Montagearbeitsplatz p_j
	V_r	Verlustrate aufgrund des Alters
	k_{w_k}	Alter des Mitarbeiters w_k
	$\hat{t}_{w_k p_j}(n, i)$	Zeit für die n -te Einheit in der Vergessenskurve am Arbeitsplatz p_j im i -ten Zyklus zu montieren
	$f_{w_k p_j}$	Vergessensrate von Mitarbeiter w_k an Montagearbeitsplatz p_j
	$d_{w_k p_j, max}$	Unterbrechungsdauer für das totale Vergessen von Mitarbeiter w_k an Montagearbeitsplatz p_j
	$v_{w_k p_j i}$	Anzahl der Einheiten, die in der Unterbrechung von Mitarbeiter w_k an Montagearbeitsplatz p_j bearbeitet werden können
	$t(v_{w_k p_j i})$	Benötigte Zeit zur Montage von $v_{w_k p_j i}$ Einheiten unter Berücksichtigung der Lernkurve
Aufgaben- zuordnung	$c_{w_k p_j}$	Kosten für die Zuordnung von Mitarbeiter w_k zu Montagearbeitsplatz p_j
	$x_{w_k p_j}$	Zuordnung von Mitarbeiter w_k zu Montagearbeitsplatz p_j
	T_{w_k, p_j}	Zykluszeit für Mitarbeiter w_k an Montagearbeitsplatz p_j
	T_i	Zykluszeit $\triangleq$ maximale Zeit über alle Mitarbeiter w im Zyklus i

A8 Software-Werkzeug zur menschenzentrierten Montageplanung und Montagesteuerung durch fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

A8.1 Mobile App

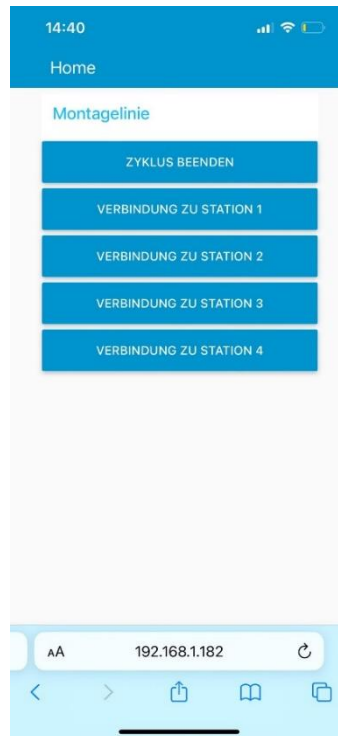
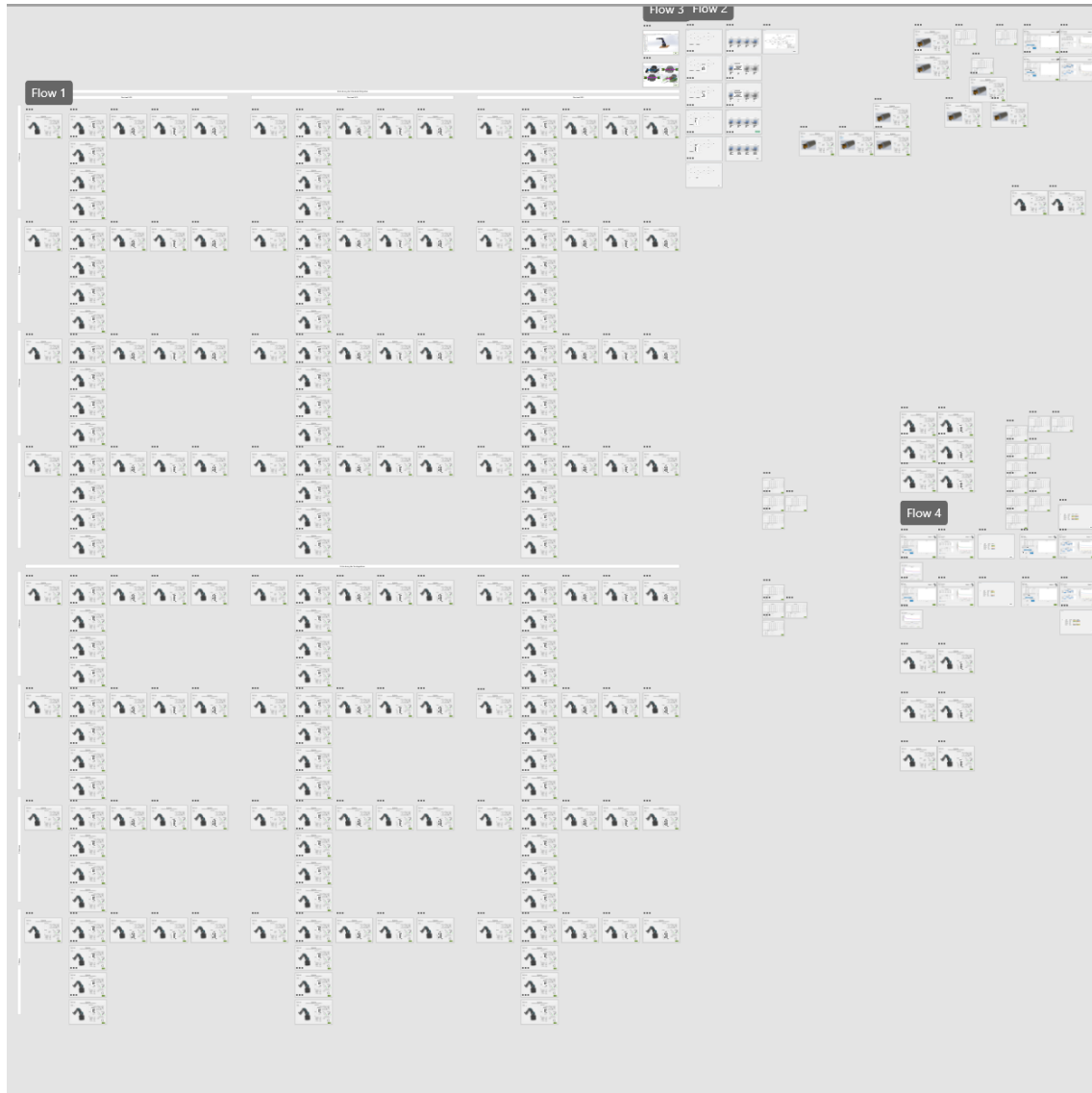


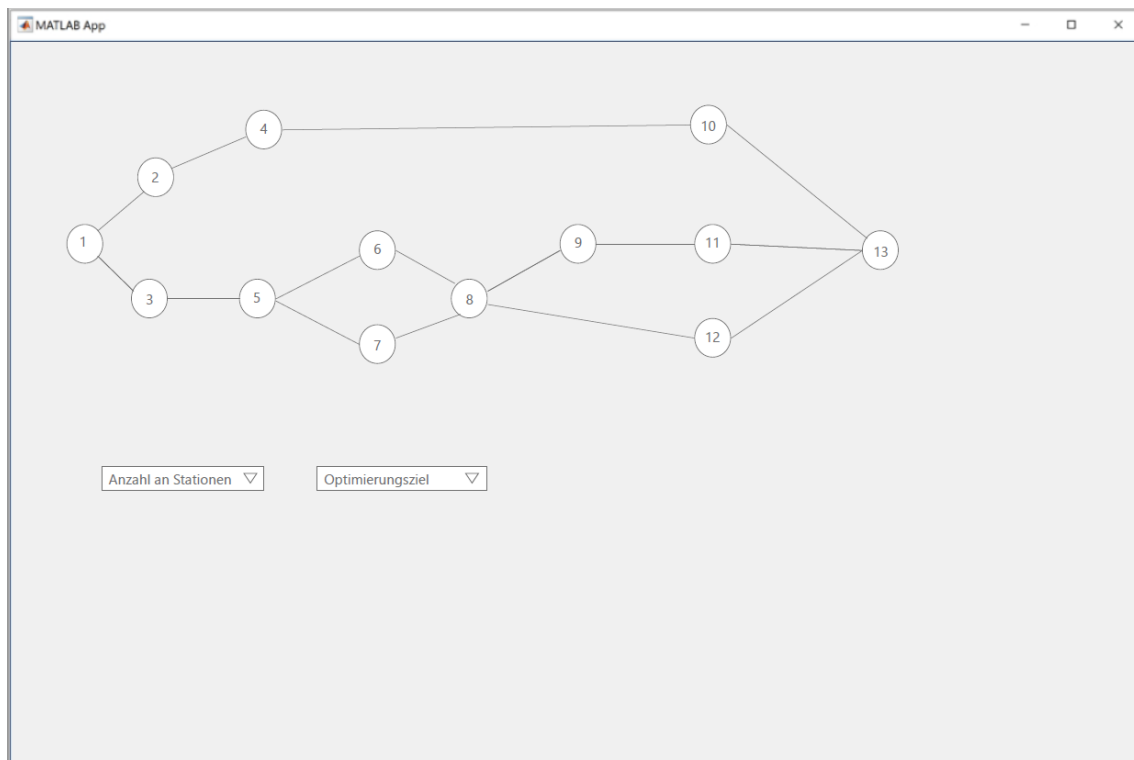
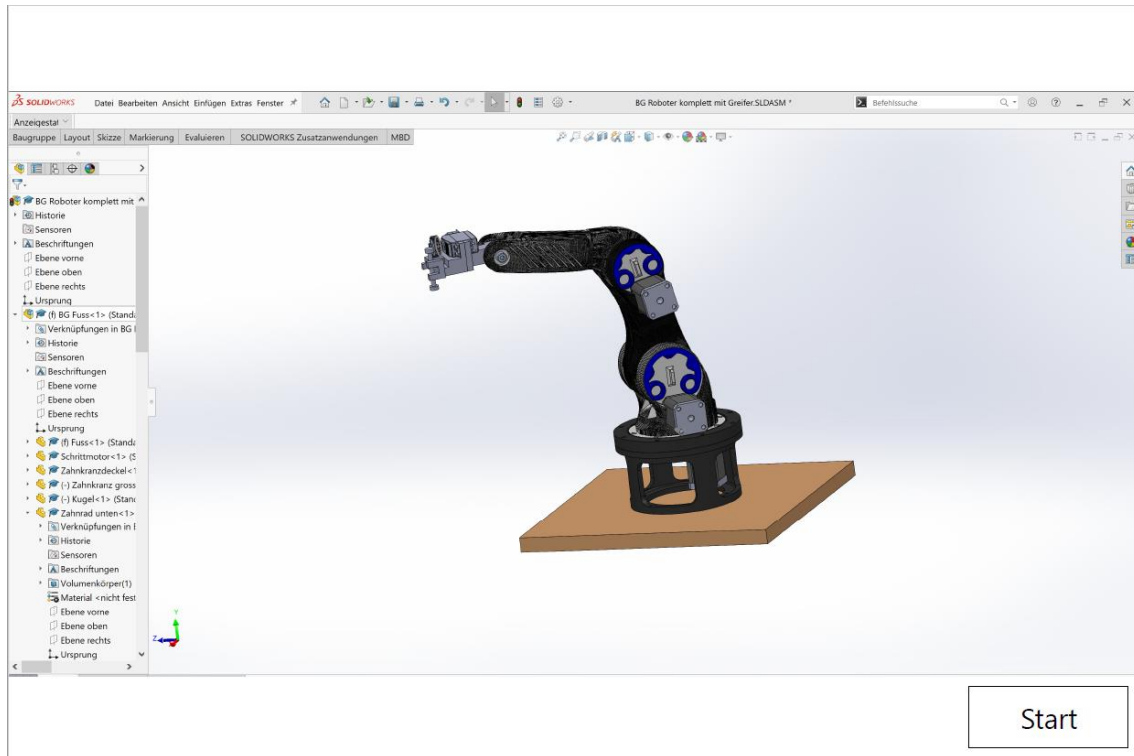
Bild A-27: Mobile GUI der IBM Node-Red Applikation für den Datenaustausch im Cyber-physischen Montagesystem

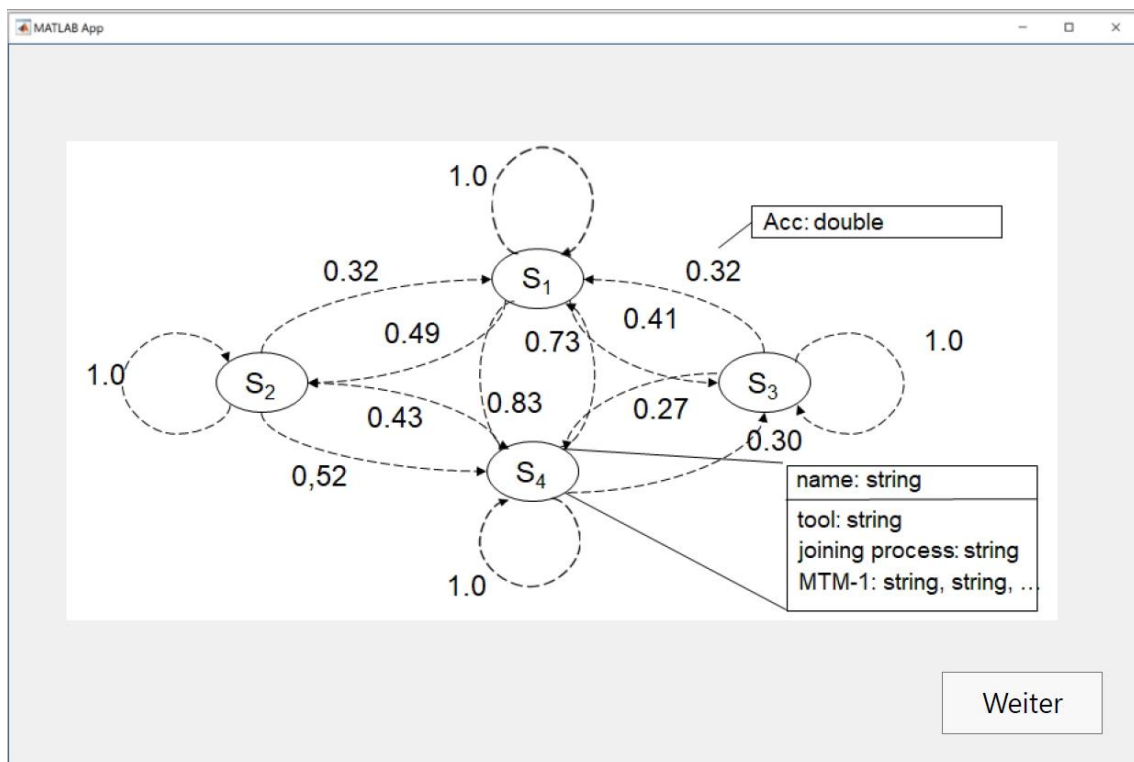
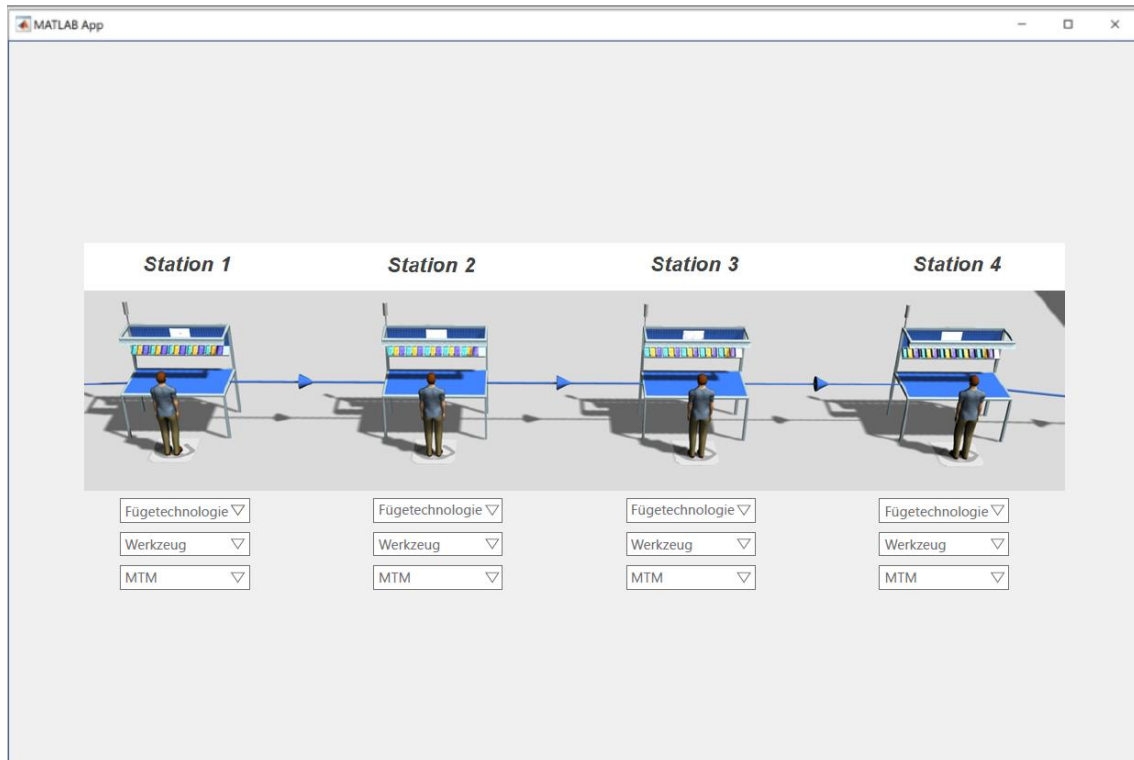
A8.2 Mock-Up in Adobe-XD

Übersicht über den Mock-Up in der Softwareprogramm Adobe-XD. Der MockUp besteht aus 269 Seiten und 4 Flows um spezifische Entscheidungspunkte zu evaluieren.



Der MockUp umfasst neben den eigentlichen Seiten der *MathWorks Matlab* Applikation zudem weitere Seiten zur ganzheitlichen Darstellung.





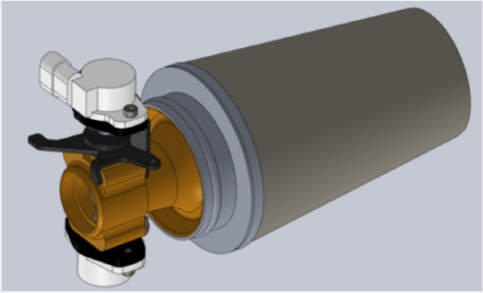
Step 0: Start

Montage App

Skill-based worker assignment in a manuel assembly line

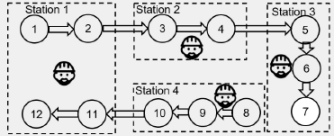
Produkt

Drosselklappe



Anzahl Stationen

4



Stückzahl

300



SIM



MTM-Zeiten



Ziel

☒ 1 Minimierung der Montagedauer

☐ 2 Maximierung der Mitarbeiterfähigkeiten

☐ 3 Pareto-Optimal







Gantt-Chart ausgeben

Mitarbeiterliste einsehen/ändern

Rotation

1



START

ID	Name	Vorname	Rotation 1
1	Müller	Jürgen	Station 1
2	Markwart	Tabea	Station 4
3	Zimmer	Julius	
4	Hoffmann	Max	
5	Richter	Sophie	Station 3
6	Altawil	Ahmed	Station 2

Weiter

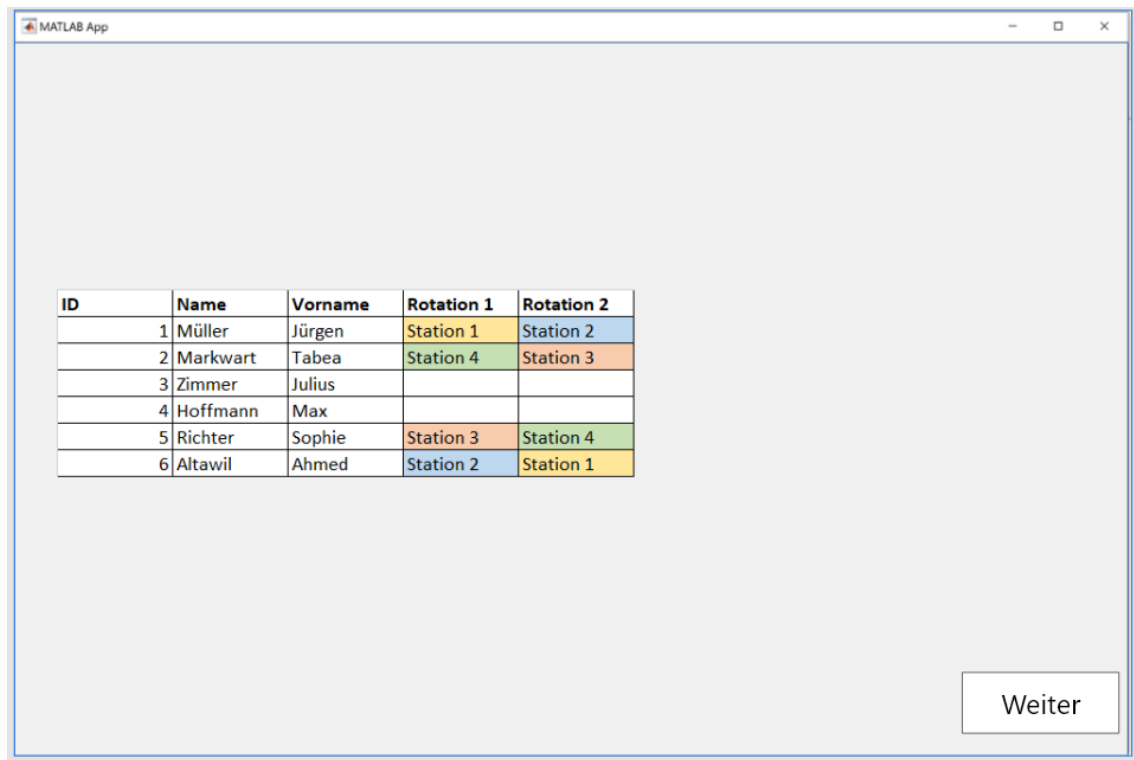


Bild A-28: Mock-Up in Adobe XD

A8.3 Bedienungsanleitung

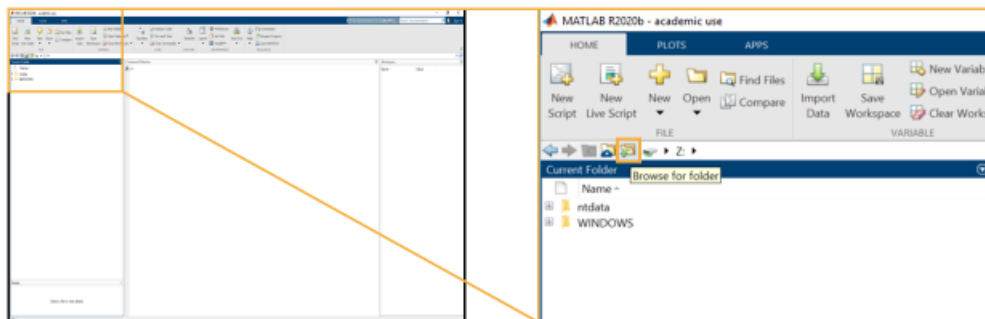
HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

MontageApp: Anleitung

Referent: M. Sc. Daniel Roesmann



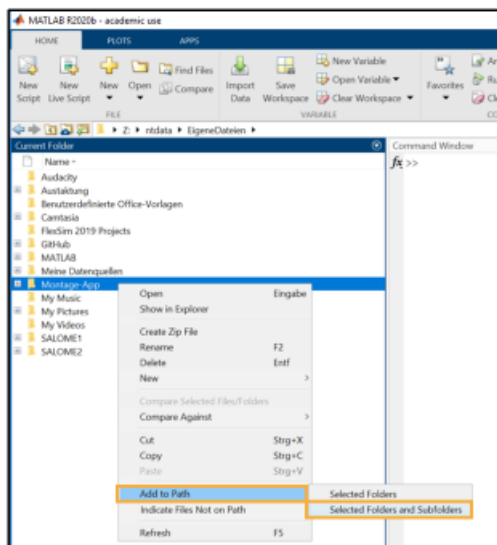
Vorbereitung 1



1 Matlab Starten

2 Ordner auswählen, in der die „MontageApp“ gespeichert wurde

Vorbereitung 2



3 Ordner „MontageApp“ mit Subordnern zum „Path“ hinzufügen

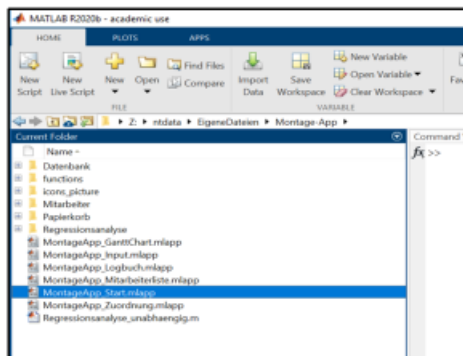
- Rechtsklick auf „MontageApp“
- „Add to Path“
- „Selected Folders and Subfolders“

3 MontageApp

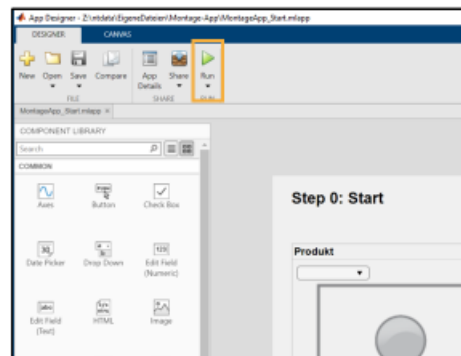
Anleitung

HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

Vorbereitung 3



4 Ordner „MontageApp“ öffnen & „MontageApp_Start.mlapp“ starten



5 App starten mit „Run“

4 MontageApp

Anleitung

HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

MontageApp: Start

6 MATLAB App

Step 0: Start Montage App
Skill-based worker assignment in a manual assembly line

Produkt
 Auswahl des Produktes
 (Roboterarm, Drosselklappe, Roboterarm)
 Anzahl der Stationen abhängig vom gewählten Produkt
 Zu fertige Stückzahl auswählen -kann mit jeder Rotation angepasst werden-
 Auswahl der Zielgröße

Anzahl Stationen
 4
 Überprüfung der Ausstattung (Zuordnung der Montagevorgänge zu den Stationen)

Ziel
 1 Minimierung der Montagezeit
 2 Maximierung der Mitarbeiterfähigkeiten
 3 Pareto-Optimal
 Bearbeitung der Mitarbeiterdaten

MTM-Zeiten
 Gantt-Chart ausgeben
 Mitarbeiterliste einsehen/ändern
 Rotation

Berechnungen starten **START**

HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

5 MontageApp

Anleitung

MontageApp: Input

7 Montage App

Step 1: Input

Produkt Roboterarm
 Auswahl der Mitarbeiter:
 Anzahl Mitarbeiter= Anzahl Stationen!
 Lernkurven des ausgewählten Mitarbeiters

Mitarbeiter Fähigkeitstypen

ID	Name	Vorname	Alter	Verfügbarkeit
1	Müller	Jürgen	55	☐
2	Markwart	Selma	45	☒
3	Zimmer	Julius	24	☒
4	Hoffmann	Max	34	☐
5	Richter	Sophia	22	☒
6	Alavi	Ahmed	27	☒

Länge der Unterbrechung
 Pause (B) 0 sek
 totale Vergessen (dmax) 0 sek mit j=1 und 50-1200
 Pause (B) anwenden

Stückzahl 50

Regressionsanalyse
 Logbuch

Lernkurve-Markwart
 Berücksichtigung einer durchgeführten Pause (Vergessen von Erfahrung)
 Zeit in Sekunden
 Produkte
 Station 1, Station 2, Station 3, Station 4
 MTM-Zeit 1, MTM-Zeit 2, MTM-Zeit 3, MTM-Zeit 4
 t₁, t₂

