

Beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personal- einsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage

Barbara Christina Tropschuh

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen
Universität München zur Erlangung einer

Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr. Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Die Dissertation wurde am 26.09.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die TUM School of Engineering and Design am 29.01.2024 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist in Zeiten globaler Herausforderungen, wie der Klimakrise, dem Mobilitätswandel und der Überalterung der Gesellschaft in westlichen Ländern, für eine nachhaltige Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Der Einfluss eines Industriebetriebs auf die Umwelt und die Gesellschaft hängt dabei entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen. Dabei muss größtes Augenmerk darauf gelegt werden, möglichst ressourcenschonend, effizient und resilient zu werden, um flexibel im volatilen Produktionsumfeld zu agieren.

Um in dem Spannungsfeld Nachhaltigkeit, Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des iwb ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen, Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Personals sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei eingesetzten rechnergestützten und Künstliche-Intelligenz-basierten Methoden und die notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades dürfen jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung ökologischer und sozialer Aspekte in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iwb. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den iwb-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Rüdiger Daub

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM).

Herrn Professor Dr.-Ing. Gunther Reinhart gilt mein besonderer Dank für seine hervorragende Betreuung als Doktorvater, sein fortwährendes Vertrauen und seine hilfsbereiten, richtungsweisenden Impulse. Die Unterstützung habe ich sehr geschätzt. Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Zäh danke ich sehr für die wohlwollende Unterstützung, die wertvollen Diskussionen sowie für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Professor Dr.-Ing. Johannes Fottner danke ich für die Übernahme des Koreferats und die Durchsicht meiner Arbeit. Darüber hinaus danke ich Professor Julien Cegarra für die hilfreichen Anmerkungen und Diskussionen zum Thema Kognition und Psychologie während meines Forschungsaufenthalts am Institut National Universitaire Champollion, Frankreich.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am *iwb*, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Sie alle haben dazu beigetragen, dass diese Zeit für mich zu einem unvergesslichen und prägenden Lebensabschnitt wurde. Insbesondere die fachlichen Diskussionen, die Teamarbeit und die gemeinsamen Erlebnisse auf Dienstreisen oder Teamausflügen werden mir sehr gut in Erinnerung bleiben. Mein besonderer Dank gilt Fabian Dillinger, Svenja Korder, Fabian Sippl, Olivia Bernhard, Susanne Vernim und Severin Teubner für ihre grenzenlose Unterstützung, kritische Reflexion und zahlreiche schöne Momente. Ich freue mich sehr, dass aus Kollegen so gute Freunde geworden sind!

Auch allen Studierenden möchte ich danken, die mich mit wertvollen fachlichen Beiträgen unterstützt haben.

Von Herzen danke ich meinen Eltern und meinen beiden Schwestern für ihren grenzenlosen Rückhalt und die fortwährende Unterstützung vor, während und nach der Promotionszeit. Ein besonderer Dank geht an meinen zukünftigen Ehemann Stefan für seine aufmunternden und motivierenden Worte, sein endloses Verständnis, die zahlreichen fachlichen Diskussionen und die liebevolle Unterstützung!

München, April 2024

Barbara Tropschuh

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abkürzungsverzeichnis..... | V |
| Verzeichnis der Formelzeichen | IX |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 1.1 Ausgangssituation..... | 1 |
| 1.2 Problemstellung..... | 3 |
| 1.3 Zielsetzung und Betrachtungsrahmen | 5 |
| 1.4 Wissenschaftliches Vorgehen..... | 6 |
| 1.4.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung..... | 6 |
| 1.4.2 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit..... | 8 |
| 2 Grundlagen | 11 |
| 2.1 Manuelle Montage..... | 11 |
| 2.1.1 Charakteristika..... | 12 |
| 2.1.2 Arbeitssystem..... | 17 |
| 2.2 Arbeitsplätze und Mitarbeitende..... | 20 |
| 2.2.1 Anforderungsarten | 20 |
| 2.2.2 Kompetenzen | 22 |
| 2.3 Belastung und Beanspruchung | 25 |
| 2.3.1 Konzept | 25 |
| 2.3.2 Messverfahren..... | 29 |
| 2.4 Personaleinsatzplanung..... | 36 |
| 2.4.1 Einordnung | 36 |
| 2.4.2 Organisationsformen | 38 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3 | Stand der Erkenntnisse | 41 |
| 3.1 | Bewertungskriterien..... | 41 |
| 3.2 | Ansätze der Personaleinsatzplanung..... | 43 |
| 3.2.1 | Belastungs- und kompetenzorientierte Ansätze | 44 |
| 3.2.2 | Beanspruchungs- und kompetenzorientierte Ansätze | 49 |
| 3.3 | Handlungsbedarf | 53 |
| 4 | Überblick über die Methode | 59 |
| 4.1 | Anforderungen an die Methode | 59 |
| 4.1.1 | Allgemeine Anforderungen | 60 |
| 4.1.2 | Anwendungsbezogene Anforderungen..... | 61 |
| 4.1.3 | Inhaltliche Anforderungen | 62 |
| 4.2 | Konzeption der Methode | 63 |
| 5 | Entwicklung der Methode | 65 |
| 5.1 | Baustein 1 Beschreibung und Vergleich von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden..... | 65 |
| 5.1.1 | Systemmodell zur Beschreibung des menschorientierten Arbeitssystems | 66 |
| 5.1.2 | Profile zum Vergleich der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Eigenschaften. | 71 |
| 5.1.3 | Zusammenfassung Baustein 1 | 80 |
| 5.2 | Baustein 2 Messung und Prognose von Beanspruchung..... | 80 |
| 5.2.1 | Methodenbaukasten zur Messung der Beanspruchung..... | 81 |
| 5.2.2 | Prädiktionsmodell zur Prognose der Beanspruchung | 94 |
| 5.2.3 | Zusammenfassung Baustein 2 | 103 |
| 5.3 | Baustein 3 Generierung und Kommunikation von Personaleinsatzplänen | 104 |
| 5.3.1 | Rotationslogik zur Generierung von Personaleinsatzplänen..... | 104 |
| 5.3.2 | Interaktionsschnittstellen zur Kommunikation der Personaleinsatzpläne.. | 110 |
| 5.3.3 | Zusammenfassung Baustein 3 | 116 |
| 5.4 | Zusammenfassung der Methodenentwicklung..... | 116 |
| 6 | Umsetzung der Methode | 119 |
| 6.1 | Industriennahe Anwendung | 119 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.1.1 | Überblick über die Anwendungsmethode | 119 |
| 6.1.2 | Anwendung der Methode in der manuellen taktgebundenen Montage..... | 121 |
| 6.2 | Prototypische Implementierung..... | 123 |
| 6.2.1 | Profilvergleichsverfahren | 123 |
| 6.2.2 | Planungs-Tool..... | 128 |
| 6.2.3 | Werkenden-Applikation..... | 133 |
| 7 | Evaluation der Methode..... | 143 |
| 7.1 | Validierung der gestellten Anforderungen..... | 143 |
| 7.2 | Bewertung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses | 149 |
| 7.3 | Limitationen | 156 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 161 |
| 8.1 | Zusammenfassung | 161 |
| 8.2 | Ausblick | 163 |
| | Literaturverzeichnis | 165 |
| | Vorveröffentlichungsverzeichnis..... | 205 |
| | Studienarbeitsverzeichnis | 209 |
| | Anhang..... | 211 |
| A. | Ergänzendes Material zum Stand der Erkenntnisse | 211 |
| B. | Ergänzendes Material zu Befragung der Experten und Expertinnen..... | 213 |
| C. | Ergänzendes Material zu Baustein 1..... | 213 |
| D. | Ergänzendes Material zu Baustein 2..... | 217 |
| E. | Ergänzendes Material zu Baustein 3..... | 232 |
| F. | Ergänzendes Material zur prototypischen Implementierung..... | 233 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------|--|
| AK | Aktivitäts- und Handlungskompetenz |
| AP | Arbeitsplatz |
| BASA-II | Psychologische Bewertung von Arbeitsbedingungen – Screening für Arbeitsplatzinhaber II |
| BeKoMi | Beanspruchungs- und kompetenzorientierte Mitarbeitereinsatzplanung |
| BEQR | Balanced Ergonomic Qualification Preserving Job Rotation (dt.: ausgewogene, qualifikationserhaltende Job-Rotations-Methode) |
| BI | Biotality Index (dt.: Biotalität-Index) |
| DAK | Deutsche Angestellten-Krankenkasse |
| DIN | Deutsches Institut für Normung e. V. |
| DRM | Design Research Methodology |
| EAWS | Ergonomic Assessment Worksheet (dt.: Arbeitsblatt zur ergonomischen Bewertung) |
| EEG | Elektroenzephalographie |
| EMG | Elektromyographie |
| FF | Forschungsfrage |
| FK | Fach- und Methodenkompetenz |
| FTS | Fahrerloses Transportsystem |
| HR | Herzrate |
| HRV | Herzratenvariabilität |
| ICC | Intraklassen-Korrelationskoeffizient |
| ISA | Instantaneous Self Assessments (dt.: sofortige Selbsteinschätzungen) |
| IT | Informationstechnologie |
| <i>iwb</i> | Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften |

| | |
|-----------|---|
| KPB | Kompaktverfahren Psychische Belastung |
| LMM | Leitmerkmalmethode |
| LoA | Limits of Agreement (dt.: Grenzen der Vereinbarung) |
| logLik | LogLikelihood-Funktion |
| MA | Mitarbeiter:in |
| MAN | MAN Truck & Bus SE |
| MSE | Muskel-Skelett-Erkrankungen |
| NASA-RTLX | National Aeronautics and Space Administration – Raw-Task-Load Index (dt.: staatliche Behörde für Luft- und Raumfahrt – roher/ungewichteter Index der Aufgabenbeanspruchung) |
| NASA-TLX | National Aeronautics and Space Administration – Task-Load-Index (dt.: staatliche Behörde für Luft- und Raumfahrt - Index der Aufgabenbeanspruchung) |
| OCRA | Occupational Risk Assessment (dt.: berufliche Risikobewertung) |
| OWAS | Ovako Working Posture Analysis System (dt.: Ovako-System zur Analyse der Arbeitshaltung) |
| PK | Personale Kompetenz |
| Q-Q-Plot | Quantile-Quantile-Plot |
| REFA | Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmens- entwicklung e.V. (früher: Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung) |
| RHIA | Verfahren zur Ermittlung von Regulationshindernissen in der Arbeitstätigkeit |
| RPE | Rating of Perceived Exertion (dt.: Bewertung der wahrgenommenen Anstrengung) |
| RULA | Rapid Upper Limb Assessment (dt.: Schnellbewertung der oberen Extremitäten) |
| SK | Sozial-kommunikative Kompetenz |
| SSCS | Screening Scale for Chronic Stress |
| SUS | System Usability Scale (dt.: Skala zur Systembenutzbarkeit) |

| | |
|-----|--|
| TUM | Technische Universität München |
| UCD | User Centered Design (dt.: nutzendenzentrierte Gestaltung) |
| VIF | Variance Inflation Factor (dt.: Abweichung Inflationsfaktor) |
| WAI | Work Ability Index (dt.: Arbeitsfähigkeitsindex) |

Verzeichnis der Formelzeichen

Statistik

| | |
|----|--|
| df | degree of freedom (dt.: Freiheitsgrad) |
| p | Signifikanzwert |
| t | t-Wert zum Vergleich der Unterschiede zweier Stichproben |

Rotationslogik

| | |
|---------------------|--|
| M_j | Mitarbeitende j |
| A_i | Arbeitsplatz i |
| i | Laufvariable für Arbeitsplätze |
| j | Laufvariable für Mitarbeitende |
| n_m | Anzahl der Mitarbeitenden |
| n_A | Anzahl der Arbeitsplätze |
| P_{phy} | Prädizierte physische Beanspruchung pro Mitarbeitende an einem Arbeitsplatz |
| P_{psy} | Prädizierte psychische Beanspruchung pro Mitarbeitende an einem Arbeitsplatz |
| B_{phy} | Physische Beanspruchung pro Mitarbeitende an einem Arbeitsplatz unter Berücksichtigung vergangener Rotationen |
| B_{psy} | Psychische Beanspruchung pro Mitarbeitende an einem Arbeitsplatz unter Berücksichtigung vergangener Rotationen |
| $B_{phy,Gruppe}$ | Physische Beanspruchung einer Arbeitsgruppe für einen Einsatzplan |
| $B_{psy,Gruppe}$ | Psychische Beanspruchung einer Arbeitsgruppe für einen Einsatzplan |
| $B_{gesamt,Gruppe}$ | Gesamtbeanspruchung einer Arbeitsgruppe für einen Einsatzplan |
| g_{phy} | Gewichtungsfaktor physisch |
| g_{psy} | Gewichtungsfaktor psychisch |
| $q_{M_j A_i}$ | Kompetenzmatrix der Mitarbeitenden M_j an Arbeitsplätzen A_i |
| g_r | Gewichtungsfaktor für vergangene Rotationen r |
| $X_{M_j A_i}$ | Zuweisungsmatrix der Mitarbeitenden M_j zu Arbeitsplätzen A_i |
| r | Variable für vergangene Rotationsschritte |
| n_r | Anzahl der berücksichtigten vergangenen Rotationen r |
| $X_{nRM_j A_i}$ | Zähl-Matrix (Summation aller vergangenen Rotationen + nächste Rotation) |
| d_r | Zeit seit Beginn des letzten Einsatzes an dem Arbeitsplatz |

| | |
|-------|--|
| t_r | Dauer einer Rotation |
| u | Exponent vergangener Rotationsschritte |

1 Einleitung

– „Humans are underrated.“ –

Elon Musk admitted that automation has been holding back Tesla’s Model 3 production and that humans, rather than machines, were the answer. (Gibbs in The Guardian, 16. April 2018)

Das Zitat von Elon Musk (GIBBS 2018) verdeutlicht die Bedeutung der Mitarbeitenden in der Produktion. Sie stellen trotz der voranschreitenden Automatisierung und Digitalisierung immer noch eine der wichtigsten Ressourcen in der Produktion dar, insbesondere in der manuellen Montage. Im Gegensatz zu roboterbasierten Produktionslinien mit sensorgestützten Kontrollsystemen zur Identifikation von Verschleiß und möglichen Ausfällen werden in der manuellen Montage kaum prädiktive Maßnahmen zum Erhalt der Gesundheit und der Leistungsfähigkeit der Mitarbeitenden getroffen.

1.1 Ausgangssituation

Im turbulenten industriellen Marktumfeld stehen produzierende Unternehmen vor zahlreichen Herausforderungen in Bezug auf technische Entwicklungen am Arbeitsplatz und soziale Veränderungen bei den Mitarbeitenden, siehe Abbildung 1-1.

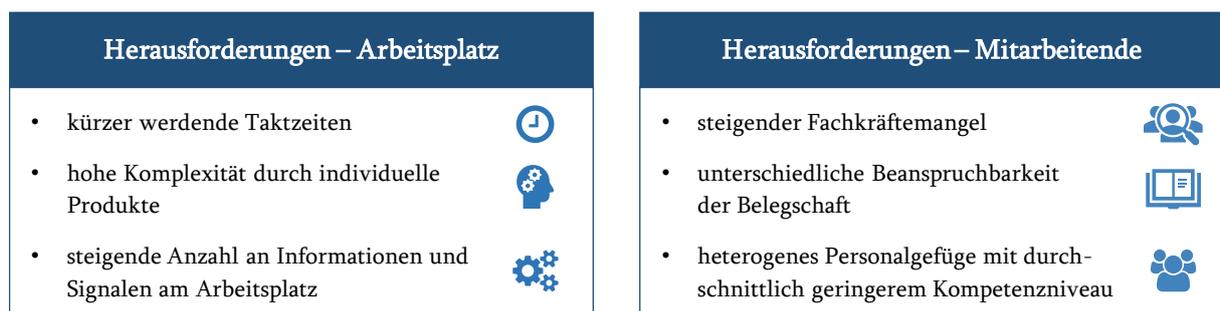


Abbildung 1-1: Überblick der Herausforderungen aus den Bereichen Arbeitsplatz und Mitarbeitende

Seitens der Arbeitsplätze führt vor allem die zunehmende Anzahl kundenindividueller Produkte mit geringen Wiederholraten und häufigen Wechseln der Montagetätigkeit zu einer zunehmenden Komplexität am Arbeitsplatz (BOGNER ET AL. 2018, S. 64, ABELE ET AL. 2019, S. 11). Zudem prägt der steigende Kosten-, Zeit- und Qualitätsdruck den Arbeitsablauf durch beispielsweise kürzer werdende Taktzeiten (REINHART & ZÜHLKE 2017,

S. XXXIV). Um die steigenden Anforderungen und die zunehmende Komplexität am Arbeitsplatz bewältigen zu können, werden den Mitarbeitenden zahlreiche Assistenzsysteme zur Verfügung gestellt, die eine Vielzahl an akustischen, optischen oder taktilen Informationen übermitteln (TEUBNER ET AL. 2019, S. 796). Vor allem in den letzten Jahren wurden im Zuge der voranschreitenden Digitalisierung und Flexibilisierung hin zu Industrie 4.0 neue Sensoren und Smart Devices entwickelt (TROPSCUH ET AL. 2021a, S. 387, SCHÜTZE ET AL. 2018, S. 368, BMBF 2018, 4ff.). Ein Großteil der aktuell in der Industrie genutzten Sensoren fokussiert sich dabei auf das Auslesen und Auswerten von Maschinendaten und die darauf aufbauende Kommunikation im Cyber-Physischen System (REINHART 2017, S. 34). Zudem gibt es zahlreiche Smart Devices, welche physiologische und verhaltensbezogene Daten der Nutzenden analysieren (GOODDAY & FRIEND 2019, S. 2). Weit verbreitet im privaten Bereich sind beispielsweise Fitness-Tracker, Brustgurte oder Ohrsensoren zum Messen von Vitalparametern wie Herzfrequenz oder Atemfrequenz (TEUCKE ET AL. 2020, S. 11, BORNEWASSER & HINRICHSSEN 2020, S. 75). Sie liefern einen Überblick über den körperlichen und geistigen Zustand der Nutzenden und geben Handlungsempfehlungen zur Verbesserung. Diese Smart Devices haben bisher kaum Einzug in das industrielle Produktionsumfeld gehalten (TEUCKE ET AL. 2020, S. 13), bieten jedoch große Potenziale zur Verbesserung der Mitarbeitendengesundheit. Durch die zunehmende Menschzentrierung im industriellen Produktionsumfeld und die Weiterentwicklung der Sensortechnologien rücken Systeme zur Erfassung menschlicher Daten und zum Erhalt der Mitarbeitendengesundheit immer stärker in den Fokus (BREQUE ET AL. 2021, 12ff.). Zusammenfassend kann für die Herausforderungen am Arbeitsplatz festgehalten werden, dass durch die Komplexität und Informationsflut die kognitive Belastung für die Mitarbeitenden stark zunimmt (LANGHOFF & SCHMELZER 2015, S. 532, TROPSCUH ET AL. 2020, S. 703). Die aktuellen technologischen Weiterentwicklungen hin zu Industrie 5.0 bieten Möglichkeiten, um diese Herausforderungen zu bewältigen.

Bei den industriellen Herausforderungen im Bereich der Mitarbeitenden sind zunächst der demografische Wandel, der damit verbundene Anstieg des Durchschnittsalters der Belegschaft (STATISTISCHES BUNDESAMT 2015, S. 5) sowie der zunehmende Fachkräftemangel zu nennen (EU COMMISSION 2020, S. 15). Besonders betroffen sind vor allem personalintensive Unternehmensbereiche wie die manuelle Montage. Das steigende Durchschnittsalter der Belegschaft geht dabei mit einer Abnahme der körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit einher, wie beispielsweise einer nachlassenden Beanspruchbarkeit (GAJEWSKI ET AL. 2018, S. 255, LINDBERG ET AL. 2009, S. 220, SOLBAKK ET AL. 2008, S. 35). Außerdem müssen Unternehmen aufgrund des Fachkräftemangels häufig auf geringerqualifizierte Mitarbeitende oder Zeitarbeitskräfte zurückgreifen, die nicht über die nötige Montageerfahrung oder Arbeitsroutine verfügen (BUNDESAGENTUR FÜR

ARBEIT 2022, S. 7). Dadurch ergibt sich ein heterogenes Personalgefüge mit signifikanten Unterschieden hinsichtlich Kompetenz und Leistungsfähigkeit. Zudem zeigt sich ein gesellschaftlicher Wertewandel hin zu mehr körperlichem und geistigem Gesundheitsbewusstsein mit der Einschätzung der Gesundheit als wichtigstem Wert und der zunehmenden Forderung nach gesundheitserhaltenden Arbeitsplätzen (BONSAI STRATEGY 2022). Zusammenfassend kann für die Herausforderungen im Bereich der Mitarbeitenden festgehalten werden, dass eine alternde Belegschaft mit zunehmend heterogenen Kompetenzen sowie körperlichen als auch geistigen Leistungsvoraussetzungen vorliegt. Laut KOLTHOFF (2021) können betriebliche Gesundheitsmaßnahmen ein entscheidender Differenzierungsfaktor bei der Rekrutierung von Fachkräften im sogenannten ‚War of Talents‘ darstellen.

1.2 Problemstellung

Diese Herausforderungen von komplexer werdenden Arbeitsplätzen auf der einen Seite und der abnehmenden körperlichen und geistigen Leistungsfähigkeit der Belegschaft auf der anderen Seite können zu einer Fehlbeanspruchung der Mitarbeitenden führen. Unter Leistungsfähigkeit werden hierbei personeninterne Voraussetzungen zur Ausübung von Tätigkeiten verstanden (BÖS & KRELL-RÖSCH 2022, S. 13), Motivation oder Leistungswille sind dabei nicht enthalten. Kurzfristig kann eine Fehlbeanspruchung zu Montagefehlern (TROPSCUH ET AL. 2022a, 12ff.) und langfristig zu krankheitsbedingten Ausfällen führen (STORM 2020, S. 44). Davon sind insbesondere ältere Arbeitnehmende betroffen sowie Leistungsgewandelte und Geringqualifizierte, da die Arbeitsaufgaben für diese Personengruppen beanspruchender sind.

Die Auswirkungen dieser Schwierigkeiten von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden spiegelt sich in der Entwicklung der Arbeitsunfähigkeitstage aufgrund von Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) und vor allem psychischen Erkrankungen in den letzten 20 Jahren wider (STORM 2022, 17f.), siehe Abbildung 1-2. Die Arbeitsunfähigkeitstage infolge psychischer Erkrankungen haben sich in diesem Zeitraum verdoppelt (TECHNIKER KRANKENKASSE 2021, S. 27). Laut dem Gesundheitsbericht 2022 der Deutschen Angestellten-Krankenkasse (DAK) sind 54,6 % aller Arbeitsunfähigkeitstage in Deutschland auf MSE und psychische Erkrankungen zurückzuführen (STORM 2022, S. 9). Herz-Kreislauf-Erkrankungen, psychische Ermüdung oder Burnout sind Beispiele für potenzielle Folgen psychischer Überlastung am Arbeitsplatz (BARTHOLD & SCHÜTZ 2010, S. 68). Im Vergleich zu physischen Erkrankungen ist die Genesungszeit bei psychischen Beschwerden jedoch wesentlich länger (Falldauer: psychische Erkrankungen durchschnittlich 39,2 Tage, Muskel-Skelett-Erkrankungen durchschnittlich 19,5 Tage) und

daher für Unternehmen deutlich kostenintensiver (STORM 2022, 15f.). Der Trend zunehmender Arbeits-unfähigkeitstage wird sich in den nächsten Jahren weiter verschärfen, da das MSE-Risiko mit zunehmendem Alter steigt (DGUV 2023).

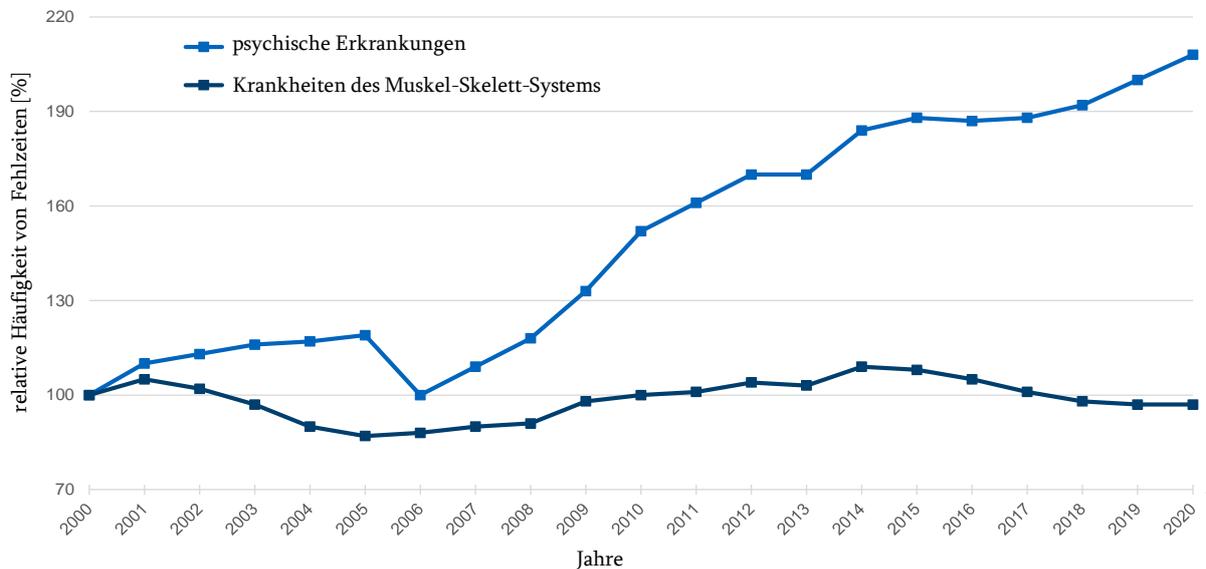


Abbildung 1-2: Entwicklung der Fehlzeiten von psychischen Erkrankungen und Muskel-Skelett-Erkrankungen von 2000-2020 (in Anlehnung an TECHNIKER KRANKENKASSE 2021, S. 27)

Um diese Herausforderungen zu bewältigen und als Unternehmen langfristig wettbewerbsfähig zu bleiben, sind Maßnahmen zum Erhalt der körperlichen und geistigen Gesundheit und dadurch zum Erhalt der Leistungsfähigkeit nötig (TROPSCHUH & REINHART 2020, S. 412, LANDSTAD ET AL. 2002, S. 781). Eine Maßnahme zum Erhalt der Mitarbeitendengesundheit ist der leistungserhaltende Personaleinsatz, welcher die individuelle Beanspruchung und die Kompetenzen der Mitarbeitenden berücksichtigt.

Hinzu kommt, dass bei kurzfristigen krankheitsbedingten Ausfällen ein hoher Zeitaufwand für Änderungen der Personaleinsatzplanung erforderlich ist. Da die Verantwortlichen oft erst kurz vor Schichtbeginn wissen, welche Mitarbeitende verfügbar sind, fällt der Planungsaufwand häufig in den Schichtbeginn, was zu erneuten kurzfristigen Arbeitsplatzwechseln und somit zu Verwirrung bei den Mitarbeitenden führen kann. Unternehmen setzen teils bereits auf eine flexible Einsatzplanung, bei der die Mitarbeitenden stündlich, täglich oder wöchentlich zwischen verschiedenen Arbeitsplätzen rotieren. Um die Leistungsfähigkeit der Mitarbeitenden langfristig zu erhalten, müssen bei der Zuordnung der verfügbaren Arbeitskräfte zu den jeweiligen Arbeitsplätzen die individuellen Kompetenzen, Leistungsvoraussetzungen sowie die tatsächliche physische und psychische Beanspruchung berücksichtigt werden. Eine solche effiziente und anpassungsfähige Personaleinsatzplanung unter Berücksichtigung psychischer und physischer Aspekte ist ein möglicher Schlüsselfaktor zur Bewältigung aktueller Herausforderungen des industriellen Produktionsumfelds, wie zum Beispiel die Reduktion der Arbeitsunfähigkeitstage infolge von MSE und psychischen Erkrankungen.

1.3 Zielsetzung und Betrachtungsrahmen

Aus der Problemstellung geht hervor, dass der Erhalt der Leistung sowie der physischen und psychischen Gesundheit von Mitarbeitenden in Zukunft einen entscheidenden Wettbewerbsfaktor für produzierende Unternehmen darstellen wird. Unternehmen versuchen daher mit verschiedensten Maßnahmen das physische und psychische Gesundheitsrisiko für die Mitarbeitenden zu reduzieren, um den Anstieg der krankheitsbedingten Arbeitsunfähigkeitstage zu verringern. Angelehnt an die Maßnahmen der Berufsgenossenschaft für Holz und Metall (BGHM 2021, S. 19) zum Schutz vor Gefahren wird zunächst versucht, die Arbeitsplätze ergonomisch (physisch und psychisch) zu verbessern, um potenzielle Gefahren für die Mitarbeitenden zu vermeiden oder zu reduzieren. Falls das technisch oder montagebedingt nicht realisierbar ist, werden häufig Assistenzsysteme zur Unterstützung eingesetzt, zum Beispiel ein Werkerassistenzsystem zur einfacheren Informationsanzeige oder eine Hebehilfe zur Reduktion aufzubringender Kräfte. Eine weitere Möglichkeit sind organisatorische Maßnahmen, wie beispielsweise die Personaleinsatzplanung, um die physische und psychische Belastung abhängig der individuellen Voraussetzungen möglichst gleichmäßig auf die Mitarbeitenden zu verteilen. Im Stand der Erkenntnisse (Kapitel 3) werden einige beanspruchungs- und kompetenzorientierte Ansätze der Personaleinsatzplanung vorgestellt, welche physische und psychische Aspekte der manuellen Montage berücksichtigen. Eine gleichzeitige Integration physischer, psychischer und kompetenzorientierter Aspekte in die Einsatzplanung findet bisher noch nicht statt (siehe Kapitel 3).

Das **Forschungsziel** dieser Arbeit ist daher der leistungserhaltende Einsatz von Mitarbeitenden in der taktgebundenen manuellen Montage durch organisatorische Maßnahmen der Personaleinsatzplanung. Das **wissenschaftliche Arbeitsergebnis** stellt eine Methode zur beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung unter Berücksichtigung psychischer und physischer Faktoren dar. Mit dieser Einsatzplanung soll den beschriebenen Herausforderungen der Industrie begegnet werden.

Um diese Zielsetzung zu erreichen, müssen die folgenden drei Forschungsfragen beantwortet werden:

- FF1:** Wie kann ein **menschorientiertes Arbeitssystem** der taktgebundenen manuellen Montage **beschrieben** und **Arbeitsplätze mit Mitarbeitenden verglichen** werden?
- FF2:** Wie können **physische und psychische Beanspruchung** bei der taktgebundenen manuellen Montage **gemessen und prognostiziert** werden?
- FF3:** Wie können beanspruchungs- und kompetenzorientierte **Personaleinsatzpläne generiert** und an die Mitarbeitenden **kommuniziert** werden?

Basierend auf dem wissenschaftlichen Arbeitsergebnis und der Beantwortung der Forschungsfragen werden zwei **industrielle Ziele** angestrebt. Das erste industrielle Ziel ist die Reduktion der Planungsaufwände pro Tag, vor allem bei kurzfristigen krankheitsbedingten Ausfällen. Das zweite industrielle Ziel stellt die Reduktion der Arbeitsunfähigkeitstage durch den Erhalt der menschlichen Gesundheit und Leistungsfähigkeit dar.

Die entwickelte Methode ist für die Anwendung in der taktgebundenen manuellen Montage konzipiert, da in diesem personenintensiven **Betrachtungsbereich** die Mitarbeitenden die physischen und psychischen Tätigkeiten ausführen. Außerdem liegt der Fokus auf der taktgebundenen manuellen Montage, da hier eine zusätzliche mentale Belastung durch den Zeitdruck und die Vorherbestimmtheit der Tätigkeiten vorliegt (GÜHNE ET AL. 2021, S. 155). Die Eigenschaften der taktgebundenen manuellen Montage werden in Abschnitt 2.1 genauer erläutert. In Bezug auf die zu entwickelnde beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzplanung stehen Ansätze der Rotationsplanung im Fokus, da diese eine Möglichkeit für einen gesundheitserhaltenden Personaleinsatz sind und besondere Bedeutung für die Anwendung in der manuellen Montage haben. Andere Planungsansätze stellen beispielsweise Methoden des Assembly-Line-Balancing (z. B. BOYSEN ET AL. 2022, DOLGUI & PROTH 2013) oder Modell-Mix-Planungen (z. B. TONELLI ET AL. 2013, BOYSEN ET AL. 2009) dar. Im Vergleich zu diesen Planungsansätzen liegt der Schwerpunkt der zu entwickelnden Methode auf den Mitarbeitenden. Das Arbeitsumfeld mit der Variantenvielfalt und Austaktung wird als gegeben betrachtet und nicht als Optimierungspotenzial berücksichtigt.

1.4 Wissenschaftliches Vorgehen

Basierend auf dem beschriebenen Forschungsziel und den Forschungsfragen folgt in diesem Abschnitt einerseits die wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit sowie andererseits die Erläuterung des konkreten Forschungsvorgehens und Aufbaus der Arbeit.

1.4.1 Wissenschaftstheoretische Einordnung

Nach ULRICH & HILL (1976a, S. 305) wird in der Wissenschaft zwischen Formalwissenschaften und Realwissenschaften unterschieden. Bei den Formalwissenschaften, wie beispielsweise der Philosophie oder der Mathematik, liegt der Fokus auf der Konstruktion von Zeichensystemen mit Regeln. Die Realwissenschaften werden in Grundlagenwissenschaften zur Erklärung empirischer Wirklichkeitsausschnitte und allgemeiner Hypothesen (z. B. Naturwissenschaften wie Physik oder Chemie) sowie in angewandte Wissenschaften zur Analyse menschlicher Handlungsalternativen (z. B.

Sozial- oder Ingenieurwissenschaften wie Psychologie oder Maschinenwesen) unterteilt. Die angewandten Wissenschaften, auch Handlungswissenschaften genannt (ULRICH & HILL 1976a, S. 305), adressieren konkrete Probleme aus der industriellen Praxis. Die Lösung dieser Probleme soll dabei nicht nur der Industrie dienen, sondern einen übergeordneten Nutzen für die Gesellschaft haben. (ULRICH & HILL 1976a, S. 305)

Bei den angewandten Wissenschaften kann laut ULRICH (1982, S. 5) nicht strikt nach einzelnen Disziplinen unterschieden werden, da durch die Praxisnähe und den Fokus auf das menschliche Handeln stets die Einflüsse des größeren soziotechnischen Umfelds und somit die Aspekte mehrerer Disziplinen berücksichtigt werden müssen. Nach ULRICH & HILL (1976a, S. 305) ist die vorliegende Forschungsarbeit Teil der angewandten Wissenschaften, da das adressierte Problem aus der industriellen Praxis stammt und eine Schnittstelle zwischen Ingenieurs- und Psychologiethematen darstellt.

Zur strukturierten Beschreibung des zu untersuchenden Problems eignet sich ein heuristischer Bezugsrahmen, welcher die Zusammenhänge und den systematischen Erkenntnisgewinn aufzeigt (REDLICH 2011, S. 83). Im Zentrum des heuristischen Bezugsrahmens dieser Arbeit steht die Personaleinsatzplanung in der manuellen Montage, siehe Abbildung 1-3. Das Kernthema weist vier übergeordnete Schnittstellen auf, die ebenfalls wechselwirkend miteinander verknüpft sind und nachfolgend beschrieben werden. Die Schnittstelle zu den Ingenieurwissenschaften beinhaltet einerseits den Bezug zur industriellen Praxis und den industriellen Bedarf einer neuen, menschenorientierten Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen Montage. Andererseits liefern die Ingenieurwissenschaften mathematische Techniken und programmiertechnische Applikationen zur Erstellung und Realisierung digitaler Einsatzpläne. Durch den Mensch-Fokus ergeben sich die Schnittstellen der Ergonomie und Psychologie, wodurch die körperlichen und geistigen Aspekte der Mitarbeitenden in der Montage berücksichtigt werden sollen. Mit Hilfe strukturierter Probandenstudien und statistischen Berechnungen können Daten erhoben und aufgestellte Annahmen getestet werden. Durch die Schnittstelle zu den Arbeitswissenschaften werden die verschiedenen Aspekte der menschlichen Arbeit betrachtet und ökonomisch bewertet. Der Gesundheitsschutz zählt hierbei auch zum Bereich der Arbeitswissenschaften und bestärkt somit das Ziel der vorliegenden Arbeit, der Entwicklung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung.

Zur strukturierten Erarbeitung neuer Erkenntnisse in einem bestimmten Forschungsbereich sowie deren praktischer Umsetzung bedarf es eines systematischen Vorgehens, einer sogenannten Forschungsmethodik. Die Bearbeitung des vorliegenden Forschungsvorhabens erfolgt nach der Design Research Methodology (DRM) nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009), da diese Forschungsmethodik den studienbasierten Charakter der

vorliegenden Arbeit unterstützt. Die einzelnen Phasen der DRM sowie eine Einordnung der Inhalte werden im nachfolgenden Abschnitt 1.4.2 detailliert erläutert.



Abbildung 1-3: Heuristischer Bezugsrahmen dieser Arbeit

1.4.2 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

Die DRM setzt sich aus den vier Phasen *Research Clarification*, *Descriptive Study I*, *Prescriptive Study* und *Descriptive Study II* zusammen, welche nicht zwingend in dieser Reihenfolge durchlaufen werden müssen (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 15). Die vier Phasen können parallel oder iterativ bearbeitet werden. Dabei differenzieren BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 18) zwischen den drei Forschungsansätzen literaturbasiert, umfassend und initial: Ein literaturbasierter Ansatz beruht rein auf der Durchsicht der Fachliteratur. Ein umfassender Forschungsansatz beinhaltet sowohl eine Literaturanalyse als auch eine Studie zur Generierung neuer Erkenntnisse. Der initiale Ansatz bildet den Abschluss eines Projekts, um die Ergebnisse zu veranschaulichen und die Nutzung in der Praxis zu evaluieren.

ULRICH & HILL (1976b, 347) unterscheiden zudem die Art der Forschungsaktivitäten in drei Kategorien: terminologisch-deskriptiv, analytisch-deduktiv und empirisch-induktiv. Terminologisch-deskriptive Forschungsaktivitäten dienen der Schaffung eines grundlegenden Begriffssystems, welches für die Beschreibung des Forschungsprojekts benötigt wird. Analytisch-deduktive Aufgaben sind alle logischen Schritte, welche keine induktiven Schlussfolgerungen benötigen, wie beispielsweise die deduktive Konzeption der Methodenbausteine und deren analytische Auswertung. Empirisch-induktive Aktivitäten beschreiben, untersuchen und verallgemeinern beobachtbare Zusammenhänge, was zum Beispiel für die Evaluierung eines Konzepts oder die Überprüfung von Hypothesen angewendet wird (HUSSY ET AL. 2013, S. 7). Empirische Forschungsmethoden werden dabei zur Informationsgewinnung oder Datenbeschaffung eingesetzt, beispielsweise mit Datenerhebungsinstrumenten wie Beobachtung, Befragung oder Experiment (STIER 1999, S. 5). (ULRICH & HILL 1976b, 347)

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer Methode zur beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung, um einen konkreten Lösungsansatz für den Handlungsbedarf zum Erhalt der Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Mitarbeitenden zu schaffen. Abbildung 1-4 zeigt die Zuordnung der einzelnen Kapitel dieser Arbeit zu den Phasen der DRM nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) und die Forschungsart nach ULRICH & HILL (1976b).

| Forschungsmethode | | | Umsetzung der Arbeit | |
|-----------------------------|---------------------------|------------------|--|-------------------------------|
| Phase der DRM | Art | Ansatz | Inhalt | Kapitel |
| Klärung des Forschungsziels | terminologisch-deskriptiv | literaturbasiert | <ul style="list-style-type: none"> • Ausgangssituation und Problemstellung • Zielsetzung und Forschungsfragen • wissenschaftliches Vorgehen • Anforderungen | 1.1, 1.2 1.3 1.4 4.1 |
| deskriptive Studie 1 | | | <ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen • Stand der Erkenntnisse <ul style="list-style-type: none"> – Bewertungskriterien – Ansätze der Personaleinsatzplanung • Handlungsbedarf | 2 3 3.1 3.2 3.3 |
| präskriptive Studie | analytisch-deduktiv | umfassend | <ul style="list-style-type: none"> • Konzeption der Methode • Entwicklung der Methode <ul style="list-style-type: none"> – Systemmodell, AP- & MA-Profile – Methodenbaukasten | 4.2 5 5.1 5.2 |
| deskriptive Studie 2 | | | <ul style="list-style-type: none"> – Beanspruchungsmessung – Prädiktionsmodell – Rotationslogik – Interaktionsschnittstellen | 5.2 5.3 5.3 |
| | empirisch-induktiv | initial | <ul style="list-style-type: none"> • Implementierung & Anwendung • Evaluation | 6 7 |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> – Validierung der Anforderungen – Aufwand-Nutzen-Bewertung – Limitationen | 7.1 7.2 7.3 |

Abbildung 1-4: Einordnung der Arbeitsinhalte in die Forschungsmethodik nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 15) und Aufbau der Arbeit

Die erste DRM-Phase (Research Clarification) fokussiert sich auf die Definition realistischer und relevanter Ziele für die eigene Forschung (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 30). Diese Phase beinhaltet sowohl die Klärung des Forschungsziels als auch die Definition der zu erreichenden Anforderungen. Das Vorgehen erfolgt in der vorliegenden Arbeit terminologisch-deskriptiv auf Basis von Literaturrecherchen und mit Hilfe von Gesprächen mit Experten und Expertinnen aus der Industrie. Durch diese praxisorientierte Validierung der Zielstellung und der Anforderungen wurde der industrielle Handlungsbedarf und der Bezug zum Anwendungsbereich sichergestellt. Bereits in diesem Schritt wird die Zuordnung zur angewandten Wissenschaft nach ULRICH & HILL (1976a) deutlich.

Die zweite DRM-Phase, die deskriptive Studie I (Descriptive Study I), hat zum Ziel, ein grundlegendes Verständnis für das Forschungsthema in den Bereichen manuelle Montage, Anforderungen und Kompetenzen, Belastung und Beanspruchung sowie Personaleinsatzplanung aufzubauen und einen Überblick über den aktuellen Stand der Erkenntnisse zu erlangen. Darauf aufbauend wird anschließend der Handlungsbedarf literaturbasiert abgeleitet (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 32). Das angewendete Vorgehen ist ebenfalls terminologisch-deskriptiv.

Im Rahmen der präskriptiven Studie (Prescriptive Study), der dritten DRM-Phase, erfolgt die Entwicklung einer konkreten Lösung für das zu Beginn beschriebene Forschungsziel (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 35). In der vorliegenden Forschungsarbeit stellt dies die Entwicklung einer Methode zur beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage dar. Das Konzept der Methode, die wissenschaftlichen Herleitungen der drei Methodenbausteine sowie die darin enthaltenen praktischen Umsetzungen werden nachfolgend beschrieben. Die Ausarbeitung der einzelnen Methodenbausteine erfolgt analytisch-deduktiv mit Hilfe von quantitativen Probandenstudien, Feldbeobachtungen in der Produktion und der datenbasierten Erstellung eines Prädiktionsmodells sowie qualitativen Gesprächen mit Nutzenden (HUSSY ET AL. 2013, 9f.). Durch die interdisziplinäre Gestaltung des Projekts werden hier sowohl Forschungsmethoden des Ingenieurwesens als auch der Psychologie genutzt (z. B. RENNER ET AL. 2012, 73f.; DÖRING & BORTZ 2016, 4f.).

In der vierten Phase der DRM, der deskriptiven Studie II (Descriptive Study II), steht die praxisnahe Evaluierung der entwickelten Methode mit den enthaltenen praktischen Umsetzungen und die Validierung der gestellten Anforderungen im Fokus. Die Bewertung der erarbeiteten Lösung erfolgt in dieser Arbeit anhand empirischer Daten aus Studien und Gesprächen mit Experten und Expertinnen aus der Automobilindustrie. Die Ergebnisse der Evaluierung sowie weiterführende Verbesserungspotenziale werden daraus abgeleitet. (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, 37f.)

2 Grundlagen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die Grundlagen für das Verständnis der vorliegenden Arbeit erläutert. Dabei wird zunächst auf die relevanten Aspekte des zugrunde liegenden Betrachtungsbereichs der **manuellen Montage** eingegangen (Abschnitt 2.1). Zu Beginn werden Begrifflichkeiten erläutert und die manuelle Montage anhand von beispielsweise Arbeitsformen und Arbeitsinhalten charakterisiert. Es folgt die literaturbasierte Beschreibung der manuellen Montage als Arbeitssystem. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 2.2 auf die detaillierten Anforderungen der **Arbeitsplätze und** die Kompetenzen der **Mitarbeitenden** eingegangen und die Arbeitsplatzanforderungen und Mitarbeitendenkompetenzen im Arbeitssystem tiefer gehend betrachtet. Anschließend werden die Grundlagen zu **Belastung und Beanspruchung** ausgeführt (Abschnitt 2.3). Nach der Erläuterung der Zusammenhänge zwischen Belastung und Beanspruchung werden Methoden zur Messung dieser Faktoren vorgestellt. Abschließend erfolgt eine Einführung in die **Personaleinsatzplanung** (Abschnitt 2.4). Dabei wird zunächst ebenfalls auf Begrifflichkeiten und Charakteristika der Einsatzplanung eingegangen, bevor grundlegende Methoden der Zuordnung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen und Arten der Einsatzplanung diskutiert werden.

2.1 Manuelle Montage

Die Montage ist ein Teilsystem der Produktion und schließt sich im Produktionsprozess an die Fertigung an (WIENDAHL 2010, S. 10). In der Fertigung werden Einzelteile aus Rohstoffen hergestellt, welche dann in der Montage zu einer übergeordneten Baugruppe oder dem Endprodukt vereint werden (EVERSHEIM 1989, S. 1). Die Aufgabe der manuellen Montage ist daher das händische Zusammenfügen von Einzelteilen zu einem Produkt höherer Komplexität mit einer vorgegebenen Funktion (WARNECKE ET AL. 1975, S. 11). Trotz der zunehmenden Automatisierung in der Montage werden die Tätigkeiten vorwiegend manuell von Mitarbeitenden ausgeführt. Die Montage ist dabei für einen hohen Anteil der Herstellungskosten verantwortlich (20 – 70 %, je nach Erzeugnis), weswegen Verbesserungen und Optimierungen hierbei von zentraler Bedeutung für den Unternehmenserfolg sind (LOTTER 2012a, S. 3). Darüber hinaus nimmt die Montage einen Großteil der Herstellungszeit ein. Je nach Branche und Komplexität der Produkte

entspricht das etwa 15 bis 70 % (LOTTER 2012a, S. 3). Aufgrund des teils geringen Automatisierungsgrads in diesem Bereich wird der Begriff manuelle Montage genutzt, abgeleitet von lat. manus: Hand, als Ausdruck für den hohen menschlichen Arbeitsanteil im Vergleich zur Nutzung von automatischen Maschinen (LOTTER 1992, S. 43).

In den nächsten Abschnitten wird zunächst auf die Charakteristika der manuellen Montage eingegangen (Abschnitt 2.1.1), bevor anschließend die manuelle Montage als Arbeitssystem betrachtet wird (Abschnitt 2.1.2).

2.1.1 Charakteristika

Die nachfolgenden sieben Charakteristika dienen in Anlehnung an LOTTER (1992, 2012a), EVERSHEIM (1989), WIENDAHL & WIENDAHL (2020), HINRICHSSEN & BORNEWASSER (2020) und SCHLICK ET AL. (2010) der Beschreibung der manuellen Montage. Begonnen wird hierbei mit der Erläuterung der Arbeitsinhalte sowie der Arbeitsformen. Anschließend werden die Merkmale Automatisierungsgrad und Variantenvielfalt sowie die verschiedenen Organisationsformen dargelegt, ergänzend erfolgt die Beschreibung möglicher Verkettungsarten von Montagestationen und Aspekten der Taktbindung. Abschließend wird auf die unterschiedlichen Varianten der manuellen Montage entlang der Wertschöpfungskette eingegangen.

Arbeitsinhalte

Die Arbeitsinhalte in der manuellen Montage setzen sich aus den Haupttätigkeiten Fügen und Handhaben sowie den zusätzlichen Tätigkeiten Prüfen, Justieren und Sonderfunktionen zusammen (LOTTER 2012a, S. 2, VDI-RICHTLINIE 2860 1990). Die Mitarbeitenden führen mit ihrer Intelligenz, ihren Fingerfertigkeiten, Kompetenzen und Qualifikationen komplexe Montagevorgänge, gegebenenfalls unter Einbeziehung mechanischer Hilfsmittel, aus (LOTTER 2012d, S. 109). Die Montagearbeit hat sich durch die Digitalisierung und Vernetzung im Rahmen von Industrie 4.0 verändert. Neue digitale Funktionen an Werkzeugen (z. B. Messung der Drehzahl bei Verschraubungen), Assistenzsysteme (z. B. Tablets zur flexiblen Anzeige der Arbeitsschritte) oder kollaborierende Roboter unterstützen die Mitarbeitenden bei der Bewältigung der steigenden Komplexität am Montagearbeitsplatz (HINRICHSSEN 2020, S. 31).

Arbeitsformen

Abhängig von der gewählten wissenschaftlichen Betrachtungsweise werden die Grundformen menschlicher Arbeit unterschiedlich spezifiziert. Im Ingenieurskontext erfolgt eine Differenzierung zwischen der Art der Leistungserbringung in energetische und informatorische Arbeit. Im Sinne der physiologischen Betrachtungsweise steht das genutzte

Organsystem im Vordergrund, was zu einer Differenzierung in muskuläre und nervliche Arbeit führt. Die philosophische Betrachtungsweise unterscheidet aufgrund existenter gegenständlicher und immaterieller abstrakter Formen in physische/körperliche und psychische/geistige Arbeit. Früher wurden oft die Begriffe Muskel- und Kopfarbeit genutzt (LUCZAK 1993, S. 214). Die Extreme sind idealtypisch und existieren in der Realität nicht, da bei einer körperlich auslastenden Tätigkeit immer ein Denkanteil enthalten ist und ebenso bei den informatorischen Tätigkeiten automatisch ein Anteil körperlicher Aktivität inkludiert ist (z. B. Schreiben, Sprechen). Abbildung 2-1 zeigt fünf Arten menschlicher Arbeit und die unterschiedlichen Betrachtungsweisen. Bei der energetischen Arbeit sind die Muskeln und das Herz-Kreislauf-System die überwiegend aktiv belasteten Organe, wohingegen bei informatorischer Arbeit die mentale Informationsverarbeitung im Gehirn im Vordergrund steht (SCHLICK ET AL. 2010, S. 230, S. 286). (SCHLICK ET AL. 2010, S. 223, ROHMERT 1983, S. 20)

| Arbeitsform | energetische/körperliche Arbeit | | | informatorische/geistige Arbeit | |
|----------------|---------------------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
| | mechanisch | motorisch | reaktiv | kombinativ | kreativ |
| Art der Arbeit | | | | | |
| Tätigkeit | Kräfte abgeben | Bewegungen ausführen | reagieren und handeln | Informationen kombinieren | Informationen erzeugen |

Abbildung 2-1: Unterteilung der Arbeitsformen (in Anlehnung an ROHMERT 1983, S. 20 und SCHLICK ET AL. 2010, S. 224)

Automatisierungsgrad

Nach LOTTER (2012b, S. 167) gibt der Automatisierungsgrad das Verhältnis zwischen automatisierten und manuellen Vorgängen an. Hinsichtlich des Automatisierungsgrades werden drei Arten von Montagesystemen unterschieden, die manuelle, die halbautomatisierte (hybride) und die automatisierte Montage (SPUR 2014, S. 459). Diese drei Arten differenzieren sich vor allem in dem nötigen initialen Kostenaufwand, ihrer Flexibilität und der Ausbringungsmenge (LOTTER & MÜLLER 2018, S. 94). In der manuellen Montage werden die Tätigkeiten ausschließlich von den Mitarbeitenden erledigt. Der erforderliche initiale Kostenaufwand ist dabei geringer, die hohe Flexibilität ermöglicht die Bearbeitung vieler Varianten und ein schnelles Reagieren auf sich verändernde Rahmenbedingungen. Obwohl die manuelle Montage meist nur bei kleineren Stückzahlen wirtschaftlich ist, zum Beispiel bei Kleinserien, ist sie aufgrund der steigenden Produktvielfalt und Komplexität der Produkte trotz der fortschreitenden Automatisierung nach wie vor bedeutend (HINRICHSSEN & BORNEWASSER 2020, 15f.). Bei der hybriden Montage werden manuelle und automatisierte Montageverrichtungen kombiniert, was zu einer Entlastung der Mitarbeitenden führt. Im Rahmen der automatisierten Montage

führen die Mitarbeitenden lediglich kontrollierende, überwachende Tätigkeit aus. Montagesysteme mit diesem Automatisierungsgrad sind für Produkte mit einer geringen Variantenvielfalt und einer hohen Wiederholhäufigkeit geeignet. Die Flexibilität ist zwar deutlich geringer als bei der manuellen Montage, dafür kann jedoch eine höhere Produktivität erreicht werden. (HESSE 2012a, S. 195, LOTTER 2012a, S. 3)

Organisationsformen

Die Organisationsformen der manuellen Montage lassen sich anhand der Bewegung des Montageobjekts, der Mitarbeitenden und der zeitlichen Verkettung unterscheiden (WIENDAHL 2010, S. 40), siehe Abbildung 2-2. In Bezug auf die *Bewegung des Montageobjekts* wird zwischen einer stationären und einer instationären Montage unterschieden. Bei ersterer wird das Produkt unbewegt an einer Station zusammengebaut, die weitere Spezifizierung bezieht sich auf die *Bewegung der Mitarbeitenden*, die ebenfalls stationär oder instationär tätig sein können. Im Falle einer stationären Montage und stationärer Mitarbeitenden liegt die Organisationsform Einzelplatzmontage vor. Die Gruppenmontage charakterisiert sich ebenso wie die Einzelplatzmontage durch ein stationäres Montageobjekt, allerdings mit bewegten Montagearbeitsplätzen (WARNECKE 1995, S. 44). Die Baustellenmontage ist eine hybride Mischform zwischen der Einzelplatzmontage und der Gruppenmontage (LOTTER 2012c, S. 148, WIENDAHL & WIENDAHL 2020, S. 53). (EVERSHEIM 1989, S. 175)

| | | Bewegung des Montageobjekts | |
|-----------------------------|-------------|-----------------------------|--|
| | | stationär | instationär |
| Bewegung der Mitarbeitenden | instationär | Gruppenmontage | Fließmontage (kontinuierlicher Materialfluss) |
| | stationär | Einzelplatzmontage | Reihenmontage (ohne zeitl. Bindung) Taktstraßenmontage (mit zeitl. Bindung) |

Abbildung 2-2: Organisationsformen der Montage (in Anlehnung an EVERSHEIM 1989, S. 176)

Im Gegensatz zur stationären Montage bewegt sich das Montageobjekt im Laufe des Zusammenbaus bei der instationären Montage. Auch bei dieser Montageform wird weiter zwischen der Bewegung der Mitarbeitenden unterschieden. Bei der Kombination aus instationärer Montage und stationären Mitarbeitenden liegen die Organisationsformen Reihenmontage (ohne zeitliche Bindung) und Taktstraßenmontage (mit zeitlicher Bindung) vor (WIENDAHL & WIENDAHL 2020, S. 53). Die Reihenmontage ist dadurch gekennzeichnet, dass die einzelnen Montagestationen nicht miteinander verkettet sind (PRASCH 2010, S. 68), wohingegen bei der Taktstraßenmontage eine feste Verkettung und

eine taktbezogene Weitergabe vorliegen (EVERSHEIM & STEUDEL 1977, S. 18). Hierbei werden die Montageobjekte zur Bearbeitung pro Station angehalten (PRASCH 2010, S. 70). Die Fließmontage unterscheidet sich von der Taktstraßenmontage durch eine kontinuierliche Weiterbewegung der Montagearbeitsplätze und Mitarbeitenden (GRUNDIG 2006, S. 137). Die zeitliche Verkettung der Arbeitsstationen erfolgt kontinuierlich, wobei die Bearbeitungszeit pro Station durch die Geschwindigkeit des Materialflusses vorgegeben wird (KRATZSCH, S. 49).

Variantenvielfalt

Der zunehmende Kundenwunsch nach individuellen Produkten stellt einen unternehmensexternen Treiber der Variantenvielfalt dar, wohingegen eine fehlende Bereinigung des Produktionsprogramms ein unternehmensinterner Treiber ist (GROßE-HEITMEYER & WIENDAHL 2004, S. 7, S. 12). Nach DIN 199-1 (2021, S. 10) werden Varianten als Teile „ähnlicher Form und/oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Baugruppen oder Teilen“ definiert. Basierend auf dieser Definition ist die Variantenvielfalt als „die Anzahl der unterschiedlichen Ausführungsformen eines Teiles, einer Baugruppe oder eines Produktes“ (GROßE-HEITMEYER & WIENDAHL 2004, S. 7) zu verstehen. Die Varianz lässt sich dabei hinsichtlich der Art in die beiden Kategorien Produktions- und Produktvarianz aufteilen (BLEY & BOSSMANN 2005, S. 477). Bei der Produktionsvarianz betreffen die Unterschiede den Montageprozess oder den Ressourceneinsatz, was zu unterschiedlichen Bearbeitungszeiten der einzelnen Varianten führen kann. Bei der Produktvarianz hingegen kommt es zu keinen Veränderungen des Montageprozesses, da sich die Montagevorgänge beispielsweise lediglich durch die Farbe eines Bauteils oder die Länge einer Schraube verändern (KESTEL 1995, 5f.).

Da aufgrund der geringen Stückzahl pro Produktionsvariante die Montage an einer Einprodukt-Fließlinie nicht mehr wirtschaftlich ist, streben Unternehmen eine Varianten-Fließlinie (engl.: Mixed-Model-Line) an (BATTALIA ET AL. 2015, S. 489). Hierbei können verschiedene Varianten in kleinen Losgrößen in beliebiger Reihenfolge an derselben Montagelinie im zeitlich ähnlichen Fluss/Takt montiert werden, siehe Abbildung 2-3. Die größten Herausforderungen sind die kapazitive Koordination der Varianten aufgrund der schwankenden Bearbeitungszeiten (BOYSEN ET AL. 2007, S. 763), die zunehmende mentale Beanspruchung der Mitarbeitenden durch die Variantenvielfalt und die geringe Wiederholhäufigkeit (GROßE-HEITMEYER & WIENDAHL 2004, S. 10). Falls eine rütfreie Montage nicht möglich ist, liegt eine serienweise Mehrprodukt-Fließlinie vor, bei der die Varianten gebündelt montiert werden.

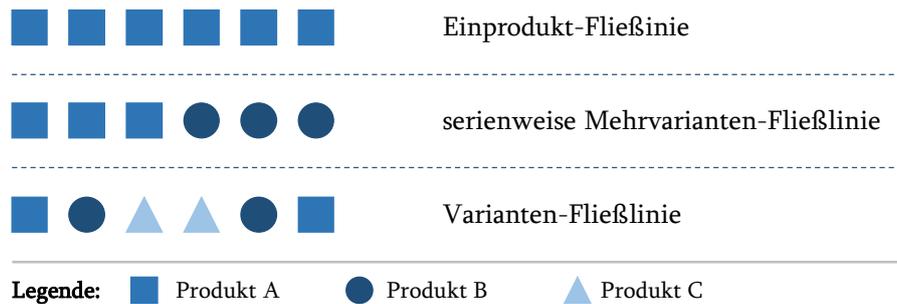


Abbildung 2-3: Unterscheidung der Fließlinien auf Basis der Variantenvielfalt und deren Produktionsreihenfolge (in Anlehnung an BOYSEN 2005, S. 11, SCHOLL 1999, S. 7)

Taktbindung

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, liegt bei den Montageorganisationsformen Taktstraßenmontage und Fließmontage eine zeitliche Bindung der Arbeitsinhalte pro Station vor. Die Taktzeit stellt die maximal verfügbare Bearbeitungszeit pro Station dar und orientiert sich an der Kundennachfrage (LUTZ 1974, S. 18). Mathematisch lässt sich die Taktzeit durch den Quotienten aus verfügbarer Arbeitszeit pro Schicht und der benötigten Stückzahl pro Schicht berechnen (DEUSE & BUSCH 2012, S. 90). Basierend darauf werden im Rahmen der Austaktung die Arbeitsinhalte möglichst gleichmäßig auf die einzelnen Montagestationen verteilt, um einen stabilen Produktionsablauf zu ermöglichen. Laut ROSCHER (2008, S. 21) ist das Ziel der Austaktung, eine möglichst hohe Auslastung der Mitarbeitenden (circa 95 %) mit manuellen Arbeitsvorgängen zu erreichen. Die genutzte Taktzeit hat sich in den letzten Jahren deutlich verändert, von mindestens 15 Minuten in den 80ern über fünf Minuten in den 90ern bis hin zu dem aktuell häufig angestrebten Ein-Minuten-Zyklus (JÜRGENS 1997, S. 256). Im Volkswagen-Werk in Zwickau fährt beispielsweise bei voller Auslastung des Montagebands alle 1,5 Minuten ein Elektroauto vom Band (ILG 2019). Die immer kürzer werdenden Taktzeiten resultieren aus gestiegenen Kundennachfragen und Lieferanforderungen.

Positionierung in der Wertschöpfungskette

Die Montage unterteilt sich je nach Positionierung in der Wertschöpfungskette in Vor-, End-/Haupt- und Nachmontage (EVERSHEIM 1989, S. 169). Die Vormontage ist ein vorgelagerter Teil des Montageprozesses, bei dem eine Vormontagebaugruppe und nicht ein Endprodukt entsteht (BARTHELMEB 1987, S. 16). Dabei wird eine erste Montage bestimmter Baugruppen bereits vor der Lieferung an das Hauptmontageband durchgeführt. Dies reduziert die Durchlaufzeit und das Fehlerpotenzial durch die bereits vorangegangene Prüfung einzelner Baugruppen (SPUR 2014, S. 448, HESSE 2012b, S. 20). In der Endmontage werden alle Vormontagebaugruppen und Einzelteile aus der Fertigung zum Endprodukt zusammengeführt (SPUR 2014, S. 435). Die Nachmontage stellt einen nach-gelagerten Prozessschritt dar, bei dem Fehlerbehebungen am Endprodukt vorgenommen werden.

2.1.2 Arbeitssystem

Nach der allgemeinen Charakterisierung der manuellen Montage folgt in diesem Abschnitt die Beschreibung dieses Produktionsbereichs als Arbeitssystem. Es werden der Aufbau sowie die Wechselwirkungen zwischen den Elementen der manuellen Montage verdeutlicht. Der Fokus liegt auf einer arbeitswissenschaftlichen Beschreibung, um die Interdisziplinarität zwischen Sozial- und Ingenieurwissenschaften darzustellen (LUCZAK 1993, S. 6). Nach DIN EN ISO 6385 (2016, S. 7) ist ein System die Zusammenfassung von technisch-organisatorischen Mitteln zur autonomen Erfüllung eines Aufgabenkomplexes. In einem Arbeitssystem wird durch das Zusammenwirken von Arbeitenden und Arbeitsmitteln innerhalb der Arbeitsumgebung mit vorgegebenen Bedingungen eine Arbeitsaufgabe erfüllt (DIN EN ISO 6385 2016, S. 7). Nach ROPOHL (2009, 84ff.) ist ein System ein vereinfachtes Modell der realen Objekte, da es nicht die ganze Wirklichkeit, sondern jeweils nur bestimmte, für die Betrachtenden relevanten Aspekte, erfasst. Aufgrund dieser meist stark vereinfachten abstrakten Modelldarstellung ist die Betrachtung komplexer Arbeitssysteme möglich (ROPOHL 2012, S. 24). Dabei zeichnet sich ein System dadurch aus, dass es

- Beziehungen zwischen Attributen (Inputs, Outputs, Zustände etc.) aufweist (→ eine Funktion darstellt),
- aus miteinander verknüpften Teilen/Subsystemen besteht (→ eine Struktur aufweist) und
- von seiner Umgebung bzw. von einem Supersystem abgegrenzt wird (→ in eine Hierarchie eingebunden ist) (ROPOHL 2009, S. 77).

Aufbauend auf dem Systemverständnis nach ROPOHL (2012, S. 24) konkretisieren WARNECKE ET AL. (1975, S. 11) diese allgemeine Systemdarstellung am Beispiel der Montage. Das Montagesystem wird dabei als Teil eines hierarchisch übergeordneten Produktionssystems beschrieben, in dem das Montagesystem über den Material- und Informationsfluss mit anderen Teilsystemen, wie zum Beispiel der vorgelagerten Teilefertigung, verbunden ist (WARNECKE ET AL. 1975, S. 11). Bei der rein funktionalen Systembetrachtung entsteht eine Black-Box-Darstellung des Montagesystems mit dem Fokus auf der Hauptfunktion, der Umwandlung von Einzelteilen oder ersten Baugruppen, hin zu höherwertigen Baugruppen oder dem Endprodukt (WARNECKE ET AL. 1975, S. 12). Das Montagesystem enthält selbst wiederum Teilsysteme und Elemente, die nachfolgend durch die Systemdarstellungen nach REFA (1978) und deren Erweiterungen detailliert werden.