Zurück **Export Excel** **Berechne Zuordnung**

HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

6 MontageApp

Anleitung

MontageApp: Zuordnung

8

Montage App

Step 2: Zuordnung

Produkt: Roboterarm

Rotation 1

Zuordnung

Wahlbare Outputs

Gesamtzeit (Summiert)

	Markwart	Zimmer	Richter	Altwell
Station 1	1.4347e+04	1.2475e+04	1.1999e+04	1.2365e+04
Station 2	1.1148e+04	9.5715e+03	9.2999e+03	9.6071e+03
Station 3	1.4788e+04	1.3123e+04	1.2511e+04	1.2683e+04
Station 4	1.2734e+04	1.1185e+04	1.0583e+04	1.0709e+04

Zuordnung

	Markwart	Zimmer	Richter	Altwell
Station 1	☐	☒	☐	☐
Station 2	☒	☐	☐	☐
Station 3	☐	☐	☒	☐
Station 4	☐	☐	☐	☒

Zuordnung der letzten Rotation

Export einer Excel für die Simulation in Plant Simulation

Zurück Export für Simulation

Gewonnene Erfahrung durch Zuordnung anwenden

Rotation

Zuordnung der Mitarbeiter an die Stationen -kann manuell angepasst werden- Hier: Minimierung der Montagedauer

Ausführungzeit [sek]

Einheiten

Station 2, Markwart

Station 3, Richter

Station 1, Zimmer

Station 4, Altwell

7 MontageApp

Anleitung

HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

MontageApp: Input 2

9

Montage App

Step 1: Input

Produkt: Roboterarm

Rotation 2

Mitarbeiter

ID	Name	Vorname	Alter	Verfügbarkeit
1	Müller	Jürgen	56	☐
2	Markwart	Tobias	45	☒
3	Zimmer	Julius	24	☒
4	Hoffmann	Max	34	☐
5	Richter	Sophie	22	☒
6	Altwell	Ahmed	27	☒

Länge der Unterbrechung

Pause (s): 0 sek

totale Vergessen (min): 0 min

Pause (s) anwenden

Stückzahl

50

Regressionsanalyse

Logbuch

Einfluss der Erfahrung

Berücksichtigung einer durchgeführten Pause (Vergessen von Erfahrung)

Anpassung der Stückzahl für die nächste Rotation

Berücksichtigung von Echtzeiteinformationen

Berechne Zuordnung

Lehrkurve: Markwart

Zeit in Sekunden

Produkte

Station 1

Station 2

Station 3

Station 4

MTM-Zeit 1

MTM-Zeit 2

MTM-Zeit 3

MTM-Zeit 4

t₀

t₁

t₂

t₃

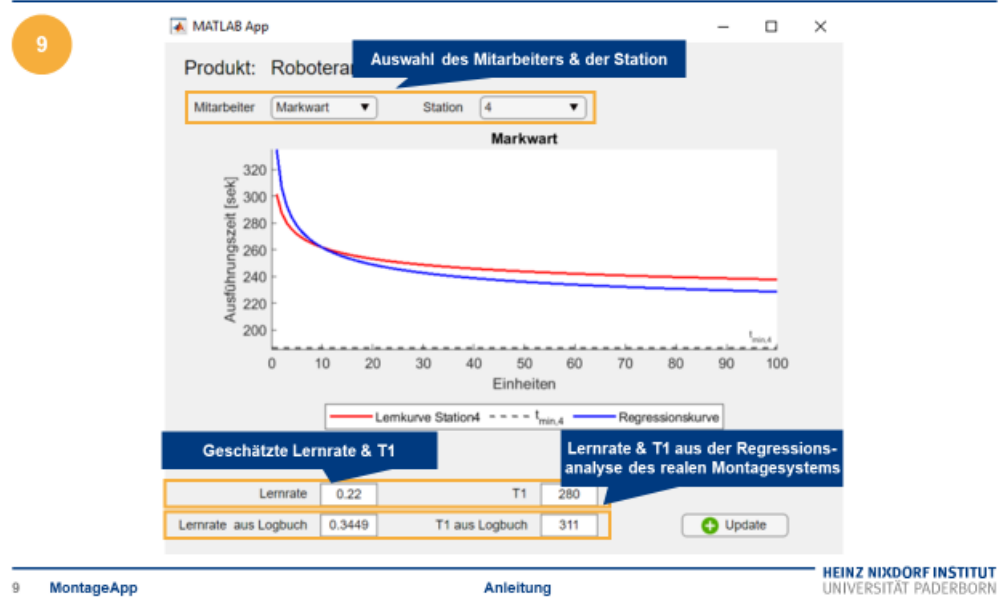
t₄

8 MontageApp

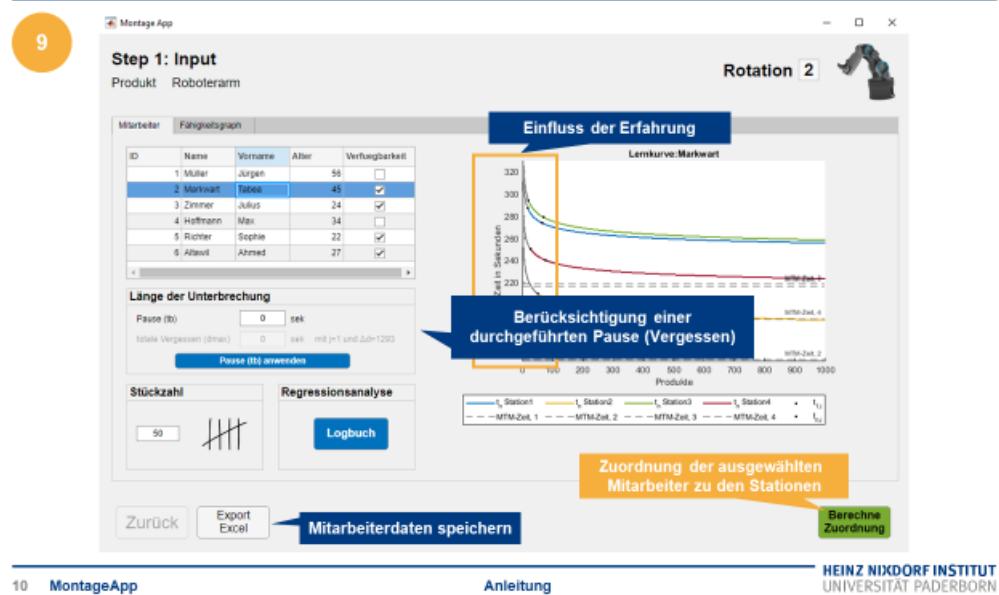
Anleitung

HEINZ NIXDORF INSTITUT
UNIVERSITÄT PADERBORN

MontageApp: Logbuch



MontageApp: Input 2



MontageApp: Zuordnung 2

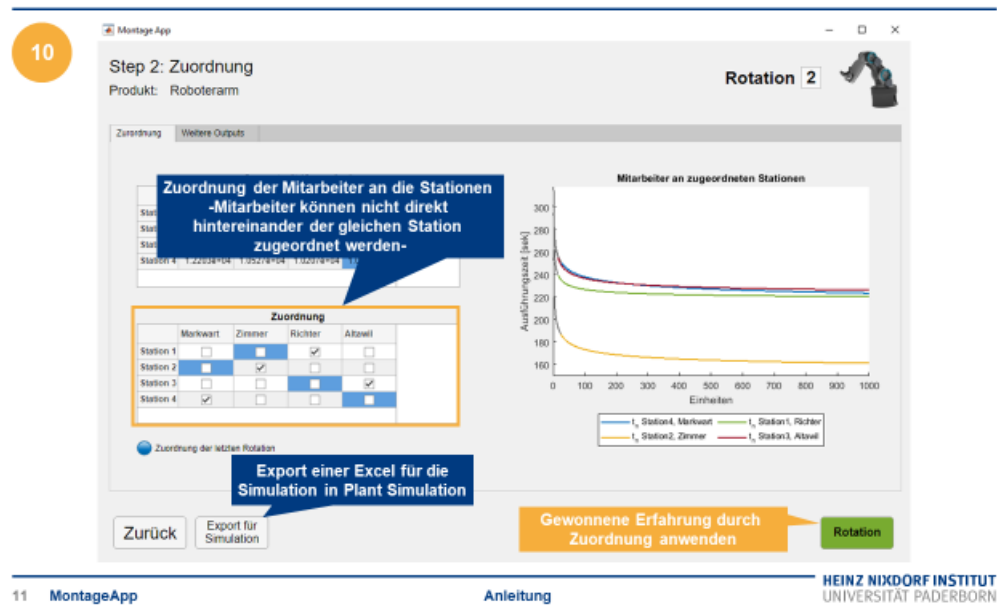


Bild A-29: Bedienungsanleitung der MontageApp

A9 Validierung

A9.1 Verwendete Fragebögen

A9.1.1 System Usability Scale nach BROOKE

Tabelle A-3: System Usability Scale nach BROOKE

	Stimme überhaupt nichz zu			Stimme voll zu	
1. In denke, dass ich die App gerne häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
2. Ich fand die App unnötig komplex.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Ich fand die App einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer sachkundigen Person benötigen, um die App benutzen zu können.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in der App waren gut eingebunden.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
6. Ich denke, die App ist in vielen Punkten noch nicht ausgereift.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	4	4	5
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit der App sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
8. Ich fand die App sehr umständlich zu nutzen.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der App sehr sicher.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die App zu verwenden.	☐	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5

A9.1.2 Fragebogen zur Verschwendung

Der Fokus von Lean Production liegt auf der Ausrichtung der Fertigung und Montage sowie der dazugehörigen Querschnittsfunktionen auf den Kundenbedarf sowie der Vermeidung von Verschwendung. Verschwendung bezeichnet hierbei alle Tätigkeiten, die nicht den Wert des Produkts für den Kunden erhöhen. Bitte bewerten Sie die Veränderung der Verschwendung vom ersten Zyklus bis zum letzten Zyklus.

Tabelle A-4: Fragebogen zur Verschwendung

	Hat deutlich zugenommen			Hat deutlich abgenommen	
1. Verschwendung durch Überproduktion.	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5
2. Verschwendung durch Wartezeit.	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5
3. Verschwendung durch Transport.	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5
4. Verschwendung durch Bewegung.	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5
5. Verschwendung durch unnötige Bearbeitungsschritte.	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5
6. Verschwendung durch hohe Bestände.	☐ 1	☐ 2	☐ 4	☐ 4	☐ 5
7. Verschwendung durch Ausschuss.	☐ 1	☐ 2	☐ 3	☐ 4	☐ 5

A9.1.3 Leitfrageninterview des Experteninterviews

Im Anschluss an den Cognitive Walkthrough wird innerhalb der Experteninterviews ein semi-strukturiertes Leitfrageninterview durchgeführt. Die folgenden Fragen wurden wörtlich gestellt:

- 1) Wie bewertest Du die Notwendigkeit einer technischen Unterstützung der menschenzentrierten Montageplanung und -steuerung?
- 2) Worin siehst Du die wesentlichen Vorteile eines solchen Systems?
- 3) Prof. Denkena et al. von der Leibniz Universität Hannover hat 2013 eine empirische Studie in KMUs durchgeführt. Diese ergab fünf wesentliche Potenziale der fähigkeitsorientierten Montageplanung und -steuerung. Wie würdest Du diese auf einer Skala von 1 bis 5 bewerten?
 - a. bessere Kapazitätsauslastung
 - b. eine langfristige Verbesserung der Produktionsergebnisse
 - c. eine bessere Kalkulationsbasis
 - d. eine höhere Motivation
 - e. eine höhere Produktivität
- 4) Für wie hilfreich hältst Du die einzelnen Schritte der Methodik?
- 5) Was fehlt Dir in der Methodik? Spezifische Schritte, Ausgaben oder Restriktionen?

A9.2 Fiktive Beispielszenarien

A9.2.1 Fiktives Beispielszenario I

Szenario 1

Sie sind Ausbilder und Dienstplaner für die Schichten ihrer Mitarbeiter*innen. Ihre Aufgaben besteht in der Ausbildung und Weiterbildung neuer Kollegen*innen. Aufgrund von einem kurzfristigen Krankheitsfall sind die zwei kommenden Rotationen umzuplanen. den Stationen ist ein *Roboterarm* zu montieren. Die Planung sieht ein Montagesystem mit vier Stationen vor. In einem Zyklus sind 250 Stück zu montieren. Sie haben die vier Mitarbeiter*innen (Tabea Markwart, Jürgen Müller, Sophie Richter und Ahmed Altawil) zur Verfügung. Aufgrund der ruhigeren Auftragslage sollen die Mitarbeiter*innen möglichst viel Fähigkeiten aufbauen. Zwischen den beiden Schichten existiert eine Pausenzeit von 15 Minuten (900 Sekunden). Das neue Tool soll für die Aufgabenzuordnung der Mitarbeiter*innen eingesetzt werden.

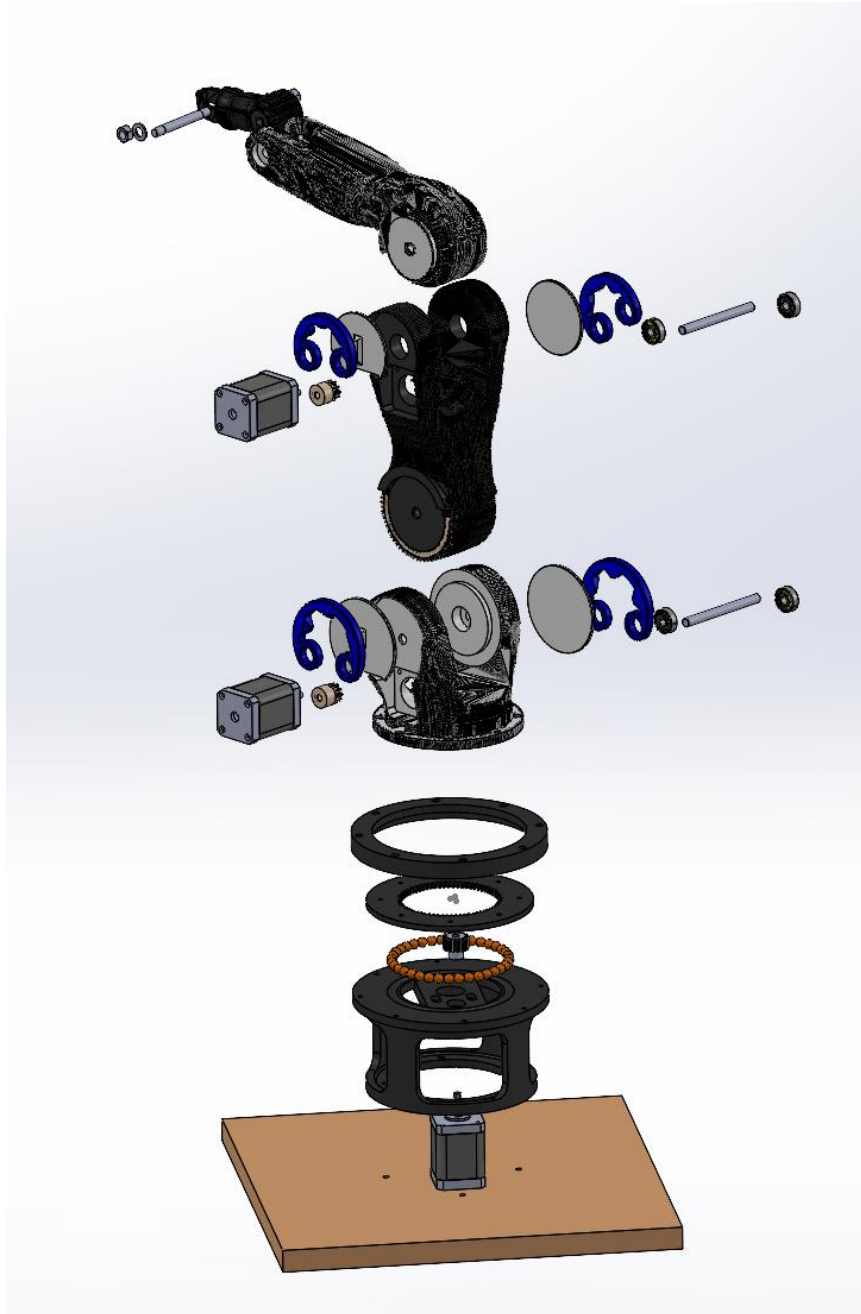
A9.2.2 Fiktives Beispielszenario II

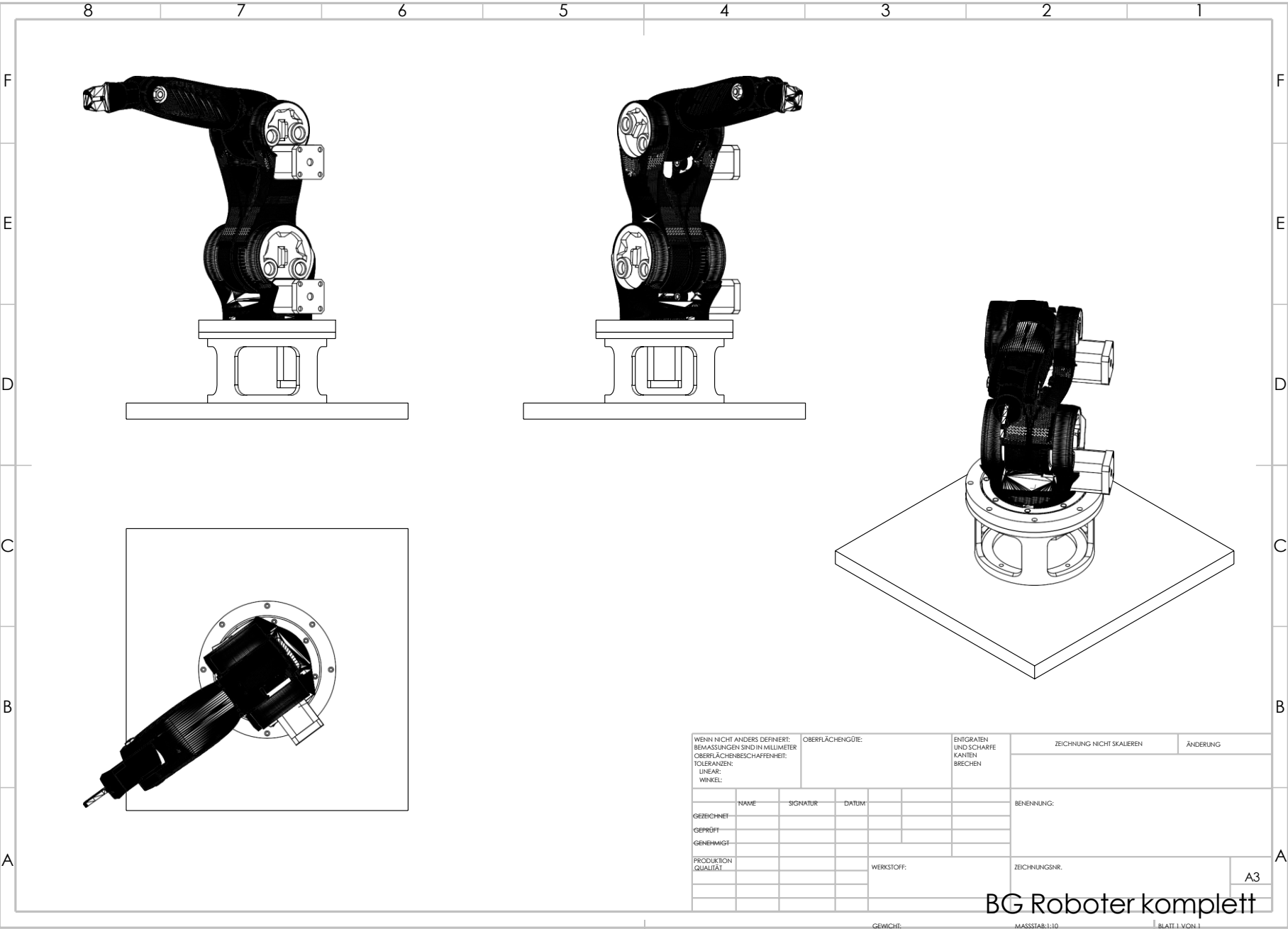
Szenario 2

Sie sind langjähriger Mitarbeiter in der Montage von *Roboterarmen*. Aufgrund eines Krankheitsfalls müssen sie kurzfristig die Funktion des Schichtleiters für den Nachmittag übernehmen. Dies umfasst unter anderem die Aufgabe der *Aufgabenzuordnung der Mitarbeiter*innen* für die nächsten zwei Rotationen. Für die vier Stationen des Montagesystems stehen Ihnen die vier Mitarbeiter (Tabea Markwart, Julius Zimmer, Sophie Richter und Ahmed Altawil) zur Verfügung. In einem Zyklus sind 300 Stück zu montieren. Aufgrund der hohen Nachfrage und der dementsprechend hohen Auftragslage soll die *Montagedauer minimiert* werden. Zwischen den beiden Schichten existiert eine Pausenzeit von 15 Minuten (900 Sekunden).

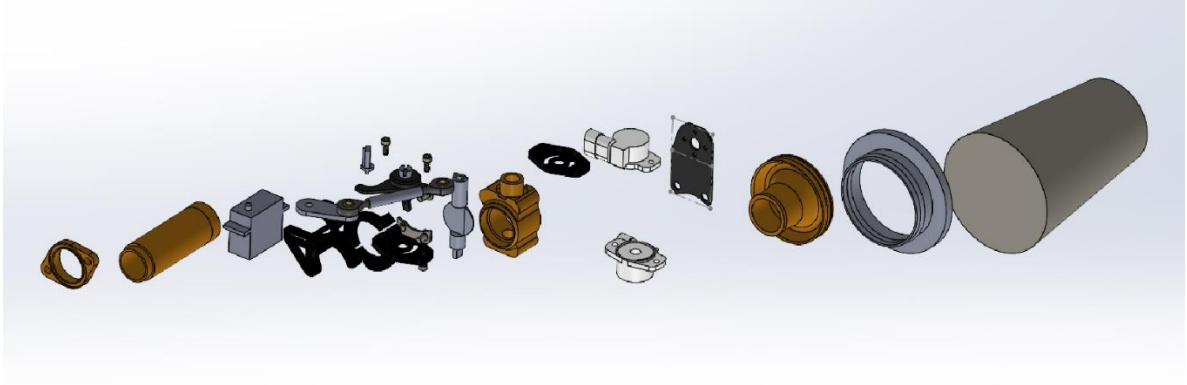
A9.3 Verwendete Produktbeispiele

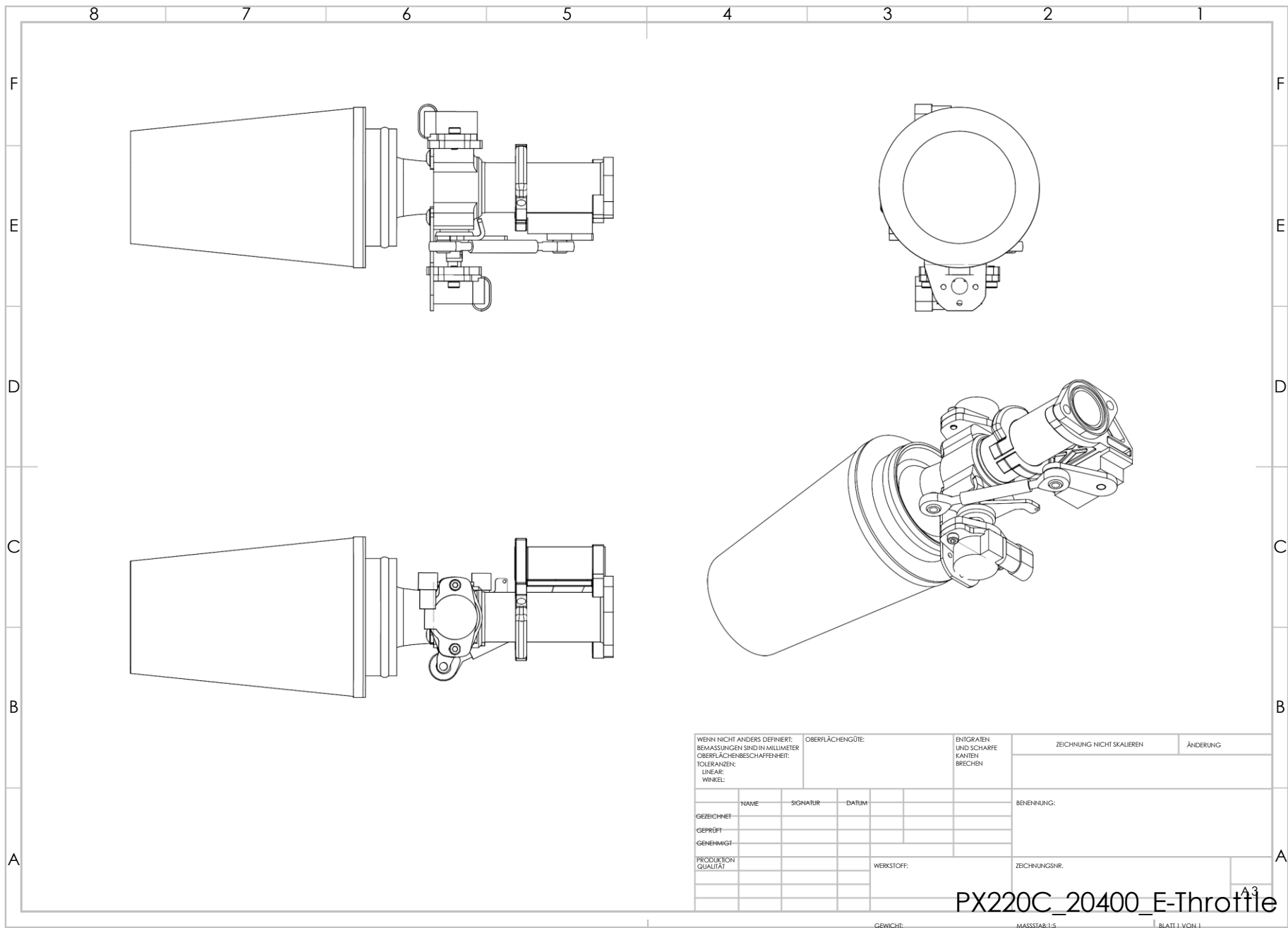
A9.3.1 Knickarmroboter





A9.3.2 Drosselklappe

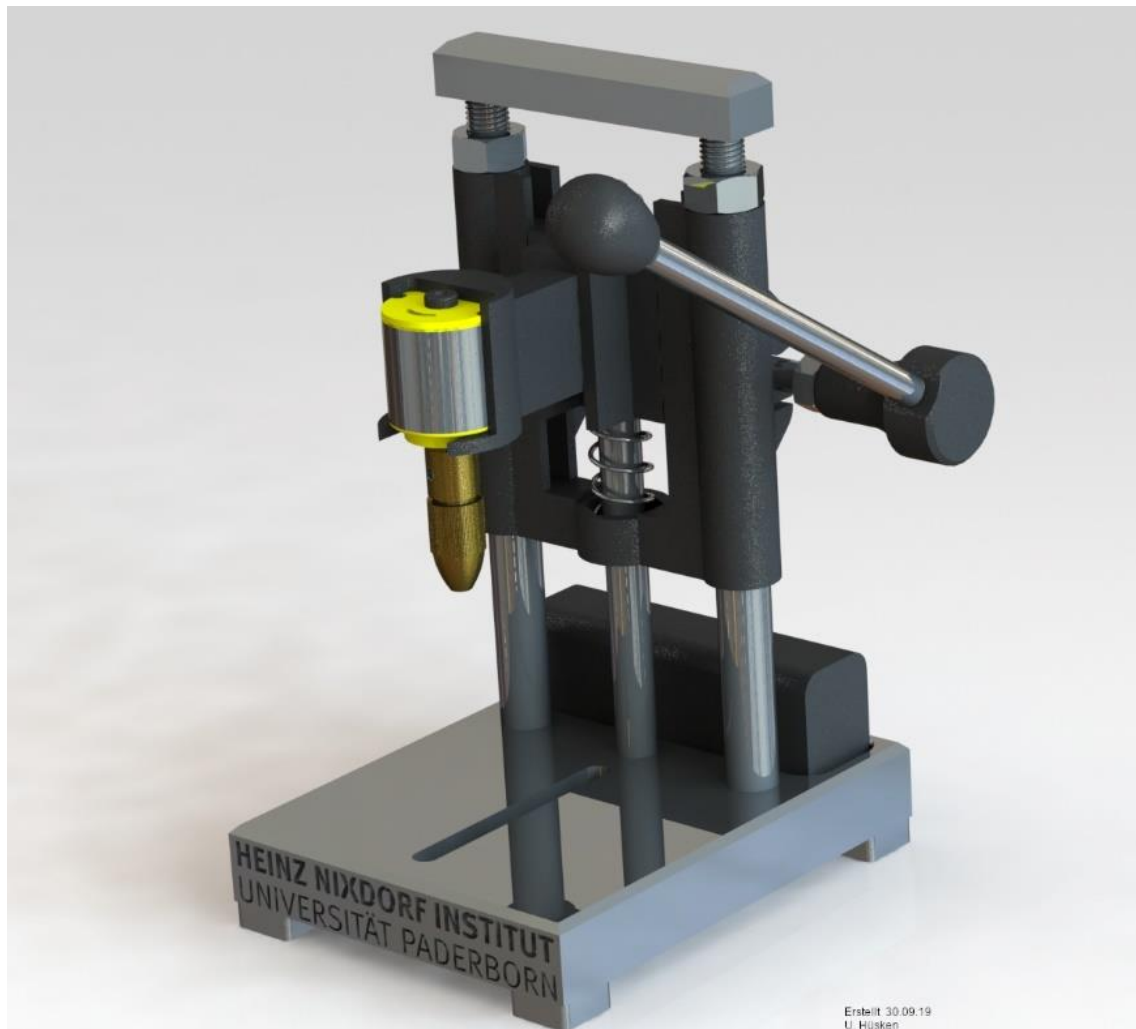


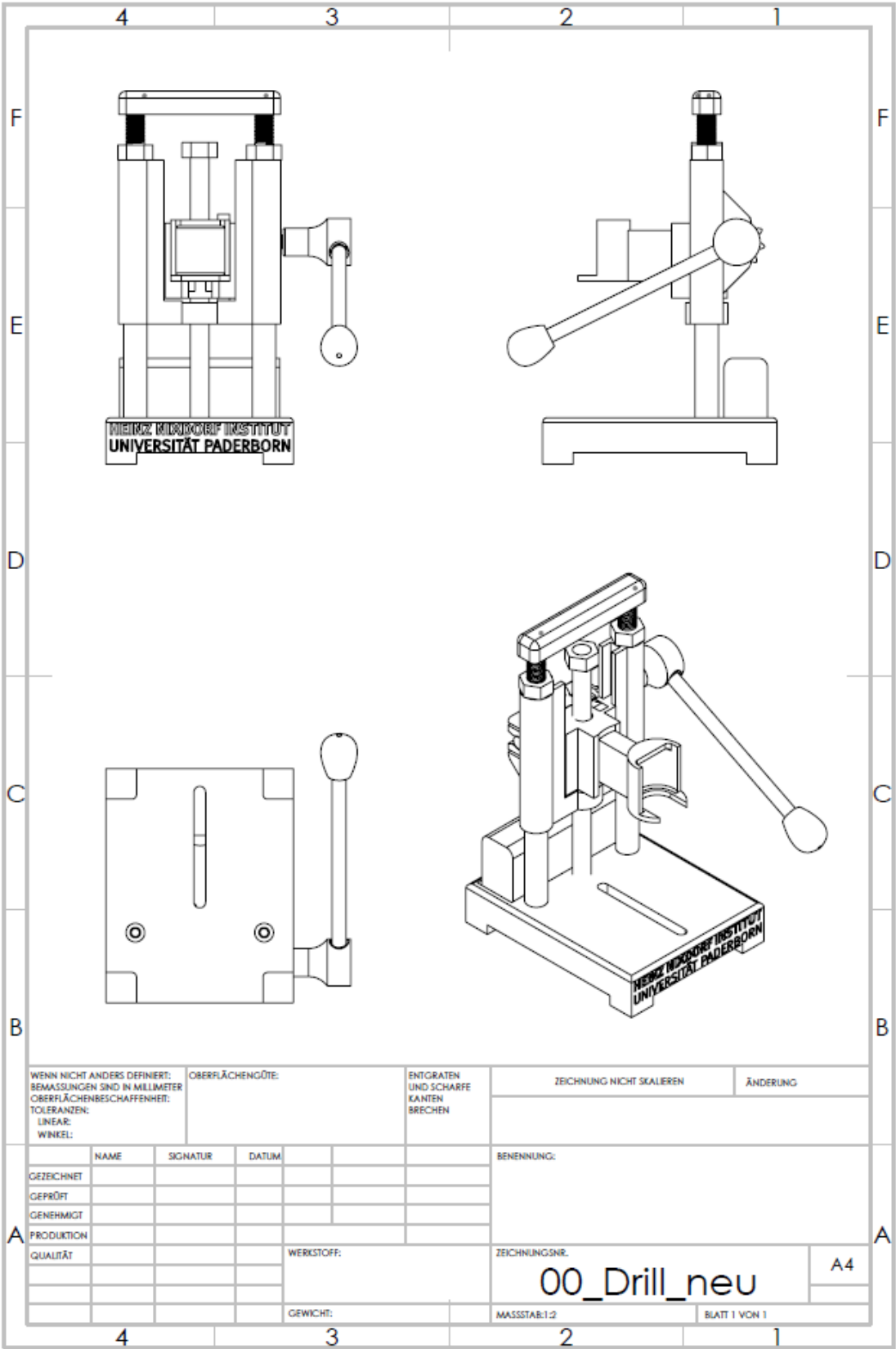


WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:				OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN	ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN	ÄNDERUNG
GEZEICHNET				NAME	SIGNATUR	DATUM	BEGUTACHTUNG:	
GEPRÜFT								
GENEHMIGT								
PRODUKTION QUALITÄT				WERKSTOFF:			ZEICHNUNGSNR.	A3

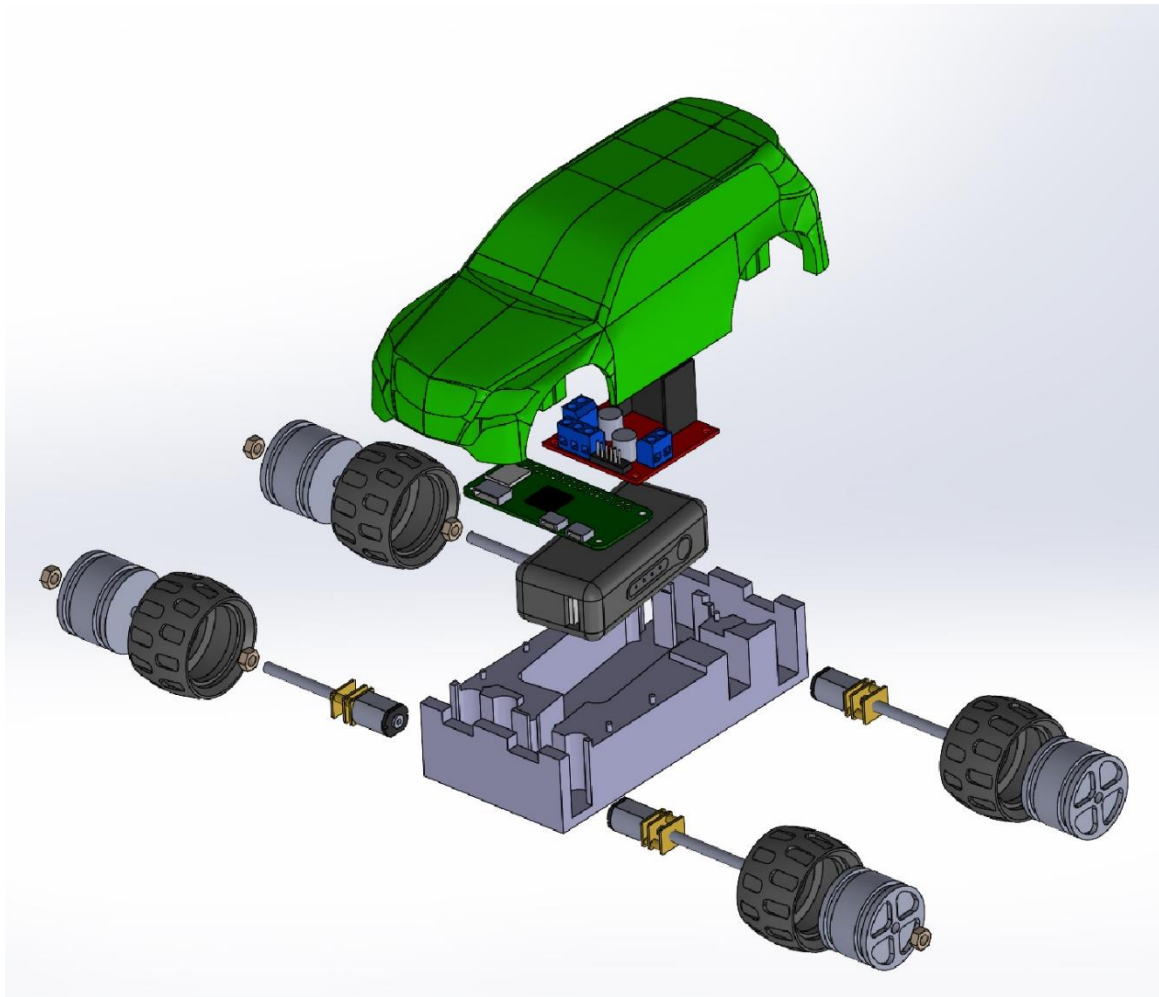
PX220C_20400_E-Throttle

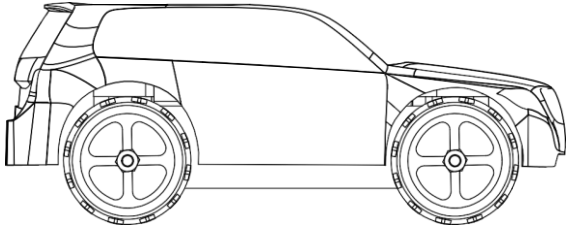
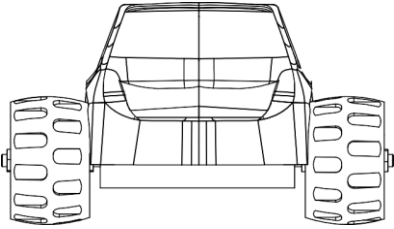
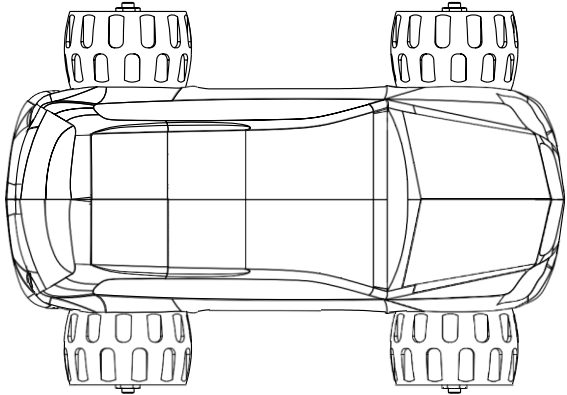
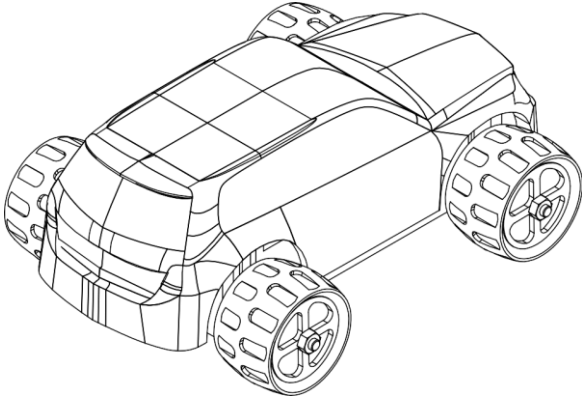
A9.3.3 Standbohrmaschine





A9.3.4 RC-Car

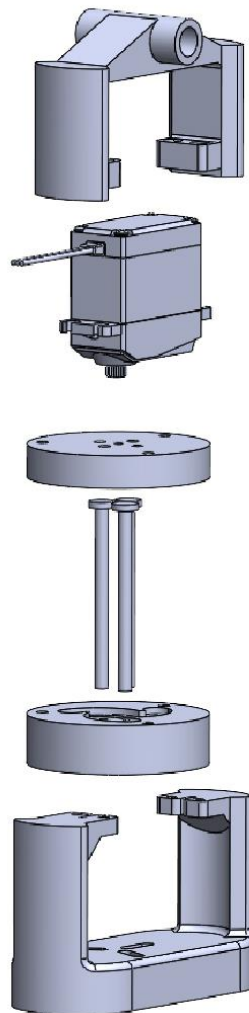


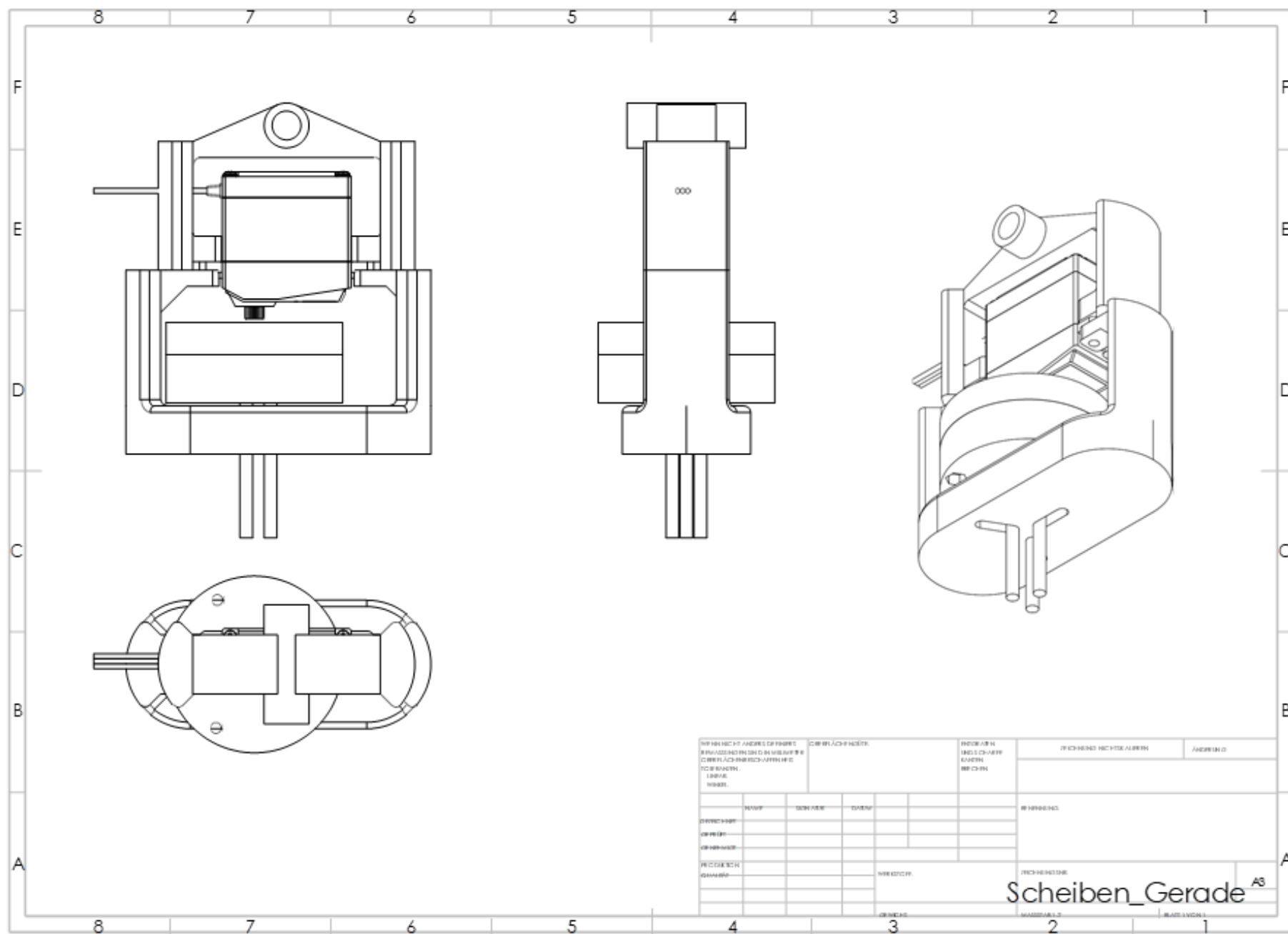
	8	7	6	5	4	3	2	1	
F									F
E									E
D									D
C									C
B									B
A									A
	8	7	6	5	4	3	2	1	

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENGÜTE: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:				OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
GEZEICHNET:				NAME:		SIGNATUR:		DATUM:		BENEHNUNG:	
GEPRÜFT:											
GENEHMIGT:											
PRODUKTION QUALITÄT:						WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSNR.		A3	
						GEWICHT:		MASSSTAB: 1:2		BLATT 1 VON 1	

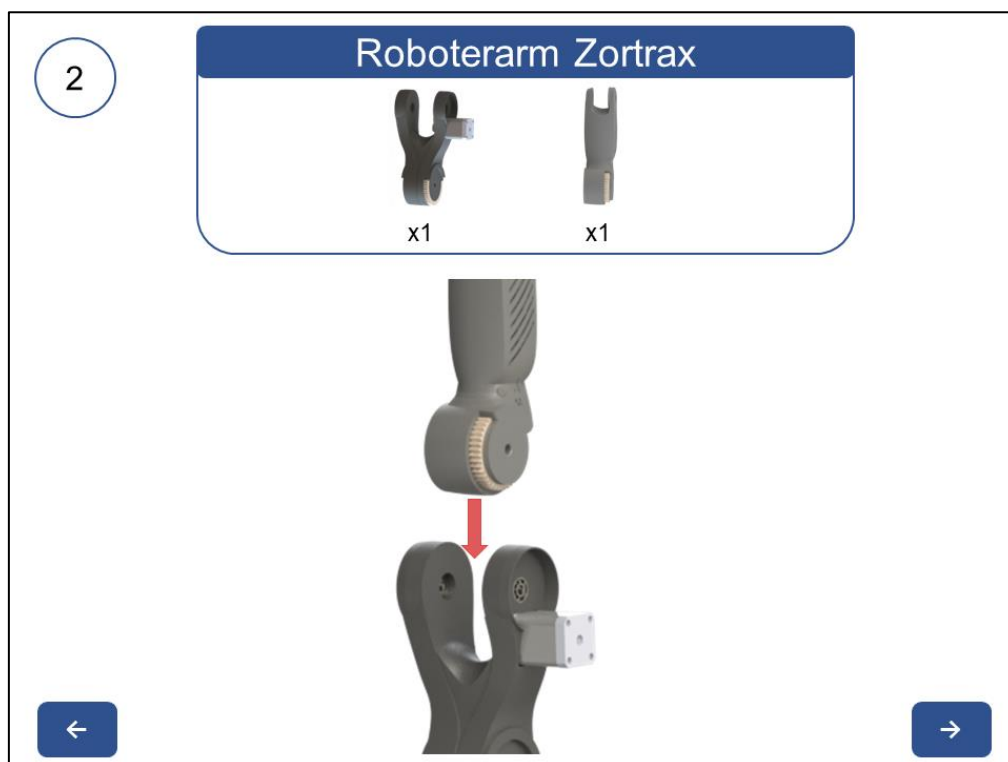
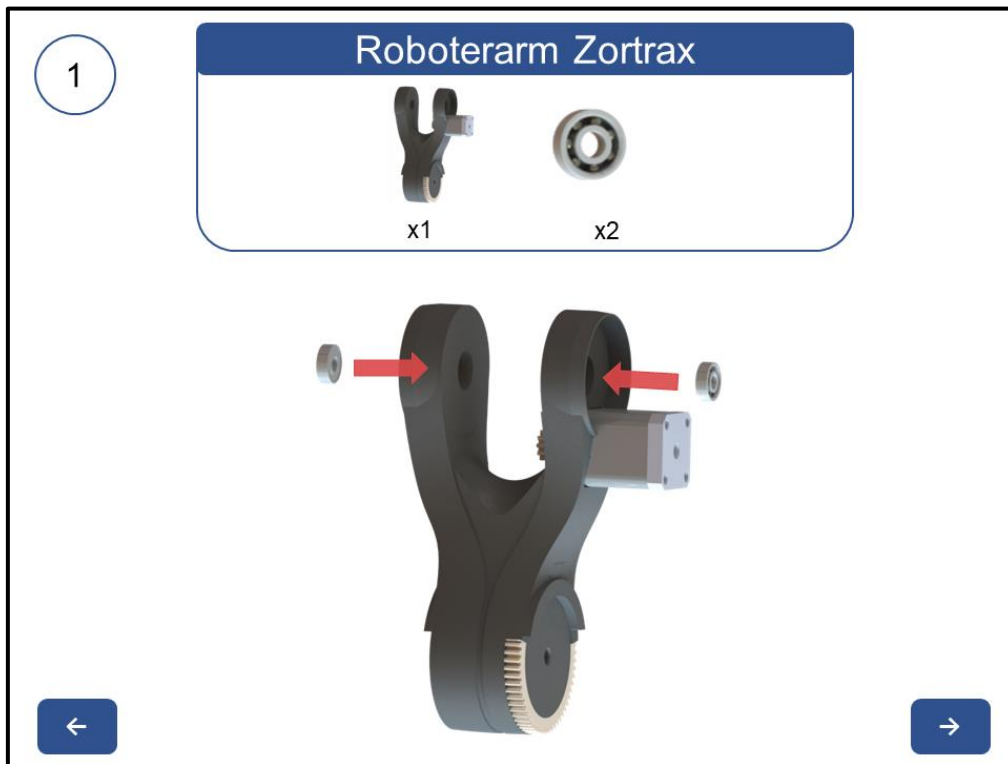
Auto komplett

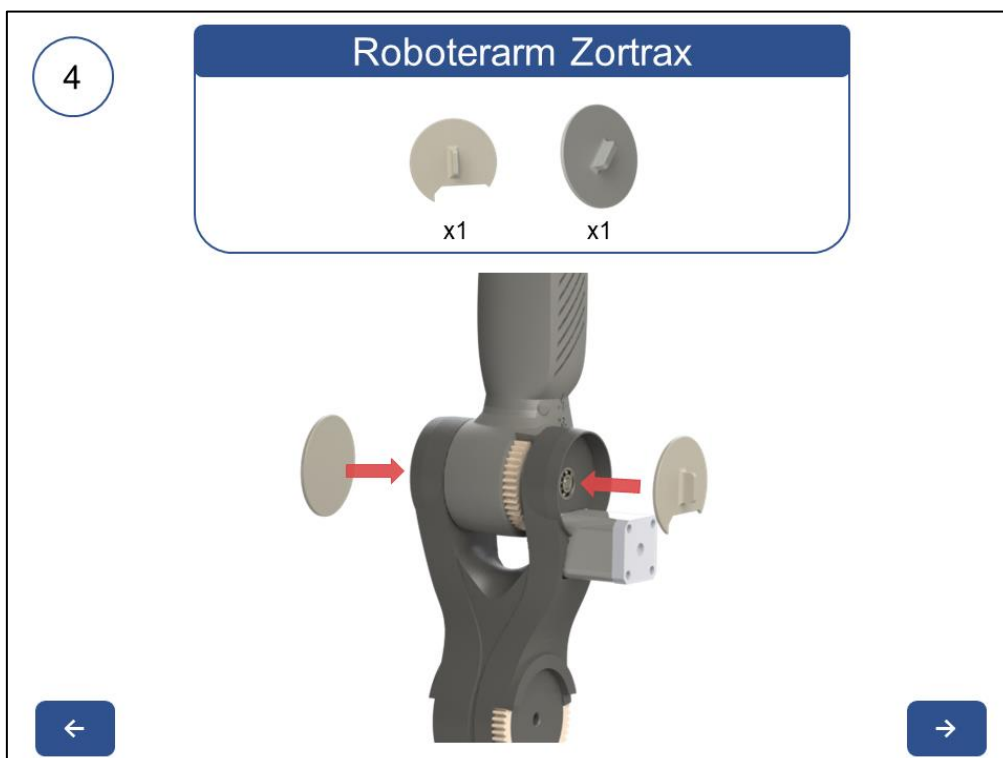
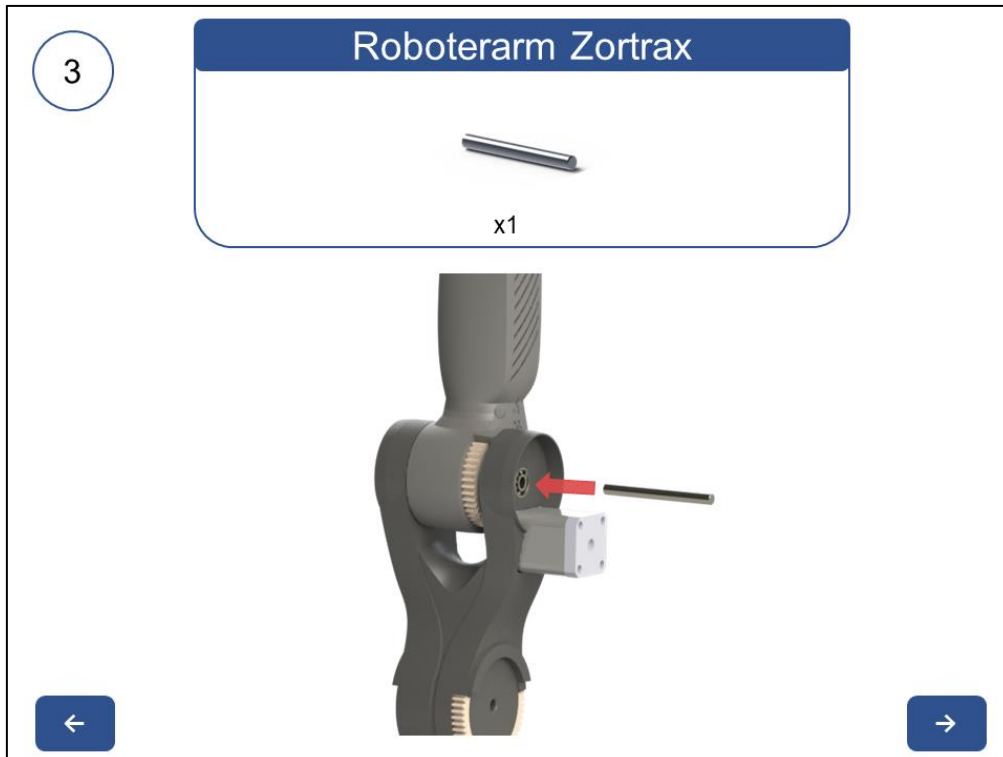
A9.3.5 Greifer