Laut REFA (1978, S. 69ff., S. 74f.) dient ein Arbeitssystem der Erfüllung einer Arbeitsaufgabe und wird durch folgende sieben Systembegriffe genauer beschrieben: Die

übergeordnete **Arbeitsaufgabe** stellt den Zweck des Arbeitssystems dar. Der darauf abgestimmte **Arbeitsablauf** ist die räumliche und zeitliche Koordination von Menschen, Betriebsmittel und Input, mit dem Ziel, die Eingabe hinsichtlich der Arbeitsaufgabe zu verändern oder zu verwenden. Der Arbeitsablauf gibt Auskunft darüber, wo (an welchem Arbeitsplatz), wann (in welcher zeitlichen Reihenfolge), was (das Arbeitsobjekt) und womit (mit welchen Menschen und Betriebsmitteln) der Input verändert wird. Der **Mensch** stellt zusammen mit den **Betriebsmitteln** die Kapazität des Arbeitssystems dar, welche gemäß der Arbeitsaufgabe den Input in einen definierten Output umwandelt. Der **Input** und **Output** eines Arbeitssystems können sowohl Arbeitsgegenstände, Informationen als auch Energie umfassen. Abschließend wird das Arbeitssystem von physikalischen (z. B. Klima, Licht, Lärm), organisatorischen (z. B. Materialbereitstellung) sowie sozialen (z. B. Betriebsklima) **Umwelteinflüssen** geprägt, die auf das System einwirken oder von diesem ausgehen. (REFA 1978, S. 67ff., S. 74f., 1985, S. 82, LANDAU ET AL. 2001, 7f.)

REFA (1978, S. 69) unterscheidet im industriellen Bereich zwischen folgenden drei Systemarten:

- **technische Systeme** (Maschinen-Systeme), welche aus Betriebsmitteln und Werkzeugen bestehen,
- **soziale Systeme** (Systeme von Menschen), welche aus Menschen bestehen, sowie
- **soziotechnische Systeme** (Mensch-Maschine-Systeme), in denen Menschen und Betriebsmittel interagieren, siehe Abbildung 2-4.

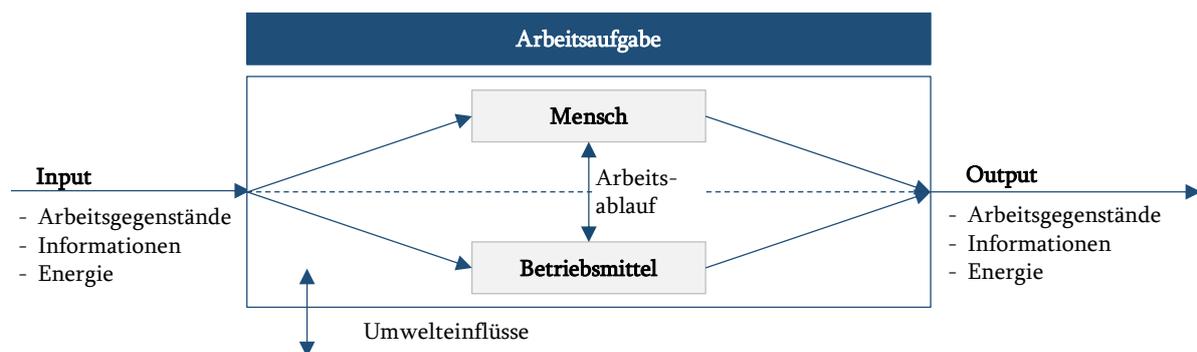


Abbildung 2-4: Soziotechnisches Arbeitssystem (in Anlehnung an REFA 1985, S. 82)

Die manuelle Montage zählt hierbei zu den soziotechnischen Systemen, da die Mitarbeitenden mit Hilfe der technischen Betriebs- und Arbeitsmittel die Arbeitsaufgaben ausführen (REFA 1978, S. 69, LANDAU ET AL. 2001, S. 6). Die Größe eines Arbeitssystems hängt dabei von der betrachteten Arbeitsaufgabe ab und kann einzelne Arbeitsplätze (Mikro-Arbeitssysteme) ebenso beschreiben wie ganze Abteilungen oder Unternehmen (Makro-Arbeitssysteme) (REFA 1978, 72f.). LANDAU ET AL. (2001, S. 7) ergänzen bei der Systemdarstellung nach REFA (1978) explizit, dass die Menschen das wichtigste Element

im Arbeitssystem darstellen, da sie als einziges aktives Element von sich aus tätig werden und inaktive Elemente, wie beispielsweise Betriebs- und Arbeitsmittel, in Bewegung setzen können. Selbst KI-basierte Roboter agieren regelbasiert, da die Handlungen nicht selbstgesteuert angestoßen sondern algorithmen-basiert durchgeführt werden. TROPSCUH ET AL. (2019, S. 143) spezifizieren zudem das Element Mensch im Arbeitssystem anhand der vier Kompetenzklassen (personale, aktivitäts- und handlungsorientierte, fachlich-methodische, sozial-kommunikative Kompetenzen) nach HEYSE & ERPENBECK (2004, S. XXI).

Aus arbeitspsychologischer und arbeitsergonomischer Sicht wird nach LEPLAT & CUNY (1977, 56ff.) bei der Beschreibung eines Arbeitssystems zusätzlich zur übergeordneten Arbeitsaufgabe der Fokus auf die tatsächliche Arbeitsausführung und die Auswirkungen/Effekte auf die Mitarbeitenden und die technischen und organisatorischen Aspekte der Produktion gelegt. Durch die separate Betrachtung der Mitarbeitenden als soziales System und der technischen und organisatorischen Aspekte der Produktion als technisches System, wird die Kombination beider Teilsysteme zum soziotechnischen Arbeitssystems über die Arbeitsaufgabe deutlich. Ein großer Einflussfaktor sind hierbei die Eigenschaften der Mitarbeitenden sowie die technischen Eigenschaften der Produktion. Außerdem werden die aus der Ausführung der Arbeitsaufgabe resultierenden Auswirkungen auf die Mitarbeitenden und die Effekte für die technischen und organisatorischen Aspekte der Produktion im Modell berücksichtigt. Resultierend daraus ergeben sich zwei Regelkreise, einer zwischen den Mitarbeitenden und ihren Effekten und ein zweiter zwischen den Eigenschaften der Produktion und ihren erzielten Leistungen (z. B. Qualität, Quantität), siehe Abbildung 2-5. Die arbeitspsychologische Beschreibung des Arbeitssystems integriert somit neben den Eigenschaften der Systemelemente und deren Interaktion über die Arbeitsaufgabe auch die resultierenden Effekte auf die Elemente Mitarbeitende und Produktion.

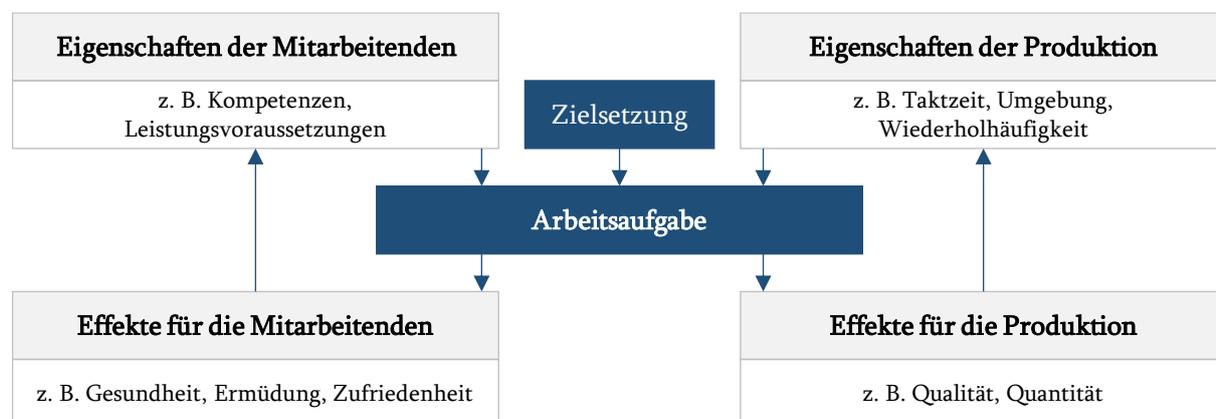


Abbildung 2-5: Arbeitspsychologisches Arbeitssystem nach LEPLAT & CUNY (1977, S. 56) mit dem Fokus auf die sozialen sowie technischen bzw. organisatorischen Aspekte der Produktion

2.2 Arbeitsplätze und Mitarbeitende

Um Arbeitsplätze und Mitarbeitende miteinander vergleichen zu können, gilt es, die Anforderungsarten der Arbeitsplätze zu analysieren (Abschnitt 2.2.1) und die Kompetenzen der Mitarbeitenden in der manuellen Montage zu identifizieren (Abschnitt 2.2.2).

2.2.1 Anforderungsarten

Anforderungsarten werden zur strukturierten Bewertung von Arbeitsplätzen genutzt, um einen systematischen Vergleich zwischen Arbeitsplatzanforderungen und Kompetenzen der Mitarbeitenden zu ermöglichen. Dies wird beispielsweise zur Personaleinsatzplanung oder zur Entgeltdifferenzierung verwendet. Mithilfe von Anforderungsarten können Anforderungsprofile der Arbeitsplätze strukturell gestaltet werden. Dabei werden die individuellen Ausprägungen der Anforderungsarten als Merkmale bezeichnet (BOKRANZ & KASTEN 2003, S. 217). Aus produktionstechnischer Sicht dient das Genfer-Schema als grundlegende Referenz zur Kategorisierung von Anforderungsarten im industriellen Umfeld (LINDNER-LOHMANN ET AL. 2012, S. 111). Dieses Schema wurde im Rahmen der Anforderungsarten nach REFA sowie bei Tarifverträgen genutzt und erweitert.

Die **Anforderungsarten des Genfer-Schemas** wurden 1950 auf der internationalen Konferenz für Arbeitsbewertung in Genf verabschiedet und sind seitdem Grundlage zahlreicher Arbeitsbewertungsverfahren (ULMER 2017, S. 50, LINDNER-LOHMANN ET AL. 2012, S. 111). Das Genfer-Schema basiert auf einer systematischen Einteilung der Arbeitsanforderungen in vier Arten: geistige Anforderung, körperliche Anforderung, Verantwortung und Umgebungseinflüsse (ULMER 2017, 50f.). Die geistigen und körperlichen Anforderungen werden zusätzlich in Können und Belastung unterteilt (REFA 1991, S. 43).

Die sechs **Anforderungsarten nach REFA** stellen eine Ergänzung des Genfer-Schemas dar und erweitern dieses durch die separate Listung der Kenntnisse und geistigen Belastung (geistige Anforderungen) sowie der Geschicklichkeit und muskelmäßigen Belastung (körperliche Anforderungen) (BULLINGER 1995, S. 230).

Die **tariflichen Verfahren zur Arbeitsbewertung** kombinieren Anforderungsarten des Genfer-Schemas und des REFA-Verfahrens (KRELL & WINTER 1997, S. 250). Diese Tarifverträge stellen in den meisten deutschen Produktionsbetrieben die Basis zur Entgeltermittlung dar. Die existierenden Bewertungsverfahren lassen sich grundsätzlich in summarische und analytische Verfahren unterscheiden (BOKRANZ & KASTEN 2003, S. 215). Bei *summarischen Verfahren* werden die Tätigkeiten eines Arbeitsplatzes als Ganzes einer

Tarifgruppe zugeteilt (BOKRANZ & KASTEN 2003, S. 216). Die Zuteilung erfolgt auf Basis der Merkmalsausprägungen der Anforderungsarten in der Tarifgruppenbeschreibung. In der in Bayern genutzten Einstufung werden folgende Anforderungsarten unterschieden: fachliche Qualifikation, Berufserfahrung, Fach- und Spezialkenntnisse sowie Handlungs- und Entscheidungsspielraum (IG METALL 2012). Im Rahmen *analytischer Verfahren* wird die Tätigkeit zunächst pro Anforderungsart einzeln bewertet und auf Basis der verrechneten Einzelwertungen einer Tarifgruppe zugeordnet (KRELL & WINTER 1997, S. 247). Tätigkeiten in der gleichen Tarifgruppe können dadurch unterschiedliche Ausprägungsmerkmale pro Anforderungsart aufweisen. Folgende fünf Anforderungsarten werden in Tarifverträgen genannt: Wissen und Können, Denken, Handlungsspielraum und Verantwortung, Kommunikation und Mitarbeitendenführung (SÜDWESTMETALL 2022). Abbildung 2-6 vergleicht das Genfer-Schema, das REFA-Schema und die tariflichen Verfahren (summarisch und analytisch).

| Genfer-Schema | REFA-Schema | summarische Verfahren | analytische Verfahren |
|---------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| geistige Anforderungen | Kenntnisse | fachliche Qualifikation | Wissen & Können |
| | geistige Belastung | Handlungs- & Entscheidungsspielraum | Denken |
| körperliche Anforderungen | Geschicklichkeit | Berufserfahrung | Wissen & Können |
| | muskelmäßige Belastung | Fach- & Spezialkenntnisse | |
| Verantwortung | Verantwortung | Handlungs- & Entscheidungsspielraum | Handlungsspielraum & Verantwortung |
| Umgebungseinflüsse | Umgebungseinflüsse | | |
| | | | Kommunikation |
| | | | Mitarbeitendenführung |

Abbildung 2-6: Vergleich des Genfer-Schemas, REFA-Schemas sowie der summarischen und analytischen tariflichen Verfahren (in Anlehnung an SCHETTGEN 1996, S. 120 und DOLLINGER 2021, S. 70)

Zur Quantifizierung der Anforderungsarten am Arbeitsplatz werden in Abschnitt 2.3.2 Messmethoden zur Erfassung der Belastungen erläutert. Nachdem die Anforderungsarten der Arbeitsplätze in der manuellen Montage untersucht wurden, folgt nun die Analyse der Kompetenzen der Mitarbeitenden, um einen Vergleich zwischen Arbeitsplatzanforderungen und Mitarbeitendenkompetenzen zu ermöglichen.

2.2.2 Kompetenzen

Die Definitionen des Kompetenzbegriffs variieren in der Literatur stark und sind oft nicht eindeutig und trennscharf von verwandten Begriffen, wie zum Beispiel Qualifikation, abgegrenzt (GNAHS 2007, S. 19). Der Kompetenzbegriff leitet sich aus den lateinischen Begriffen „competentia“ (dt.: Zusammentreffen) und „competens“ (dt.: angemessen) ab. GNAHS (2007, S. 20) folgert daraus, dass sich **Kompetenzen** beim zweckorientierten und angemessenen Handeln unter Einsatz des vorhandenen Wissens zeigen. Kompetenzen werden daher in situationsspezifischen Handlungen sichtbar und basieren auf erworbenem Wissen sowie vorhandenen Fähigkeiten und Fertigkeiten (ERPENBECK ET AL. 2017, S. 16).

Dabei entsteht **Wissen** aus der Verknüpfung von Informationen mit deren Bedeutung (NORTH 2016, 37f.). Im unternehmerischen Kontext wird zwischen Tätigkeitswissen, Prozesswissen und Auftragswissen unterschieden. Unter Tätigkeitswissen wird das notwendige Wissen zur Ausführung grundlegender Tätigkeiten verstanden, zum Beispiel Schrauben. Prozesswissen bezieht sich auf die Eingliederung und selbstständige Abarbeitung mehrerer einzelner Tätigkeiten in einer Arbeitsfolge, beispielsweise die vollständige Bearbeitung einer Produktvariante am Arbeitsplatz. Auftragswissen befähigt die Mitarbeitenden, die Aufgabe kundenorientiert auszuführen. (DOMBROWSKI ET AL. 2002, S. 313)

Fähigkeiten sind individuelle geistige und körperliche Voraussetzungen, wie beispielsweise Intelligenz, und bilden die Basis zum Erlernen von Fertigkeiten. Daher sind **Fertigkeiten** erlernte, automatisierte Tätigkeiten oder Vorgänge, welche auf Basis vorhandener Fähigkeiten und bereits erworbenen Wissens individuell aufgebaut werden (ERPENBECK & SAUTER 2013, S. 32).

Qualifikationen stellen die aktuellen Wissensbestände und Fertigkeiten einer Person in Form eines Nachweises oder einer Berechtigung zur Durchführung bestimmter Tätigkeiten oder eines Berufs dar (GNAHS 2007, S. 22, BLICKLE 2019, S. 238). Sie sind somit tätigkeitsbezogen (ERPENBECK ET AL. 2017, S. 17), wobei individuelle Eigenschaften der Mitarbeitenden kaum berücksichtigt werden (SCHLICK ET AL. 2018, S. 109). Der Führerschein stellt beispielsweise die Qualifikation zum Autofahren dar, wohingegen das Beherrschen des Fahrens die Kompetenz ist (HECHENLEITNER & SCHWARZKOPF 2006, S. 2). Die Kompetenzen sind somit Voraussetzung für den Erwerb von Qualifikationen (HECHENLEITNER & SCHWARZKOPF 2006, S. 2). Statische, einmalig durchgeführte Evaluationen der Qualifikationen sind aufgrund der Veränderungen im Produktionsumfeld und der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Mitarbeitenden nicht mehr zeitgemäß (METTERNICH ET AL. 2018, S. 74).

Nach dem Kompetenzverständnis von ERPENBECK ET AL. (2017, S. XXV) werden Kompetenzen in die folgenden vier **Kompetenzklassen** gegliedert, siehe Abbildung 2-7:



Abbildung 2-7: Kompetenzklassen (in Anlehnung an ERPENBECK ET AL. 2017, S. XXV)

- **Personale Kompetenzen** ermöglichen eine kritische Selbstreflexion, strukturierte Selbstorganisation sowie die Entwicklung von Idealen, Werten und einer produktiven Einstellung (SAUTER ET AL. 2018, S. 117). Beispiele hierfür sind Loyalität, Entscheidungsbildung, Belastbarkeit und Glaubwürdigkeit (HEYSE & ERPENBECK 2004, 3, 28).
- Zu **Aktivitäts- und Handlungskompetenzen** zählen aktives, zielgerichtetes Handeln, das auf die wertorientierte Realisierung von Vorhaben und Plänen gerichtet ist (SAUTER ET AL. 2018, S. 117, ERPENBECK ET AL. 2017, S. 25). Kompetenzen in dieser Klasse sind beispielsweise Tatkraft, Ausführungsbereitschaft, Initiative und Kompetenz für die Handhabung von Störungen (HEYSE & ERPENBECK 2004, S. 147, S. 159ff., S. 174).
- Die **Fach- und Methodenkompetenzen** bezeichnen das sinnorientierte Einordnen und Bewerten von Wissen sowie das methodisch strukturierte, fachliche und instrumentelle Bearbeiten von Aufgaben und Lösungen sowie das eigene Entwickeln von Arbeitsmethoden (ERPENBECK ET AL. 2017, S. 25). Im Gegensatz dazu resultiert Methodenkompetenz aus situationsübergreifend, flexibel einsetzbaren kognitiven Fähigkeiten, deren Basis Intelligenz und Expertise darstellen (BLICKLE 2019, S. 238). Beispiele für die Klasse der Fach- und Methodenkompetenzen sind Entscheidungs- und Beurteilungskompetenz, Maschinenkenntnisse, Problemlösefähigkeit, Arbeitstechniken und fachübergreifende Kenntnisse (GNAHS 2007, S. 28, HEYSE & ERPENBECK 2004, S. 458, S. 472).
- Zu den **sozial-kommunikativen Kompetenzen** zählen gemeinschaftliches, kreatives und verantwortungsbewusstes Verhalten sowie die gemeinsame Entwicklung neuer Vorhaben, Tätigkeiten und Ziele (ERPENBECK ET AL. 2017, S. 25, ANTON & WEILAND 1993, 23f.). Somit zeigen sich Kompetenzen dieser Klasse im Umgang mit anderen, beispielsweise durch Kooperationsfähigkeit, Beziehungsmanagement sowie Anpassungsfähigkeit (HEYSE & ERPENBECK 2004, S. 289ff., S.305ff.).

Der in der Literatur weit verbreitete Kompetenzatlas nach HEYSE & ERPENBECK (2004, S. XXI) unterteilt die vier Kompetenzklassen weiter in insgesamt 64 Kompetenzen, welche als Basis für zahlreiche Kompetenzübersichten und Kompetenzmodelle dienen (ROST 2014, S. 59). Führungskompetenzen werden in diesem Kompetenzatlas als Kombination einzelner Kompetenzen aller vier Kategorien angesehen.

Zur Darstellung der qualitativen und quantitativen Ausprägung von Kompetenzen lassen sich Kompetenzniveaus festlegen (SCHLICK ET AL. 2018, S. 115). In Anlehnung an RAUNER (2018, 26f.) und BFW - UNTERNEHMEN FÜR BILDUNG (2017, S. 28) können fünf aufeinander aufbauende Kompetenzniveaus unterschieden werden:

- **Anfänger:in:** Mitarbeitende besitzen keine Kompetenz.
- **Fortgeschrittene:r:** Die oberflächliche Orientierungs- und Überblickskompetenz reicht zum Bearbeiten der Arbeitsaufgabe unter Anleitung aus. Mitarbeitende besitzen nominelle Kompetenz.
- **Kenner:in:** Mitarbeitende verfügen über fachlich-instrumentelle Kompetenzen, mit denen sie erkennen, wie und warum Zusammenhänge bestehen, und können systemisch vorstrukturierte Aufgaben bearbeiten (NORTH 2016, S. 139). Mitarbeitende dieser Stufe besitzen funktionale Kompetenz.
- **Könnner:in:** Mitarbeitende sind in der Lage, mit fundierter Detail- und Funktionskompetenz problembehaftete Aufgaben theoriegeleitet zu bearbeiten. Dabei können Aspekte wie Wirtschaftlichkeit, Kundenorientierung und deren Zusammenhänge mit betrieblichen Arbeitsprozessen bei der Aufgabenausführung beachtet und interpretiert werden. Mitarbeitende dieser Stufe besitzen konzeptuelle Kompetenz.
- **Experte/Expertin:** Die Komplexität beruflicher Aufgaben kann unter Berücksichtigung vielfältiger betrieblicher und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen vollständig erfasst werden. Mit erfahrungsbasierter und fachsystematischer Vertiefungs-kompetenz können Probleme selbstorganisiert und intuitiv gelöst werden (NORTH 2016, S. 139). Die Mitarbeitenden auf dieser Stufe besitzen ganzheitliche Gestaltungskompetenz.

Die Unterscheidung verschiedener Kompetenzniveaus ist für eine passende Zuordnung von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden bei der Personaleinsatzplanung relevant. Stimmt das vom Arbeitsplatz geforderte Kompetenzniveau nicht mit dem bei den Mitarbeitenden vorhandenen überein, kann dies zu einer Fehlbeanspruchung und Qualitätsproblemen führen.

2.3 Belastung und Beanspruchung

Um die Einflüsse der Arbeitsplätze auf die Gesundheit der Mitarbeitenden zu verdeutlichen, wird in diesem Abschnitt zunächst auf das Belastungs- und Beanspruchungskonzept eingegangen (Abschnitt 2.3.1). Anschließend werden Verfahren zur Messung der Belastung und Beanspruchung diskutiert (Abschnitt 2.3.2).

2.3.1 Konzept

Das Belastungs-Beanspruchungs-Konzept nach ROHMERT (1983, 9f.) bildet die Grundlage für die Analyse arbeitsbeeinflussender Faktoren. Dabei werden die auf den Menschen wirkenden Einflüsse des Arbeitssystems (Belastungen) sowie die daraus resultierenden Reaktionen (Beanspruchungen) in einen Ursachen-Wirkungs-Zusammenhang gesetzt (SCHLICK ET AL. 2010, S. 38). Der Ursprung des Belastungs-Beanspruchungs-Konzepts ist in der technischen Mechanik begründet (SCHLICK ET AL. 2010, S. 38). Dort wird die Summe der auf ein Bauteil einwirkenden äußeren Kräfte als Belastung definiert, die zu inneren Spannungen im Bauteil führen (LUCZAK 1998, S. 31). Diese inneren Spannungen hängen von der vorliegenden Geometrie und den Werkstoffeigenschaften des Bauteils ab und werden als Beanspruchung des Bauteils aufgefasst (LUCZAK 1998, S. 31). Die Logik dieses mechanischen Konzepts wurde anschließend auf menschenorientierte Arbeitssysteme übertragen. Die auf die Mitarbeitenden wirkende Gesamtbelastung kann aus einer Vielzahl von Teilbelastungen bestehen, die nach Höhe und Dauer quantifizierbar sind (ROHMERT 1983, 9f.).

Nach DIN EN ISO 6385 (2016, S. 8) wird **Belastung** als die Gesamtheit aller erfassbaren äußeren Bedingungen und Anforderungen definiert, die gleichermaßen auf die Menschen einwirken. Im Arbeitssystem werden im Wesentlichen die folgenden drei Belastungsarten unterschieden: Arbeitsaufgabe (z. B. Heben, Montieren), Arbeitsumgebung (z. B. Lärm, Betriebsklima, Arbeitszeit) und Arbeitsmittel am Arbeitsplatz (z. B. Arbeitsplatzgestaltung, Informationsbereitstellung) (BUBB ET AL. 2015, S. 18, JOIKO ET AL. 2010, S. 11). Im Gegensatz dazu ist die **Beanspruchung** die personenbezogene Auswirkung der Belastung, die von den

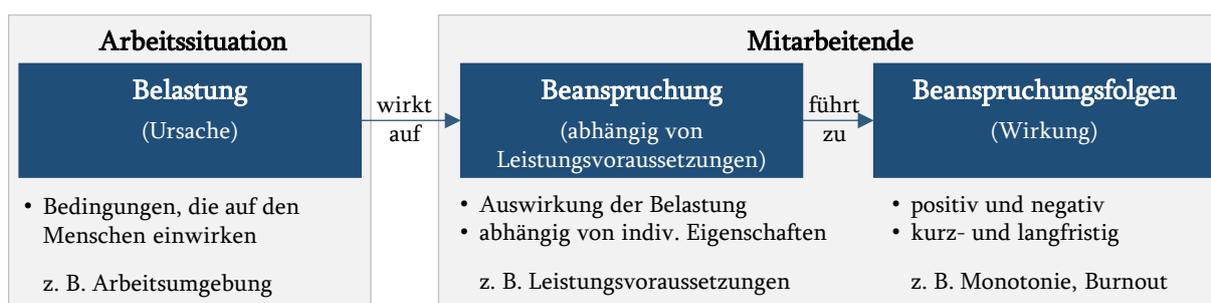


Abbildung 2-8: Belastungs-Beanspruchungskonzept (in Anlehnung an ROHMERT 1983, 9f. und METZ & ROTHE 2017, S. 7)

individuellen körperlichen und geistigen Eigenschaften des Individuums abhängt (DIN EN ISO 6385 2016, S. 8). Körperliche Eigenschaften sind hierbei beispielsweise Geschlecht, Alter oder Gesundheitszustand, wohingegen Bewältigungsstrategien und Motivation Beispiele für geistige Eigenschaften eines Menschen sind (JOIKO ET AL. 2010, S. 11). Aufgrund der individuellen Voraussetzungen der Arbeitspersonen kann die gleiche an einem Arbeitsplatz vorliegende Belastung zu unterschiedlichen Beanspruchungen führen (LUCZAK 1998, S. 31). Abbildung 2-8 visualisiert das Belastung-Beanspruchungskonzept.

Im deutschen Sprachraum sind die Begriffe Belastung und Beanspruchung klar voneinander abgegrenzt, wohingegen im englischsprachigen Sprachraum die Begriffsthematik regelmäßig diskutiert wird (GOODDAY & FRIEND 2019, S. 1, NACHREINER FRIEDHELM 2002, S. 521). Für den englischsprachigen Raum schlägt die DIN EN ISO 10075-1 (2017, S. 2) zwar die Begriffe ‚stress‘ für Belastung und ‚strain‘ für Beanspruchung vor, da der Begriff Stress im alltäglichen deutschen Sprachgebrauch eine negative Konnotation hat und mit individuell empfundenen Auswirkungen verbunden ist, kann dies zu Missverständnissen führen (NACHREINER FRIEDHELM 2002, S. 521). Zahlreiche Autoren nutzen daher die englischen Begriffe ‚workload‘ oder ‚job demand‘ für Belastung (z. B. BAKKER & DEMEROUTI 2017, JOIKO ET AL. 2010, S. 8). Hinsichtlich der Beanspruchung werden in der englischsprachigen Literatur teilweise ebenfalls die Begriffe ‚stress‘ und ‚workload‘ für die individuelle Beanspruchung verwendet (z. B. RUSNOCK & BORGHETTI 2018, DiDOMENICO & NUSSBAUM 2008, MARINESCU ET AL. 2018). Dieser Exkurs zu den Begrifflichkeiten in der deutsch- und englischsprachigen Literatur zeigt die Schwierigkeiten im internationalen Diskurs und die Bedeutung der Schaffung einer gemeinsamen Begriffsgrundlage auf.

Die Belastungen eines Arbeitsplatzes können sowohl zu positiven und negativen Beanspruchungen (Eustress und Distress) sowie zu kurz- als auch langfristigen Beanspruchungen und **Beanspruchungsfolgen** führen, siehe Abbildung 2-9 (JOIKO ET AL. 2010, S. 7, BÖCKELMANN & SEIBT 2011, S. 208).

| | | Beanspruchungsfolgen | |
|------|-------------|--|--|
| | | positiv | negativ |
| Zeit | kurzfristig | Aktivierung, Anregung, Fokussierung | Überforderung, Ermüdung, Stress Unterforderung, Sättigung, Monotonie |
| | langfristig | Weiterentwicklung körperlicher und geistiger Fähigkeiten | Burnout, Rückenschmerzen, Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Magen-Darm-Erkrankungen |

Abbildung 2-9: Beispiele an Beanspruchungsfolgen (in Anlehnung an JOIKO ET AL. 2010, S. 7 und BÖCKELMANN & SEIBT 2011, S. 208)

Kurzfristige positive Beanspruchung, welche bei einer optimalen Kombination aus Belastung und individuellen Leistungsvoraussetzungen auftritt, wirkt anregend, aufwärmend und aktivierend (BÖCKELMANN & SEIBT 2011, S. 209). Dieser Idealzustand von höchster Produktivität und Fokussierung wird auch als Flow bezeichnet (CSIKSZENTMIHALYI ET AL. 2014, 230ff.). *Langfristige positive Beanspruchungsfolgen* sind beispielsweise die Weiterentwicklung körperlicher und geistiger Fähigkeiten und damit gegebenenfalls das Erlernen neuer Kompetenzen. *Kurzfristige negative Beanspruchungsfolgen* sind Überforderungszustände, wie zum Beispiel Ermüdung und Distress sowie Unterforderungszustände, wie beispielsweise Sättigung und Monotonie (BÖCKELMANN & SEIBT 2011, S. 209).

Dabei wird der Unterforderungszustand Monotonie nach DIN EN ISO 10075-1 (2017, S. 8) als ein „langsam entstehender Zustand nachlassender Aktivierung [verstanden], der bei langdauernden, einförmigen und sich wiederholenden Arbeitsaufgaben oder Tätigkeiten auftreten kann und der hauptsächlich mit Schläfrigkeit, Müdigkeit, Leistungsabnahme und Leistungsschwankungen, Verminderung der Umstellungs- und Reaktionsfähigkeit sowie Zunahme der Schwankungen der Herzschlagfrequenz einhergeht“. Auswirkungen sind quantitative und qualitative Leistungsabnahmen, Koordinationsstörungen, eine steigende Fehlerrate sowie eine sinkende Reaktions- und Umstellfähigkeit (SCHLICK ET AL. 2018, S. 125). Monotonie tritt besonders bei einfachen, wiederholenden Tätigkeiten mit geringer Qualifikationsanforderung und bei fehlender Aufgabenvielfalt auf und kann durch einen Tätigkeitswechsel behoben werden (RUDOW 2004, S. 54). Der Unterforderungszustand der Sättigung ist nach DIN EN ISO 10075-1 (2017, S. 9) als ein „Zustand der nervös-unruhevollen, stark affektbetonten Ablehnung einer sich wiederholenden Tätigkeit oder Situation [definiert], bei der das Erleben des Auf-der-Stelle-Tretens oder des Nicht-weiterkommens besteht“. Die physische oder psychische Sättigung zeigt sich in Form von Frustration, Ärger, Leistungsabfall, Motivationsverlust, Gleichgültigkeit und Gereiztheit (RUDOW 2004, S. 54). Pausen, Mitspracherecht hinsichtlich der eigenen Tätigkeit, Information über den Gesamtzusammenhang der Arbeitsaufgaben sowie Aufgabenerweiterung und -bereicherung zählen beispielsweise zu den vorbeugenden Maßnahmen physischer und psychischer Sättigung (JOIKO ET AL. 2010, S. 17, OPPOLZER 2010, S. 126). Für die Beanspruchungen Monotonie und Sättigung sind laut KAISER (2016, S. 31) keine langfristigen Beanspruchungsfolgen bekannt, da die Kompensation durch einen Tätigkeitswechsel und Pausen sofort erreicht wird (SCHAPER 2019b, S. 420).

Überforderung durch Ermüdung entsteht durch informatorisch-mentale oder körperliche Arbeit, wie statische Haltearbeit, einseitige oder schwere dynamische Muskeltätigkeit. Sie

wird als „vorübergehende Beeinträchtigung der psychischen und körperlichen Funktionstüchtigkeit [definiert], die von Intensität, Dauer und Verlauf der vorausgegangenen psychischen Beanspruchung abhängt“ (DIN EN ISO 10075-1 2017, S. 8). Mögliche Folgen der Ermüdung können ein zunehmender Zeitbedarf für Tätigkeiten, abnehmende Bewegungskoordination und Muskelleistung, Fehlhandlungen oder das Vergessen von Informationen sein (JOIKO ET AL. 2010, S. 13). Die bei Überforderung auftretende Beanspruchungsreaktion Stress wird als ein Zustand erregter Gespanntheit definiert, der mit Gefühlen des Kontrollverlustes, der Bedrohung, des Ausgeliefertseins, der Hilflosigkeit und Abhängigkeit einhergeht (OPPOLZER 2010, S. 109). Stressursachen (Belastungen) am Arbeitsplatz können beispielsweise Bedingungen der Arbeitsaufgabe und -organisation (z. B. hohes Arbeitstempo), physische Arbeitsbedingungen (z. B. einseitige Körperhaltungen), soziale Bedingungen (z. B. Konflikte mit Kollegen) oder organisatorische Bedingungen sein (z. B. Vereinbarkeit von Berufs- und Privatleben) (BARTHOLD & SCHÜTZ 2010, S. 62). Langfristig negative Beanspruchungen treten bei anhaltender Ermüdung oder Stresszuständen auf und können zu chronischen, nur bedingt reversiblen Beanspruchungsfolgen, wie zum Beispiel Rückenschmerzen, Herz-Kreislauf- sowie Magen-Darm-Erkrankungen oder Burnout führen (MILCZAREK ET AL. 2009, S. 16, BARTHOLD & SCHÜTZ 2010, 47f.). Laut SCHAUFELI & GREENGLASS (2001, S. 501) wird Burnout als ein Zustand körperlicher, emotionaler und geistiger Erschöpfung verstanden, der durch eine langfristige Einbindung in emotional überfordernde Arbeitssituationen ausgelöst wird. Zudem kommt es bei anhaltendem Stress häufig zu vermehrtem Alkohol-, Drogen- und Zigarettenkonsum, einer erhöhten Unfallgefahr und Gewaltbereitschaft (QUICK ET AL. 1987, S. 23). Vor allem die langfristigen Folgen wirken sich aufgrund der abnehmenden Handlungskompetenzen und steigender Fehlzeiten negativ auf die Produktivität von Unternehmen aus. Der Zustand der Ermüdung kann nur durch Erholung revidiert werden (SCHLICK ET AL. 2018, S. 123).

Physische und psychische Belastung in der manuellen Montage

Die Abnahme der physischen und psychischen Gesundheit der Arbeitskräfte in der manuellen Montage spiegelt sich in zunehmendem Absentismus (Arbeitsunfähigkeitstage) und Präsentismus (anwesend mit verringerter Leistung) wider (MILCZAREK ET AL. 2009, S. 15, RIECHERT 2015, S. 7). Laut der TECHNIKER KRANKENKASSE (2021, S. 74) belaufen sich die jährlichen Arbeitsunfähigkeitstage für Metall- und Elektroberufe pro Person auf etwa 20,3 Tage. Die Fehlzeiten führen beispielsweise zu Planungs- und Terminschwierigkeiten, zusätzlichen Arbeitsbelastungen für Kollegen und Kolleginnen der Arbeitsgruppe und Produktivitätsverlusten (JOIKO ET AL. 2010, S. 15).

In der manuellen Montage treten physische Belastungen vor allem durch die bei der Aufgabenausführung geforderte statische Haltearbeit und einseitige dynamische Arbeit auf (SCHLICK ET AL. 2018, S. 143). Dabei führen besonders kurzzyklische repetitive Arbeitsinhalte mit wiederkehrender Beanspruchung einzelner Muskelgruppen zu langfristigen Schäden (HEIDL ET AL. 2018, S. 121). Dies begünstigt das Auftreten von entzündlichen und degenerativen Erkrankungen des Bewegungsapparats (z. B. Repetitive-Strain-Injury-Syndrom, Karpaltunnelsyndrom), die allgemein unter dem Begriff Muskel-Skelett-Erkrankungen (MSE) zusammengefasst werden. Besonders betroffene Bereiche sind hierbei Nacken, Rücken, Schulter, Handgelenke und Hände (HEIDL & BOESPFLUG 2017, S. 216). Dabei treten gesundheitliche Schäden aus manuellen Montageprozessen nur auf, wenn Intensität, Dauer und Wiederholung das individuelle Leistungsvermögen der Mitarbeitenden überschreiten (PUTZ-ANDERSON ET AL. 1997, S. XIV).

Psychische Belastungen stellen in der manuellen Montage vor allem monotone und wiederkehrende Tätigkeitsausführungen dar (KLIPPERT 2018, S. 53). Das Monotonieempfinden wird verstärkt, wenn die Mitarbeitenden über einen längeren Zeitraum die gleiche, kurzzyklische Arbeitsaufgabe am gleichen Arbeitsplatz erledigen (BULLINGER & LUNG 1994, S. 218). Andererseits werden die Montagetätigkeiten durch die zunehmende Variantenvielfalt der kundenindividuellen und der damit verbundenen häufigen Wechsel kognitiv deutlich komplexer (BORNEWASSER ET AL. 2018, S. 265). Zum Umgang mit der ansteigenden Komplexität und zur Unterstützung der Mitarbeitenden kommen in der manuellen Montage vermehrt digitale Assistenzsysteme zum Einsatz (BLÄSING ET AL. 2021, S. 268). Falls Mitarbeitende nicht die für einen Arbeitsplatz benötigten Kompetenzen aufweisen und zum Beispiel die Informationsmenge der Assistenzsysteme nicht bewältigen können, kann es zu einer mentalen Überforderung und einem daraus resultierenden Anstieg der Fehlerquote kommen (RIECHERT 2015, S. 31, MARRENBACH & GEIGER 2019, S. 360).

Nach der Abgrenzung der Begrifflichkeiten Belastung und Beanspruchung sowie der Erläuterung der Zusammenhänge folgt im nächsten Abschnitt eine Übersicht und Kategorisierung von Methoden zur Messung physischer und psychischer Belastung und Beanspruchung.

2.3.2 Messverfahren

Das Zitat „If you can't measure it, you can't manage it“, welches unter anderem den Ökonomen Peter Drucker oder Henry Deming zugesprochen wird (COLLIGNON 2021, S. I), unterstreicht die Bedeutung des Messens von Belastung und Beanspruchung, um fundierte Aussagen treffen und gesundheitserhaltende Maßnahmen ableiten zu können.

Nach SCHLICK ET AL. (2018, S. 38) können die empirischen Messmethoden in vier Kategorien unterteilt werden. Diese sind Befragungen, Beobachtungen, physiologische und physikalische Messmethoden, siehe Abbildung 2-10. Die am meisten verwendeten Methoden sind die Befragung und Beobachtung, welche bei Arbeitsanalysen oft kombiniert als Beobachtungsinterviews eingesetzt werden (SCHAPER 2019a, S. 390). Im Folgenden werden die vier Kategorien der Messmethoden kurz beschrieben, bevor anschließend auf konkrete Beispiele zur Messung physischer und psychischer Belastung und Beanspruchung eingegangen wird.

| Kategorien der Messmethoden | | | |
|---|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Befragung | Beobachtung | physiologische Messmethoden | physikalische Messmethoden |
| subjektive Sichtweise, persönliche Einschätzung | verbale, non-verbale Verhaltensweisen | körperliche Reaktionen | Umgebungsbedingungen |

Abbildung 2-10: Kategorien der Messmethoden (in Anlehnung an SCHLICK ET AL. 2018, S. 38)

Befragungen eignen sich besonders zur Analyse von subjektiven Aspekten, die schwer von außen zu beobachten sind, wie zum Beispiel individuelle Beanspruchungen oder soziale Beziehungen. Der Fokus liegt auf der subjektiven Sichtweise und der persönlichen Einschätzung der Befragten, zum Beispiel hinsichtlich der physischen und psychischen Beanspruchung (KAUFFELD & MARTENS 2019, S. 266). Generell können Befragungsmethoden mündlich oder schriftlich durchgeführt werden (HÄDER 2015, S. 191) und sollten möglichst standardisiert aufgebaut sowie angewendet werden.

Eine **Beobachtung** ist das direkte, unmittelbare Registrieren verbaler und non-verbaler Verhaltensweisen (HÄDER 2015, S. 306). Beobachtungen im Rahmen einer Arbeitsanalyse erfassen Merkmale der Arbeitstätigkeit sowie das Verhalten der Mitarbeitenden und dienen beispielsweise der Erfassung der physischen und psychischen Arbeitsplatzgestaltung oder der Analyse des Arbeitsablaufs. Die Beobachtungsmethode lässt sich zudem in direkte und indirekte Beobachtungen unterscheiden, je nachdem, ob die beobachtende Person als solche erkennbar ist oder nicht (SCHAPER 2019a, S. 392). Zusätzlich kann unterschieden werden, ob es sich um eine offene (Beobachtende stehen direkt bei den Mitarbeitenden) oder verdeckte (eine anonyme Person beobachtet unbemerkt) Beobachtung handelt (LISSMANN 2013, S. 88). Bei der Beobachtungsmethode ist zu berücksichtigen, dass Schwankungen des Arbeitsprozesses nicht zwingend in der Beobachtungsdauer auftreten und somit nur eine Momentaufnahme vorliegt (NERDINGER ET AL. 2008, S. 360). Um einen umfassenderen Einblick bei der Beobachtung zu erlangen, bieten sich Multimomentaufnahmen beispielsweise im Rahmen einer zeitlichen Längsschnittstudie an. Dabei wird die gleiche Situation oder der gleiche Arbeitsablauf zu verschiedenen Zeitpunkten strichprobenartig betrachtet (SCHAEFFER 1961, S. 73). Darüber hinaus ist

anzumerken, dass durch die Beteiligung einer beobachtenden Person die Methode subjektive Einflüsse aufweist.

Physiologische Messmethoden erfassen und quantifizieren körperliche Reaktionen, wie beispielsweise Herzrate, Muskelaktivität, Atmung oder Lidschlussfrequenz. Da diese Vitalparameter meist nicht willkürlich von den Versuchspersonen beeinflusst werden können, gelten diese Messmethoden als objektiv (DÖRING & BORTZ 2016, S. 501). Aufgrund des technologischen Fortschritts in den letzten Jahren und der Weiterentwicklung der Sensortechnologien sind zahlreiche neue Wearables auf den Markt gekommen, welche Vitalwerte einfach und kontinuierlich messen können (BUBB ET AL. 2015, S. 641). Wearables sind eine Untergruppe von Smart Devices, die direkt am oder im Körper getragen werden. In diese Geräte sind Sensoren, Kameras und Mikrofone integriert, die persönliche Daten und Daten des Umfelds erfassen, sammeln und über Internettechnologien weiterleiten (EUROPEAN COMMISSION 2016, S. 4). Auf Basis der Veränderung von Vitalwerten können Rückschlüsse auf die individuelle Beanspruchung der Mitarbeitenden gezogen werden (SCHAPER 2019a, S. 394). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass nicht nur die individuelle Beanspruchung zu Veränderungen der Vitalwerte führen kann, sondern auch Unterschiede der physikalischen Umgebungsbedingungen, wie zum Beispiel Raumtemperatur oder Luftfeuchtigkeit (BUBB ET AL. 2015, S. 641).

Physikalische Messmethoden erfassen die Umgebungsbedingungen der Arbeitstätigkeit, wie beispielsweise Lärm, Klima und Licht (NERDINGER ET AL. 2008, S. 360). Die objektiven Ergebnisse physikalischer Messmethoden werden meist mit den subjektiven Beanspruchungen der Mitarbeitenden verglichen, welche beispielsweise mittels einer Befragung erhoben wurden, und in Relation zueinander gesetzt (NERDINGER ET AL. 2008, 360f.).

Die beschriebenen vier Kategorien der Messmethoden stellen die Basis für die nachfolgenden Methoden zur Messung physischer und psychischer Belastung und Beanspruchung sowie zur Erfassung von Leistungsvoraussetzungen dar. Für eine ganzheitliche Analyse der Belastung und Beanspruchung ist eine Kombination aus subjektiven und objektiven Messmethoden zu wählen.

Messung der Belastung

Bei der **Messung der Belastung** des Arbeitsplatzes werden personenneutrale Aspekte bewertet, die sich physisch und psychisch auf die Mitarbeitenden auswirken. Zur Ermittlung **physischer Belastung** gibt es zahlreiche standardisierte Verfahren, die seit einigen Jahren erfolgreich in der Industrie genutzt werden. Diese bewerten vor allem

Bewegungen, die Handhabung von Lasten und Körperhaltungen am Arbeitsplatz. Die in der Literatur am häufigsten verbreiteten Methoden sind hierbei das *Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS)*, die *Leitmerkalmethode (LMM)* und das *Occupational Risk Assessment (OCRA)* (OTTO & SCHOLL 2011, S. 278, OTTO & BATTALIA 2017, S. 468, ARKHIPOV ET AL. 2018, S. 64), die im Folgenden erläutert werden.

- Die Beobachtungsmethode *Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS)* nach SCHAUB ET AL. (2013) erfasst Arbeitshaltungen und -bewegungen, Aktionskräfte des gesamten Körpers und des Hand-Finger-Systems, manuelle Handhabungsvorgänge sowie Belastungen der oberen Gliedmaßen. Die Methode ist speziell für die Analyse von Montageaufgaben in der Automobilindustrie ausgelegt, wobei die Bewertung der einzelnen Aspekte zu einem Punktwert führt, der als Summe das Ausmaß der körperlichen Belastung angibt. Je höher diese Punktzahl ist, desto höher ist das Risiko von Muskel-Skelett-Erkrankungen für Arbeitnehmende. (SCHAUB ET AL. 2013)
- Die *Leitmerkalmethode (LMM)* wird als Beobachtungsmethode während der Arbeitsausführung angewendet. Es gibt sechs Arten der LMM: manuelles Heben, Halten und Tragen (LMM-HHT), manuelles Ziehen und Schieben (LMM-ZS), manuelle Arbeitsprozesse (LMM-MA), Ausübung von Ganzkörperkräften (LMM-GK), Körperfortbewegung (LMM-KB) und Körperzwangshaltungen (LMM-KH) (BAUA 2019, S. 4). Jede Version der LMM beinhaltet die Berechnung eines Risikowerts, welcher Auskunft über nötige Handlungsmaßnahmen zur Verbesserung der Arbeitsplatzergonomie gibt. (BAUA 2019)
- Das *Occupational Risk Assessment (OCRA)* nach OCCHIPINTI (1998) wird zur Bewertung von repetitiven Handlungen verwendet, die mit den oberen Gliedmaßen ausgeführt werden. Der OCRA-Index beschreibt das Verhältnis zwischen der tatsächlichen und der empfohlenen Häufigkeit der Arbeitstätigkeit, wobei verschiedene Parameter, wie die angewendeten Kräfte, die Körperhaltung und zusätzliche Risikofaktoren (z. B. Vibrationen), berücksichtigt werden (OCCHIPINTI 1998, S. 1292). Diese Methode wird ebenfalls im Rahmen einer Beobachtung durchgeführt.

Seit dem Jahr 2013 ist in Deutschland die Erfassung **psychischer Belastung** bzw. Gefährdung am Arbeitsplatz zusätzlich zur physischen Bewertung gesetzlich vorgeschrieben (SANDROCK & STAHN CATHARINA 2017, S. 1). Häufig genutzte Methoden im deutschsprachigen Raum sind hierfür das *Kompaktverfahren Psychische Belastung (KPB)*, die *psychologische Bewertung von Arbeitsbedingungen Screening für Arbeitsplatzinhaber II (BASA-II)*, und die *Analyse psychischer Belastung in der Arbeit (RHIA)*, die im Folgenden erläutert werden.

- Das ***Kompaktverfahren Psychische Belastung (KPB)*** ist ein Beobachtungsinterview des Instituts für angewandte Arbeitswissenschaft (ifaa), mit dem die psychische Belastung an den Arbeitsplätzen erfasst werden kann (SANDROCK & STAHN CATHARINA 2017, S. 2). Merkmalsbereiche sind hierbei Arbeitsinhalt/Arbeitsaufgabe, Arbeitsorganisation, soziale Beziehungen und Arbeitsumgebung. Das KPB dient als Bewertungshilfe für psychische Belastung und gibt keine Grenzwerte vor, weswegen die abzuleitenden Maßnahmen individuell getroffen werden müssen (SANDROCK & STAHN CATHARINA 2017, S. 19).
- Die ***psychologische Bewertung von Arbeitsbedingungen Screening für Arbeitsplatzinhaber II (BASA-II)*** nach RICHTER & SCHATTE (2008) ist ein Beobachtungsinterview, welches die vorherrschenden Arbeitsbedingungen aus arbeitsplatzbezogener, arbeitsumweltbezogener, allgemeiner, organisatorischer, sozialer, personenbezogener, tätigkeitsbezogener und betriebsspezifischer Sicht bewertet (RICHTER & SCHATTE 2008, S. 43). Mit Hilfe des BASA-II können Gestaltungs- und Diskussionsbedarfe an einem Arbeitsplatz ermittelt werden (RICHTER & SCHATTE 2008, S. 61).
- Das ***Verfahren zur Ermittlung von Regulationshindernissen in der Arbeitstätigkeit (RHIA)*** nach LEITNER ET AL. (1987) erfasst Regulationsbehinderungen, wie zum Beispiel Überforderungen (Monotonie, Zeitdruck, Umgebungsbedingungen), Erschwerungen und Unterbrechungen im Rahmen eines Beobachtungsinterviews. Mit Hilfe der RHIA-Methode können die Anforderungen der Arbeitstätigkeit sowie die psychische Belastung der Tätigkeit erfasst und Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden. (OESTERREICH & VOLPERT 1998, 71ff.)

Messung von Leistungsvoraussetzungen

Häufig angewendete Methoden zur Messung **physischer Leistungsvoraussetzungen** von Mitarbeitenden sind die Befragungsmethoden *Work Ability Index (WAI)* und *Biotality Index (BI)* sowie die *Handkraftmessung* als Beispiel für physiologische Messmethoden (MUSALEK & KIRCHENGAST 2017, BÖRNER 2019, S. 70). Zur Messung **psychischer Leistungsvoraussetzungen** werden Befragungen wie die *Screening Scale for Chronic Stress (SSCS)* genutzt (WELTERMANN ET AL. 2020, S. 10). Die Verfahren werden nachstehend erörtert.

- Der ***Work Ability Index (WAI)*** ist ein Screening-Instrument für Gesundheit und Sicherheit am Arbeitsplatz, das Auskunft über die Übereinstimmung zwischen den Arbeitsanforderungen und den individuellen Fähigkeiten und Fertigkeiten einer Person gibt (GIESERT 2018, S. 7). Der Fragebogen besteht aus sieben Fragenkategorien zur Selbsteinschätzung der eigenen Arbeitsfähigkeit (z. B.

körperliche und geistige Arbeitsfähigkeit, Arbeitseinschränkungen, Erkrankungen). Je höher der Wert des WAI ist, desto besser ist die Arbeitsfähigkeit einer Person (GIESERT 2018, S. 8).

- Der *Biotality Index (BI)* definiert die körperliche Vitalität und Leistungsfähigkeit von Beschäftigten anhand von Faktoren des privaten und beruflichen Lebens (BARTENSCHLAGER & NÜRNBERG 2019, S. 26). Der Fragebogen beinhaltet 40 Fragen in 13 Kategorien, wie Bewegung, Ernährung oder Vorerkrankungen (BARTENSCHLAGER & NÜRNBERG 2019, 83ff.). Je höher der BI-Wert ist, desto jünger wird das subjektive Alter im Vergleich zum kalendarischen Alter eingeschätzt (BARTENSCHLAGER & NÜRNBERG 2019, S. 90).
- Die *Messung der Handkraft* gehört zu den physiologischen objektiven Messmethoden und liefert eine Aussage bezüglich der körperlichen Leistungsfähigkeit einer Person. Die Handkraft wird mit Hilfe eines Dynamometers im Sitzen gemessen und ist abhängig von Alter, dominanter Hand und Geschlecht (MUSALEK & KIRCHENGAST 2017, S. 8). Eine hohe Handkraft wird mit einer guten körperlichen Verfassung verbunden (BOHANNON 2008, S. 8).
- Die *Screening Scale for Chronic Stress (SSCS)* eignet sich dazu, einen ersten Eindruck zur Stressbelastung der Mitarbeitenden zu erlangen. Die SSCS ist eine psychologische Selbsteinschätzungsmethode zur Identifizierung verschiedener Bereiche von chronischem Stress. Je niedriger der Wert der SSCS ist, desto weniger chronischer Stress liegt bei den Arbeitnehmenden vor. (SCHULZ ET AL. 2004)

Messung der Beanspruchung

Bei der Messung der physischen und psychischen Beanspruchung steht die Analyse individueller, subjektiver Empfindungen im Mittelpunkt. Die **physische Beanspruchung** bezieht sich dabei auf die Erfassung körperlicher Anstrengung. Häufig genutzte Methoden sind hier die Borg-Skala sowie die Messung von Vitalwerten (MANGHISI ET AL. 2020, S. 98, DODE ET AL. 2016, S. 3109, YOUSIF ET AL. 2019, S. 1, NICOLÒ ET AL. 2017, S. 2).

- Das *BORG-Rating of Perceived Exertion (Borg – Bewertung der wahrgenommenen Anstrengung)* ist ein Fragebogen zur Selbsteinschätzung der körperlichen Beanspruchung auf einer Skala von 6 (keine Anstrengung) bis 20 (hohe Anstrengung) (BORG 1970, 92f.).
- Mit Hilfe der *Messung von Vitalwerten* können Rückschlüsse auf die physische Beanspruchung getroffen werden. Parameter sind hierfür zum Beispiel die Messung der Muskelaktivität mit Elektromyographie (EMG) (FORSMAN ET AL. 2002, S. 535) oder die Messung der Atemfrequenz (YAMAMOTO ET AL. 2019, 2741f.).

Bei der Messung **psychischer Beanspruchung** sind häufig verwendete Methoden der *NASA-Task-Load-Index (NASA-TLX)*, die Befragung mit Hilfe des *Instantaneous Self Assessments (ISA)* und die *Messung physiologischer Vitalparameter* (BÖCKELMANN & SEIBT 2011, S. 215, NOYES & BRUNEAU 2007, S. 514, HART 2006, S. 905), welche nachfolgend beschrieben werden.

- Der *NASA-Task-Load-Index (NASA-TLX)* nach HART & STAVELAND (1988) gibt Auskunft über die subjektive Arbeitsbelastung in den sechs Dimensionen geistige Anforderung, körperliche Anforderung, Zeitbedarf, Leistung, Anstrengung und Frustration (HART & STAVELAND 1988, S. 169). Die einzelnen Punktwerte (0 bis 10) pro Dimension werden bei der Variante Task-Load-Index einander gegenübergestellt und nach subjektiver Bedeutung gewichtet. Bei der Variante Raw-Task-Load-Index (NASA-RTLX) fällt diese zusätzliche Gewichtung weg. Je nach Anwendungsfall und zu berücksichtigender Einflussfaktoren (Gewichtung der Dimensionen) entscheidet ist die Verwendung des TLX oder RTLX zu untersuchen. Falls, wie in der vorliegenden Arbeit, alle Dimensionen gleich bedeutend in die Bewertung eingehen sollen, ist nach HART (2006, S. 906) die Verwendung des RTLX ausreichend. Am Ende werden alle Punktwerte zu einem Gesamtwert zusammengefasst, der Auskunft über die psychische Gesamtbeanspruchung gibt (HART 2006, S. 904).
- Das *Instantaneous Self Assessment (ISA)* ist eine kurze Selbsteinschätzung der aktuellen mentalen Belastung während einer Aufgabenausführung auf einer Skala von 1 (gering) bis 5 (hoch) (TATTERSALL & FOORD 1996, 741f.). Die Abfrage kann sowohl mündlich im Kurzinterview, schriftlich oder reaktiv in kurzen Zeitabständen erfolgen (alle 2 bis 5 Minuten) (CASTOR ET AL. 2003, S. 46).
- Die *Messung von Vitalparametern* kann Auskunft über die psychische Beanspruchung einer Person geben. Hierbei genutzte Parameter sind beispielsweise die Herzrate (HR) und die Herzratenvariabilität (HRV) (BAIG & KAVAKLI 2019, S. 4, KIM ET AL. 2018, S. 243).

Abschließend wird in diesem Abschnitt auf den **Anwendungsbereich der Forschungsmethoden** eingegangen. Diese können entweder in Laborumgebung oder direkt in der Praxis, im Feld, angewendet werden. Im Rahmen der **Laborforschung** finden die Experimente und Studien in eigens für deren Durchführung eingerichteten bzw. ausgestatteten Räumen statt (BAUR & BLASIUS 2014, S. 205). Bei Laborexperimenten wird meist nicht die gesamte Arbeitstätigkeit, sondern nur ein Ausschnitt des Arbeitsverhaltens abgebildet (SCHAPER 2019a, S. 394). Im Rahmen von Laborexperimenten und Studien können bestimmte Arbeitskriterien bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen gezielt

verändert werden. Im Gegensatz zur Laborforschung findet die **Feldforschung** in der natürlichen, nicht speziell für das Experiment erstellten Arbeitsumgebung der Probanden und Probandinnen statt (BAUR & BLASIUS 2014, S. 205). Durch den Einbezug der realen Umgebung wird der Nutzen für die Praxis sichergestellt.

Mit Hilfe der in diesem Abschnitt beschriebenen Methoden können physische und psychische Beanspruchung erfasst werden. Darauf aufbauend gilt es, die gemessenen Daten zum Erhalt der Mitarbeitendengesundheit zu nutzen. Eine Möglichkeit ist hierbei die beanspruchungsorientierte Personaleinsatzplanung. Der nachfolgende Abschnitt geht daher genauer auf die Personaleinsatzplanung in der manuellen Montage ein.

2.4 Personaleinsatzplanung

Im Rahmen dieses Abschnitts wird zunächst eine grundlegende Wissensbasis bezüglich der Personaleinsatzplanung in der Montage geschaffen. Zunächst erfolgt eine Einordnung der Charakteristika der Personaleinsatzplanung (Abschnitt 2.4.1), bevor anschließend die einzelnen Organisationsformen erläutert werden (Abschnitt 2.4.2).

2.4.1 Einordnung

Die Personaleinsatzplanung ist neben der Personalbedarfsplanung (benötigte Mitarbeitende) und der Personalausstattung (verfügbare Mitarbeitende) ein Teil der übergeordneten Personalplanung eines Unternehmens (SPENGLER ET AL. 2019, S. 20). Dabei baut die Einsatzplanung auf der Personalbedarfsplanung und der Personalausstattung auf, siehe Abbildung 2-11 (SPENGLER ET AL. 2019, S. 21).

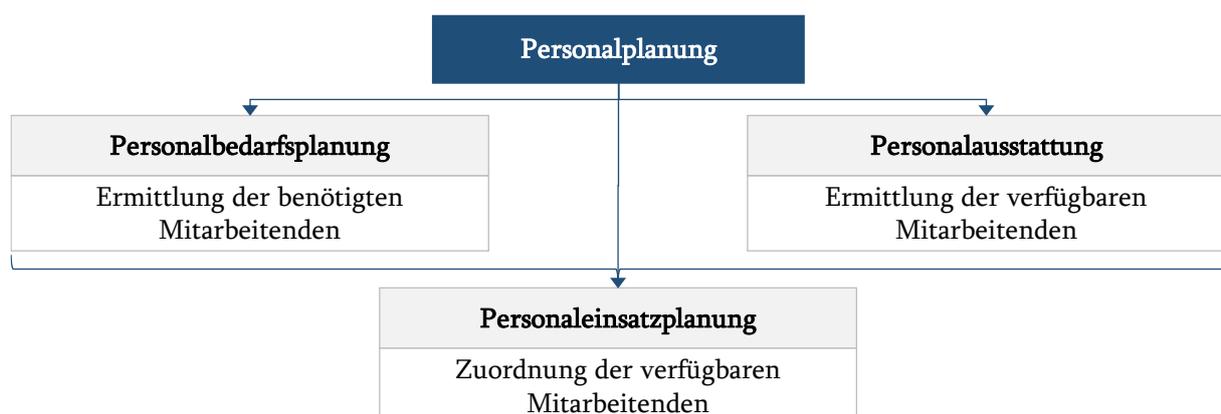


Abbildung 2-11: Kategorien der Personalplanung nach SPENGLER ET AL. (2019, S. 21)

Unter Personaleinsatzplanung wird die bestmögliche zeitliche, örtliche, quantitative und qualitative Zuordnung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen verstanden (LINDNER-LOHMANN ET AL. 2012, S. 79, WIESNER 1980, S. 269). Das Ziel ist dabei ein möglichst

effizienter und nachhaltiger Einsatz der Ressource Mensch, bei dem die richtige Anzahl an Mitarbeitenden mit den richtigen Kompetenzen zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Arbeitsplatz verfügbar ist (SPENGLER ET AL. 2019, S. 21). Bei der Zuordnung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen erfolgt ein Vergleich zwischen den Anforderungsprofilen der Arbeitsplätze und den Kompetenzprofilen der Mitarbeitenden (SPENGLER ET AL. 2019, S. 21, COHRS 2015, S. 146). Dabei wird eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen den Anforderungsprofilen der Arbeitsplätze und den Mitarbeitenden-Profilen angestrebt. Bei der Personaleinsatzplanung können vier Formen unterschieden werden: die quantitative, qualitative, zeitliche und räumliche Personaleinsatzplanung. Das optimale Ergebnis resultiert aus der Kombination aller Formen.

- Bei der **quantitativen Personaleinsatzplanung** steht der zahlenmäßige Vergleich zwischen dem erwarteten Personalbedarf und dem vorhandenen, verfügbaren Personal im Mittelpunkt (KOLB & WERNER 1978, S. 5). Dieser quantitative Vergleich wird meist sowohl frühzeitig in Bezug auf Neueinstellungen, Weiterqualifizierungen und Austritten (Jahresplanung), als auch sehr kurzfristig im Rahmen der täglichen Zuordnung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen durchgeführt (Tagesplanung) (KOLB & WERNER 1978, S. 6).
- Die **qualitative Personaleinsatzplanung** legt den Fokus auf den Vergleich der vorhandenen Kompetenzen der Mitarbeitenden mit den Anforderungen der Arbeitsplätze (KOLB & WERNER 1978, S. 16). Basierend auf diesem Vergleich erfolgt der Personaleinsatz und erforderliche Weiterbildungsmaßnahmen oder qualitative Neueinstellungen werden vorgenommen (KOLB & WERNER 1978, 31f.).
- Die **zeitliche Komponente** bezieht sich langfristig gesehen auf saisonale Personalbedarfsschwankungen bei Unternehmen, wie beispielsweise bei der Produktion von Pistenraupen im Sommer. Bei der kurzfristigen zeitlichen Planung steht der Beginn und die Dauer des Personaleinsatzes im Vordergrund (SCHOLZ 2014, S. 641)
- Die **örtliche Komponente** gibt Auskunft über den Einsatzort, dies können langfristig zum Beispiel verschiedene Unternehmensstandorte und kurzfristig zum Beispiel unterschiedliche Arbeitsplätze sein (SCHOLZ 2014, S. 641).

Eine ganzheitliche Personaleinsatzplanung soll zudem robust gegenüber kurzfristigen Änderungen sein, um die Personaldeckung zu gewährleisten. Die Robustheit eines Systems hängt sowohl von der Anzahl der qualifizierten Arbeitskräfte für einen Arbeitsplatz als auch von den damit verbundenen Qualifikationskosten zum primären Anlernen und kontinuierlichen Training ab. Erfüllen mehrere Mitarbeitende die Anforderungen eines

bestimmten Arbeitsplatzes, so können durch Urlaub, Krankheit oder Weiterbildung entstehende Fehlzeiten flexibler ausgeglichen werden. (DENKENA ET AL. 2017, S. 641)

Der Personaleinsatz in der manuellen Montage ist stark durch die von F. W. Taylor begründete Arbeitsteilung beeinflusst. Dabei sind die Mitarbeitenden über einen längeren Zeitraum für wiederkehrende und standardisierte Teiltätigkeiten mit geringem zeitlichen Arbeitsumfang zuständig (TAYLOR & WALLICHS 1914, S. 86, S. 129). Dieser hohe Grad an Arbeitsteilung, der für die Beschäftigten mit monotonen Aufgaben, streng abgegrenzten Arbeitsinhalten und wenig Handlungsspielraum einhergeht, kann zu einseitiger körperlicher und mentaler Beanspruchung führen, beispielsweise aufgrund von Taktbindung und Monotonie (WIENDAHL 2010, S. 42). Um den nachteiligen Auswirkungen der Spezialisierung entgegenzuwirken, werden verschiedene Organisationsformen bei der Personaleinsatzplanung genutzt (SCHLICK ET AL. 2010, S. 506). Im nachfolgenden Abschnitt wird genauer auf die einzelnen Organisationsformen der Personaleinsatzplanung eingegangen.

2.4.2 Organisationsformen

Nach SCHMIDT (2002, 53ff.) werden vier verschiedene Organisationsformen der Personaleinsatzplanung unterschieden: Job Rotation, Job Enlargement, Job Enrichment und teilautonome Arbeitsgruppe, siehe Abbildung 2-12. Die vier Organisationsformen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Tätigkeitsspielraums (horizontal) und ihres Entscheidungsspielraums (vertikal).

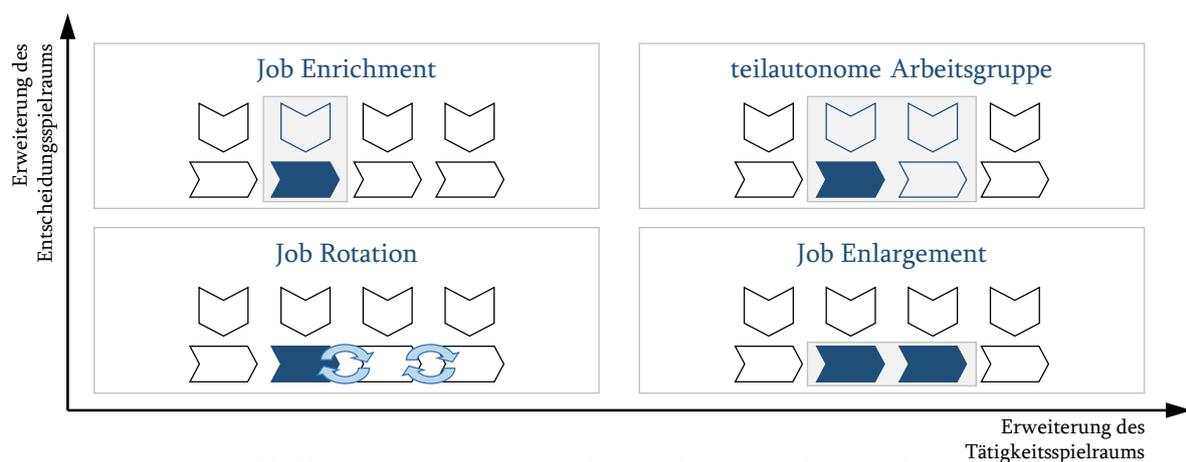


Abbildung 2-12: Organisationsformen der Personaleinsatzplanung
(in Anlehnung an AFW WIRTSCHAFTSAKADEMIE, S. 19 und ZÄH & DAUB 2022, S. 47)

Job Rotation – Arbeitsrotation

Unter Job Rotation oder Arbeitsrotation wird der systematische Wechsel der Mitarbeitenden zwischen Arbeitsplätzen mit sehr ähnlichem Tätigkeits- und Entscheidungsspielraum auf gleicher Hierarchieebene verstanden (SCHLICK ET AL. 2018,

S. 689, DENKENA ET AL. 2017, S. 641, ANLAUFT 2017, S. 135). Der Grad der Arbeitsteilung und der Fremdkontrolle bleibt unverändert. Nach ANLAUFT (2017, 137f.) sind die drei Kernziele der Job Rotation:

- der Erhalt der Mitarbeitendengesundheit,
- der Ausbau des Qualifikationsniveaus und
- die Erhöhung der betrieblichen Einsatzflexibilität.

KLIPPER ET AL. (2016, S. 7) definieren Job Rotation als „eine Gestaltungsoption, die durch Belastungswechsel, zum Beispiel von körperlich hoch belastenden Tätigkeiten zu weniger belastenden Tätigkeiten, dazu dienen kann, die Gesamtbelastung zu minimieren“. Der Belastungswechsel dient der Reduzierung einseitiger Belastungen und Monotonie, wodurch MSE und psychischen Erkrankungen vorgebeugt wird (SCHMIDT 2002, S. 53, BERGMANN & GARRECHT 2021, S. 35). Zudem können die Mitarbeitenden durch Job Rotation weiterentwickelt werden (STANIĆ 2010, S. 26), was einen flexibleren Personaleinsatz ermöglicht (DELLER ET AL. 2008, 189f.). Außerdem bekommen die Mitarbeitenden einen umfassenden Einblick in die Wertschöpfungsprozesse und ein besseres Verständnis für ihre Arbeit (MARRENBACH & GEIGER 2019, S. 360). Die abwechslungsreiche Gestaltung der Arbeit trägt nicht nur zum Erhalt der Gesundheit und der Leistungsfähigkeit sowie zur Kompetenzentwicklung der Mitarbeitenden bei, sondern steigert zudem die intrinsische Arbeitsmotivation und das Wohlbefinden (AYOUGH ET AL. 2012, S. 651). Dadurch wird letztendlich die Arbeitgeberattraktivität gesteigert (KLIPPER ET AL. 2016, S. 7). Der Wechsel zwischen den Arbeitsplätzen kann nach definierten Rotationszeiten erfolgen, beispielsweise stündlich, täglich oder wöchentlich (SCHMIDT 2002, S. 53). Die Rotationszeit, auch Intervalllänge der Rotation genannt, wird als die Zeitspanne verstanden, die die Mitarbeitenden an einem Arbeitsplatz bis zum nächsten Wechsel verbringen (THARMMAPHORNPHILAS & NORMAN 2004, S. 252).

Job Enlargement – Arbeitserweiterung

Im Vergleich zur Job Rotation beinhaltet Job Enlargement eine horizontale, quantitative Erweiterung des Arbeitsinhalts um Tätigkeiten mit gleichem Qualifikationsniveau (MARRENBACH & GEIGER 2019, S. 360, BERGMANN & GARRECHT 2021, S. 36). Studien haben gezeigt, dass durch die Arbeitserweiterung und die Reduktion der Arbeitsteilung der Bezug zum Arbeitsergebnis und die Arbeitszufriedenheit steigen (CAMPION & MCCLELLAND 1991, S. 195). Ein Beispiel für eine Arbeitserweiterung ist die Übernahme von Tätigkeiten eines vor- oder nachgelagerten Arbeitsplatzes (SCHMIDT 2002, S. 53).

Job Enrichment – Arbeitsbereicherung

Unter Job Enrichment wird eine vertikale, inhaltliche Ausweitung des Arbeitsinhalts verstanden (LINDNER-LOHMANN ET AL. 2012, S. 84, BERGMANN & GARRECHT 2021, S. 36). Durch die Erweiterung des Entscheidungsspielraums reduziert sich der Grad der Fremdkontrolle, der Tätigkeitsspielraum der Arbeitsaufgabe im Hauptprozess bleibt weitestgehend unverändert. Durch die zusätzlich übernommenen Tätigkeiten werden Planungs-, Kontroll- und Entscheidungskompetenzen in die Arbeitsaufgabe integriert und weiterentwickelt (SCHMIDT 2002, S. 55), die hierarchisch höheren Arbeitsstufen zugeordnet sind (KAUFFELD & MARTENS 2019, S. 280). Die zusätzlichen Herausforderungen fördern die Motivation der Mitarbeitenden (MARRENBACH & GEIGER 2019, 360f.). Daher wird bei Job Enrichment auch von einer qualitativen Erweiterung der Arbeit gesprochen.

Teilautonome Arbeitsgruppe

Teilautonome Arbeitsgruppen stellen eine Mischform aus Job Enlargement und Job Enrichment dar (LINDNER-LOHMANN ET AL. 2012, S. 84). Bei teilautonomen Arbeitsgruppen wird ein ganzheitlicher Aufgabenkomplex an eine interdisziplinäre Gruppe von Mitarbeitenden übertragen. Die Gruppe aus Facharbeitenden und ungelerten Mitarbeitenden plant und arbeitet anschließend eigenverantwortlich an der geforderten Leistung. Die Arbeits- und Zeitaufteilung sowie die Verteilung der einzelnen Entscheidungsspielräume bestimmen die Gruppe selbst. (SCHMIDT 2002, S. 55)

3 Stand der Erkenntnisse

Basierend auf den theoretischen Grundlagen und der Klärung der Begrifflichkeiten im vorangehenden Kapitel 2 werden in diesem Kapitel bestehende Lösungsansätze zur beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung vorgestellt. Dabei erfolgt zunächst die Ableitung von **Bewertungskriterien** aus den Forschungsfragen (Abschnitt 3.1), bevor anschließend aktuelle **Ansätze der Personaleinsatzplanung** mit dem Fokus auf Rotationsplänen erläutert werden (Abschnitt 3.2). Auf Basis der dargestellten Literaturübersicht erfolgt in Abschnitt 3.3 die Bewertung der vorgestellten Lösungsansätze in Bezug auf die definierten Kriterien und die Ableitung des **Handlungsbedarfs** für die vorliegende Arbeit.

3.1 Bewertungskriterien

Die Bewertungskriterien für den Stand der Erkenntnisse leiten sich aus den in Abschnitt 1.3 aufgeführten Forschungsfragen ab. Daher bezieht sich das erste Kriterium auf die Merkmale der Elemente Arbeitsplatz und Mitarbeitende des menschenorientierten Arbeitssystems der manuellen Montage (siehe Forschungsfrage 1). Dabei stellt die Beschreibung der zu bewältigenden Belastung an den Arbeitsplätzen (physisch, psychisch) sowie der benötigten Kompetenzen das erste Kriterium dar, siehe Abbildung 3-1. Hinsichtlich der Belastung entspricht eine ganzheitliche physische/psychische Betrachtung des Arbeitsplatzes der vollen Erfüllung des Kriteriums und eine Analyse einzelner Tätigkeiten oder Aspekte einer Teilerfüllung. In Bezug auf die Kompetenzen wird eine differenzierte Kompetenzeinstufung (z. B. Anfänger:in bis Experte/Expertin) als volle Erfüllung des Kriteriums und eine ja/nein-Betrachtung vorhandener Kompetenzen als eine Teilerfüllung gewertet.

| Kriterium 1 |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Kriterium 1.1: Beschreibung der Belastung (physisch, psychisch)• Kriterium 1.2: Beschreibung der Kompetenzen |

Abbildung 3-1: Kriterium 1 zur Bewertung des Stands der Erkenntnisse

Das zweite Kriterium fokussiert sich auf die Messung und Prädiktion der personenindividuellen physischen und psychischen Beanspruchung (siehe Forschungsfrage 2). Bei der Messung der Beanspruchung wird zunächst die Auswahl

geeigneter Methoden für die Anwendung in der manuellen Montage bei gleichzeitiger körperlicher und geistiger Arbeit betrachtet, siehe Abbildung 3-2. Wenn sowohl die physische als auch die psychische Beanspruchung der Mitarbeitenden in der manuellen Montage betrachtet wird, gilt das Kriterium 2.1 als erfüllt. Falls nur Einzelaspekte berücksichtigt werden, liegt eine Teilerfüllung vor. Um eine langfristig nutzbare, aufwandsreduzierte und erweiterbare Methode zur Erstellung von Einsatzplänen zu entwickeln, ist die Prognose der individuellen Beanspruchung von entscheidender Bedeutung. Falls Ansätze auf Basis von Trainingsdaten oder realen Daten die zukünftige Beanspruchung berechnen und abschätzen können, gilt das Kriterium 2.2 als erfüllt.

Kriterium 2

- Kriterium 2.1: Messung der Beanspruchung (physisch, psychisch)
- Kriterium 2.2: Prognose der Beanspruchung (physisch, psychisch)

Abbildung 3-2: Kriterium 2 zur Bewertung des Stands der Erkenntnisse

Das dritte Kriterium bezieht sich auf das methodische Vorgehen zur Generierung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage sowie auf die Kommunikation zu den Mitarbeitenden (siehe Forschungsfrage 3). Das Kriterium 3.1 ist voll erfüllt, wenn eine mathematische Logik zur Erstellung von Einsatzplänen sowie geeignete Werkzeuge zur praktischen Nutzung für die Anwendenden erstellt sind, siehe Abbildung 3-3. Eine Teilerfüllung liegt vor, falls lediglich die Logik oder das Modell ohne unterstützende Hilfsmittel oder mathematische Umsetzungen enthalten sind. Darüber hinaus soll neben der Erstellung der Einsatzpläne auch die Kommunikation mit den beteiligten Mitarbeitenden vorgesehen werden. Eine strukturierte Rückmeldung der Mitarbeitenden bezüglich der durchgeführten Einsatzplanung und von Veränderungen physischer/psychischer Leistungsvoraussetzungen sollte zudem integriert sein. Falls eine Interaktion mit den Mitarbeitenden stattfindet und Handlungen daraus resultieren, gilt das Kriterium 3.2 als erfüllt. Falls lediglich eine reine Anzeige der Einsatzplanung vorliegt, ist das Kriterium teilweise erfüllt.

Kriterium 3

- Kriterium 3.1: Generierung von Personaleinsatzplänen
- Kriterium 3.2: Kommunikation zu den Mitarbeitenden

Abbildung 3-3: Kriterium 3 zur Bewertung des Stands der Erkenntnisse

3.2 Ansätze der Personaleinsatzplanung

Auf Basis einer umfangreichen strukturierten Literaturrecherche wurden zahlreiche relevante Veröffentlichungen identifiziert, die Ansätze der Personaleinsatzplanung im Produktionsbereich beschreiben. Dabei wurde eine suchbegriffbasierte Durchsicht nach VERNIM (2020, 86ff.) (siehe Abbildung A-1, Anhang A) in den drei Datenbanken Scopus, Web of Science und EBSCO durchgeführt. EBSCO stellt dabei mit dem Schwerpunkt auf Soziologie und Psychologie eine Ergänzung zu den zwei größten wissenschaftlichen Datenbanken Scopus und Web of Science dar (GOSTELI 2019, CHADEGANI ET AL. 2013, S. 1). Im nächsten Schritt erfolgte eine titelbasierte, abstractbasierte und textbasierte Filterung der Literaturquellen in den Datenbanken sowie die Entfernung von Duplikaten. Abschließend wurde nach dem Vorwärts-rückwärts-Schneeballeffekt in der gefundenen Literatur nach weiteren relevanten Quellen gesucht (WOHLIN 2014, S. 3). Das systematische Vorgehen der Literaturrecherche sowie die jeweiligen Treffer sind in Abbildung 3-4 dargestellt.

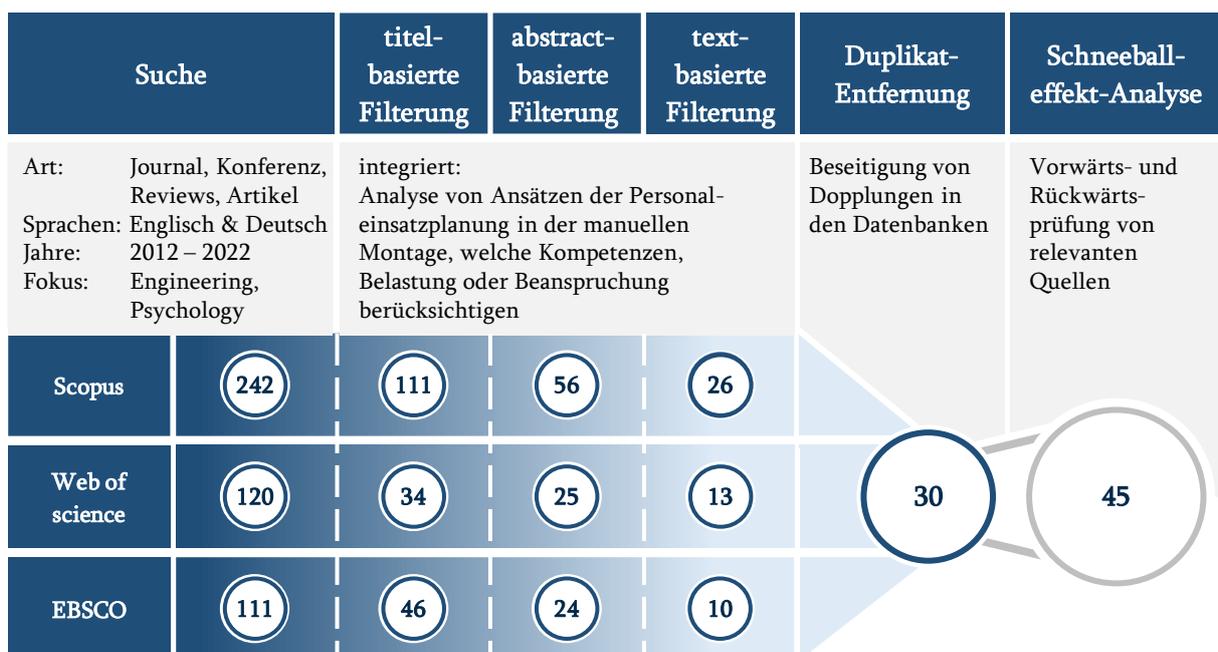


Abbildung 3-4: Vorgehen der strukturierten Literaturrecherche (Stand: 20.06.2022)

In Bezug auf das angestrebte Arbeitsergebnis, der Entwicklung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung, konnten aus der strukturierten Literaturrecherche einige belastungs- und kompetenzorientierte Ansätze (Abschnitt 3.2.1) sowie beanspruchungs- und kompetenzorientierte Ansätze (Abschnitt 3.2.2) identifiziert werden. Die Kategorisierung der englischsprachigen Literatur mit den vielfältigen Begriffen für Belastung und Beanspruchung wurde durch die Analyse des Kontexts vorgenommen. Ausgewählte Ansätze werden nachfolgend genauer erläutert. Keiner der nachfolgend beschriebenen Ansätze erfüllt vollumfänglich die Anforderungen der vorliegenden Arbeit,

einzelne Aspekte können jedoch bei der Entwicklung der Personaleinsatzplanung in Kapitel 5 genutzt werden.

Der Vollständigkeit halber sei anzumerken, dass es neben den belastungs-, beanspruchungs- und kompetenzorientierten Ansätzen ebenso Beiträge zu kompetenzorientierten sowie zu belastungsorientierten Ansätzen gibt. Bei den kompetenzorientierten Ansätzen erfolgt die Zuteilung von Mitarbeitenden zu geeigneten Arbeitsplätzen auf Basis ihrer vorhandenen Kompetenzen. Dabei werden auch Kriterien der Kompetenzentwicklung und des Kompetenzerhalts berücksichtigt, zum Beispiel DENKENA ET AL. (2016, 2017) oder GRÄBLER ET AL. (2021). Im Vergleich dazu steht bei den belastungsorientierten Ansätzen die Reduzierung der maximalen täglichen physischen Belastung pro Person und die Einhaltung der Belastungsgrenzen im Mittelpunkt, zum Beispiel YOON ET AL. (2016), SANA ET AL. (2019) oder OTTO & SCHOLL (2013). Eine Übersicht der kompetenzorientierten und belastungsorientierten Ansätze ist in Abbildung A-2 in Anhang A zu sehen.

3.2.1 Belastungs- und kompetenzorientierte Ansätze

Im Themenbereich der belastungs- und kompetenzorientierten Ansätze existieren zahlreiche Vorarbeiten, welche die Reduktion einzelner physischer Belastungen, wie beispielsweise die Hand-Arm-Vibration (ADEM & DAĞDEVIREN 2021) oder Lärm (RERKJIRATTIKAL & OLAPIRIYAKUL 2021), zum Gegenstand haben. Weitere Ansätze verfolgen die Reduktion der Produktionszykluszeit oder die Maximierung der Produktivität und Mitarbeitendenzufriedenheit durch eine ergonomische Einsatzplanung (MOUSSAVI ET AL. 2016, WONGWIEN & NANTHAVANIJ 2013). Ein Großteil der Ansätze fokussiert sich auf physische Aspekte, psychische Faktoren bleiben meist unberücksichtigt. Nachfolgend werden einige relevante Rotationsansätze genauer beschrieben, welche interessante Aspekte für die Lösungsentwicklung liefern.

BOENZI ET AL. (2015), MOSSA ET AL. (2016) und BOENZI ET AL. (2016)

Das Ziel der Rotationslogik von BOENZI ET AL. (2015) ist die Maximierung der Systemleistung bei einer parallelen Reduzierung und gleichmäßigen Verteilung physischer Arbeitsbelastung zwischen den Mitarbeitenden. Der Ansatz berücksichtigt besonders die Integration altersbedingter physiologischer Eigenschaften bei der Rotationsplanung, wie zum Beispiel die abnehmende Flexibilität und Muskelkraft oder die zunehmende Reaktionszeit. Die Messung physischer Belastung an den Arbeitsplätzen erfolgt mittels des OCRA-Verfahrens. Zudem werden die Mitarbeitenden hinsichtlich ihrer Kompetenzen und altersbedingten Faktoren bewertet. Dasselbe Team an Autoren und Autorinnen entwickelte den Ansatz in MOSSA ET AL. (2016) weiter, indem sie individuelle Grenzwerte

physischer Beanspruchung festlegten und die Bearbeitungszeiten der Mitarbeitenden berücksichtigten. Mit Hilfe der unterschiedlichen Bearbeitungszeiten ist es möglich, verschiedene Kompetenzniveaus in die Planung zu integrieren. BOENZI ET AL. (2016) adaptierten die beiden vorangehenden Ansätze, indem sie die Mitarbeitenden hinsichtlich ihrer Arbeitsplatzkompetenzen gruppieren und lediglich in diesen Kleingruppen zwischen ausgewählten Arbeitsplätzen rotieren. Dadurch werden weniger Detailinformationen der Mitarbeitenden und der Arbeitsplätze benötigt, was den Ansatz einfacher und praxistauglicher macht.

Keiner der drei Ansätze berücksichtigt die Beanspruchung bzw. deren Messung und Prädiktion oder die Interaktion mit den Mitarbeitenden. Hinsichtlich der methodischen Unterstützung liefern die Ansätze Modelle und erste mögliche schrittweise Vorgehensweisen sowie potenzielle Umsetzungen als Softwarelösungen.

DIGIESI ET AL. (2018)

Die Autoren und Autorinnen DIGIESI ET AL. (2018) entwickelten einen Rotationsansatz zur gleichmäßigen Verteilung der physischen Arbeitsbelastung bei einem gegebenen Produktionsziel, um das ergonomische Expositionsrisiko von Mitarbeitenden bei sich wiederholenden manuellen Tätigkeiten zu minimieren. Zur Bewertung der physischen Arbeitsplatzbelastung wird das RULA (Rapid Upper Limb Assessment, dt.: Schnellbewertung der oberen Extremitäten) genutzt, welches die Bewegungen und Haltungen der oberen Extremitäten beurteilt. Die festgelegten maximalen RULA-Werte können für einzelne Mitarbeitende angepasst werden, um die individuellen körperlichen Voraussetzungen zu berücksichtigen. Die unterschiedlichen Kompetenzen und das Alter der Mitarbeitenden werden durch personenindividuelle Bearbeitungszeiten pro Arbeitsplatz bei der Einsatzplanung berücksichtigt.

Zusammenfassend kann für den Ansatz von DIGIESI ET AL. (2018) festgehalten werden, dass kompetenzorientierte Rotationspläne zur ausgeglichenen Verteilung der physischen Arbeitsplatzbelastung erstellt werden. Die individuelle Beanspruchung, psychische Aspekte oder eine mögliche Prädiktion werden nicht berücksichtigt. Zudem sind erste Tools für ein methodisches Vorgehen für die Teamleitenden enthalten, Aspekte der Mitarbeitendenkommunikation sind nicht integriert.

HOCHDÖRFFER ET AL. (2018)

Das von HOCHDÖRFFER ET AL. (2018) entwickelte Rotationsmodell BEQR (Balanced Ergonomic Qualification Preserving Job Rotation) (dt.: ausgewogene, qualifikations-erhaltende Job-Rotations-Methode), generiert einen wöchentlichen Personaleinsatzplan. Ziel ist die Reduktion physischer Belastung einer heterogen qualifizierten Belegschaft bei

gleichzeitigem Kompetenzerhalt. Die physische Belastung der Arbeitsplätze wird mit EAWS bewertet. Für die Mitarbeitenden steigt die physische Belastung linear mit der Zeit an und kann durch Erholungsphasen verringert werden. Zudem wirken sich die vergangenen Rotationsschritte auf die aktuelle Belastungsbewertung aus, wobei der Einfluss weiter zurückliegender Tätigkeiten abnimmt. In Bezug auf den Kompetenzerhalt steigt der Wert für weiter zurückliegende Arbeitsplätze, um eine priorisierte Zuordnung zu forcieren und ein Vergessen der Arbeitsinhalte zu vermeiden. Eine detaillierte Unterteilung von Arbeitsplatzkompetenzen erfolgt nicht. Weiterhin werden kurzfristige und unerwartete personelle Schwankungen im Sinne einer Unter- oder Überbesetzung integriert. Nicht-obligatorische Arbeitsplätze bleiben im Falle eines Arbeitskräftemangels unbesetzt; bei Personalüberschuss ist durch das Mehrfachbesetzen eines Arbeitsplatzes eine Qualifizierungsmaßnahme für eine unqualifizierte Person möglich. Zudem werden dauerhafte, langfristige Einschränkungen von Mitarbeitenden (z. B. Beschränkungen der Nackenbelastung) sowie temporäre, kurzfristige Einschränkungen (z. B. Sportverletzungen) berücksichtigt. Zusätzlich erfolgt die Integration individueller Arbeitsplatz-Präferenzen der Mitarbeitenden in die Planung.

Der Rotationsansatz nach HOCHDÖRFFER ET AL. (2018) fokussiert sich auf den Kompetenzerhalt der Mitarbeitenden sowie die Betrachtung physischer Belastung. Die Autoren merken an, dass eine weitere Verbesserung der Rotationspläne durch die Berücksichtigung der psychischen Belastung möglich ist. Die Integration der individuellen Beanspruchung ist nicht vorgesehen. Hinsichtlich der methodischen Unterstützung liefert der Ansatz ein achtstufiges Vorgehen zur Erstellung der Einsatzpläne sowie ein Softwaretool zur Anwendung in der Praxis. Dieses beinhaltet eine Nutzendenschnittstelle für die Teamleitenden oder Planenden. Eine Interaktion mit den Mitarbeitenden am Montageband ist nicht enthalten.

BOTTI ET AL. (2017) und BOTTI ET AL. (2021)

BOTTI ET AL. (2017) und BOTTI ET AL. (2021) stellten Ansätze zur Rotationsplanung vor, welche einerseits die physische Belastung und somit das Risiko von MSE reduzieren. Andererseits zielen die Ansätze auf eine Steigerung der Produktivität ab, indem die Mitarbeitenden den Arbeitsplätzen zugewiesen werden, die ihren Fähigkeiten und Kompetenzen am besten entsprechen. Um eine passende Zuteilung zu ermöglichen, wird ein detaillierter Vergleich anhand von 42 Kriterien in folgenden Kategorien durchgeführt: Bewegungen/Bewegungsfähigkeit, physische Anforderungen/Fähigkeiten, relationale Fähigkeiten und mentale Fähigkeiten sowie Kompetenzen. Die Bewertung der physischen Belastung der Arbeitsplätze erfolgt mit dem OCRA-Verfahren. Die festgelegten Grenzwerte dürfen summiert über den Tag nicht überschritten werden.

Neben der Analyse der physischen Belastung mittels der OCRA-Verfahren erfassen BOTTI ET AL. (2017) und BOTTI ET AL. (2021) erste Kriterien psychischer Belastung, zum Beispiel benötigte und vorhandene psychische Fähigkeiten und Kapazitäten. Eine Beschreibung der prototypischen Anwendung der Ansätze und eine Erläuterung der verwendeten Werkzeuge findet nur oberflächlich statt, eine Anwendung in der Praxis steht noch aus. Darüber hinaus ist keine Interaktion mit Mitarbeitenden vorgesehen.

DIEGO-MAS (2020)

DIEGO-MAS (2020) beschreibt einen Ansatz zur Erstellung von Rotationsplänen, bei dem Mitarbeitende zwischen Arbeitsplätzen einer Rotationsgruppe wechseln, um die Gefahr von MSE zu reduzieren. Gleichzeitig soll die Aufgabendiversifikation der Mitarbeitenden erhöht werden. Im Rahmen der Rotationsplanung erfolgt eine Bündelung von Arbeitsplätzen mit unterschiedlichen ergonomischen Anforderungen zu einer Rotationsgruppe, zu denen Mitarbeitende basierend auf ihren Kompetenzen und Leistungsvoraussetzungen zugeordnet werden. Zur Bewertung der Zuordnung zwischen Mitarbeitenden und Arbeitsplätzen nutzte der Autor folgende drei Kriterienkategorien: Bewegungen, Fähigkeiten sowie mentale und kommunikative Kompetenzen. Es besteht die Möglichkeit, die einzelnen Kriteriengruppen nach ihrer Bedeutung zu gewichten. Zur Lösung des Optimierungsproblems wird der Fitnesswert jeder Zuordnungsoption berechnet, der angibt, wie passend die Zuteilung von Mitarbeitenden und Arbeitsplätzen ist. Darauf basierend wird die bestmögliche Variante ausgewählt. Die Optimierungsfunktion ist modular aufgebaut und bietet die Option, weitere Faktoren hinzuzufügen. Zusätzlich werden die durchgeführten Bewegungen vorangehender Rotationsschritte in die ergonomische Bewertung zukünftiger Rotationen integriert.

Zusammenfassend kann für den Ansatz von DIEGO-MAS (2020) festgehalten werden, dass die Rotationsplanung sowohl kompetenzbezogene als auch physische Aspekte berücksichtigt. Das methodische Vorgehen wird anhand der genutzten Formeln und Werkzeuge beschrieben. Aspekte individueller Beanspruchung sowie eine Interaktion mit Mitarbeitenden sind nicht vorgesehen.

ASENSIO-CUESTA ET AL. (2012) und ASENSIO-CUESTA ET AL. (2019)

Das Ziel der Rotationsplanung von ASENSIO-CUESTA ET AL. (2012) ist die Maximierung der Tätigkeitsvielfalt sowie die Minimierung der täglichen physischen Ermüdung der Mitarbeitenden. Dabei bewerteten die Autoren und Autorinnen die Mitarbeitenden und die Arbeitsplätze anhand von 39 Kriterien analog, welche sich in die drei Kategorien ergonomische Kriterien (Bewertung von Körperbewegungen), körperliche Anforderungen/Fähigkeiten und Kompetenzkriterien unterteilen. Zudem kann eine

individuelle Gewichtung der Kriteriengruppen bei der Rotationsplanung vorgenommen werden. Hinsichtlich der Kompetenzen geht die direkte Differenz zwischen den jeweils vorhandenen und den benötigten Kompetenzen in die Berechnung des Fitnesswerts der Einsatzplanung ein. Da in diesem Ansatz von einer fachlich qualifizierten Belegschaft ausgegangen wird, liegt der Schwerpunkt auf personenbezogenen und strategischen Kompetenzen. Die Inklusion körperlicher Anforderungen/Fähigkeiten erfolgt durch restringierende Randbedingungen. Falls eine Person die körperlichen Anforderungen eines Arbeitsplatzes temporär oder permanent nicht erfüllt, findet keine Zuordnung der Person zu diesem Arbeitsplatz statt. Darüber hinaus steigt der Fitnesswert, wenn eine Person über einen längeren Zeitraum ergonomisch gleichartigen Arbeitsplätzen zugewiesen ist, und nimmt umgekehrt proportional zu der Zeit ab, die seit der letzten Ausübung dieser bestimmten Bewegung vergangen ist. Mit einem stärkeren Fokus auf die Reduktion von MSE beschreiben ASENSIO-CUESTA ET AL. (2019) einen Rotationsansatz, bei dem die Arbeitsplatzpräferenzen und Kompetenzen der Mitarbeitenden sowie die physische Belastung der Arbeitsplätze berücksichtigt werden. Bei einer präferenzbasierten Zuteilung werden beispielsweise alle Mitarbeitenden ihrer ersten Präferenz zugeordnet, wobei bei einer Mehrfachzuteilung zu einem Arbeitsplatz die qualifizierteste Person ausgewählt wird. Die weitere Zuteilung der abgelehnten Personen erfolgt nach analogem Vorgehen zu den nächsten Präferenzen. Durch die individuelle Angabe der Arbeitsplatzpräferenzen werden die Mitarbeitenden aktiv in die Entwicklung der Einsatzpläne eingebunden. Die Kompetenzen beinhalten sowohl physische Fähigkeiten als auch fachliche und personelle Kompetenzen. Ein ausgewogener Arbeitsplatzwechsel bei der Rotationsplanung wird durch das Heruntersetzen der Präferenzen und Kompetenzen für den zuletzt besetzten Arbeitsplatz forciert. Zudem werden vorherige Rotationsschritte durch eine Zunahme des ergonomischen Risikos berücksichtigt. Die Erfassung physischer Belastung an jedem Arbeitsplatz erfolgt mit der Sue-Roger-Methode.

Die Rotationsansätze von ASENSIO-CUESTA ET AL. (2012) und ASENSIO-CUESTA ET AL. (2019) berücksichtigen im ersten Ansatz die Kompetenzen und physischen Eigenschaften der Mitarbeitenden und der Arbeitsplätze und im zweiten Ansatz die Kompetenzen und individuellen Arbeitsplatzpräferenzen. Beide Ansätze beachten die physische Belastung der Mitarbeitenden, psychische Aspekte bleiben weitestgehend unberücksichtigt. Lediglich bei den Kompetenzkriterien sind Faktoren enthalten, welche der Bewertung psychischer Belastung dienen (z. B. Stresstoleranz, Lernfähigkeit). Ebenso beinhalten die Ansätze keine Interaktion mit oder Feedback von Mitarbeitenden. Ein Softwaretool unterstützt die Planenden bei der Anwendung der Rotationsansätze in der Praxis.

MONDAL ET AL. (2013)

Die Autoren und Autorinnen MONDAL ET AL. (2013) beschreiben einen Rotationsansatz zur Reduktion repetitiver Tätigkeiten. Dieser berücksichtigt die vier Faktoren Ergonomie der Arbeitsplätze (Häufigkeit und physische Belastung verschiedener Körperhaltungen), Kompetenzen, Umgebungsbedingungen und körperliche Fähigkeiten der Mitarbeitenden. Die einzelnen Arbeitsplatz- und Mitarbeitendenfaktoren werden zwar differenziert erfasst, wenn auch die Erläuterung einzelner Kriterien fehlt. Durch den personenindividuellen Vergleich zwischen den Arbeitsplatzanforderungen und den Voraussetzungen der Mitarbeitenden kann die Güte der Zuordnung bewertet werden. Zur Berechnung des Fitnesswerts eines möglichen Rotationsplans kann eine unternehmensindividuelle Gewichtung der betrachteten Faktoren erfolgen. Zusätzlich werden negative Interdependenzen aufgrund gleicher ergonomischer Körperhaltungen in vorangehenden Rotationsschritten mit Hilfe eines Einflussfaktors bei der ergonomischen Bewertung berücksichtigt und ein Arbeitsplatz darf nur einmal pro Schicht von der gleichen Person besetzt werden. Zudem ist die Kompetenzentwicklung Unqualifizierter in diesem Rotationsansatz möglich.

Zusammenfassend kann für den Ansatz von MONDAL ET AL. (2013) festgehalten werden, dass die Autoren und Autorinnen vergangene Rotationen sowie die Möglichkeit der Kompetenzentwicklung berücksichtigten. Aspekte der Beanspruchung oder der Interaktion mit Mitarbeitenden sind nicht enthalten. Das methodische Vorgehen zur Erstellung der Einsatzplanung ist detailliert beschrieben und die in den einzelnen Schritten verwendeten Formeln und Hilfsmittel werden ebenfalls ausgeführt.

3.2.2 Beanspruchungs- und kompetenzorientierte Ansätze

Durch die zunehmende Mensch-Orientierung der letzten Jahre im industriellen Produktionsumfeld wird in den Ansätzen der Personaleinsatzplanung vermehrt die tatsächliche individuelle Beanspruchung der Mitarbeitenden integriert. In der Kategorie der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzpläne werden nachfolgend fünf aktuelle Ansätze aus der Literatur beschrieben, welche interessante Aspekte für die zu erstellende Einsatzplanung liefern.

FINCO ET AL. (2020)

Der Rotationsansatz von FINCO ET AL. (2020) hat die Maximierung der täglichen Produktivität unter Berücksichtigung der Kompetenzen, der Erfahrung der Mitarbeitenden sowie des individuellen Energieaufwands pro Arbeitsplatz zum Ziel. Darüber hinaus wird der alters- und geschlechtsabhängige maximal akzeptable Energieaufwand pro Person zur

Bewältigung physischer Belastung sowie die damit zusammenhängenden notwendigen Erholungszeiten bei der Einsatzplanung berücksichtigt. In diesem Ansatz ist eine Kompetenzentwicklung durch die Zuteilung einer an diesem Arbeitsplatz ungelerten und einer erfahrenen Person möglich. Zudem besteht die Restriktion, dass eine Person eine Tätigkeit nicht mehrmals nacheinander ausführen darf. FINCO ET AL. (2020) zeigen in ihrem Ansatz, dass vor allem bei Arbeitsplätzen mit hoher physischer Belastung der Einsatz von jungen, ungelerten Mitarbeitenden mit der Trainingsunterstützung von erfahrenen, älteren Experten und Expertinnen vorteilhaft ist, da ältere Mitarbeitende aufgrund von längeren Erholungszeiten eine geringere Gesamtproduktivität aufweisen.

Zusammenfassend kann für den Rotationsansatz von FINCO ET AL. (2020) festgehalten werden, dass durch die Berücksichtigung individueller Energieaufwände die physische Beanspruchung der Mitarbeitenden objektiv erfasst und in die Planung integriert wird. Dabei betrachteten die Autoren und Autorinnen jedoch nur personenbezogene Durchschnittswerte über alle Arbeitsplätze. Neben der Beanspruchungsberechnung erfolgen keine weiteren Beanspruchungsmessungen. Zudem werden die individuellen Kompetenzen bei der Einsatzplanung einbezogen. Eine Betrachtung mentaler Aspekte, der Beanspruchungsprädiktion oder der Interaktion mit Mitarbeitenden erfolgt nicht. Hinsichtlich der methodischen Unterstützung erläutert der Ansatz ein Vorgehen, wobei der Fokus auf dem mathematischen Lösungsansatz und weniger auf einer anwendungsbezogenen Nutzung liegt.

KATIRAE ET AL. (2021)

Der Ansatz von KATIRAE ET AL. (2021) kombiniert eine Austaktungsplanung mit einer Personaleinsatzplanung, welche die Minimierung der Taktzeit und der physischen Beanspruchung zum Ziel hat. Dabei berücksichtigt der Ansatz einerseits die individuellen Eigenschaften der Mitarbeitenden, wie zum Beispiel Alter, Geschlecht und Kompetenz, welche sich auf die Bearbeitungszeiten auswirken. Andererseits wird die empfundene physische Beanspruchung der Mitarbeitenden pro Arbeitsaufgabe mittels der Borg-Skala abgefragt. Auf Basis der individuellen Kompetenzen und physischen Beanspruchung an jedem Arbeitsplatz erfolgt die Einteilung der Arbeitsaufgaben für jede Person in einer Matrix, siehe Abbildung 3-5.

Bei der Zuteilung von Mitarbeitenden und Arbeitsaufgaben zu Arbeitsplätzen soll ein Borg-Wert von fünf für eine Aufgabe und die Taktzeit aufgrund der unterschiedlichen kompetenzabhängigen Bearbeitungszeiten nicht überschritten werden. Die Autoren und Autorinnen merken an, dass der Ansatz durch die ergonomische Bewertung des Arbeitsplatzes oder die Erfassung der psychischen Beanspruchung mittels NASA-TLX erweitert werden könnte.

KATIRAE ET AL. (2021) präsentieren somit einen Ansatz zur Personaleinsatzplanung, welcher die Kompetenzen und die individuelle physische Beanspruchung der Mitarbeitenden berücksichtigt. Da die Borg-Werte für alle Arbeitsplätze und Mitarbeitenden initial erfasst werden, findet keine Prädiktion der Beanspruchung statt. Auf die Integration psychischer Aspekte wird verwiesen, diese sind aber im vorliegenden Ansatz nicht enthalten. Des Weiteren findet nach der initialen Borg-Abfrage keine weitere Interaktion mit den Mitarbeitenden statt. Zudem betonen die Autoren und Autorinnen, dass weiterführende Studien nötig sind, um ein übergreifendes Vorgehen für die Anwendung in der Praxis zu definieren.

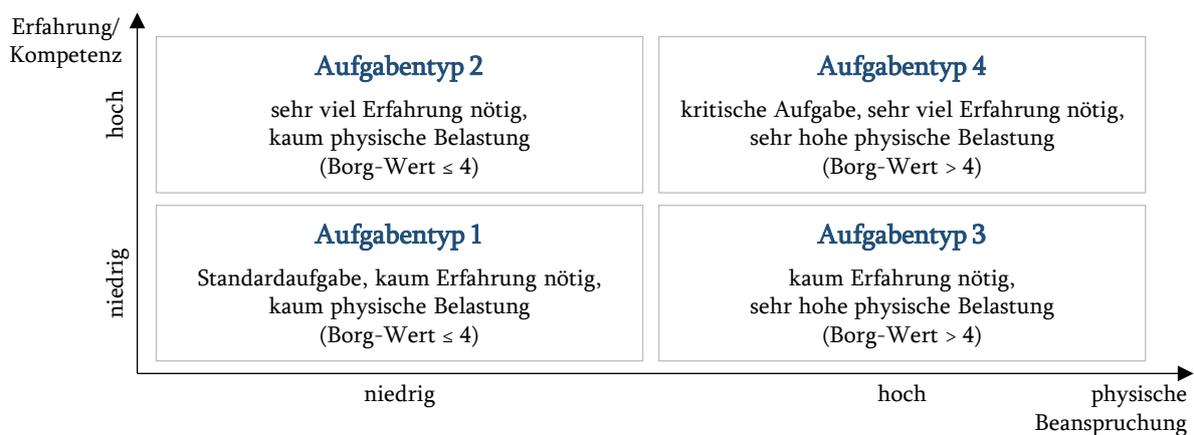


Abbildung 3-5: Matrix zur Kategorisierung von Arbeitsaufgaben (KATIRAE ET AL. 2021, 15f.)

RAO PABOLU & SHRIVASTAVA (2021)

RAO PABOLU & SHRIVASTAVA (2021) entwickelten ein Konzept für einen digitalen Zwilling, welcher das Ermüdungsverhalten der Mitarbeitenden abbildet und auf Basis dieser Daten Mitarbeitendenrotationen vorschlägt. Die Ermüdung hängt einerseits von statischen Daten, wie zum Beispiel Alter, Geschlecht, Kompetenzniveau der Mitarbeitenden oder der Komplexität der Arbeitsaufgabe, sowie andererseits von dynamischen Messwerten ab, wie beispielsweise der Wiederholhäufigkeit, der Pulsrate oder der Liniengeschwindigkeit, siehe Abbildung 3-6. Die Erfassung der dynamischen Daten erfolgt dabei kontinuierlich während der Arbeit, zum Beispiel durch die Messung der Pulsrate der Mitarbeitenden. Der entwickelte Rotationsansatz prädiziert auf Basis der Daten die Ermüdung einer Person. In diesem Fall wird entweder ein Tausch zweier ermüdeter Personen am Montageband (Rotation), ein Arbeitsplatzwechsel mit einer geeigneten Person außerhalb des Montagebands (Replacement) oder eine Unterstützung der ermüdeten Person durch produktionsnahe Mitarbeitende (Reinforcement) angestrebt. Das entwickelte Modell wird zunächst angelernt, bevor anschließend automatisch Wechselvorschläge generiert werden. Vergangene Rotationen bleiben unberücksichtigt, lediglich die Wiederholhäufigkeit der Arbeitsaufgabe ist im Rahmen der Ermüdungsmessung enthalten. Die Autoren merken an,

dass das kontinuierliche Messen von Vitalparametern zu zusätzlicher psychischer Beanspruchung der Mitarbeitenden führen kann. Zudem wird die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung nicht bei der Ermüdungsanalyse berücksichtigt.

| Daten der Einsatzplanung | | | statische Daten (Datenbank) | | | | | | dynamische Daten (Messung) | | |
|--------------------------|---------|-----------------|-----------------------------|------------|-----|-----------------|---------------------|-----------|----------------------------|----------|------------------------|
| AP-Nr. | MA-Name | Arbeitsaufgaben | Alter | Geschlecht | BMI | Kompetenzniveau | Aufgabenkomplexität | Belastung | Wiederholhäufigkeit | Pulsrate | Linien-geschwindigkeit |

Abbildung 3-6: Übersicht der Ermüdungsparameter der Mitarbeitenden
(RAO PABOLU & SHRIVASTAVA 2021, S. 1371)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Ansatz von RAO PABOLU & SHRIVASTAVA (2021) einen digitalen Zwilling zur ermüdungsbasierten Personaleinsatzplanung beschreibt. Physische Kriterien stehen dabei im Mittelpunkt. Es ist anzumerken, dass durch die Messung der Pulsrate in diesem Ansatz automatisch die gesamte Beanspruchung (physisch und psychisch) erfasst wird. Eine gezielte Betrachtung psychischer Faktoren liegt nicht vor. Die gemessenen dynamischen Daten werden über ein Monitoring-System visualisiert. Aus dem Ansatz geht nicht hervor, ob dies ausschließlich für planende Personen zur Verfügung steht oder ob eine Interaktion mit den Mitarbeitenden erfolgt. Die Kompetenzen der Mitarbeitenden werden als Kenngrößen für die Ermüdungsprädiktion genutzt. Der Ansatz ist konzeptionell beschrieben und liefert ein Anwendungsbeispiel aus der Praxis. Ein methodisches Vorgehen für die Industrie ist nicht enthalten.

DALLE MURA & DINI (2022)

Der Austaktungs- und Rotationsansatz von DALLE MURA & DINI (2022) fokussiert sich auf die Minimierung der Implementierungskosten einer Montagelinie sowie auf die Reduktion der Beanspruchungsunterschiede zwischen den Mitarbeitenden. Dadurch sollen die Kosten gering und die Gesundheit der Mitarbeitenden erhalten werden. Die physische Belastung oder Ermüdung der Mitarbeitenden wird durch den Vergleich der personenindividuellen Energieaufwände an den Arbeitsplätzen mit den Grenzwerten der Mitarbeitenden erfasst. Die Energieaufwände sowie die Grenzwerte können durch den Sauerstoffverbrauch gemessen werden und sind vom Alter, Geschlecht und Gewicht der Mitarbeitenden sowie von den jeweiligen Körperbewegungen bei der Arbeitsausführung abhängig. Bei diesem Ansatz kommen kollaborative oder autonome Roboter zum Einsatz, welche die Mitarbeitenden bei der Handhabung schwerer Teile unterstützen und die physische Belastung reduzieren sollen. Der Einsatz von Robotern und die Qualifizierung der Mitarbeitenden stellen die primären Kostenfaktoren bei der Implementierung dar. Mitarbeitende werden zudem nur Arbeitsplätzen zugeteilt, für welche sie die nötigen

technischen Kompetenzen aufweisen. Die Planung berücksichtigt vorangegangene Rotationen, damit den Mitarbeitenden nicht die gleiche Tätigkeit direkt aufeinanderfolgend zugeteilt wird.

Der Ansatz von DALLE MURA & DINI (2022) zeigt somit eine kosten- und beanspruchungsorientierte Rotationsplanung, bei der die physischen Energieaufwände der Mitarbeitenden nivelliert und durch den Einsatz von Robotern reduziert werden. Die Messung des individuellen Sauerstoffverbrauchs gibt Auskunft über die physische Beanspruchung, wobei anzumerken ist, dass sich die psychische Beanspruchung ebenfalls auf den Sauerstoffverbrauch auswirkt. Psychische Aspekte werden nicht berücksichtigt. Es findet zudem keine Interaktion mit den Mitarbeitenden statt. Hinsichtlich der methodischen Unterstützung liefert dieser Ansatz ein Softwaretool zur Anwendung in der Praxis.

YENER & CAN (2018)

Der von YENER & CAN (2018) entwickelte Rotationsansatz zielt auf die Maximierung der Produktionsstückzahl bei gleichzeitiger Reduktion mentaler und physischer Ermüdung ab. Die Messung der physischen Belastung durch Körperhaltungen und -bewegungen am Arbeitsplatz erfolgt mittels der OWAS-Methode, die Messung mentaler Beanspruchung wird mittels NASA-TLX durchgeführt. Zur Erstellung der Rotationsplanung werden zudem die vorhandenen Kompetenzen der Mitarbeitenden berücksichtigt, indem für jeden Arbeitsplatz möglichst die Person mit der höchsten Kompetenz zugeteilt wird. Bei dieser Zuordnung sind die festgelegten Maximalwerte physischer und psychischer Ermüdung einzuhalten.

YENER & CAN (2018) gehen bei der Beschreibung des Rotationsansatzes auf ein dreistufiges konzeptionelles Vorgehen zur Anwendung ein, die Umsetzung mit den genutzten Tools wird jedoch kaum erläutert. Die Kompetenzen der Mitarbeitenden werden in Bezug auf eine möglichst geringe Bearbeitungszeit berücksichtigt. Zudem kann auf Basis der gemittelten Bewertung der physischen Belastung am Arbeitsplatz nicht auf die individuelle physische Beanspruchung geschlossen werden. Die Abfrage des NASA-TLX wird jeweils nach fünf Rotationen durchgeführt, weitere Interaktionen mit den Mitarbeitenden oder eine Rückmeldung an diese erfolgt nicht. Die Prädiktion der Beanspruchung ist in diesem Ansatz nicht vorgesehen.

3.3 Handlungsbedarf

Die umfangreiche Literaturübersicht in den Kategorien kompetenzorientierte, belastungsorientierte, belastungs- und kompetenzorientierte und beanspruchungs- und

kompetenzorientierte Ansätze (Abbildung A-2 in Anhang A) zeigt das große Forschungsinteresse im Bereich der menschenorientierten Personaleinsatzplanung. Dies geht einher mit dem in der Einleitung genannten Ziel, den Herausforderungen des Produktionsumfelds (demografischer Wandel, Digitalisierung, zunehmende Variantenvielfalt) mit neuen Ansätzen der Personaleinsatzplanung entgegenzuwirken.

| | Kriterium 1 | | | Kriterium 2 | | | Kriterium 3 | |
|-------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------|---------------------------------|--|-------------------------------------|
| | 1.1: Beschreibung der Belastung | | 1.2: Beschreibung der Kompetenzen | 2.1: Messung der Beanspruchung | | 2.2: Prognose der Beanspruchung | 3.1: Generierung von Personaleinsatzplänen | 3.2: Kommunikation der Einsatzpläne |
| | physisch | psychisch | | physisch | psychisch | | | |
| BOENZI ET AL. (2015) | ● | - | ◐ | - | - | - | ◐ | - |
| BOENZI ET AL. (2016) | ● | - | ◐ | - | - | - | ◐ | - |
| MOSSA ET AL. (2016) | ● | - | ● | - | - | - | - | - |
| ASENSIO-CUESTA ET AL. (2012A) | ● | ◐ | ◐ | - | - | - | ◐ | - |
| ASENSIO-CUESTA ET AL. (2019) | ● | - | ◐ | - | - | - | ◐ | ◐ |
| DIEGO-MAS (2020) | ● | ◐ | ● | - | - | - | ◐ | - |
| MONDAL ET AL. (2013) | ● | - | ● | - | - | - | ● | - |
| BOTTI ET AL. (2017) | ● | ◐ | ● | - | - | - | ◐ | - |
| BOTTI ET AL. (2021) | ● | ◐ | ● | - | - | - | ◐ | - |
| HOCHDÖRFFER ET AL. (2018) | ● | - | ◐ | - | - | - | ● | ◐ |
| DIGIESI ET AL. (2018) | ● | - | ● | - | - | - | ◐ | - |
| YENER & FERYALCAN (2018) | ◐ | - | ● | ◐ | ◐ | - | ◐ | - |
| FINCO ET AL. (2020) | ◐ | - | ● | ● | - | - | ◐ | - |
| RAO PABOLU ET AL. (2021) | ◐ | - | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | ◐ | - |
| KATIRAE ET AL. (2021) | ◐ | - | ◐ | ● | - | - | ◐ | - |
| DALLEMURA & DINI (2022) | ● | - | ● | ● | ◐ | - | ◐ | - |

| Legende | | | |
|---------|--|--------------------------------|-------------------------------------|
| - | wird nicht betrachtet | nicht erwähnt oder alle gleich | wird nicht betrachtet |
| ◐ | nur einzelne Aspekte werden analysiert | ja/nein-Unterscheidung | wird in Teilaspekten berücksichtigt |
| ● | Arbeitsplatz wird komplett betrachtet | differenziert berücksichtigt | wird komplett betrachtet |

Abbildung 3-7: Bewertung der Ansätze aus der Literatur anhand der vorab definierten Kriterien

Die Analyse der in Abschnitt 3.2 beschriebenen Ansätze aus der Literatur mit Hilfe der Bewertungskriterien aus Abschnitt 3.1 lassen Rückschlüsse auf den Handlungsbedarf hinsichtlich der Entwicklung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage zu, siehe Abbildung 3-7. Folgende Aspekte können abgeleitet werden.

Kriterium 1:*Kriterium 1.1: Beschreibung der Belastung (physisch, psychisch)*

Hinsichtlich der Beschreibung und Integration der Arbeitsplatzbelastung in der Einsatzplanung werden physische Aspekte vielfach vollumfänglich abgedeckt. Hierbei lassen sich lediglich die Erhebungsmethoden in Bezug auf ihren Detailgrad und das nötige Vorwissen unterscheiden. Im Ansatz von MONDAL ET AL. (2013) wird beispielsweise ein sechsstufiges Grob-Screening zur Erfassung physischer Belastung genutzt, wohingegen HOCHDÖRFFER ET AL. (2018) das Experten-Verfahren EAWS und BOTTI ET AL. (2021) das Experten-Verfahren OCRA anwenden.

Psychische Belastung ist lediglich in sehr wenigen Ansätzen enthalten und dort meist nur mit einzelnen Aspekten beschrieben. BOTTI ET AL. (2021) berücksichtigen beispielsweise die mentalen Arbeitsplatzanforderungen durch die Entscheidungskompetenz oder die eigene Initiative. Da diese Aspekte nur einen kleinen Teil der psychischen Arbeitsplatzbelastung abdecken, besteht Handlungsbedarf.

Kriterium 1.2: Beschreibung der Kompetenzen

Kompetenzen werden in allen vorgestellten Ansätzen zum Vergleich von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden genutzt, wobei sich der Detailgrad unterscheidet. Einige Ansätze differenzieren durch eine reine ja/nein-Unterteilung, ob eine Person die notwendigen Kompetenzausprägungen hat, um an einem Arbeitsplatz zu arbeiten (z. B. RAO PABOLU & SHRIVASTAVA 2021, BOENZI ET AL. 2016). Demgegenüber stehen Ansätze mit einer mehrstufigen Kompetenzeinteilung (z. B. YENER & CAN 2018, BOTTI ET AL. 2021, FINCO ET AL. 2020). In sehr wenigen Rotationsansätzen wird zudem die Option der Kompetenzentwicklung oder des Kompetenzerhalts berücksichtigt. HOCHDÖRFFER ET AL. (2018) integrieren im Falle einer personellen Überbesetzung zum Beispiel eine On-the-job-Qualifizierungsmaßnahme, bei der ein Arbeitsplatz doppelt von einer qualifizierten und einer unqualifizierten Person besetzt wird. Im gleichen Ansatz wird ebenso der Kompetenzerhalt durch das Speichern vorheriger Rotationsschritte in Kombination mit einem regelmäßigen Zurückrotieren zu vergangenen Arbeitsplätzen ermöglicht.

Kriterium 2:*Kriterium 2.1: Messung der Beanspruchung (physisch, psychisch)*

In Bezug auf Beanspruchung wird in aktuellen Ansätzen bereits teils oder vollumfänglich die physische Beanspruchung am Arbeitsplatz integriert. DALLE MURA & DINI (2022) und FINCO ET AL. (2020) messen beispielsweise den individuellen Energiebedarf der Mitarbeitenden an den einzelnen Arbeitsplätzen und schließen somit auf die individuelle Beanspruchung. In dem Ansatz von KATIRAE ET AL. (2021) wird die individuelle physische Beanspruchung mit Hilfe der Borg-Skala erhoben.

Psychische Beanspruchung hingegen ist in drei Ansätzen teilweise berücksichtigt. YENER & CAN (2018) erfassen die individuelle psychische Beanspruchung mittels des Fragebogens NASA-TLX. Es wird jedoch nicht weiter darauf eingegangen, ob die einzuhaltenden maximalen Grenzwerte personenindividuell oder allgemeingültig sind. In dem Ansatz von RAO PABOLU & SHRIVASTAVA (2021) liegt der Fokus auf der Erfassung der physischen Ermüdung mittels Pulsmessung und bei DALLE MURA & DINI (2022) wird die Beanspruchung über den Sauerstoffverbrauch bewertet. Beide Verfahren messen eine Kombination aus physischer und psychischer Beanspruchung, weswegen spezifische Aussagen schwer zu treffen sind. Es besteht großer Handlungsbedarf bei der Berücksichtigung psychischer Beanspruchung im Rahmen der Erstellung von Rotationsplänen.

Kriterium 2.2: Prognose der Beanspruchung (physisch, psychisch)

Zahlreiche Ansätze in der Literatur erfassen die individuelle Beanspruchung pro Person pro Arbeitsplatz, um diese Werte für die Einsatzplanung zu nutzen. Dieses Vorgehen ist mit einem großen Initialaufwand pro Person und mit Neuerfassungen bei individuellen oder arbeitsplatzbezogenen Veränderungen verbunden. Um die individuelle Beanspruchung nicht während der Montage erfassen zu müssen und die Skalierbarkeit der Einsatzplanung zu gewährleisten, können Prädiktionsmodelle zur datenbasierten Berechnung der physischen und psychischen Beanspruchung genutzt werden. Ähnlich dazu wird in der Literatur aktuell bei RAO PABOLU & SHRIVASTAVA (2021) ein digitaler Zwilling zur Ermüdungsprädiktion von Mitarbeitenden genutzt. Auf die Details bezüglich Datengrundlage und Prädiktionsmodell wird nicht eingegangen. Dementsprechend besteht Handlungsbedarf, ein skalierbares, praxistaugliches Modell zur Prognose physischer und psychischer Beanspruchung zu generieren.

Kriterium 3:*Kriterium 3.1: Generierung von Personaleinsatzplänen*

Zur erfolgreichen Generierung von Personaleinsatzplänen wird ein strukturiertes methodisches Vorgehen benötigt, welches Mitarbeitende zu Arbeitsplätzen unter Berücksichtigung der vorhandenen Kompetenzen und der vorherrschenden Beanspruchungen zuteilt. Zahlreiche Ansätze in der Literatur beschreiben die mathematischen Formeln im Detail und die Anwendung an einem Beispiel. KATIRAE ET AL. (2021) und DIGIESI ET AL. (2018). HOCHDÖRFFER ET AL. (2018) stellen beispielsweise zusätzlich das Vorgehen in einem Ablaufdiagramm mit Entscheidungspunkten dar. Keiner der vorgestellten Ansätze beschreibt das methodische Vorgehen vollumfänglich in einer übertragbaren, schrittweisen Abfolge, bei der die einzelnen Werkzeuge, wie Arbeitsplatz-Profile, verwendete Methoden zur Belastungs-/ Beanspruchungsmessung, der mathematische Algorithmus und der Optimierungsansatz vorgestellt werden.

Kriterium 3.2: Kommunikation zu den Mitarbeitenden

Nur vereinzelt geht in den beschriebenen Ansätzen zur Personaleinsatzplanung die Kommunikation mit den beteiligten Mitarbeitenden über die ggf. fragebogenbasierte Erfassung der Beanspruchung hinaus. In den Ansätzen von ASENSIO-CUESTA ET AL. (2019) und HOCHDÖRFFER ET AL. (2018) können die beteiligten Mitarbeitenden Arbeitsplatzpräferenzen angeben, welche bei der Erstellung der Rotationspläne berücksichtigt werden. Die Rückmeldung oder Zufriedenheit der Mitarbeitenden bezüglich der Arbeitsplatzzuordnung oder der empfundenen Beanspruchung wird in der Literatur nach aktuellem Erkenntnisstand bei der Rotationsplanung nicht kontinuierlich berücksichtigt. Durch die Integration des Mitarbeitendenfeedbacks kann die Mitarbeitendenzufriedenheit und -motivation gesteigert werden (WEBER & GESING 2019, S. 11). Daher besteht Handlungsbedarf für die Berücksichtigung der Mitarbeitendenkommunikation und -interaktion bei der Personaleinsatzplanung.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem industriellen (Abschnitt 1.2) und wissenschaftlichen Leidensdruck (Abschnitt 3.3) ein Handlungs- und Entwicklungsbedarf. Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist die Entwicklung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage, welche die Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Mitarbeitenden erhält. Dabei sollen beanspruchungsorientierte Aspekte, wie physische und psychische Belastung und Beanspruchung, sowie kompetenzorientierte Aspekte, wie Kompetenzerhalt, berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 1.4.1 erwähnt, ist der zu entwickelnde Ansatz Teil der Anwendungsforschung. Daher wird eine anwendungsorientierte Lösung angestrebt,

welche die Verantwortlichen bei der Personaleinsatzplanung in der Montage unterstützt. Für die Realisierung einer anwendungsfreundlichen Einsatzplanung werden für den Vergleich und die Zuordnung von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profile benötigt. In der Literatur sind keine AP- oder MA-Profile vorhanden, welche sowohl Kompetenzen als auch physische und psychische Leistungsvoraussetzungen enthalten. Zudem ist neben der mathematischen Erstellung der Rotationspläne eine bedienungsfreundliche Anwendungsmethode für den Einsatz in der Industrie vorgesehen. Im nachfolgenden Kapitel 4 werden Anforderungen an die zu erstellende Methode definiert und das Konzept beschrieben.

4 Überblick über die Methode

Aufbauend auf der Erläuterung des heuristischen Bezugsrahmens, den Grundlagen und dem Stand der Erkenntnisse werden in diesem Kapitel zunächst **Anforderungen an die zu entwickelnde Methode** gestellt (Abschnitt 4.1). Sie dienen einerseits der inhaltlichen Orientierung bei der Erarbeitung der einzelnen Methodenbausteine in Kapitel 5 und unterstützen andererseits bei der abschließenden Validierung der Ergebnisse in Abschnitt 7.1. Im Anschluss wird die **Konzeption der Methode** vorgestellt (Abschnitt 4.2), bei der sowohl auf den Aufbau als auch auf das Vorgehen bei der Entwicklung der einzelnen Methodenbausteine eingegangen wird.

4.1 Anforderungen an die Methode

Um die in Abschnitt 3.3 beschriebene Forschungslücke zu schließen, wird eine Methode zur Entwicklung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Einsatzplanung entworfen. Das Ziel ist der langfristige Erhalt der Gesundheit und Leistungsfähigkeit der Mitarbeitenden in der Produktion. Im Sinne der angewandten Wissenschaften werden zur strukturierten Erreichung dieses Ziels Anforderungen definiert. Diese Anforderungen, auch Erfolgskriterien genannt, sind nötig, um zu überprüfen, ob die entwickelte Methode tatsächlich zur Zielerreichung führt (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 26).

Eine Methode wird dabei als ein „regelgeleitetes Verfahren zur Bearbeitung von Aufgaben“ definiert (DIAZ-BONE & WEISCHER 2015, S. 262). Sie ist als planmäßige Vorschrift zur Lösung eines Problems oder einer Aufgabenstellung zu verstehen (LINDEMANN 2009, S. 57). Durch die regelbasierte Vorgehensweise mit konkreten Handlungsanweisungen, auf welche Art und Weise etwas zu tun ist, haben Methoden einen starken operativen Charakter (HÄDER 2019, S. 13, LINDEMANN 2009, S. 58). Es wird zwischen qualitativen und quantitativen Methoden unterschieden. Qualitative Methoden fokussieren sich auf das Verstehen und Analysieren individueller Handlungen, während quantitative Methoden verallgemeinerbare Aussagen auf Basis von standardisierten Datenerhebungsverfahren zum Ziel haben (BORTZ & DÖRING 2006, S. 296). Die in dieser Arbeit angestrebte Methode soll dabei einen quantitativen Charakter aufweisen. Die Anforderungen an die Methode sind unterteilt in allgemeine Kriterien (Abschnitt 4.1.1), welche auf einer Literaturrecherche basieren, und anwendungsbezogene Kriterien (Abschnitt 4.1.2), welche gemeinsam mit

Experten und Expertinnen aus der Industrie identifiziert wurden, sowie inhaltliche Kriterien (Abschnitt 4.1.3), die sich aus der Zielsetzung ergeben. Anforderungen werden in diesem Kontext als zu erfüllende Kriterien verstanden, die einen Bedarf sowie damit einhergehende Voraussetzungen ausdrücken (ISO 29148 - 2018, S. 5).

4.1.1 Allgemeine Anforderungen

Im Rahmen der empirischen Forschung werden qualitative Anforderungen, sogenannte Gütekriterien, an wissenschaftliche Methoden gestellt (HELFRICH 2016, S. 95, AEPPLI ET AL. 2016, S. 139). Die drei Qualitätskriterien qualitativer Forschung Objektivität, Reliabilität und Validität stellen sicher, dass die Ergebnisse wissenschaftlicher Methoden nicht beliebig zustande kommen, sondern intersubjektiv nachvollziehbar, wiederholbar sowie dem verfolgten Zweck angemessen sind (HELFRICH 2016, S. 95).

- **Objektivität:** Objektivität, auch Sachlichkeit oder Anwendendenunabhängigkeit genannt, gilt als das grundlegende Gütekriterium (BORTZ & DÖRING 2006, S. 195). Es bezieht sich auf die Unabhängigkeit der angewandten Methoden und der erzielten Messergebnisse von der durchführenden, auswertenden oder interpretierenden Person (NERDINGER ET AL. 2019, S. 281). Das bedeutet, dass die Methode unabhängig von den Anwendenden zum gleichen Ergebnis führt. (HUSSY ET AL. 2013, S. 23, HELFRICH 2016, S. 96)
- **Reliabilität:** Eine Methode gilt als reliabel bzw. zuverlässig oder präzise, wenn bei wiederholter Durchführung unter vergleichbaren Bedingungen dasselbe Ergebnis erzielt wird (HÄDER 2015, S. 104). Das Resultat einer reliablen Methode muss zuverlässig reproduzierbar sein (HELFRICH 2016, S. 96). In der Regel ist es aufgrund von Messungenauigkeiten, veränderten Umgebungsbedingungen oder interindividuellen Tagesformen der Probanden und Probandinnen nicht möglich, eine Reliabilität von 100 % zu erreichen (AEPPLI ET AL. 2016, S. 140). Die Objektivität ist für die Reliabilität grundlegend vorauszusetzen, da eine fehlende Sachlichkeit oder Anwendendenunabhängigkeit zu Messfehlern und Ungenauigkeiten und somit zu einer reduzierten Zuverlässigkeit führt (BORTZ & DÖRING 2006, S. 200).
- **Validität:** Die Validität prüft die Gültigkeit der Forschungsergebnisse (HÄDER 2015, S. 109). Dabei wird beurteilt, in welchem Ausmaß die Methode ein vorher definiertes Untersuchungsziel erfasst und misst (HUSSY ET AL. 2013, S. 24). Im Rahmen von Forschungsstrategien wird zwischen interner und externer Validität unterschieden (HELFRICH 2016, S. 101). Erstere bezieht sich auf die eindeutige Interpretierbarkeit der Daten, Vorgehensweisen und Ergebnisse. Die externe Validität befasst sich mit der Übertragbarkeit der ermittelten Ergebnisse auf andere

Rahmenbedingungen. Die Validität gilt laut HELFRICH (2016, 99f.) als wichtigstes Gütekriterium, da eine objektive, reliable Methode ohne validen Bezug zur Forschungsfrage keinen Mehrwert liefert. Um diese Anforderung der Validität zu erfüllen, muss die Objektivität und Reliabilität der Methode gewährleistet sein (HUSSY ET AL. 2013, S. 25, HÄDER 2015, S. 109).