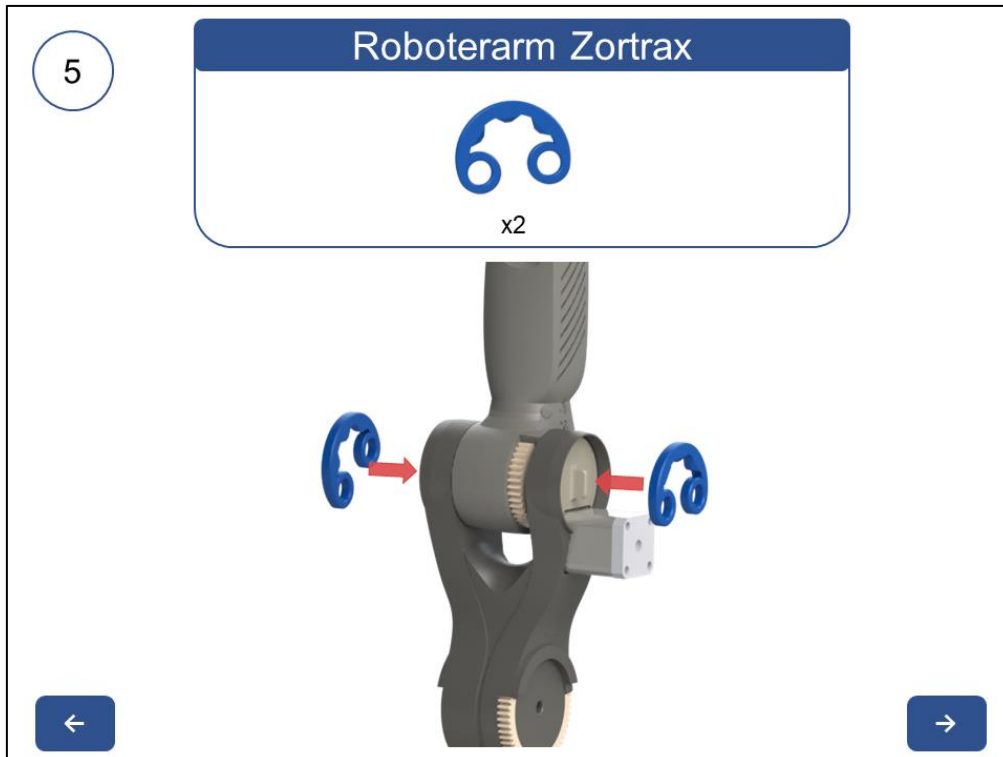




A9.4 Montageanleitung der Probandenstudie

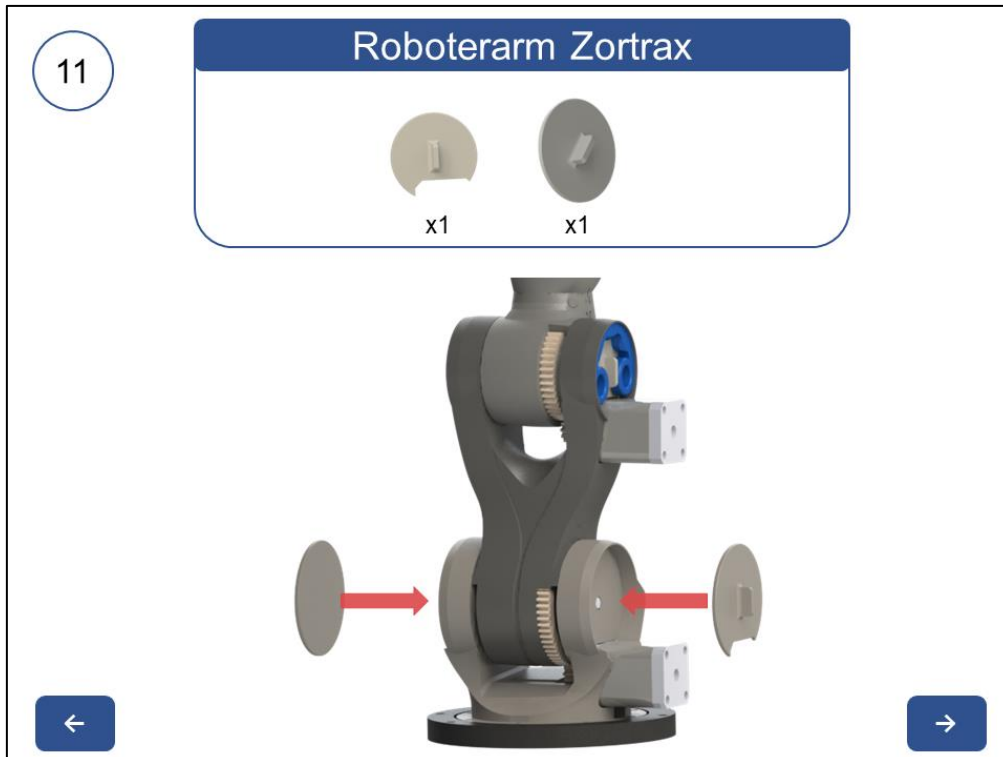
















A9.5 Aufgabenzuordnung Probandenstudie

Tabelle A-5: Aufgabenzuordnung in der Probandenstudie

	<i>Zyklus 1</i>	<i>Zyklus 2</i>	<i>Zyklus 3</i>
<i>Montagestation 1</i>	Proband 1	Proband 3	Proband 1
<i>Montagestation 2</i>	Proband 2	Proband 4	Proband 2
<i>Montagestation 3</i>	Proband 3	Proband 1	Proband 3
<i>Montagestation 4</i>	Proband 4	Proband 2	Proband 4

A9.6 Ergebnisse der Simulationsstudie

Innerhalb der Simulationsstudie wurden die entwickelte Methodik mit dem etablierten Vorgehen nach REFA verglichen. Hierzu wurden fünf unterschiedliche Personalstrukturen genutzt und die Aufgabenzuordnung mit Hilfe des Simulationswerkzeug *Siemens Plant Simulation* verglichen. Nachfolgend wird ein Überblick über die Personalstrukturen und die Ergebnisse der Simulationsstudie gegeben.

Tabelle A-6: Personalstrukturen für die Simulationsstudie

Zwei-Gruppen-Personal

Name	Alter	LR1	LR2	LR3	LR4	t1,1	t1,2	t1,3	t1,4
Mitarbeiter 1	22	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	120	100	150	90
Mitarbeiter 2	28	0.152	0.152	0.152	0.152	120	100	150	90
Mitarbeiter 3	42	0.152	0.152	0.152	0.152	120	100	150	90
Mitarbeiter 4	55	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	120	100	150	90

Homogenes Personal & heterogene Stationen

Name	Alter	LR1	LR2	LR3	LR4	t1,1	t1,2	t1,3	t1,4
Mitarbeiter 1	22	0.3219	0.3219	0.3219	0.74	120	100	150	90
Mitarbeiter 2	28	0.3219	0.3219	0.3219	0.74	120	100	150	90
Mitarbeiter 3	42	0.3219	0.3219	0.3219	0.74	120	100	150	90
Mitarbeiter 4	55	0.3219	0.3219	0.3219	0.74	120	100	150	90

Homogenes Personal & homogene Stationen

Name	Alter	LR1	LR2	LR3	LR4	t1,1	t1,2	t1,3	t1,4
Mitarbeiter 1	22	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	120	100	150	90
Mitarbeiter 2	28	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	120	100	150	90
Mitarbeiter 3	42	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	120	100	150	90
Mitarbeiter 4	55	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	120	100	150	90

Homogenes Personal mit Vorerfahrung

Name	Alter	LR1	LR2	LR3	LR4	t1,1	t1,2	t1,3	t1,4
Mitarbeiter 1	22	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	450	390	430	400
Mitarbeiter 2	28	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	450	390	430	400
Mitarbeiter 3	42	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	120	100	150	90
Mitarbeiter 4	55	0.3219	0.3219	0.3219	0.3219	120	100	150	90

Heterogenes Personal

Name	Alter	LR1	LR2	LR3	LR4	t1,1	t1,2	t1,3	t1,4
Mitarbeiter 1	22	0.32	0.30	0.28	0.28	120	110	145	95
Mitarbeiter 2	28	0.22	0.23	0.24	0.22	121	100	150	90
Mitarbeiter 3	42	0.33	0.33	0.31	0.32	126	105	159	96
Mitarbeiter 4	55	0.45	0.41	0.40	0.50	105	90	135	80

A9.6.1 Zwei-Gruppen-Personal

Zuordnung

		Fähigkeitsorientiert				Zeitorientiert				REFA			
		Montagestation				Montagestation				Montagestation			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Zyklus	1	4	3	2	1	4	3	2	1	1	2	3	4
	2	3	4	1	2	3	4	1	2	4	1	2	3
	3	1	2	4	3	1	2	4	3	3	4	1	2
	4	4	1	3	2	4	1	3	2	2	3	4	1
	5	1	3	2	4	1	3	2	4	1	2	3	4
	6	4	2	1	3	4	2	1	3	4	1	2	3
	7	1	3	4	1	1	3	4	2	3	4	1	2
	8	4	2	1	3	4	2	1	3	2	3	4	1
	9	1	4	3	2	1	4	3	2	1	2	3	4
	10	2	1	4	3	2	1	4	3	4	1	2	3
	11	4	3	2	1	4	3	2	1	3	4	1	2
	12	3	4	1	2	3	4	1	2	2	3	4	1
	13	4	2	3	1	4	2	3	1	1	2	3	4
	14	3	1	4	2	3	1	4	2	4	1	2	3
	15	4	2	1	3	4	2	1	3	3	4	1	2
	16	1	3	4	2	1	3	4	2	2	3	4	1
	17	4	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
	18	1	4	3	2	1	4	3	2	4	1	2	3
	19	4	2	1	3	4	2	1	3	3	4	1	2
	20	1	3	4	2	1	3	4	2	2	3	4	1
	21	4	1	2	3	4	1	2	3	1	2	3	4
	22	3	4	1	2	3	4	1	2	4	1	2	3
	23	4	2	3	1	4	2	3	1	3	4	1	2
	24	1	3	4	2	1	3	4	2	2	3	4	1
	25	4	2	1	3	4	2	1	3	1	2	3	4
	26	2	3	4	1	2	3	4	1	4	1	2	3
	27	4	1	2	3	4	1	2	3	3	4	1	2
	28	3	4	1	2	3	4	1	2	2	3	4	1
	29	4	2	3	1	4	2	3	1	1	2	3	4
	30	3	1	4	2	3	1	4	2	4	1	2	3
	31	4	3	2	1	4	3	2	1	3	4	1	2
	32	3	4	1	2	3	4	1	2	2	3	4	1
	33	4	2	3	1	4	2	3	1	1	2	3	4
	34	2	3	1	4	2	3	1	4	4	1	2	3
	35	3	2	4	1	3	2	4	1	3	4	1	2
	36	4	3	1	2	4	3	1	2	2	3	4	1
	37	3	4	2	1	3	4	2	1	1	2	3	4
	38	2	1	4	3	2	1	4	3	4	1	2	3
	39	4	2	3	1	4	2	3	1	3	4	1	2
	40	2	4	1	3	2	4	1	3	2	3	4	1
	41	4	3	2	1	4	3	2	1	1	2	3	4
	42	3	1	4	2	3	1	4	2	4	1	2	3
	43	4	2	1	3	4	2	1	3	3	4	1	2
	44	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1
	45	4	1	3	2	4	1	3	2	1	2	3	4
	46	3	4	2	1	3	4	2	1	4	1	2	3
	47	4	3	1	2	4	3	1	2	3	4	1	2
	48	3	2	4	1	3	2	4	1	2	3	4	1
	49	4	3	1	2	4	3	1	2	1	2	3	4
	50	3	2	4	1	3	2	4	1	4	1	2	3

Anzahl der Zuordnung in der 50 Zyklen

		<i>Fähigkeitsorientiert</i>				<i>Zeitorientiert</i>				<i>REFA</i>			
		Montagestation				Montagestation				Montagestation			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Mitarbeiter	1	8	10	16	16	8	10	16	16	13	13	12	12
	2	6	15	10	19	6	15	10	19	12	13	13	12
	3	13	15	9	13	13	15	9	13	12	12	13	13
	4	23	10	15	2	23	10	15	2	13	12	12	13

Anzahl der Zuordnungen in den 50 Zyklen

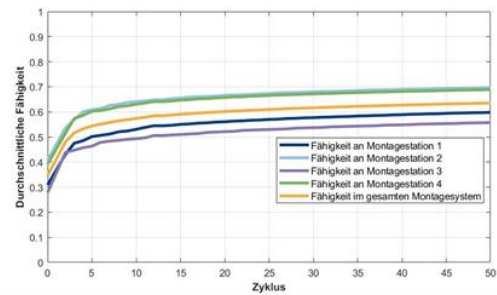
Nutzungsgrad

	Fähigkeitsorientiert					Zeitorientiert					REFA					
	Montagestation					Montagestation					Montagestation					
	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	
Zyklus	1	0.57	0.67	1.00	0.58	0.70	0.57	0.67	1.00	0.58	0.70	0.57	0.67	1.00	0.58	0.70
	2	0.95	0.65	1.00	0.82	0.85	0.67	0.55	1.00	0.63	0.71	0.52	0.64	1.00	0.61	0.69
	3	0.88	1.00	0.86	0.80	0.89	0.55	0.71	1.00	0.57	0.71	0.93	1.00	0.94	0.96	0.96
	4	0.56	0.69	1.00	0.69	0.74	0.66	0.55	1.00	0.63	0.71	0.88	1.00	0.88	0.82	0.89
	5	0.65	0.69	1.00	0.46	0.70	0.55	0.72	1.00	0.58	0.71	0.69	0.97	1.00	0.79	0.86
	6	0.68	0.98	1.00	0.80	0.86	0.66	0.55	1.00	0.64	0.71	0.53	0.65	1.00	0.61	0.70
	7	0.93	1.00	0.91	0.96	0.95	0.55	0.72	1.00	0.58	0.71	0.92	1.00	0.90	0.95	0.94
	8	0.69	0.99	1.00	0.81	0.87	0.66	0.55	1.00	0.64	0.71	0.86	1.00	0.84	0.82	0.88
	9	0.69	0.57	1.00	0.71	0.74	0.55	0.73	1.00	0.59	0.72	0.69	0.99	1.00	0.81	0.87
	10	1.00	0.80	0.75	0.75	0.82	0.66	0.56	1.00	0.64	0.72	0.53	0.66	1.00	0.62	0.70
	11	0.52	0.70	1.00	0.57	0.70	0.55	0.73	1.00	0.59	0.72	0.91	1.00	0.89	0.95	0.94
	12	1.00	0.71	0.99	0.87	0.89	0.66	0.56	1.00	0.65	0.72	0.85	1.00	0.82	0.81	0.87
	13	0.56	0.82	1.00	0.62	0.75	0.55	0.73	1.00	0.59	0.72	1.00	0.71	1.00	0.88	0.90
	14	1.00	0.87	0.81	0.88	0.89	0.66	0.56	1.00	0.65	0.72	0.53	0.66	1.00	0.62	0.70
	15	0.69	1.00	0.99	0.81	0.88	0.55	0.73	1.00	0.59	0.72	0.91	1.00	0.88	0.95	0.93
	16	0.92	1.00	0.87	0.95	0.93	0.69	0.57	1.00	0.65	0.73	0.85	1.00	0.82	0.81	0.87
	17	0.52	0.66	1.00	0.62	0.70	0.58	0.74	1.00	0.60	0.73	0.65	0.55	1.00	0.63	0.71
	18	0.70	0.59	1.00	0.72	0.75	0.68	0.57	1.00	0.65	0.73	0.53	0.67	1.00	0.63	0.71
	19	0.69	1.00	0.99	0.81	0.87	0.57	0.74	1.00	0.60	0.73	0.91	1.00	0.87	0.95	0.93
	20	0.91	1.00	0.87	0.94	0.93	0.71	0.58	1.00	0.66	0.74	0.85	1.00	0.81	0.81	0.87
	21	0.53	0.67	1.00	0.62	0.70	0.59	0.74	1.00	0.61	0.74	0.65	0.55	1.00	0.63	0.71
	22	1.00	0.72	0.99	0.88	0.90	0.69	0.57	1.00	0.65	0.73	0.53	0.67	1.00	0.63	0.71
	23	0.57	0.83	1.00	0.63	0.76	0.57	0.74	1.00	0.60	0.73	0.91	1.00	0.87	0.95	0.93
	24	0.91	1.00	0.87	0.94	0.93	0.68	0.57	1.00	0.65	0.72	0.85	1.00	0.81	0.81	0.87
	25	0.69	1.00	0.98	0.81	0.87	0.57	0.74	1.00	0.60	0.73	0.65	0.55	1.00	0.63	0.71
	26	1.00	0.86	0.75	0.71	0.83	0.67	0.57	1.00	0.65	0.72	0.53	0.68	1.00	0.63	0.71
	27	0.53	0.67	1.00	0.62	0.71	0.56	0.74	1.00	0.60	0.73	0.91	1.00	0.87	0.95	0.93
	28	1.00	0.72	0.99	0.89	0.90	0.67	0.57	1.00	0.65	0.72	0.84	1.00	0.81	0.81	0.87
	29	0.57	0.83	1.00	0.63	0.76	0.59	0.74	1.00	0.62	0.74	0.65	0.55	1.00	0.63	0.71
	30	1.00	0.89	0.81	0.89	0.90	0.69	0.58	1.00	0.66	0.73	0.53	0.68	1.00	0.63	0.71
	31	0.53	0.72	1.00	0.59	0.71	0.58	0.74	1.00	0.60	0.73	0.91	1.00	0.87	0.95	0.93
	32	1.00	0.73	0.99	0.89	0.90	0.68	0.57	1.00	0.66	0.73	0.84	1.00	0.81	0.81	0.87
	33	0.57	0.83	1.00	0.63	0.76	0.57	0.74	1.00	0.60	0.73	0.66	0.56	1.00	0.63	0.71
	34	1.00	0.87	0.92	0.58	0.84	0.68	0.57	1.00	0.65	0.73	0.54	0.68	1.00	0.63	0.71
	35	0.99	1.00	0.80	0.76	0.89	0.56	0.74	1.00	0.60	0.73	0.91	1.00	0.87	0.95	0.93
	36	0.70	0.95	1.00	0.89	0.89	0.68	0.57	1.00	0.65	0.72	0.84	1.00	0.80	0.81	0.87
	37	0.76	0.56	1.00	0.59	0.73	0.56	0.74	1.00	0.60	0.73	0.66	0.56	1.00	0.63	0.71
	38	1.00	0.83	0.75	0.76	0.83	0.67	0.57	1.00	0.65	0.72	0.58	0.84	1.00	0.64	0.77
	39	0.57	0.84	1.00	0.64	0.76	0.56	0.74	1.00	0.60	0.73	0.91	1.00	0.86	0.95	0.93
	40	1.00	0.68	0.92	0.76	0.84	0.67	0.57	1.00	0.66	0.72	0.84	1.00	0.80	0.81	0.86
	41	0.53	0.72	1.00	0.59	0.71	0.56	0.74	1.00	0.60	0.73	0.66	0.56	1.00	0.64	0.71
	42	1.00	0.90	0.81	0.89	0.90	0.67	0.57	1.00	0.66	0.72	0.58	0.84	1.00	0.64	0.77
	43	0.69	1.00	0.98	0.81	0.87	0.56	0.74	1.00	0.60	0.73	0.91	1.00	0.86	0.94	0.93
	44	1.00	0.87	0.75	0.72	0.84	0.67	0.57	1.00	0.66	0.73	0.84	1.00	0.80	0.81	0.86
	45	0.58	0.74	1.00	0.73	0.76	0.56	0.74	1.00	0.61	0.73	0.66	0.56	1.00	0.64	0.71
	46	0.76	0.56	1.00	0.59	0.73	0.70	0.59	1.00	0.66	0.74	0.58	0.84	1.00	0.64	0.77
	47	0.70	0.95	1.00	0.90	0.89	0.58	0.75	1.00	0.62	0.74	0.91	1.00	0.86	0.94	0.93
	48	0.98	1.00	0.80	0.76	0.89	0.69	0.58	1.00	0.66	0.73	0.84	1.00	0.80	0.81	0.86
	49	0.70	0.95	1.00	0.90	0.89	0.58	0.75	1.00	0.61	0.73	0.66	0.56	1.00	0.64	0.72
	50	0.98	1.00	0.80	0.76	0.89	0.69	0.58	1.00	0.66	0.73	0.58	0.85	1.00	0.65	0.77

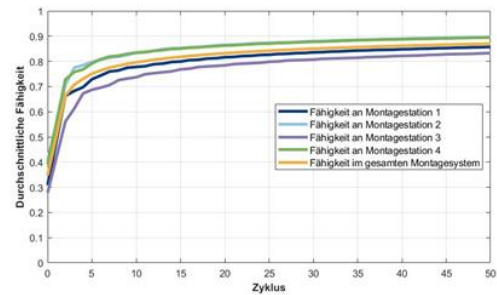
Fähigkeitsorientiert				Zeitorientiert			REFA			
	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	
Zyklus	1	0.0089	-	64.77	0.0133	-	64.77	0.0089	-	64.77
	2	0.0118	1.34	6.97	0.0151	1.13	6.65	0.0096	1.08	6.89
	3	0.0134	1.13	3.52	0.0157	1.04	3.34	0.0144	1.51	3.55
	4	0.0109	0.81	2.33	0.0161	1.03	2.25	0.0139	0.96	2.36
	5	0.0105	0.96	1.63	0.0165	1.02	1.65	0.0136	0.98	1.64
	6	0.0138	1.32	1.30	0.0167	1.02	1.31	0.0106	0.78	1.29
	7	0.0155	1.12	1.08	0.0169	1.01	1.06	0.0154	1.45	1.07
	8	0.0143	0.92	0.88	0.0171	1.01	0.90	0.0145	0.94	0.92
	9	0.0117	0.82	0.79	0.0173	1.01	0.77	0.0144	1.00	0.77
	10	0.0134	1.14	0.68	0.0174	1.01	0.68	0.0111	0.77	0.67
	11	0.0111	0.83	0.72	0.0175	1.01	0.60	0.0158	1.43	0.60
	12	0.0147	1.32	0.41	0.0176	1.01	0.54	0.0148	0.94	0.55
	13	0.0121	0.82	0.49	0.0177	1.01	0.49	0.0148	1.00	0.49
	14	0.0149	1.23	0.44	0.0178	1.01	0.45	0.0114	0.77	0.44
	15	0.0150	1.01	0.41	0.0179	1.01	0.41	0.0161	1.41	0.41
	16	0.0162	1.08	0.38	0.0170	0.95	0.38	0.0150	0.93	0.38
	17	0.0114	0.71	0.35	0.0172	1.01	0.35	0.0115	0.77	0.35
	18	0.0124	1.08	0.33	0.0173	1.01	0.33	0.0116	1.00	0.33
	19	0.0151	1.22	0.31	0.0175	1.01	0.31	0.0163	1.41	0.31
	20	0.0164	1.08	0.29	0.0164	0.94	0.29	0.0152	0.93	0.29
	21	0.0116	0.71	0.27	0.0167	1.02	0.27	0.0117	0.77	0.27
	22	0.0154	1.32	0.25	0.0169	1.01	0.26	0.0118	1.00	0.25
	23	0.0126	0.82	0.24	0.0171	1.01	0.24	0.0164	1.40	0.24
	24	0.0165	1.31	0.23	0.0172	1.01	0.23	0.0153	0.93	0.23
	25	0.0154	0.93	0.22	0.0174	1.01	0.22	0.0119	0.78	0.22
	26	0.0143	0.93	0.21	0.0175	1.01	0.21	0.0119	1.00	0.21
	27	0.0118	0.83	0.20	0.0176	1.01	0.20	0.0166	1.39	0.20
	28	0.0156	1.32	0.19	0.0177	1.01	0.19	0.0154	0.93	0.19
	29	0.0128	0.82	0.18	0.0168	0.95	0.18	0.0120	0.78	0.18
	30	0.0157	1.22	0.17	0.0170	1.01	0.18	0.0120	1.00	0.17
	31	0.0120	0.76	0.17	0.0171	1.01	0.17	0.0167	1.39	0.17
	32	0.0157	1.32	0.16	0.0173	1.01	0.16	0.0155	0.93	0.16
	33	0.0130	0.82	0.16	0.0174	1.01	0.16	0.0121	0.78	0.16
	34	0.0146	1.13	0.15	0.0176	1.01	0.15	0.0121	1.00	0.15
	35	0.0156	1.07	0.15	0.0177	1.01	0.15	0.0168	1.39	0.15
	36	0.0160	1.02	0.14	0.0178	1.01	0.14	0.0156	0.93	0.14
	37	0.0121	0.76	0.14	0.0179	1.01	0.14	0.0122	0.78	0.14
	38	0.0147	1.21	0.13	0.0180	1.00	0.13	0.0132	1.08	0.13
	39	0.0131	0.89	0.13	0.0180	1.00	0.13	0.0169	1.28	0.13
	40	0.0148	1.13	0.12	0.0181	1.00	0.13	0.0157	0.93	0.13
	41	0.0122	0.83	0.12	0.0182	1.00	0.12	0.0123	0.78	0.12
	42	0.0160	1.31	0.12	0.0183	1.00	0.12	0.0133	1.08	0.12
	43	0.0158	0.98	0.11	0.0183	1.00	0.11	0.0170	1.28	0.11
	44	0.0149	0.94	0.11	0.0184	1.00	0.11	0.0158	0.93	0.11
	45	0.0132	0.89	0.11	0.0184	1.00	0.11	0.0124	0.78	0.11
	46	0.0123	0.93	0.11	0.0177	0.96	0.11	0.0134	1.08	0.10
	47	0.0162	1.32	0.10	0.0178	1.01	0.10	0.0170	1.28	0.10
	48	0.0158	0.98	0.10	0.0179	1.01	0.10	0.0158	0.93	0.10
	49	0.0162	1.02	0.10	0.0180	1.00	0.10	0.0124	0.79	0.10
	50	0.0159	0.98	0.10	0.0181	1.00	0.10	0.0134	1.08	0.09

Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

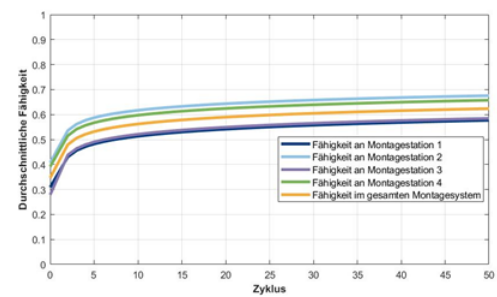
Mitarbeiter 2



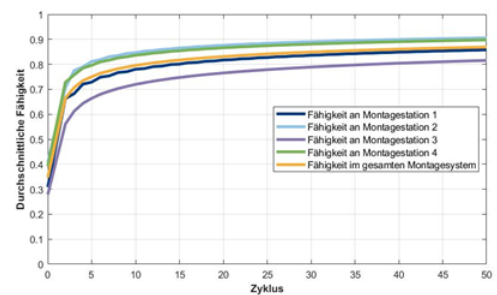
Mitarbeiter 4



Mitarbeiter 2

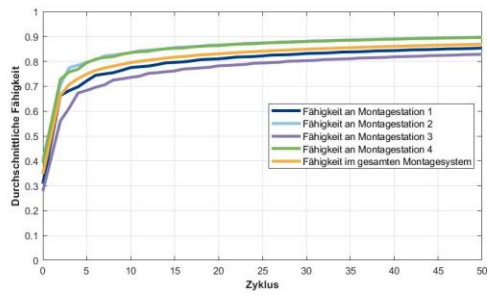


Mitarbeiter 4

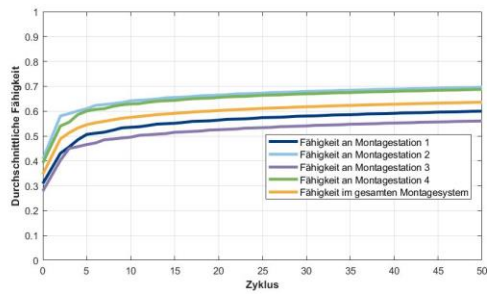


MTM-basierte Aufgabenzuordnung

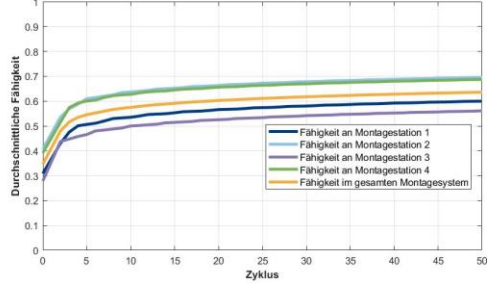
Mitarbeiter 1



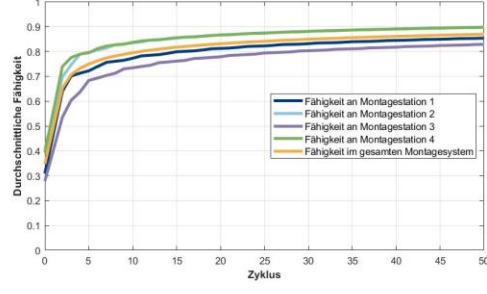
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3