4.1.2 Anwendungsbezogene Anforderungen

Neben den allgemeinen Anforderungen gewährleisten die folgenden anwendungsbezogenen Kriterien die erfolgreiche Umsetzung der zu entwickelnden Methode in der Praxis. Diese wurden gemeinsam mit neun Experten und Expertinnen aus der Automobilindustrie identifiziert. Die Befragung der Experten und Expertinnen fand im Rahmen einer qualitativen Studie des Forschungsprojekts BeKoMi (beanspruchungs- und kompetenzorientierte Mitarbeiterereinsatzplanung) statt (BOTZ 2022). Eine Übersicht der befragten Experten und Expertinnen ist in Abbildung B-3 in Anhang B zu sehen. Die Ergebnisse werden nachfolgend erläutert.

- **Anwendbarkeit:** Die Methode muss so anwendbar und praxistauglich gestaltet sein, dass die Nutzenden ohne Vorerfahrungen die Methode selbstständig durchführen können. Dafür ist eine gut verständliche, nachvollziehbare Beschreibung der einzelnen Handlungsschritte notwendig. Darüber hinaus soll mit der zu entwickelnden Methode schnell auf kurzfristige Veränderungen der täglichen Personaleinsatzplanung reagiert werden können. Zudem müssen die Zusammenhänge der einzelnen Methodenschritte transparent für die Anwendenden dargestellt werden, um das Verständnis und das Vertrauen für die Nutzung zu fördern.
- **Geringer Ressourceneinsatz:** In Bezug auf einen geringen Ressourceneinsatz ist bei der zu entwickelnden Methode darauf zu achten, dass die Implementierung und die laufende Nutzung keinen unverhältnismäßig hohen Einsatz der Mitarbeitenden erfordern. Zudem ist hinsichtlich der Kommunikation mit den Mitarbeitenden auf vorhandene Smart Devices oder Computer zurückzugreifen, sofern dies möglich ist. Um eine einfache, ressourcenschonende Nutzung der Einsatzplanung zu gewährleisten, ist die Wahl standardisierter Schnittstellen zum Import und Export von Daten wünschenswert.
- **Adaptierbarkeit:** Um die Adaptierbarkeit der Methode sicherzustellen, muss die zu entwickelnde Einsatzplanung je nach Anwendungsfall erweiterbar bzw. anpassbar sein. Eine Variation zwischen kleinen und großen Teamgrößen, eine Integration mehrerer Arbeitsgruppen und weitere unternehmensindividuelle Anpassungen in

der Anwendungsmethode oder im Softwaretool sollen möglich sein. Dadurch wäre die zu entwickelnde Methode für alle Gruppen- und Unternehmensgrößen nutzbar.

- **Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit:** Aufbauend auf der Anforderung der Adaptierbarkeit soll die Methode übertragbar auf weitere Anwendungsfälle und somit allgemeingültig für den in der Einleitung beschriebenen Betrachtungsbereich sein.

4.1.3 Inhaltliche Anforderungen

Die nachfolgend gelisteten inhaltlichen Anforderungen ergeben sich aus der Zielsetzung und den dazugehörigen Forschungsfragen (siehe Kapitel 1.3). Mit Hilfe der Methode werden Unternehmen dabei unterstützt, eine beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage zu realisieren. Die inhaltlichen Anforderungen resultieren direkt aus den drei Forschungsfragen und liefern Leitlinien für die Bausteine der Methode.

Anforderungen zu Forschungsfrage 1:

- **Beschreibung wesentlicher Elemente im menschenorientierten Arbeitssystem:** Um ein einheitliches Verständnis des menschenorientierten Arbeitssystems zu erlangen, ist eine Beschreibung der Elemente und deren Zusammenhänge erforderlich. Dabei soll das Element Arbeitsplatz Kompetenzanforderungen und körperliche sowie geistige Anforderungen inkludieren. Analog dazu sollen die menschenbezogenen Aspekte sowohl die vorhandenen Kompetenzen als auch die Leistungsvoraussetzungen enthalten.
- **Vergleich der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Eigenschaften:** Um Arbeitsplätze und Mitarbeitende bestmöglich in der Praxis beurteilen zu können, sind relevante Vergleichskriterien übersichtlich in einem anwendungsfreundlichen Werkzeug, beispielsweise einem individuellen Profil, darzustellen. Neben der reinen Darstellung der Kriterien sind zudem einfache, verständliche Skalen zur jeweiligen Quantifizierung nötig.

Anforderung zu Forschungsfrage 2:

- **Messung physischer und psychischer Beanspruchung:** Planende sollten bei der Auswahl geeigneter Fragebögen und Smart Devices zur Beanspruchungsmessung methodisch unterstützt werden. Dabei sind unternehmens- und arbeitsplatzspezifische Einschränkungen zu berücksichtigen.

- **Prognose physischer und psychischer Beanspruchung:** Das Ziel der zu entwickelnden Methode ist der langfristige Erhalt der Mitarbeitendengesundheit und -leistung. Um hierfür eine passende Einsatzplanung vorzunehmen, müssen die individuellen physischen und psychischen Beanspruchungen der Mitarbeitenden prognostiziert werden. Eine gute Prädiktionsfähigkeit ist daher ausschlaggebend für die Zielerreichung.

Anforderungen zu Forschungsfrage 3:

- **Generierung von Personaleinsatzplänen:** Die Methode soll beanspruchungs- und kompetenzorientierte Einsatzpläne generieren, welche sowohl physische als auch psychische Aspekte berücksichtigen. Hierbei ist einerseits ein Vergleich zwischen den Kompetenzanforderungen der Arbeitsplätze und den vorhandenen Kompetenzen der Mitarbeitenden durchzuführen. Andererseits sind Grenzwerte physischer und psychischer Beanspruchung zu berücksichtigen.
- **Kommunikation der Personaleinsatzpläne zu den Planenden und Mitarbeitenden:** Die Methode soll eine Interaktionsschnittstelle zu den Planenden als auch zu den Mitarbeitenden enthalten. Einerseits sollen Planende favorisierte, automatisch erstellte Einsatzpläne angezeigt werden, von denen sie eine aus ihrer Sicht passende Personaleinsatzplanung auswählen können. Die finale Entscheidung der Einsatzplanung soll somit weiterhin beim Menschen liegen. Andererseits soll den Mitarbeitenden die Einsatzplanung kommuniziert und darüber hinaus die Möglichkeit geben werden, aktiv Rückmeldung über das System einzusteuern.

4.2 Konzeption der Methode

Um das Ziel dieser Arbeit, eine Methode zur beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung, zu erreichen, wird nachfolgend ein konzeptioneller Überblick gegeben. Der Fokus liegt hierbei auf der Beschreibung der einzelnen Methodenbausteine. Eine detaillierte Erläuterung der wissenschaftlichen Sichtweise und die Entwicklung der einzelnen Bausteine folgt in Kapitel 5, bevor die Methode aus Anwendungssicht in Abschnitt 6.1 skizziert wird.

Die Methode besteht aus drei Bausteinen, wobei die parallel durchgeführten Bausteine 1 und 2 die Grundlage für Baustein 3 darstellen, siehe Abbildung 4-1. **Baustein 1** beinhaltet den Vergleich zwischen Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden im menschenorientierten Arbeitssystem. Hierfür wird zunächst ein Systemmodell zur Beschreibung wesentlicher Elemente im menschenorientierten Arbeitssystem beschrieben, wodurch ein grundlegendes Verständnis für den Betrachtungsbereich geschaffen wird. Darauf aufbauend folgt die

Identifizierung und Klassifizierung relevanter Vergleichskriterien von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden, welche in Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profilen zusammengefasst werden. Abschließend wird in diesem Baustein die Entwicklung einer Bewertungslogik zum strukturierten Vergleich von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden beschrieben. In **Baustein 2** wird zunächst ein Vorgehen zur strukturierten Auswahl von Fragebögen und Smart Devices zur Beanspruchungsmessung im Rahmen eines Methodenbaukastens erstellt. Anschließend steht die Prädiktion physischer und psychischer Beanspruchung im Vordergrund. Hierbei liegt der Fokus auf der Entwicklung eines Prädiktionsmodells zur Prognose physischer und psychischer Beanspruchung auf Basis von Studiendaten. Die Ergebnisse der ersten beiden Bausteine fließen dann in die Generierung von Personaleinsatzplänen in **Baustein 3** ein. Dabei wird eine Rotationslogik zur Erstellung und Bewertung der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzpläne erstellt. Die beanspruchungsminimierten Optionen der Einsatzplanung werden den Teamleitenden dann über eine Nutzendenschnittstelle zur finalen Auswahl angezeigt. Über eine weitere Interaktionsschnittstelle wird der ausgewählte Einsatzplan den Mitarbeitenden mitgeteilt. Mit Blick auf die übergeordnete Forschungsmethodik dieser Arbeit, der Design Research Methodology nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009), entspricht die Entwicklung der dreistufigen Methode der präskriptiven Studie.

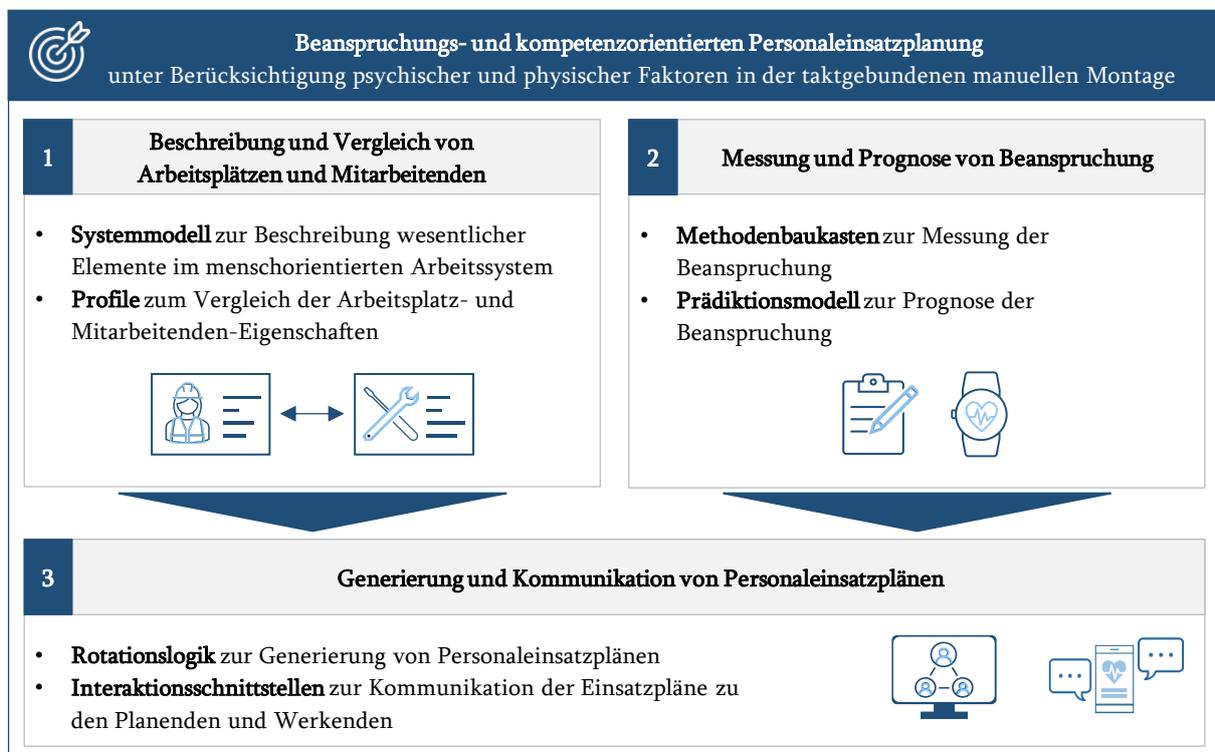


Abbildung 4-1: Überblick der dreistufigen Methode zur Entwicklung der Personaleinsatzplanung

5 Entwicklung der Methode

Das nachfolgende Kapitel erläutert auf Basis der im vorherigen Kapitel geschilderten Struktur die drei Bausteine und Werkzeuge der Methode zur Erstellung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage, siehe Abbildung 5-1. Der Fokus liegt hierbei auf der Methodenerstellung und der Entwicklung der einzelnen Werkzeuge. Dabei steht im ersten Baustein das **Systemmodell des menschorientierten Arbeitssystems** mit den Elementen Arbeitsplatz und Mitarbeitende sowie deren **Vergleich anhand von Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profilen** im Mittelpunkt (Abschnitt 5.1). Anschließend beschreibt Baustein zwei die **Messung und Prognose von physischer und psychischer Beanspruchung** (Abschnitt 5.2). Die Ergebnisse der ersten beiden Bausteine bilden die Basis für Baustein drei, der **Generierung und Kommunikation von Personaleinsatzplänen** (Abschnitt 5.3). Jeder Baustein beantwortet dabei eine Forschungsfrage. Das Kapitel schließt mit einer **Zusammenfassung der Methodenentwicklung** (Abschnitt 5.4). Abbildung 5-1 zeigt die wissenschaftlichen Arbeitsergebnisse der einzelnen Bausteine sowie die dazugehörige wissenschaftliche Vorgehensweise mit Literaturrecherchen, Probandenstudien und Gesprächen mit Experten und Expertinnen.

5.1 Baustein 1 | Beschreibung und Vergleich von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden

Der erste Baustein befasst sich mit der Beantwortung der ersten Forschungsfrage: „*Wie kann ein menschorientiertes Arbeitssystem der taktgebundenen manuellen Montage beschrieben und Arbeitsplätze mit Mitarbeitenden verglichen werden?*“. Um die Forschungsfrage zu beantworten, erfolgt zunächst die Entwicklung eines Systemmodells zur Beschreibung wesentlicher Elemente im menschorientierten Arbeitssystem (Abschnitt 5.1.1). Basierend auf der Charakterisierung der Systemelemente werden anschließend Profile zum Vergleich der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Eigenschaften erstellt (Abschnitt 5.1.2). Baustein eins schließt mit der Zusammenfassung der Ergebnisse (Abschnitt 5.1.3). In die Erarbeitung dieses Lösungsbausteins fließen folgende von der Autorin betreute wissenschaftliche Studienarbeiten ein: BILL (2020), SPRENGER (2020),

MAIER (2020), SAINI (2021), WERNER (2021), LACHER (2021), GANIA (2021), BECK (2022) und MÜLLER (2022).



Abbildung 5-1: Übersicht der wissenschaftlichen Arbeitsergebnisse und wissenschaftlichen Vorgehensweisen in den einzelnen Bausteinen

5.1.1 Systemmodell zur Beschreibung des menschorientierten Arbeitssystems

Das Ziel dieses Abschnitts ist, ein grundlegendes Verständnis für die Arbeitsplätze in der manuellen Montage und deren Wirkung auf die Mitarbeitenden zu schaffen. Dies kann

durch eine menschenorientierte Darstellung des Arbeitssystems und der Beschreibung der Systemelemente realisiert werden. Möglich ist es dabei, den Unterschied zwischen Belastung und Beanspruchung sowie die Entstehung von individueller Beanspruchung zu visualisieren. Zur Erstellung des Systemmodells wurden eine multiperspektivische Literaturrecherche zu Arbeitssystemen sowie Gespräche mit Experten und Expertinnen aus der Industrie genutzt.

Auf Basis der in Abschnitt 2.1.2 vorgestellten grundlegenden Arbeitssysteme und aktuellen Ansätze wurde ein menschenorientiertes Arbeitssystem für die Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage entwickelt, siehe Abbildung 5-4, das nachfolgend erläutert wird. Die grundlegenden technischen/ingenieursbezogenen Modelldarstellungen eines Arbeitssystems nach WARNECKE ET AL. (1975, S. 11) und REFA (1985, S. 82) legen den Fokus auf die ganzheitliche, abstrakte und allgemeingültige Beschreibung der Systemelemente und deren Interaktionen. Das Ziel dabei ist die prozessorientierte Erläuterung der Erfüllung einer übergeordneten Arbeitsaufgabe. TROPSCHUH ET AL. (2019, S. 143) erweiterten die technische Beschreibung des Arbeitssystems um die kompetenzorientierte Charakterisierung des Menschen unter Heranziehung der Kompetenzübersicht nach ERPENBECK ET AL. (2017, S. XXV). Zudem wurde die Beschreibung des Arbeitsplatzes durch fünf detaillierende Eigenschaften spezifiziert, siehe Abbildung 5-2.

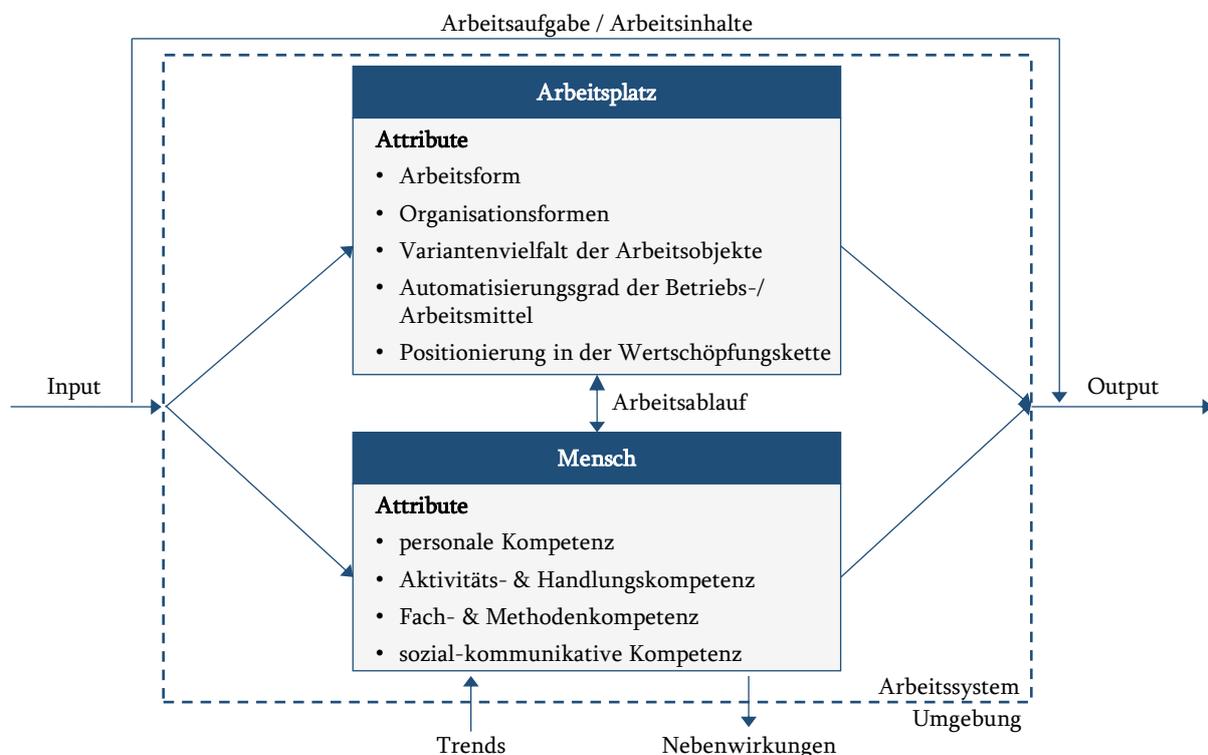


Abbildung 5-2: Erweitertes, kompetenzorientiertes Arbeitssystem
(in Anlehnung an TROPSCHUH ET AL. 2019, S. 143)

In der arbeitspsychologischen und -ergonomischen Systembeschreibung nach LEPLAT & CUNY (1977, S. 77) liegt der Fokus auf der Arbeitsausführung, welche von den Eigenschaften der Mitarbeitenden und den vorherrschenden Umgebungsbedingungen abhängt. Der Ansatz enthält zudem eine Beschreibung der individuellen Eigenschaften und der Beanspruchung der Mitarbeitenden. VERNIM (2020, 79f.) integrierte einige dieser menschenbezogenen Aspekte, wie zum Beispiel Belastung, Kompetenzen und Konstitution, in die Systembeschreibung und ergänzte beispielhafte Ausprägungen dieser Merkmale. Aus der Systembeschreibung geht jedoch nicht das menschenbezogene Zusammenwirken von Mitarbeitenden und Arbeitsplätzen sowie die individuelle Beanspruchung hervor. Darüber hinaus separierte VERNIM (2020) neben den Systemelementen Mensch und Arbeitsablauf auch Betriebsmittel und Arbeitsobjekt. Die Interaktion zwischen Systemelementen, wie beispielsweise die Auswirkung der Betriebsmittel auf die Menschen, bleibt außer Betracht.

Auf Basis der genannten Vorarbeiten wurde ein menschenorientiertes Framework eines Simulationsmodells zur Personaleinsatzplanung entwickelt (TROPSCUH ET AL. 2021c, S. 1819). Das Framework berücksichtigt neben den Elementen Arbeitsplatz (AP) und Mitarbeitende (MA) ebenso die Montagesequenz und den Prozess. Der Fokus liegt dabei auf der Verdeutlichung der Auswirkungen auf die Mitarbeitenden, der physischen und psychischen Beanspruchung. Die Sequenz der zu montierenden Produktvarianten mit unterschiedlichen Montagezeiten im Laufe des Prozesses beeinflusst die Ausgewogenheit der Arbeitslast. Die Arbeitsplätze werden zudem durch physische und psychische Belastung sowie durch Kompetenzanforderungen beschrieben. Analog zu den Arbeitsplätzen werden die Mitarbeitenden durch Kompetenzen sowie physische und psychische Leistungsvoraussetzungen charakterisiert, siehe Abbildung 5-3.

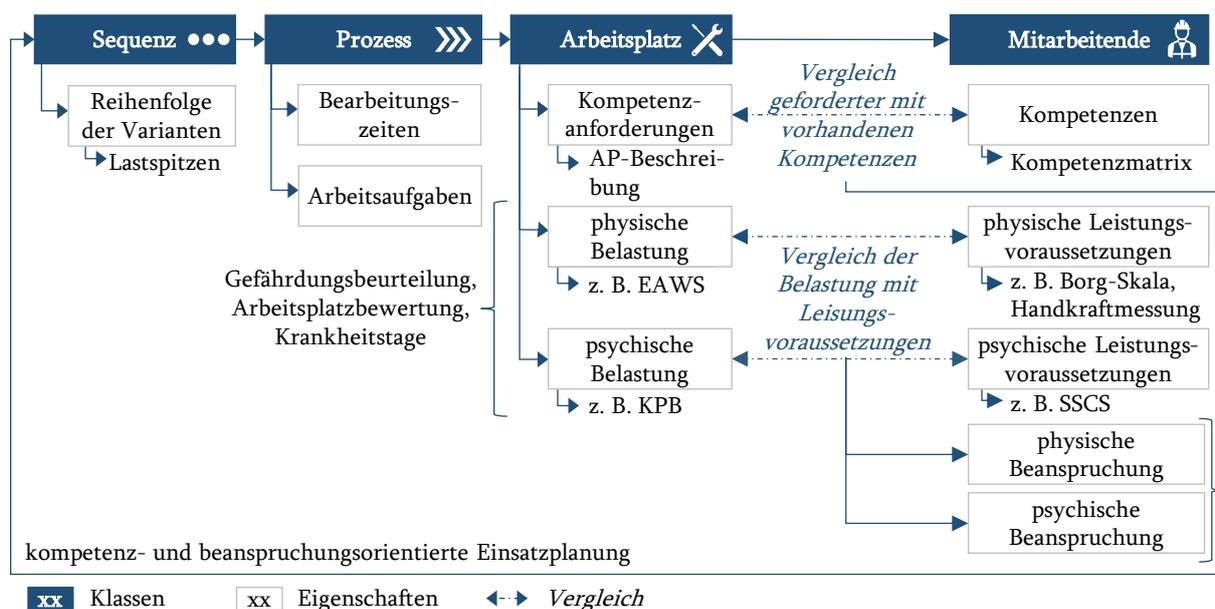


Abbildung 5-3: Framework zur Erstellung einer kompetenz- und beanspruchungsorientierten Personaleinsatzplanung (in Anlehnung an TROPSCUH ET AL. 2021c, S. 1819)

Durch diesen analogen Aufbau ist ein einfacher Vergleich der Elementeigenschaften im Rahmen der Einsatzplanung möglich. Aus dem Vergleich der Belastung des Arbeitsplatzes und den Leistungsvoraussetzungen der Mitarbeitenden ergibt sich die physische und psychische Beanspruchung der Mitarbeitenden. Diese Beanspruchung kann anschließend wiederum als Eingangsgröße zur Sequenz-, Prozess- und AP-Planung genutzt werden. Im Rahmen von 10 Interviews mit Experten und Expertinnen aus Industrie und Wissenschaft wurden das Framework, die Elementeigenschaften und die zugrunde liegende Literatur hinsichtlich Verständlichkeit und Praxistauglichkeit geprüft. Die Experten und Expertinnen setzten sich aus Mitarbeitenden der Softwareentwicklung, verschiedener Funktionen der Automobilindustrie und Professoren aus der Wissenschaft zusammen, siehe Abbildung C-4 in Anhang C. Sie merkten an, dass im Rahmen der Einsatzplanung der Fokus auf dem Vergleich zwischen Mitarbeitenden und Arbeitsplätzen liegt. Produktionstechnische Einflüsse, wie die Integration von Sequenz und Prozess analog zu TROPSCHUH ET AL. (2021c) oder die Unterscheidung zwischen Betriebsmittel und Arbeitsobjekt analog zu VERNIM (2020), werden als gegebene Rahmenbedingungen betrachtet und im menschorientierten Arbeitssystem nicht weiter spezifiziert. Das daraus resultierende, aus wissenschaftlicher und praktischer Sichtweise hergeleitete, menschorientierte Arbeitssystem für die Personaleinsatzplanung ist in Abbildung 5-4 dargestellt und wird nachfolgend genauer beschrieben.

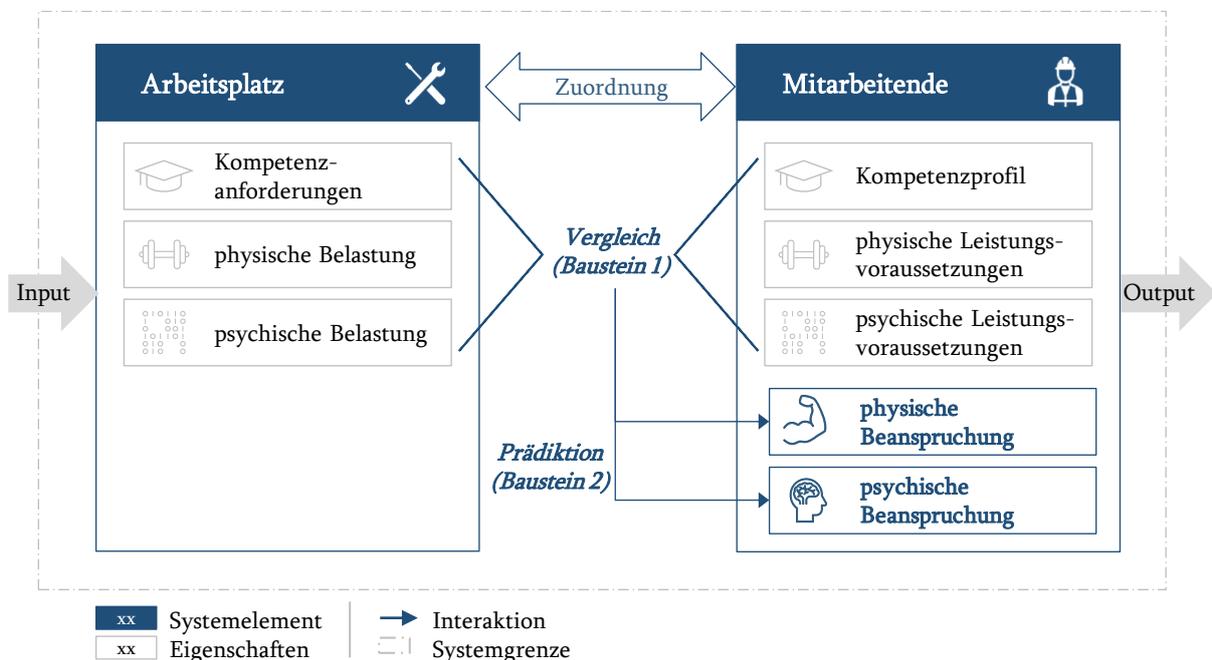


Abbildung 5-4: Systemmodell des menschorientierten Arbeitssystems mit dem Zusammenspiel der Systemelemente

Das entwickelte menschorientierte Arbeitssystem besteht aus den beiden Systemelementen Arbeitsplatz und Mitarbeitende. Diese sind analog zueinander charakterisiert, um eine gute Vergleichbarkeit zwischen den Arbeitsplatzzeigenschaften und den Eigenschaften der

Mitarbeitenden im Rahmen der Personaleinsatzplanung zu ermöglichen. Das Systemelement *Arbeitsplatz* wird durch die drei Eigenschaften physische, psychische Belastung sowie Kompetenzanforderungen beschrieben. Die Kompetenzanforderungen können aus der Arbeitsplatzbeschreibung und den zu erledigenden Tätigkeiten abgeleitet werden. Eine Erfassung der physischen und psychischen Belastung am Arbeitsplatz ist mit den in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Methoden möglich, zum Beispiel der EAWS-Methode für physische Belastung und der KPB-Methode für psychische Belastung. Im Vergleich zur klassischen REFA-Systemdarstellung werden im menschenorientierten Arbeitssystem die am Arbeitsplatz vorherrschenden Umgebungseinflüsse bereits bei der physischen und psychischen Belastung und den benötigten Kompetenzen inkludiert. Dazu zählen beispielsweise Lärm, Licht, Verkettung zu anderen Montagestationen oder Teamarbeit.

Analog dazu erfolgt die Beschreibung des Systemelements der *Mitarbeitenden* anhand der drei Eigenschaften Kompetenzen, physische sowie psychische Leistungsvoraussetzungen. Die Kompetenzen der Mitarbeitenden können in produzierenden Unternehmen oft aus Qualifikations- oder Kompetenzmatrizen entnommen werden. Mit Hilfe des Work-Ability-Index, des Biotality Index oder der Handkraftmessung ist zum Beispiel die Erfassung der physischen Leistungsvoraussetzungen möglich. Die psychische Leistungsfähigkeit von Mitarbeitenden kann beispielsweise durch die Screening Scale for Chronic Stress ermittelt werden (siehe Abschnitt 2.3.2).

Das entwickelte Modell bildet zudem die physische und psychische Beanspruchung der Mitarbeitenden ab, welche aus der Zuordnung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen im Rahmen der Einsatzplanung entsteht. Die individuelle Beanspruchung kann beispielsweise mit Hilfe des NASA-Task-Load-Index (psychisch) oder der Borg-Skala (physisch) erfasst werden. Die In- und Outputs des Arbeitssystems sind analog zu REFA (1985, S. 82) gestaltet.

Das Ergebnis dieses Abschnitts ist das Systemmodell zur Beschreibung der wesentlichen Elemente Arbeitsplatz und Mensch im menschenorientierten Arbeitssystem. Diese Systemdarstellung schärft das grundlegende Verständnis der Anwendenden hinsichtlich der Personaleinsatzplanung in der manuellen Montage, zeigt das Zusammenspiel zwischen den Elementen auf und gibt somit einen systematischen Überblick über die nachfolgenden Bausteine. Für den angestrebten Vergleich zwischen Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden aus Baustein 1 wurden beschreibende Profile und eine Bewertungslogik erstellt. Aus diesem Vergleich ergibt sich die individuelle Beanspruchung, welche auf der Basis von Referenzwerten prädiiziert werden kann (Baustein 2).

5.1.2 Profile zum Vergleich der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Eigenschaften

Für den strukturierten Vergleich zwischen Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden werden Profile mit den im Arbeitssystem (Abschnitt 5.1.1) beschriebenen Arbeitsplatz- und Mitarbeitendeneigenschaften sowie eine Bewertungslogik benötigt. Diese Profile und die Bewertungslogik dienen den Anwendenden als Unterstützung bei der Zuordnung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen. Die wissenschaftliche Vorgehensweise zur Entwicklung der Profile umfasst hierbei Literaturrecherchen sowie Gespräche mit Experten und Expertinnen. Nachfolgend wird zunächst auf die Entwicklung der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profile eingegangen, bevor anschließend die Erstellung der Bewertungslogik zum Vergleich der AP- und MA-Profile erläutert wird.

Erstellung von Arbeitsplatz und Mitarbeitenden-Profilen

Arbeitsplatz-Kompetenzanforderungen und Mitarbeitenden-Kompetenzen: Auf Basis des menschorientierten Arbeitssystems mit der Charakterisierung der Systemelemente ist es möglich, Arbeitsplatz (AP)- und Mitarbeitenden (MA)-Profile mit identischen Kriterien abzuleiten. Die Vergleichskategorien sind hierbei einerseits Kompetenzanforderungen bzw. Kompetenzen sowie andererseits physische und psychische Belastungen bzw. Leistungsvoraussetzungen. Zunächst erfolgt die Beschreibung des methodischen Vorgehens zur Identifikation der Kompetenzmerkmale, bevor anschließend auf die Belastungen und Leistungsvoraussetzungen eingegangen wird. Die in den einzelnen Vergleichskategorien identifizierten Merkmale können nach dem Baukastenprinzip zu AP- und MA-Profilen zusammengesetzt werden.

Die Identifikation relevanter Kompetenzanforderungen und Kompetenzen erfolgte im Rahmen eines dreistufigen methodischen Vorgehens in Anlehnung an MÜLLER (2022, 70f.), siehe Abbildung 5-5. Im ersten Schritt wurden Kompetenzmerkmale für die Arbeit im industriellen Produktionsumfeld im Rahmen einer Literaturrecherche identifiziert. Analog zu VERNIM (2020, 112f.) basierte die Recherche auf dem Kompetenzatlas von HEYSE & ERPENBECK (2009, S. XIII), da dieser aufgrund eines umfangreichen Kompetenzkatalogs sowie der häufigen Anwendung in der Unternehmenspraxis und in der Literatur bereits etabliert ist (BUTSCHAN ET AL. 2017, S. 83), siehe Abschnitt 2.2.2. Zusätzlich zum Kompetenzatlas erfolgte die Auswahl von weiteren relevanten Quellen mit besonderem Bezug zur manuellen Montage und Produktion aus einer breiten Literaturrecherche: BUTSCHAN ET AL. (2017), BLUMBERG & KAUFFELD (2021), VERNIM (2020), SCHUH ET AL. (2020) und DILLINGER ET AL. (2022).

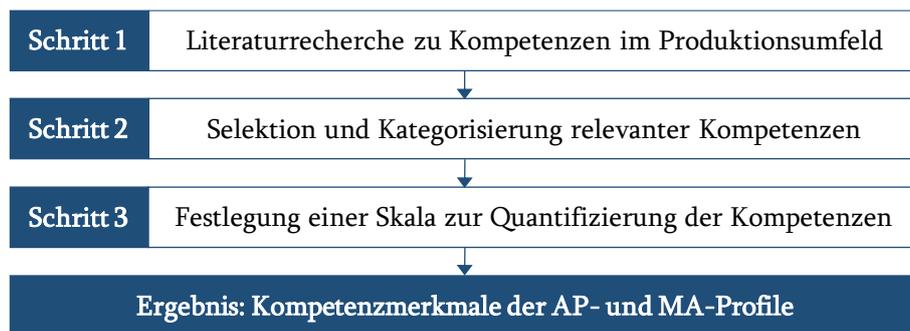


Abbildung 5-5: Methodisches Vorgehen zur Identifikation der Kompetenzmerkmale
(in Anlehnung an MÜLLER 2022, 70f.)

Im zweiten Schritt folgte die Auswahl der relevanten Kompetenzmerkmale für die Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profile, basierend auf der Erwähnungshäufigkeit in der Fachliteratur. Dieses Kriterium wurde gewählt, da es den Konsens der Autoren zeigt. Um die Nennhäufigkeit zu erfassen, wurden zunächst die aufgelisteten Kompetenzmerkmale der einzelnen Quellen hinsichtlich Synonyme sowie ähnlicher Begrifflichkeiten geprüft und geordnet. Die zusammengefassten Begrifflichkeiten weisen zwar feine Kompetenzunterschiede auf, welche hinsichtlich der Einfachheit und Praxistauglichkeit des methodischen Vorgehens jedoch nicht weiter berücksichtigt werden. Bei der Selektion relevanter Kompetenzen wurden nur Kompetenzmerkmale berücksichtigt, die in mindestens drei der sechs Quellen gelistet sind. Durch die mehrfache Nennung wird die mehrheitliche Akzeptanz in der Literatur sichergestellt. Dabei konnten 23 für Produktionsarbeitsplätze relevante Kompetenzen identifiziert werden, siehe Abbildung 5-6. In diesem Fall wurden somit alle Kompetenzen ausgewählt und in die AP- und MA-Profile integriert, siehe Abbildung 5-12 und Abbildung 5-13. Abschließend erfolgte die Eingruppierung der Kompetenzen und die Ergänzung der Kategorien des Kompetenzatlas nach HEYSE & ERPENBECK (2009, S. XIII) zur übersichtlicheren Strukturierung. VERNIM (2020, 114ff.) liefert hierbei eine Orientierungshilfe für die Zuordnung von Anforderungsmerkmalen zu den vier Kategorien personale Kompetenz, Aktivitäts- und Handlungskompetenz, sozial-kommunikative Kompetenz sowie Fach- und Methodenkompetenz.

Im dritten Schritt erfolgte die Festlegung einer Bewertungsskala für die Mitarbeitendenkompetenzen und die Kompetenzanforderungen der Arbeitsplätze. Dabei wurde die in der Literatur häufig genutzte fünfstufige Einteilung (0 – 4) verwendet: Anfänger:in, Fortgeschrittene:r, Kenner:in, Könner:in, Experte/Expertin (RAUNER 2018, 26f.), siehe Abbildung 5-7. Es ist anzumerken, dass der Katalog eine Momentaufnahme der Literatur darstellt und keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt.

| | HEYSE & ERPENBECK (2009, S. XIII) | BUTSCHAN (2017, S. 94) | VERNIM (2020, S. 126) | SCHUH ET AL. (2020 S. 78) | BLUMBERG ET AL. (2021, S. 211) | DILLINGER ET AL. (2022, S. 62) |
|--|------------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| P: personale Kompetenz | Eigenverantwortung | | Eigenverantwortung | | Eigenverantwortung | Verantwortung |
| | schöpferische Fähigkeit | schöpferische Fähigkeit | Kreativität | | | Kreativität |
| | Offenheit für Veränderungen | Offenheit für Veränderungen | Veränderungsfähigkeit | Offenheit für Veränderungen | Veränderungsbereitschaft | Offenheit für Veränderungen |
| | Lernbereitschaft | Lernbereitschaft | Lernfähigkeit & -bereitschaft | Lern- & Transferfähigkeit | | Lernfähigkeit |
| | ganzheitliches Denken | ganzheitliches Denken | ganzheitliches Denken | ganzheitliches Denken | | |
| A: Aktivitäts- und Handlungs-kompetenz | Entscheidungsfähigkeit | | Entscheidungsfähigkeit | Entscheidungsfähigkeit | | |
| | Innovationsfreudigkeit | Innovationsfreudigkeit | Innovationsfreudigkeit | | | Innovationsfähigkeit |
| | Belastbarkeit | | physische & psychische Belastbarkeit | | Belastbarkeit | |
| | Initiative | Initiative | | Initiative | | Initiative |
| | | | IT-Verständnis | | IT-Anwendungs-kompetenz | IT-Verständnis |
| | | | Bedienung von digitalen Devices | Umgang mit digitalen Devices | | Umgang mit digitalen Devices |
| S: sozial-kommunikative Kompetenz | Teamfähigkeit | | Teamfähigkeit | | | Teamfähigkeit |
| | Problemlösungsfähigkeit | Problemlösungsfähigkeit | | | digitale Problembehebung | Problemlösungsfähigkeit |
| | Kommunikationsfähigkeit | Kommunikationsfähigkeit | Kommunikationsfähigkeit | | Kommunikationsfähigkeit | Kommunikationsfähigkeit |
| | Kooperationsfähigkeit | Kooperationsfähigkeit | Kooperationsfähigkeit | | Kooperationsfähigkeit | Kooperationsfähigkeit |
| | Anpassungsfähigkeit | Anpassungsfähigkeit | Anpassungsfähigkeit | | | Anpassungs-, Veränderungsfähigkeit |
| F: Fach- und Methodenkompetenz | analytische Fähigkeiten | | | analytische Fähigkeiten | Analysefähigkeit | analytische Fähigkeiten |
| | Organisationsfähigkeit | Organisationsfähigkeit | | Organisationsfähigkeit | | |
| | systematisch-methodisches Vorgehen | | methodisches Vorgehen | systematisch-methodisches Vorgehen | | |
| | Lehrfähigkeit | Lehrfähigkeit | | Lehrfähigkeit | | |
| | Fachwissen | | Fachwissen | | Fachwissen | |
| | Planungsverhalten | | | Planungsverhalten | | Anpassungs-, Veränderungsfähigkeit |
| | fachübergreifende Kenntnisse | fachübergreifende Kenntnisse | fachübergreifendes Wissen | | | |

Abbildung 5-6: Übersicht der relevanten Kompetenzen in der manuellen Montage

| Bewertungsschlüssel | | |
|---------------------|---------------------------------|--------------------|
| 0 | nicht vorhanden | Anfänger:in |
| 1 | kaum vorhanden | Fortgeschrittene:r |
| 2 | vorhanden, entwicklungsfähig | Kenner:in |
| 3 | ausgeprägt | Köner:in |
| 4 | überdurchschnittlich ausgeprägt | Experte/Expertin |

Abbildung 5-7: Skala zur Bewertung der Kompetenzen und Kompetenzanforderungen

Arbeitsplatz-Belastungen und Mitarbeitenden-Leistungsvoraussetzungen: Die Arbeitsplatzkriterien der physischen und psychischen Belastung und die einzelnen Kriterien der Leistungsvoraussetzung der Mitarbeitenden wurden nach demselben dreistufigen Vorgehen identifiziert, siehe Abbildung 5-5 (Literaturrecherche, Selektion und Kategorisierung, Bewertungsskala). In Schritt eins wurde ebenfalls eine Literaturrecherche zu physischen und psychischen Leistungsvoraussetzungen und Belastungskriterien durchgeführt, wobei folgende Quellen besonders für die Anwendung im industriellen Produktionsumfeld geeignet sind, siehe Abbildung 5-8.

| | Autor:innen | Titel |
|--------------------|--|---|
| physische Aspekte | ADENAUER (2004) | Die (Re-) Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in den Arbeitsprozess - Das Projekt FILM bei FORD Köln |
| | KNÜLLE (2004) | Mitarbeiter krank – was nun? Betriebliches Eingliederungsmanagement – Herausforderung für Unternehmen |
| | ANNEKEN (2006) | Entwicklung und Überprüfung eines Assessmentmoduls zur FCE-basierten Beurteilung arbeitsbezogener Leistungsfähigkeit anhand des IMBA-Verfahrens (Integration von Menschen mit Behinderungen in die Arbeitswelt) |
| | PRASCH (2010) | Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage |
| | WALCH (2011) | Belastungsausgleich durch intelligente Job Rotation in der Intralogistik |
| | SCHMIDTKE & JASTRZEBSKA-FRACZEK (2013) | Ergonomie - Daten zur Systemgestaltung und Begriffsbestimmungen |
| | FRITZSCHE ET AL. (2017) | Arbeitsgestaltung für leistungsgewandelte Mitarbeiter mit digitalen Planungstools |
| | WITTEMANN (2017) | Konzeption eines Verfahrens zur Ableitung ergonomischer Gestaltungslösungen für fähigkeitgerechte Arbeitsplätze (Job-Match-Verfahren) |
| | DGUV (2022) | DGUV Information 208-033: Muskel-Skelett-Belastungen – erkennen und beurteilen |
| psychische Aspekte | PRÜMPER ET AL. (1995) | KFZA. Kurz-Fragebogen zur Arbeitsanalyse |
| | SANDROCK & STAHN (2017) | KPB – Kompaktverfahren Psychische Belastung |

Abbildung 5-8: Übersicht der genutzten Literatur zur Erstellung der AP- und MA-Profile

Anschließend erfolgten im zweiten Schritt die Ordnung und Quantifizierung der einzelnen Begriffe hinsichtlich Synonymen und zusammengefasster ähnlicher Begrifflichkeiten. Bei der Selektion wurden lediglich die Merkmale weiter berücksichtigt, welche in mindestens zwei Quellen genannt sind. Hieraus resultierten 45 Belastungs- und Leistungsvoraussetzungskriterien, welche in die Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profile integriert wurden. In Anlehnung an die in Abbildung 5-8 gezeigten Autoren erfolgte eine Unterteilung dieser Kriterien in sieben Kategorien: Körperhaltung (1), Aktionskräfte (2), Lastenhandhabung (3), Arbeitsumgebung (4), Arbeitsorganisation (5), Wahrnehmung (6) und Arbeitssicherheit (7), siehe Ausschnitt in Abbildung 5-9. Die gesamte Übersicht ist in Abbildung C-5 in Anhang C zu sehen.

Bei der Auswahl passender Bewertungsskalen für die einzelnen Kriterien erfolgte ebenfalls ein analoger Vergleich der Arbeitsplätze und der Mitarbeitenden. Da die Kriterien der Belastung und Leistungsvoraussetzungen sehr unterschiedlich sind, wurden verschiedene

Bewertungsskalen analog zu WITTEMANN (2017) und PRASCH (2010) genutzt, zum Beispiel ja/nein-Unterscheidung oder eine sechsstufige Bewertungsskala, welche den jeweiligen Zeitanteil einer Tätigkeit beinhaltet, siehe Abbildung 5-10.

| Kriterium | PRASCH (2010) | ANNEKEN (2006) | FRITZSCHE ET AL. (2017) | ADENAUER (2004), KNÜLLE (2004) |
|--------------------------|---|-----------------------|---|--------------------------------|
| Belastung des Nackens | Belastung des Nacken | Kopf-/ Halsbewegungen | Bewegung Kopf/Nacken/Hals | Kopf-/ Halsbewegungen |
| Beweglichkeit der Arme | Beweglichkeit der Arme (inkl. Schultergelenk) | | | Armbewegungen |
| Beugung | Beweglichkeit des Rumpfes | Rumpfbewegung: Bücken | Rumpf | Rumpfbewegung |
| Drehung/ Torsion | | | seitliche Neigung/ Verdrehung >10° | |
| Belastung der Hände/Arme | Belastung der Unterarme und Hände (durch Schlag-, Druck- oder Drehbewegung sowie Vibrationen) | Handbewegungen | | Hand-/ Fingerbewegungen |
| Drehen der Hände/Arme | | Armbewegungen Drehen | Beweglichkeit Handgelenk/Unterarm | Armbewegungen |
| Hand-/Arm-Vibration | Belastung der Unterarme und Hände (durch Schlag-, Druck- oder Drehbewegung sowie Vibrationen) | | Hand/Arm: Vibrationen > 2,5 m/s ² oder Rückschläge/Impulse | |
| Feinmotorik der Finger | Belastung der Finger (Anforderung durch Bewegung und/oder Kraftausübung) | Feinmotorik | | Feinmotorik ... |
| Belastung der Finger | | Fingerbewegungen | Aufbringen hoher Fingerkräfte > 20 N | |
| Knien | Beweglichkeit der Kniegelenke | Knien | Knien | Knien |
| Hocken | | Hocken | Hocken | Hocken |
| Steigen | | Steigen | Steigen | |
| Liegen | | | Liegen | Liegen |
| Stehen | Stehen | Stehen | Stehen | Stehen |
| Gehen | Gehen | Gehen | | Gehen |
| Sitzen | Sitzen | Sitzen | Sitzen | Sitzen |
| ... | | | | |

Abbildung 5-9: Ausschnitt aus der Kriterienliste der physischen Belastungen und Leistungsvoraussetzungen

| Bewertungsschlüssel | | |
|-----------------------|---------------------------|--------------|
| sechsstufige Merkmale | | |
| | Zeitanteil (Schichtdauer) | Gewicht (kg) |
| 0 | 0 % | 0 |
| 1 | 1 – 5 % | 0 – 5 |
| 2 | 6 – 25 % | 5 – 10 |
| 3 | 26 – 50 % | 10 – 15 |
| 4 | 51 – 75 % | 15 – 25 |
| 5 | 76 – 100 % | ≥ 25 |

| zweistufige Merkmale | |
|----------------------|------|
| 0 | Nein |
| 1 | Ja |

Abbildung 5-10: Skalen zur Bewertung der physischen und psychischen Anforderungen/ Leistungsvoraussetzungen

Allgemeine Angaben: Für den Einsatz der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profile in der Industrie werden zusätzlich zu den Vergleichskriterien *allgemeine Angaben* zum Arbeitsplatz und zu den Mitarbeitenden benötigt, beispielsweise der Name und die Abteilung. Die Herleitung dieser Kriterien erfolgte analog zu den beiden vorangehenden Abschnitten anhand einer Literaturanalyse und einer Selektion. Die Übersicht der hierfür herangezogenen Literaturquellen ist in Abbildung C-6 in Anhang C zu sehen. Auf Basis der quantitativen Bewertung folgt die Berücksichtigung von acht Angaben im Arbeitsplatz-Profil und sechs Angaben im Mitarbeitenden-Profil, siehe Abbildung 5-11.

| Allgemeine Angaben Arbeitsplatz | | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------|-----------------------------------|--------------|-------------|---------------|---------------|-------|
| AP | Stellenbezeichnung | Werk, Werksteil, Standort (Halle) | Kostenstelle | Kurzzeichen | Arbeitsgruppe | Bearbeiter:in | Datum |
| AP01 | | | | | | | |

| Allgemeine Angaben Mitarbeitende | | | | | |
|----------------------------------|---------------|--------------|----------|---------------|-------|
| MA | Name, Vorname | Geburtsdatum | Sprachen | Bearbeiter:in | Datum |
| 01 | | | | | |

Abbildung 5-11: Allgemeine Angaben der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profile

Abbildung 5-12 zeigt das Arbeitsplatz-Profil mit allgemeinen Angaben, Belastungsfaktoren und Kompetenzanforderungen. Analog dazu ist in Abbildung 5-13 das Mitarbeitenden-Profil mit allgemeinen Daten, Leistungsvoraussetzungen und Kompetenzen visualisiert. Die Profile werden anschließend mit einer Bewertungslogik miteinander verglichen.

Arbeitsplatzprofil

Basisinformationen

| | | | | | | |
|------|-------------------|---------------------------------|-------------|------------------|---------------|-------|
| AP | Selbstbezeichnung | Werk, Werstatt, Standort (Wahl) | Kurzzeichen | Abteilungsgruppe | Bearbeiter:in | Datum |
| AP01 | | | | | | |
| AP02 | | | | | | |

Physische & psychische Anforderungen

| Merkmal Nr. | Merkmale | AP01 | | | | | AP02 | | | | | Bewertungsschlüssel | |
|-------------------------------|-----------------------------|--|---|---|---|---|------|---|---|---|---|---------------------|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 1 | 2 | 3 | | 4 |
| 1. Körperhaltungen | | | | | | | | | | | | | |
| M101 | Bein-System | Sitzen | | | | | | | | | | | Bewertungsschlüssel Sechsstufige Merkmale 0: Zwischen (Schwächen) Gewetzt (Stg) 1: 1-5% 2: 6-20% 3: 21-50% 4: 51-75% 5: 76-100% 0: Zusätzliche Merkmale Name Jb |
| M102 | Bein-System | Stehen | | | | | | | | | | | |
| M103 | Bein-System | Knien | | | | | | | | | | | |
| M104 | Bein-System | Stehen | | | | | | | | | | | |
| M105 | Bein-System | Knien | | | | | | | | | | | |
| M106 | Bein-System | Beugen | | | | | | | | | | | |
| M107 | Bein-System | Beugen | | | | | | | | | | | |
| M108 | Wirbelsäule | Bewegung: gebückt > 60° | | | | | | | | | | | |
| M109 | Wirbelsäule | Bewegung: gebückt > 60° | | | | | | | | | | | |
| M110 | Wirbelsäule | Bewegung: gebeugt > 60° | | | | | | | | | | | |
| M111 | Wirbelsäule | Bewegung: gebeugt > 60° | | | | | | | | | | | |
| M112 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Statische Belastung des Nackens | | | | | | | | | | | |
| M113 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Arm über Schulterhöhe > 90° | | | | | | | | | | | |
| M114 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Arm über Schulterhöhe > 90° | | | | | | | | | | | |
| M115 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Arm über Schulterhöhe > 90° | | | | | | | | | | | |
| 2. Aktionskräfte | | | | | | | | | | | | | |
| M201 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Belastung der Fingerhand (lokaler Druck bis 40 N) | | | | | | | | | | | |
| M202 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Belastung der Fingerhand (lokaler Druck bis 40 N) | | | | | | | | | | | |
| M203 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Ein-Ausweit strecken des Unterarms | | | | | | | | | | | |
| M204 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Ein-Ausweit strecken des Unterarms | | | | | | | | | | | |
| M205 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Belastung der Hand | | | | | | | | | | | |
| M206 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Belastung der Hand | | | | | | | | | | | |
| M207 | Hand-/Finger-/Arm-/System | Belastung der Hand | | | | | | | | | | | |
| M208 | Vibrationen | Ganzkörpervibration | | | | | | | | | | | |
| M209 | Vibrationen | Hand-/Arm-/Vibration | | | | | | | | | | | |
| M210 | Schalter-/Arm-/Greifsystem | Aufhängen / Lösen Greifobjekte | | | | | | | | | | | |
| 3. Lastenhebelung | | | | | | | | | | | | | |
| M301 | Unterarm/Hand/Beugung | Heben & Untersetzen, Tragen, Halten | | | | | | | | | | | |
| M302 | Unterarm/Hand/Beugung | Heben & Untersetzen, Tragen, Halten | | | | | | | | | | | |
| 4. Arbeitsumgebung | | | | | | | | | | | | | |
| M401 | Lärm | 80 bis 85 dB(A) | | | | | | | | | | | |
| M402 | Beleuchtung | Beleuchtung | | | | | | | | | | | |
| M403 | Beleuchtung | Beleuchtung | | | | | | | | | | | |
| M404 | Klima | Hitzebelastung nicht ausreichend für die Arbeit | | | | | | | | | | | |
| M405 | Klima | Kältebelastung | | | | | | | | | | | |
| M406 | Bewegungsfreiheit | Räumliche Ergo. behindernde Bewegungsfreiheit | | | | | | | | | | | |
| 5. Arbeitsorganisation | | | | | | | | | | | | | |
| M501 | Normalschicht | | | | | | | | | | | | |
| M502 | Wechselschichtsysteme | | | | | | | | | | | | |
| M503 | 3-Schicht mit Nachtschicht | | | | | | | | | | | | |
| M504 | Teamarbeit | | | | | | | | | | | | |
| M505 | Arbeitsauftrag | Planungsintensiv | | | | | | | | | | | |
| M506 | Arbeitslast | Zieldruck | | | | | | | | | | | |
| M507 | Arbeitslast | Arbeitsunterbrechungen, Störungen | | | | | | | | | | | |
| M508 | Kommunikation & Kooperation | Interdisziplinäre Arbeit | | | | | | | | | | | |
| M509 | Kommunikation & Kooperation | Sprache, Anweisung | | | | | | | | | | | |
| M510 | Vorkenntnisse | Aufgaben werden nicht von Beginn bis Ende ausgeführt, kein sichtbares Ergebnis | | | | | | | | | | | |
| M511 | Handlungsaspekt | Feingegabtes Arbeitstempo | | | | | | | | | | | |
| M512 | Handlungsaspekt | Feingegabtes Arbeitstempo | | | | | | | | | | | |
| M513 | Handlungsaspekt | Arbeitszeit < Arbeitspensum (zu wenig Arbeit) | | | | | | | | | | | |
| M514 | Handlungsaspekt | Arbeitszeit < Arbeitspensum (zu wenig Arbeit) | | | | | | | | | | | |
| M515 | Handlungsaspekt | Arbeitszeit < Arbeitspensum (zu viel Arbeit) | | | | | | | | | | | |
| M516 | Informationsaufnahme | Größe Informationsmenge | | | | | | | | | | | |
| M517 | Informationsaufnahme | Schlechte Informationsstruktur | | | | | | | | | | | |
| M518 | Informationsaufnahme | Schlechte Informationsstruktur | | | | | | | | | | | |
| M519 | Informationsangebot | Ausreichende Rückmeldung über Arbeitsabläufe bzw. -ergebnisse | | | | | | | | | | | |
| 6. Wahrnehmung | | | | | | | | | | | | | |
| M601 | Sehen | Schwachsehr nah | | | | | | | | | | | |
| M602 | Sehen | Schwachsehr nah | | | | | | | | | | | |
| M603 | Sehen | Räumliches Sehen | | | | | | | | | | | |
| M604 | Sehen | Farbsehen | | | | | | | | | | | |
| M605 | Hören | Geräusch-/Spracherkennung | | | | | | | | | | | |
| M606 | Geruchsgewicht | Geruchsgewicht | | | | | | | | | | | |
| 7. Arbeitsfähigkeit | | | | | | | | | | | | | |
| M701 | Arbeitsanforderung | Gefährdung am Arbeitsplatz, B. Einsatz/Bedienung von Maschinen | | | | | | | | | | | |
| M702 | Arbeitsanforderung | Gefährdung am Arbeitsplatz, B. Einsatz/Bedienung von Maschinen | | | | | | | | | | | |
| M703 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Tragen von Schutzanforderung | | | | | | | | | | | |
| M704 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Tragen von Schutzanforderung | | | | | | | | | | | |
| M705 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Tragen von Schutzanforderung | | | | | | | | | | | |
| M706 | Fahr- und Steuerfähigkeit | Fahr- und Steuerfähigkeit | | | | | | | | | | | |

Kompetenzanforderungen

| Merkmal Nr. | Merkmale | AP01 | | | | | AP02 | | | | | Bewertungsschlüssel |
|--|-------------------------------------|------|---|---|---|---|------|---|---|---|---|---------------------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 0 | 1 | 2 | 3 | |
| BK: Personelle Kompetenz | | | | | | | | | | | | |
| MPK01 | Erfahrungswahrung | | | | | | | | | | | |
| MPK02 | Schöpferische Fähigkeit/Kreativität | | | | | | | | | | | |
| MPK03 | Offenheit für Veränderungen | | | | | | | | | | | |
| MPK04 | Kommunikationsfähigkeit | | | | | | | | | | | |
| MPK05 | Charakteristisches Denken | | | | | | | | | | | |
| AK: Aktives- und Handlungskompetenz | | | | | | | | | | | | |
| MAK01 | Entscheidungsfindung | | | | | | | | | | | |
| MAK02 | Innovationsfähigkeit | | | | | | | | | | | |
| MAK03 | Sozialkompetenz | | | | | | | | | | | |
| MAK04 | IT-Kompetenz | | | | | | | | | | | |
| MAK05 | IT-Verständnis | | | | | | | | | | | |
| MAK06 | Umgang mit Smart Devices | | | | | | | | | | | |
| SK: Sozial-kommunikative Kompetenz | | | | | | | | | | | | |
| MSK01 | Problemlösefähigkeit | | | | | | | | | | | |
| MSK02 | Problemlösefähigkeit | | | | | | | | | | | |
| MSK03 | Kommunikationsfähigkeit | | | | | | | | | | | |
| MSK04 | Kooperationsfähigkeit | | | | | | | | | | | |
| MSK05 | Anpassungsfähigkeit | | | | | | | | | | | |
| FK: Fach- und Methodenkompetenz | | | | | | | | | | | | |
| MFK01 | Analytische Fähigkeiten | | | | | | | | | | | |
| MFK02 | Organisationsfähigkeit | | | | | | | | | | | |
| MFK03 | Systemisch-methodisches Vorgehen | | | | | | | | | | | |
| MFK04 | Methodenkompetenz | | | | | | | | | | | |
| MFK05 | Planungsverhalten | | | | | | | | | | | |
| MFK06 | Planungsverhalten | | | | | | | | | | | |
| MFK07 | Fachübergreifende Kenntnisse | | | | | | | | | | | |
| MFK08 | Fachübergreifende Kenntnisse | | | | | | | | | | | |
| MFK09 | Fachübergreifende Kenntnisse | | | | | | | | | | | |
| MFK10 | Fachübergreifende Kenntnisse | | | | | | | | | | | |

Abbildung 5-12: Arbeitsplatz-Profil

Mitarbeiterprofil

Basisinformationen

| | | | | | |
|----|-----------------|--------------|---------|--------------|-------|
| MA | Namens, Vorname | Geburtsdatum | Smacken | BearbeiterIn | Datum |
|----|-----------------|--------------|---------|--------------|-------|

Physische & psychische Leistungsvoraussetzungen

| Merkmal Nr. | Merkmale | MA01 | | | | |
|-------------------------------|--|------|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. Körperhaltungen | | | | | | |
| M101 | Stehen | | | | | |
| M102 | Sitzen | | | | | |
| M103 | Bein-System | | | | | |
| M104 | Bein-System | | | | | |
| M105 | Bein-System | | | | | |
| M106 | Bein-System | | | | | |
| M107 | Bein-System | | | | | |
| M108 | Wirbelsäule | | | | | |
| M109 | Wirbelsäule | | | | | |
| M110 | Wirbelsäule | | | | | |
| M111 | Wirbelsäule | | | | | |
| M112 | Halbweibellen/Nacken | | | | | |
| M113 | Schulter-Arm-System (über Schulter) | | | | | |
| M114 | Schulter-Arm-System (Unterkopf) | | | | | |
| 2. Aktionskräfte | | | | | | |
| M201 | Beleuchtung der Fingerhohlh. (leichter Druck, bis 4,0 N) | | | | | |
| M202 | Hand-Finger-Arm-System | | | | | |
| M203 | Hand-Finger-Arm-System | | | | | |
| M204 | Hand-Finger-Arm-System | | | | | |
| M205 | Hand-Finger-Arm-System | | | | | |
| M206 | Hand-Finger-Arm-System | | | | | |
| M207 | Vibrationen | | | | | |
| M208 | Hand-Arm-Vibration | | | | | |
| M209 | Schulter-Arm-Ganzkörper-System | | | | | |
| 3. Lasthandhabung | | | | | | |
| M301 | Heben & Umsetzen, Tragen, Halten | | | | | |
| M302 | Laserrahmhabung | | | | | |
| M303 | Ziehen und Schieben | | | | | |
| 4. Arbeitsumgebung | | | | | | |
| M401 | 80 bis 95 dB(A) | | | | | |
| M402 | Lärm | | | | | |
| M403 | Beleuchtung | | | | | |
| M404 | Klima | | | | | |
| M405 | Arbeitsplatz | | | | | |
| M406 | Räumliche Enge, behinderte Bewegungsfreiheit | | | | | |
| 5. Arbeitsorganisation | | | | | | |
| M501 | Normalschicht | | | | | |
| M502 | Schicht | | | | | |
| M503 | Wechselschichtsysteme | | | | | |
| M504 | Schicht | | | | | |
| M505 | Schicht | | | | | |
| M506 | Arbeitsablauf | | | | | |
| M507 | Arbeitsablauf | | | | | |
| M508 | Arbeitsablauf | | | | | |
| M509 | Kommunikation & Kooperation | | | | | |
| M510 | Kommunikation & Kooperation | | | | | |
| M511 | Vollständig | | | | | |
| M512 | Handlungsspielraum | | | | | |
| M513 | Handlungsspielraum | | | | | |
| M514 | Handlungsspielraum | | | | | |
| M515 | Handlungsspielraum | | | | | |
| M516 | Arbeitsablauf | | | | | |
| M517 | Arbeitsablauf | | | | | |
| M518 | Informationsaufnahme | | | | | |
| M519 | Informationsangebot | | | | | |
| 6. Wahrnehmung | | | | | | |
| M601 | Schlechte Luft | | | | | |
| M602 | Schlechte Luft | | | | | |
| M603 | Schlechte Luft | | | | | |
| M604 | Räumliches Sehen | | | | | |
| M605 | Sehen | | | | | |
| M606 | Sehen | | | | | |
| M607 | Geräuschaufnahme | | | | | |
| M608 | Gleichgewicht | | | | | |
| 7. Arbeitsanforderung | | | | | | |
| M701 | Gefährdung am Arbeitsplatz | | | | | |
| M702 | Arbeitsanforderung | | | | | |
| M703 | Gefahr- und Betriebsstoffe | | | | | |
| M704 | Gefahr- und Betriebsstoffe | | | | | |
| M705 | Gefahr- und Betriebsstoffe | | | | | |
| M706 | Fahr- und Steuerfähigkeit | | | | | |

| Bewertungsschlüssel | |
|-------------------------------|------------|
| Sechststufige Merkmale | 0 bis 5 |
| Zusatzmerkmal (Schichtarbeit) | 0 bis 5 |
| 1 | 1 - 5 % |
| 2 | 6 - 25 % |
| 3 | 26 - 50 % |
| 4 | 51 - 75 % |
| 5 | 76 - 100 % |
| Zweistufige Merkmale | 0 bis 1 |
| 0 | Nicht |
| 1 | Ja |

Kompetenzen

| Merkmal Nr. | Merkmale | MA01 | | | | |
|---|-------------------------------------|------|---|---|---|---|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| PK: Personale Kompetenz | | | | | | |
| MPK01 | Einflussnahme | | | | | |
| MPK02 | Schöpferische Fähigkeit/Kreativität | | | | | |
| MPK03 | Offenheit für Veränderungen | | | | | |
| MPK04 | Lernbereitschaft | | | | | |
| MPK05 | Gemeinschaftliches Denken | | | | | |
| AK: Aktivitäts- und Handlungskompetenz | | | | | | |
| MAK01 | Entscheidungsfindung | | | | | |
| MAK02 | Innovationsfähigkeit | | | | | |
| MAK03 | Problemlösungsfähigkeit | | | | | |
| MAK04 | Initiative | | | | | |
| MAK05 | IT-Verständnis | | | | | |
| MAK06 | Umgang mit Smart Devices | | | | | |
| SK: Sozial-kommunikative Kompetenz | | | | | | |
| MSK01 | Teamfähigkeit | | | | | |
| MSK02 | Problemlösungsfähigkeit | | | | | |
| MSK03 | Kommunikationsfähigkeit | | | | | |
| MSK04 | Konfliktbewältigung | | | | | |
| MSK05 | Anpassungsfähigkeit | | | | | |
| FK: Fach- und Methodenkompetenz | | | | | | |
| MFK01 | Organisationsfähigkeit | | | | | |
| MFK02 | Organisationsfähigkeit | | | | | |
| MFK03 | Systematisch-methodisches Vorgehen | | | | | |
| MFK04 | Lernfähigkeit | | | | | |
| MFK05 | Planungsfähigkeit | | | | | |
| MFK06 | Planungsfähigkeit | | | | | |
| MFK07 | Fachübergreifende Kenntnisse | | | | | |
| MFK08 | Fachübergreifende Kenntnisse | | | | | |
| MFK09 | Fachübergreifende Kenntnisse | | | | | |
| MFK10 | Fachübergreifende Kenntnisse | | | | | |

Abbildung 5-13: Mitarbeitenden-Profil

Erstellung der Bewertungslogik

Im Rahmen des Profilvergleichs werden alle Kriterien der Arbeitsplatz-Profile mit den Kriterien der Mitarbeitenden-Profile zahlenmäßig verglichen. Das Ergebnis zeigt eine prozentuale Übereinstimmung der Eignung (Eignungsgrad) (KOLB & WERNER 1978, S. 11). Zahlreiche Ansätze in der Literatur nutzen Bewertungslogiken, welche lediglich eine ja/nein-Unterscheidung treffen, ob eine Person an einem Arbeitsplatz arbeiten kann oder nicht. Dabei bedarf es oft lediglich kleiner Änderungen am Arbeitsplatz, um den Eignungsgrad zu erhöhen. Bei der entwickelten Bewertungslogik werden daher auch Arbeitsplätze angezeigt, welche nicht zu 100 % zu einer Person passen. Um trotz einer nicht-100 %-igen Übereinstimmung nur sinnvolle AP-MA-Zuordnungen zu erhalten, sind kritische Faktoren (Kompetenzen/Anforderungen) zu definieren und bei der Bewertung zu berücksichtigen. Diese können zum Beispiel Spezialkompetenzen oder Sicherheitsunterweisungen sein. Es erfolgt somit keine Zuordnung von Personen zu Arbeitsplätzen, welche die erforderlichen kritischen Kompetenzen nicht besitzen. Die kritischen Anforderungen eines Arbeitsplatzes werden unternehmensindividuell durch die Führungskraft festgelegt.