Mitarbeiter 4



A9.6.2 Homogenes Personal & heterogene Stationen

Zuordnung

	Fähigkeitsorientiert				Zeitorientiert				REFA				
	Montagestation				Montagestation				Montagestation				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Zyklus	1	3	2	1	4	4	2	3	1	1	2	3	4
	2	2	3	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	3	4	1	3	2	4	2	3	1	3	4	1	2
	4	3	4	2	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	5	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
	6	3	4	2	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	7	4	1	3	2	4	2	3	1	3	4	1	2
	8	3	2	4	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	9	2	3	1	4	4	2	3	1	1	2	3	4
	10	3	4	2	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	11	4	1	3	2	4	2	3	1	3	4	1	2
	12	3	2	4	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	13	1	3	2	4	4	2	3	1	1	2	3	4
	14	2	4	3	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	15	4	2	1	3	4	2	3	1	3	4	1	2
	16	3	1	4	2	1	3	4	2	2	3	4	1
	17	4	3	2	1	4	2	3	1	1	2	3	4
	18	2	1	4	3	1	3	4	2	4	1	2	3
	19	4	2	3	1	4	2	3	1	3	4	1	2
	20	3	4	1	2	1	3	4	2	2	3	4	1
	21	2	3	4	1	4	2	3	1	1	2	3	4
	22	1	2	3	4	1	3	4	2	4	1	2	3
	23	3	4	2	1	4	3	2	1	3	4	1	2
	24	4	3	1	2	1	3	4	2	2	3	4	1
	25	2	1	4	3	4	2	3	1	1	2	3	4
	26	4	2	3	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	27	3	4	1	2	4	2	3	1	3	4	1	2
	28	4	3	2	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	29	3	1	4	2	4	2	3	1	1	2	3	4
	30	2	4	3	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	31	4	1	2	3	4	2	3	1	3	4	1	2
	32	3	2	4	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	33	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
	34	2	4	3	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	35	3	1	2	4	4	3	2	1	3	4	1	2
	36	4	2	3	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	37	3	4	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
	38	2	3	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	39	4	1	2	3	4	2	3	1	3	4	1	2
	40	3	2	4	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	41	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
	42	2	4	3	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	43	3	1	2	4	4	2	3	1	3	4	1	2
	44	4	2	3	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	45	3	4	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
	46	2	3	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
	47	4	1	2	3	4	2	3	1	3	4	1	2
	48	3	2	4	1	1	3	4	2	2	3	4	1
	49	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
	50	2	4	3	1	1	3	4	2	4	1	2	3

Anzahl der Zuordnung in der 50 Zyklen

<i>Fähigkeitsorientiert</i>						<i>Zeitorientiert</i>					<i>REFA</i>				
Montagestation						Montagestation					Montagestation				
1 2 3 4						1 2 3 4					1 2 3 4				
Mitarbeiter	1	2	12	12	24	25	0	0	25		13	13	12	12	
	2	12	12	12	14	0	23	2	25		12	13	13	12	
	3	18	13	13	6	0	27	23	0		12	12	13	13	
	4	18	13	13	6	25	0	25	0		13	12	12	13	

Anzahl der Zuordnungen in den 50 Zyklen

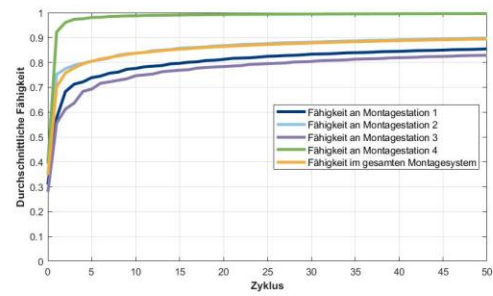
Nutzungsgrad

		Fähigkeitsorientiert					Zeitorientiert					REFA				
		Montagestation					Montagestation					Montagestation				
		1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø
Zyklus	1	0.68	0.69	1.00	0.43	0.70	0.83	0.84	1.00	0.64	0.83	0.83	0.84	1.00	0.64	0.83
	2	0.90	0.79	1.00	0.67	0.84	0.99	0.82	1.00	0.59	0.85	0.90	0.81	1.00	0.65	0.84
	3	0.82	1.00	0.99	0.60	0.85	0.85	0.90	1.00	0.72	0.87	0.96	0.85	1.00	0.72	0.88
	4	0.76	0.77	1.00	0.65	0.80	1.00	0.83	0.98	0.63	0.86	0.84	0.91	1.00	0.73	0.87
	5	0.69	0.68	1.00	0.53	0.72	0.85	0.92	1.00	0.75	0.88	0.82	1.00	0.97	0.63	0.85
	6	0.78	0.78	1.00	0.69	0.81	1.00	0.84	0.98	0.65	0.87	0.91	0.85	1.00	0.74	0.87
	7	0.80	1.00	0.96	0.63	0.85	0.86	0.93	1.00	0.77	0.89	0.93	0.86	1.00	0.76	0.89
	8	0.84	0.92	1.00	0.76	0.88	1.00	0.84	0.97	0.66	0.87	0.85	0.92	1.00	0.77	0.88
	9	0.75	0.70	1.00	0.51	0.74	0.86	0.93	1.00	0.78	0.89	1.00	0.83	0.96	0.65	0.86
	10	0.78	0.80	1.00	0.72	0.82	1.00	0.85	0.97	0.67	0.87	0.91	0.86	1.00	0.77	0.89
	11	0.80	1.00	0.94	0.65	0.85	0.86	0.94	1.00	0.80	0.90	0.92	0.87	1.00	0.78	0.89
	12	0.84	0.93	1.00	0.78	0.89	1.00	0.85	0.97	0.68	0.87	0.85	0.94	1.00	0.79	0.89
	13	0.97	0.80	1.00	0.60	0.84	0.86	0.94	1.00	0.81	0.90	1.00	0.83	0.96	0.67	0.87
	14	0.92	0.87	1.00	0.80	0.90	1.00	0.85	0.96	0.69	0.88	0.92	0.87	1.00	0.79	0.90
	15	0.69	0.77	1.00	0.53	0.75	0.86	0.95	1.00	0.81	0.91	0.92	0.88	1.00	0.80	0.90
	16	0.79	1.00	0.93	0.66	0.85	1.00	0.85	0.96	0.69	0.88	0.85	0.94	1.00	0.80	0.90
	17	0.79	0.81	1.00	0.75	0.84	0.86	0.95	1.00	0.82	0.91	1.00	0.84	0.96	0.68	0.87
	18	0.86	1.00	0.93	0.62	0.85	1.00	0.85	0.96	0.70	0.88	0.92	0.88	1.00	0.81	0.90
	19	0.85	0.95	1.00	0.81	0.90	0.86	0.95	1.00	0.83	0.91	0.92	0.88	1.00	0.81	0.90
	20	0.69	0.72	1.00	0.58	0.75	1.00	0.85	0.96	0.70	0.88	0.85	0.95	1.00	0.82	0.90
	21	0.92	0.88	1.00	0.82	0.91	0.86	0.96	1.00	0.83	0.91	1.00	0.84	0.96	0.69	0.87
	22	1.00	0.90	0.95	0.64	0.87	1.00	0.86	0.96	0.70	0.88	0.92	0.88	1.00	0.82	0.91
	23	0.79	0.82	1.00	0.76	0.84	0.87	0.96	1.00	0.84	0.91	0.93	0.88	1.00	0.82	0.91
	24	0.69	0.72	1.00	0.59	0.75	1.00	0.86	0.96	0.71	0.88	0.86	0.95	1.00	0.82	0.91
	25	0.85	1.00	0.92	0.62	0.85	0.87	0.96	1.00	0.84	0.92	1.00	0.84	0.95	0.69	0.87
	26	0.86	0.96	1.00	0.83	0.91	1.00	0.86	0.96	0.71	0.88	0.92	0.89	1.00	0.83	0.91
	27	0.70	0.72	1.00	0.59	0.75	0.87	0.96	1.00	0.84	0.92	0.93	0.89	1.00	0.83	0.91
	28	0.79	0.82	1.00	0.77	0.85	1.00	0.86	0.96	0.71	0.88	0.86	0.96	1.00	0.83	0.91
	29	0.79	1.00	0.92	0.67	0.84	0.87	0.96	1.00	0.85	0.92	1.00	0.85	0.95	0.70	0.88
	30	0.93	0.89	1.00	0.84	0.91	1.00	0.86	0.96	0.71	0.88	0.92	0.89	1.00	0.83	0.91
	31	0.79	1.00	0.99	0.63	0.85	0.87	0.97	1.00	0.85	0.92	0.93	0.89	1.00	0.84	0.91
	32	0.86	0.96	1.00	0.84	0.92	1.00	0.86	0.95	0.72	0.88	0.86	0.96	1.00	0.84	0.91
	33	0.70	0.72	1.00	0.60	0.76	0.87	0.97	1.00	0.85	0.92	1.00	0.85	0.95	0.70	0.88
	34	0.93	0.89	1.00	0.84	0.92	1.00	0.86	0.95	0.72	0.88	0.92	0.89	1.00	0.84	0.91
	35	0.78	1.00	0.99	0.63	0.85	0.87	0.97	1.00	0.86	0.92	0.93	0.89	1.00	0.84	0.92
	36	0.86	0.97	1.00	0.85	0.92	1.00	0.86	0.95	0.72	0.88	0.86	0.96	1.00	0.84	0.92
	37	0.70	0.73	1.00	0.61	0.76	0.87	0.97	1.00	0.86	0.92	1.00	0.85	0.95	0.71	0.88
	38	0.93	0.89	1.00	0.85	0.92	1.00	0.86	0.95	0.72	0.88	0.93	0.89	1.00	0.85	0.92
	39	0.78	1.00	0.98	0.63	0.85	0.87	0.97	1.00	0.86	0.92	0.93	0.90	1.00	0.85	0.92
	40	0.86	0.97	1.00	0.85	0.92	1.00	0.86	0.95	0.72	0.88	0.86	0.96	1.00	0.85	0.92
	41	0.70	0.73	1.00	0.61	0.76	0.87	0.97	1.00	0.86	0.93	1.00	0.85	0.95	0.71	0.88
	42	0.93	0.90	1.00	0.85	0.92	1.00	0.86	0.95	0.73	0.88	0.93	0.90	1.00	0.85	0.92
	43	0.78	1.00	0.98	0.63	0.85	0.87	0.97	1.00	0.86	0.93	0.93	0.90	1.00	0.85	0.92
	44	0.86	0.97	1.00	0.85	0.92	1.00	0.86	0.95	0.73	0.89	0.86	0.97	1.00	0.85	0.92
	45	0.70	0.73	1.00	0.61	0.76	0.87	0.97	1.00	0.87	0.93	1.00	0.85	0.95	0.72	0.88
	46	0.93	0.90	1.00	0.86	0.92	1.00	0.86	0.95	0.73	0.89	0.93	0.90	1.00	0.85	0.92
	47	0.78	1.00	0.98	0.64	0.85	0.87	0.97	1.00	0.87	0.93	0.93	0.90	1.00	0.86	0.92
	48	0.86	0.97	1.00	0.86	0.92	1.00	0.86	0.95	0.73	0.89	0.86	0.97	1.00	0.86	0.92
	49	0.70	0.73	1.00	0.62	0.76	0.87	0.98	1.00	0.87	0.93	1.00	0.85	0.95	0.72	0.88
	50	0.93	0.90	1.00	0.86	0.92	1.00	0.86	0.95	0.73	0.89	0.93	0.90	1.00	0.86	0.92

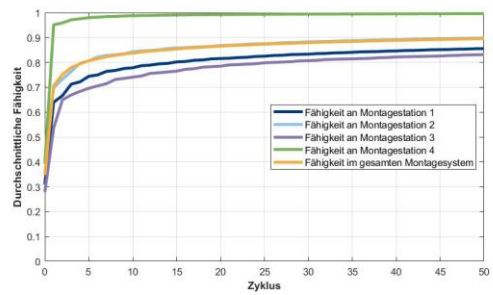
Fähigkeitsorientiert				Zeitorientiert			REFA			
	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	
Zyklus	1	0.0106	-	63.73	0.0130	-	64.77	0.0130	-	64.77
	2	0.0145	1.37	7.57	0.0148	1.14	6.89	0.0145	1.12	6.89
	3	0.0153	1.06	3.53	0.0161	1.09	3.33	0.0161	1.11	3.55
	4	0.0147	0.96	2.32	0.0162	1.01	2.27	0.0164	1.02	2.36
	5	0.0136	0.92	1.66	0.0171	1.05	1.64	0.0162	0.99	1.64
	6	0.0156	1.15	1.30	0.0168	0.99	1.31	0.0169	1.04	1.29
	7	0.0164	1.05	1.07	0.0176	1.05	1.06	0.0173	1.03	1.07
	8	0.0173	1.05	0.92	0.0172	0.98	0.91	0.0175	1.01	0.92
	9	0.0143	0.83	0.77	0.0180	1.04	0.77	0.0170	0.97	0.77
	10	0.0164	1.15	0.67	0.0175	0.97	0.68	0.0177	1.04	0.67
	11	0.0169	1.03	0.60	0.0183	1.04	0.60	0.0180	1.02	0.60
	12	0.0179	1.06	0.55	0.0177	0.97	0.54	0.0181	1.01	0.55
	13	0.0168	0.94	0.49	0.0185	1.04	0.49	0.0174	0.96	0.49
	14	0.0183	1.09	0.44	0.0179	0.97	0.45	0.0182	1.04	0.44
	15	0.0149	0.81	0.42	0.0187	1.04	0.41	0.0184	1.01	0.41
	16	0.0172	1.15	0.38	0.0181	0.97	0.38	0.0185	1.00	0.38
	17	0.0172	1.00	0.35	0.0189	1.04	0.35	0.0177	0.96	0.35
	18	0.0173	1.01	0.33	0.0182	0.96	0.33	0.0186	1.05	0.33
	19	0.0187	1.08	0.31	0.0190	1.05	0.31	0.0187	1.01	0.31
	20	0.0152	0.82	0.29	0.0183	0.96	0.29	0.0188	1.00	0.29
	21	0.0188	1.24	0.27	0.0191	1.05	0.27	0.0180	0.96	0.27
	22	0.0179	0.95	0.26	0.0184	0.96	0.26	0.0188	1.05	0.25
	23	0.0175	0.98	0.24	0.0193	1.05	0.24	0.0189	1.01	0.24
	24	0.0154	0.88	0.24	0.0185	0.96	0.23	0.0190	1.00	0.23
	25	0.0175	1.14	0.22	0.0194	1.05	0.22	0.0182	0.96	0.22
	26	0.0191	1.09	0.21	0.0186	0.96	0.21	0.0190	1.05	0.21
	27	0.0156	0.82	0.20	0.0194	1.05	0.20	0.0191	1.00	0.20
	28	0.0177	1.14	0.19	0.0186	0.96	0.19	0.0192	1.00	0.19
	29	0.0176	0.99	0.18	0.0195	1.05	0.18	0.0183	0.96	0.18
	30	0.0193	1.09	0.17	0.0187	0.96	0.18	0.0192	1.05	0.17
	31	0.0177	0.92	0.17	0.0196	1.05	0.17	0.0193	1.00	0.17
	32	0.0194	1.09	0.16	0.0188	0.96	0.16	0.0193	1.00	0.16
	33	0.0157	0.81	0.16	0.0197	1.05	0.16	0.0184	0.95	0.16
	34	0.0194	1.23	0.15	0.0188	0.96	0.15	0.0194	1.05	0.15
	35	0.0178	0.92	0.14	0.0197	1.05	0.15	0.0194	1.00	0.15
	36	0.0195	1.10	0.14	0.0189	0.96	0.14	0.0195	1.00	0.14
	37	0.0159	0.81	0.14	0.0198	1.05	0.14	0.0186	0.95	0.14
	38	0.0195	1.23	0.13	0.0189	0.95	0.13	0.0195	1.05	0.13
	39	0.0178	0.91	0.13	0.0199	1.05	0.13	0.0196	1.00	0.13
	40	0.0196	1.10	0.13	0.0190	0.95	0.13	0.0196	1.00	0.13
	41	0.0160	0.81	0.12	0.0199	1.05	0.12	0.0186	0.95	0.12
	42	0.0197	1.23	0.12	0.0190	0.95	0.12	0.0196	1.05	0.12
	43	0.0179	0.91	0.11	0.0200	1.05	0.11	0.0197	1.00	0.11
	44	0.0197	1.10	0.11	0.0190	0.95	0.11	0.0197	1.00	0.11
	45	0.0160	0.81	0.11	0.0200	1.05	0.11	0.0187	0.95	0.11
	46	0.0198	1.23	0.11	0.0191	0.95	0.11	0.0197	1.05	0.10
	47	0.0180	0.91	0.10	0.0201	1.05	0.10	0.0198	1.00	0.10
	48	0.0198	1.10	0.10	0.0191	0.95	0.10	0.0198	1.00	0.10
	49	0.0161	0.81	0.10	0.0201	1.05	0.10	0.0188	0.95	0.10
	50	0.0199	1.23	0.09	0.0191	0.95	0.10	0.0198	1.05	0.09

Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

Mitarbeiter 2

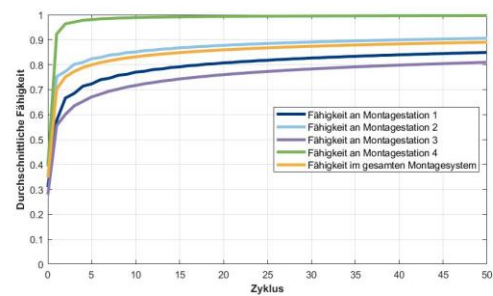


Mitarbeiter 4

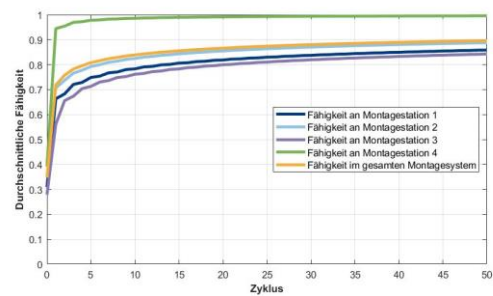


Mitarbeiter 1

Mitarbeiter 2

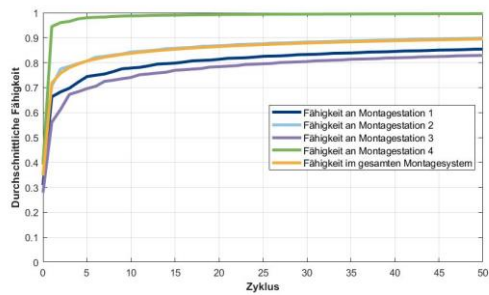


Mitarbeiter 4

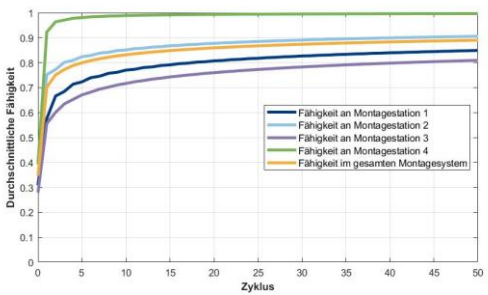


MTM-basierte Aufgabenzuordnung

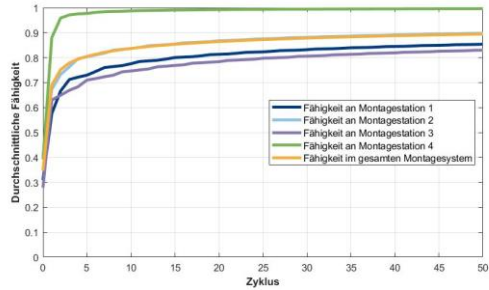
Mitarbeiter 1



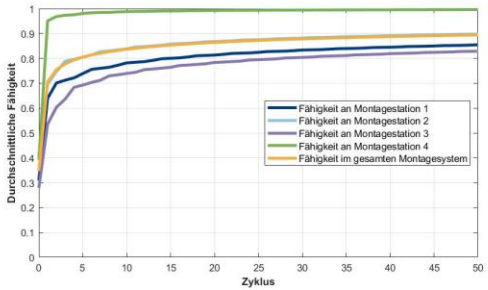
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3



Mitarbeiter 4



A9.6.3 Homogenes Personal & homogene Stationen

Zuordnung

	<i>Fähigkeitsorientiert</i> Montagestation				<i>Zeitorientiert</i> Montagestation				<i>REFA</i> Montagestation			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	1	2	3	1	4	2	3	1	1	2	3	4
2	3	2	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
3	2	1	3	4	4	2	3	1	3	4	1	2
4	1	4	2	3	1	3	4	2	2	3	4	1
5	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
6	3	2	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
7	2	1	3	4	4	2	3	1	3	4	1	2
8	1	4	2	3	1	3	4	2	2	3	4	1
9	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
10	3	2	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
11	2	1	3	4	4	2	3	1	3	4	1	2
12	1	4	2	3	1	3	4	2	2	3	4	1
13	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
14	3	2	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
15	2	1	3	4	4	2	3	1	3	4	1	2
16	1	4	2	3	1	3	4	2	2	3	4	1
17	4	3	1	2	4	3	2	1	1	2	3	4
18	3	2	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
19	2	1	3	4	4	2	3	1	3	4	1	2
20	1	4	2	3	1	3	4	2	2	3	4	1
21	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
22	3	4	2	1	1	3	4	2	4	1	2	3
23	4	1	3	2	4	2	3	1	3	4	1	2
24	1	2	4	3	1	3	4	2	2	3	4	1
25	2	3	1	4	4	2	3	1	1	2	3	4
26	3	4	2	1	1	3	4	2	4	1	2	3
27	4	1	3	2	4	2	3	1	3	4	1	2
28	1	2	4	3	1	3	4	2	2	3	4	1
29	2	3	1	4	4	2	3	1	1	2	3	4
30	3	4	2	1	1	3	4	2	4	1	2	3
31	4	1	3	2	4	2	3	1	3	4	1	2
32	1	2	4	3	1	3	4	2	2	3	4	1
33	2	3	1	4	4	2	3	1	1	2	3	4
34	3	4	2	1	1	3	4	2	4	1	2	3
35	4	1	3	2	4	2	3	1	3	4	1	2
36	1	2	4	3	1	3	4	2	2	3	4	1
37	2	3	1	4	4	2	3	1	1	2	3	4
38	3	4	2	1	1	3	4	2	4	1	2	3
39	4	1	3	2	4	2	3	1	3	4	1	2
40	1	2	4	3	1	3	4	2	2	3	4	1
41	2	3	1	4	4	2	3	1	1	2	3	4
42	3	2	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
43	2	1	3	4	4	2	3	1	3	4	1	2
44	1	4	2	3	1	3	4	2	2	3	4	1
45	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
46	3	2	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3
47	2	1	3	4	4	2	3	1	3	4	1	2
48	1	4	2	3	1	3	4	2	2	3	4	1
49	4	3	1	2	4	2	3	1	1	2	3	4
50	3	2	4	1	1	3	4	2	4	1	2	3

Anzahl der Zuordnung in der 50 Zyklen

		<i>Fähigkeitsorientiert</i>					<i>Zeitorientiert</i>					<i>REFA</i>				
		Montagestation					Montagestation					Montagestation				
		1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4	
Mitarbeiter	1	12	12	13	13		25	0	0	25		13	13	12	12	
	2	13	13	12	12		0	24	1	25		12	13	13	12	
	3	13	13	12	12		0	26	24	0		12	12	13	13	
	4	12	12	13	13		25	0	25	0		13	12	12	13	