Die Ergebnisse der Bewertungslogik zeigen die Übereinstimmung der AP-Kompetenzanforderungen mit den MA-Kompetenzen, das Matching zwischen den physischen/psychischen AP-Anforderungen und den MA-Leistungsvoraussetzungen sowie ein Gesamtergebnis der Übereinstimmung einer Person mit ausgewählten Arbeitsplätzen. Sowohl bei den Kompetenzen als auch den Leistungsvoraussetzungen wird sowohl der prozentuale Anteil der gesamten erfüllten Merkmale als auch der prozentuale Anteil erfüllter Merkmale pro Unterkategorie angegeben, wie beispielsweise personale Kompetenzen oder Aktivitäts-, Handlungskompetenzen oder Lastenhandhabung. Basierend auf dieser Detailauswertung ist es möglich, Kriterien zu identifizieren, die als Ansatzpunkt für Änderungen am Arbeitsplatz oder Qualifizierungsmaßnahmen fungieren, siehe Abbildung 6-3. Die Werte in der nachfolgenden Abbildung ergeben sich aus beispielhaft ausgefüllten AP- und MA-Profilen, siehe Abbildung C-7 in Abschnitt C. Ebenso ist der Anteil an erfüllten kritischen Merkmalen abgebildet. Im Rahmen des Anwendungs-Tools des Profilvergleichsverfahrens (siehe Abschnitt 6.2.1) wird die Erfüllung aller Kriterien farblich in folgende drei Fälle unterschieden: ‚genaue Übereinstimmung‘ (dunkelgrün) der vorhandenen MA-Eigenschaften und der geforderten AP-Eigenschaften, ‚Übererfüllung‘ (hellgrün) der geforderten AP-Eigenschaften und ‚Untererfüllung/ Nichterfüllung‘ (rot) falls die AP-Eigenschaften über den vorhandenen MA-Eigenschaften liegen. Beispielhaft ausgefüllte Profilvergleiche sind in Abbildung 6-4 und Abbildung 6-5 inklusive der beschriebenen Legenden zu sehen. Bei dem Vergleich

zwischen Kompetenzanforderungen und Kompetenzen gibt es zusätzlich noch kritische Merkmale, welche zwingend erfüllt sein müssen. Deren Bewertung ist im Profilvergleich fett und unterstrichen hervorgehoben.

5.1.3 Zusammenfassung Baustein 1

In Baustein 1 lag der Fokus einerseits auf der Schaffung eines einheitlichen Verständnisses für die Zusammenhänge im menschenorientierten Arbeitssystem. Dabei wurden die Systemansichten aus den Ingenieurs- und Arbeitswissenschaften mit Aspekten aus der Psychologie und Ergonomie ergänzt. Das daraus resultierende Ergebnis ist das entwickelte Systemmodell zur Beschreibung der Elemente Arbeitsplatz und Mensch im menschenorientierten Arbeitssystem. Die Elemente sind analog zueinander charakterisiert mit den Eigenschaften Kompetenzanforderungen/Kompetenzen, physische sowie psychische Belastung/Leistungsvoraussetzungen. Bei der Zuordnung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen kann somit ausgehend von den genannten Eigenschaften die individuelle physische und psychische Beanspruchung abgeleitet werden.

Andererseits erfolgte in Baustein 1, basierend auf dem menschenorientierten Arbeitssystem und der Charakterisierung der Systemelemente, die Entwicklung der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profile. Diese werden zur Erstellung der AP- und MA-Profile sowie für den Vergleich der Zuordnung von Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden benötigt. In den drei übergeordneten Kategorien der Beschreibung der Systemelemente finden sich über 85 aus der Literatur abgeleitete Merkmale wieder. Für alle Kriterien sind Bewertungsskalen für den einfachen Vergleich zwischen AP- und MA-Profilen und die Berechnung des Erfüllungsgrads hinterlegt. Die Bewertungslogik liefert eine Übersicht hinsichtlich der Übereinstimmung zwischen AP- und MA-Profilen. Besonders hervorzuheben sind die Integration der nicht 100 %-igen Übereinstimmungen und die Berücksichtigung von kritischen Merkmalen, welche zwingend zu erfüllen sind. Das prototypisch umgesetzte Anwendungs-Tool des Profilvergleichs mit den finalen AP- und MA-Profilen für den Einsatz in der Industrie wird in Abschnitt 6.2.1 genauer beschrieben.

5.2 Baustein 2 | Messung und Prognose von Beanspruchung

Der zweite Baustein befasst sich mit der Beantwortung der zweiten Forschungsfrage: „*Wie können physische und psychische Beanspruchung bei der taktgebundenen manuellen Montage gemessen und prognostiziert werden?*“. Das Ziel von Baustein 2 ist die Auswahl geeigneter Messmethoden zur Beanspruchungsermittlung sowie die Prädiktion physischer und psychischer Beanspruchung in der manuellen Montage. In den nachfolgenden Abschnitten wird zunächst auf die Erstellung eines Methodenbaukastens zur Messung der

Beanspruchung (Abschnitt 5.2.1) und deren Anwendung im Rahmen einer Studie zur Erfassung der Beanspruchung eingegangen. Basierend auf den Studiendaten wird das Prädiktionsmodell zur Prognose der Beanspruchung erstellt (Abschnitt 5.2.2). Die wissenschaftliche Vorgehensweise in diesem Methodenbaustein umfasst Literaturrecherchen, Gespräche mit Experten und Expertinnen sowie zwei Studien mit Probanden und Probandinnen. In die Erarbeitung dieses Lösungsbausteins fließen folgende von der Autorin betreute wissenschaftliche Studienarbeiten ein: BROCKMANN (2019), KALWEIT (2020), AMIRATO CHIQUITO (2020) ARANDA-DIEZ (2020), OBERPARLEITER (2021) und WINDECKER (2021).

5.2.1 Methodenbaukasten zur Messung der Beanspruchung

Wie in Abschnitt 2.3.2 erwähnt, kann physische und psychische Beanspruchung sowohl subjektiv, zum Beispiel anhand von Fragebögen, als auch objektiv, beispielsweise durch die Messung von Vitalwerten mit Hilfe von Smart Devices beziehungsweise Wearables, erhoben werden. Die Messung von Vitalwerten mittels Wearables ermöglicht eine automatische Datenaufnahme im Produktionsumfeld, ohne die Tätigkeitsausführung der Mitarbeitenden zu stören oder zu unterbrechen. Nach GUK ET AL. (2019) werden Wearables in tragbare, anbringbare, implantierbare und einnehmbare/verzehrbare Devices unterschieden, siehe Abbildung 5-14.

| Art von Wearables | Beschreibung | Beispiele |
|------------------------|------------------------|---|
| tragbar | am Körper getragen | Fitnessband, intelligente Kleidung, Brustgurt |
| ansteckbar | auf der Haut getragen | Klebesensoren, intelligente Kontaktlinsen |
| implantierbar | wirkt direkt im Körper | Bio-Inc (intelligente Tattoos), Herzschrittmacher |
| einnehmbar, verzehrbar | wirkt direkt im Körper | intelligente Pillen |

Abbildung 5-14: Übersicht der verschiedenen Arten an Wearables mit Beispielen
(GUK ET AL. 2019, S. 2, S. 13)

Aufgrund der drahtlosen Kommunikation und der Miniaturisierung der Sensoren ist die Wearable-Technologie bereits in verschiedene Alltagsgegenstände integriert (GUK ET AL. 2019, 2f.). Für die Anwendung im Produktionsumfeld werden nachfolgend ausschließlich tragbare und anbringbare Devices berücksichtigt, da diese Devices nicht in den menschlichen Organismus eingreifen und jederzeit ablegbar sind. Zu den tragbaren Wearables zählen zum Beispiel intelligente Uhren, Fitness-Tracker und intelligente Textilien. Letztere sind Kleidungsstücke, wie beispielsweise T-Shirts, Hosen oder Handschuhe, die über angebrachte oder eingewebte leitfähige Sensoren verfügen (WILSON & LAING 2018, 7f.). Bei den ansteckbaren Geräten kann es sich zum Beispiel um Klebesensoren oder Kontaktlinsen handeln (DIAS & PAULO SILVA CUNHA 2018, 16f.).

Allerdings werden diese Geräte bisher vor allem im Medizin-, Reha- und Wellnessbereich (z. B. Management chronischer Krankheiten, Haltungsanalysen), für Sport- und Fitnesszwecke (z. B. Leistungsanalyse, Fitness Monitoring) sowie in der Modebranche (z. B. Displays auf T-Shirts zur Interaktion) eingesetzt (CICEK 2015, S. 47).

Zur ganzheitlichen Messung physischer und psychischer Beanspruchung in der manuellen Montage ist die Nutzung sowohl objektiver als auch subjektiver Messverfahren essenziell. Eine Kombination aus Wearables und Fragebögen liefert hierfür einen guten Lösungsansatz zur produktionsbegleitenden Beanspruchungserfassung. Daher wird nachfolgend ein vierstufiges Verfahren zur Auswahl geeigneter Fragebögen und Wearables zur Messung physischer und psychischer Beanspruchung vorgestellt, siehe Abbildung 5-15. Der Fokus des praxisorientierten Vorgehens liegt auf dem strukturierten Ansatz zur Auswahl von Fragebögen und Wearables, da eine vollständige Integration aller in der Literatur und auf dem Markt verfügbaren Fragebögen und Wearables nicht möglich ist. Demnach erfolgt eine Momentaufnahme des aktuellen Stands der Technik mit einer Übersicht aktueller Wearables und häufig in der Praxis genutzter Fragebögen. Ein Ausschnitt des Vorgehens zur Auswahl geeigneter Wearables ist in TROPSCHUH ET AL. (2020) publiziert. Das Vorgehen setzt dabei nach der Definition des Projektrahmens an und unterstützt bei der Auswahl geeigneter Methoden aus einem Methodenbaukasten. Alle vier Schritte und deren Entwicklung werden nachfolgend detailliert erläutert.



Abbildung 5-15: Vierstufiges Vorgehen zur Auswahl geeigneter Fragebögen und Wearables zur Beanspruchungsmessung

Schritt 1: Auswahl geeigneter Fragebögen und Methoden

Zur Auswahl geeigneter Fragebögen bzw. Methoden wurden diese hinsichtlich der betrachteten Inhalte und berücksichtigter Indikatoren bewertet. Diese Bewertung liefert einen Überblick für Anwendende in der Industrie und stellt einen ersten Anhaltspunkt für die Auswahl geeigneter Fragebögen bzw. Methoden dar. Ein Ausschnitt der Übersicht geeigneter Fragebögen ist in Abbildung 5-16 zu sehen.

| Kürzel | Methode | Kategorie | Art | Beschreibung / Inhalte | Indikatoren |
|-------------------|---|---------------|-----------|---|--|
| BORG-Skala | BORG-Skala | Beanspruchung | Physisch | <ul style="list-style-type: none"> - subjektives Belastungsempfinden - Einordnung auf Skala - Zwei Varianten <ul style="list-style-type: none"> - RPE-Skala (Skala 6-20) - Category-ratio scale (Skala 0-10) - verbale Beschreibung zu den Zahlen - Bewertung des Empfindens der Anstrengung während der Arbeitstätigkeit | <ul style="list-style-type: none"> - empfundene Anstrengung - überhaupt keine Anstrengung bis maximale Anstrengung |
| ChEF | Checkliste zur Erfassung der Fehlbeanspruchungsfolgen | Beanspruchung | Psychisch | <ul style="list-style-type: none"> - Verfahren zur Diagnose negativer Beanspruchungsfolgen - Richter, Friesenbichler und Vanis (2012) - Checkliste zur Groberfassung der Folgen psychischer Belastung und Beanspruchung - 56 Items - Selbst-/Fremdeinschätzung; Fragebogen; Beobachtung - Anwendungsdauer: 15 min, Auswertungsdauer: 15 min - Quantitatives Verfahren der Verhältnisprävention - Orientierendes Verfahren | <ul style="list-style-type: none"> - Psychische Ermüdung - Monotonie - Psychische Sättigung - Stress |
| KPB | Kompaktverfahren Psychische Belastung | Belastung | Psychisch | <ul style="list-style-type: none"> - Begehung, Beurteilung durch Experten, Checklisten und Dokumentationshilfen im Dokument enthalten mit Beispiel - 4 Merkmalsbereiche mit jeweils 10 Items - Verfahren der Verhältnisprävention - Orientierendes Verfahren - bedingungsbezogene Belastungsbeurteilung - Beobachtungsinterview - Bearbeitungszeit: 100 - 120 Min | <ul style="list-style-type: none"> - Arbeitsinhalt/ Arbeitsaufgabe - Vollständigkeit der Aufgabe, - Handlungsspielraum, Variabilität - Information/ Informationsangebot - Verantwortung |

Abbildung 5-16: Ausschnitt aus der Übersicht an standardisierten Verfahren zur Messung physischer und psychischer Belastung und Beanspruchung

Schritt 2: Auswahl gewünschter Vitalwerte

In diesem Schritt ist eine literaturbasierte Übersicht über die gängigsten Vitalwerte zur Messung psychischer und physischer Beanspruchung abgebildet, aus welchen die Anwendenden gewünschte Vitalwerte auswählen können. Die Einschränkung hinsichtlich gewünschter oder möglicher Werte hängt beispielsweise von den Vorgaben des jeweiligen Unternehmens und dem Einverständnis der Mitarbeitenden ab. Nachfolgend werden einige gängige Vitalwerte zur Messung psychischer und physischer Beanspruchung erläutert (z. B. KHAN ET AL. 2016, S. 4375, PEAKE ET AL. 2018, S. 3). Dabei können einige Vitalwerte sowohl Indikatoren für physische als auch für psychische Beanspruchung sein.

Indikatoren psychischer Beanspruchung: Abbildung 5-17 zeigt eine Übersicht der acht beschriebenen Indikatoren psychischer Beanspruchung.

| Indikatoren psychischer Beanspruchung | | | |
|---------------------------------------|-------------|-----------------------------------|--------------|
| Atemfrequenz | Blutdruck | elektrische Aktivität des Gehirns | Hautleitwert |
| Herzrate, Herzratenvariabilität | Okulometrie | Sauerstoffsättigung | Schweißrate |

Abbildung 5-17: Indikatoren psychischer Beanspruchung

- Die **Atemfrequenz** gibt die Anzahl der Atemzüge einer Person pro Minute an und steigt bei erhöhter Beanspruchung (KOCESKA ET AL. 2017, S. 24, YAMAMOTO ET AL. 2019, 2741f.).
- Der **Blutdruck** ist ein kardiopulmonaler Parameter, der den Druck auf die Gefäßwände angibt (DIAS & PAULO SILVA CUNHA 2018, S. 6). Ein Anstieg des Blutdrucks kann ein Indikator für psychische Beanspruchung sein und beispielsweise auf Überforderung bei der Ausführung einer Arbeitsaufgabe hinweisen (SCHMAUDER & SPANNER-ULMER 2014, S. 233).
- Die **elektrische Aktivität des Gehirns** wird mittels einer Elektroenzephalographie (EEG) analysiert (MA ET AL. 2012, S. 193) und gilt als Indikator zur Bestimmung der mentalen Zustände von Menschen (BAIG & KAVAKLI 2019, S. 3). Der geistige Zustand einer Person kann anhand der verschiedenen Gehirnwellenrhythmen bestimmt werden. Schnelle Hirnströme können beispielsweise auf Angst und Stress hinweisen, wohingegen langsame Hirnströme eher für Aufmerksamkeitsdefizite oder Schlaf stehen. (ROOHI-AZIZI ET AL. 2017, S. 54)
- Der **Hautleitwert** stellt die Eigenschaft des Körpers dar, Elektrizität zu leiten und ist im Falle eines Anstiegs ein empfindlicher Indikator für zunehmende psychische Beanspruchung (BÖCKELMANN & SEIBT 2011, S. 215).
- Die **Herzrate (HR)** und die **Herzratenvariabilität (HRV)** sind als die Anzahl der Herzschläge pro Minute bzw. die Abfolge der Zeitintervalle zwischen den Herzschlägen definiert (BAIG & KAVAKLI 2019, S. 4). Im Falle einer arbeitsbedingten Steigerung der Beanspruchung beschleunigt sich die Herzrate (BAIG & KAVAKLI 2019, S. 4) und die Herzratenvariabilität nimmt ab (BÖCKELMANN & SEIBT 2011, S. 215). Nach BÖCKELMANN & SEIBT (2011, S. 215) werden diese Parameter am häufigsten zur Ermittlung psychischer Beanspruchung bei monotonen Tätigkeiten verwendet. KIM ET AL. (2018, S. 243) weisen jedoch darauf hin, dass die Einflüsse physischer Arbeit und individueller Erkrankungen auf die HR und die HRV berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der Entwicklungen in der Sensortechnologie stehen zahlreiche Wearables zur Messung der HR und HRV zur Verfügung.
- Die **Okulometrie-Analyse** untersucht beanspruchungsabhängige Parameter wie Blickbewegung, Pupillengröße und Lidschlagfrequenz. Bei zunehmender psychischer Beanspruchung nehmen die Augen-/Blickbewegungen zu und die Pupillen erweitern sich. Die Lidschlagfrequenz nimmt bei zunehmender

psychischer Beanspruchung oder bei Ermüdungszuständen ab. (SCHMAUDER & SPANNER-ULMER 2014, S. 233, SHARMA & GEDEON 2012, S. 1293)

- Die **Sauerstoffsättigung** des Blutes ist ein Maß für den aktuellen Sauerstoffgehalt im Blut. Bei zunehmender Beanspruchung steigt die Atemfrequenz und der Sauerstoffgehalt im Blut sinkt, da bei stärkerer psychischer Beanspruchung mehr Sauerstoff im Körper verbraucht wird (DIAS & PAULO SILVA CUNHA 2018, S. 7).
- Die **Schweißrate**, auch Hautschweiß genannt, ist ein physiologischer Parameter zur Identifikation von Beanspruchungszuständen (DIAS & PAULO SILVA CUNHA 2018, S. 9). Eine zunehmende Schweißrate kann auf eine steigende psychische Beanspruchung hinweisen. Diese Variable steht in direktem Zusammenhang mit dem Hautleitwert, da dieser je nach Schweißmenge variiert (CARNEIRO ET AL. 2019, S. 242).

Indikatoren physischer Beanspruchung: Mit Abbildung 5-18 wird eine literaturbasierte Liste an Indikatoren vorgeschlagen, welche sich zur Messung physischer Beanspruchung eignen. Einige Parameter wurden bereits als Indikatoren psychischer Beanspruchung genannt. Aufgrund dieser doppelten Indikatorrolle kann einerseits die Gesamtbeanspruchung mit einer Messmethode erfasst werden. Andererseits ist eine getrennte Betrachtung physischer und psychischer Beanspruchung und die damit zusammenhängende Ableitung von Handlungsmaßnahmen bei Vitalparametern mit doppelter Indikatorrolle schwierig. Daher sind bei der Auswahl geeigneter Parameter und Wearables immer der Arbeitsplatz und die Arbeitsaufgabe zu berücksichtigen.

| Indikatoren physischer Beanspruchung | | |
|--------------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| Atemfrequenz | Hauttemperatur | Herzrate, Herzratenvariabilität |
| Muskelaktivität | Sauerstoffsättigung | Schweißrate |

Abbildung 5-18: Indikatoren physischer Beanspruchung

- **Atemfrequenz** (siehe psychische Indikatoren).
- Bei physischer Anstrengung kann ein Anstieg der **Hauttemperatur** verzeichnet werden. Der Temperaturanstieg tritt jedoch um circa 5 bis 15 Minuten verzögert auf, abhängig von dem Grad der Anstrengung. (FRÖHLICH ET AL. 2014, 23f.)
- Die **Herzrate und Herzratenvariabilität** (siehe psychische Indikatoren) werden ebenfalls zur Messung physischer Beanspruchung herangezogen (GATTI ET AL. 2011, S. 195, MELANSON ET AL. 1996, S. 388).
- Bei der Messung der **Muskelaktivität** mit Hilfe von Elektromyographie (EMG) werden die elektrischen Impulse erfasst, die von einzelnen Muskelgruppen während

statischer und dynamischer Kontraktionen erzeugt werden (RAEZ ET AL. 2006, S. 11, FORSMAN ET AL. 2002, S. 535). Zahlreiche Studien belegen den Zusammenhang zwischen Muskelaktivität und Muskelermüdung. JEBELLI & LEE (2019, S. 186) zeigen, dass stärkere Muskelermüdung zu höheren quadratischen Mittelwerten und höheren gemittelten Absolutwerten der elektrischen Impulse führt, welche basierend auf EMG-Signalmessungen ermittelt werden können.

- **Sauerstoffsättigung** (siehe psychische Indikatoren). Laut DIAS & PAULO SILVA CUNHA (2018, S. 7) gibt es einen Zusammenhang zwischen der Leistungsfähigkeit einer Person und ihrer Sauerstoffsättigung im Blut, abhängig vom Arbeitsinhalt. Die Messung der Sauerstoffsättigung eignet sich besonders bei schwerer körperlicher Arbeit, da durch die erhöhte Muskelaktivität mehr Sauerstoff verbraucht wird und somit die Sauerstoffsättigung sinkt (KNAUTH, S. 7).
- **Schweißrate** (siehe psychische Indikatoren).

Schritt 3: Auswahl anwendungsspezifischer Restriktionen

Ziel dieses Schritts ist es, die Einschränkungen am betrachteten Montagearbeitsplatz hinsichtlich der Nutzung von Wearables zu identifizieren. Hierfür wurden zunächst literaturbasiert und mit Hilfe von zwölf Experten und Expertinnen aus der Automobilindustrie Beispiele produktionsstypischer Restriktionen ermittelt. Eine Übersicht der Experten und Expertinnen ist in Abbildung D-8 in Anhang D gezeigt. Zur Unterstützung der Anwendenden werden unternehmens- und anwendungsspezifische Restriktionen mit Leitfragen geprüft. Abbildung 5-19 zeigt beispielhaft Restriktionen, welche besonders häufig in der manuellen Montage vorkommen. Weitere einschränkende Kriterien können unternehmens-individuell hinzugefügt und geprüft werden.

| Restriktionen in der manuellen Montage (Beispiele) | |
|--|---|
| Verbot von Handys | Pflicht zum Tragen von Schutzkleidung (z. B. Helm, Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Sicherheitsschuhe) |
| Verbot von Schmuck an Fingern und Handgelenken | |

Abbildung 5-19: Häufige Restriktionen beim Einsatz von Wearables in der manuellen Montage

- **Verbot von Handys:** Während der Handy-Nutzung ist die Umgebungswahrnehmung deutlich eingeschränkt und der Blick auf das Display gerichtet. Dies kann zu Unfällen führen, zum Beispiel Kollision mit selbstfahrenden Transportmitteln oder Gabelstaplern.

- **Verbot von Schmuck an Fingern und Handgelenken:** Diese Regel soll Kratzer im Lack bei der Montage verhindern. Oft kann Schmuck mit einem übergezogenen Schutz getragen werden, beispielsweise eine Uhr unter einem Uhrschröner mit Sichtfeld. Die Bedienung von Touch-Displays ist durch den Schutzüberzug meist eingeschränkt.
- **Pflicht zum Tragen von Schutzkleidung:** Das Tragen von einzelnen Schutzausrüstungen (z. B. Helm, Schutzbrille, Schutzhandschuhe, Sicherheitsschuhe) wird abhängig von der Montageaufgabe und dem Montageumfeld festgelegt. Beispielsweise sind bei der Handhabung scharfkantiger Bauteile Handschuhe und Sicherheitsschuhe vorgeschrieben.

Die Informationen über mögliche Restriktionen am Arbeitsplatz werden für die Auswahl geeigneter Wearables benötigt. Sie bilden zusammen mit den Ergebnissen des zweiten Schritts die Grundlage für den vierten Schritt des Vorgehens. Hierbei erfolgt die finale Auswahl der Wearables (TROPSCUH ET AL. 2020, S. 704).

Schritt 4: Auswahl geeigneter Wearables

Im vierten Schritt werden auf Basis der ausgewählten Vitalparameter aus Schritt 2 und der arbeitsplatzbezogenen Restriktionen aus Schritt 3 geeignete Wearables vorgeschlagen. Dabei erfolgt zunächst eine Überprüfung der Wearable-Kategorien in Bezug auf die eingegebenen Restriktionen und Vitalparameter. Darüber hinaus sind Beispiele aktuell gängiger Devices in den einzelnen Kategorien enthalten, welche um weitere Wearables ergänzt werden können. Abbildung 5-20 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt dieser Übersicht.

Nach der Eingabe der präferierten Vitalparameter und Restriktionen wird den Nutzenden eine Ergebnisliste mit geeigneten Devices angezeigt. Hierbei sind bei den einzelnen Devices zusätzliche Informationen zum Beispiel hinsichtlich Datenqualität, Tragekomfort oder Nutzbarkeit aufgeführt.

| | | tragbare Wearables | | | | ansteckbare Wearables | | |
|--|--|---|--|--|--|--|--|----------------------------|
| | | Fitnessband, Smart Watch | intelligente Kleidung | Brustgurt | Ohrsensor | Smart Glasses | Klebesensoren | intelligente Kontaktlinsen |
| Indikatoren physischer & psychischer Beanspruchung | Herzrate | x | - | x | x | - | x | x |
| | Herzfrequenz | x | - | x | x | - | x | x |
| | Blutdruck | - | - | - | - | - | - | - |
| | Atemfrequenz | - | - | - | - | - | - | - |
| | EEG | - | - | - | - | - | - | - |
| | Hautleitwert | - | - | - | - | - | - | - |
| | Schweißrate | - | - | - | - | - | - | - |
| | Sauerstoffsättigung | x | - | - | - | - | - | - |
| | Blickbewegung | - | - | - | - | x | - | x |
| | Lidschlagfrequenz | - | - | - | - | - | - | - |
| | Pupillengröße | - | - | - | - | x | - | x |
| | Muskelaktivität | - | x | - | - | - | - | - |
| Handkraft | - | - | - | - | - | - | - | |
| Restriktionen | Verbot von Handys | x | x | x | x | x | x | x |
| | Verbot von Schmuck | - | x | x | x | x | x | x |
| | Schutzbrille nötig | x | x | x | - | - | x | x |
| | Schutzhandschuhe nötig | x | x | x | x | x | x | x |
| | Helm nötig | x | x | x | x | x | x | x |
| | Sicherheitsschuhe nötig | x | x | x | x | x | x | x |
| Beispiele | Apple Watch  | Myontec Mbody3  | Polar H10  | Cosinuss° Two  | Tobii Pro Glasses 3  | Movisens EcgMove 4,  | Mojo lens  | |

Abbildung 5-20: Ausschnitt aus der Datenbank zur Bewertung von Wearables nach Kategorien mit Beispielen

Anwendung des vierstufigen Vorgehens

Die Durchführung des entwickelten vierstufigen Vorgehens erfolgte beispielhaft an einem nachgebauten Montagearbeitsplatz im InnovationLab des *iwb*. Nachfolgend wird zunächst der Montageaufbau, die Montageaufgabe und die darauf basierende methodengestützte Auswahl der Fragebögen und Wearables beschrieben.

Der Studienaufbau am InnovationLab des *iwb* ist ein praxisorientierter Montagearbeitsplatz. Zur Auswahl geeigneter repräsentativer Montageinhalte wurden die Tätigkeiten in den taktgebundenen Montagebereichen der Motor-Getriebe-Vormontage sowie der Linienmontage der Kotflügelträger eines Münchner Nutzfahrzeugherstellers analysiert. Im Rahmen der realitätsnahen Nachbildung eines Montagearbeitsplatzes erfolgte die Integration der häufigsten Tätigkeiten in die konzipierte Montageaufgabe, zum

Beispiel Schrauben, Kabel montieren sowie Stecker und Kabelbinder anbringen. Der Versuchsaufbau besteht aus einem Montagearbeitsplatz mit einem Lkw-Achsträger und einem Durchlaufregal, welches alle benötigten Montageteile sowie die erforderlichen Werkzeuge enthält. Ein digitales tabletbasiertes Werkendeninformationssystem zeigt den Teilnehmenden die exakte Montageposition der Einzelteile auf dem Achsträger für die verschiedenen Produktvarianten an. Das Unterstützungssystem ist dabei auf Augenhöhe am Durchlaufregal befestigt. An diesem nachgebauten taktgebundenen Montagearbeitsplatz montierten und demontierten die Probanden und Probandinnen Anbauteile an dem Lkw-Achsträger, siehe Abbildung 5-21. (TROPSCHUH ET AL. 2022b, 571f.)



Abbildung 5-21: Studienaufbau am InnovationLab des iwib (TROPSCHUH ET AL. 2022b, S. 572)

Die nachfolgend beschriebene fünfstufige Montageaufgabe wurde von den Probanden und Probandinnen in der Studie ausgeführt. Im ersten Schritt wurden am Montagearbeitsplatz zwei Kotflügelhalterungen an den Lkw-Achsträger geschraubt. Anschließend brachten die Probanden und Probandinnen im zweiten Schritt zwei Schrauben-Mutter-Kombinationen an, wobei ein manuelles Anziehen der Schrauben ausreichte. Darauf folgend wurden im dritten Schritt zwei Schläuche mit Schlauchschellen befestigt und mit einem Schraubendreher festgedreht. In Schritt vier folgte die Montage zweier Schellen sowie die Fixierung der entsprechenden Kabel mit je zwei Kabelbindern. Nach der Montage führten die Testpersonen im fünften Schritt die Demontage aller montierten Teile durch. Diesen Montage- und Demontageablauf führte jede Testperson zweimal durch, wobei sich die Taktzeiten unterschieden (7:30 Minuten und 5:45 Minuten pro Montagerunde). (TROPSCHUH ET AL. 2021b, S. 969)

Die Auswahl geeigneter Fragebögen und Wearables für dieses Montageszenario erfolgte mit Hilfe der beschriebenen Schritte des Vorgehens in Zusammenarbeit mit Experten und Expertinnen aus der Industrie. Basierend auf dem erstellten Methodenbaukasten aus Schritt 1 wurden den Fachpersonen verschiedene Fragebögen zur subjektiven Messung physischer und psychischer Beanspruchung vorgestellt, wobei der Fokus auf den am häufigsten in der Literatur und im Produktionskontext genutzten Methoden lag, siehe Abschnitt 2.3.2. Basierend darauf wählten die Fachpersonen für die subjektive Messung der Beanspruchung die Borg-Skala (physisch) und den NASA-TLX (psychisch) aus. Zur Messung der objektiven physischen Beanspruchung fiel die Entscheidung der Experten und Expertinnen auf die Messgrößen Atemgas und Muskelaktivität. Geeignete Devices sind hier zum Beispiel Spiroergometrie und EMG-Shirts. Aufgrund der Covid-19-Pandemie kam als Restriktion hinzu, dass die Messgeräte selbstständig anzulegen sind, weswegen nach ersten Vorversuchen mit einer Spiroergometrie die Messung der Muskelaktivität mittels eines EMG-Shirts von Myontec genutzt wurde, siehe Abbildung 5-22.



Abbildung 5-22: Vorversuche mit der Spiroergometrie (links) und dem Muskelshirt (rechts) im InnovationLab des *iwB*

Hinsichtlich der objektiven Messung psychischer Beanspruchung präferierten die Industrieexperten und Expertinnen die Herzrate als Messparameter, da dies einer der am meisten genutzten Parameter zur Bewertung des Gesundheitszustands ist. In Bezug auf die Einschränkung am Montagearbeitsplatz ist lediglich das Tragen von Schmuck verboten. Basierend auf diesen Vorgaben enthält die Ergebnisliste unter anderem folgende geeignete Device-Kategorien: Fitness-Armbänder, Ohrsensoren und Klebesensoren.

Um detailliertere Aussagen hinsichtlich der Datenqualität der Herzratenmessung und des Tragekomforts einzelner Wearables zu erlangen, wurden vier beispielhafte Devices in einer Laborstudie am *iwB* an dem beschriebenen nachgebauten Montagearbeitsplatz getestet. Die in TROPSCHUH ET AL. (2022b) veröffentlichten Studienergebnisse werden nachfolgend kurz erläutert. Zur Analyse der Datenqualität bei der Herzratenmessung wurde aus jeder Device-Kategorie in Rücksprache mit den Industrieexperten und Expertinnen ein Wearable

ausgewählt und zusätzlich mit dem Polar-H10-Brustgurt gemessen. Dieser wurde aufgrund seiner hohen Datenqualität bereits bei zahlreichen Untersuchungen als Referenzgerät genutzt (z. B. DOOLEY ET AL. 2017, GILLINOV ET AL. 2017, WANG ET AL. 2017). Die ausgewählten Wearables sind das vivosmart-4-Fitness-Armband von Garmin, der cosinuss°One-Ohrsensor sowie der EcgMove4-Klebesensor von movisens. Die finale Entscheidung über die eingesetzten Wearables erfolgte auf Basis ergonomischer und wirtschaftlicher Aspekte. Das Garmin-vivosmart-4-Fitness-Armband wurde beispielsweise aufgrund seiner schlichten Form (keine hervorstehenden Knöpfe), der geringen Größe und des moderaten Preises ausgewählt. Die im Rahmen der Studie genutzten Wearables sind in Abbildung 5-23 gezeigt. (TROPSCHUH ET AL. 2022b, S. 572)



Abbildung 5-23: In der Studie genutzte Wearables (TROPSCHUH ET AL. 2022b, S. 573)

An dieser Studie nahmen 9 Frauen und 16 Männer teil, wobei das Probandenkollektiv aufgrund der zu dem Zeitpunkt vorherrschenden Covid-19-Situation nur aus Studierenden und wissenschaftlichen Mitarbeitenden bestand. Da es in dieser Studie jedoch lediglich um die Datenqualität der einzelnen Devices und nicht um die individuell empfundene Beanspruchung geht, ist lediglich eine aussagekräftige Anzahl der Messpunkte relevant, unabhängig von der Probandenverteilung. Die 25 Teilnehmenden der Studie trugen die vier Geräte gleichzeitig bei der Ausführung der oben beschriebenen Montageaufgabe am nachgebauten Arbeitsplatz. Im Rahmen der Datenanalyse wurden die Datensätze der evaluierten Wearables mit den Daten des Brustgurts entsprechend der Zeitstempel verglichen und mit Hilfe von Bland-Altman-Diagrammen quantifiziert, siehe Abbildung 5-24.

Diese Diagramme ermöglichen den Vergleich einer etablierten Messmethode (Polar-H10-Brustgurt) mit einer neuen Messmethode (Garmin-vivosmart-4, cosinuss°One und movisens-EcgMove4) durch die Identifikation der Variationsbreite unter Verwendung von 95 % Übereinstimmungsgrenzen (Limits of Agreement, LoA) (BLAND & ALTMAN 1999, S. 136). Dabei sind 95 % aller Werte zwischen den Übereinstimmungsgrenzen enthalten. Auf diese Weise kann festgestellt werden, ob zwei Methoden eine ähnliche Messqualität aufweisen (BLAND & ALTMAN 1999, S. 136). Durch die Verteilung der Abweichungspunkte ist die Schwankungsbreite ersichtlich, was Rückschlüsse auf eine grundsätzlich höhere oder

niedrigere Messung zulässt (systematischer Messfehler). Die Bland-Altman-Diagramme zeigen, dass das Garmin-vivosmart-4 im Durchschnitt die HR-Daten im Vergleich zum Referenzgerät überschätzt. Im Gegensatz dazu unterschätzen das cosinuss°One und das movisens-EcgMove4 diese Daten. Darüber hinaus zeigt die visuelle Inspektion der Bland-Altman-Diagramme für das Garmin-vivosmart-4 und das cosinuss°One, dass mehr als ein Drittel der mittleren Unterschiede außerhalb der Grenzen der Übereinstimmung (LoA) liegen. Folglich weisen diese Messmethoden keine akzeptable Datenqualität im Vergleich zum Polar-H10-Brustgurt auf. Im Gegensatz dazu liegen beim movisens-EcgMove4 fast alle Mittelwertunterschiede innerhalb der Variationsbreite, weswegen dieses Gerät eine akzeptable Alternative zum Polar-H10-Brustgurt hinsichtlich der Datenqualität darstellt. Weitere Details zur statistischen Berechnung finden sich in TROPSCHUH ET AL. (2022b). (TROPSCHUH ET AL. 2022b, 575ff.)

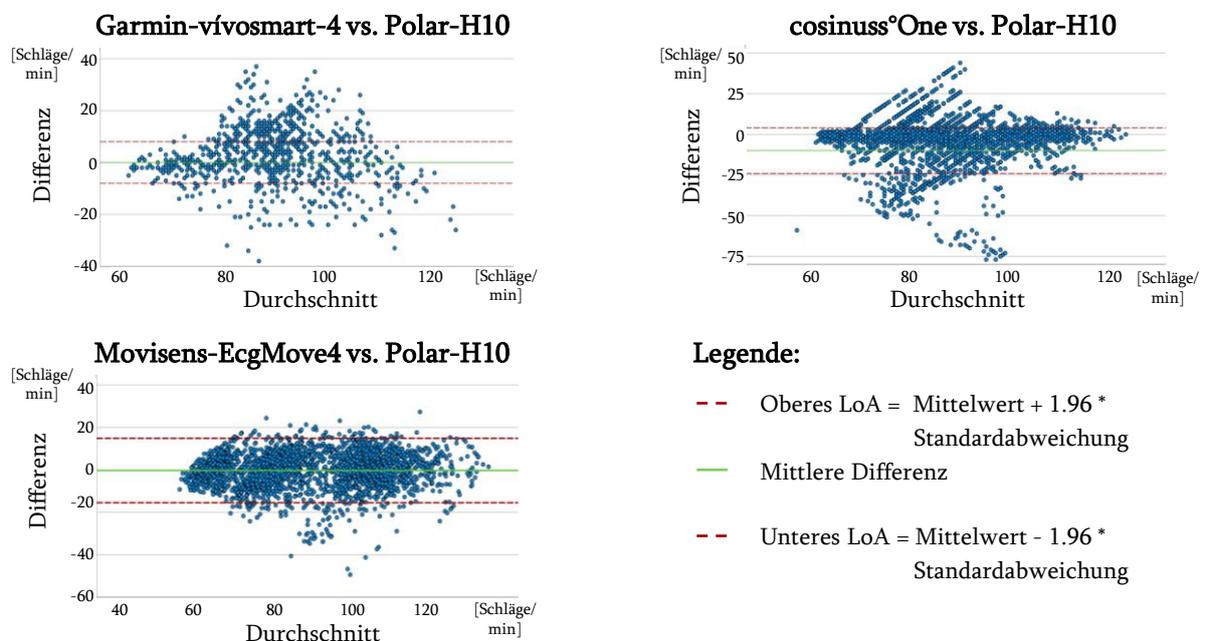


Abbildung 5-24: Bland-Altman-Diagramme zum Vergleich der HR-Datenunterschiede im Vergleich zum Polar-H10-Brustgurt (TROPSCHUH ET AL. 2022b, S. 576)

Die Benutzendenfreundlichkeit der vier Wearables wurde durch eine Nutzenstudie mit 15 Probanden und Probandinnen (7 Frauen und 8 Männer) im Alter von 19 bis 28 Jahren erfasst (TROPSCHUH ET AL. 2022b, 577ff.). Bei der Auswahl der Testpersonen wurde auf eine ungefähre Gleichverteilung der Geschlechter geachtet, um geschlechtsspezifische Empfindungen der Benutzendenfreundlichkeit zu berücksichtigen. Die Altersstruktur des Probandenkollektivs ist jünger als die Altersstruktur am Montageband, Covid-19-bedingt konnten jedoch keine TUM-externen Testpersonen integriert werden. Die Testpersonen führten die gleiche oben beschriebene Montageaufgabe vier Mal durch, wobei bei jeder Montagerunde ein anderes Wearable getragen und mittels der Think-aloud-Methode und eines Fragebogens bewertet wurde. Die Reihenfolge der Devices war randomisiert, um eine

gegenseitige Beeinflussung der Montagerunden zu reduzieren. Relevante, literaturbasiert abgeleitete Bewertungskriterien sind dabei Beeinträchtigung bei der Arbeit, Form, Dimension/Gewicht, Anwendungsfreundlichkeit, Tragekomfort und Austauschbarkeit zwischen Personen. Die Auswertung der Fragebögen ergab, dass das Garmin-Fitness-Armband bei allen Kriterien mit Ausnahme der Anwendungsfreundlichkeit am besten abgeschnitten hat. Der Brustgurt wurde hinsichtlich der Anwendungsfreundlichkeit am positivsten beurteilt, da keine Einstellungen am Gerät nötig sind. Gleichzeitig bewerteten die Testpersonen den Tragekomfort des Brustgurts am schlechtesten. Bei allen weiteren Kriterien schnitt der Ohrsensor am negativsten ab. Der Klebesensor liegt bei allen Kriterien bewertungstechnisch im Mittelfeld. Was die geräteübergreifende Bewertung angeht, so bevorzugte die Mehrheit der Teilnehmenden das Fitness-Armband (12 von 15), da diese Geräteart bereits durch Uhren oder Armbänder im privaten Bereich bekannt ist. Unter Berücksichtigung der Möglichkeit von Mehrfachnennungen entschieden sich drei Teilnehmende für den Brustgurt, zwei für den Klebesensor und niemand für den Ohrsensor. (TROPSCUH ET AL. 2022b, 577ff.)

Zusammenfassend kann für diesen Abschnitt festgehalten werden, dass ein Vorgehen zur strukturierten Auswahl geeigneter Fragebögen und Wearables zur Messung physischer und psychischer Beanspruchung entwickelt wurde. Die Auswahl erfolgt in vier Schritten, siehe Abbildung 5-25:

1. Auswahl geeigneter Fragebögen mit Hilfe eines Methodenbaukastens
2. Auswahl möglicher Vitalwerte mit Hilfe einer Übersicht an Parametern
3. Auswahl anwendungsspezifischer Restriktionen
4. Auswahl geeigneter Wearables mit Hilfe der Ergebnisliste inklusive Handlungsempfehlungen zu Datenqualität und Komfort

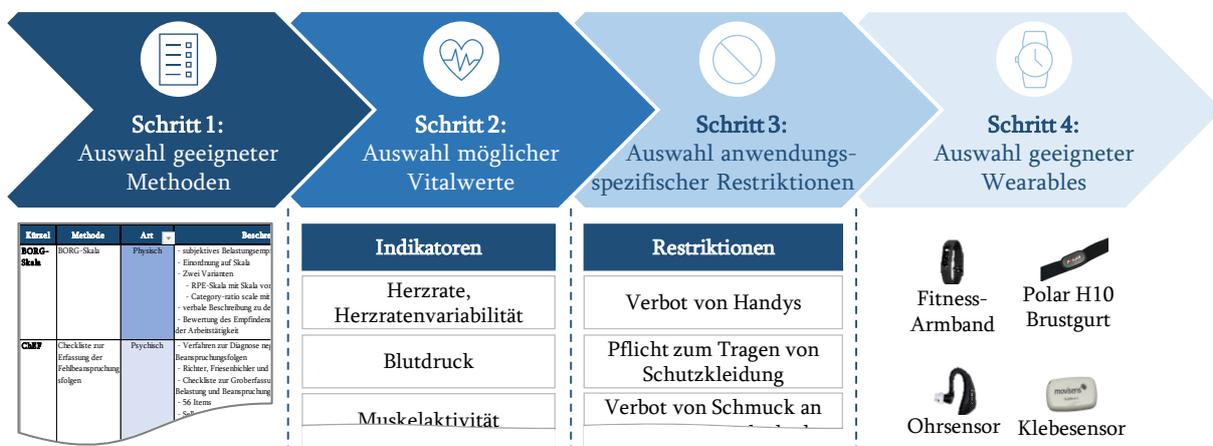


Abbildung 5-25: Leitfaden zur Auswahl von Fragebögen und Wearables zur Messung physischer und psychischer Beanspruchung

Durch die Anwendung des Leitfadens wurden die Fragebögen Borg-Skala und NASA-RTLX zur subjektiven Erfassung physischer und psychischer Beanspruchung ausgewählt. Zudem erwies sich der Klebesensor als geeignetes System zur Messung psychischer Beanspruchung. Das Muskelshirt setzte sich aufgrund der einfacheren Nutzung unter Covid-Sicherheitsmaßnahmen für die Messung physischer Beanspruchung durch. Die detaillierte Beschreibung der Auswahl an Messmethoden ermöglicht es, die in der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Personaleinsatzplanung auf andere Einsatzbereiche mit unterschiedlichen Anforderungen und Restriktionen zu übertragen und an diese anzupassen. Zudem kann die methodische Auswahl von Devices oder die Übersicht standardisierter Fragebögen als alleinstehendes Unterstützungs-Tool in der Industrie angewendet werden.

5.2.2 Prädiktionsmodell zur Prognose der Beanspruchung

Das Ziel dieses Abschnitts ist die Erstellung eines Prädiktionsmodells zur Prognose personenbezogener physischer und psychischer Beanspruchung an einem Arbeitsplatz. Das Prädiktionsmodell basiert auf den gemessenen und ausgewerteten Daten einer Studie, welche bereits teilweise in TROPSCHUH ET AL. (2021b) veröffentlicht wurden. Für die Studiendurchführung wurde ein Ethikantrag bei der Ethikkommission der TUM gestellt und durch die Kommission genehmigt (Nr. 388/20 S-KH). In Bezug auf das übergeordnete Forschungsvorgehen der DRM handelt es sich um eine präskriptive Studie. Nachfolgend wird zunächst auf das Studiendesign und anschließend auf die Datenauswertung und die Studienergebnisse eingegangen. Detaillierte Beschreibungen sind in TROPSCHUH ET AL. (2021b) zu finden.

Studiendesign

Bei der Beschreibung des Studiendesigns wird zunächst auf das Ziel der Studie, ihren Aufbau und ihren Ablauf eingegangen. Abschließend werden die genutzten Messmethoden erläutert.

Das *Ziel der Studie* war es, physische und psychische Beanspruchung zu messen und diese anschließend auf Basis der Belastungsdaten am Arbeitsplatz und der individuellen Leistungsvoraussetzungen für weitere Szenarien zu präzisieren.

Der *Studienaufbau* bzw. das Studiensetting war hinsichtlich der Montageaufgabe und des nachgebauten Montagearbeitsplatzes im InnovationLab am *iwb* analog zu der Studie aus Abschnitt 5.2.1, Abbildung 5-21.

Der *Studienablauf* bestand aus zwei Montagerunden, in denen die Versuchspersonen die Montageaufgabe mit unterschiedlichen Taktzeiten durchführten (5:45 Minuten und 7:30 Minuten). Bei Erreichen des Zeitlimits wurde die Tätigkeit abgebrochen. Zudem

erfolgte eine Teilrandomisierung der Reihenfolge der Montagerunden, um den Einfluss des Lerneffekts auf die Ergebnisse zu reduzieren (30 Personen starten mit einer Taktzeit von 7:30 Minuten, 31 Personen starten mit einer Taktzeit von 5:45 Minuten). Die Laborumgebung gewährleistete zudem ein neutrales Setting, in dem die Parameter des Experiments genau definiert und externe Einflussfaktoren weitestgehend vermieden werden konnten. Zudem wurde für alle Versuchspersonen das gleiche detaillierte Protokoll mit Anweisungen zum Ablauf verwendet, um den Versuchsleiter-Effekt, auch Rosenthal-Effekt genannt, zu minimieren. Dieser Effekt beschreibt die Beeinflussung der Studienergebnisse durch die positiven Erwartungen der Versuchsleitenden oder deren Interaktion mit den Probanden und Probandinnen (ROSENTHAL & LAWSON 1964, S. 70). Die studienbegleitenden Unterlagen, wie der Ablaufplan (Abbildung D-9 und Abbildung D-10), die Arbeitsplatzbeschreibung (Abbildung D-11) und die Montageanleitung der Werkendeninformation (Abbildung D-12), sind im Anhang D abgebildet. (TROPSCUH ET AL. 2021b, S. 970)

Nachfolgend werden die genutzten *Messmethoden* erläutert, da die Prädiktion der Beanspruchung auf der Belastung der Arbeitsplätze und den Leistungsvoraussetzungen der Mitarbeitenden basiert. Die physische und psychische **Belastung** des nachgebauten Montagearbeitsplatzes mit unterschiedlichen Taktzeiten wurde mit EAWS (physisch) und KPB (psychisch) bewertet. Dabei wurde die Methode EAWS ausgewählt, da sie die Belastung des ganzen Körpers und separat die reine Belastung des Oberkörpers analysiert und flexibel für unterschiedliche Tätigkeiten anwendbar ist. Die Experten und Expertinnen bevorzugten das KPB aufgrund der detaillierten Betrachtung zahlreicher psychischer Kriterien im Vergleich zu weniger detaillierten Verfahren, siehe Abschnitt 2.3.2. Zur Erfassung der individuellen psychischen **Leistungsvoraussetzungen** erfolgte vor den Montagerunden die Abfrage der allgemeinen Montagekompetenz (Anfänger:in, Fortgeschrittene:r, Kenner:in, Könnler:in, Experte/Expertin) der Probanden und Probandinnen, um eine kompetenzbezogene Beanspruchungs-auswertung zu erhalten. Darüber hinaus wurde die Screening Scale for Chronic Stress (SSCS) aufgrund der guten Anwendbarkeit in der Praxis ausgewählt, um Auskunft über die psychische Verfassung der Testpersonen zu erhalten. Zur Ermittlung der physischen Leistungsvoraussetzungen folgt die Erhebung des Work-Ability-Index (WAI), des Biotality-Index (BI) und der Handkraft. Dabei ist die Handkraft vom Alter und Geschlecht der Testpersonen abhängig. Der WAI und BI werden zu Studienbeginn redundant genutzt, um den aussagekräftigeren Fragebogen zu identifizieren. Zur Auswahl passender Fragebögen wurden der Methodenbaukasten und das dazugehörige Vorgehen zur Auswahl geeigneter Methoden aus Abschnitt 5.2.1 sowie die Übersicht in Abschnitt 2.3.2 herangezogen. Zur subjektiven Erfassung der psychischen **Beanspruchung** erfolgt während der Studie die Abfrage des

NASA-Raw-Task-Load-Index (NASA-RTLX) und des Instantaneous Self-Assessment of Workload (ISA) nach jeder Montagerunde. Der NASA-RTLX wurde als eine der meistgenutzten Methoden zur Erfassung psychischer Beanspruchung gewählt, wobei die RTLX-Variante ohne Gewichtungsfaktoren zur besseren Praxistauglichkeit bevorzugt wurde, siehe Abschnitt 5.2.1. Das ISA stellt eine sehr einfache, intuitive Abfrage des aktuellen psychischen Beanspruchungszustands dar und wird normalerweise alle 2 bis 5 Minuten während der Tätigkeit durchgeführt (TATTERSALL & FOORD 1996, S. 742). Da in der vorliegenden Studie die Taktzeiten sehr kurz sind (7:30 Minuten und 5:45 Minuten) und Unterbrechungen während der Montage die Konzentration und den Arbeitsfluss stark beeinträchtigen, wurde das ISA nach jeder Montagerunde abgefragt (TROPSCUH ET AL. 2021b, S. 970). Zusätzlich wurde die Borg-Skala zur Messung der subjektiven physischen Beanspruchung angewendet. Diese ist analog zum ISA eine intuitive und leicht verständliche Abfragemethode. Die genannten Fragebögen (NASA-RTLX, ISA, Borg-Skala) wurden nach jeder Montagerunde ausgefüllt. Zudem wurden zur Messung der Vitalwerte basierend auf dem Leitfaden zur Auswahl geeigneter Wearables der Polar-H10-Brustgurt zur Messung der Herzrate und das EMG-Shirt von Myontec zur Erfassung der Muskelaktivität eingesetzt. Die gesamte Studie wurde zu Dokumentationszwecken auf Video aufgezeichnet. Abbildung 5-26 zeigt zusammenfassend die für die Studie ausgewählten Messmethoden.

| | Belastung | individuelle Leistungsvoraussetzungen | Beanspruchung |
|-----------|---|---|---|
| physisch | <ul style="list-style-type: none"> Ergonomic Assessment Worksheet (EAWS) | <ul style="list-style-type: none"> Work Ability Index (WAI) Biotality Index (BI) Handkraft | <ul style="list-style-type: none"> Borg-Rating of Perceived Exertion (BORG-Skala) Electromyographie (EMG) / Muskelaktivität |
| psychisch | <ul style="list-style-type: none"> Kompaktverfahren Psychische Belastung (KPB) | <ul style="list-style-type: none"> Screening Scale for Chronic Stress (SSCS) Montagekompetenz | <ul style="list-style-type: none"> NASA-Task Load Index (NASA-TLX) Instantaneous Self Assessment (ISA) Herzrate (HR) |

Abbildung 5-26: Ausgewählte Messmethoden der Studie zur Beanspruchungsmessung

Datenauswertung und Ergebnisse

In Bezug auf die Datenauswertung und die daraus abgeleiteten Ergebnisse wird zunächst auf das Probandenkollektiv eingegangen, bevor anschließend die Erstellung des hierarchisch linearen Modells zur Prädiktion der Beanspruchung folgt.

Das *Probandenkollektiv* bestand aus 61 Versuchspersonen (13 Frauen und 48 Männer; Alter zwischen 21 bis 66 Jahren, Mittelwert 28 Jahre mit einer Standardabweichung von 9 Jahren). Die Gruppe der Testpersonen setzte sich aus Studierenden und Mitarbeitenden der Technischen Universität München sowie aus externen Testpersonen zusammen. Der

Altersdurchschnitt der Versuchspersonen ist dabei etwas jünger als in der industriellen Praxis, liefert jedoch unter Berücksichtigung der Covid-bedingten Einschränkungen eine gute Datengrundlage für die Berechnung der Beanspruchung. Diese Berechnung wurde im Rahmen der Validierung mit anderen Mitarbeitenden aus der industriellen Praxis hinsichtlich der Übertragbarkeit geprüft. Da nicht alle Teilnehmenden des vorliegenden Probandenkollektivs eine technische Ausbildung oder Montageerfahrung aufwiesen, ist die Gruppe der Probanden und Probandinnen hinsichtlich der Kompetenzausprägung relativ heterogen (5 Anfänger:innen, 9 Fortgeschrittene, 26 Kenner:innen, 20 Könnner:innen und ein Experte). Verschiedene Ausbildungen der Testpersonen wurden dabei nicht separat bewertet, sondern lediglich im Rahmen der Montagekompetenz berücksichtigt.

Zur Prädiktion der physischen und psychischen Beanspruchung wird ein *hierarchisch lineares Modell* erstellt. Dieses ermöglicht die Prognose einer abhängigen Variable, auch Kriterium genannt, durch mehrere unabhängige Variablen, die auch als Prädiktoren bezeichnet werden (BÜHNER & ZIEGLER 2009, S. 635). Hierarchisch lineare Modelle werden besonders zur Integration personenbezogener Einflussfaktoren bei der Prädiktion genutzt, zum Beispiel in den Sozial- und Verhaltenswissenschaften (HOX ET AL. 2017, S. XI). Die Daten des Modells stammen aus mindestens zwei hierarchischen Ebenen (PÖTSCHKE 2019, S. 5). In der vorliegenden Studie stellen die physische und psychische Beanspruchung die abhängige Variable, bzw. das zu prädizierende Kriterium dar. Die Prädiktoren sind die Belastungen am Arbeitsplatz (Ebene 1: EAWS, KPB) und die Leistungsvoraussetzungen (Ebene 2: WAI, BI, Handkraft, SSCS, Montagekompetenz). Das Vorgehen zur Erstellung des hierarchisch linearen Modells ist in Abbildung 5-27 visualisiert.

Um ein hierarchisch lineares Modell zu erstellen, sind zunächst die folgenden fünf Voraussetzungen zu prüfen (BÜHNER & ZIEGLER 2009, S. 665, WENTURA & POSPESCHILL 2015, S. 48):

1. *Linearität zwischen den abhängigen Variablen und der unabhängigen Variable*

Die Linearität wurde anhand von Streudiagrammen geprüft (BÜHNER & ZIEGLER 2009, S. 666), siehe Abbildung D-13 in Anhang D. Der Biotality Index hat sich dabei als nicht linear herausgestellt und wurde daraufhin ausgeschlossen.

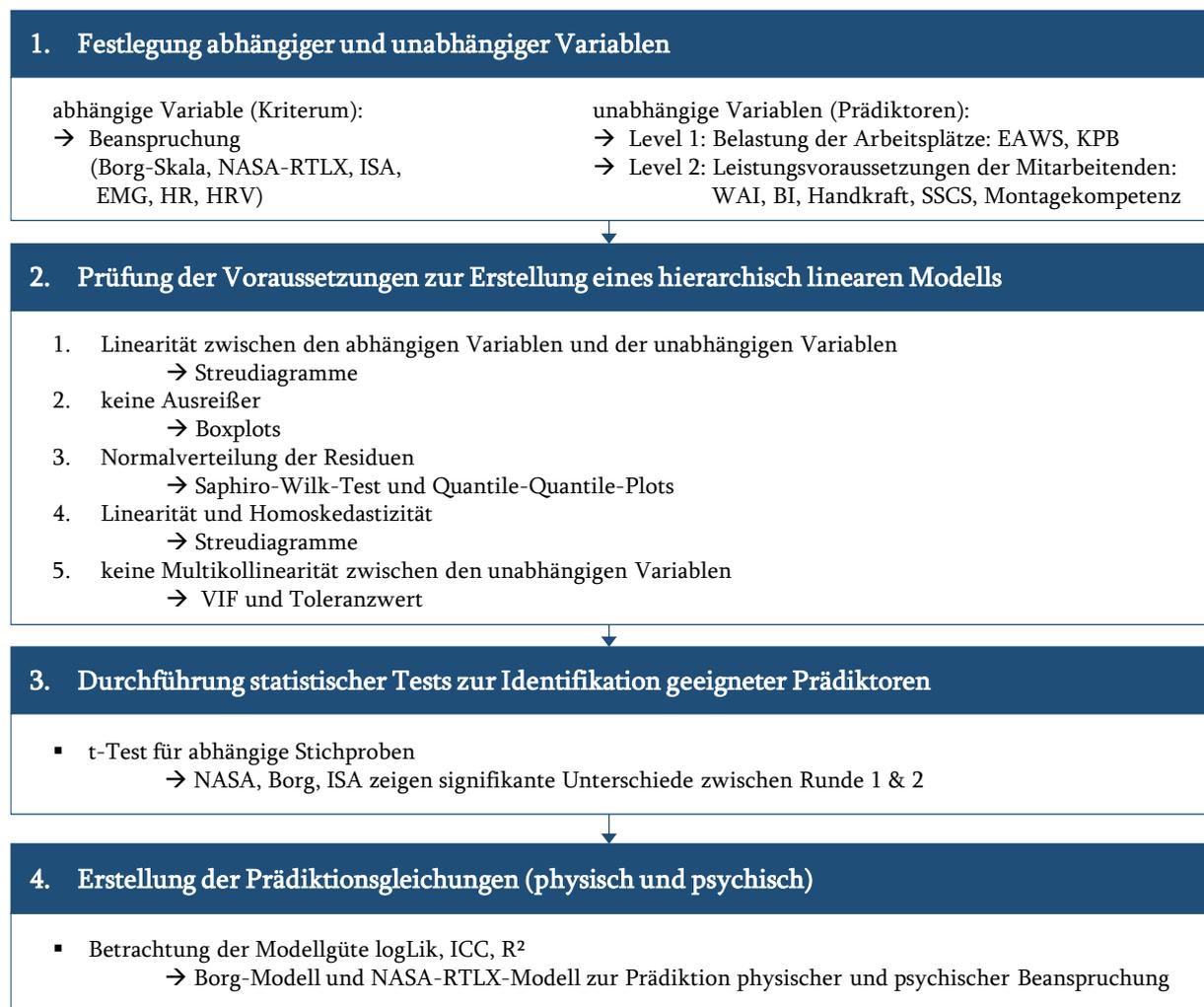


Abbildung 5-27: Methodisches Vorgehen zur Erstellung eines hierarchisch linearen Modells zur Prädiktion physischer und psychischer Beanspruchung

2. Keine Ausreißer

Zur Prüfung der Datensätze auf Ausreißer wurden Boxplots erstellt, siehe Abbildung 5-28. Die Box im Boxplot visualisiert den Bereich, in dem zwischen 25 % und 75 % der Werte liegen. Die Linie in der Box stellt den Median dar, der die Datenreihe halbiert, sodass eine Hälfte der Daten unterhalb und die andere Hälfte oberhalb des Medians in der geordneten Reihe liegt. Darüber hinaus zeigen die Antennen, auch Whisker genannt, die Minimal- und Maximalwerte, ohne Ausreißer. Einfache Ausreißer werden durch Kreise symbolisiert und liegen maximal in einem Abstand der 1,5-fachen Boxlänge. Im Gegensatz dazu markieren Sterne extreme Ausreißer und liegen im Abstand von 1,5- bis 3-fachen Boxlänge. Ausreißer sollten manuell geprüft werden. (ECKSTEIN 2016, S. 96)

Die grafischen Ausreißer können auf das heterogene Probandenkollektiv mit zahlreichen jüngeren Teilnehmenden (< 30 Jahre) und wenigen älteren Teilnehmenden (> 55 Jahre) zurückgeführt werden. Somit sind nach der manuellen Prüfung keine Ausreißer oder Fehler zu vermerken.