Anzahl der Zuordnungen in den 50 Zyklen

Nutzungsgrad

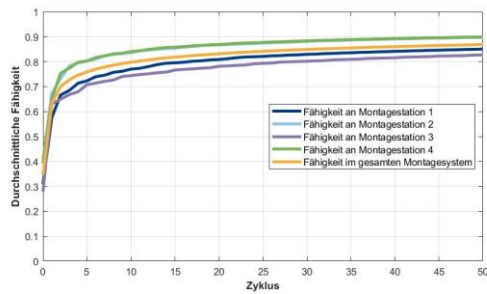
	Fähigkeitsorientiert					Zeitorientiert					REFA					
	Montagestation					Montagestation					Montagestation					
	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	
Zyklus	1	0.68	0.69	1.00	0.56	0.73	0.83	0.84	1.00	0.84	0.88	0.83	0.84	1.00	0.84	0.88
	2	0.90	0.79	1.00	0.87	0.89	0.99	0.82	1.00	0.76	0.89	0.90	0.81	1.00	0.83	0.88
	3	0.77	0.94	1.00	0.65	0.84	0.85	0.90	1.00	0.88	0.91	0.96	0.85	1.00	0.89	0.93
	4	1.00	0.81	0.98	0.76	0.89	1.00	0.83	0.98	0.78	0.90	0.84	0.91	1.00	0.91	0.91
	5	0.69	0.74	1.00	0.60	0.76	0.85	0.92	1.00	0.90	0.92	0.82	1.00	0.97	0.77	0.89
	6	0.91	0.84	1.00	0.90	0.91	1.00	0.84	0.98	0.78	0.90	0.91	0.85	1.00	0.89	0.91
	7	0.78	0.97	1.00	0.68	0.86	0.86	0.93	1.00	0.91	0.92	0.93	0.86	1.00	0.91	0.92
	8	0.90	0.85	1.00	0.90	0.91	1.00	0.84	0.97	0.79	0.90	0.85	0.92	1.00	0.92	0.92
	9	0.69	0.75	1.00	0.61	0.76	0.86	0.93	1.00	0.92	0.93	1.00	0.83	0.96	0.78	0.89
	10	0.91	0.86	1.00	0.91	0.92	1.00	0.85	0.97	0.79	0.90	0.91	0.86	1.00	0.91	0.92
	11	0.80	1.00	0.95	0.76	0.88	0.86	0.94	1.00	0.92	0.93	0.92	0.87	1.00	0.92	0.93
	12	0.79	0.80	1.00	0.85	0.86	1.00	0.85	0.97	0.79	0.90	0.85	0.94	1.00	0.92	0.93
	13	0.69	0.76	1.00	0.62	0.77	0.86	0.94	1.00	0.93	0.93	1.00	0.83	0.96	0.78	0.89
	14	0.92	0.87	1.00	0.92	0.93	1.00	0.85	0.96	0.79	0.90	0.92	0.87	1.00	0.92	0.93
	15	0.79	0.99	1.00	0.70	0.87	0.86	0.95	1.00	0.93	0.94	0.92	0.88	1.00	0.93	0.93
	16	1.00	0.83	0.96	0.78	0.89	1.00	0.85	0.96	0.80	0.90	0.85	0.94	1.00	0.93	0.93
	17	0.70	0.77	1.00	0.62	0.77	0.86	0.95	1.00	0.93	0.94	1.00	0.84	0.96	0.78	0.90
	18	0.79	1.00	0.93	0.76	0.87	1.00	0.85	0.96	0.80	0.90	0.92	0.88	1.00	0.93	0.93
	19	0.79	0.81	1.00	0.86	0.87	0.86	0.95	1.00	0.94	0.94	0.92	0.88	1.00	0.93	0.93
	20	1.00	0.84	0.95	0.78	0.89	1.00	0.85	0.96	0.80	0.90	0.85	0.95	1.00	0.94	0.93
	21	0.70	0.77	1.00	0.62	0.77	0.86	0.96	1.00	0.94	0.94	1.00	0.84	0.96	0.79	0.90
	22	0.92	0.88	1.00	0.94	0.93	1.00	0.86	0.96	0.80	0.90	0.92	0.88	1.00	0.93	0.93
	23	0.79	1.00	1.00	0.71	0.87	0.87	0.96	1.00	0.94	0.94	0.93	0.88	1.00	0.94	0.94
	24	0.92	0.88	1.00	0.94	0.93	1.00	0.86	0.96	0.80	0.90	0.86	0.95	1.00	0.94	0.94
	25	0.70	0.78	1.00	0.63	0.78	0.87	0.96	1.00	0.94	0.94	1.00	0.84	0.95	0.79	0.90
	26	0.79	1.00	0.92	0.76	0.87	1.00	0.86	0.96	0.80	0.90	0.92	0.89	1.00	0.94	0.94
	27	0.79	0.82	1.00	0.87	0.87	0.87	0.96	1.00	0.94	0.94	0.93	0.89	1.00	0.94	0.94
	28	1.00	0.84	0.95	0.79	0.90	1.00	0.86	0.96	0.80	0.90	0.86	0.96	1.00	0.94	0.94
	29	0.70	0.78	1.00	0.63	0.78	0.87	0.96	1.00	0.95	0.94	1.00	0.85	0.95	0.79	0.90
	30	0.79	1.00	0.92	0.76	0.87	1.00	0.86	0.96	0.80	0.90	0.92	0.89	1.00	0.94	0.94
	31	0.79	0.82	1.00	0.87	0.87	0.87	0.97	1.00	0.95	0.95	0.93	0.89	1.00	0.94	0.94
	32	0.85	1.00	0.92	0.71	0.87	1.00	0.86	0.95	0.80	0.90	0.86	0.96	1.00	0.95	0.94
	33	0.70	0.73	1.00	0.68	0.78	0.87	0.97	1.00	0.95	0.95	1.00	0.85	0.95	0.79	0.90
	34	0.79	0.83	1.00	0.88	0.87	1.00	0.86	0.95	0.80	0.90	0.92	0.89	1.00	0.94	0.94
	35	0.78	1.00	0.92	0.76	0.87	0.87	0.97	1.00	0.95	0.95	0.93	0.89	1.00	0.95	0.94
	36	0.86	0.96	1.00	0.95	0.94	1.00	0.86	0.95	0.80	0.90	0.86	0.96	1.00	0.95	0.94
	37	0.70	0.73	1.00	0.68	0.78	0.87	0.97	1.00	0.95	0.95	1.00	0.85	0.95	0.79	0.90
	38	0.79	0.83	1.00	0.88	0.88	1.00	0.86	0.95	0.81	0.90	0.93	0.89	1.00	0.95	0.94
	39	0.78	1.00	0.91	0.76	0.87	0.87	0.97	1.00	0.95	0.95	0.93	0.90	1.00	0.95	0.94
	40	0.86	0.97	1.00	0.95	0.94	1.00	0.86	0.95	0.81	0.91	0.86	0.96	1.00	0.95	0.94
	41	0.76	0.73	1.00	0.63	0.78	0.87	0.97	1.00	0.95	0.95	1.00	0.85	0.95	0.80	0.90
	42	0.80	0.83	1.00	0.88	0.88	1.00	0.86	0.95	0.81	0.91	0.93	0.90	1.00	0.95	0.94
	43	0.70	0.73	1.00	0.68	0.78	0.87	0.97	1.00	0.95	0.95	0.93	0.90	1.00	0.95	0.94
	44	0.86	0.97	1.00	0.95	0.94	1.00	0.86	0.95	0.81	0.91	0.86	0.97	1.00	0.95	0.94
	45	0.84	1.00	0.91	0.71	0.87	0.87	0.97	1.00	0.96	0.95	1.00	0.85	0.95	0.80	0.90
	46	0.80	0.83	1.00	0.88	0.88	1.00	0.86	0.95	0.81	0.91	0.93	0.90	1.00	0.95	0.94
	47	0.70	0.73	1.00	0.69	0.78	0.87	0.97	1.00	0.96	0.95	0.93	0.90	1.00	0.95	0.95
	48	0.86	0.97	1.00	0.95	0.95	1.00	0.86	0.95	0.81	0.91	0.86	0.97	1.00	0.95	0.95
	49	0.84	1.00	0.91	0.71	0.87	0.87	0.98	1.00	0.96	0.95	1.00	0.85	0.95	0.80	0.90
	50	0.80	0.83	1.00	0.88	0.88	1.00	0.86	0.95	0.81	0.91	0.93	0.90	1.00	0.95	0.95

	<i>Fähigkeitsorientiert</i>			<i>Zeitorientiert</i>			<i>REFA</i>		
	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung
Zyklus	1	0.0129	63.73	0.0130	-	64.77	0.0130	-	64.77
	2	0.0145	-	0.0148	1.14	6.89	0.0145	1.12	6.89
	3	0.0161	1.12	0.0161	1.09	3.33	0.0161	1.11	3.55
	4	0.0165	1.11	0.0162	1.01	2.27	0.0164	1.02	2.36
	5	0.0162	1.02	0.0171	1.05	1.64	0.0162	0.99	1.64
	6	0.0169	0.98	0.0168	0.99	1.31	0.0169	1.04	1.29
	7	0.0173	1.04	0.0176	1.05	1.06	0.0173	1.03	1.07
	8	0.0174	1.03	0.0172	0.98	0.91	0.0175	1.01	0.92
	9	0.0169	1.00	0.0180	1.04	0.77	0.0170	0.97	0.77
	10	0.0177	0.97	0.0175	0.97	0.68	0.0177	1.04	0.67
	11	0.0180	1.04	0.0183	1.04	0.60	0.0180	1.02	0.60
	12	0.0181	1.02	0.0177	0.97	0.54	0.0181	1.01	0.55
	13	0.0175	1.01	0.0185	1.04	0.49	0.0174	0.96	0.49
	14	0.0182	0.96	0.0179	0.97	0.45	0.0182	1.04	0.44
	15	0.0184	1.04	0.0187	1.04	0.41	0.0184	1.01	0.41
	16	0.0184	1.01	0.0181	0.97	0.38	0.0185	1.00	0.38
	17	0.0177	1.00	0.0189	1.04	0.35	0.0177	0.96	0.35
	18	0.0186	0.96	0.0182	0.96	0.33	0.0186	1.05	0.33
	19	0.0188	1.05	0.0190	1.05	0.31	0.0187	1.01	0.31
	20	0.0187	1.01	0.0183	0.96	0.29	0.0188	1.00	0.29
	21	0.0179	1.00	0.0191	1.05	0.27	0.0180	0.96	0.27
	22	0.0188	0.96	0.0184	0.96	0.26	0.0188	1.05	0.25
	23	0.0190	1.05	0.0193	1.05	0.24	0.0189	1.01	0.24
	24	0.0190	1.01	0.0185	0.96	0.23	0.0190	1.00	0.23
	25	0.0181	1.00	0.0194	1.05	0.22	0.0182	0.96	0.22
	26	0.0191	0.95	0.0186	0.96	0.21	0.0190	1.05	0.21
	27	0.0191	1.05	0.0194	1.05	0.20	0.0191	1.00	0.20
	28	0.0192	1.00	0.0186	0.96	0.19	0.0192	1.00	0.19
	29	0.0183	1.01	0.0195	1.05	0.18	0.0183	0.96	0.18
	30	0.0193	0.95	0.0187	0.96	0.18	0.0192	1.05	0.17
	31	0.0194	1.05	0.0196	1.05	0.17	0.0193	1.00	0.17
	32	0.0194	1.00	0.0188	0.96	0.16	0.0193	1.00	0.16
	33	0.0184	1.00	0.0197	1.05	0.16	0.0184	0.95	0.16
	34	0.0194	0.95	0.0188	0.96	0.15	0.0194	1.05	0.15
	35	0.0194	1.05	0.0197	1.05	0.15	0.0194	1.00	0.15
	36	0.0194	1.00	0.0189	0.96	0.14	0.0195	1.00	0.14
	37	0.0186	1.00	0.0198	1.05	0.14	0.0186	0.95	0.14
	38	0.0195	0.96	0.0189	0.95	0.13	0.0195	1.05	0.13
	39	0.0195	1.05	0.0199	1.05	0.13	0.0196	1.00	0.13
	40	0.0197	1.00	0.0190	0.95	0.13	0.0196	1.00	0.13
	41	0.0187	1.01	0.0199	1.05	0.12	0.0186	0.95	0.12
	42	0.0196	0.95	0.0190	0.95	0.12	0.0196	1.05	0.12
	43	0.0196	1.05	0.0200	1.05	0.11	0.0197	1.00	0.11
	44	0.0196	1.00	0.0190	0.95	0.11	0.0197	1.00	0.11
	45	0.0188	1.00	0.0200	1.05	0.11	0.0187	0.95	0.11
	46	0.0198	0.96	0.0191	0.95	0.11	0.0197	1.05	0.10
	47	0.0198	1.05	0.0201	1.05	0.10	0.0198	1.00	0.10
	48	0.0199	1.00	0.0191	0.95	0.10	0.0198	1.00	0.10
	49	0.0188	1.00	0.0201	1.05	0.10	0.0188	0.95	0.10
	50	0.0198	0.95	0.0191	0.95	0.10	0.0198	1.05	0.09

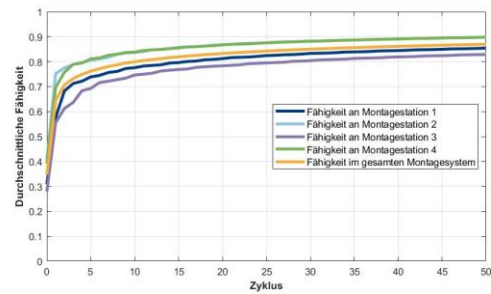
Fähigkeitsentwicklung

Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

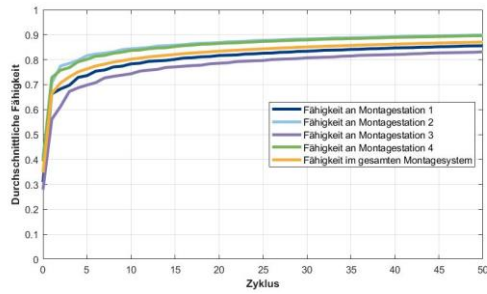
Mitarbeiter 1



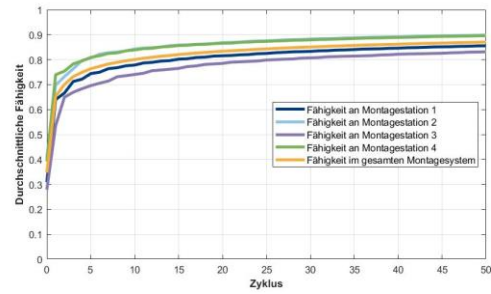
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3

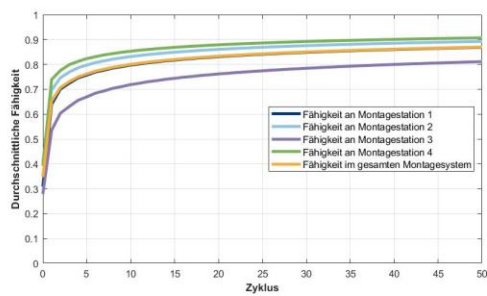


Mitarbeiter 4

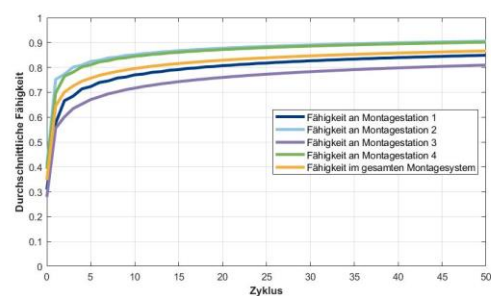


Zeitorientierte Aufgabenzuordnung

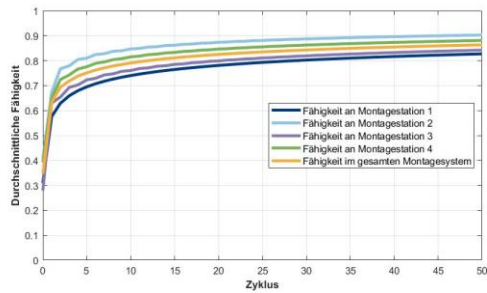
Mitarbeiter 1



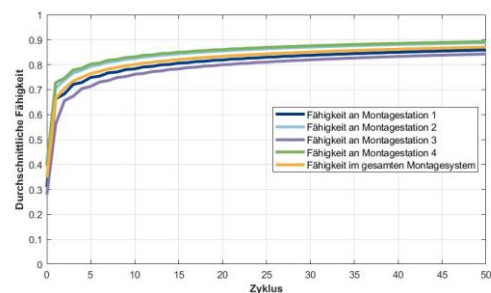
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3

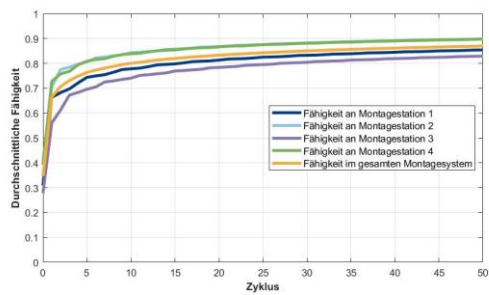


Mitarbeiter 4

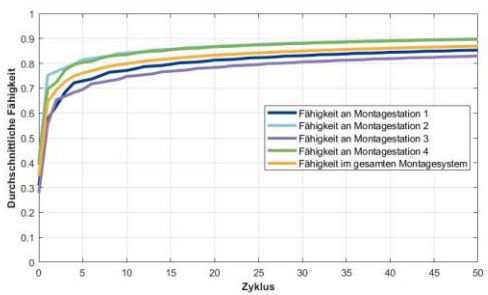


MTM-basierte Aufgabenzuordnung

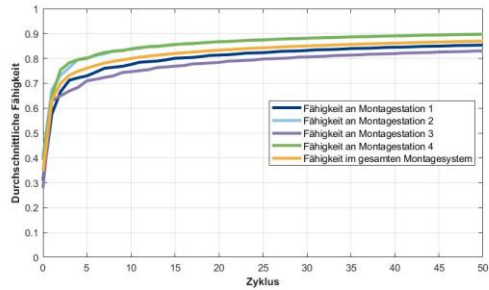
Mitarbeiter 1



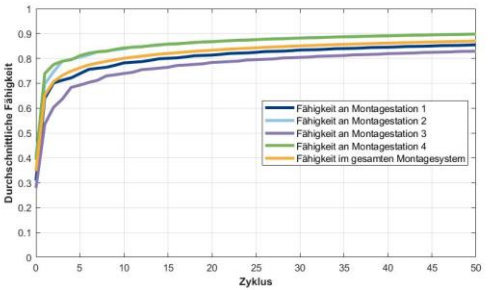
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3



Mitarbeiter 4



A9.6.4 Homogenes Personal mit Vorerfahrungen

Zuordnung

	Fähigkeitsorientiert Montagestation				Zeitorientiert Montagestation				REFA Montagestation			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	3	2	1	4	3	4	2	1	1	2	3	4
2	2	3	4	1	4	1	3	2	4	1	2	3
3	4	1	3	2	3	4	2	1	3	4	1	2
4	1	4	2	3	4	1	3	2	2	3	4	1
5	2	1	3	4	3	4	2	1	1	2	3	4
6	1	2	4	3	4	1	3	2	4	1	2	3
7	2	4	3	1	3	4	2	1	3	4	1	2
8	4	2	1	3	4	1	3	2	2	3	4	1
9	2	3	4	1	3	4	2	1	1	2	3	4
10	3	1	2	4	4	1	3	2	4	1	2	3
11	2	4	3	1	3	4	2	1	3	4	1	2
12	1	2	4	3	4	1	3	2	2	3	4	1
13	2	1	3	4	3	4	2	1	1	2	3	4
14	1	3	4	2	4	1	3	2	4	1	2	3
15	2	1	3	4	3	4	2	1	3	4	1	2
16	1	2	4	3	4	1	3	2	2	3	4	1
17	2	3	1	4	3	4	2	1	1	2	3	4
18	1	2	4	3	4	1	3	2	4	1	2	3
19	2	1	3	4	3	4	2	1	3	4	1	2
20	1	4	2	3	4	1	3	2	2	3	4	1
21	2	1	3	4	3	4	2	1	1	2	3	4
22	1	2	4	3	4	1	3	2	4	1	2	3
23	2	4	3	1	3	4	2	1	3	4	1	2
24	1	2	4	3	4	1	3	2	2	3	4	1
25	2	3	1	4	3	4	2	1	1	2	3	4
26	1	4	3	2	4	1	3	2	4	1	2	3
27	2	1	4	3	3	4	2	1	3	4	1	2
28	1	2	3	4	4	1	3	2	2	3	4	1
29	2	1	4	3	3	4	2	1	1	2	3	4
30	1	3	2	4	4	1	3	2	4	1	2	3
31	2	1	4	3	2	3	4	1	3	4	1	2
32	1	2	3	4	3	1	2	4	2	3	4	1
33	2	4	1	3	4	3	1	2	1	2	3	4
34	1	2	3	4	2	4	3	1	4	1	2	3
35	2	1	4	3	3	1	2	4	3	4	1	2
36	1	2	3	4	4	3	1	2	2	3	4	1
37	2	3	4	1	2	4	3	1	1	2	3	4
38	1	4	3	2	3	1	2	4	4	1	2	3
39	2	1	4	3	2	4	3	1	3	4	1	2
40	1	3	2	4	3	1	2	4	2	3	4	1
41	2	1	4	3	2	4	3	1	1	2	3	4
42	1	2	3	4	3	1	2	4	4	1	2	3
43	2	4	1	3	2	4	3	1	3	4	1	2
44	1	2	3	4	3	1	2	4	2	3	4	1
45	2	1	4	3	2	4	3	1	1	2	3	4
46	1	2	3	4	3	1	2	4	4	1	2	3
47	2	3	4	1	2	4	3	1	3	4	1	2
48	1	4	2	3	3	1	2	4	2	3	4	1
49	2	1	3	4	2	4	3	1	1	2	3	4
50	1	3	4	2	3	1	2	4	4	1	2	3

Anzahl der Zuordnung in der 50 Zyklen

		<i>Fähigkeitsorientiert</i>				<i>Zeitorientiert</i>				<i>REFA</i>			
		Montagestation				Montagestation				Montagestation			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Mitarbeiter	1	22	15	6	7	0	24	2	24	13	13	12	12
	2	24	15	6	5	9	0	24	17	12	13	13	12
	3	2	10	19	19	24	3	23	0	12	12	13	13
	4	2	10	19	19	17	23	1	9	13	12	12	13

Anzahl der Zuordnungen in den 50 Zyklen

Nutzungsgrad

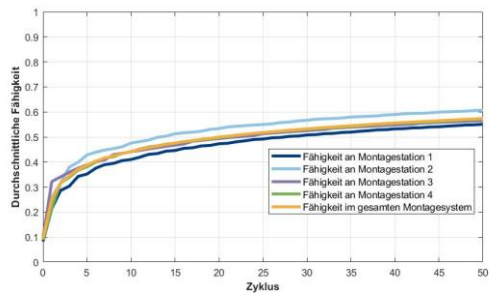
	Fähigkeitsorientiert					Zeitorientiert					REFA					
	Montagestation					Montagestation					Montagestation					
	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	
Zyklus	1	0.31	0.81	1.00	0.26	0.59	0.34	0.32	0.96	1.00	0.65	0.34	0.32	0.96	1.00	0.65
	2	0.96	0.35	0.44	1.00	0.69	0.38	1.00	0.45	0.91	0.69	0.33	0.34	1.00	0.78	0.61
	3	0.38	1.00	0.46	0.79	0.66	0.42	0.41	1.00	1.00	0.71	0.42	0.91	0.51	1.00	0.71
	4	1.00	0.37	0.91	0.32	0.65	0.42	1.00	0.49	0.88	0.70	0.41	0.90	0.50	1.00	0.70
	5	0.93	1.00	0.50	0.36	0.70	0.45	0.45	1.00	1.00	0.72	0.42	1.00	0.96	0.36	0.69
	6	1.00	0.82	0.48	0.35	0.66	0.44	1.00	0.51	0.87	0.71	0.39	0.40	1.00	0.76	0.64
	7	0.98	0.47	0.55	1.00	0.75	0.47	0.47	1.00	0.99	0.73	0.47	0.93	0.55	1.00	0.74
	8	0.40	0.79	1.00	0.35	0.63	0.45	1.00	0.53	0.87	0.71	0.46	0.93	0.55	1.00	0.73
	9	0.97	0.49	0.56	1.00	0.76	0.48	0.48	1.00	0.99	0.74	0.45	1.00	0.95	0.39	0.70
	10	0.45	1.00	0.97	0.40	0.70	0.46	1.00	0.54	0.86	0.72	1.00	0.49	0.57	1.00	0.77
	11	0.98	0.50	0.58	1.00	0.76	0.49	0.50	1.00	0.99	0.74	0.49	0.94	0.58	1.00	0.75
	12	1.00	0.84	0.52	0.39	0.69	0.47	1.00	0.55	0.86	0.72	0.49	0.94	0.57	1.00	0.75
	13	0.90	1.00	0.54	0.41	0.71	0.50	0.51	1.00	0.99	0.75	0.46	1.00	0.95	0.41	0.71
	14	1.00	0.46	0.53	0.79	0.70	0.48	1.00	0.56	0.86	0.72	0.99	0.52	0.59	1.00	0.77
	15	0.90	1.00	0.55	0.42	0.72	0.51	0.52	1.00	0.99	0.75	0.51	0.95	0.59	1.00	0.76
	16	1.00	0.85	0.54	0.41	0.70	0.49	1.00	0.56	0.85	0.73	0.50	0.94	0.59	1.00	0.76
	17	0.81	0.44	1.00	0.38	0.66	0.51	0.52	1.00	0.99	0.76	0.47	1.00	0.95	0.42	0.71
	18	1.00	0.85	0.54	0.42	0.70	0.49	1.00	0.57	0.85	0.73	0.99	0.53	0.61	1.00	0.78
	19	0.90	1.00	0.56	0.43	0.72	0.52	0.53	1.00	0.99	0.76	0.52	0.95	0.61	1.00	0.77
	20	1.00	0.49	0.95	0.42	0.72	0.50	1.00	0.57	0.85	0.73	0.52	0.95	0.61	1.00	0.77
	21	0.90	1.00	0.57	0.44	0.73	0.52	0.54	1.00	0.99	0.76	0.48	1.00	0.95	0.43	0.72
	22	1.00	0.86	0.56	0.43	0.71	0.50	1.00	0.58	0.85	0.73	0.98	0.54	0.62	1.00	0.79
	23	0.97	0.55	0.62	1.00	0.78	0.53	0.54	1.00	0.99	0.76	0.53	0.95	0.62	1.00	0.77
	24	1.00	0.86	0.56	0.44	0.71	0.50	1.00	0.58	0.85	0.73	0.53	0.95	0.62	1.00	0.77
	25	0.81	0.47	1.00	0.40	0.67	0.53	0.55	1.00	0.98	0.77	0.49	1.00	0.95	0.44	0.72
	26	1.00	0.51	0.57	0.80	0.72	0.51	1.00	0.59	0.85	0.73	0.98	0.55	0.63	1.00	0.79
	27	0.89	1.00	0.58	0.45	0.73	0.54	0.55	1.00	0.98	0.77	0.54	0.95	0.63	1.00	0.78
	28	1.00	0.86	0.57	0.44	0.72	0.51	1.00	0.59	0.85	0.74	0.54	0.95	0.63	1.00	0.78
	29	0.89	1.00	0.58	0.45	0.73	0.54	0.56	1.00	0.98	0.77	0.50	1.00	0.58	0.81	0.72
	30	1.00	0.52	0.96	0.45	0.73	0.51	1.00	0.59	0.84	0.74	0.98	0.56	0.63	1.00	0.79
	31	0.89	1.00	0.59	0.46	0.73	1.00	0.58	0.65	0.98	0.80	0.54	0.96	0.64	1.00	0.78
	32	1.00	0.87	0.58	0.45	0.72	0.52	1.00	0.95	0.47	0.73	0.54	0.95	0.63	1.00	0.78
	33	0.80	0.48	1.00	0.42	0.67	0.44	0.46	1.00	0.71	0.65	0.50	1.00	0.59	0.81	0.73
	34	1.00	0.87	0.58	0.45	0.73	1.00	0.57	0.64	0.99	0.80	0.98	0.57	0.64	1.00	0.80
	35	0.89	1.00	0.59	0.46	0.74	0.52	1.00	0.95	0.47	0.73	0.55	0.96	0.64	1.00	0.79
	36	1.00	0.87	0.59	0.46	0.73	0.45	0.47	1.00	0.72	0.66	0.55	0.96	0.64	1.00	0.79
	37	0.96	0.58	0.64	1.00	0.80	1.00	0.58	0.65	1.00	0.81	0.51	1.00	0.59	0.81	0.73
	38	1.00	0.53	0.59	0.81	0.73	0.52	1.00	0.95	0.47	0.73	0.98	0.58	0.65	1.00	0.80
	39	0.88	1.00	0.60	0.47	0.74	1.00	0.58	0.65	1.00	0.81	0.56	0.96	0.65	1.00	0.79
	40	1.00	0.54	0.97	0.46	0.74	0.52	1.00	0.94	0.47	0.74	0.56	0.96	0.65	1.00	0.79
	41	0.88	1.00	0.60	0.47	0.74	1.00	0.59	0.65	1.00	0.81	0.51	1.00	0.60	0.81	0.73
	42	1.00	0.87	0.60	0.47	0.73	0.53	1.00	0.94	0.48	0.74	0.98	0.59	0.65	1.00	0.80
	43	0.80	0.49	1.00	0.43	0.68	1.00	0.59	0.65	1.00	0.81	0.56	0.96	0.65	1.00	0.79
	44	1.00	0.87	0.60	0.47	0.74	0.53	1.00	0.94	0.48	0.74	0.56	0.96	0.65	1.00	0.79
	45	0.88	1.00	0.60	0.47	0.74	0.99	0.59	0.66	1.00	0.81	0.52	1.00	0.60	0.81	0.73
	46	1.00	0.87	0.60	0.47	0.74	0.53	1.00	0.94	0.48	0.74	0.97	0.59	0.66	1.00	0.81
	47	0.96	0.60	0.66	1.00	0.80	0.99	0.60	0.66	1.00	0.81	0.57	0.96	0.66	1.00	0.80
	48	1.00	0.55	0.97	0.48	0.75	0.53	1.00	0.94	0.48	0.74	0.57	0.96	0.66	1.00	0.80
	49	0.88	1.00	0.61	0.48	0.74	0.99	0.60	0.66	1.00	0.81	0.52	1.00	0.61	0.81	0.73
	50	1.00	0.55	0.61	0.81	0.74	0.53	1.00	0.94	0.48	0.74	0.97	0.60	0.66	1.00	0.81