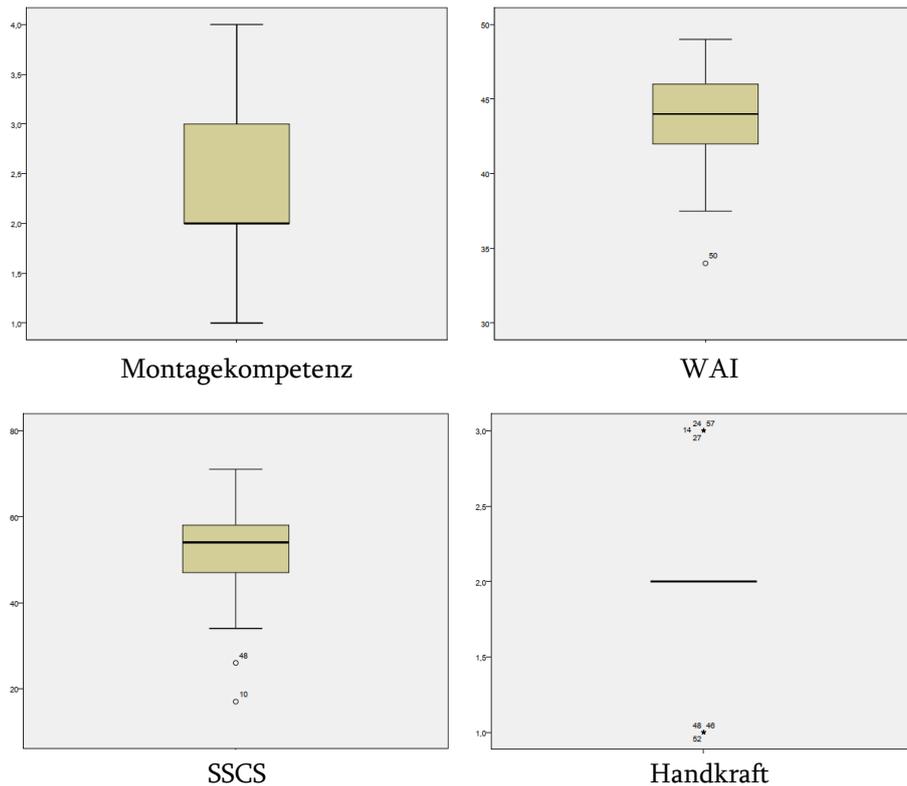


Abbildung 5-28: Boxplots der Prädiktoren

3. Normalverteilung der Residuen

Die Normalverteilung der Residuen wurde anhand des Shapiro-Wilk-Tests und der Quantile-Quantile-Plots (Q-Q-Plots) geprüft (BORTZ & SCHUSTER 2010, S. 198, ECKSTEIN 2016, S. 97). Residuen stellen die Differenz zwischen dem erwarteten und dem beobachteten Wert der abhängigen Variable (des zu prädizierenden Kriteriums) dar (BORTZ & SCHUSTER 2010, S. 186). Der Shapiro-Wilk-Test zeigt für die meisten Werte ein Signifikanz-Niveau p kleiner 0,05 an, was gegen eine Normalverteilung spricht, siehe Abbildung 5-29.

| | Statistik | Freiheitsgrad df | p |
|----------------|-----------|------------------|-------|
| Diff_NASA-RTLX | 0,950 | 61 | 0,015 |
| Diff_Borg | 0,955 | 61 | 0,026 |
| Diff_ISA | 0,794 | 61 | 0,000 |
| Diff_EMG | 0,956 | 54 | 0,048 |
| Diff_NHR | 0,934 | 60 | 0,003 |
| Diff_HRV | 0,980 | 60 | 0,442 |

Abbildung 5-29: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests

Die unzureichende Signifikanz kann laut SHAPIRO & WILK (1965, S. 610) auf die Anfälligkeit des Tests hinsichtlich Ausreißer und auf die hohe Anzahl an Probanden und Probandinnen (> 50) zurückgeführt werden. Daher wurden zusätzlich Q-Q-Plots

der Residuen hinsichtlich der Normalverteilung visuell geprüft, siehe Abbildung 5-30. Da die Punkte in den Q-Q-Plots nahe bei der Geraden liegen, sprechen die Ergebnisse für eine Normalverteilung. ECKSTEIN (2016, S. 118) betont, dass das Kriterium der Normalverteilung ab einer Stichprobengröße größer als 50 vernachlässigbar ist, da das hierarchisch lineare Modell robust gegenüber einer Verletzung der Normalverteilung ist. Der Stichprobenumfang der vorliegenden Studie von 61 Personen übersteigt diese genannte Größe.

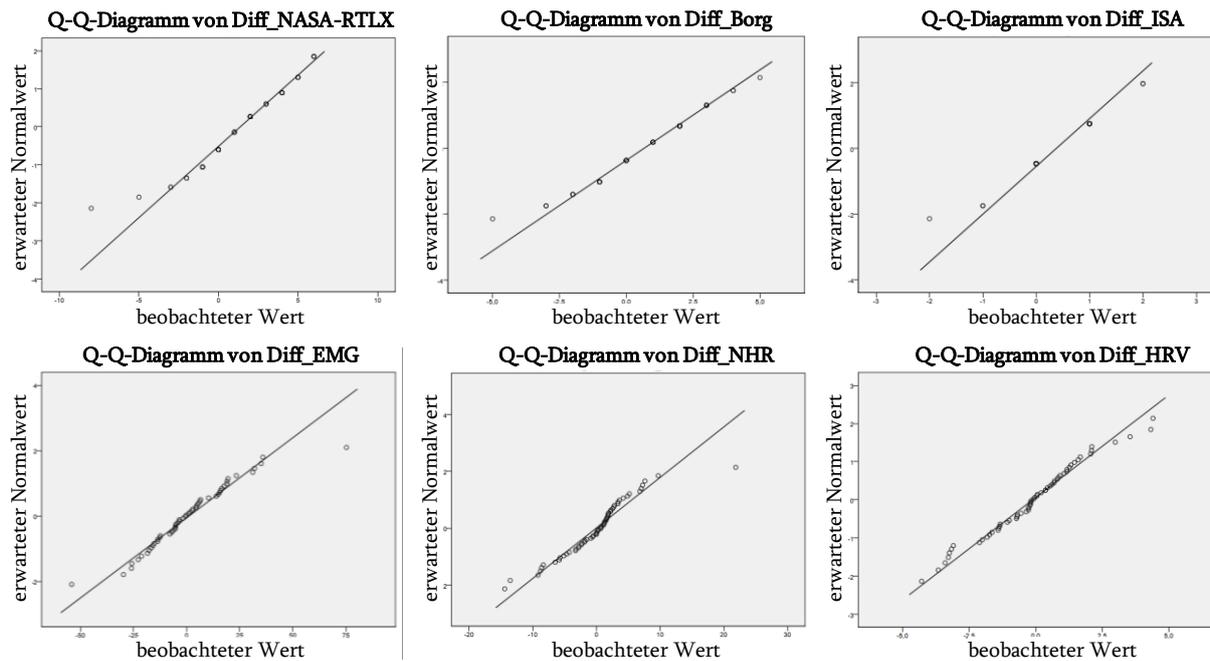


Abbildung 5-30: Q-Q-Plots der Residuen

4. *Linearität und Homoskedastizität*

Homoskedastizität liegt vor, wenn die Abweichung der Prädiktion für alle Variablen ungefähr gleich ist (BORTZ & SCHUSTER 2010, S. 193). Die Linearität und Homoskedastizität der Modelle werden visuell anhand von Streudiagrammen geprüft, siehe Abbildung D-14 bis Abbildung D-19 in Anhang D. Auf Basis der Abbildungen wird die Voraussetzung als erfüllt angenommen, da die Werte in den vorgegebenen Bereichen liegen.

5. *Keine Multikollinearität zwischen den unabhängigen Variablen*

Multikollinearität beschreibt einen sehr starken Zusammenhang zwischen Variablen (BÜHNER & ZIEGLER 2009, S. 677). Zur Prüfung der Multikollinearität werden der Variance Inflation Factor (VIF) und die Toleranz betrachtet (BÜHNER & ZIEGLER 2009, S. 677). Da beide bei ungefähr 1 liegen und somit die empfohlenen Richtwerte von Toleranz $> 0,1$ und $VIF < 5$ nicht über- bzw. unterschritten werden, wird von keiner Multikollinearität ausgegangen (URBAN & MAYERL 2011, S. 232), siehe Abbildung D-20, Abbildung D-21, Abbildung D-22 in Anhang D.

Anschließend wurde ein t-Test für abhängige Stichproben durchgeführt, um dieselbe Stichprobe bei zwei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen zu vergleichen. Der t-Test zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen Montagerunde 1 und Montagerunde 2 bei EMG, HRV und NHR. Bei NASA-RTLX ($t(60) = -4,025$; $p = 0,000$), ISA ($t(60) = -2,879$; $p = 0,006$) und Borg ($t(60) = -4,286$; $p = 0,000$) können signifikante Unterschiede festgestellt werden, siehe Abbildung 5-31, weswegen die drei Methoden NASA-RTLX, Borg und ISA zur Beanspruchungsmessung weiterverfolgt werden.

| | gepaarte Differenz | | | | | t | df | p Sig (2-seitig) |
|-----------------|--------------------|-------------------------|--|--|---------|--------|----|---------------------|
| | Mittelwert | Standard- abweichung | Standard- fehler des Mittelwerts | 95 % Konfidenzintervall der Differenz | | | | |
| | | | | Untere | Obere | | | |
| Paare NASA-RTLX | -1,377 | 2,672 | 0,342 | -2,061 | -,693 | -4,025 | 60 | 0,000 |
| Paare Borg | -0,672 | 1,823 | 0,233 | -1,139 | -0,205 | -2,879 | 60 | 0,006 |
| Paare ISA | -0,377 | 0,687 | 0,088 | -0,553 | -0,201 | -4,286 | 60 | 0,000 |
| Paare EMG | -1,18867 | 20,41389 | 2,77798 | -6,76059 | 4,38325 | -0,428 | 53 | 0,670 |
| Paare NHR | 0,02296 | 5,63698 | 0,72773 | -1,43322 | 1,47915 | 0,032 | 59 | 0,975 |
| Paare HRV | 0,11050 | 1,86287 | 0,24050 | -0,37073 | 0,59173 | 0,459 | 59 | 0,648 |

Abbildung 5-31: t-Test abhängiger Stichproben

Nach der erfolgreichen Prüfung der Voraussetzungen erfolgte die Erstellung der hierarchisch linearen Modelle für NASA-RTLX, ISA und Borg zur Prognose der physischen und psychischen Beanspruchung. Dabei wurden zunächst die maximal möglichen Modelle für jeden Prädiktionsparameter bestimmt (NASA, ISA, Borg) (BATES ET AL., S. 12), welche neben dem Random Intercept auch Interaktionen zwischen den Prädiktoren enthalten können. Die Ergebnisse der hierarchisch linearen Modelle sind mathematische Gleichungen, mit denen die Beanspruchung auf Basis der Prädiktoren und deren Koeffizienten berechnet werden kann. Zur Bewertung der erstellten Modelle wurde die Modellgüte analysiert, welche eine Aussage darüber gibt, wie gut ein Modell den empirisch beobachteten Daten entspricht (DÖRING & BORTZ 2016, S. 962). Dabei dienen die Qualitätskriterien der LogLikelihood-Funktion (logLik), das Bestimmtheitsmaß R^2 und der Intraklassen-Korrelationskoeffizient (ICC) als Bewertungsbasis für den manuellen Modellvergleich. Da eine negative, doppelt logarithmische Likelihood-Funktion für die Berechnung verwendet wurde, deutet ein niedriger Wert für logLik auf ein plausibles Modell hin. Die Effekte und Schätzparameter des geeignetsten Modells wurden unter eingeschränkter Maximum-Likelihood-Schätzung bestimmt (SNIJDERS & BOSKER 2012, S. 89). Die Modelle von NASA-RTLX und Borg zeigen die besten Ergebnisse hinsichtlich logLik, siehe Abbildung 5-32. Die Modellgüte des Prädiktionsmodells wurde zudem mit Hilfe von R^2 nach Nakagawa bewertet. Das R^2 gibt an, wie gut das Kriterium durch die Prädiktoren erklärt werden kann (NAKAGAWA & SCHIELZETH 2013).

| | NASA-RTLX | ISA | Borg |
|----------------|-----------|---------|---------|
| R ² | 0,264 | 0,276 | 0,231 |
| logLik | -273,08 | -118,98 | -243,69 |
| ICC | 0,448 | 0,58 | 0,661 |

Abbildung 5-32: Bewertung der drei Modelle NASA-RTLX, ISA und Borg

Der ICC gilt als Maß für die Reliabilität einer Messreihe, wobei ein ICC-Wert unter 0,40 als schlecht, zwischen 0,40 und 0,59 als durchschnittlich, zwischen 0,6 und 0,74 als gut und ab 0,75 als sehr gut gilt (CICCHETTI 1994, S. 286). Die ICC-Werte in Abbildung 5-32 zeigen durchschnittliche Werte für das NASA-TLX- und ISA-Modell und gute Werte für das Borg-Modell. Beim Borg-Modell gehen zum Beispiel 66,1 % der Varianz in der subjektiven Beanspruchung auf die Unterschiede zwischen den Testpersonen und 43,9 % Prozent auf die Unterschiede zwischen den Belastungsstufen zurück.

Die finalen Modelle mit den einzelnen Residuen sind in Anhang D abgebildet, siehe Abbildung D-20, Abbildung D-21 und Abbildung D-22. Zur Prädiktion physischer Beanspruchung wurde das Borg-Modell ausgewählt. Auf Basis des Borg-Modells mit den Prädiktoren EAWS, Montagekompetenz, WAI, Handkraft und SSCS ergibt sich die Prädiktionsgleichung der physischen Beanspruchung. Hinsichtlich der Prädiktion psychischer Beanspruchung wurde das NASA-RTLX-Modell gewählt, da der Fragebogen NASA-RTLX eine der anerkanntesten Messmethoden zur Ermittlung subjektiver Beanspruchung darstellt. Zudem ist die R²-Bewertung sowie der ICC-Wert von NASA-RTLX und ISA sehr ähnlich, weswegen das NASA-RTLX-Modell bevorzugt wurde. Daraus ergab sich das NASA-RTLX-Modell mit den Prädiktoren KPb, Montagekompetenz, WAI, Handkraft und SSCS. Das Borg- und NASA-RTLX-Modell geben Berechnungswerte für die Gleichungen physischer und psychischer Beanspruchung an, woraus sich jeweils eine Gleichung zur Beanspruchungsberechnung ergibt. Dadurch kann die Beanspruchung für weitere Szenarien prognostiziert werden, siehe Abbildung 5-33.

$$P_{phy} = 10,443549 - 1,123466 * MK - 0,098842 * WAI + 0,057722 * SSCS - 1,138961 * HK + 0,036331 * EAWS + 0,048958 * MK * WAI + 0,082573 * MK * SSCS + 0,003661 * WAI * SSCS - 0,541437 * MK * HK + 0,195313 * WAI * HK + 0,020282 * SSCS * HK - 0,014688 * MK * WAI * SSCS - 0,984853 * MK * WAI * HK - 0,391565 * MK * SSCS * HK - 0,053231 * WAI * SSCS * HK - 0,056506 * MK * WAI * SSCS * HK$$

$$P_{psy} = 3,369441 - 1,173364 * MK + 0,071652 * WAI + 0,071652 * SSCS + 1,44252 * HK + 0,688525 * KPb - 0,105397 * MK * WAI + 0,025447 * MK * SSCS + 0,003246 * WAI * SSCS - 1,059857 * MK * HK - 0,358572 * WAI * HK + 0,169216 * SSCS * HK - 0,022504 * MK * WAI * SSCS + 1,039784 * MK * WAI * HK + 0,330454 * MK * SSCS * HK + 0,076341 * WAI * SSCS * HK - 0,036426 * MK * WAI * SSCS * HK$$

| | | | |
|------------------|--|------|------------------------------------|
| P _{phy} | prädizierte physische Beanspruchung pro Mitarbeitende | MK | Montagekompetenz |
| P _{psy} | prädizierte psychische Beanspruchung pro Mitarbeitende | WAI | Work Ability Index |
| KPB | Kompaktverfahren psychische Beanspruchung | HK | Handkraft Kategorie |
| EAWS | Ergonomic Assessment Worksheet | SSCS | Screening Scale for Chronic Stress |

Abbildung 5-33: Modellgleichungen zur Berechnung psychischer und physischer Beanspruchung mit Hilfe der Modellkoeffizienten und Eingabedaten

Zur Bewertung der Prädiktionsgenauigkeit wurden nach der Erstellung des Prädiktionsmodells die im Rahmen der Studie erhobenen Beanspruchungsdaten zur Kontrolle prädiziert. Die Borg-Daten weichen dabei im Durchschnitt um 0,97 Borg-Punkte von der Prädiktion ab (6,9 %) und die NASA-RTLX-Daten um durchschnittlich 1,49 NASA-Punkte (7,4 %).

Das Ergebnis dieses Abschnitts stellt das Prädiktionsmodell zur Berechnung physischer und psychischer Beanspruchung (Borg, NASA-RTLX) auf Basis der physischen und psychischen Arbeitsplatzeigenschaften (EAWS, KPB) und Leistungsvoraussetzungen der Mitarbeitenden (WAI, Handkraft, SSCS) dar. Aufbauend auf den Studiendaten war es möglich, die Koeffizienten zur Beanspruchungsberechnung zu identifizieren. Daraus ergeben sich jeweils eine Gleichung für die Prädiktion der psychischen und der physischen Beanspruchung. Diese Gleichungen stellen die Berechnungsgrundlage für die Rotationslogik dar, welche nachfolgend in Baustein 3 (Abschnitt 5.3) entwickelt wird. Die Evaluierung der Beanspruchungsberechnung erfolgt im Rahmen einer Validierungsstudie mit Mitarbeitenden aus der industriellen Praxis und wird in Abschnitt 7.1 beschrieben.

5.2.3 Zusammenfassung Baustein 2

In Baustein 2 lag der Fokus auf der Auswahl der Messmethoden zur Beanspruchungsermittlung und auf der Erstellung des Prädiktionsmodells zur Prognose physischer und psychischer Beanspruchung. Dafür wurde zunächst ein methodisches Vorgehen zur strukturierten Auswahl geeigneter Fragebögen und Wearables zur Beanspruchungsmessung in der Produktion aus einem Methodenbaukasten vorgestellt. Dieser Methodenbaukasten enthält unter anderem studienbasierte Aussagen über den Komfort und die Datenqualität ausgewählter Wearables. Neben der Auswahl des Brustgurts zur Messung der Herzrate, des EMG-Shirts zur Erfassung der Muskelaktivität (objektive Methoden der Beanspruchungsmessung) und der Fragebögen NASA-RTLX, ISA und Borg (subjektive Methoden der Beanspruchungsmessung) erfolgte die Auswahl von Verfahren zur Belastungsanalyse am Arbeitsplatz (EAWS, KPB). Um die Leistungsvoraussetzungen der Mitarbeitenden aufzunehmen, wurden der WAI, der BI und der SSCS erhoben. Diese Fragebögen und Devices wurden anschließend in einer umfangreichen Nutzendenstudie mit 61 Teilnehmenden zur Messung physischer und psychischer Beanspruchung im InnovationLab des *iwb* eingesetzt. Hinsichtlich der Auswertung der erfassten Studiendaten erfolgte zunächst die Prüfung der Voraussetzungen zur Erstellung eines hierarchisch linearen Modells sowie die Durchführung von Tests zur Identifikation geeigneter Prädiktoren. Abschließend wurde die Güte der verschiedenen Modelle verglichen, woraufhin das Borg-Modell zur Prädiktion physischer Beanspruchung und das NASA-RTLX-Modell zur Prognose psychischer Beanspruchung ausgewählt wurden.

5.3 Baustein 3 | Generierung und Kommunikation von Personaleinsatzplänen

Der dritte Baustein befasst sich mit der Beantwortung der dritten Forschungsfrage: „*Wie können beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzpläne generiert und an die Mitarbeitenden kommuniziert werden?*“. In diesem Abschnitt wird zunächst die Rotationslogik zur Generierung der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzpläne beschrieben (Abschnitt 5.3.1). Anschließend folgt die Entwicklung der Interaktionsschnittstellen zur Kommunikation der Personaleinsatzpläne zu den Planenden und Werkenden (Abschnitt 5.3.2), bevor der Abschnitt mit einer Zusammenfassung des Bausteins 3 abgeschlossen wird (Abschnitt 5.3.3). Die wissenschaftliche Vorgehensweise dieses Bausteins umfasst neben Literaturrecherchen, Gesprächen mit Experten und Expertinnen und Nutzenden ebenso die Entwicklung einer Rotationslogik und die iterative Erstellung zugehöriger Interaktionsschnittstellen. Zudem fließen in die Erarbeitung dieses Lösungsbausteins folgende von der Autorin betreute wissenschaftliche Studienarbeiten ein: RAINER (2019), REISINGER (2020), BECK (2020), ANGERMANN (2020b) und ANGERMANN (2020a).

5.3.1 Rotationslogik zur Generierung von Personaleinsatzplänen

In diesem Abschnitt erfolgt die Beschreibung der algorithmen-basierten Entwicklung der Rotationslogik und die Erstellung der Personaleinsatzpläne. Die Rotationslogik besteht aus zwei Teilen, einerseits dem Algorithmus zur Berechnung der prädizierten physischen und psychischen Beanspruchung pro AP-MA-Konstellation der möglichen Einsatzpläne und andererseits der Zielfunktion zur Bewertung und Priorisierung der einzelnen Einsatzpläne anhand der Beanspruchung, siehe Abbildung 5-34. Die Entwicklung des Algorithmus und der Zielfunktion wird nachfolgend dargelegt.

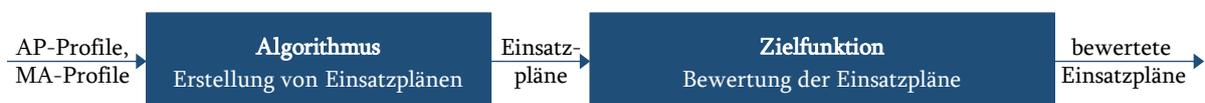
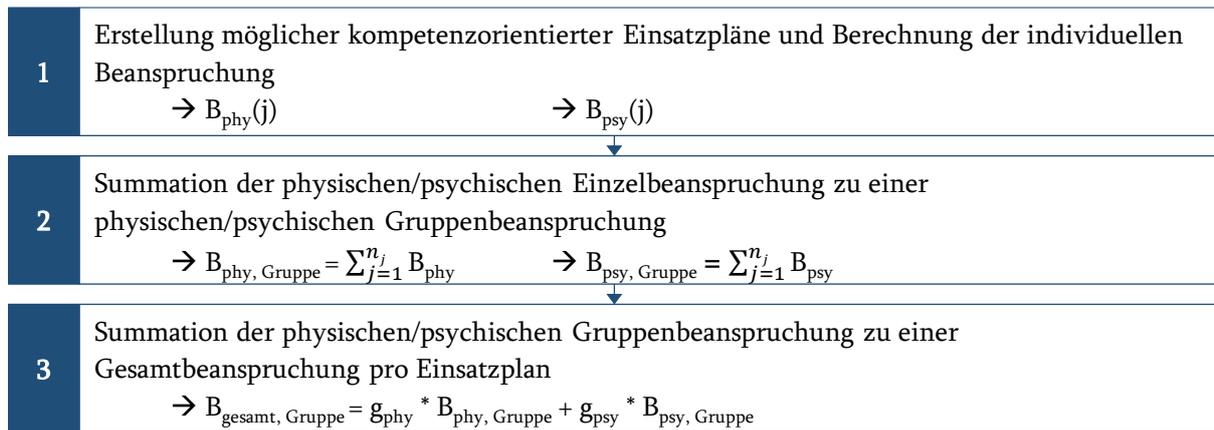


Abbildung 5-34: Überblick über die Rotationslogik

Die algorithmen-basierte Erstellung von Einsatzplänen erfolgt in drei Schritten. Im ersten Schritt werden unter Berücksichtigung der Kompetenzen mögliche Konstellationen an Einsatzplänen einer Arbeitsgruppe erstellt und dabei die in Abschnitt 5.1.2 erstellten AP- und MA-Profilen sowie der AP-MA-Vergleich genutzt. Für jeden Einsatzplan werden darauf aufbauend die individuellen physischen und psychischen Beanspruchungen pro Person mit Hilfe der Prädiktionsgleichungen aus Abschnitt 5.2.2 und unter Berücksichtigung vergangener Rotationen berechnet (B_{phy} , B_{psy}). Der zweite Schritt beinhaltet die Summation

der individuellen physischen und psychischen Beanspruchungen der Einzelpersonen zur physischen und psychischen Beanspruchung der Arbeitsgruppe für einen Einsatzplan ($B_{phy, Gruppe}$, $B_{psy, Gruppe}$). Im dritten Schritt erfolgt die Addition der physischen und psychischen Beanspruchung der Arbeitsgruppe zu einer Gesamtbeanspruchung eines Einsatzplans, wobei jeder Beanspruchungsart ein individueller Gewichtungsfaktor vorgesetzt ist, siehe Abbildung 5-35. Die drei Schritte werden nachfolgend genauer erläutert.



- $B_{phy}(j)$ physische Beanspruchung individueller Mitarbeitenden j eines Einsatzplans
- $B_{psy}(j)$ psychische Beanspruchung individueller Mitarbeitenden j eines Einsatzplans
- $B_{phy, Gruppe}$ physische Beanspruchung einer Arbeitsgruppe für einen Einsatzplan
- $B_{psy, Gruppe}$ psychische Beanspruchung einer Arbeitsgruppe für einen Einsatzplan
- $B_{gesamt, Gruppe}$ Gesamtbeanspruchung einer Arbeitsgruppe für einen Einsatzplan
- g_{phy} Gewichtungsfaktoren physisch
- g_{psy} Gewichtungsfaktoren psychisch

Abbildung 5-35: Vorgehen zur Erstellung der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Einsatzpläne

Schritt 1: Erstellung möglicher kompetenzorientierter Einsatzpläne und Berechnung der individuellen Beanspruchung

Bevor Mitarbeitende einem Arbeitsplatz zugewiesen werden, findet ein Vergleich zwischen den vorhandenen Kompetenzen der Mitarbeitenden und den Kompetenzanforderungen der Arbeitsplätze statt. Hierfür wird der Kompetenzvergleich aus Abschnitt 5.1.2 genutzt (ANGERMANN 2020a, 90f.). Falls eine ausreichende Übereinstimmung vorliegt, wird in der Kompetenzmatrix an entsprechender Stelle eine 1 vermerkt, andernfalls der Wert 0, siehe Formel 5-1.

$$(q_{M_j, A_i}) = \begin{pmatrix} q_{M_1, A_1} & q_{M_2, A_1} & \dots & q_{M_{n_M}, A_1} \\ q_{M_1, A_2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{M_1, A_{n_A}} & \dots & \dots & q_{M_{n_M}, A_{n_A}} \end{pmatrix} \quad (5-1)$$

mit: $q_{M_j, A_i} \in [0,1]$ | q_{M_j, A_i} Kompetenz der Mitarbeitenden M_j am Arbeitsplatz A_i

Bei der Zuweisung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen ist zunächst die Anzahl der zu besetzenden Arbeitsplätze n_A und die Anzahl der zur Verfügung stehenden Mitarbeitenden n_M zu prüfen. Falls mehr Mitarbeitende als Arbeitsplätze zur Verfügung stehen, kommt es

zu einer Arbeitsplatzdoppelbelegung. Dabei werden zwei Mitarbeitende demselben Arbeitsplatz zugewiesen, eine Person mit den benötigten Kompetenzen und eine Person ohne diese. Durch diese Doppelbelegung kann eine Kompetenzentwicklung stattfinden. Ein Einsatzplan stellt mathematisch betrachtet eine Zuweisungsmatrix x_{M_j, A_i} dar, welche die Zuordnung von Mitarbeitenden M_j zu Arbeitsplätzen A_i auflistet. Im Falle einer Zuweisung einer Person zu einem Arbeitsplatz enthält die Zuweisungsmatrix an der entsprechenden Stelle den Wert 1, sonst den Wert 0, siehe Formel 5-2.

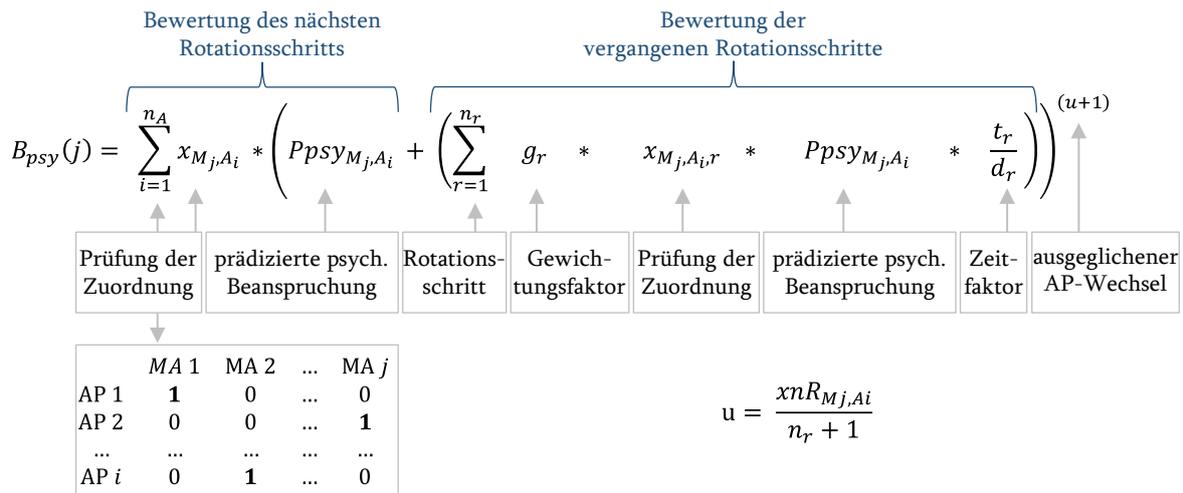
$$(x_{M_j, A_i}) = \begin{pmatrix} x_{M_1, A_1} & x_{M_2, A_1} & \dots & x_{M_{n_M}, A_1} \\ x_{M_1, A_2} & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{M_1, A_{n_A}} & \dots & \dots & x_{M_{n_M}, A_{n_A}} \end{pmatrix} \quad (5-2)$$

mit: $x_{M_j, A_i} \in [0,1]$ | x_{M_j, A_i} Zuweisung von Mitarbeitenden M_j zu Arbeitsplätzen A_i

Auf Basis der Kompetenzmatrix können alle möglichen kompetenzorientierten Zuweisungskonstellationen ermittelt werden. Darauf aufbauend erfolgt die Berechnung der individuellen physischen und psychischen Beanspruchung dieser Zuweisungskonstellationen. Die getrennte Berechnung physischer und psychischer Beanspruchung erfolgt nach einem analogen Vorgehen, weswegen nachfolgend nur auf die Berechnung psychischer Beanspruchung eingegangen wird. Zur Vollständigkeit ist die Formel zur Berechnung der individuellen physischen Beanspruchung in Abbildung E-23 in Anhang E gezeigt. Die Formel zur Berechnung der individuellen psychischen Beanspruchung ist in Abbildung 5-36 zu sehen. Die einzelnen Bestandteile der Formel und deren Zusammensetzung werden nun im Detail beschrieben.

Die personenindividuelle psychische Beanspruchung $B_{psy}(j)$ einer Person j an einem bestimmten Arbeitsplatz i setzt sich aus der Berechnung der Beanspruchung für den nächsten geplanten Einsatz und der Berücksichtigung der Beanspruchung aus vergangenen Einsätzen/Rotationen zusammen. Die Anzahl der zu berücksichtigenden vergangenen Rotationen (n_r) kann unternehmensindividuell festgelegt werden, je nachdem, in welchem Rhythmus rotiert wird (z. B. mehrmals täglich, einmal täglich, wöchentlich).

Bei der Bewertung der nächsten Rotation erfolgt durch die Summation $\sum_{i=1}^{n_A}$ eine Überprüfung aller möglichen Arbeitsplatzzuweisungen. Die Zuweisungsmatrix wird anschließend mit einem in der Klammer gefassten Term multipliziert, welche die prädierte psychische Beanspruchung einer Person an einem bestimmten Arbeitsplatz in der nächsten Rotation $Ppsy_{M_j, A_i}$ sowie die kumulierte Beanspruchung der vergangenen Rotationen beinhaltet. Dabei wird für die Prädiktion der Beanspruchung die Formel aus Abschnitt 5.2.2 genutzt.



| | | | |
|----------------|---|-------------------|--|
| B_{psy} | psychische Beanspruchung pro Mitarbeitenden | u | Exponent vergangener Rotationsschritte, Werte zwischen 0 bis 1 |
| M_j | Mitarbeitende j | t_r | Dauer einer Rotation (z. B. 1 Schicht = 8 h) |
| j | Laufvariable für Mitarbeitende | d_r | Zeit seit Beginn des letzten Einsatzes an dem Arbeitsplatz (Vielfaches von 24 $\rightarrow d = r \cdot 24$) |
| A_i | Arbeitsplätze i | $Ppsy_{M_j, A_i}$ | prädizierte psychische Beanspruchung von Mitarbeitenden M_j an den Arbeitsplätzen A_i |
| i | Laufvariable für Arbeitsplätze | xnR_{M_j, A_i} | Zähl-Matrix (Summation aller vergangenen Rotationen + nächste geplante Rotation) |
| n_A | Anzahl aller Arbeitsplätze | g_r | Gewichtungsfaktor für vergangene Rotationsschritte (z. B. $g_1 = 3$) |
| r | Variable für vergangene Rotationsschritte | | |
| x_{M_j, A_i} | Zuweisungsmatrix der Mitarbeitenden M_j zu Arbeitsplätzen A_i | | |
| n_r | Anzahl vergangener Rotationsschritte, die in die Bewertung einfließen | | |

Abbildung 5-36: Formel zur Berechnung der psychischen Beanspruchung eines Mitarbeitenden unter Berücksichtigung vergangener Rotationen und Integration eines ausgewogenen AP-Wechsels

Jede zu berücksichtigende vergangene Rotation besteht aus einem Gewichtungsfaktor g_r , der kleiner ist, je weiter eine Rotation zurück liegt, der Zuordnungsmatrix der jeweiligen vergangenen Rotation ($x_{M_j, A_i, r}$), der dafür prädizierten Beanspruchung ($Ppsy_{M_j, A_i}$) und dem Zeitfaktor $\frac{t_r}{d_r}$. Dieser Zeitfaktor berechnet sich aus der Division von t_r , der Dauer einer Rotation/eines Einsatzes (z. B. eine Schicht von 8 h), und d_r , der Zeit seit Beginn des letzten Einsatzes an diesem Arbeitsplatz. Bei einer täglichen Rotation wäre d_r z. B. ein Vielfaches von 24 h. Der Exponent $(u+1)$ berücksichtigt die Anzahl der Zuweisungen eines Mitarbeitenden zu einem bestimmten Arbeitsplatz innerhalb der letzten n_r Rotationsschritte. Je höher diese Anzahl der Zuweisungen zu einem bestimmten Arbeitsplatz im Verhältnis zu allen anderen Arbeitsplätzen ist, desto stärker wirkt sich dies auf die Berechnung aus. Dazu werden die Zuweisungsmatrizen $x_{M_j, A_i, r}$ der vergangenen n_r Rotationsschritte mit der Zuweisungsmatrix des geplanten Rotationsschritts x_{M_j, A_i} addiert. Durch die Matrix xnR_{M_j, A_i} wird somit ermittelt, wie oft Mitarbeitende M_j an einem Arbeitsplatz A_i waren, siehe Formel 5-3. Der Exponent u berechnet sich aus dem Verhältnis von xnR_{M_j, A_i} und der Anzahl der betrachteten vergangenen Rotationsschritte $n_r + 1$, siehe Formel 5-4. Somit bewirkt der Exponent $(u+1)$ einen ausgewogenen Arbeitsplatzwechsel. Die Formel zur Berechnung physischer Beanspruchung unter Berücksichtigung einer

Person sowie der vergangenen Rotationen und der Integration eines ausgewogenen AP-Wechsels ist in Abbildung E-23 in Anhang E zu finden.

$$(xnR_{M_j, A_i}) = \sum_{r=1}^{n_R} (x_{M_j, A_i, r}) + (x_{M_j, A_i}) \quad (5-3)$$

$$u = \frac{xnR_{A_j, Z_i}}{n_R + 1} \quad (5-4)$$

Schritt 2: Berechnung der physischen/psychischen Gruppenbeanspruchung

Die jeweilige physische und psychische Gruppenbeanspruchung ($B_{phy, Gruppe}$, $B_{psy, Gruppe}$) ergibt sich aus der Summe der Einzelbeanspruchungen der Mitarbeitenden, die im Rahmen einer möglichen Einsatzplanung bestimmten Arbeitsplätzen zugeordnet sind, siehe Formel 5-5. Die Auflistung der physischen und psychischen Gruppenbeanspruchung zeigt bei der späteren Auswahl einer geeigneten Einsatzplanung die Auswertung pro Beanspruchungskategorie und verhindert somit eine reine Gesamtbetrachtung, bei der Maximalwerte unentdeckt bleiben könnten.

$$B_{psy, Gruppe} = \sum_{j=1}^{n_M} B_{psy}(j) \quad (5-5)$$

Schritt 3: Berechnung der Gesamtbeanspruchung pro Einsatzplan

Die Gesamtbeanspruchung eines Einsatzplans ($B_{Einsatzplan}$) berechnet sich aus der Summe der physischen und psychischen Beanspruchung der Arbeitsgruppe, die jeweils mit einem Gewichtungsfaktor (g_{phy} , g_{psy}) versehen sind, siehe Formel 5-6. Dieser Gewichtungsfaktor ermöglicht es Unternehmen, physische und psychische Beanspruchung mit unterschiedlicher Stärke und Bedeutung in die Einsatzplanung einfließen zu lassen. Dadurch kann gegebenenfalls eine Beanspruchungsart ausgeschlossen werden. Dies ist nicht zu empfehlen, erweitert aber die Nutzbarkeit für Unternehmen, bei denen beispielsweise aus Datenschutzgründen die psychische Beanspruchung nicht erhoben oder prädiiziert werden darf.

$$B_{Einsatzplan} = g_{psy} * B_{psy} + g_{phy} * B_{phy} \quad (5-6)$$

Nach der Beschreibung des Algorithmus zur Berechnung der Gesamtbeanspruchung aller möglicher Einsatzpläne erfolgt nun die Erläuterung der Zielfunktion zur Auswahl der am besten geeigneten Einsatzpläne. Damit können die erstellten Einsatzpläne hinsichtlich optimaler Beanspruchungswerte beurteilt werden. Dafür wird analog zu HOCHDÖRFFER ET AL. (2018, S. 107) ein Minimierungsansatz mit Restriktionen gewählt. Dieser sorgt dafür,

dass stets die drei Ansätze mit der minimalen Gesamtbeanspruchung der Arbeitsgruppe als priorisierte Einsatzpläne vorgeschlagen werden. Damit bei der Betrachtung der Gesamtbeanspruchung der Gruppe personenindividuelle physische oder psychische Überbeanspruchungen einzelner Mitarbeitenden nicht unberücksichtigt bleiben, werden Grenzwerte als Restriktionen festgelegt. Da die Beanspruchungen B_{psy}/B_{phy} Kompetenzaspekte beinhalten, wird zur Festlegung der Grenzwerte auf die prädierten Werte pro Arbeitsplatz zurückgegriffen. Hierbei darf keine Einzelbeanspruchung den NASA-RTLX-Wert von 49 (Obergrenze für mittlere psychische Beanspruchung) (PRABASWARI ET AL. 2019, S. 2, HART & STAVELAND 1988) und den Borg-Wert von 14 (Obergrenze für mittlere physische Beanspruchung) (BORG 1970, S. 93) überschreiten. Den Planenden werden die drei Einsatzpläne mit der niedrigsten Gesamtbeanspruchung angegeben, welche die genannten Restriktionen berücksichtigen.

Die Ergebnisse dieses Abschnitts bestehen aus dem Algorithmus zur Erstellung der Einsatzpläne und der Zielfunktion zu deren Priorisierung. Dabei erstellt der Algorithmus auf Basis der AP- und MA-Profile kompetenzorientierte Einsatzpläne und berechnet anschließend deren Beanspruchung. Damit nur Mitarbeitende mit ausreichenden Kompetenzen zu einem Arbeitsplatz zugeteilt werden, erfolgt ein Kompetenzvergleich. Zudem werden durch eine Doppelbesetzung eines Arbeitsplatzes Kompetenzentwicklungsmaßnahmen angestoßen. Bei der Berechnung der physischen und psychischen Beanspruchung werden zudem die Beanspruchung der vergangenen Rotationen sowie ein ausgewogener Arbeitsplatzwechsel berücksichtigt. Darauf aufbauend vergleicht die Zielfunktion die Einsatzpläne beanspruchungsorientiert. Dabei erfolgt die Anzeige der drei Personaleinsatzpläne mit der geringsten Gesamtbeanspruchung der Arbeitsgruppe unter Berücksichtigung von Grenzwerten der individuellen Über- und Unterbeanspruchung, siehe Abbildung 5-37. Welcher der drei priorisierten Einsatzpläne final ausgewählt wird, liegt bei den Planenden oder Teamleitenden. Der vorgestellte Algorithmus und die Zielfunktion wurden im Rahmen eines Anwendungs-Tools prototypisch umgesetzt und werden in Abschnitt 6.2.2 vorgestellt.

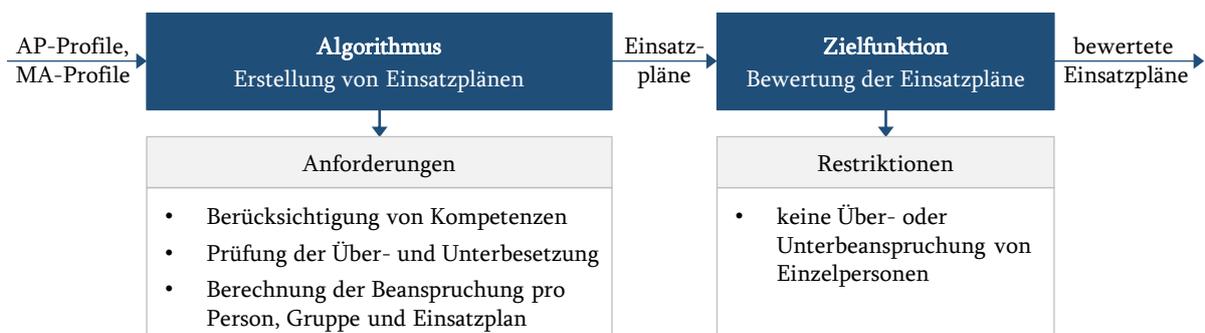


Abbildung 5-37: Übersicht der Erstellung und Bewertung von Einsatzplänen

5.3.2 Interaktionsschnittstellen zur Kommunikation der Personaleinsatzpläne

Für die Anwendung der Rotationslogik in der Praxis wurden zwei Interaktionsschnittstellen konzipiert. Die erste dient den Personalplanenden zur Erstellung von Einsatzplänen und der finalen Auswahl eines priorisierten Einsatzplans (Umsetzung der Ergebnisse aus Abschnitt 5.3.1). Die zweite Schnittstelle interagiert mit den Mitarbeitenden am Montageband sowohl zur Anzeige der Einsatzplanung als auch zur Rückmeldung realer Beanspruchungszustände. Die Interaktion eines Menschen mit einem technischen System erfolgt mittels eines User Interfaces (deutsch: Benutzungsschnittstelle) (HEIMGÄRTNER 2017, S. 84). Nach DIN EN ISO 9241-110 (2020, S. 10) stellt die Benutzungsschnittstelle Informationen und Steuerelemente zur Verfügung, die für die Nutzenden zur Erledigung einer bestimmten Aufgabe mit dem interaktiven System notwendig sind. Bei der Konzeptionierung der beiden benötigten Interaktionsschnittstellen lag der Fokus auf der Gestaltung der Nutzendenschnittstellen und erfolgte parallel zur Entwicklung der Personaleinsatzplanung, um eine enge Verknüpfung der Mensch-Technik-Schnittstelle zu gewährleisten (RICHTER 2018, S. 80ff.). Die Gestaltung erfolgte nach dem User-Centered-Design-Prozess (UCD-Prozess), bei dem eine menschenorientierte Gestaltung der Interaktionsschnittstelle im Mittelpunkt steht (DIN EN ISO 9241-210 2020, S. 19). Nachfolgend werden die vier Schritte des UCD-Prozesses beschrieben, bevor anschließend auf die Entwicklung der beiden Interaktionsschnittstellen eingegangen wird.

User-Centered-Design-Prozess

Der User-Centered-Design-Prozess zur Erstellung einer Interaktionsschnittstelle erfolgt in vier Schritten, die iterativ und unter Einbeziehung der Nutzenden durchgeführt werden, siehe Abbildung 5-38 (DIN EN ISO 9241-210 2020, 19ff.):

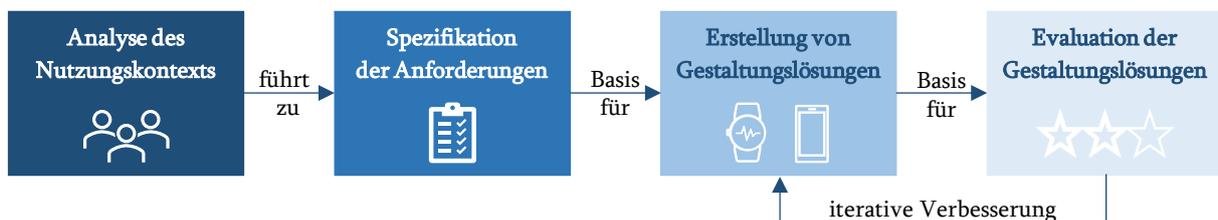


Abbildung 5-38: Vier Schritte des User-Centered-Design-Prozesses (in Anlehnung an DIN EN ISO 9241-210 2020, S. 19)

1. Analyse des Nutzungskontexts

In diesem Schritt wird der Nutzungskontext in Bezug auf die Nutzendengruppe und deren Merkmale, das Ziel der Nutzung und die Nutzungsumgebung inklusive geeigneter Devices, wie beispielsweise Tablet, Smartphone oder Computer, untersucht.

2. Spezifikation der Anforderungen

Im zweiten Schritt werden aufbauend auf der Analyse des Anwendungsbereichs die Anforderungen hinsichtlich der benötigten Funktionen, der Interaktionsgestaltung und der ergonomischen Aspekte festgelegt. In Bezug auf die Interaktionsgestaltung gibt es zahlreiche Standards, Heuristiken und Guidelines. Die am häufigsten zitierten sind die Interaktionsprinzipien der DIN EN ISO 9241-110 (2020, S. 11), die sogenannten acht goldenen Regeln nach SHNEIDERMAN (1998, 95f.) und die Heuristiken nach MOLICH & NIELSEN (1990, S. 339). Diese drei grundlegenden Werke werden in Abbildung 5-39 vergleichend dargestellt.

| Standards der DIN EN ISO 9241-110 | goldenen Regeln nach Shneidermann (1998) | Heuristiken nach Molich & Nielsen (1990) |
|-----------------------------------|--|---|
| Aufgabenangemessenheit | Verringere die Belastung des Kurzzeitgedächtnisses | Minimiere die Belastung des Kurzzeitgedächtnisses |
| Selbstbeschreibungsfähigkeit | Biete informative Rückmeldung | Gebe Rückmeldung |
| Erwartungskonformität | Strebe nach Konsistenz | Sei konsistent |
| Erlernbarkeit | Entwerfe abgeschlossene Dialoge | Spreche die Sprache der Nutzenden |
| Steuerbarkeit | Erlaube eine einfache Umkehr von Aktionen | Biete eindeutig markierte Ausgänge, Rückwege |
| | Unterstütze den internen Steuerungsmechanismus | Erstelle einfache und natürliche Dialoge |
| Robustheit gegen Benutzungsfehler | Biete eine einfache Fehlerbehandlung | Unterstütze beim Erkennen, Verstehen und Bearbeiten von Fehlern |
| | | Vermeide Fehler |
| Benutzendenbindung | Ermögliche häufigen Nutzenden die Verwendung von Shortcuts | Stelle Shortcuts bereit |

Abbildung 5-39: Richtlinien zur Gestaltung Benutzungsschnittstellen nach DIN EN ISO 9241-110 (2020, S. 11), SHNEIDERMAN (1998, 95f.) und MOLICH & NIELSEN (1990, S. 339)

3. Erstellung von Gestaltungslösungen

Im dritten Schritt werden Gestaltungslösungen entwickelt, welche die Anforderungen aus Schritt zwei bestmöglich erfüllen sollen. Die Aufgabe des Gestaltungsprozesses ist es, die Ästhetik und Funktionalität harmonisch zu vereinen und nutzendengerecht darzustellen. Dabei ist ein gemeinsames Verständnis für die Bedeutung genutzter Zeichen oder bildlicher Icons entscheidend. Es ist zu berücksichtigen, dass sich dieses Verständnis durch soziale oder kulturelle Gegebenheiten unterscheiden kann (DAHME 2006, S. 118). Darauf aufbauend werden Prototypen entwickelt, welche im vierten Schritt durch Nutzende evaluiert werden.

4. Evaluation der Gestaltungslösungen

Bei der Evaluierung der Gestaltungslösungen bewerten Nutzende die entwickelten Gestaltungslösungen und Prototypen hinsichtlich der Usability (deutsch:

Gebrauchstauglichkeit). Dies ist das Maß, in dem Nutzende mit einem System in einem bestimmten Nutzungskontext die vorgegebenen Ziele erfüllen können (DIN EN ISO 9241-11 2018, S. 9, SCHWEIBENZ & THISSEN 2003, 39f.) Die rückgemeldeten Verbesserungspotenziale werden im Rahmen der iterativen Prototypenentwicklung berücksichtigt. Auf die Erstellung und Evaluierung der erstellten Prototypen wird in Abschnitt 6.12 eingegangen.

Auf Basis der ersten drei Prozessschritte ist es möglich, eine Anforderungsliste mit Lösungsoptionen für die beiden Interaktionsschnittstellen mit den Planenden und Werkenden zu erstellen. Dabei werden einerseits die Anforderungen an die Schnittstellen in Bezug auf einen konkreten Nutzungskontext beschrieben (Schritt 1 und 2 des UCD-Prozesses) und zusätzlich Gestaltungslösungen notiert (Schritt 3). Nachfolgend wird zunächst die Entwicklung der Interaktionsschnittstelle zu den Planenden, das Planungs-Tool und anschließend die Entwicklung der Interaktionsschnittstelle zu den Werkenden, die Werkenden-Applikation, erläutert. Die Vorstellung und erste Evaluierung der entwickelten Prototypen erfolgt in Abschnitt 6.2.

Entwicklung des Planungs-Tools

In *Schritt 1* des UCD-Prozesses wurden die Planenden in der Produktion als Nutzendengruppe identifiziert, welche die Werkenden im Rahmen von Einsatzplänen zu passenden Arbeitsplätzen zuteilen. Da die Personalplanenden meist computergestützt in montagenahen Büros arbeiten, bietet sich eine Computer-Applikation zur Unterstützung bei der Personaleinsatzplanung an. Hinsichtlich der Interaktionsziele zwischen dem Tool und den Planenden wurden drei Ziele formuliert: (1) Auswahl verfügbarer Mitarbeitenden für einen Montagebereich und Start der Einsatzplanerstellung, (2) Anzeige von drei priorisierten Einsatzplänen inklusive physischer und psychischer Beanspruchung, (3) Auswahl einer Einsatzplanung durch die Planenden. Die finale Auswahl durch die Personalplanenden ist besonders hervorzuheben, da letztlich nicht das System, sondern weiterhin die Planenden über die Zuteilung von Mitarbeitenden zu Arbeitsplätzen entscheiden. Das Planungs-Tool soll durch die Anzeige der besten beanspruchungs- und kompetenzorientierten Einsatzpläne lediglich unterstützen. In *Schritt 2* des UCD-Prozesses wurden Anforderungen an das Planungs-Tool definiert. Diese können in funktionale, interaktionsbezogene und ergonomische Anforderungen unterschieden werden, siehe Abbildung 5-40. Die Anforderungen ergaben sich aus der Zielsetzung, dem Nutzungskontext und der Wahl des Endgeräts. Im Hinblick auf den *dritten Schritt* des UCD-Prozesses wurden Gestaltungsmöglichkeiten zu den einzelnen Anforderungen entwickelt. Ein Beispiel hierfür ist die Gestaltungslösung für die funktionale Anforderung ‚Auswahl einer Einsatzplanung‘, welche ein Bedienfeld (einen Button) zur Auswahl und

Speicherung des ausgewählten Einsatzplans vorsieht. Darüber hinaus *wurde* in Bezug auf die Anforderung ‚Hinzufügen/Entfernen von Mitarbeitenden oder Arbeitsplätzen‘ beispielsweise ein separater Admin-Account mit Zugriff auf MA- und AP-Daten empfohlen. Die Zusammenfassung des Nutzungskontexts, der Anforderungen und erster Gestaltungsvorschläge ist in Abbildung 5-40 zu sehen. Die programmiertechnische prototypische Umsetzung des Planungs-Tools zur Erstellung beanspruchungs- und kompetenzorientierter Einsatzpläne (*Schritt 4*) erfolgte in Visual Studio und wird in Abschnitt 6.2.2 genauer erläutert.

Entwicklung der Werkenden-Applikation

Die Werkenden-Applikation wurde analog zum Planungs-Tool nach dem UCD-Prozess erstellt. In *Schritt 1* bei der Analyse des Nutzungskontexts wurden die Mitarbeitenden einer taktgebundenen, manuellen Montage als Nutzendengruppe festgelegt, siehe Abbildung 5-41. Die Eigenschaften der Nutzendengruppe sind jedoch sehr divers, zum Beispiel hinsichtlich Alter, Sehfähigkeit oder technischer Vorerfahrung mit Applikationen. Bei der Auswahl des Endgeräts konnten die Mitarbeitenden entweder die Applikation am Arbeitscomputer nutzen, eine Rückmeldung aller Mitarbeitenden der Arbeitsgruppe nach der Rotation am Arbeitscomputer ist jedoch nicht besonders praktikabel. Daher bietet sich das persönliche Smartphone an, da die Mitarbeitenden dieses meist bei sich tragen, kurzfristige Absprachen im Team bereits über das private Smartphone abgewickelt werden und somit eine diskrete, private Rückmeldung der individuellen Beanspruchung sichergestellt wird. Es wurden drei Ziele der Werkenden-Applikation definiert: (1) die Anzeige der Einsatzplanung, (2) die Eingabe/Rückmeldung realer Beanspruchungsdaten durch die Mitarbeitenden und (3) die Möglichkeit, Unterstützung anzufordern. In *Schritt 2* wurden anschließend die funktionalen, interaktionsspezifischen und ergonomischen Anforderungen definiert. Anforderung eins ist beispielsweise das ‚Ein- und Ausloggen mit MA-Nummer und Passwort‘, siehe Abbildung 5-41. Für die aufgestellten Anforderungen wurden im *dritten Schritt* des UCD-Prozesses Design-Vorschläge zur Umsetzung des Interfaces erarbeitet und im *vierten Schritt* iterativ verbessert. Die entwickelten Prototypen und die Optimierungsstufen werden in Abschnitt 6.2.3 vorgestellt.

Die Ergebnisse dieses Abschnitts stellen die beiden konzipierten Interaktionsschnittstellen dar, welche nach dem User-Centered-Design-Prozess entwickelt wurden. Für das Planungs-Tool und die Werkenden-Applikation wurden jeweils der Nutzendenkontext definiert, spezifische Anforderungen identifiziert und grafische Gestaltungsmöglichkeiten eruiert.

| Schritt 1 - Analyse des Nutzungskontexts | | |
|---|--|---|
| Zielgruppe | Planende in der Produktion/manuellen Montage | |
| Ziel der Interaktions-schnittstelle | 1. Auswahl verfügbarer Mitarbeitenden für einen Montagebereich | |
| | 2. Anzeige von drei priorisierten Einsatzplänen inklusive physischer und psychischer Beanspruchung | |
| | 3. Auswahl einer Einsatzplanung durch die Planenden | |
| Art des Endgeräts | z. B. Computer | |
| Nutzungsumfeld | z. B. Büro an der Montagelinie | keine Einschränkungen |
| Schritt 2 - Spezifikation der Anforderungen | | Schritt 3 - Erstellung von Gestaltungslösungen |
| funktionale Anforderungen | 1. Auswahl der verfügbaren Mitarbeitenden einer bestimmten Arbeitsgruppe für einen bestimmten Tag | - Auswahl der Abteilung/Arbeitsgruppe mittels Drop-Down Menü - Auswahl des Datums mittels Drop-Down Menü in Kalender-Format - Anzeige der Mitarbeitenden der ausgewählten Abteilung/Arbeitsgruppe --> Boxen zum Anklicken --> Anzeigen, wie viele Personen ausgewählt werden müssen |
| | 2. Erstellung der Einsatzpläne | - Button "Einsatzplan erstellen" --> Anzeigefeld mit Einsatzplänen |
| | 3. Anzeige dreier priorisierter Einsatzpläne mit Angabe physischer und psychischer Beanspruchungen | Anzeigefeld mit 3 Reitern (pro Einsatzplanung ein Reiter) - pro Reiter 3 weitere Kategorien --> Gesamtbeanspruchung --> physische Beanspruchung --> psychische Beanspruchung |
| | 4. Auswahl einer Einsatzplanung | - Button für "Einsatzplanung übernehmen" --> Speicherung der Einsatzplanung |
| | 5. Hinzufügen/Entfernen von Mitarbeitenden und Arbeitsplätzen von berechtigten Personen | - Extra Admin-Account, der auf die MA- und AP-Daten zugreifen kann --> Buttons zum Hinzufügen, Entfernen und Bearbeiten von MA-, AP-Listen und Bereichen |
| interaktions-bezogene Anforderungen | 6. Rückmeldung an die Nutzenden | Pop-Up-Nachrichten nach erfolgreichem Auswählen der Einsatzplanung oder Fehlermeldung, wenn nicht genügend Personen zur Erstellung des Einsatzplans ausgewählt wurden |
| ergonomische Anforderungen | 7. Schriftgröße | Empfehlung nach DIN-EN ISO 9241 für Computer |
| | 8. Farbgestaltung | - Kontraste berücksichtigen (z.B. schwarze Schrift auf weißem Hintergrund) - Farbgebung hinsichtlich Wahrnehmung berücksichtigen (z.B. rot = Signal, wichtig) |

Abbildung 5-40: Zusammenfassung des UCD-Prozesses des Planungs-Tools

| Schritt 1 - Analyse des Nutzungskontexts | | |
|---|---|---|
| Zielgruppe | Mitarbeitende in der taktgebundenen manuellen Montage | |
| Ziel der Interaktions-schnittstelle | 1. Anzeige von Einsatzplänen 2. Eingabe von realen Beanspruchungsdaten 3. Unterstützung anfordern | |
| Art des Endgeräts | Smartphone, am Körper getragen | |
| Nutzungsumfeld | evtl. lautes Umfeld | Bevorzugung von Vibration statt Tönen als Hinweisfunktion |
| Schritt 2 - Spezifikation der Anforderungen | | Schritt 3 - Erstellung von Gestaltungslösungen |
| funktionale Anforderungen | 1. Ein- und Ausloggen mit MA-Nummer und Passwort | Log-In-Seite mit: - Eingabeflächen für MA-Nummer und Passwort - Button für "Anmelden" - Buttons für "neue Person hinzufügen" und "Passwort vergessen", Log-Out-Seite mit Button für "Abmelden" |
| | 2. Anzeige der aktuellen und der nächsten Einsatzplanung | Home-Seite mit Button zur Anzeige der Einsatzplanungs-Seite --> Anzeige der aktuellen und nächsten Planung + klare Markierung |
| | 3. Rückmeldung der realen Beanspruchungsdaten durch die Fragebögen Bor-Skala (physisch) und NASA-RTLX (psychisch) | Home-Seite mit Button zur Anzeige der Beanspruchungsseite Beanspruchungs-Seite mit - Abfrage der Borg-Skala (1 Frage mit einer Skala von 6-20) - Abfrage des NASA-TLX (6 Fragen mit einer Skala von 0-100) --> klare Unterscheidung zwischen physisch und psychisch --> Nutzung von Schieberegler von "sehr gering" bis "sehr hoch" --> Farbcodierung des Schiebereglers (rot - orange - grün) - Button zum Absenden der Daten --> Rückmeldung an Nutzende |
| | 4. Unterstützung anfordern | Home-Seite mit Button mit "Unterstützung anfordern", welche die Unterstützungs-Seite aufruft Unterstützungs-Seite mit - Button „Arbeitsplatzwechsel anfordern“ --> führt zur nächsten Seite, wo Gründe für den geforderten Wechsel angegeben werden müssen (entweder Freitext oder standardisierte Textbausteine) - Button „Springer anfordern“ --> führt zur nächsten Seite, wo zwischen Verteilzeit oder fachlicher Unterstützung gewählt wird --> es soll bei allen Optionen am Ende eine Rückmeldung über das erfolgreiche Absenden der Anfrage an die Nutzenden erfolgen |
| | 5. individuelle Anpassungen bei der App ermöglichen | - Home-Seite mit Button für Einstellungen - Einstellungs-Seite mit veränderbaren Schriftgrößen (--> Schieberegler mit Icons) und aktivierbarer Vibration, Tönen |
| interaktions-spezifischen Anforderungen | 6. Rückmeldung an die Nutzenden | Pop-Up-Nachrichten nach erfolgreichem Absenden/Eingeben: „Die Eingabe war erfolgreich.“ / „Ihr Wunsch auf Arbeitsplatzwechsel wurde versandt.“ |
| | 7. Posteingang zur Kommunikation | - Home-Seite mit Button zu Posteingang - Posteingangs-Seite mit Übersicht über gesendete Anfragen (z.B. Wechselwunsch) und erhaltene Rückmeldungen |
| ergonomische Anforderungen | 8. Schriftgröße | Empfehlung nach DIN-EN ISO 9241 für Smartphone: 13pt, 40cm Abstand |
| | 9. Farbgestaltung | - Kontraste berücksichtigen - Farbgebung hinsichtlich Wahrnehmung berücksichtigen |
| | 10. Symbole/Icons | - Empfehlung für Zeichenhöhe nach DIN-EN ISO 9241 - Bekannte, etablierte Symbole nutzen, z.B. Haus -> Home-Seite |

Abbildung 5-41: Zusammenfassung des UCD-Prozesses der Werkenden-Applikation

5.3.3 Zusammenfassung Baustein 3

In Baustein 3 lag der Fokus einerseits auf der Generierung von Personaleinsatzplänen und andererseits auf der Entwicklung zweier Interaktionsschnittstellen. Die Rotationslogik besteht aus einem Algorithmus und einer Zielfunktion. Der Algorithmus erstellt die möglichen Einsatzpläne mit Hilfe des Profilvergleichs, wobei mögliche Einsatzpläne ausschließlich AP-MA-Zuordnungen enthalten, bei denen die Kompetenzanforderungen der Arbeitsplätze den Kompetenzen der Mitarbeitenden entsprechen. Anschließend werden für die möglichen Einsatzpläne die physische und psychische Beanspruchung berechnet. Daraufhin werden nur Einsatzpläne akzeptiert, bei denen die individuelle physische und psychische Beanspruchung aller Mitarbeitenden die Grenzwerte für Über- und Unterbeanspruchung einhält. Die darauffolgende Zielfunktion bewertet die Einsatzpläne hinsichtlich der berechneten Beanspruchung und priorisiert drei Einsatzpläne mit minimaler Beanspruchung für die Mitarbeitenden. Dabei treffen die Planenden die finale Entscheidung, welche Einsatzplanung Anwendung findet. Die Nutzendenschnittstellen, das Planungs-Tool und die Werkenden-Applikation wurden mit Hilfe des User-Centered-Design-Prozesses entwickelt. Basierend auf der Nutzendengruppe, den Zielen der Interaktion und des gewählten Endgeräts werden funktionale, interaktionsspezifische und ergonomische Anforderungen für die Interaktionsschnittstelle definiert. Daraufhin wurden erste Gestaltungslösungen entwickelt, welche im nachfolgenden Abschnitt 6.2 prototypisch umgesetzt und iterativ verbessert werden.

5.4 Zusammenfassung der Methodenentwicklung

Zur Entwicklung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage wurde eine Methode mit drei Bausteinen entwickelt. Zunächst wurde in **Baustein 1** ein gemeinsames Verständnis des menschenorientierten Arbeitssystems mit Hilfe eines detaillierten Systemmodells geschaffen. Aus der Beschreibung der Systemelemente konnten Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Profile abgeleitet werden. Die darin enthaltenen charakterisierenden Kriterien sind analog aufgebaut und umfassen sowohl Kompetenzanforderungen/Kompetenzen als auch physische und psychische Anforderungen bzw. Leistungsvoraussetzungen. Der analoge Aufbau der Profile ermöglicht eine gute Vergleichbarkeit im Rahmen der erstellten Bewertungslogik. Baustein 1 gibt Nutzenden somit AP- und MA-Profile sowie eine Bewertungslogik für einen AP-MA-Vergleich an die Hand. In **Baustein 2** wurde zunächst eine Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter Methoden zur Messung physischer und psychischer Beanspruchung im Rahmen eines Methodenbaukastens entwickelt, welche anschließend in der taktgebundenen manuellen

Montage angewendet wurde. Darauf aufbauend wurden im Rahmen einer umfassenden Probandenstudie datenbasiert geeignete Prädiktoren (EAWS, KPB, SSCS, WAI, Handkraft, Montagekompetenz) physischer und psychischer Beanspruchung (Borg, NASA-RTLX) ermittelt und ein hierarchisches Modell zur Prognose der Beanspruchung erstellt. Mit Hilfe von Baustein 2 kann somit die physische und psychische Beanspruchung in der manuellen Montage prädiziert werden. Aufbauend auf Baustein 1 und 2 wurde in **Baustein 3** eine beanspruchungs- und kompetenzorientierte Rotationslogik zur Generierung von Einsatzplänen entwickelt und Interaktionsschnittstellen zu den Planenden und den Werkenden gestaltet. Die algorithmen-basierte Rotationslogik zeigt im Planungs-Tool drei präferierte Einsatzpläne mit minimaler Beanspruchung an. Die Planenden wählen daraus eine Einsatzplanung aus, welche den Mitarbeitenden über die Werkenden-Applikation angezeigt wird. Nach jeder Rotation können die Mitarbeitenden Rückmeldung zur Beanspruchung in der Applikation geben, wodurch sich die Beanspruchungsprädiktion aufgrund der wachsenden Datengrundlage stetig verbessert. Mit Hilfe der Rotationslogik und der Interaktionsschnittstellen kann eine beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzplanung in der manuellen Montage realisiert werden.

6 Umsetzung der Methode

In diesem Kapitel wird zunächst auf die **industrienahe Anwendung** der in Kapitel 5 beschriebenen Werkzeuge eingegangen (Abschnitt 6.1), bevor anschließend die Erläuterung der **prototypischen Implementierung** folgt (Abschnitt 6.2). Die Umsetzung der wissenschaftlichen Forschungsinhalte zur Nutzung in der industriellen Praxis steht im Rahmen dieses Kapitels im Vordergrund. In Bezug auf die Forschungsmethodik der DRM ist die Implementierung und praktische Anwendung Teil der deskriptiven Studie II, welche einen empirisch-induktiven Forschungsansatz aufweist.

6.1 Industrienahe Anwendung

Hierfür wird ein **Überblick über die dreistufige Anwendungsmethode** für die Industrie beschrieben (Abschnitt 6.1.1) und die Methode an einem konkreten taktgebundenen Montagebereich **beispielhaft angewendet** (Abschnitt 6.1.2). In die Erarbeitung dieses Abschnitts fließen folgende von der Autorin betreute wissenschaftliche Studienarbeiten ein: BOTZ (2022) und STELZER (2022).

6.1.1 Überblick über die Anwendungsmethode

Die Nutzung der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung in der Industrie erfolgt in drei Schritten, welche nachfolgend erläutert werden, siehe Abbildung 6-1.

Schritt 1: Zur Einführung der Personaleinsatzplanung werden zuerst die Mitarbeitenden und Arbeitsplätze eines Montagebereichs mit Hilfe der AP- und MP-Profile aus Abschnitt 5.1.2 charakterisiert und durch das Profilvergleichsverfahren miteinander verglichen. Dafür müssen initial die Kompetenzen sowie die physischen und psychischen Leistungsvoraussetzungen aller einzuplanenden Mitarbeitenden aufgenommen werden. Die Leistungsvoraussetzungen werden durch die Fragebögen SSCS und WAI sowie durch die Handkraftmessung erfasst, welche im Rahmen des Methodenbaukastens aus Abschnitt 5.2.1 ausgewählt wurden. Die MA-Profile sollten bestmöglich gemeinsam von der betroffenen Person, dem Vorgesetzten und einem Betriebsarzt ausgefüllt werden. Auf Seiten der Arbeitsplätze werden ebenfalls die Kompetenz- und Leistungsanforderungen in AP-Profilen festgehalten. Die Bewertung der Arbeitsplätze wird mit Hilfe der Methoden

EAWS und KPB vorgenommen. Dabei und beim Ausfüllen der AP-Profile ist die Unterstützung der Bereichsverantwortlichen durch Betriebsärzte und -ärztinnen oder Ergonomieexperten und -expertinnen empfohlen.

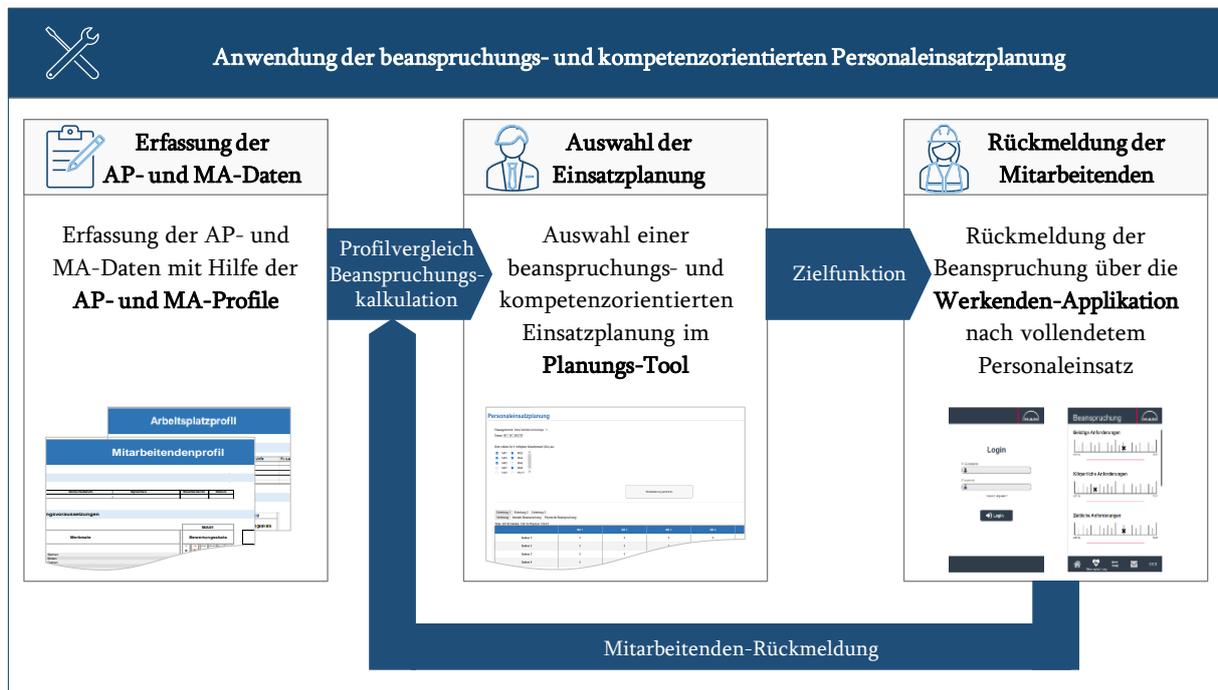


Abbildung 6-1: Einführung der Einsatzplanung in drei Schritten

Schritt 2: In Schritt zwei erfolgt die Erstellung von Einsatzplänen auf Basis der in Schritt eins erhobenen Daten. Das entwickelte Planungs-Tool führt einerseits einen Profilvergleich zwischen den Mitarbeitenden und den Arbeitsplätzen durch und prädiziert andererseits die individuelle Beanspruchung pro Person und Arbeitsplatz. Hierbei wird das Prädiktionsmodell aus Abschnitt 5.2.2 sowie die Rotationslogik aus Abschnitt 5.3.1 genutzt. Darauf aufbauend werden Einsatzpläne generiert, wobei die drei beanspruchungsoptimierten Optionen den Personalplanenden im Planungs-Tool vorgeschlagen werden. Diese treffen anschließend die finale Entscheidung zur Auswahl einer Einsatzplanung und können neben den Beanspruchungs-Aspekten auch soziale Faktoren mitberücksichtigen. Die ausgewählte Einsatzplanung wird den Mitarbeitenden am Montageband in der Werkenden-Applikation angezeigt.

Schritt 3: Der dritte Schritt fokussiert sich auf die Rückmeldung der realen Beanspruchung durch die Werkenden nach einer abgeschlossenen Rotation. Dadurch lernt das Planungs-Tool, wie gut die prädizierte Beanspruchung im Vergleich zur realen Beanspruchung war. Basierend auf der wachsenden Datenbasis in der industriellen Anwendung können einerseits Anpassungen in der Rotationslogik vorgenommen werden und andererseits lernt das Prädiktionsmodell mit der Zeit dazu. Zudem können Entwicklungstendenzen bei

Mitarbeitenden, zum Beispiel altersbedingte physische Veränderungen, erkannt und daraufhin das individuelle Mitarbeitenden-Profil angepasst werden.

Wichtig zu betonen ist, dass die Datenerhebung im ersten Schritt einmal initial durchgeführt wird, wobei die MA-Profile bei Kompetenzentwicklungen oder Leistungsveränderungen ggf. im Rahmen von Mitarbeitendengesprächen angepasst werden können. Die Schritte zwei und drei werden bei der Nutzung der Einsatzplanung wiederholt durchlaufen. Dabei wählen die Planenden lediglich die verfügbaren Mitarbeitenden sowie anschließend eine geeignete Einsatzplanung aus und die Werkenden geben Rückmeldung nach der abgeschlossenen Rotation. Die Anwendungsmethode ist dadurch sehr einfach einzusetzen und erfordert nicht nur einen geringen initialen, sondern auch einen niedrigen wiederkehrenden Aufwand.

6.1.2 Anwendung der Methode in der manuellen taktgebundenen Montage

Die entwickelte Anwendungsmethode wurde für einen konkreten Anwendungsbereich in der taktgebundenen manuellen Montage der MAN Truck & Bus SE im Werk München theoretisch geplant und mit Experten und Expertinnen besprochen. Die MAN Truck & Bus SE, im Folgenden MAN genannt, ist als Teil der VW-Tochtergesellschaft TRATON GROUP einer der führenden Nutzfahrzeughersteller in Europa. Das MAN-Werk in München fertigt Lkw der Baureihen von 18 bis 41 Tonnen zulässigem Gesamtgewicht sowie Fahrerhäuser, angetriebene Achsen und Verteilergetriebe für den gesamten Werksverbund. Nachfolgend wird zunächst der Anwendungsbereich in der manuellen Montage charakterisiert, bevor die theoretische Durchführung der Methode beschrieben wird.

Charakterisierung des Anwendungsbereichs

Der Betrachtungsbereich ist die Motor-Getriebe-Vormontage, welcher fünf Arbeitsstationen und insgesamt sieben Arbeitsplätze beinhaltet, siehe Abbildung 6-2. An jedem Arbeitsplatz arbeitet eine Person. Die Werkstücke werden abhängig von der Taktzeit mit einem fahrerlosen Transportsystem (FTS) zur nächsten Arbeitsstation gebracht. Die Stationen sind synchron miteinander verkettet und bilden einen sequenziellen Ablauf. Die montierten Werkstücke werden am Ende der betrachteten Motor-Getriebe-Vormontage mit dem fahrerlosen Transportsystem ans Hauptmontageband geliefert. Es ist anzumerken, dass der letzte Arbeitsplatz des Anwendungsbereichs (AP 5) stets von Teamleitenden besetzt ist, da hier eine Endkontrolle durchgeführt wird. Die Montage erfolgt im Zwei-Schicht-Betrieb mit jeweils 8 Stunden pro Schicht.

Der Anwendungsbereich zeichnet sich durch eine große Variantenvielfalt (z. B. durch Schalt-, Automatik-, Hydrodrive-Getriebe) und durch ausschließlich manuelle Tätigkeiten

aus. Die Herausforderungen in diesem Bereich sind neben der hohen Produktvarianz die teils körperlich anstrengenden Tätigkeiten und die mitarbeitendengerechte Einteilung von leistungsgewandelten Mitarbeitenden. Hierunter werden Mitarbeitende mit gewissen körperlichen oder geistigen Einschränkungen verstanden, beispielsweise einer reduzierten Kraftausübung oder körperlichen Flexibilität (HALFAR & MICKEN 2019, S. 383). Diese personenindividuellen Leistungsvoraussetzungen müssen bei der Einsatzplanung berücksichtigt werden.

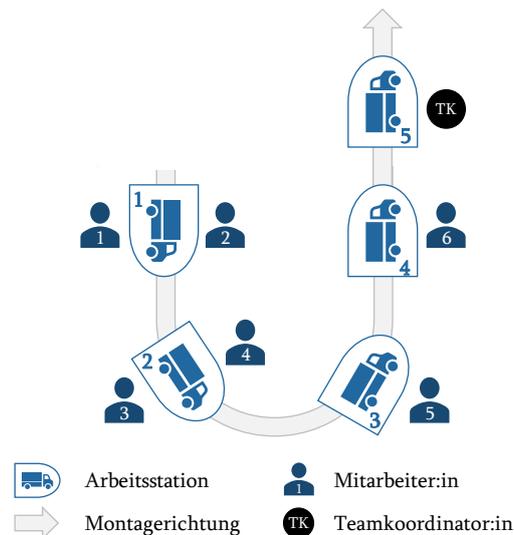


Abbildung 6-2: Übersicht des Anwendungsbereichs in der Motor-Getriebe-Vormontage<

Im Hinblick auf die bisherige Einsatzplanung im Anwendungsbereich gibt es kein einheitliches Vorgehen zur Erstellung von Einsatzplänen, bei denen die Mitarbeitenden regelmäßig zwischen Arbeitsplätzen rotieren. Grundsätzlich entscheiden die Planenden zusammen mit den Teamleitenden über die Personaleinsatzplanung. Diese hängt von den verfügbaren Mitarbeitenden und den vorhandenen Kompetenzen ab. Die Kompetenzmatrix gibt dabei an, welche Person an welchem Arbeitsplatz arbeiten kann. Falls es Arbeitsplätze mit einer sehr begrenzten Anzahl an möglichen zuzuteilenden Arbeitskräften gibt, werden diese zuerst besetzt. Danach werden Mitarbeitende mit geringer Flexibilität eingeteilt, da diese meist nur einen Arbeitsplatz ausführen können oder leistungsgewandelt sind. Die verbliebenen Mitarbeitenden werden anschließend den restlichen Arbeitsplätzen zugeordnet. Da dieser manuelle Einteilungsprozess sehr zeitaufwendig sowie komplex ist und teilweise die Mitarbeitenden bestimmte Arbeitsplätze präferieren, wird die Erstellung eines neuen Einsatzplans meist durch einen Wechselwunsch für einzelne Mitarbeitende geändert. Es ist anzumerken, dass die Teamleitenden die Personalplanung vornehmlich auf Basis von langjährigen Erfahrungswerten durchführen, da sie alle Mitarbeitenden der Arbeitsgruppe, deren Kompetenzen, Leistungsvoraussetzungen und deren Arbeitsplatzpräferenzen kennen.

Durchführung der Anwendungsmethode

Bei der Nutzung der Anwendungsmethode erfolgt im ersten Schritt die Analyse der Arbeitsplätze und Mitarbeitenden anhand der AP- und MA-Profile, von Fragebögen und Arbeitsplatz-Evaluationen. Die physische und psychische Arbeitsplatzbewertung wurde mit Hilfe der Methoden EAWS und KPB durchgeführt. Hinsichtlich der Mitarbeitenden wurden die MA-Profile mit Dummy-Daten analog zu Abbildung 5-13 ausgefüllt. Dummy-Daten sind dabei erfundene Daten, welche als Platzhalter für die realen Werte der praktischen Anwendung dienen. Im zweiten Schritt werden mit Hilfe des Planungs-Tools Einsatzpläne erstellt und ein geeigneter Einsatzplan von den Personalplanenden und/oder Teamleitenden ausgewählt. Dabei werden die Einsatzpläne direkt auf Plausibilität und eine kompetenzorientierte Zuordnung hinsichtlich der Besetzung von AP 5 durch die Teamleitenden geprüft. Im dritten Schritt erfolgt die Rückmeldung der tatsächlichen Beanspruchung der Mitarbeitenden in der Werkenden-Applikation. Die ausgewählte Einsatzplanung konnte aufgrund datenschutzrechtlicher Bedenken des Betriebsrats nicht final im Anwendungsbereich umgesetzt werden. Daher wurde eine separate Validierungsstudie mit 20 Mitarbeitenden von MAN am *iwb* zur Rückmeldung der realen Beanspruchung und zur Überprüfung der Prädiktionsgenauigkeit der Beanspruchung durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studie werden im Rahmen der Validierung in Abschnitt 7.1 erläutert.

6.2 Prototypische Implementierung

Analog zu den Bausteinen der Methode wird nachfolgend auf den prototypisch implementierten Vergleich der Arbeitsplatz und Mitarbeitenden-Profile (Abschnitt 6.2.1), die umgesetzte Rotationslogik in Form des Planungs-Tools (Abschnitt 6.2.2) und die Interaktionsschnittstellen zu den Mitarbeitenden mit der Werkenden-Applikation (Abschnitt 6.2.3) eingegangen. In die Erarbeitung dieses Lösungsbausteins fließen folgende von der Autorin betreute wissenschaftliche Studienarbeiten ein: MÜLLER (2022), TROUDI (2021) und KESKIN (2021).

6.2.1 Profilvergleichsverfahren

Die prototypische Implementierung des Profilvergleichs zwischen Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden erfolgt als Excel-Tool mit verknüpften Abschnitten. Excel wurde hierbei als Programm ausgewählt, weil es bereits in den Unternehmen bekannt, einfach zu bedienen und zu erweitern ist. Das Tool umfasst drei Bereiche: das Arbeitsplatz-Profil, das Mitarbeitenden-Profil und den Vergleich der Profile bzw. die Bewertung der Übereinstimmung. Das AP- und das MA- Profil sind in Abschnitt 5.1.2 in Abbildung 5-12

und Abbildung 5-13 zu sehen. Das MA-Profil besteht aus den drei Abschnitten *Basisinformationen*, *physische und psychische Leistungsvoraussetzungen* und *Kompetenzen*. Analog dazu gliedert sich das AP-Profil in die drei Abschnitte *Basisinformation*, *physische und psychische Anforderungen* sowie *Kompetenzanforderungen*. Für die Bewertung der einzelnen Kriterien pro Abschnitt sind Bewertungsskalen angegeben, wobei die Skalenbeschriftungen sowohl über der Bewertung der einzelnen Kriterien als auch in der Legende vermerkt und farblich codiert sind. Hinsichtlich der grafischen Gestaltung stehen einfache, klare Strukturen besonders im Vordergrund. Darüber hinaus erleichtert die Gruppierung der Merkmale die Übersichtlichkeit. (MÜLLER 2022, 118ff.)

Nach dem Ausfüllen der AP- und MA- Profile erfolgt im Excel-Tool ein automatischer Übertrag der Werte in die Vergleichsansicht. Abbildung 6-3 zeigt den Vergleich einer Person mit zwei Arbeitsplätzen.

| Ergebnis Vergleich Anforderungen und Leistungsvoraussetzungen: | | AP01 | AP02 |
|---|--------------------------------------|-------------|-------------|
| | 1. Körperhaltungen | 71% | 143% |
| | 2. Aktionskräfte | 89% | 89% |
| | 3. Lastenhandhabung | 100% | 100% |
| | 4. Arbeitsumgebung | 100% | 83% |
| | 5. Arbeitsorganisation | 74% | 74% |
| | 6. Wahrnehmung | 83% | 100% |
| | 7. Arbeitssicherheit | 83% | 83% |
| Vergleich Anforderungen / Leistungsvoraussetzungen: | | | |
| | Anteil erfüllter Merkmale | 49/62 | 47/62 |
| | prozentualer Anteil | 79% | 76% |
| Ergebnis Vergleich Kompetenzprofile: | | AP01 | AP02 |
| | PK: Anteil erfüllter Merkmale | 60% | 60% |
| | SK: Anteil erfüllter Merkmale | 100% | 100% |
| | MK: Anteil erfüllter Merkmale | 80% | 60% |
| | FK: Anteil erfüllter Merkmale | 70% | 70% |
| | Anteil erfüllter kritischer Merkmale | 80% | 20% |
| Vergleich Kompetenzprofile: Anteil erfüllter Merkmale | | 20/26 | 19/26 |
| | prozentualer Anteil | 77% | 73% |
| Ergebnis Profilvergleich: | | AP01 | AP02 |
| Vergleich Kompetenzprofile: Anteil erfüllter Merkmale | | 20/26 | 19/26 |
| | prozentualer Anteil | 77% | 73% |
| Vergleich Anforderungs- und Fähigkeitsprofile: | | | |
| | Anteil erfüllter Merkmale | 51/62 | 52/62 |
| | prozentualer Anteil | 82% | 84% |
| Profilvergleich: | | | |
| | Anteil erfüllter Merkmale | 113/135 | 96/135 |
| | prozentualer Anteil | 82% | 71% |

Abbildung 6-3: Ergebnis des AP-MA-Vergleichs in der Übersicht

Ein Vergleich zwischen einem Arbeitsplatz und mehreren Mitarbeitenden ist ebenso möglich. Der AP-MA-Vergleich ist unterteilt in den Vergleich der Leistungsvoraussetzungen mit den physischen und psychischen Anforderungen des Arbeitsplatzes, den Vergleich der Kompetenzprofile sowie dem Ergebnis des Profilvergleichs.

Im ersten Abschnitt werden die Ergebnisse des Vergleichs der physischen und psychischen AP-Anforderungen und der Leistungsvoraussetzungen angezeigt. Hierbei wird zwischen den sieben übergeordneten Kategorien der Leistungsvoraussetzungen unterschieden und pro Arbeitsplatz eine prozentuale Übereinstimmung angegeben. Abschließend wird der Anteil erfüllter Anforderungen dargestellt. Analog dazu werden den Personalplanenden im zweiten Abschnitt die Ergebnisse des Kompetenzvergleichs pro Arbeitsplatz angezeigt, aufgeteilt in die vier Kompetenzkategorien (PK, AK, SK, FK). Darüber hinaus wird die Gesamtauswertung der erfüllten Merkmale sowie der Anteil erfüllter kritischer Merkmale angegeben. Der Erfüllungsgrad der kritischen Merkmale sowie der Erfüllungsgrad des Kompetenzvergleichs im Gesamten bietet einen guten Orientierungspunkt für die Planenden, um ggf. Kompetenzentwicklungsmaßnahmen anzustoßen.

Im letzten Abschnitt ist das finale Ergebnis als Zusammenfassung des Vergleichs der Leistungsvoraussetzungen und des Kompetenz-Vergleichs abgebildet. Der finale prozentuale Anteil an erfüllten Merkmalen dient als Indikator, ob eine Person für einen Arbeitsplatz geeignet ist, sollte aber stets im Zusammenhang mit der Erfüllung kritischer Merkmale betrachtet werden. Daher können hier keine definierten Erfüllungsgrade für eine automatisierte Entscheidung festgelegt werden. Diese Entscheidung und die damit verbundene Abwägung, ob die Übereinstimmung durch eine AP-Änderung oder eine Kompetenzentwicklung verbessert werden könnte, liegt bei den Vorgesetzten. Falls die Personalplanenden bei nicht erfüllten oder kritischen Faktoren detaillierte Informationen für beispielsweise Schulungsmaßnahmen benötigen, liefert das Profilvergleichsverfahren jeweils eine Detailansicht für den Vergleich der Leistungsvoraussetzungen (Abbildung 6-4) und den Kompetenzvergleich (Abbildung 6-5). Dabei werden alle einzelnen Merkmale pro Arbeitsplatz aufgelistet.

| Vergleich Belastungen mit Leistungsvoraussetzungen | | | | | |
|--|----------------------------|--|------|------|------|
| Nr. | Merkmale | | MA01 | AP01 | AP02 |
| 1. Körperhaltungen | | | | | |
| M101 | Bein-System | Stehen | 1 | 1 | 1 |
| M102 | Bein-System | Sitzen | 3 | 3 | 3 |
| M103 | Bein-System | Gehen | 2 | 2 | 2 |
| M104 | Bein-System | Steigen | 4 | 5 | 1 |
| | | | | | |
| 7. Arbeitssicherheit | | | | | |
| M701 | Arbeitssicherheit | Gefährdung am Arbeitsplatz | 2 | 2 | 1 |
| M702 | Arbeitssicherheit | Tragen von Schutzausrüstung | 1 | 1 | 1 |
| M703 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Gase, Dämpfe, Aerosole, Stäube, Rauch | 4 | 3 | 4 |
| M704 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Flüssigkeiten, Feststoffe (Öle, Fette, Emulsionen, Lösungsmittel, Lacke) | 0 | 0 | 1 |
| M705 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Feuchtarbeit | 2 | 3 | 0 |
| M706 | Fahr- und Steuertätigkeit | Fahr- und Steuertätigkeit | 0 | 0 | 0 |

| | | |
|---|-------------|-------------|
| Vergleich Anforderungs- und Fähigkeitsprofile: | 51/62 | 52/62 |
| Anteil erfüllter Merkmale | | |
| prozentualer Anteil | 82% | 84% |
| | AP01 | AP02 |

| | | |
|------------------------|------|------|
| 1. Körperhaltungen | 71% | 143% |
| 2. Aktionskräfte | 89% | 89% |
| 3. Lastenhandhabung | 100% | 100% |
| 4. Arbeitsumgebung | 100% | 83% |
| 5. Arbeitsorganisation | 74% | 74% |
| 6. Wahrnehmung | 83% | 100% |
| 7. Arbeitssicherheit | 83% | 83% |

| Legende (aus Mitarbeitenden-Perspektive) | |
|--|------------------------|
| | genaue Übereinstimmung |
| | Übererfüllung |
| | Untererfüllung |

Abbildung 6-4: Profilvergleich – Detailansicht des Vergleichs zwischen AP-Anforderungen und MA-Leistungsvoraussetzungen

| Vergleich Kompetenzanforderungen mit Kompetenzen | | | | |
|--|--|--------------------------------------|-------------|-------------|
| Nr. | Merkmale | MA01 | AP01 | AP02 |
| PK: personale Kompetenz | | | | |
| PK01 | Eigenverantwortung | 4 | 2 | 4 |
| PK02 | schöpferische Fähigkeit/Kreativität | 2 | 2 | 2 |
| PK03 | Offenheit für Veränderungen | 2 | 3 | 3 |
| PK04 | Lernbereitschaft | 1 | 4 | 2 |
| PK05 | ganzheitliches Denken | 4 | 1 | 1 |
| AK: Aktivitäts- & Handlungskompetenz | | | | |
| AK01 | Entscheidungsfähigkeit | 0 | 0 | 0 |
| AK02 | Innovationsfreudigkeit | 0 | 0 | 0 |
| AK03 | Belastbarkeit | 3 | 2 | 0 |
| AK04 | Initiative | 4 | 1 | 3 |
| AK05 | IT-Verständnis | 4 | 1 | 2 |
| AK06 | Umgang mit Smart Devices | 2 | 1 | 1 |
| SK: sozial-kommunikative Kompetenz | | | | |
| SK01 | Teamfähigkeit | 2 | 3 | 1 |
| SK02 | Problemlösungsfähigkeit | 2 | 2 | 2 |
| SK03 | Kommunikationsfähigkeit | 2 | 0 | 3 |
| SK04 | Kooperationsfähigkeit | 2 | 1 | 1 |
| SK05 | Anpassungsfähigkeit | 2 | 1 | 3 |
| FK: Fach- & Methodenkompetenz | | | | |
| FK01 | analytische Fähigkeiten | 4 | 4 | 2 |
| FK02 | Organisationsfähigkeit | 3 | 3 | 1 |
| FK03 | systematisch-methodisches Vorgehen | 2 | 2 | 3 |
| FK04 | Lehrfähigkeit | 1 | 2 | 1 |
| FK05 | Fachwissen | 2 | 2 | 1 |
| FK06 | Planungsverhalten | 1 | 1 | 3 |
| FK07 | fachübergreifende Kenntnisse | 1 | 1 | 1 |
| FK08 | xxx (unternehmensspezifisch) | 3 | 3 | 1 |
| FK09 | xxx (unternehmensspezifisch) | 0 | 1 | 2 |
| FK10 | xxx (unternehmensspezifisch) | 0 | 2 | 0 |
| | | Anzahl krit. Merkmale | 5 | 5 |
| Ergebnis Vergleich Kompetenzprofile: | | | | |
| | | Anteil erfüllter kritischer Merkmale | 80% | 20% |
| Vergleich Kompetenzprofile: | Anteil erfüllter Merkmale prozentualer Anteil | | 20/26 | 19/26 |
| | | | 77% | 73% |
| | | | AP01 | AP02 |
| personale Kompetenzen | | | 60% | 60% |
| Aktivitäts- und Handlungskompetenz | | | 100% | 100% |
| sozial-kommunikative Kompetenz | | | 80% | 60% |
| Fach- und Methodenkompetenz | | | 70% | 70% |

| Legende (aus Mitarbeitenden-Perspektive) | |
|--|-------------------------------|
| | genaue Übereinstimmung |
| | Übererfüllung |
| | Untererfüllung/Nichterfüllung |
| fett | kritisches Merkmal |

Abbildung 6-5: Profilvergleich – Detailansicht des Kompetenzvergleichs

6.2.2 Planungs-Tool

In diesem Abschnitt wird die prototypische Implementierung des Planungs-Tools zur Erstellung und Auswahl beanspruchungs- und kompetenzorientierter Einsatzpläne vorgestellt. Das Planungs-Tool wurde mit dem python-basierten Programm Django erstellt. Dabei wird das Frontend über den Internet-Browser in Django abgebildet und das Backend mit zugrunde liegenden Datenbanken und Strukturen in Visual Studio Code angelegt. Das Frontend beinhaltet alle für die Nutzenden sichtbaren Aspekte des Planungs-Tools, wohingegen die Nutzenden keinen Zugriff auf das im Hintergrund arbeitende Backend haben. Nachfolgend wird zunächst auf die Entwicklung des Backends und anschließend auf die Visualisierung des Frontends eingegangen.

Das in Visual Studio Code programmierte **Backend** besteht aus einzelnen Modulen, welche in einer Ordnerstruktur miteinander verknüpft sind. Ein Modul ist beispielsweise die programmierte Berechnung der individuellen Beanspruchung, welche für die Erstellung der Einsatzpläne genutzt wird. Ein weiteres Modul ist die grafische Darstellung des Frontends, welches im Rahmen des Django-Frameworks nach dem Baukastenprinzip zusammengesetzt wurde. Individuelle grafische Elemente, wie das TUM-Logo oder Farbkonzept, können hierbei hinzugefügt werden. Das genutzte Django-Framework bietet für die Gestaltung der einzelnen Module einige Standardelemente und -funktionen, welche miteinander verknüpft werden. Dabei wurde zum Beispiel der Button ‚Einsatzplan generieren‘ mit dem Modul zur Erstellung der Matrizen inklusive der Beanspruchungsdaten verknüpft. Zudem müssen Schnittstellen zum Einlesen und standardisierten Aufbereiten von MA- und AP-Daten sowie Datenbanken zum Speichern der vergangenen Einsatzpläne erstellt werden.

Bei der Gestaltung des **Frontends** bietet Django die Möglichkeit, zwischen einer Nutzenden-Ansicht und einer Administrator-Ansicht zu unterscheiden. Die Nutzenden-Ansicht ermöglicht die Erstellung neuer beanspruchungsorientierter Einsatzpläne, wohingegen bei der Administrator-Ansicht die individuellen Leistungsvoraussetzungen der Mitarbeitenden eingesehen und bearbeitet werden können. Ebenso ist es in der Administrator-Ansicht möglich, neue Mitarbeitende, Arbeitsplätze und Arbeitsgruppen anzulegen sowie vergangene Rotationen einzusehen. Durch die Zweiteilung in Nutzenden- und Administrator-Ansicht erfolgt eine klare Trennung hinsichtlich des Zugriffes auf personenbezogene Daten der Mitarbeitenden. Die Gestaltung der beiden Frontend-Ansichten basiert auf den definierten Anforderungen und erstellten Gestaltungslösungen des UCD-Prozesses in Abschnitt 5.3.2. Nachfolgend wird auf beide Ansichten genauer eingegangen.

Nutzenden-Ansicht: Die Personalplanenden wählen nach dem Aufrufen des Planungs-Tools zunächst den passenden Arbeitsbereich und das gewünschte Planungsdatum aus. Anschließend erscheint eine Liste mit Mitarbeitenden, welche diesem Arbeitsbereich zugeordnet sind. Aus dieser Liste wählen die Planenden die verfügbaren Personen aus, welche bei der Einsatzplanung berücksichtigt werden sollen. In der prototypischen Umsetzung wird die Anzahl der benötigten Mitarbeitenden für den ausgewählten Arbeitsbereich angezeigt und muss exakt erfüllt werden. Von einer automatischen Einplanung bei Über- oder Unterbesetzung wurde in der prototypischen Implementierung abgesehen. Falls zu wenige oder zu viele Mitarbeitende ausgewählt werden, erscheint ein Hinweis für die Nutzenden. Nach dem Klicken auf das Feld ‚Einsatzplanung generieren‘ zeigt das Planungs-Tool drei beanspruchungsminimierte Einsatzpläne mit den Informationen zur Gesamtbeanspruchung und der individuellen physischen und psychischen Beanspruchung aller eingeplanten Mitarbeitenden an. Dabei werden nur Personen zu Arbeitsplätzen zugewiesen, wenn die Kompetenzanforderungen erfüllt und die Beanspruchungsgrenzwerte nicht überschritten werden, siehe Abschnitt 5.3.1. Diese hängen von der Anzahl berücksichtigter Rotationen ab, da die Beanspruchung bei zunehmender Anzahl steigt. Die Personalplanenden können auf Basis der drei Empfehlungen visuell überprüfen, ob einzelne Personen bereits nahe an den Grenzwerten liegen und weitere, nicht im Planungstool enthaltene Faktoren, berücksichtigen. Diese können zum Beispiel Konflikte zwischen zwei Personen in einem Team sein. Die Planenden wählen dann eine der drei vorgeschlagenen Einteilungen mit Hilfe des Felds ‚Verteilung >Nr.< speichern‘ aus. Die ausgewählte Einsatzplanung wird in der Datenbank im Backend gespeichert und kann in der Administrator-Ansicht eingesehen werden. Die Nutzenden-Ansicht mit bereits ausgewählten Mitarbeitenden und generierten Einsatzplänen ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Die Nutzenden-Ansicht erfüllt somit vier der fünf funktionalen Anforderungen des UCD-Prozesses: (1) Auswahl verfügbarer MA einer bestimmten Arbeitsgruppe für einen bestimmten Tag, (2) Erstellung der Einsatzpläne als Klickfunktion, (3) Anzeige dreier priorisierter Einsatzpläne und (4) finale Auswahl einer Einsatzplanung. Dabei erhalten die Nutzenden Rückmeldung nach getätigten Interaktionen, wie beispielsweise bei der Auswahl zu weniger oder zu vieler Mitarbeitenden für einen Arbeitsbereich, siehe ‚Bitte wählen Sie 6 Mitarbeitende aus‘ in Abbildung 6-7. Hinsichtlich der ergonomischen Anforderungen wurde auf eine lesbare, übersichtliche Darstellung der Inhalte sowie ein einheitliches Farbkonzept geachtet. Die interaktionsspezifischen und ergonomischen Anforderungen sind somit erfüllt.

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)
TUM School of Engineering and Design
Technische Universität München

Personaleinsatzplanung

Planungsbereich: Motor-Getriebe-Vormontage ▾
Datum: 03.10.2022 📅

Bitte wählen Sie 6 verfügbare Mitarbeitende (MA) aus:

MA1
 MA3
 MA5
 MA7
 MA9

MA2
 MA4
 MA6
 MA8
 MA10

Einsatzplanung generieren

Einteilung 1 | Einteilung 2 | Einteilung 3

Verteilung | Mentale Beanspruchung | Physische Beanspruchung

Total: 297.85 Mental: 138.18 Physical: 159.67

| | MA 1 | MA 2 | MA 3 |
|-----------|------|------|------|
| Station 1 | 0 | 0 | 0 |
| Station 2 | 0 | 0 | 0 |
| Station 3 | 0 | 0 | 0 |
| Station 4 | 0 | 1 | 0 |
| Station 5 | 0 | 0 | 1 |
| Station 6 | 1 | 0 | 0 |

Verteilung 1 speichern

| MA 8 |
|------|
| 1 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |

Einteilung 1 | Einteilung 2 | Einteilung 3

Verteilung | Mentale Beanspruchung | Physische Beanspruchung

Total: 297.85 Mental: 138.18 Physical: 159.67

| | MA 1 | MA 2 | MA 3 |
|-----------|------|------|------|
| Station 1 | 0 | 0 | 0 |
| Station 2 | 0 | 0 | 0 |
| Station 3 | 0 | 0 | 0 |
| Station 4 | 0 | 22 | 0 |
| Station 5 | 0 | 0 | 18 |
| Station 6 | 23 | 0 | 0 |

Verteilung 1 speichern

| MA 8 |
|------|
| 21 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |

Einteilung 1 | Einteilung 2 | Einteilung 3

Verteilung | Mentale Beanspruchung | Physische Beanspruchung

Total: 297.85 Mental: 138.18 Physical: 159.67

| | MA 1 | MA 2 | MA 3 |
|-----------|------|------|------|
| Station 1 | 0 | 0 | 0 |
| Station 2 | 0 | 0 | 0 |
| Station 3 | 0 | 0 | 0 |
| Station 4 | 0 | 25 | 0 |
| Station 5 | 0 | 0 | 21 |
| Station 6 | 34 | 0 | 0 |

Verteilung 1 speichern

| MA 8 |
|------|
| 24 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |
| 0 |

Abbildung 6-6: Nutzenden-Ansicht des Planungs-Tools mit generierten Einsatzplänen

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)
 TUM School of Engineering and Design
 Technische Universität München

TUM

Personaleinsatzplanung

Planungsbereich: Motor-Getriebe-Vormontage ▾

Datum: 13.01.2023 📅

Bitte wählen Sie 6 verfügbare Mitarbeitende (MA) aus:

| | |
|---|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> MA1 | <input type="checkbox"/> MA2 |
| <input type="checkbox"/> MA3 | <input checked="" type="checkbox"/> MA4 |
| <input type="checkbox"/> MA5 | <input type="checkbox"/> MA6 |
| <input checked="" type="checkbox"/> MA7 | <input checked="" type="checkbox"/> MA8 |
| <input type="checkbox"/> MA9 | <input type="checkbox"/> MA10 |

Bitte wählen Sie 6 Mitarbeitende aus.

Abbildung 6-7: Ausschnitt aus dem prototypisch implementierten Planungs-Tool mit Anzeige der Fehlermeldung als Feedback an die Planenden

Administrator-Ansicht: Im Rahmen der Administrator-Ansicht können Arbeitsbereiche, Arbeitsplätze und Mitarbeitende neu erstellt, eingesehen und bearbeitet werden. Dadurch wird die fünfte funktionale Anforderung ‚Hinzufügen/Entfernen von Mitarbeitenden und Arbeitsplätzen‘ erfüllt. Grafisch wird auf voreingestellte, bewährte Ansichten des Django-Programms zurückgegriffen. Dabei befindet sich auf der linken Seite der Ansicht eine Menü-Leiste zur einfachen Navigation. Gängige Icons ermöglichen in der Administrator-Ansicht eine selbsterklärende Nutzung. Beispielsweise steht das Plus-Zeichen für das Hinzufügen neuer Personen/Arbeitsbereiche/Arbeitsplätze, das Stift-Symbol zum Bearbeiten vorhandener Einträge und das Mülleimer-Symbol zum Löschen der ausgewählten Einträge. Im Gegensatz zur Nutzenden-Ansicht ist die Administrator-Ansicht in Django in englischer Sprache, da auf vorprogrammierte Standardmodule des Django-Frameworks zurückgegriffen wurde. Abbildung 6-8 zeigt drei Ausschnitte der Administrator-Ansicht, die Seite zur Bearbeitung der Arbeitsbereiche (Ausschnitt oben), den Bereich zur Bearbeitung der Mitarbeitenden (Ausschnitt Mitte) und die Seite zur Bearbeitung der Arbeitsplätze (Ausschnitt unten).

Django administration

Home > Jobrotation > Areas

Start typing to filter...

AUTHENTICATION AND AUTHORIZATION

- Groups + Add
- Users + Add

JOBROTATION

- Areas + Add
- Assigneds + Add
- Datess + Add
- Employees + Add
- Job rotations + Add
- Work places + Add

Select area to change

Action: [dropdown] Go 0 of 2 selected

- AREA
- ArealID: 2, Name: Endmontage
- ArealID: 1, Name: Motor-Getriebe-Vormontage

2 areas

Django administration

Home > Jobrotation > Employees

Start typing to filter...

AUTHENTICATION AND AUTHORIZATION

- Groups + Add
- Users + Add

JOBROTATION

- Areas + Add
- Assigneds + Add
- Datess + Add
- Employees + Add
- Job rotations + Add
- Work places + Add

Select employee to change

Action: [dropdown] Go 0 of 20 selected

- EMPLOYEE
- Employeeid: 20, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 3, WAI: 42, SSCS: 14, HK: 2
- Employeeid: 19, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 3, WAI: 42, SSCS: 12, HK: 3
- Employeeid: 18, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 3, WAI: 39, SSCS: 0, HK: 2
- Employeeid: 17, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 3, WAI: 38, SSCS: 23, HK: 3
- Employeeid: 16, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 3, WAI: 42, SSCS: 6, HK: 3
- Employeeid: 15, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 2, WAI: 33, SSCS: 5, HK: 2
- Employeeid: 14, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 3, WAI: 34, SSCS: 5, HK: 2
- Employeeid: 13, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 3, WAI: 34, SSCS: 5, HK: 2
- Employeeid: 12, Arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, MK: 3, WAI: 34, SSCS: 5, HK: 2

Django administration

Home > Jobrotation > Work places

Start typing to filter...

AUTHENTICATION AND AUTHORIZATION

- Groups + Add
- Users + Add

JOBROTATION

- Areas + Add
- Assigneds + Add
- Datess + Add
- Employees + Add
- Job rotations + Add
- Work places + Add

Select work place to change

Action: [dropdown] Go 0 of 10 selected

- WORK PLACE
- Workplace WorkplacelID: 10, arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, EAWS: 47, KPB: 8
- Workplace WorkplacelID: 9, arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, EAWS: 49, KPB: 13
- Workplace WorkplacelID: 8, arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, EAWS: 39, KPB: 15
- Workplace WorkplacelID: 7, arealid: ArealID: 2, Name: Endmontage, EAWS: 51, KPB: 9
- Workplace WorkplacelID: 6, arealid: ArealID: 1, Name: Motor-Getriebe-Vormontage, EAWS: 46, KPB: 5
- Workplace WorkplacelID: 5, arealid: ArealID: 1, Name: Motor-Getriebe-Vormontage, EAWS: 75, KPB: 10
- Workplace WorkplacelID: 4, arealid: ArealID: 1, Name: Motor-Getriebe-Vormontage, EAWS: 47, KPB: 8
- Workplace WorkplacelID: 3, arealid: ArealID: 1, Name: Motor-Getriebe-Vormontage, EAWS: 49, KPB: 15
- Workplace WorkplacelID: 2, arealid: ArealID: 1, Name: Motor-Getriebe-Vormontage, EAWS: 39, KPB: 15
- Workplace WorkplacelID: 1, arealid: ArealID: 1, Name: Motor-Getriebe-Vormontage, EAWS: 51, KPB: 9

10 work places

Abbildung 6-8: Administrator-Ansichten des Planungs-Tools in Django

6.2.3 Werkenden-Applikation

In diesem Abschnitt wird die prototypische Implementierung der in Abschnitt 5.3.2 konzipierten Werkenden-Applikation beschrieben. Hierfür werden basierend auf der Anforderungsliste und der in Abschnitt 5.3.2 erstellten Gestaltungslösungen des UCD-Prozesses vier verschiedene prototypische Applikationen zur Interaktion mit den Mitarbeitenden iterativ entwickelt. Dabei liegt beim ersten und zweiten Prototyp der Fokus vor allem auf der technischen Implementierung der Funktionen und den grundlegenden Abläufen der Applikation. Im Gegensatz dazu wird beim dritten und vierten Prototyp besonderer Wert auf die grafische Gestaltung und das Designkonzept gelegt. Dabei ist anzumerken, dass der vierte Prototyp in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Ergonomie der TUM im Rahmen des gemeinsamen Forschungsprojekts BeKoMi (BFS, AK-1336-18) entwickelt und umgesetzt wurde. Eine Gegenüberstellung aller vier Prototypen mit den gestellten Anforderungen ist nach einer kurzen Beschreibung der einzelnen Prototypen in Abbildung 6-14 gezeigt.

Der **erste Prototyp** wurde mit dem Programm AndroidStudio umgesetzt und dient zum Testen der Funktionen und der Klick-Abläufe in der Applikation. Es handelt sich daher um einen funktionalen Prototyp, d. h. die eingegebenen Werte werden in Datenbanken gespeichert und für die nächste Berechnung genutzt. Hinsichtlich der Funktionen ermöglicht dieser Prototyp das individuelle Einloggen beim Start der Applikation und das automatische Ausloggen der Nutzenden beim Schließen der Applikation. Nach dem Einloggen gelangen die Nutzenden auf die Startseite mit einer Übersicht aller Funktionalitäten. Die erste Funktion ist die Anzeige der aktuellen Rotation mit dem aktuellen Arbeitsplatz und der Arbeitszeit, die nächste Rotation wird erst zu Beginn des nächsten Rotationsschritts visualisiert. Die zweite Funktion zeigt die Leistungsstatistik der Person hinsichtlich der abgegebenen Beanspruchungsdaten in den letzten Rotationen an. Die Bewertung der einzelnen Einsatzpläne stellt die dritte Funktion dar. Bei der Bewertung des aktuellen Einsatzes bzw. der Rückmeldung der realen Beanspruchung, steht den Nutzenden ein 10-stufiger Schieberegler für die körperliche und geistige Beanspruchung zur Verfügung. Beim Absenden der Bewertung erhalten die Nutzenden Rückmeldung über das erfolgreiche Versenden. Die vierte Funktion beinhaltet das Anfordern von Hilfe, wobei angegeben werden muss, ob körperliche oder geistige Unterstützung nötig ist. Auch hier erhalten die Nutzenden automatisch eine schriftliche Rückmeldung nach Absenden des Hilferufs. Die letzte Funktion dient dem Hinzufügen von Nutzenden. Hierbei wurden bekannte Icons genutzt, beispielsweise das Plus-Symbol zum Hinzufügen von Mitarbeitenden-Daten. Die einzelnen Ansichten der Applikation sind in Abbildung 6-9 zu sehen.

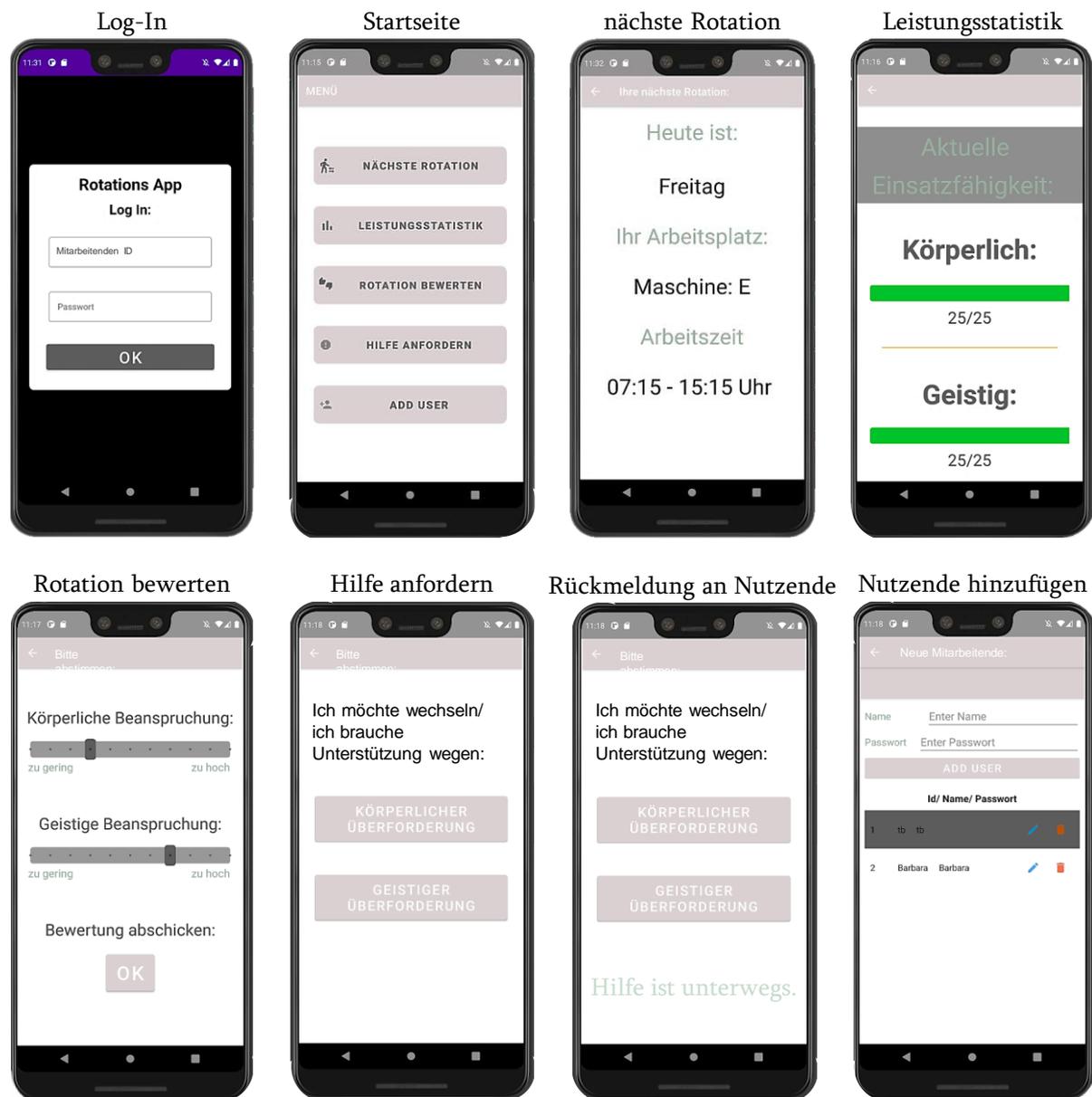


Abbildung 6-9: Verschiedene Ansichten des ersten Prototyps in AndroidStudio

Laut dem UCD-Prozess erfolgt nach der Erstellung der Prototypen eine erste Befragung von Nutzenden und Experten sowie Expertinnen hinsichtlich der Funktionalitäten, um Verbesserungsoptionen zu identifizieren. Hierbei wurden für die erste Iterationsschleife sechs Experten und Expertinnen aus dem Produktionsmanagement befragt, siehe Abbildung F-24 in Anhang F. Das Feedback der Produktionsexperten und Expertinnen war sehr positiv, wobei besonders die Rückmeldung der Beanspruchung per Schieberegler hervorgehoben wurde. Verbesserungspotenziale wurden in Bezug auf das Hinzufügen neuer Nutzenden und der Leistungsstatistik angesprochen. Neue Nutzende sollten nicht von anderen Nutzenden in der Applikation, sondern direkt bei der Log-In-Seite oder über die Administratoren erstellt werden können. Darüber hinaus gibt die Leistungsstatistik keine Auskunft, über welchen Zeitraum die Daten verrechnet werden und welche

Schlussfolgerungen daraus gezogen werden. Zudem sind einige softwareergonomische Aspekte zu verbessern, die bei diesem Prototypen nicht im Fokus standen, zum Beispiel die Berücksichtigung stärkerer Kontraste und einheitlicher Schriftgrößen oder die Integration eines Knopfs zum schnellen Zurücknavigieren auf die Startseite.

Der **zweite Prototyp** wurde mit dem Programm NodeJs entwickelt und dient ebenso zum Testen der Funktionen und Abläufe, wobei bereits die grafische Gestaltung integriert wurde. Dieser Prototyp ist für die Nutzung am Tablet, Computer oder Smartphone (in Querformat) geeignet. Die Nutzenden wählen beim Starten der Applikation aus, ob ein neuer Account erstellt werden soll oder der Log-In mit einem bestehenden Account erfolgt. Bei dieser Anwendung ist links das Menü mit allen Funktionen und ein dunkel hinterlegtes Feld mit der aktuellen Position zu sehen. Auf der Startseite ist für die Nutzenden eine grafische Darstellung ihrer physischen und psychischen Beanspruchungsrückmeldung der vergangenen Woche ersichtlich. Dies soll die Beanspruchungsbewertung transparent für die Mitarbeitenden visualisieren. Unter der Funktion ‚Health Status‘ können die Mitarbeitenden die aktuelle Einsatzplanung/Rotation auf einer Skala von 0 bis 10 physisch und psychisch bewerten. Der Schieberegler zeigt durch eine Farbcodierung die Bedeutung der Skalen an (0 = grün → Beanspruchung in Ordnung, 10 = rot → Beanspruchung nicht in Ordnung). Durch eine Pop-Up-Nachricht, eine plötzlich erscheinende Mitteilung auf dem Bildschirm, erhalten die Nutzenden Rückmeldung über das erfolgreiche Absenden der Bewertung. Bei der Funktion ‚Work Status‘ können die Mitarbeitenden angeben, ob sie verfügbar sind oder nicht. Durch diese Funktion können Mitarbeitende frühzeitig rückmelden, ob sie beispielsweise krankheitsbedingt ausfallen. Auch bei diesem Prototyp ist ein außerplanmäßiger Arbeitsplatzwechsel möglich, wobei verfügbare Mitarbeitende angezeigt oder Springer aktiv in der Mitarbeitenden-Liste gesucht werden können. Der zweite Prototyp ist zudem in englischer Sprache für nicht deutschsprachige Mitarbeitende. Die einzelnen Ansichten der Applikation sind in Abbildung 6-10 dargestellt. (TROUDI 2021, 57ff.)

Für die Bewertung dieses Prototyps wurden die gleichen Experten und Expertinnen aus der Industrie befragt, analog zu Prototyp eins. Besonders positiv wurden die direkten Pop-Up-Rückmeldungen sowie die frühzeitige Angabe des Arbeitsstatus genannt, da die Personalplanenden oft erst ein paar Minuten vor Produktionsbeginn wissen, welche Mitarbeitenden zur Verfügung stehen. Die Verbesserungspotenziale liegen bei der Anzeige der aktuellen und der nächsten Rotation sowie der Ausarbeitung des bereits geplanten Posteingangs.

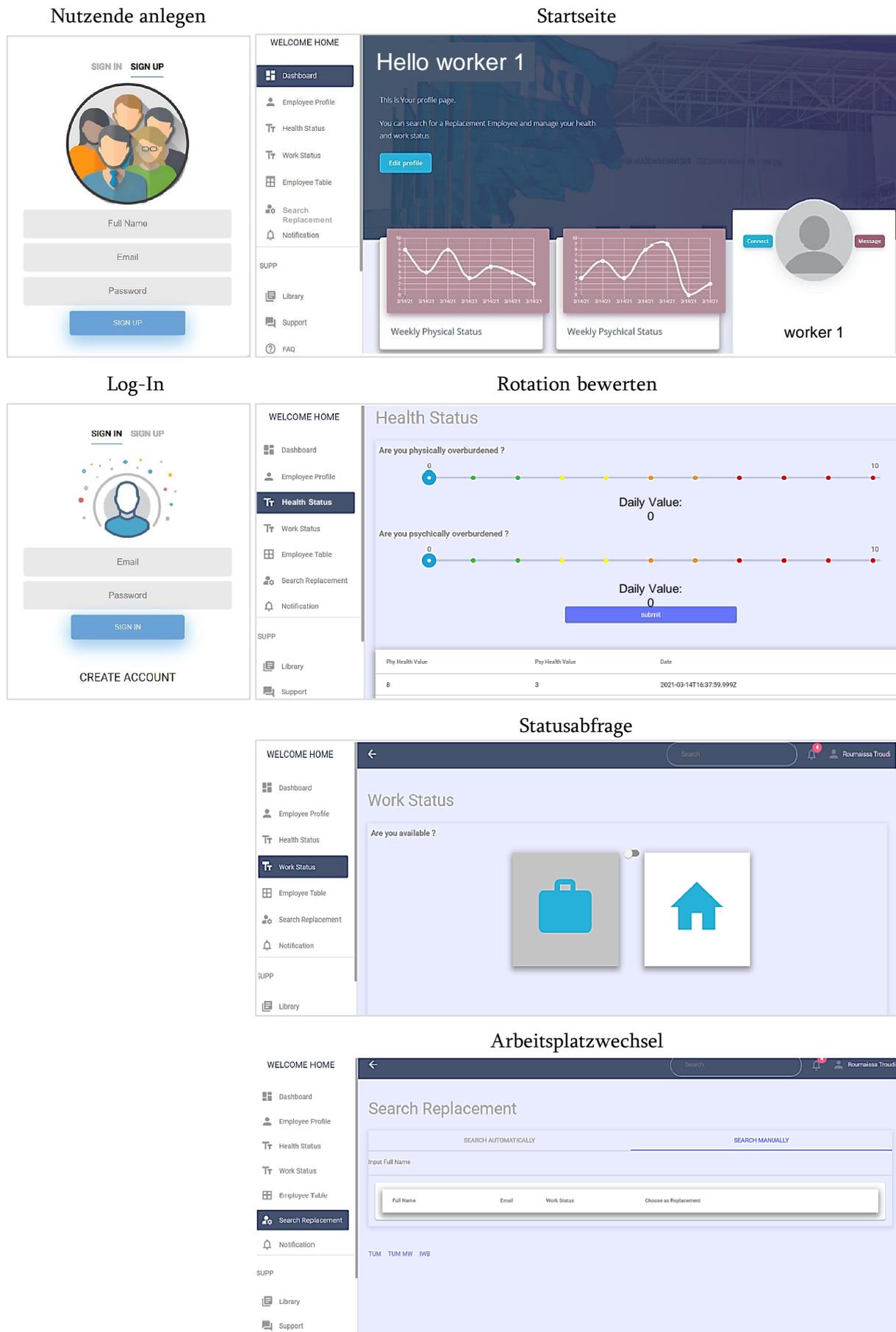


Abbildung 6-10: Verschiedene Ansichten des zweiten Prototyps in NodeJs

Der **dritte Prototyp** wurde als Mock-up in Power-Point entwickelt, um die grafische Gestaltung der Applikation zu testen, siehe Abbildung 6-11. Hinsichtlich der visualisierten Funktionen orientiert sich der dritte Prototyp an den beiden vorangegangenen Prototypen. Dabei sehen die Nutzenden auf der Startseite drei Hauptfunktionen: Die erste Funktion ‚nächste Rotation‘ zeigt neben der aktuellen Rotation auch die beiden nächsten geplanten Rotationsschritte mit dazugehörigem Datum, Schichteinteilung und konkretem Arbeitsplatz an. Bei der zweiten Funktion ‚Schichtplan‘ kann der aktuelle Einsatzplan bewertet werden. Dafür stehen farblich codierte Schieberegler zur Verfügung sowie ein Textfeld, um Anmerkungen hinzuzufügen. Zahlreiche Icons werden zur grafischen Darstellung der Skalen genutzt (z. B. Daumen hoch/runter, Kopf für psychische Beanspruchung). Nach dem Absenden der Bewertung erhalten die Nutzenden Rückmeldung über eine Pop-Up-Nachricht. Bei der ‚Dashboard‘-Funktion werden den Nutzenden Kennzahlen zur Erreichung des Produktionsziels und des Tagesziels der zugeordneten Maschine oder des zugeordneten Arbeitsplatzes sowie die monatliche Arbeitsplatz-Variation angezeigt. Dies soll die Motivation fördern und Transparenz schaffen. In den vier Ecken der App-Ansicht sind weitere Funktionen hinterlegt. Links oben steht das Haus-Icon für das einfache Zurücknavigieren zur Startseite und in der rechten Ecke erreicht man über das Zahnrad die individuellen Einstellungen. Links unten symbolisiert der Briefumschlag den Posteingang und rechts unten gelangen die Nutzenden über das Gruppen-Icon zum Hilfe-Ruf. Dabei kann bei diesem Prototyp entweder ein Springer oder ein Instandhalter angefordert werden. Zudem sendet die Applikation gegen Ende der Schicht eine Erinnerung in Form einer Pop-Up-Nachricht an die Nutzenden zur Bewertung der Einsatzplanung. Der dritte Prototyp mit seinen verschiedenen Ansichten ist in Abbildung 6-11 zu sehen. (KESKIN 2021, 72ff.)

Zur Bewertung des erstellten Prototyps wurden zehn Experten und Expertinnen aus der Produktion und Softwareergonomie im Rahmen einer qualitativen Studie hinsichtlich der integrierten Funktionen, Usability und Ästhetik befragt (Skala von 2, stimme voll zu/sehr gut, bis -2, stimme gar nicht zu/sehr schlecht) (KESKIN 2021, 78ff.). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Funktionen als sehr hilfreich eingestuft wurden, vor allem der Hilferuf mit der Unterteilung in Springer:in und Instandhalter:in. Im Gegensatz dazu wurde die Ästhetik nur als zufriedenstellend bewertet, da die farbliche Gestaltung den Experten und Expertinnen insgesamt zu grau und bei der Bewertung der Beanspruchung zu bunt ist, siehe Abbildung 6-12.



Abbildung 6-11: Verschiedene Ansichten des dritten Prototyps in PowerPoint

Die Icons und Schriften erfüllen die ergonomischen Anforderungen und die genutzten Icons werden durch die Befragten als selbsterklärend beschrieben. Für die Positionierung der Icons wurde eine abgetrennte Menüleiste vorgeschlagen, um das Bedienfeld besser zu strukturieren. Dies würde sich positiv auf die optische Struktur der Interaktionsschnittstelle auswirken. Im Bereich der Usability gaben die Experten und Expertinnen an, sich eine regelmäßige Nutzung der Applikation vorstellen zu können. Zudem wurde die Bedienbarkeit des Prototyps als intuitiv eingestuft. Dies deutet auf eine gute Gebrauchstauglichkeit hin, welches die effektive, effiziente und zufriedenstellende Nutzung sichert. Bei der Befragung der Experten und Expertinnen wurde zudem auf unterschiedliche Fragestellungen geachtet, um ein unaufmerksames Durchkreuzen der Antworten zu verhindern. Dies ist zum Beispiel bei der umgekehrten Bewertung der zu

beurteilenden Aussagen bei Usability zu sehen. Abschließend evaluierten die Experten und Expertinnen den Gesamteindruck auf einer Skala von 1 (mangelhaft) bis 5 (sehr gut), wobei der Mittelwert der Bewertung bei 4,3 liegt.

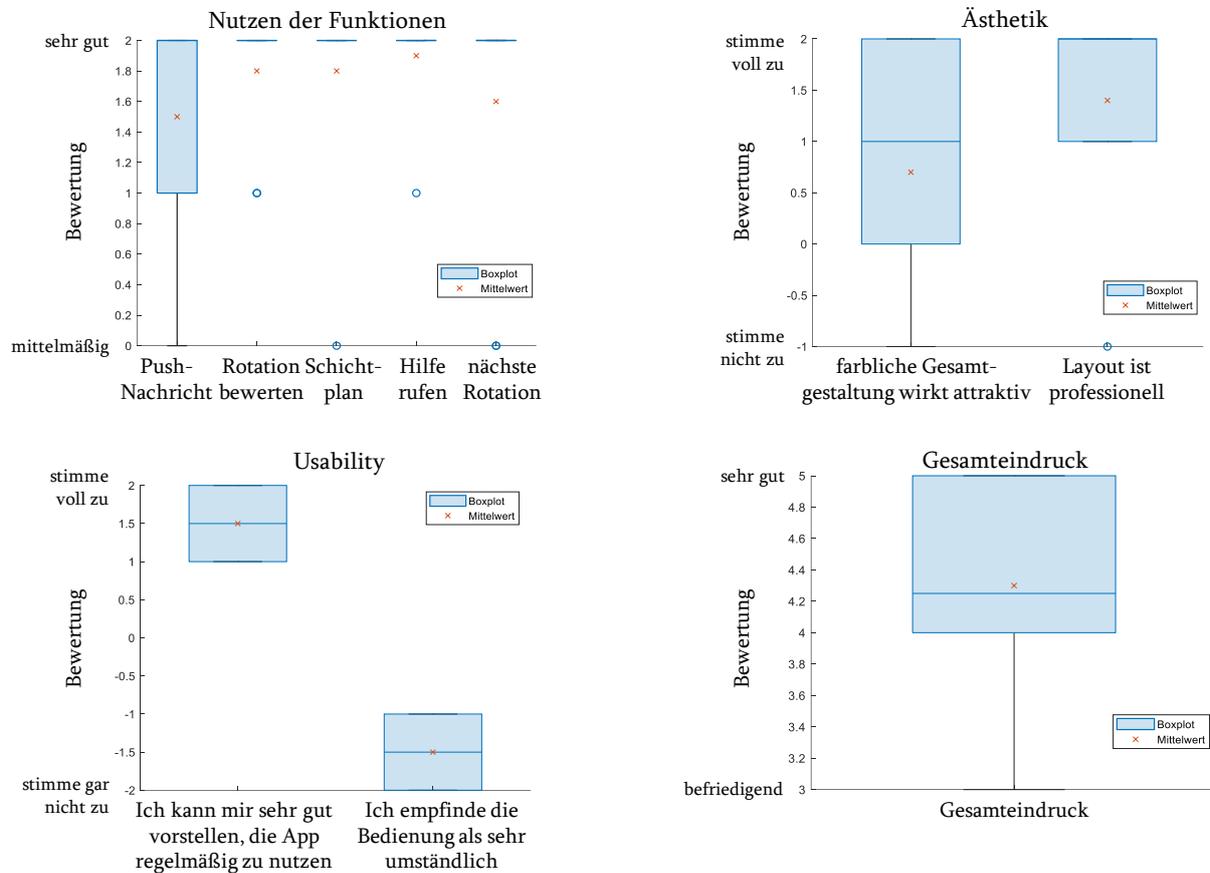


Abbildung 6-12: Ergebnisse der Befragung von Experten und Expertinnen hinsichtlich des Nutzens der Funktionen, der Ästhetik, der Usability und des Gesamteindrucks

Auf Basis der Erkenntnisse aus den drei erstellten Prototypen wurde der **vierte Prototyp** mit dem Programm AxShare erstellt, siehe Abbildung 6-13. Dieser Prototyp wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Ergonomie im Rahmen des Forschungsprojekts BeKoMi konzipiert. Der Fokus liegt verstärkt auf der grafischen Gestaltung der Nutzendenschnittstelle. Die prototypische Applikation ermöglicht ein Ein- und Ausloggen und die eigenständige Auswahl des aktuellen Arbeitsplatzes auf der Startseite. Mit Hilfe der Menü-Leiste am unteren Bildschirmrand können die Nutzenden durch die Applikation navigieren. Das Herz-Symbol steht für die Bewertung der aktuellen Rotation. Dabei werden die Fragen des NASA-RTLX auf einer 10-stufigen Skala beantwortet. Nach dem erfolgreichen Absenden der Bewertung wird eine Bestätigung angezeigt. Eine weitere Funktion ist der Wunsch nach einem Arbeitsplatzwechsel. Hierbei müssen die Nutzenden Gründe angeben, welche entweder aus den vorprogrammierten Antworten ausgewählt oder selbst als Freitext eingefügt werden können. Ob die Anfrage eines Wechselwunsches durch die Personalplanenden angenommen oder abgelehnt wurde, erfahren die Nutzenden

per Nachricht im Posteingang. Der Posteingang wird über das Briefkuvert-Symbol angesteuert. Über die drei Punkte in der Menü-Leiste gelangen die Nutzenden zur abschließenden Ansicht, wo sie einerseits Einblick in ihre eigene Leistungsstatistik erhalten, individuelle Einstellungen in der Applikation vornehmen (z. B. Schriftgröße, Helligkeit der Anzeige) oder sich ausloggen können. Analog zum dritten Prototyp gibt es bei dieser Applikation die Erinnerungsfunktion für die Beanspruchungseingabe per Pop-Up-Nachricht. Das Design der Applikation weist ein klares, konsistentes, unternehmensspezifisches Farbschema auf. Diese spezifische Anpassung wurde vorgenommen, um für die nachfolgende Evaluation mit Nutzenden aus der Industrie einen realen Anwendungsfall zu simulieren und Bezug zum industriellen Anwendungskontext herzustellen. Die Evaluierung des vierten Prototyps erfolgt im Rahmen einer Validierungsstudie mit 20 Mitarbeitenden von MAN. Auf die Ergebnisse der finalen Evaluation wird in Abschnitt 7.1 eingegangen.