Fähigkeitsorientiert				Zeitorientiert			REFA			
	Ausbringungs- menge	Zuwachsr- ate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsr- ate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsr- ate	Fähigkeitsent- wicklung	
Zyklus	1	0.0048	-	74.33	0.0053	-	64.03	0.0053	-	63.36
	2	0.0064	1.31	9.34	0.0066	1.25	7.37	0.0061	1.15	7.22
	3	0.0071	1.11	4.40	0.0080	1.22	3.26	0.0079	1.30	3.97
	4	0.0072	1.01	2.81	0.0081	1.00	2.34	0.0081	1.03	2.49
	5	0.0083	1.16	2.21	0.0090	1.11	1.62	0.0083	1.02	1.53
	6	0.0080	0.97	1.79	0.0088	0.98	1.34	0.0079	0.95	1.30
	7	0.0095	1.18	1.47	0.0096	1.09	1.05	0.0095	1.20	1.12
	8	0.0082	0.87	1.26	0.0094	0.97	0.92	0.0096	1.01	0.96
	9	0.0099	1.21	1.11	0.0101	1.08	0.76	0.0093	0.97	0.72
	10	0.0094	0.95	0.86	0.0097	0.97	0.69	0.0102	1.10	0.68
	11	0.0103	1.10	0.88	0.0104	1.07	0.60	0.0103	1.01	0.62
	12	0.0094	0.91	0.78	0.0101	0.96	0.55	0.0104	1.01	0.57
	13	0.0099	1.06	0.73	0.0107	1.07	0.48	0.0099	0.95	0.45
	14	0.0097	0.98	0.66	0.0103	0.96	0.45	0.0108	1.09	0.45
	15	0.0102	1.05	0.61	0.0110	1.06	0.41	0.0109	1.01	0.42
	16	0.0099	0.97	0.56	0.0105	0.96	0.39	0.0109	1.00	0.40
	17	0.0093	0.94	0.55	0.0112	1.06	0.35	0.0103	0.94	0.33
	18	0.0102	1.09	0.49	0.0107	0.96	0.33	0.0112	1.09	0.33
	19	0.0106	1.04	0.47	0.0114	1.06	0.31	0.0113	1.01	0.31
	20	0.0104	0.98	0.40	0.0109	0.96	0.29	0.0114	1.00	0.31
	21	0.0108	1.04	0.43	0.0116	1.06	0.27	0.0106	0.94	0.25
	22	0.0105	0.98	0.39	0.0111	0.96	0.26	0.0116	1.09	0.26
	23	0.0118	1.12	0.38	0.0118	1.06	0.24	0.0117	1.01	0.25
	24	0.0107	0.91	0.36	0.0112	0.95	0.23	0.0117	1.00	0.24
	25	0.0099	0.93	0.37	0.0119	1.06	0.22	0.0109	0.93	0.20
	26	0.0109	1.10	0.32	0.0114	0.95	0.21	0.0119	1.09	0.21
	27	0.0111	1.02	0.33	0.0121	1.06	0.20	0.0120	1.00	0.20
	28	0.0110	0.99	0.30	0.0115	0.95	0.19	0.0120	1.00	0.20
	29	0.0113	1.02	0.30	0.0122	1.06	0.18	0.0112	0.93	0.17
	30	0.0112	0.99	0.25	0.0116	0.95	0.18	0.0122	1.09	0.18
	31	0.0114	1.02	0.28	0.0123	1.06	0.19	0.0122	1.00	0.17
	32	0.0113	0.99	0.26	0.0117	0.95	0.16	0.0123	1.00	0.17
	33	0.0104	0.92	0.27	0.0100	0.85	0.18	0.0114	0.93	0.15
	34	0.0114	1.09	0.24	0.0126	1.26	0.15	0.0124	1.09	0.15
	35	0.0116	1.02	0.25	0.0118	0.94	0.14	0.0125	1.00	0.15
	36	0.0115	0.99	0.23	0.0102	0.86	0.16	0.0125	1.00	0.15
	37	0.0126	1.10	0.23	0.0128	1.26	0.14	0.0115	0.92	0.13
	38	0.0116	0.92	0.21	0.0119	0.93	0.13	0.0126	1.09	0.13
	39	0.0118	1.01	0.22	0.0129	1.08	0.13	0.0127	1.00	0.13
	40	0.0117	1.00	0.18	0.0120	0.93	0.12	0.0127	1.00	0.13
	41	0.0119	1.01	0.21	0.0130	1.08	0.12	0.0117	0.92	0.11
	42	0.0118	0.99	0.19	0.0121	0.93	0.12	0.0128	1.09	0.12
	43	0.0108	0.92	0.20	0.0131	1.08	0.11	0.0129	1.00	0.12
	44	0.0119	1.10	0.18	0.0122	0.93	0.11	0.0129	1.00	0.12
	45	0.0120	1.01	0.19	0.0131	1.08	0.11	0.0119	0.92	0.10
	46	0.0120	1.00	0.17	0.0122	0.93	0.10	0.0130	1.10	0.11
	47	0.0131	1.10	0.18	0.0132	1.08	0.10	0.0130	1.00	0.10
	48	0.0120	0.92	0.15	0.0123	0.93	0.10	0.0130	1.00	0.11
	49	0.0121	1.01	0.17	0.0133	1.08	0.10	0.0120	0.92	0.09
	50	0.0121	1.00	0.16	0.0124	0.93	0.09	0.0131	1.10	0.10

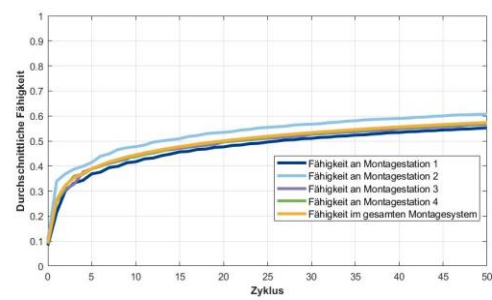
Fähigkeitsentwicklung

Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

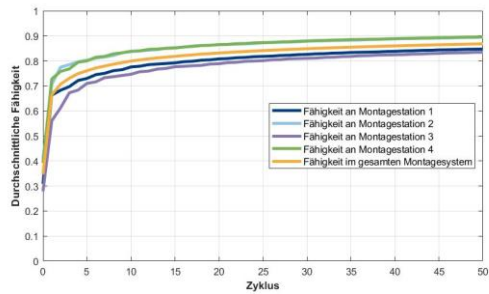
Mitarbeiter 1



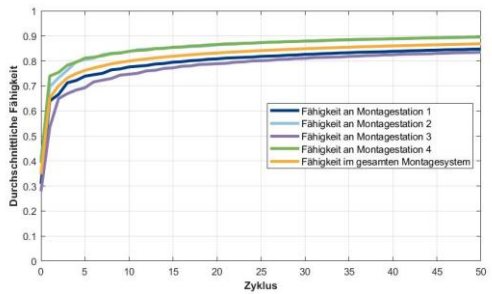
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3

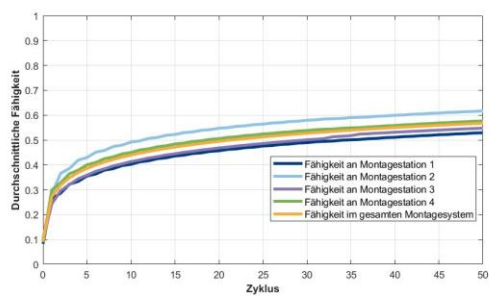


Mitarbeiter 4

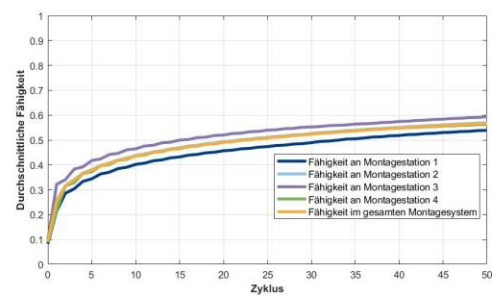


Zeitorientierte Aufgabenzuordnung

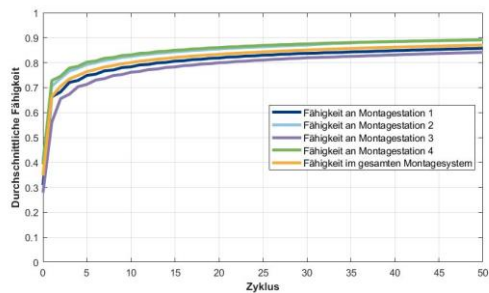
Mitarbeiter 1



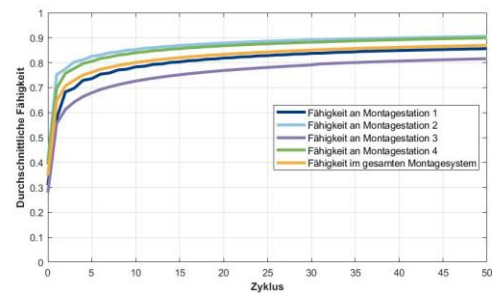
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3

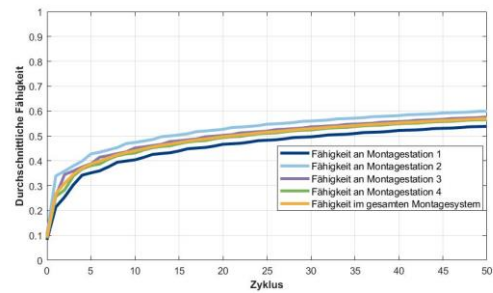


Mitarbeiter 4

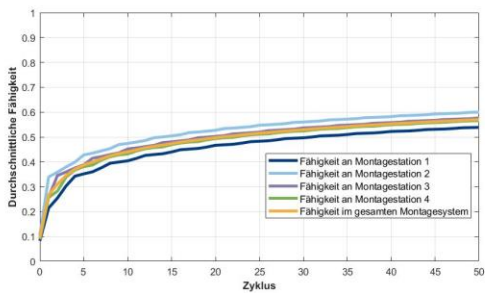


MTM-basierte Aufgabenzuordnung

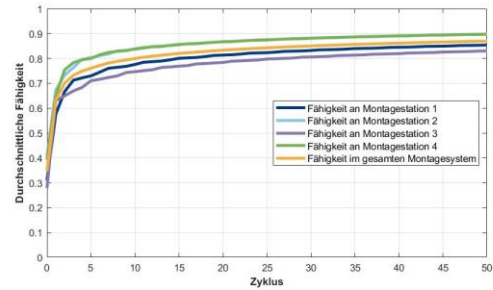
Mitarbeiter 1



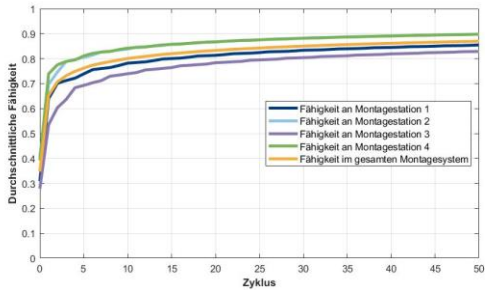
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3



Mitarbeiter 4



A9.6.5 Heterogenes Personal

Zuordnung

	<i>Fähigkeitsorientiert</i> Montagestation				<i>Zeitorientiert</i> Montagestation				<i>REFA</i> Montagestation			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	4	1	2	3	4	3	1	2	1	2	3	4
2	1	3	4	2	3	2	4	1	4	1	2	3
3	3	2	1	4	1	4	3	2	3	4	1	2
4	2	4	3	1	3	2	4	1	2	3	4	1
5	3	1	4	2	1	4	3	2	1	2	3	4
6	4	2	3	1	3	2	4	1	4	1	2	3
7	1	4	2	3	1	4	3	2	3	4	1	2
8	3	1	4	2	3	2	4	1	2	3	4	1
9	2	3	1	4	1	4	3	2	1	2	3	4
10	3	2	4	1	3	2	4	1	4	1	2	3
11	1	4	3	2	1	4	3	2	3	4	1	2
12	3	1	2	4	3	2	4	1	2	3	4	1
13	2	3	4	1	1	4	3	2	1	2	3	4
14	3	4	1	2	3	2	4	1	4	1	2	3
15	1	2	4	3	1	4	3	2	3	4	1	2
16	2	1	3	4	3	2	4	1	2	3	4	1
17	3	4	2	1	1	4	3	2	1	2	3	4
18	1	3	4	2	3	2	4	1	4	1	2	3
19	3	2	1	4	1	4	3	2	3	4	1	2
20	2	4	3	1	3	2	4	1	2	3	4	1
21	3	1	4	2	1	4	3	2	1	2	3	4
22	2	3	1	4	3	2	4	1	4	1	2	3
23	3	2	4	1	1	4	3	2	3	4	1	2
24	2	1	3	4	3	2	4	1	2	3	4	1
25	3	4	2	1	1	4	3	2	1	2	3	4
26	2	1	4	3	3	2	4	1	4	1	2	3
27	3	4	2	1	1	4	3	2	3	4	1	2
28	2	3	1	4	3	2	4	1	2	3	4	1
29	3	2	4	1	1	4	3	2	1	2	3	4
30	1	4	3	2	3	2	4	1	4	1	2	3
31	2	1	4	3	1	4	3	2	3	4	1	2
32	3	2	1	4	3	2	4	1	2	3	4	1
33	2	4	3	1	1	4	3	2	1	2	3	4
34	3	1	4	2	3	2	4	1	4	1	2	3
35	1	3	2	4	1	4	3	2	3	4	1	2
36	3	2	4	1	3	2	4	1	2	3	4	1
37	2	1	3	4	1	4	3	2	1	2	3	4
38	3	2	4	1	3	2	4	1	4	1	2	3
39	2	4	1	3	1	4	3	2	3	4	1	2
40	1	3	4	2	3	2	4	1	2	3	4	1
41	2	4	3	1	1	4	3	2	1	2	3	4
42	3	1	2	4	3	2	4	1	4	1	2	3
43	2	3	4	1	1	4	3	2	3	4	1	2
44	3	4	1	2	3	2	4	1	2	3	4	1
45	2	1	3	4	1	4	3	2	1	2	3	4
46	3	2	4	1	3	2	4	1	4	1	2	3
47	2	4	1	3	1	4	3	2	3	4	1	2
48	3	2	4	1	3	2	4	1	2	3	4	1
49	2	1	3	4	1	4	3	2	1	2	3	4
50	3	4	2	1	3	2	4	1	4	1	2	3

Anzahl der Zuordnung in der 50 Zyklen

		<i>Fähigkeitsorientiert</i>				<i>Zeitorientiert</i>				<i>REFA</i>			
		Montagestation				Montagestation				Montagestation			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Mitarbeiter	1	8	14	10	18	24	0	1	25	13	13	12	12
	2	18	12	9	11	0	25	0	25	12	13	13	12
	3	22	9	12	7	25	1	24	0	12	12	13	13
	4	2	15	19	14	1	24	25	0	13	12	12	13

Anzahl der Zuordnungen in den 50 Zyklen

Nutzungsgrad

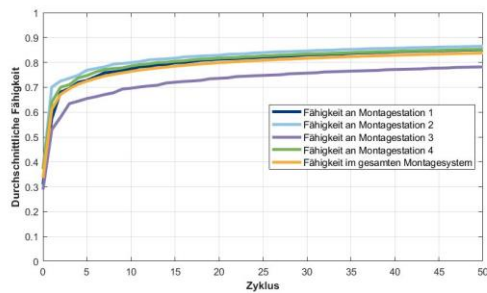
	Fähigkeitsorientiert					Zeitorientiert					REFA					
	Montagestation					Montagestation					Montagestation					
	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	1	2	3	4	Ø	
Zyklus	1	0.54	0.84	1.00	0.58	0.74	0.53	0.62	1.00	0.66	0.70	0.53	0.62	1.00	0.66	0.70
	2	1.00	0.78	0.81	0.86	0.86	0.88	1.00	0.86	0.98	0.93	0.51	0.64	1.00	0.68	0.71
	3	0.64	0.78	1.00	0.46	0.72	0.97	0.70	1.00	0.83	0.87	0.64	0.56	1.00	0.70	0.73
	4	1.00	0.68	0.97	0.87	0.88	0.84	1.00	0.84	0.94	0.91	0.54	0.79	1.00	0.58	0.73
	5	0.77	1.00	0.79	0.83	0.85	0.98	0.73	1.00	0.87	0.90	0.99	0.98	1.00	0.60	0.89
	6	0.68	0.99	1.00	0.92	0.90	0.83	1.00	0.84	0.94	0.90	0.55	0.66	1.00	0.71	0.73
	7	0.81	0.61	1.00	0.59	0.75	0.99	0.75	1.00	0.88	0.91	0.65	0.59	1.00	0.71	0.74
	8	0.77	1.00	0.79	0.84	0.85	0.82	1.00	0.84	0.93	0.90	0.56	0.80	1.00	0.59	0.74
	9	0.84	0.66	1.00	0.50	0.75	0.99	0.76	1.00	0.89	0.91	1.00	1.00	1.00	0.63	0.91
	10	0.81	1.00	0.83	0.94	0.90	0.82	1.00	0.84	0.93	0.90	0.56	0.67	1.00	0.71	0.74
	11	1.00	0.76	1.00	0.89	0.91	1.00	0.77	1.00	0.90	0.92	0.66	0.61	1.00	0.72	0.75
	12	0.67	0.88	1.00	0.52	0.77	0.82	1.00	0.84	0.93	0.90	0.99	1.00	0.84	0.73	0.89
	13	1.00	0.79	0.79	0.89	0.87	1.00	0.78	1.00	0.90	0.92	1.00	0.77	1.00	0.89	0.91
	14	0.65	0.61	1.00	0.71	0.74	0.82	1.00	0.84	0.93	0.90	0.66	0.62	1.00	0.72	0.75
	15	0.99	1.00	0.83	0.73	0.89	1.00	0.78	1.00	0.91	0.92	0.57	0.67	1.00	0.72	0.74
	16	0.99	1.00	0.93	0.60	0.88	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.66	0.62	1.00	0.72	0.75
	17	0.67	0.64	1.00	0.78	0.77	1.00	0.79	0.99	0.91	0.92	1.00	0.77	0.99	0.90	0.92
	18	1.00	0.84	0.85	0.90	0.90	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.57	0.68	1.00	0.72	0.74
	19	0.65	0.81	1.00	0.52	0.75	1.00	0.79	0.99	0.91	0.92	0.66	0.62	1.00	0.72	0.75
	20	1.00	0.74	0.94	0.90	0.89	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.99	1.00	0.84	0.73	0.89
	21	0.75	1.00	0.79	0.83	0.84	1.00	0.79	0.99	0.91	0.92	0.57	0.68	1.00	0.73	0.75
	22	0.85	0.68	1.00	0.53	0.76	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	1.00	0.78	0.99	0.90	0.92
	23	0.80	1.00	0.84	0.93	0.89	1.00	0.79	0.99	0.91	0.92	0.66	0.63	1.00	0.73	0.75
	24	0.97	1.00	0.92	0.61	0.88	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.99	1.00	0.84	0.73	0.89
	25	0.67	0.65	1.00	0.79	0.78	1.00	0.80	0.99	0.91	0.92	1.00	0.78	0.99	0.90	0.92
	26	0.97	1.00	0.79	0.69	0.86	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.58	0.68	1.00	0.73	0.75
	27	0.68	0.66	1.00	0.79	0.78	1.00	0.80	0.99	0.91	0.92	0.66	0.64	1.00	0.73	0.76
	28	0.84	0.68	1.00	0.53	0.77	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.98	1.00	0.84	0.73	0.89
	29	0.80	1.00	0.84	0.93	0.89	1.00	0.80	0.99	0.91	0.92	1.00	0.79	0.99	0.90	0.92
	30	1.00	0.79	0.99	0.90	0.92	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.58	0.69	1.00	0.73	0.75
	31	0.97	1.00	0.79	0.69	0.86	1.00	0.80	0.98	0.91	0.92	0.66	0.64	1.00	0.73	0.76
	32	0.66	0.82	1.00	0.54	0.75	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.98	1.00	0.84	0.73	0.89
	33	1.00	0.76	0.94	0.91	0.90	1.00	0.80	0.98	0.91	0.92	1.00	0.79	0.98	0.90	0.92
	34	0.75	1.00	0.79	0.83	0.84	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.59	0.69	1.00	0.73	0.75
	35	0.84	0.71	1.00	0.56	0.78	1.00	0.80	0.98	0.91	0.92	0.66	0.64	1.00	0.73	0.76
	36	0.80	1.00	0.84	0.93	0.89	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.98	1.00	0.84	0.73	0.89
	37	0.97	1.00	0.91	0.62	0.87	1.00	0.81	0.98	0.91	0.92	1.00	0.79	0.98	0.90	0.92
	38	0.80	1.00	0.84	0.93	0.89	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.59	0.69	1.00	0.73	0.75
	39	0.84	0.64	1.00	0.60	0.77	1.00	0.81	0.98	0.91	0.92	0.66	0.65	1.00	0.73	0.76
	40	1.00	0.85	0.85	0.90	0.90	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.98	1.00	0.84	0.73	0.89
	41	1.00	0.77	0.94	0.91	0.90	1.00	0.81	0.98	0.91	0.92	1.00	0.80	0.98	0.90	0.92
	42	0.68	0.91	1.00	0.57	0.79	0.81	1.00	0.84	0.93	0.90	0.59	0.69	1.00	0.73	0.75
	43	1.00	0.82	0.82	0.91	0.89	1.00	0.81	0.98	0.91	0.92	0.66	0.65	1.00	0.73	0.76
	44	0.66	0.65	1.00	0.73	0.76	0.81	1.00	0.85	0.93	0.90	0.98	1.00	0.84	0.73	0.89
	45	0.96	1.00	0.90	0.62	0.87	1.00	0.81	0.98	0.91	0.92	1.00	0.80	0.98	0.90	0.92
	46	0.80	1.00	0.84	0.93	0.89	0.81	1.00	0.85	0.93	0.90	0.59	0.70	1.00	0.74	0.76
	47	0.84	0.65	1.00	0.61	0.78	1.00	0.81	0.98	0.91	0.92	0.67	0.65	1.00	0.74	0.76
	48	0.80	1.00	0.84	0.93	0.89	0.81	1.00	0.85	0.93	0.90	0.98	1.00	0.85	0.73	0.89
	49	0.96	1.00	0.90	0.63	0.87	1.00	0.81	0.98	0.91	0.92	1.00	0.80	0.98	0.90	0.92
	50	0.68	0.68	1.00	0.80	0.79	0.81	1.00	0.85	0.93	0.90	0.60	0.70	1.00	0.74	0.76

Fähigkeitsorientiert				Zeitorientiert			REFA			
	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	Ausbringungs- menge	Zuwachsrate	Fähigkeitsent- wicklung	
Zyklus	1	0.0105	-	64.46	0.0101	-	64.16	0.0101	-	76.06
	2	0.0141	1.34	7.24	0.0150	1.48	7.37	0.0114	1.13	7.42
	3	0.0119	0.85	3.45	0.0147	0.98	3.51	0.0119	1.04	3.85
	4	0.0146	1.22	2.30	0.0161	1.10	2.16	0.0127	1.06	2.50
	5	0.0152	1.05	1.59	0.0160	0.99	1.65	0.0159	1.25	1.67
	6	0.0162	1.06	1.33	0.0166	1.04	1.26	0.0130	0.82	1.33
	7	0.0135	0.83	1.07	0.0167	1.00	1.06	0.0132	1.01	1.09
	8	0.0158	1.17	0.87	0.0169	1.02	0.87	0.0135	1.02	0.94
	9	0.0134	0.85	0.80	0.0171	1.01	0.77	0.0169	1.25	0.77
	10	0.0170	1.27	0.66	0.0172	1.00	0.66	0.0137	0.81	0.68
	11	0.0171	1.01	0.60	0.0175	1.02	0.60	0.0137	1.01	0.60
	12	0.0142	0.83	0.54	0.0174	0.99	0.53	0.0172	1.25	0.55
	13	0.0164	1.15	0.48	0.0177	1.02	0.49	0.0174	1.01	0.48
	14	0.0139	0.85	0.45	0.0175	0.99	0.44	0.0140	0.81	0.44
	15	0.0174	1.25	0.41	0.0179	1.02	0.41	0.0141	1.00	0.40
	16	0.0164	0.95	0.38	0.0176	0.99	0.37	0.0142	1.00	0.38
	17	0.0146	0.89	0.35	0.0180	1.02	0.35	0.0177	1.25	0.34
	18	0.0178	1.22	0.33	0.0178	0.98	0.32	0.0142	0.81	0.32
	19	0.0143	0.80	0.32	0.0182	1.02	0.31	0.0143	1.00	0.30
	20	0.0169	1.19	0.28	0.0179	0.98	0.29	0.0176	1.23	0.29
	21	0.0167	0.98	0.26	0.0183	1.02	0.27	0.0145	0.82	0.26
	22	0.0145	0.87	0.27	0.0179	0.98	0.26	0.0180	1.25	0.25
	23	0.0178	1.23	0.24	0.0184	1.02	0.24	0.0145	0.81	0.24
	24	0.0168	0.94	0.23	0.0180	0.98	0.23	0.0178	1.23	0.23
	25	0.0150	0.90	0.22	0.0185	1.02	0.22	0.0181	1.02	0.21
	26	0.0169	1.12	0.20	0.0181	0.98	0.21	0.0147	0.81	0.20
	27	0.0152	0.90	0.20	0.0185	1.02	0.20	0.0147	1.00	0.19
	28	0.0147	0.97	0.20	0.0182	0.98	0.19	0.0180	1.22	0.19
	29	0.0180	1.22	0.18	0.0186	1.02	0.18	0.0183	1.02	0.17
	30	0.0183	1.02	0.18	0.0182	0.98	0.18	0.0148	0.81	0.17
	31	0.0170	0.93	0.17	0.0187	1.02	0.17	0.0148	1.00	0.16
	32	0.0148	0.87	0.17	0.0183	0.98	0.16	0.0181	1.22	0.16
	33	0.0176	1.19	0.15	0.0187	1.03	0.16	0.0184	1.02	0.15
	34	0.0171	0.97	0.15	0.0183	0.98	0.15	0.0149	0.81	0.15
	35	0.0155	0.91	0.15	0.0188	1.03	0.15	0.0150	1.00	0.14
	36	0.0182	1.18	0.14	0.0184	0.98	0.14	0.0182	1.21	0.14
	37	0.0171	0.94	0.14	0.0188	1.03	0.14	0.0185	1.02	0.13
	38	0.0182	1.06	0.13	0.0184	0.98	0.13	0.0151	0.81	0.13
	39	0.0150	0.82	0.13	0.0189	1.03	0.13	0.0151	1.00	0.12
	40	0.0186	1.24	0.12	0.0185	0.98	0.13	0.0183	1.21	0.12
	41	0.0179	0.96	0.12	0.0189	1.03	0.12	0.0186	1.02	0.11
	42	0.0157	0.88	0.12	0.0185	0.98	0.12	0.0152	0.81	0.11
	43	0.0179	1.14	0.11	0.0190	1.03	0.11	0.0152	1.00	0.11
	44	0.0151	0.84	0.11	0.0185	0.98	0.11	0.0183	1.21	0.11
	45	0.0173	1.14	0.11	0.0190	1.03	0.11	0.0187	1.02	0.10
	46	0.0184	1.06	0.10	0.0186	0.98	0.11	0.0152	0.82	0.10
	47	0.0152	0.83	0.10	0.0190	1.03	0.10	0.0153	1.00	0.10
	48	0.0184	1.21	0.10	0.0186	0.98	0.10	0.0184	1.21	0.10
	49	0.0173	0.94	0.10	0.0191	1.03	0.10	0.0188	1.02	0.09
	50	0.0158	0.91	0.09	0.0186	0.98	0.10	0.0153	0.82	0.09

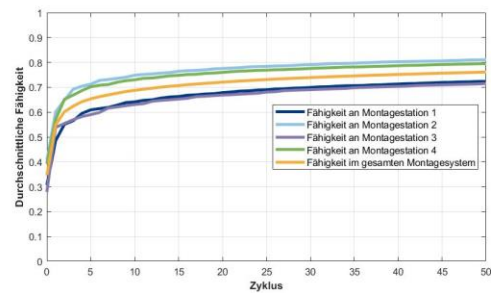
Fähigkeitsentwicklung

Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung

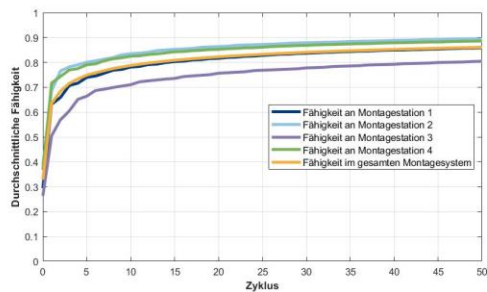
Mitarbeiter 1



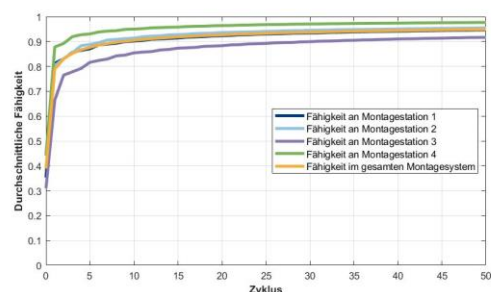
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3

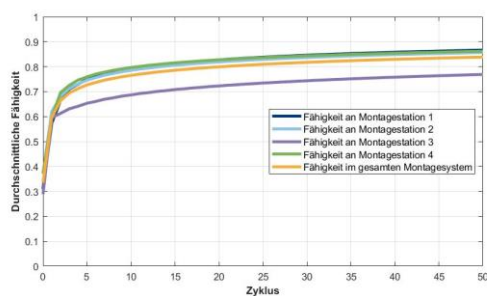


Mitarbeiter 4

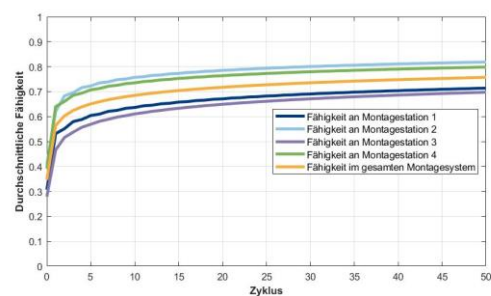


Zeitorientierte Aufgabenzuordnung

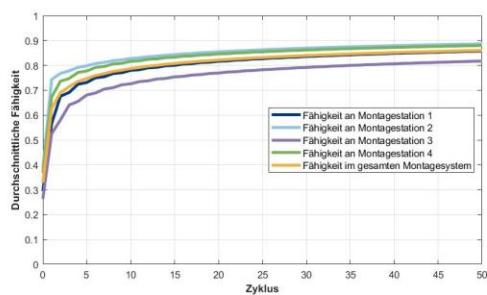
Mitarbeiter 1



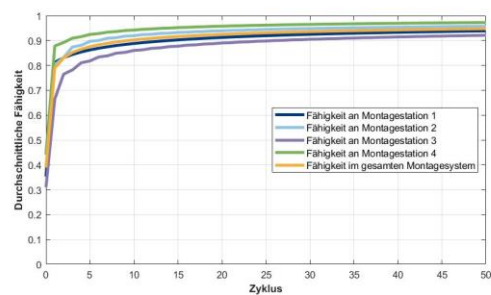
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3

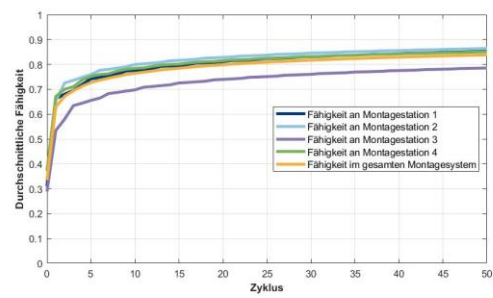


Mitarbeiter 4

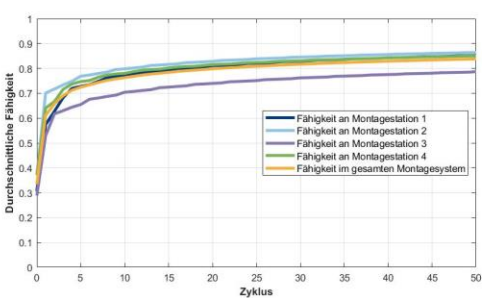


MTM-basierte Aufgabenzuordnung

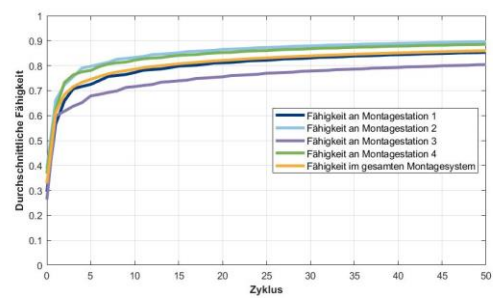
Mitarbeiter 1



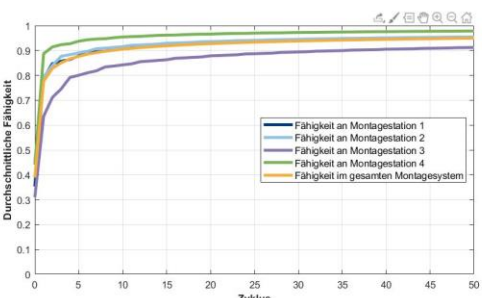
Mitarbeiter 2



Mitarbeiter 3



Mitarbeiter 4



A10 Bewertung innerhalb des Experteninterviews

Experte 1

Tabelle A-7: Ergebnisse Experteninterview Experte 1

	Geringes Potenzial			Hohes Potenzial	
1. Bessere Kapazitätsauslastung	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
2. Langfristige Verbesserung der Produktionsergebnisse	☐	☐	☒	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Bessere Kalkulationsbasis	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
4. Höhere Motivation.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Höhere Produktivität	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5

Experte 2

Tabelle A-8: Ergebnisse Experteninterview Experte 2

	Geringes Potenzial			Hohes Potenzial	
1. Bessere Kapazitätsauslastung	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
2. Langfristige Verbesserung der Produktionsergebnisse	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Bessere Kalkulationsbasis	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
4. Höhere Motivation.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Höhere Produktivität	☐	☐	☒	☒	☐
	1	2	3	4	5

Experte 3*Tabelle A-9: Ergebnisse Experteninterview Experte 3*

	Geringes Potenzial			Hohes Potenzial	
1. Bessere Kapazitätsauslastung	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
2. Langfristige Verbesserung der Produktionsergebnisse	☐	☐	☒	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Bessere Kalkulationsbasis	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
4. Höhere Motivation.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
5. Höhere Produktivität	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5

Experte 4*Tabelle A-10: Ergebnisse Experteninterview Experte 4*

	Geringes Potenzial			Hohes Potenzial	
1. Bessere Kapazitätsauslastung	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
2. Langfristige Verbesserung der Produktionsergebnisse	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Bessere Kalkulationsbasis	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
4. Höhere Motivation.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Höhere Produktivität	☐	☐	☒	☐	☐
	1	2	3	4	5

A11 User Test: Ausgefüllte Fragebögen

User 1

Tabelle A-11: Ergebnisse SUS-Fragebogen User 1

	Stimme überhaupt nichz zu			Stimme voll zu	
1. In denke, dass ich die App gerne häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
2. Ich fand die App unnötig komplex.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Ich fand die App einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer sachkundigen Person benötigen, um die App benutzen zu können.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in der App waren gut eingebunden.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
6. Ich denke, die App ist in vielen Punkten noch nicht ausgereift.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	4	4	5
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit der App sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
8. Ich fand die App sehr umständlich zu nutzen.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der App sehr sicher.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die App zu verwenden.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5

User 2*Tabelle A-12: Ergebnisse SUS-Fragebogen User 2*

	Stimme überhaupt nicht zu			Stimme voll zu	
1. In denke, dass ich die App gerne häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
2. Ich fand die App unnötig komplex.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Ich fand die App einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer sachkundigen Person benötigen, um die App benutzen zu können.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in der App waren gut eingebunden.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
6. Ich denke, die App ist in vielen Punkten noch nicht ausgereift.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	4	4	5
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit der App sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
8. Ich fand die App sehr umständlich zu nutzen.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der App sehr sicher.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die App zu verwenden.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5

User 3*Tabelle A-13: Ergebnisse SUS-Fragebogen User 3*

	Stimme überhaupt nicht zu			Stimme voll zu	
1. In denke, dass ich die App gerne häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
2. Ich fand die App unnötig komplex.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Ich fand die App einfach zu benutzen.	☐	☐	☒	☐	☐
	1	2	3	4	5
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer sachkundigen Person benötigen, um die App benutzen zu können.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in der App waren gut eingebunden.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
6. Ich denke, die App ist in vielen Punkten noch nicht ausgereift.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	4	4	5
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit der App sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
8. Ich fand die App sehr umständlich zu nutzen.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der App sehr sicher.	☐	☐	☒	☐	☐
	1	2	3	4	5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die App zu verwenden.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5

User 4*Tabelle A-14: Ergebnisse SUS-Fragebogen User 4*

	Stimme überhaupt nicht zu			Stimme voll zu	
1. Ich denke, dass ich die App gerne häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
2. Ich fand die App unnötig komplex.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Ich fand die App einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer sachkundigen Person benötigen, um die App benutzen zu können.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in der App waren gut eingebunden.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
6. Ich denke, die App ist in vielen Punkten noch nicht ausgereift.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	4	4	5
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit der App sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
8. Ich fand die App sehr umständlich zu nutzen.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der App sehr sicher.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die App zu verwenden.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5

User 5*Tabelle A-15: Ergebnisse SUS-Fragebogen User 5*

	Stimme überhaupt nicht zu			Stimme voll zu	
1. In denke, dass ich die App gerne häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
2. Ich fand die App unnötig komplex.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Ich fand die App einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer sachkundigen Person benötigen, um die App benutzen zu können.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in der App waren gut eingebunden.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
6. Ich denke, die App ist in vielen Punkten noch nicht ausgereift.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	4	4	5
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit der App sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
8. Ich fand die App sehr umständlich zu nutzen.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der App sehr sicher.	☐	☐	☒	☐	☐
	1	2	3	4	5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die App zu verwenden.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5

User 6*Tabelle A-16: Ergebnisse SUS-Fragebogen User 6*

	Stimme überhaupt nicht zu			Stimme voll zu	
1. In denke, dass ich die App gerne häufig benutzen würde.	☐	☐	☒	☐	☐
	1	2	3	4	5
2. Ich fand die App unnötig komplex.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
3. Ich fand die App einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer sachkundigen Person benötigen, um die App benutzen zu können.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in der App waren gut eingebunden.	☐	☐	☒	☐	☐
	1	2	3	4	5
6. Ich denke, die App ist in vielen Punkten noch nicht ausgereift.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	4	4	5
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit der App sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
8. Ich fand die App sehr umständlich zu nutzen.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der App sehr sicher.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die App zu verwenden.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5

User 7*Tabelle A-17: Ergebnisse SUS-Fragebogen User 7*

	Stimme überhaupt nicht zu			Stimme voll zu	
1. In denke, dass ich die App gerne häufig benutzen würde.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
2. Ich fand die App unnötig komplex.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
3. Ich fand die App einfach zu benutzen.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer sachkundigen Person benötigen, um die App benutzen zu können.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in der App waren gut eingebunden.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
6. Ich denke, die App ist in vielen Punkten noch nicht ausgereift.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	4	4	5
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit der App sehr schnell lernen.	☐	☐	☐	☐	☒
	1	2	3	4	5
8. Ich fand die App sehr umständlich zu nutzen.	☐	☒	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der App sehr sicher.	☐	☐	☐	☒	☐
	1	2	3	4	5
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die App zu verwenden.	☒	☐	☐	☐	☐
	1	2	3	4	5

Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten

In Ergänzung zu meinem Antrag auf Zulassung zur Promotion in der Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn erkläre ich gemäß §11 der Promotionsordnung und unter Beachtung der Regelung zur Zitation studentischer Arbeiten:

Die von mir vorgelegte Dissertation habe ich selbstständig verfasst, und ich habe keine anderen als die dort angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Es sind Inhalte studentischen Ursprungs (studentische Arbeiten) in dieser Dissertation enthalten.

Ich habe die verwendeten Arbeiten entsprechend der Regelung „Zitation aus studentischen Arbeiten in Dissertationen“ zitiert.

Münster, 24.10.2023

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Daniel Roesmann
Anschrift	Von-der-Tinnen-Straße 28, 48145 Münster
Geburtsdatum	01.06.1992
Geburtsort	Münster
Staatsangehörigkeit	deutsch

Schulbildung

08/1998 – 07/2002	Kreuzschule, Münster
08/2002 – 07/2011	Schillergymnasium, Münster

Studium

10/2011 – 04/2015	Fachhochschule Münster Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen (Bachelor) Studienrichtung Maschinenbau <i>Abschluss: Bachelor of Science (B.Sc.)</i>
03/2016 – 07/2016	Qingdao University of Science and Technology, China
02/2017 – 07/2017	<i>Auslandssemester</i>
04/2015 – 09/2018	Universität Paderborn Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen (Master) Studienrichtung Maschinenbau <i>Abschluss: Master of Science (M.Sc.)</i>

Beruflicher Werdegang

04/2014 – 10/2014	Praktikant & Bachelorand Schaeffler Technologies
04/2023 – 07/2023	Forschungs- und Lehraufenthalt Qingdao University of Science and Technology, China
10/2018 – 09/2023	Wissenschaftlicher Mitarbeiter Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn Lehrstuhl für Produktentstehung Prof. Dr.-Ing. I. Gräßler

Münster, der 24.10.2023

Daniel Roesmann

Publikationsliste

- [GPT+19] GRÄßLER, I.; POTTEBAUM, J.; TAPLICK, P.; ROESMANN, D.; PREUß, D.: Unterstützung des Lernens für kritische Situationen: Potenzial von Augmented Reality für die Instandsetzung auf See. In: Lukas U.; Bauer K.; Dolereit T. (Hrsg.): Go-3D 2019 “Mit 3D Richtung Maritim 4.0” - Tagungsband zur Konferenz Go-3D 2019. Fraunhofer Verlag; 2019:45-57.
- [GBP+20] GRÄßLER, I.; BODDEN, E.; POTTEBAUM, J.; GEISMANN, J.; ROESMANN, D.: Security-Oriented Fault-Tolerance in Systems Engineering: A Conceptual Threat Modelling Approach for Cyber-Physical Production Systems. In: Advanced, Contemporary Control, Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol 1196. Springer International Publishing; 2020:1458-1469.
- [GRP20] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Entwicklung eines Prüfstands für die Bewertung von kompetenzbildenden Assistenzsystemen in Cyber-physischen Produktionssystemen. In: Frühjahrskongress 2020 - Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch?; 16. - 18. Mrz. 2020. Berlin: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V., Dortmund; 2020: B.6.4.
- [GPT+20] GRÄßLER, I.; POTTEBAUM, J.; TAPLICK, P.; ROESMANN, D.; KAMANN, M.: Produktdatenbasiertes, arbeitsgebundenes Lernen für und mit Augmented Reality in der Instandhaltung. In: Frühjahrskongress 2020 - Digitaler Wandel, digitale Arbeit, digitaler Mensch?; 16. - 18. Mrz. 2020. Berlin: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e. V., Dortmund; 2020: B.2.2.
- [GRP20] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Traceable learning effects by use of digital adaptive assistance in production. In: Procedia Manufacturing - Proceedings of the 10th Conference on Learning Factories, CLF2020, Vol 45. Graz, Austria: Elsevier; 2020:479-484.
- [GRP20] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Model based Integration of Human Characteristics in Production Systems: A Literature Survey. In: 14th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering; 15. - 17. Jul. 2020. Elsevier B. V.; 2020:57-62.
- [GHR21] GRÄßLER, I.; HILLEBRAND, S.; ROESMANN, D.: Design Review of Assembly Workstations using Virtual Prototypes. In: ETI - The European Technology Institute; 2021:29-36.
- [GRH+22] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; Hillebrand, S.; Pottebaum, J.: Information Model for Hybrid Prototyping in Design Reviews of Assembly Stations. In: Procedia CIRP ICME 20222, Vol 112, Gulf of Naples: Elsevier; 2022:489-494.
- [GMH+21] GÜRTLER, M.; MANDISCHER, N.; HÜSING, M.; CORVES, B.; POTTEBAUM, J.; ROESMANN, D.; GRÄßLER, I.: Ein reaktiver Modellierungsansatz für Mensch-Roboter-Kollaboration in Rettungs- und Brandszenarien der Feuerwehr. In 7. IFToMM D-A-CH Konferenz 2021. Universität Duisburg-Essen: DuEPublico2 Duisburg-Essen Publications online.
- [GRC+21] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; CAPPELLO, C.; STEFFEN, E.: Skill-based worker assignment in a manual assembly line. In: Lutters, E. (Hrsg.): Procedia CIRP Design. Elsevier; 2021:433-438.

- [GRW21] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; WIECHEL, D.; PREUß, D.; POTTEBAUM, J.: Determine similarity of assembly operations using semantic technology. In: 54th CIRP Conference on Manufacturing Systems; Elsevier; 2021:1245-1250.
- [GWR21] GRÄßLER, I.; WIECHEL, D.; ROESMANN, D.: Integrating human factors in the model based development of cyber-physical production systems. In: Procedia CIRP Design. Elsevier; 2021:518-523.
- [GWR+21] GRÄßLER, I.; WIECHEL, D.; ROESMANN, D.; THIELE, H.: V-model based development of cyber-physical systems and cyber-physical production systems. In: LUTTERS, E. (Hrsg.): Procedia CIRP Design; 2021:253-258.
- [GPR+21] GRÄßLER, I.; POTTEBAUM, J.; ROESMANN, D.; MANDISCHER, N.; GÜRTLER, M.; HÜSING, M.; CORVES, B.: Fähigkeitsorientierte Aufgabenzuordnung für die Mensch-Roboter-Kollaboration in sicherheitskritischen Einsatzsituationen. In WIENRICH, C.; WINTERSBERGER, P.; WEYERS, B.; (Hrsg.), Mensch und Computer 2021 - Workshopband.
- [GRP22] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.; CORVES, B.; MANDISCHER, N.; GÜRTLER, M.: Mensch-Tracking zur Identifizierung des Voranschreitens von Roboterunterstützten Rettungseinsätzen der Feuerwehr. In: Tagungsband der VDI Mechatronik; 2022:151-156.
- [GHR+23] GRÄßLER, I.; HIEB, M.; ROESMANN, D.; UNVERZAGT, M.: Creating Synthetic Training Data for Machine Vision Quality Gates. n: V. Lohweg (Ed.), Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2023: 95–106.
- [GHR22] GRÄßLER, I.; HIEB, M.; ROESMANN, D.: Gestaltung einer Forschungsinfrastruktur für die Anwendung digitaler Werkzeuge in Cyber-Physischen Produktionssystemen. In: Automation 2022. VDI Verlag; 2022: 667-678.
- [GRP23] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.: Human Factors in der integrierten Produktentwicklung. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 118, 2023: 149-152.
- [GHR+23] GRÄßLER, I.; HIEB, M.; ROESMANN, D.; POTTEBAUM, J.; UNVERZAGT, M.: Virtual learning environment for teaching the handling of collaborative robots. In: 12th Conference on Learning Factories, SSRN, 2023:1-6.
- [GRU+23] GRÄßLER, I.; ROESMANN, D.; UNVERZAGT, M.; POTTEBAUM, J.: Virtual Test Scenarios for Human-Centered Design with Virtual Measurement Systems. In: Schmid, U.; Heizmann, M.; Sommer, K.-D.: Sensor and Measurement Science International, 2023: 416-417.
- [WRE+23] WELLER, J.; ROESMANN, D.; EGGERT, S.; VON ENZBERG, S.; GRÄßLER, I.; DUMITRESCU, R.: Identification and prediction of standard times in machining for precision steel tubes through the usage of data analytics. In: Procedia CIRP, 2023: 514-520.
- [GSM+23] GRÄßLER, I.; STEFFEN, E.; MAIER, G.W.; ROESMANN, D.: Introduction – The Digital Twin of Humans. In: GRÄßLER, I.; MAIER, G.W.; STEFFEN, E.; ROESMANN, D.: The Digital Twin of Humans. An Interdisciplinary Concept of Digital Working Environments in Industry 4.0, Springer Springer International Publishing, 2023: 3-10.

- [RG23] ROESMANN, D.; GRÄßLER, I: Integration of Human Factors for Assembly Systems of the Future. In: GRÄßLER, I.; MAIER, G.W.; STEFFEN, E.; ROESMANN, D.: The Digital Twin of Humans. An Interdisciplinary Concept of Digital Working Environments in Industry 4.0, Springer International Publishing, Cham, 2023: 187-203.

Das Heinz Nixdorf Institut – Interdisziplinäres Forschungszentrum für Informatik und Technik

Das Heinz Nixdorf Institut ist ein Forschungszentrum der Universität Paderborn. Es entstand 1987 aus der Initiative und mit Förderung von Heinz Nixdorf. Damit wollte er Ingenieurwissenschaften und Informatik zusammenführen, um wesentliche Impulse für neue Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen. Dies schließt auch die Wechselwirkungen mit dem gesellschaftlichen Umfeld ein.

Die Forschungsarbeit orientiert sich an dem Programm „Dynamik, Mobilität, Vernetzung: Eine neue Schule des Entwurfs der technischen Systeme von morgen“. In der Lehre engagiert sich das Heinz Nixdorf Institut in Studiengängen der Informatik, der Ingenieurwissenschaften und der Wirtschaftswissenschaften.

Heute wirken am Heinz Nixdorf Institut acht Professoren mit insgesamt 120 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Pro Jahr promovieren hier etwa 15 Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

Heinz Nixdorf Institute – Interdisciplinary Research Centre for Computer Science and Technology

The Heinz Nixdorf Institute is a research centre within the Paderborn University. It was founded in 1987 initiated and supported by Heinz Nixdorf. By doing so he wanted to create a symbiosis of computer science and engineering in order to provide critical impetus for new products and services. This includes interactions with the social environment.

Our research is aligned with the program “Dynamics, Mobility, Integration: Enroute to the technical systems of tomorrow.” In training and education the Heinz Nixdorf Institute is involved in many programs of study at the University of Paderborn. The superior goal in education and training is to communicate competencies that are critical in tomorrow's economy.

Today eight Professors and 120 researchers work at the Heinz Nixdorf Institute. Per year approximately 15 young researchers receive a doctorate.

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 393 ECHTERFELD, J.: Systematik zur Digitalisierung von Produktprogrammen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 393, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-12-5
- Bd. 394 LOCHBICHLER, M.: Systematische Wahl einer Modellierungstiefe im Entwurfsprozess mechatronischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 394, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-13-2
- Bd. 395 LUKEI, M.: Systematik zur integrativen Entwicklung von mechatronischen Produkten und deren Prüfmittel. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 395, Paderborn, 2020 – ISBN 978-3-947647-14-9
- Bd. 396 KOHLSTEDT, A.: Modellbasierte Synthese einer hybriden Kraft-/Positionsregelung für einen Fahrzeugachsprüfstand mit hydraulischem Hexapod. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 396, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-15-6
- Bd. 397 DREWEL, M.: Systematik zum Einstieg in die Plattformökonomie. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 397, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-16-3
- Bd. 398 FRANK, M.: Systematik zur Planung des organisationalen Wandels zum Smart Service-Anbieter. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 398, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-17-0
- Bd. 399 KOLDEWEY, C.: Systematik zur Entwicklung von Smart Service-Strategien im produzierenden Gewerbe. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 399, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-18-7
- Bd. 400 GAUSEMEIER, J. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 16. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 2. und 3. Dezember 2021, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 400, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-19-4
- Bd. 401 BRETZ, L.: Rahmenwerk zur Planung und Einführung von Systems Engineering und Model-Based Systems Engineering. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 401, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-20-0
- Bd. 402 WU, L.: Ultrabreitbandige Sampler in SiGe-BiCMOS-Technologie für Analog-Digital-Wandler mit zeitversetzter Abtastung. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 402, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-21-7
- Bd. 403 HILLEBRAND, M.: Entwicklungssystematik zur Integration von Eigenschaften der Selbstheilung in Intelligente Technische Systeme. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 403, Paderborn, 2021 – ISBN 978-3-947647-22-4
- Bd. 404 OLMA, S.: Systemtheorie von Hardware-in-the-Loop-Simulationen mit Anwendung auf einem Fahrzeugachsprüfstand mit parallelkinematischem Lastsimulator. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 404, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-23-1
- Bd. 405 FECHTELPETER, C.: Rahmenwerk zur Gestaltung des Technologietransfers in mittelständisch geprägten Innovationsclustern. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 405, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-24-8

Zuletzt erschienene Bände der Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts

- Bd. 406 OLEFF, C.: Proaktives Management von Anforderungsänderungen in der Entwicklung komplexer technischer Systeme. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 406, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-25-5
- Bd. 407 JAVED, A. R.: Mixed-Signal Baseband Circuit Design for High Data Rate Wireless Communication in Bulk CMOS and SiGe BiCMOS Technologies. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 407, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-26-2
- Bd. 408 DUMITRESCU, R., KOLDEWEY, C.: Daten-gestützte Projektplanung. Fachbuch. Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 408, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-27-9
- Bd. 409 PÖHLER, A.: Automatisierte dezentrale Produktionssteuerung für cyber-physische Produktionssysteme mit digitaler Repräsentation der Beschäftigten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 409, Paderborn, 2022 – ISBN 978-3-947647-28-6
- Bd. 410 RÜDDENKLAU, N.: Hardware-in-the-Loop-Simulation von HD-Scheinwerfer-Steuergeräten zur Entwicklung von Lichtfunktionen in virtuellen Nachtfahrten. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 410, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-29-3
- Bd. 411 BIEMELT, P.: Entwurf und Analyse modell-prädiktiver Regelungsansätze zur Steigerung des Immersionsempfindens in inter-aktiven Fahrsimulationen. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 411, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-30-9
- Bd. 412 HAAKE, C.-J., MEYER AUF DER HEIDE, F., PLATZNER, M., WACHSMUTH, H., WEHRHEIM, H. (Eds.): On-The-Fly Computing - Individualized IT-Services in dynamic markets, Collaborative Research Centre 901 (2011 - 2023), Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 412, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-31-6
- Bd. 413 DUMITRESCU, R.; HÖLZLE, K. (Hrsg.): Vorausschau und Technologieplanung. 17. Symposium für Vorausschau und Technologieplanung, Heinz Nixdorf Institut, 14./15. September 2023, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 413, Paderborn, 2023 – ISBN 978-3-947647-32-3
- Bd. 414 ABUGHANNAM, S.: Low-power Direct-detection Wake-up Receiver at 2.44 GHz for Wireless Sensor Networks. Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 414, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-33-0
- Bd. 415 REINHOLD, J.: Systematik zur muster-basierten Transformation von Wertschöpfungssystemen für Smart Services. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 415, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-34-7
- Bd. 416 YANG, X.: Eine Methode zur Unterstüt-zung von Entscheidungen bei der Ent-wicklung modularer Leichtbauprodukte. Dissertation, Fakultät für Maschinenbau, Universität Paderborn, Verlagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Instituts, Band 416, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-35-4
- Bd. 417 GRÄLER, M.: Entwicklung adaptiver Ein-richtassistenzsysteme für Produktions-prozesse. Dissertation, Fakultät für Ma-schinenbau, Universität Paderborn, Ver-lagsschriftenreihe des Heinz Nixdorf Insti-tuts, Band 417, Paderborn, 2024 – ISBN 978-3-947647-36-1