Abbildung 6-14 zeigt zusammenfassend die Bewertung der vier beschriebenen Prototypen der Werkenden-Applikation hinsichtlich der im Rahmen des UCD-Prozesses definierten funktionalen, interaktionsspezifischen und ergonomischen Anforderungen. Die Bewertung erfolgt mit Harvey-Balls.

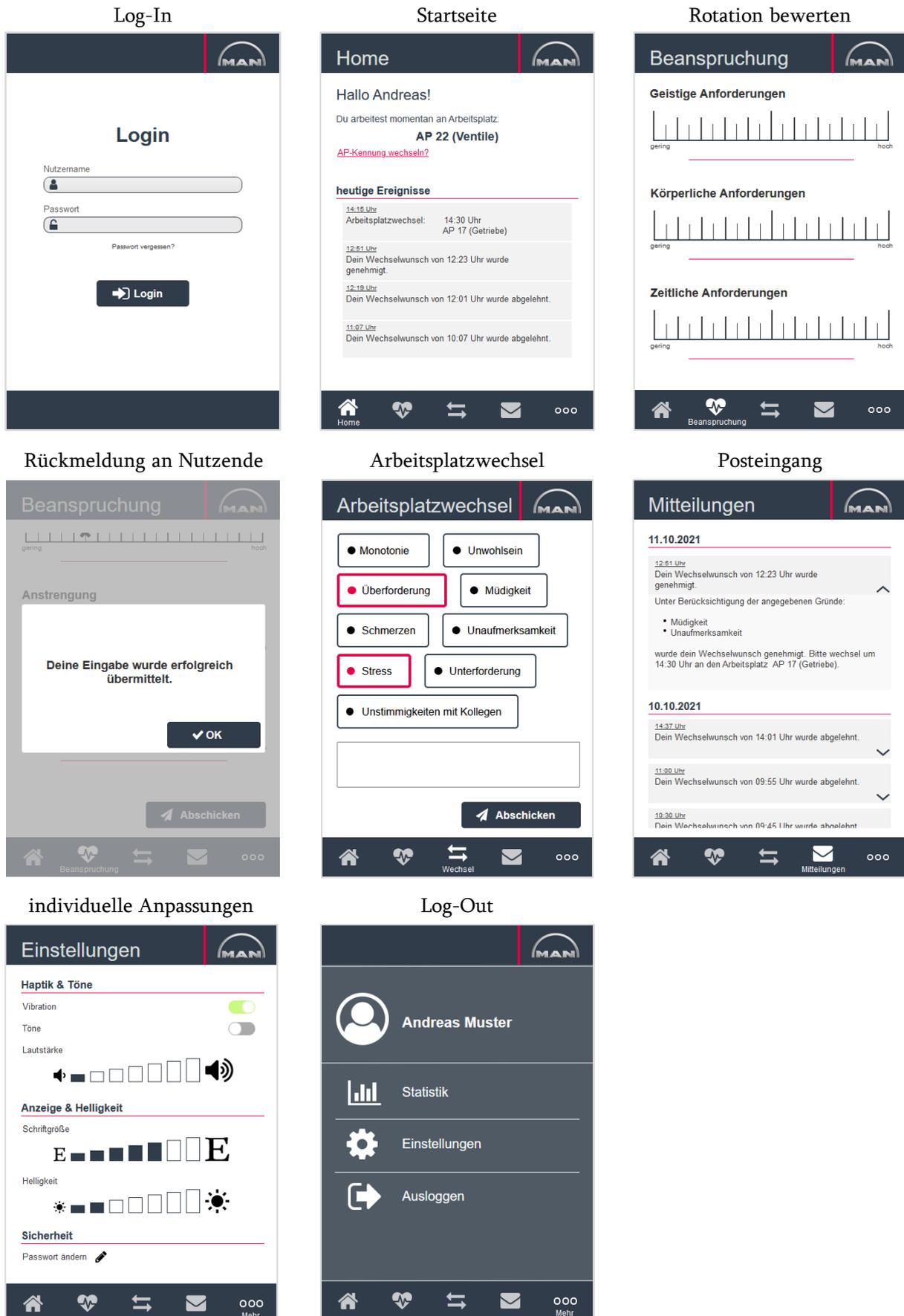


Abbildung 6-13: Verschiedene Ansichten des vierten Prototyps in AxShare

| | | Prototyp 1 | Prototyp 2 | Prototyp 3 | Prototyp 4 |
|--------------------------------|-------------------------------|---|--|---|---|
| Ziel | | Test der Funktionen und Abläufe | | grafische Gestaltung | |
| Programm | | Android Studio | NodeJs | PowerPoint | AxShare |
| funktionale Anforderungen | Ein-/Ausloggen | <input type="radio"/> nur Einloggen | <input checked="" type="radio"/> Ein-/Ausloggen | <input type="radio"/> nicht vorhanden | <input checked="" type="radio"/> Ein-/Ausloggen |
| | Anzeige der Rotationen | <input type="radio"/> aktuelle Rotation | <input type="radio"/> keine Anzeige | <input checked="" type="radio"/> aktuelle Rotation; nächste Rotation | <input checked="" type="radio"/> eigenständige Auswahl des aktuellen APs |
| | Rückmeldung der Beanspruchung | <input checked="" type="radio"/> jeweils Rückmeldung auf Skala von 1 bis 10 | <input checked="" type="radio"/> jeweils Rückmeldung auf Skala von 1 bis 10; farbliche Codierung | <input checked="" type="radio"/> Rückmeldung per Schieberegler; farbliche Codierung Möglichkeit für Anmerkungen | <input checked="" type="radio"/> Beantwortung des NASA-RTLX |
| | Unterstützung anfordern | <input type="radio"/> Unterstützung & Wechsel nicht unterschieden; Angabe, ob körperliches oder geistiges Problem | <input type="radio"/> Anfrage für personellen Ersatz mit Suche in der Datenbank | <input type="radio"/> Anfordern eines Springers; Anfordern eines Instandhalters | <input type="radio"/> Arbeitsplatzwechsel anfordern; Auswahl von stand. Gründen oder Freitext |
| | individuelle Anpassungen | <input type="radio"/> keine Anpassungen möglich | <input type="radio"/> keine Anpassungen möglich | <input type="radio"/> keine Anpassungen möglich | <input checked="" type="radio"/> Haptik & Töne; Anzeige & Helligkeit |
| interaktionspez. Anforderungen | Rückmeldung | <input checked="" type="radio"/> Rückmeldung beim Absenden der Bewertung & Wechselwunsch | <input checked="" type="radio"/> Pop-Up-Nachricht als Rückmeldung | <input checked="" type="radio"/> Rückmeldung beim Absenden der Bewertung & Unterstützungsruf | <input checked="" type="radio"/> Rückmeldung beim Absenden der Bewertung & Wechselwunsch |
| | Posteingang | <input type="radio"/> kein Posteingang | <input type="radio"/> bedacht, aber nicht ausgearbeitet | <input type="radio"/> bedacht, aber nicht ausgearbeitet | <input checked="" type="radio"/> Rückmeldung zu Wechselwunsch |
| ergonomische Anforderungen | Schriftgröße | <input type="radio"/> unterschiedliche Größen, teils zu klein | <input type="radio"/> unterschiedliche Größen, teils zu klein | <input checked="" type="radio"/> angemessen | <input checked="" type="radio"/> angemessen |
| | Farbgestaltung | <input type="radio"/> konstantes Farbschema; teils zu wenig Kontrast | <input checked="" type="radio"/> konstantes Farbschema; optisch ansprechend | <input type="radio"/> konstantes Farbschema; teils zu wenig Kontrast | <input checked="" type="radio"/> konstantes Farbschema; übersichtliches, unternehmensspez. Design |
| | Symbole/Icons | <input checked="" type="radio"/> nur auf Startseite; zu klein | <input checked="" type="radio"/> sinnvolle Nutzung der Icons; teils unbekannte Icons | <input checked="" type="radio"/> viele Icons, teils überfüllt; Nutzung gängiger Icons | <input checked="" type="radio"/> sinnvolle Nutzung der Icons; Nutzung gängiger Icons |
| zusätzliche Funktionen | Nutzende hinzufügen | <input checked="" type="radio"/> Funktion vorhanden; Name & ID verwirrend | <input checked="" type="radio"/> Funktion vorhanden | <input type="radio"/> bedacht, aber nicht ausgearbeitet | <input type="radio"/> nicht vorhanden |
| | Leistungsstatistik | <input checked="" type="radio"/> durchschnittliche Einsatzfähigkeit der letzten Rotationen | <input checked="" type="radio"/> wöchentlicher Überblick über physischen & psychischen Status | <input type="radio"/> Übersicht Produktionsleistung; Tagesziel Maschine | <input checked="" type="radio"/> Statistik zu Leistung, Beanspruchung, Anforderungen etc. |
| | Arbeitsstatus | <input type="radio"/> keine Rückmeldung | <input checked="" type="radio"/> einfache Rückmeldung | <input type="radio"/> keine Rückmeldung | <input type="radio"/> keine Rückmeldung |
| | Erinnerung an Bewertung | <input type="radio"/> nicht vorhanden | <input type="radio"/> nicht vorhanden | <input checked="" type="radio"/> Pop-Up-Nachricht | <input checked="" type="radio"/> Pop-Up-Nachricht |

Erfüllungs der Anforderung nicht erfüllt etwas erfüllt teilweise erfüllt größtenteils erfüllt
 erfüllt

Abbildung 6-14: Bewertung der vier prototypisch entwickelten Werkenden-Applikationen hinsichtlich der gestellten Anforderungen

7 Evaluation der Methode

Im Rahmen der Evaluation der entwickelten Methode werden zunächst die in Abschnitt 4.1 gestellten **Anforderungen validiert** (Abschnitt 7.1). Anschließend wird die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsmethode anhand einer **Bewertung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses** geprüft (Abschnitt 7.2), bevor abschließend auf die **Limitationen** eingegangen wird (Abschnitt 7.3). In die Erarbeitung dieses Kapitels fließen folgende von der Autorin betreute wissenschaftliche Studienarbeiten ein: BRUNNER (2020), WERNER (2021), BOTZ (2022) und KADLETZ (2022)

7.1 Validierung der gestellten Anforderungen

Dieser Abschnitt beinhaltet die Validierung der Forschungsergebnisse basierend auf der industriellen Anwendung der Methode sowie der kritischen Prüfung aus wissenschaftlicher Sicht. Die Validierung beruht auf Gesprächen mit Experten und Expertinnen aus der Automobilindustrie, siehe Abbildung C-4, den gesammelten Erfahrungen beim Anwendungspartner und den Ergebnissen der Validierungsstudien. Dabei werden die vorab festgelegten Nutzungsziele sowie die in Abschnitt 4.1 aufgestellten allgemeinen, anwendungsbezogenen und inhaltlichen Anforderungen überprüft. Diese werden nachfolgend in gleicher Reihenfolge diskutiert. Abbildung 7-1 zeigt zusammenfassend den Erfüllungsgrad jeder Anforderung.

Allgemeine Anforderungen

Objektivität: Die Anforderung gilt als größtenteils erfüllt, da die Anwendungsmethode zur Einführung und Nutzung der Einsatzplanung unabhängig von der anwendenden Person gestaltet ist. Zudem unterstützen die AP- und MA-Profile, die standardisierten Fragebögen und Bewertungsmethoden, das entwickelte Planungs-Tool sowie die Werkenden-Applikation eine einheitliche, strukturierte und objektive Vorgehensweise. Dennoch ist ein individueller Einfluss bei der physischen und psychischen Bewertung der Arbeitsplätze nicht ganz auszuschließen. Zudem liegt die finale Entscheidung zur Auswahl einer der drei priorisierten Einsatzplanungen letztlich bei den Planenden.

| Art | Anforderung | Erfüllungsgrad |
|----------------------------------|--|----------------|
| allgemeine Anforderungen | Objektivität | |
| | Reliabilität | |
| | Validität | |
| anwendungsbezogene Anforderungen | Anwendbarkeit | |
| | geringer Ressourceneinsatz | |
| | Adaptierbarkeit | |
| | Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit | |
| inhaltliche Anforderungen | Beschreibung wesentlicher Elemente im menschenorientierten Arbeitssystem | |
| | Vergleich der AP- und MA-Eigenschaften | |
| | Messung physischer und psychischer Beanspruchung | |
| | Prognose physischer und psychischer Beanspruchung | |
| | Generierung von Personaleinsatzplänen | |
| | Kommunikation der Personaleinsatzpläne zu den Planenden und Werkenden | |

Erfüllungsgrad der Anforderungen:

nicht erfüllt
 etwas erfüllt
 teilweise erfüllt
 größtenteils erfüllt
 erfüllt

Abbildung 7-1: Erfüllungsgrad der an die Methode gestellten Anforderungen

Reliabilität: Die Anforderung ist erfüllt, da bei gleichen initialen AP- und MA-Daten und bei derselben Auswahl an Mitarbeitenden die gleiche Beanspruchungsbewertung und identische Einsatzpläne im Planungs-Tool erstellt und den Teamleitenden vorgeschlagen werden. Die Reproduzierbarkeit ist durch die definierten Zusammenhänge im Arbeitssystem, die Beschreibung der Systemelemente sowie das standardisierte Vorgehen des Algorithmus zur Erstellung der Einsatzpläne gewährleistet.

Validität: Bei der Anforderung der Validität wurde in Abschnitt 4.1 zwischen interner und externer Validität unterschieden. Die Anforderung der internen Validität kann als größtenteils erfüllt betrachtet werden, da bei der Entwicklung der einzelnen Bausteine und Anwendungs-Werkzeuge auf eine Kombination aus umfassenden Literaturrecherchen und Validierungen durch Experten und Expertinnen geachtet wurde. Der Fokus dieser Forschungsarbeit liegt auf der Erstellung von Einsatzplänen hinsichtlich beanspruchungs- und kompetenzorientierter Kriterien, vorherrschende soziale oder wirtschaftsbezogene Aspekte bleiben unberücksichtigt. Daher können die erhobenen oder rückgemeldeten Beanspruchungsdaten nicht rein auf den Arbeitsplatz und die Arbeitsaufgabe zurückgeführt werden. In Bezug auf externe Validität und die Übertragbarkeit der

ermittelten Forschungsergebnisse kann die Anforderung als erfüllt betrachtet werden, da die Methode auf andere Arbeitsbereiche mit ähnlichen Montagetätigkeiten übertragbar ist.

Anwendungsbezogene Anforderungen

Anwendbarkeit: Die Anforderung der Anwendbarkeit gilt nach der Befragung von Planenden und Werkenden als halb erfüllt. Laut den Experten und Expertinnen ermöglicht die einfache Nutzung des Planungs-Tools eine selbstständige Anwendung ohne Vorerfahrung. Zur Bewertung der Werkenden-Applikation wurde eine Nutzendenstudie mit 20 Mitarbeitern von MAN im Alter von 24 bis 55 Jahren (alle männlich, Durchschnittsalter 33,9 Jahre) durchgeführt, siehe Abbildung 7-2. Im Rahmen der Studie bearbeiteten die Teilnehmer eine vorgegebene Aufgabe in der Werkenden-Applikation (Prototyp vier), welche sie durch alle Funktionen führte, und beurteilten anschließend die Applikation anhand der System Usability Scale (SUS) nach BROOKE (1996). Gemittelt über alle Testpersonen erreichte der vierte Prototyp der Werkenden-Applikation einen SUS-Wert von 68,75 Punkten bei 100 möglichen Punkten. Da die SUS-Bewertung größer als 68 ist, gelten der Prototyp und seine Gebrauchstauglichkeit entsprechend als gut. Im Gespräch mit den Probanden wurden Bedenken hinsichtlich der Akzeptanz neuer Applikationen und des technischen Verständnisses der älteren Mitarbeitenden in Bezug auf die Smartphone-Nutzung geäußert. Abbildung 7-3 zeigt die SUS-Werte im Vergleich zum Alter der Probanden, wobei ein abnehmender linearer Zusammenhang zwischen dem Alter und der SUS-Bewertung zu erkennen ist. Eine Schulung der Mitarbeitenden sollte daher vorab erfolgen, um die Funktionalitäten der Applikation zu erläutern sowie die Transparenz, Akzeptanz und das Verständnis für die Hintergründe einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung zu schaffen. Darüber hinaus betonen die Montagemitarbeitenden besonders positiv die faire und transparente Einteilung des Planungs-Tools mit eindeutigen Entscheidungskriterien und der aktiven Beteiligung der Mitarbeitenden durch die Beanspruchungsrückmeldung. Zudem unterstützt das Planungs-Tool bei kurzfristigen Änderungen, da zu beliebigen Zeiten die Erstellung neuer Einsatzpläne angestoßen werden kann.



Abbildung 7-2: MAN-Mitarbeiter beim Testen der Nutzenden-App

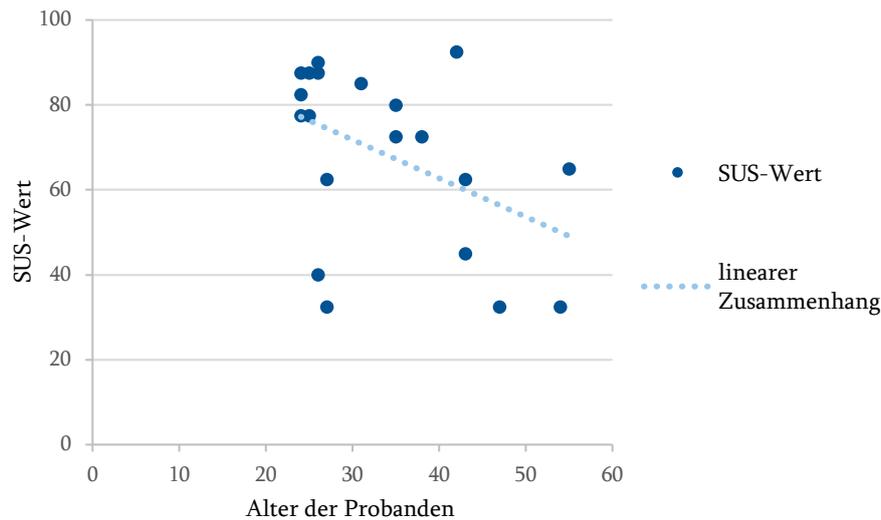


Abbildung 7-3: Linearer Zusammenhang zwischen SUS-Bewertung und Alter der Probanden

In Gesprächen mit den Experten und Expertinnen wurde festgestellt, dass die initiale Datenerhebung mit physischen und psychischen AP-Anforderungen und MA-Leistungsvoraussetzungen ohne Vorkenntnisse in diesem Bereich herausfordernd ist, da nicht alle Begrifflichkeiten in den AP- und MA-Profilen geläufig sind. Eine schriftliche Erläuterung aller Profil-Elemente wäre jedoch zu zeitaufwendig für die Nutzung in der Praxis. Daher empfiehlt sich hier eine Unterstützung beim Ausfüllen der AP- und MA-Profile durch Betriebsärzte oder Ergonomen. Zudem erläuterten die Experten und Expertinnen, dass der detaillierte Vergleich zwischen Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden im Rahmen des Profilvergleichsverfahrens sehr sinnvoll für leistungsgewandelte Mitarbeitende im Rahmen einer Einzelbetrachtung direkt anwendbar ist. Für alle anderen Mitarbeitenden könnte die Analyse der einzelnen AP-MA-Unterschiede zu detailliert sein.

Geringer Ressourceneinsatz: Die Anforderung ist vollständig erfüllt, da zur Umsetzung der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung lediglich die vorhandenen Computer der Planenden, die dienstlichen oder privaten Handys der Mitarbeitenden oder alternativ die Computer der Arbeitsgruppe genutzt werden. Es entsteht daher kein Bedarf an Neuanschaffungen. Auch der Ressourcenbedarf zur initialen Implementierung ist sehr gering, was in Abschnitt 7.2 genauer erläutert wird. Vor allem der tägliche Zeitbedarf zur Erstellung neuer Einsatzpläne kann von 40 Minuten auf 5 Minuten reduziert werden.

Adaptierbarkeit: Die Anforderung gilt als vollständig erfüllt, da weitere Abteilungen und Mitarbeitende inklusive der initialen Daten in das Planungs-Tool integriert werden können. Zudem besteht keine Restriktion hinsichtlich der Größe eines Anwendungsbereichs oder einer Arbeitsgruppe. Darüber hinaus können unternehmensindividuelle Anpassungen bei den AP- und MA-Profilen vorgenommen

werden. In Bezug auf die Kompetenzen sind beispielsweise bereits freie Felder für spezifische unternehmensbezogene Kompetenzen vorgesehen.

Übertragbarkeit und Allgemeingültigkeit: Die Anforderung wird innerhalb des Betrachtungsbereichs als erfüllt angesehen, da die Anwendungsmethode und die einzelnen Werkzeuge im Betrachtungsbereich der taktgebundenen manuellen Montage auf weitere Arbeitsplätze übertragbar sind. Die Prädiktion der Beanspruchung basiert auf Studiendaten, welche an Arbeitsplätzen mit klassischen Montagetätigkeiten (Verschrauben, Klipsen, Verkabeln, etc.) erhoben wurden. Falls die Montagetätigkeiten im Bereich der physischen oder psychischen Belastung abweichen, kann es zu einer initialen Falscheinschätzung der Beanspruchung kommen. Diese wird durch die Rückmeldung der realen Beanspruchungsdaten der Mitarbeitenden iterativ identifiziert und angepasst. Hinsichtlich der Allgemeingültigkeit ist die Anwendungsmethode somit auf andere Bereiche mit ähnlichen Tätigkeiten übertragbar.

Inhaltliche Anforderungen

Forschungsfrage 1:

Beschreibung wesentlicher Elemente im menschenorientierten Arbeitssystem: Die Anforderung gilt als vollständig erfüllt, da das Arbeitssystem mit den Elementen Arbeitsplätze und Mitarbeitende detailliert hinsichtlich Kompetenzen sowie physischer und psychischer Aspekte beschrieben wird. Um zu überprüfen, ob alle gesundheitlichen Einschränkungen der Mitarbeitenden in der Industrie in den Profilen berücksichtigt werden, wurde ein Praxistest bei einem Münchner Automobilhersteller durchgeführt (WERNER 2021). Hierbei wurden die anonymisierten Daten der Belegschaft in der Produktion hinsichtlich körperlicher und geistiger Einschränkungen analysiert. Ein Großteil der vermerkten Einschränkungen (> 85 %) ist auf physische Kriterien zurückzuführen. Die häufigsten Einschränkungen treten in der Praxisanalyse beim Handhaben von Lasten bei der Rumpfbelastung sowie beim Stehen, Gehen, Sitzen, Knien und Hocken auf. Diese Kriterien sind alle in den entwickelten AP- und MA-Profilen enthalten. Die Experten und Expertinnen aus der Industrie begründen das geringere Maß an psychischen Einschränkungen damit, dass psychische Erkrankungen eher verschwiegen oder geleugnet werden. Es wird daher von einer deutlich größeren Anzahl an psychischen Einschränkungen ausgegangen.

Vergleich der Arbeitsplatz- und Mitarbeitenden-Eigenschaften: Die Anforderung ist durch die Entwicklung von strukturierten und analog aufgebauten MA- und AP-Profilen vollständig erfüllt. Dabei können die einzelnen Kriterien mit Hilfe von Bewertungsskalen

quantifiziert und verglichen werden. Bei dem automatischen AP- und MA-Vergleich werden nicht erfüllte Kriterien rot und erfüllte Kriterien grün angezeigt. Die Farbcodierung erleichtert die Nutzung des Profilvergleichs. Die prozentuale Übereinstimmung zwischen Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden und die Erfüllung kritischer Kriterien wurde von den Experten und Expertinnen besonders positiv hervorgehoben.

Forschungsfrage 2:

Messung physischer und psychischer Beanspruchung: Das Kriterium gilt durch die Entwicklung eines Vorgehens zur Auswahl von Fragebögen und Smart Devices zur Beanspruchungsmessung als erfüllt. Dabei werden zunächst geeignete Fragebögen ausgewählt, bevor mögliche Vitalparameter selektiert werden. Darüber hinaus werden anwendungsspezifische Restriktionen, wie das Verbot von Schmuck, berücksichtigt. Abschließend werden beispielhafte Wearables zur Beanspruchungsmessung einer Gerätekategorie, zum Beispiel Brustgurte, angezeigt.

Prognose physischer und psychischer Beanspruchung: Das Kriterium gilt als teilweise erfüllt, da Abweichungen der Borg- und NASA-Werte zu den realen physischen und psychischen Beanspruchungen zu verzeichnen sind. Um die Prädiktionsgenauigkeit des Modells zu prüfen, wurde einerseits die gemessene Beanspruchung der ursprünglichen Studie zur Erstellung des Prädiktionsmodells und andererseits die Beanspruchung im Rahmen einer Validierungsstudie mit Hilfe des Modells prädiziert. Die erfassten Beanspruchungsdaten der Studie zur Erstellung des Prädiktionsmodells weichen von den prognostizierten Werten um 0,97 Borg-Punkte (Abweichung um 6,9 %) und 1,49 NASA-Punkte (Abweichung um 7,4 %) ab.

Die Validierungsstudie wurde mit 20 MAN-Mitarbeitenden im InnovationLab am *iwb* durchgeführt. Da bei der primären Studie zur Erstellung des Prädiktionsmodells Covid-19-bedingt keine Werkenden von MAN teilnehmen konnten, wird mit dieser Validierungsstudie die Prädiktionsgenauigkeit für das Probandenkollektiv der Werkenden überprüft. Die Probanden führten die gleiche Montageaufgabe wie zur Erstellung des Prädiktionsmodells durch (siehe Abschnitt 5.2.2), siehe Abbildung 7-4. Sie meldeten nach jeder Montagerunde die individuelle reale Beanspruchung über die Werkenden-Applikation zurück, welche dann mit der prädizierten Beanspruchung verglichen wurde. Dabei zeigte sich, dass die Borg-Werte in der Validierungsstudie um 3,19 Borg-Punkte (22,8 %) und die NASA-Werte um 3,84 Punkte (19,2 %) abweichen. Die Prädiktion stellt somit eine gute erste Einordnung der Beanspruchung dar und verbessert sich durch die ständige Rückmeldung realer Beanspruchungsdaten der Mitarbeitenden.



Abbildung 7-4: Werker des Anwendungspartners bei der Validierungsstudie im *iwb*-InnovationLab

Forschungsfrage 3:

Generierung von Personaleinsatzplänen: Die Anforderung gilt als vollständig erfüllt, da die Rotationslogik beanspruchungs- und kompetenzorientierte Einsatzpläne erstellt. Dabei werden zunächst die AP-Kompetenzanforderungen und die MA-Kompetenzen im Algorithmus verglichen, damit nur passende AP-MA-Konstellationen ermöglicht werden. Anschließend werden für die einzelnen AP-MA-Konstellationen der Einsatzpläne die physische und psychische Beanspruchung berechnet. Daraufhin werden nur Einsatzpläne berücksichtigt, welche die individuellen Grenzwerte physischer und psychischer Beanspruchung einhalten. Die darauffolgende Zielfunktion identifiziert die beanspruchungsminimalsten Einsatzpläne und schlägt diese den Planenden priorisiert vor.

Interaktionsschnittstellen zu Planenden und Mitarbeitenden: Die Anforderung ist vollständig erfüllt, da einerseits das Planungs-Tool den Planenden drei priorisierte Einsatzpläne vorschlägt, aus denen die finale Einsatzplanung ausgewählt wird. Andererseits bietet die Werkenden-Applikation den Mitarbeitenden die Möglichkeit, die ausgewählte Einsatzplanung einzusehen und aktiv während oder nach einer Rotation Rückmeldung über die tatsächliche Beanspruchung zu geben.

7.2 Bewertung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses

Um die Relevanz und Sinnhaftigkeit der entwickelten Anwendungsmethode zur Implementierung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Einsatzplanung zu überprüfen, wird eine Bewertung des erwarteten Nutzens und des zu leistenden Aufwands durchgeführt. Diese Aufwand-Nutzen-Bewertung liefert einen Überblick über die Wirtschaftlichkeit der Anwendungsmethode. Dafür werden zuerst die initialen Aufwände der Einführung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung und die kontinuierlichen Aufwände der Nutzung der Einsatzplanung aufgelistet.

Anschließend wird der Nutzen der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Einsatzplanung erläutert und in Relation zu den Aufwänden der aktuellen Personaleinsatzplanung gesetzt. Die zeitliche Abschätzung basiert dabei auf einer Messung bei der prototypischen Umsetzung sowie auf den Erfahrungen und Einschätzungen der Experten und Expertinnen bei MAN, siehe Abbildung B-3.

Initiale Aufwände

- ***Anschaffungskosten:*** Für die initiale Handkraftmessung wird ein Dynamometer benötigt, welches ca. 50 € kostet. Für die Nutzung der Applikationen werden keine neuen Geräte benötigt, da das Planungs-Tool auf den vorhandenen Computern genutzt werden kann und für die Rückmeldung der Mitarbeitenden dienstliche Handys, Privatgeräte oder der Computer der Arbeitsgruppe verwendet werden können.
- ***Unternehmensspezifische Anpassungen:*** Zur unternehmensspezifischen Anpassung der entwickelten Applikationen und deren Software werden circa drei Personentage angesetzt.
- ***Erstellung des Einführungsworkshops:*** Für die Erstellung des Workshops werden fünf Personentage veranschlagt, um die Applikation und die übergeordnete Einsatzplanung den Mitarbeitenden zu erläutern.
- ***Technische Umsetzung:*** Für das Installieren des Planungs-Tools pro Computer circa zehn Minuten benötigt. Für die Installation der Werkenden-Applikation benötigen die Mitarbeitenden circa fünf Minuten.
- ***Initiale Datenerhebung:*** Zur Einführung der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Einsatzplanung werden initiale Daten der Mitarbeitenden und Arbeitsplätze benötigt. Auf Seiten der Mitarbeitenden sind die Kompetenzen sowie die physischen und psychischen Leistungsvoraussetzungen erforderlich. Diese werden anhand der Kriterien im MA-Profil und mit Hilfe der Fragebögen WAI und SSCS erfasst. Das einmalige Ausfüllen der ergonomischen Kriterien im MA-Profil durch die Personalplanenden dauert circa zehn Minuten, das Beantworten der Fragebögen durch die Werkenden ebenfalls circa zehn Minuten pro Person. Die Fragebögen können direkt digital am Tablet, Smartphone oder Computer bearbeitet werden. So entsteht kein zusätzlicher Aufwand zum Übertragen der Daten und die Mitarbeitenden können die Fragebögen ggf. zeitlich flexibel beantworten. Die Handkraftmessung dauert ungefähr fünf Minuten pro Person und kann beispielsweise beim Betriebsarzt im Rahmen der ärztlichen Routinekontrolle durchgeführt werden. Darüber hinaus können die Kompetenzen aus den bereits vorhandenen Kompetenzmatrizen ausgelesen und in das MA-Profil eingetragen

werden (fünf Minuten). Neben den MA-Daten bewerten die Planenden die Arbeitsplätze eines Arbeitsbereichs. Dafür werden analog zu den Mitarbeitenden die Kompetenzanforderungen und ergonomischen Voraussetzungen der Arbeitsplätze mit Hilfe des AP-Profiles und der Arbeitsplatzbewertungen EAWS und KPB erfasst. Die Bewertung der Arbeitsplätze mittels EAWS und KPB beinhaltet ein längeres Beobachtungsinterview und eine anschließende Auswertung, weswegen hier Personalplanende oder Ergonomieexperten und Expertinnen pro Arbeitsplatz circa 90 Minuten benötigen. Falls ein Unternehmen bereits EAWS oder KPB als Bewertung im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung nutzt, sind keine weiteren Aufwände für die AP-Bewertung vorzusehen. Das Ausfüllen eines AP-Profiles mit den vorhandenen Kompetenzanforderungen und den ergonomischen Kriterien dauert zusammen circa zehn min pro Arbeitsplatz. Der Aufwand der beteiligten Werkenden zur initialen Datenerhebung beträgt somit circa 15 Minuten. Für die Planenden fallen zur Erfassung der MA-Daten initial pro Person circa 15 Minuten an und pro Arbeitsplatz circa 70 Minuten.

- **Schulung der Mitarbeitenden:** Zur erfolgreichen Einführung der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung ist eine initiale Schulung der beteiligten Werkenden und Planenden erforderlich. Einerseits werden der Nutzen der Einsatzplanung und andererseits die Funktionalität der Applikation für die Mitarbeitenden bzw. das Planungs-Tool erläutert. Die Erklärung des Nutzens ist essenziell für die Akzeptanz und die Teilnahme der Nutzenden. Die Vorstellung der technischen Funktionalitäten der erstellten Applikation ist besonders für ältere Mitarbeitende von Bedeutung, falls gängige App-Symbole nicht bekannt sind. Für die Teilnahme an einer initialen Einführungsschulung werden pro Person (Werkende und Planende) circa 30 Minuten veranschlagt.

Kontinuierliche Aufwände

- **Erstellung der Einsatzpläne:** Die Generierung der Einsatzpläne für eine Rotation (z. B. einmal täglich) dauert für die Planenden circa fünf Minuten. Dabei werden nach der Angabe der verfügbaren Mitarbeitenden im Planungs-Tool die drei vorgeschlagenen Optionen für Einsatzpläne verglichen und eine Option ausgewählt. Die benötigten fünf Minuten zur Erstellung der Einsatzpläne werden bei der Gegenüberstellung der Aufwände und Nutzen bei den Zeitersparnissen berücksichtigt.
- **Rückmeldung der realen Beanspruchung:** Die Mitarbeitenden melden bei jeder Rotation ihre reale Beanspruchung über die Werkenden-Applikation zurück. Das Beantworten der Fragebögen in der Applikation dauert circa fünf Minuten.

- **Aktualisierung der Daten:** Die AP- sowie die MA-Profile sollten regelmäßig aktualisiert werden, beispielsweise wenn es Änderungen am Arbeitsplatz gibt, Mitarbeitende Kompetenzen erwerben oder neue gesundheitliche Einschränkungen hinzukommen. Hierfür fällt ein Zeitaufwand für die Planenden von jährlich circa 15 Minuten pro MA und circa 70 Minuten pro AP an. Diese Aufwände sind jedoch nur minimal größer im Vergleich zur aktuellen Einsatzplanung, da die Arbeitsplatzbewertungen sowie die Mitarbeitendenkompetenzen ebenso aktualisiert werden. Lediglich das Aktualisieren der Leistungsvoraussetzungen und das Eintragen in das neue System nehmen zusätzlich Zeit in Anspruch.
- **Lizenzkosten:** Lizenzkosten für die beiden Anwendungswerkzeuge belaufen sich auf etwa 1.500 € pro Jahr, wobei die Preisschätzung der Experten und Expertinnen auf Basis anderer Applikationen der Personaleinsatzplanung und von Erfahrungswerten getroffen wurde.
- **Instandhaltung der Software:** Jährlich sind zwei Tage zur Analyse und Verbesserung der Werkenden-Applikation und des Planungs-Tools erforderlich.

Nutzen

Die verschiedenen Nutzen-Aspekte der Einführung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung lassen sich hinsichtlich ihrer Quantifizierbarkeit in zwei Gruppen einteilen (SCHEER 1978, S. 311, HOLZAPFEL 1992, S. 115). Diese sind quantitative, messbare Effekte, wie zum Beispiel die Senkung von Personalkosten durch die Reduktion der Planungszeiten, und qualitative, nicht eindeutig messbare Effekte, wie beispielsweise die Steigerung der Mitarbeitendenzufriedenheit oder die Verbesserung des Unternehmens-Images.

Hinsichtlich der quantitativen Effekte kann zudem zwischen direkt und indirekt monetär erfassbaren Effekten unterschieden werden. Bei den direkt monetär erfassbaren Effekten steht folgender Aspekt im Vordergrund, welcher nach einer Einführung der Personaleinsatzplanung zu einem quantitativ messbaren Kostenvorteil führt:

- **Reduktion der Planungszeiten:** Durch die Nutzung des Planungs-Tools und die automatische Erstellung von Einsatzplänen reduziert sich die benötigte Zeit zur täglichen und wöchentlichen Personalplanung von aktuell circa 40 Minuten pro Rotation auf circa fünf Minuten. Die Reduktion ist auf den automatischen Profilvergleich zwischen Mitarbeitenden und Arbeitsplätzen sowie auf die automatische Erstellung von beanspruchungsorientierten Einsatzplänen zurückzuführen.

Bei den monetär indirekt erfassbaren, quantitativen Effekten stehen folgende zwei Aspekte im Fokus. Diese Effekte könnten im Rahmen von Langzeitstudien gemessen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde auf die Erfahrungswerte der Experten und Expertinnen zurückgegriffen:

- **Reduktion der Arbeitsunfähigkeitstage:** Durch die beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzplanung wird die Gesundheit der Mitarbeitenden erhalten, wodurch die Arbeitsunfähigkeitstage reduziert werden. Die Experten und Expertinnen gehen von einer circa 3- bis 10 %-igen Reduktion der Arbeitsunfähigkeitstage aus.
- **Reduktion der menschverursachten Montagefehler:** Durch die regelmäßige Arbeitsplatzrotation wird die Monotonie am Arbeitsplatz reduziert, wodurch von einer Reduktion menschverursachter Montagefehler ausgegangen wird. Auf Basis der Erfahrungen der Experten und Expertinnen wird eine Reduktion der Montagefehler von circa 2 % bis 8 % vermutet, wobei für eine monetäre Bewertung die eventuell verhinderten Montagefehler und deren Kosten betrachtet werden müssen.

Bei den qualitativen, nicht direkt erfassbaren Effekten sind die Vorteile erst zu einem späteren Zeitpunkt messbar und oft nicht eindeutig auf eine spezifische Ursache zurückzuführen. Der Fokus liegt auf folgenden drei Effekten, welche im Rahmen von Gesprächen mit Experten und Expertinnen aus der Industrie identifiziert wurden, siehe Abbildung 7-5. Diese Effekte werden im Rahmen der Kosten-Nutzen-Bewertung nicht in monetäre Größen übertragen, da die Rahmenbedingungen unberücksichtigt bleiben und keine Vergleichsstudien vorliegen.

- **Steigerung der Mitarbeitendenzufriedenheit:** Die Zufriedenheit der Mitarbeitenden steigt aufgrund der Fairness und Transparenz der neuen Planungs-Systematik, da das neutrale Planungs-Tool nach klaren Kriterien und nicht auf Basis personeller Präferenzen der Teamleitenden entscheidet. Zudem wird den Mitarbeitenden kommuniziert, dass nach gegebenenfalls höheren Beanspruchungsphasen Rotationen mit geringerer Beanspruchung folgen, was zu einer fairen Verteilung führt. Vor allem leistungstragende, vielseitig einsetzbare Teammitglieder, die oft durchgehend an den stark belastenden Arbeitsplätzen tätig sind, werden durch das Planungs-Tool vor einer Überbeanspruchung geschützt. Zudem werden die Mitarbeitenden in die Einsatzplanung integriert, indem sie Rückmeldung zu ihrer realen Beanspruchung geben können. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die Zufriedenheit steigt, wenn die Mitarbeitenden nicht physisch oder psychisch überlastet sind. Diese gesundheitsförderliche Maßnahme der beanspruchungs- und

kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung zeigt außerdem Interesse des Unternehmens am Wohlergehen der Mitarbeitenden und drückt Wertschätzung aus, was wiederum die Zufriedenheit der Mitarbeitenden fördert.

- **Steigerung des Unternehmens-Images:** Der präventive Gesundheitsschutz durch die entwickelte Personaleinsatzplanung wirkt sich positiv auf das Unternehmens-Image aus, da vor allem jüngere Arbeitsgenerationen großen Wert auf den Erhalt der Gesundheit sowie Mitbestimmung bei den eigenen Tätigkeiten legen. Diese Aspekte können sich positiv auf arbeitssuchende Fachkräfte auswirken und zur Minderung des Fachkräftemangels im Unternehmen beitragen.
- **Reduktion der Fluktuation:** Durch die bereits erläuterten positiven Effekte, die Steigerung der Mitarbeitenden-Zufriedenheit und die Steigerung des Unternehmens-Images sowie den zugrunde liegenden präventiven Schutz der Mitarbeitenden-Gesundheit wird sich die Fluktuation von Fachkräften reduzieren. Der auf den Erhalt der Mitarbeitenden-Gesundheit gelegte Fokus ist ein Alleinstellungsmerkmal, da aktuell keine weiteren Einsatzplanungskonzepte im Produktionsumfeld mit vergleichbaren mitarbeitendenorientierten Aspekten bekannt sind.

| Nutzen | Einsparung |
|--|---|
| Quantitative Nutzen | |
| Reduktion der Planungszeiten | Zeitersparnis von 35 min pro Rotation |
| Reduktion der Arbeitsunfähigkeitstage | Reduktion der Lohnkosten (ca. 3 – 10 %) |
| Reduktion der menschverursachten Montagefehler | Reduktion der Montagefehler (ca. 2 – 8 %) |
| Qualitative Nutzen | |
| Steigerung der Mitarbeitendenzufriedenheit | qualitativ |
| Steigerung des Unternehmens-Images | qualitativ |
| Reduktion der Fluktuation | qualitativ |

Abbildung 7-5: Übersicht des qualitativen und quantitativen Nutzens

Zur Verdeutlichung der Vorteile werden in Abbildung 7-6 die aktuellen zeitlichen Aufwände zur Erstellung einer Einsatzplanung und die Aufwände zur Erstellung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung gegenübergestellt. Dafür wird die Erstellung einer Einsatzplanung für einen beispielhaften Arbeitsbereich mit sechs Arbeitsplätzen, sechs Mitarbeitenden und einer planenden Person betrachtet. Die Berechnung bezieht sich auf den Einsatz der Rotationsplanung in einem Jahr und einer täglichen Rotation (fünf Tage pro Woche, 47 Arbeitswochen). Zudem erfolgt eine monetäre Bewertung mit Hilfe kalkulatorischer Lohnkosten (HOLZAPFEL 1992, S. 134).

| | | Personaleinsatzplanung | | | |
|--|--|---|--------------------|---|---------------------|
| | | aktuell | | beanspruchungs- und kompetenzorientiert | |
| Nr. | Beschreibung | Anzahl | Aufwand in Euro | Anzahl | Aufwand in Euro |
| Initiale Kosten | | | | | |
| 1 | Anschaffungskosten | 0 | 0,00 € | Dynamometer | 50,00€ |
| 2 | unternehmensspezifische Anpassungen | 0 | 0,00 € | 3 Tage | 2.700,00 € |
| 3 | Erstellung des Einführungsworkshops | 0 | 0,00 € | 5 Tage | 4.500,00 € |
| 4 | technische Umsetzung | 1 | 0,00 € | MA: je 5 min Planende: 10 min | 28,00 € 19,00 € |
| 5 | initiale Datenerhebung | 0 | 0,00 € | MA: je 15 min Planende: 15 min pro MA, 70 min pro AP | 84,00 € 956,00 € |
| 6 | Schulung der Mitarbeitenden | 0 | 0,00 € | pro Person 30min | 225,00 € |
| Gesamtbetrag initiale Kosten | | | 0,00 € | | 8.562,00 € |
| Laufende Kosten (pro Jahr) | | | | | |
| 7 | Erstellung der Einsatzplanung durch Planende | 235x pro Jahr, Dauer 40 min → 20 Tage | 18.000,00 € | 235x pro Jahr, Dauer 5 min → 2,5 Tage | 2.250,00 € |
| 8 | Rückmeldung der Beanspruchung | 0 | 0,00 € | MA: je 5 min | 6.610,00 € |
| 9 | Aktualisierung der Daten | Planende: 5 min pro MA, 70 min pro AP | 855,00 € | Planende: 15 min pro MA, 70 min pro AP | 956,00 € |
| 10 | Lizenzkosten der Software | 0 | 0,00 € | 1 Stück | 2.500,00 € |
| 11 | Instandhaltung der Software | 0 | 0,00 € | 2.5 Tage | 2.250,00 € |
| Gesamtbetrag laufende Kosten (pro Jahr) | | | 18.855,00 € | | 14.566,00 € |

Abbildung 7-6: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für einen Arbeitsbereich

Da keine neuen Endgeräte benötigt werden, fallen lediglich Anschaffungskosten für das Dynamometer in Höhe von ca. 50 € an. Die initialen Aufwände für unternehmensspezifische Anpassungen umfassen in der Kostenabschätzung drei Personentage und die Erstellung des Einführungsworkshops nimmt circa fünf Personentage von Entwickelnden in Anspruch. Dabei wird in Anlehnung an HÖLLTHALER (2021, S. 155) ein durchschnittlicher Personalkostensatz von Planenden und Entwickelnden von 900 € pro Tag und in Anlehnung an TEUBNER (2021, S. 161) ein durchschnittlicher

Personalkostensatz von Werkenden von 450 € pro Tag angesetzt. Bei der technischen Umsetzung werden pro Werker:in fünf Minuten für die Installation der Werkenden-Applikation am privaten Smartphone und für die Planenden zehn Minuten für das Einrichten des Planungs-Tools am Computer veranschlagt. Zudem fallen bei der initialen Datenerhebung zeitliche Aufwände für die Mitarbeitenden (15 Minuten) und für die Planenden (15 Minuten pro MA und 70 Minuten pro AP) an. Alle Beteiligten nehmen an dem Einführungsworkshop teil, was pro Person circa 30 Minuten ausmacht. Somit entsteht bei der Einführung der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Einsatzplanung ein finanzieller initialer Aufwand von circa 8.562 €.

Zu den kontinuierlichen jährlichen Kosten zählt die tägliche Erstellung der Einsatzplanung, welche mit der aktuellen Planungsmethode circa 40 Minuten pro Tag in Anspruch nimmt und circa 235-mal pro Jahr ausgeführt wird. Die neue Einsatzplanung benötigt hingegen nur fünf Minuten pro Einsatzplan, es kommen jedoch die tägliche Rückmeldung der Werkenden sowie Lizenzkosten und Kosten für die Instandhaltung der Software hinzu. Hinsichtlich der Aktualisierung der Daten werden bei der aktuellen Planung circa fünf Minuten pro MA und 70 Minuten für eine Arbeitsplatzbewertung veranschlagt. Da das Ausfüllen der Profile bei der neuen Einsatzplanung hinzukommt, wird hierbei von einem Zeitbedarf von 15 Minuten pro MA und ebenfalls 70 Minuten pro AP ausgegangen. Die kontinuierlichen Kosten der aktuellen Planung belaufen sich somit auf 18.855 €, die neue beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzplanung erfordert 14.566 € jährlich.

Zur Berechnung der Amortisationsdauer werden die initialen Kosten (8.562 €) durch die Differenz des Gesamtbetrags der laufenden Kosten der aktuellen Planung (18.855 €) mit dem Gesamtbetrag der laufenden Kosten der neuen Einsatzplanung (14.566 €) geteilt. Zusammenfassend kann somit festgehalten werden, dass eine Amortisierung der beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzplanung für eine Arbeitsgruppe nach etwa 1,9 Jahren erreicht ist. Wenn die jährlichen Einsparungen ungefähr die Hälfte der initialen Ausgaben darstellen, wird eine Amortisationszeit von ca. 2 Jahren erreicht, was in der Praxis als Anhaltspunkt für Investitionen gesehen wird. Somit ist die wirtschaftliche Abschätzung leicht auf andere Anwendungsfälle zu übertragen. Bei dieser Abschätzung sind jedoch nicht die positiven Auswirkungen der qualitativen, nicht direkt monetär erfassbaren Effekte berücksichtigt. Zudem sind die weiteren Vorteile zu berücksichtigen, wenn mehrere Arbeitsgruppen am Montageband die entwickelte Einsatzplanung nutzen. Diese Kostenaufstellung stellt daher eine grobe Abschätzung dar, und dient nur als erster Anhaltspunkt. Limitationen

Im Rahmen dieses Abschnitts wird auf Limitationen der entwickelten beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung eingegangen.

Zusammensetzung des Probandenkollektivs zur Erstellung des Prädiktionsmodells:

Aufgrund von Covid-19-Restriktionen konnten keine Industriepartner als Testpersonen für die Studie zur Erstellung des Prädiktionsmodells genutzt werden. Deswegen sind die 61 Testpersonen der Studie in Abschnitt 5.2 nicht gleichmäßig über alle Alters- und Geschlechtsgruppen verteilt (Alter: 21 bis 66 Jahren; Geschlecht: 13 Frauen, 48 Männer).

Das Prädiktionsmodell aus Baustein 2 (Abschnitt 5.2.2) basiert auf den erhobenen Studiendaten, weswegen eine Validierungsstudie mit Mitarbeitenden von MAN zur Kontrolle der Prädiktionsgenauigkeit durchgeführt wurde. Bei der Validierungsstudie standen nur Männer als Versuchspersonen aus der Montage zur Verfügung, weshalb die Prädiktionsgenauigkeit für Frauen nicht geprüft wurde. Da das Prädiktionsmodell durch die Rückmeldung der realen Beanspruchungen die Datenbasis erweitert, steigt die Prädiktionsgenauigkeit. Die aktuelle Beanspruchungsprädiktion liefert somit einerseits das allgemeine Vorgehen zur Erstellung des Prädiktionsmodells und dessen Nutzung im Rahmen der beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung und liefert andererseits einen guten Prognosewert für die Beanspruchung, der durch die iterative Anpassung das Modell verbessert.

Tabuisierung psychischer Beschwerden

Körperliche Erkrankungen sind in der Gesellschaft deutlich etablierter als psychische Erkrankungen, die oft noch tabuisiert und als persönliche Schwäche deklariert werden (MEHTA & THORNICROFT 2010, S. 26, WALLNER 2020, S. 4). Dies führt dazu, dass psychische Überbeanspruchung weniger oft kommuniziert wird. Sie äußert sich jedoch häufig durch physische Beschwerden, wie beispielsweise eine erhöhte Herzrate, Verspannungen oder Verdauungsprobleme. Daher erfolgen mehr Rückmeldungen aufgrund der körperlichen Beschwerden als aufgrund psychischer Überforderung. In der Werkenden-Applikation wird bei der Rückmeldung physischer und psychischer Beanspruchung daher nicht in physisch und psychisch unterschieden, sondern rein auf die Fragen des NASA-RTLX eingegangen, wie zum Beispiel Zeitdruck, Leistungsanforderung und Frustration. Trotzdem kann es infolge der Tabuisierung zu einer verminderten Rückmeldung in Bezug auf psychische Aspekte kommen.

Keine klare Trennung physischer und psychischer Beanspruchung

Durch die Doppeldeutigkeit physischer Beschwerden aufgrund physischer und/oder psychischer Überbeanspruchung ist eine klare Unterscheidung oft schwierig. Ebenso ist eine getrennte Messung physischer und psychischer Beanspruchung bei einer gleichzeitig körperlichen und geistigen Tätigkeit nicht eindeutig möglich. Sogar die Fragebögen zur subjektiven Erfassung physischer und psychischer Beanspruchung fragen entweder nach der allgemeinen Verfassung (Borg-Skala) oder integrieren direkt die physische Belastung als ein Kriterium, wie bei NASA-RTLX. Um diesen Effekt abzumildern, wird bei der Auswahl der Einsatzplanungen zuerst die Gesamtbeanspruchung (physisch und psychisch zusammen) betrachtet, bevor die einzelnen Beanspruchungen zur Vermeidung von Extremwerten untersucht werden. Zudem lernt das Prädiktionsmodell durch die iterative Anpassung aufgrund der Rückmeldung realer Beanspruchungswerte der Mitarbeitenden.

Festlegung von Grenzwerten für Unter- und Überbeanspruchung

Das Planungs-Tool priorisiert aktuell die drei Einsatzpläne mit der geringsten Gesamtbeanspruchung der Arbeitsgruppe. Durch die Auflistung der personenindividuellen physischen und psychischen Beanspruchungen können einzelne Über- und Unterbeanspruchungen detektiert werden. Diese Grenzwerte könnten als Randbedingung beim Algorithmus hinterlegt werden. Im implementierten Planungs-Tool wurden generelle Grenzwerte zur Vermeidung von Überbeanspruchung definiert, da einerseits bei einer täglichen Rotation eine Unterbeanspruchung an einzelnen Tagen weniger kritisch ist als eine Überbeanspruchung. Andererseits kommt laut den Werkenden und Planenden im Anwendungsbeispiel keine Unterbeanspruchung vor. Trotzdem wäre es sinnvoll, hier Grenzwerte zur Vermeidung von Unterbeanspruchung hinzuzufügen.

Ausnutzen des Systems zur Rückmeldung realer Beanspruchung

Falls Mitarbeitende über einen längeren Zeitraum eine hohe physische und psychische Beanspruchung über die Werkenden-Applikation rückmelden, würde sich die Beanspruchungsprädiktion anpassen und gegebenenfalls weniger beanspruchende Arbeitsplätze für diese Person präferieren. Damit das System an dieser Stelle nicht ausgenutzt werden kann, ist regelmäßig ein Gespräch gemeinsam mit den Mitarbeitenden, Planenden und dem Gesundheitswesen durchzuführen, um die Entwicklung der individuellen Leistungsvoraussetzungen zu diskutieren. Dabei können Veränderungen ärztlich attestiert und entsprechend der Leistungswandlung passende Arbeitsplätze identifiziert werden.

Begrenzung des Betrachtungsbereichs

Der Betrachtungsbereich ist die taktgebundene manuelle Montage, da durch die zeitliche Bindung und die manuellen Montagetätigkeiten sowohl eine erhöhte psychische als auch physische Belastung vorliegt. Die Methode ist auf andere Anwendungsbereiche übertragbar, sofern die gleichen Arbeitsplatzbewertungsmethoden (KPB, EAWS) angewendet werden können (gleichbleibende Tätigkeiten pro AP) und manuelle Montagetätigkeiten vorliegen. Das Prädiktionsmodell kann zudem auch bei leicht abweichenden Szenarien genutzt werden, da es sich durch die Rückmeldung realer Beanspruchung an die neuen Gegebenheiten anpasst. Zu Beginn einer Nutzung in einem anderen Bereich ist die Abweichung der prädizierten Beanspruchung zur realen Beanspruchung somit gegebenenfalls größer, wird aber über die Zeit durch die neu erfassten Daten und deren Integration in das Prädiktionsmodell geringer und führt zu einer besseren Einsatzplanung der Mitarbeitenden.

Keine Berücksichtigung sozialer Beziehungen in der Arbeitsgruppe

Die entwickelte Einsatzplanung berücksichtigt die individuelle Beanspruchung und die Kompetenzen der Mitarbeitenden bei der Einsatzplanung. Soziale Beziehungen zwischen Mitgliedern einer Arbeitsgruppe, zum Beispiel Präferenzen bei der Teamarbeit, werden bei der Planung nicht betrachtet. Da die Mitarbeitenden aber aus verschiedenen Kulturkreisen, sozialen Schichten oder Altersgruppen kommen, kann es durchaus zu zwischenmenschlichen Konflikten und Auseinandersetzungen am Montageband kommen, sodass eine Zusammenarbeit im Zweifelsfall nicht möglich ist. Diese Aspekte werden bisher von den Planenden aufgrund ihrer Personen-Kenntnisse in die Planung integriert. Trotz des Einsatzes des Planungs-Tools, liegt diese Aufgabe weiterhin bei den Planenden, die bei der Auswahl einer der drei präferierten Einsatzplanungen im Planungs-Tool zusätzlich die MA-Konstellationen hinsichtlich sozialer Aspekte prüfen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst zunächst die **wichtigsten Inhalte der Forschungsarbeit** zusammen (Abschnitt 8.1) und schließt mit einem **Ausblick auf weitere Forschungsthemen** (Abschnitt 8.2).

8.1 Zusammenfassung

Die Herausforderungen der abnehmenden physischen und psychischen Leistungsfähigkeit der alternden Belegschaft einerseits und der zunehmenden Komplexität durch eine steigende Produktindividualisierung andererseits prägen das industrielle Produktionsumfeld. Die Berücksichtigung dieser Herausforderungen ist besonders in der personenintensiven manuellen Montage von Bedeutung. Eine Möglichkeit zur Bewältigung dieser Herausforderung sind organisatorische Maßnahmen der Personaleinsatzplanung.

Um eine solche organisatorische Maßnahme der Personaleinsatzplanung im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickeln, wurde zunächst auf grundlegende Aspekte der manuellen Montage, der Belastung und Beanspruchung und deren Messung sowie der Personaleinsatzplanung eingegangen. Anschließend wurden im Stand der Erkenntnisse aktuelle belastungs-/beanspruchungs- und kompetenzorientierte Ansätze der Personaleinsatzplanung vorgestellt. Dabei bleiben psychische Aspekte sowie die individuelle physische und psychische Beanspruchung in aktuellen Ansätzen meist unberücksichtigt. Basierend auf den Forschungsfragen, den Grundlagen und den aktuellen Ansätzen wurden Anforderungen an die zu entwickelnde Personaleinsatzplanung gestellt. Allgemeine und anwendungsbezogene Anforderungen sorgen für eine wissenschaftliche und praxistaugliche Erstellung und Nutzung. Die inhaltlichen Anforderungen legen den Fokus auf die Integration von physischer und psychischer Beanspruchung und Kompetenzen bei der Personaleinsatzplanung.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine Methode zur beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung in der taktgebundenen manuellen Montage entwickelt. Dies erfolgte anhand von drei Bausteinen, aus denen anschließend eine dreistufige Anwendungsmethode hervorgeht. In Baustein 1 wurde zunächst ein Systemmodell zur Beschreibung wesentlicher Elemente im menschenorientierten Arbeitssystem aufgestellt, bevor anschließend detaillierte Profile für die Systemelemente

Mitarbeitende und Arbeitsplätze sowie eine Bewertungslogik für den Profilvergleich entwickelt wurden. Die erstellten AP- und MA-Profile mit den enthaltenen Vergleichskriterien stellen die Antwort auf Forschungsfrage 1 dar. Im zweiten Baustein folgte die Analyse zahlreicher Beanspruchungsmessmethoden im Rahmen eines Methodenbaukastens sowie die Erstellung des Prädiktionsmodells zur Prognose der individuellen physischen und psychischen Beanspruchung. Das Ergebnis dieses Bausteins beantwortet Forschungsfrage 2 mit den ausgewählten Messmethoden und dem finalen Prädiktionsmodell der Beanspruchung. Abschließend folgte in Baustein 3 die Generierung von Personaleinsatzplänen mit Hilfe der Rotationslogik sowie die Gestaltung von Interaktionsschnittstellen zu den Planenden und Mitarbeitenden. Die mit Hilfe der Rotationslogik generierten Personaleinsatzpläne werden im Planungs-Tool den Planenden zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus können die Mitarbeitenden die reale physische und psychische Beanspruchung in der Werkenden-Applikation rückmelden. Die Logik sowie die Interaktionsschnittstellen beantworten Forschungsfrage 3. Basierend auf den drei Methodenbausteinen wurde eine Anwendungsmethode entwickelt. Bei der dreistufigen Anwendung der Methode müssen Unternehmen lediglich die Daten der Arbeitsplätze und Mitarbeitenden initial mit den AP- und MA-Profilen erfassen (Schritt 1), die Einsatzpläne mit Hilfe des Planungs-Tools erstellen (Schritt 2) und die Rückmeldung der Mitarbeitenden per Applikation ermöglichen (Schritt 3), siehe Abbildung 8-1.

Hinsichtlich der angestrebten industriellen Ziele kann abschließend festgehalten werden, dass die entwickelte beanspruchungs- und kompetenzorientierte Einsatzplanung einerseits die zeitlichen Aufwände bei der Einsatzplanung deutlich reduziert (industrielles Ziel 1). Andererseits bietet sie eine Möglichkeit zum Erhalt der Gesundheit und dadurch der Leistungsfähigkeit der Mitarbeitenden (industrielles Ziel 2). Die beiden angestrebten industriellen Ziele werden somit erfüllt und es wird aktiv den Herausforderungen des Produktionsumfelds begegnet. Durch die Einführung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung kann somit der Produktionsstandort Deutschland gestärkt werden.

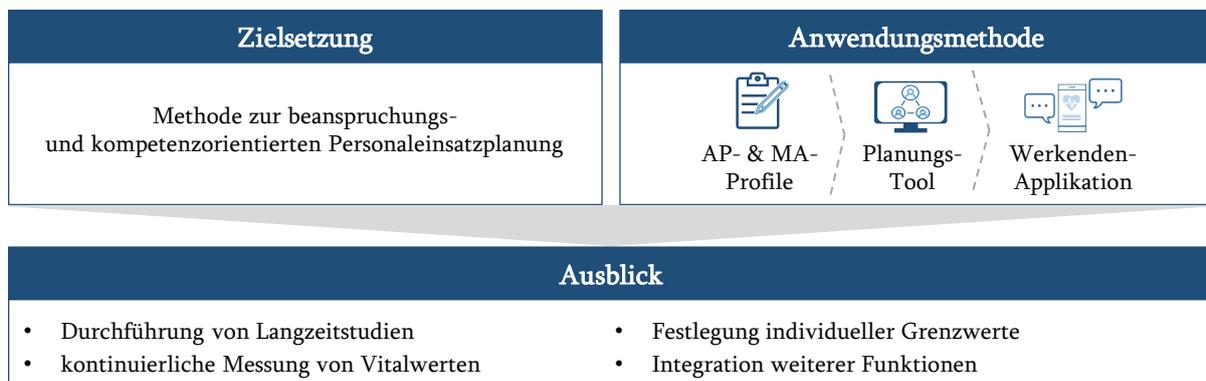


Abbildung 8-1: Zusammenfassende Übersicht der Zielsetzung, der Anwendungsmethode und weiterführender Forschungsthemen

8.2 Ausblick

Das entwickelte Vorgehen zur Erstellung, Implementierung und Nutzung einer beanspruchungs- und kompetenzorientierten Personaleinsatzplanung unterstützt Unternehmen beim Erhalt der Gesundheit und dadurch beim Erhalt der Leistungsfähigkeit der Mitarbeitenden. Die Forschungsergebnisse ebnen den Weg für einen Einsatz in der Praxis, dennoch werden weitere Forschungsbedarfe in folgenden Themen gesehen:

Durchführung von Langzeitstudien: Um die positiven Effekte der Personaleinsatzplanung vollumfänglich beurteilen zu können, ist eine Analyse der Effekte nach mehrmonatiger und mehrjähriger Nutzung erforderlich. Dabei können beispielsweise die Reduktion der Arbeitsunfähigkeitstage, die Entwicklung der Fehlerquote oder die Auswirkungen auf Fluktuation und Mitarbeitendenzufriedenheit gemessen werden.

Kontinuierliche Messung von Vitalwerten: Für die im Rahmen der Forschungsarbeit entwickelte Einsatzplanung wird die physische und psychische Beanspruchung mit Hilfe des Prädiktionsmodells berechnet. Anstelle dieser Prädiktion könnten die Vitalwerte bei den Mitarbeitenden während der Montage mit Smart Devices gemessen werden und basierend auf den gemessenen Werten nächste Rotationen anstoßen. Die Auswahl von nicht einschränkenden Devices und die Festlegung individueller Grenzwerte sind dabei entscheidend.

Festlegung individueller Grenzwerte: Um die Einsatzplanung noch individueller an die einzelnen Mitarbeitenden anzupassen, könnten individuelle Grenzwerte im Rahmen von initialen Studien oder während realer Montagerunden erfasst werden. Dadurch könnten mögliche Unter- oder Überbeanspruchungen personenindividuell genauer festgelegt werden.

Integration weiterer Funktionen: In die Werkenden-Applikation könnten weitere Funktionen integriert werden, wie beispielsweise die Abwicklung von Urlaubsanträgen oder das tägliche Ein- und Ausstempeln. Diese zusätzlichen Funktionen waren aktive Vorschläge der befragten Mitarbeitenden, da zum Ein- und Ausstempeln häufig Umwege oder Warteschlangen in Kauf genommen werden. Zudem reduziert die digitale Beantragung von Urlaubstagen oder Schicht-Wechselwünschen Papier- und Kommunikationsaufwände, da die Rückmeldung über die eingereichten Anträge über die Werkenden-Applikation vorgenommen werden könnten.

Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2019

Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M.: Learning Factories. Cham: Springer International Publishing 2019. ISBN: 978-3-319-92260-7.

ADEM & DAĞDEVIREN 2021

Adem, A.; Dağdeviren, M.: A job rotation-scheduling model for blue-collar employees' hand–arm vibration levels in manufacturing firms. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing 31 (2021) 2, S. 174-190.

ADENAUER 2004

Adenauer, S.: Die (Re-)Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in den Arbeitsprozess. Das Projekt FILM bei FORD Köln. Angewandte Arbeitswissenschaften: Zeitschrift für die Unternehmenspraxis (2004) 181, S. 1-18.

AEPPLI ET AL. 2016

Aeppli, J.; Gasser, L.; Tettenborn, A.; Gutzwiller, E.: Empirisches wissenschaftliches Arbeiten. Ein Studienbuch für die Bildungswissenschaften. 4. Aufl. Bad Heilbrunn: Julius Klinkhardt 2016. ISBN: 978-3-838-54695-7. (4201).

AMIRATO CHIQUITO 2020

Amirato Chiquito, R.: Entwicklung einer Methode zur psychischen Arbeitsplatzbewertung in der manuellen Montage. (Bachelorarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

ANGERMANN 2020a

Angermann, P.: Entwicklung einer Zielfunktion zur Bewertung von Job-Rotationsplänen. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

ANGERMANN 2020b

Angermann, P.: Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Bewertung eines Rotationsplans in der manuellen Montage. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

ANLAUFT 2017

Anlauff, W.: Gestaltung von Job-Rotation in der Produktion (2017).

ANNEKEN 2006

Anneken, V.: Entwicklung und Überprüfung eines Assessmentmoduls zur FCE-basierten Beurteilung arbeitsbezogener Leistungsfähigkeit anhand des IMBA-Verfahrens. (Dissertation). Institut für Rehabilitation und Behindertensport, Deutsche Sporthochschule Köln (2006).

ANTON & WEILAND 1993

Anton, K.-H.; Weiland, D.: Soziale Kompetenz. Vom Umgang mit Mitarbeitern; zielorientiertes Sprechen, souveränes Verhalten, Teamfähigkeit, strategisches Denken. Düsseldorf, Wien: ECON-Taschenbuch 1993. ISBN: 3-612-21177-3. (Econ 21177).

ARANDA-DIEZ 2020

Aranda-Diez, M.: Methode zur anwendungsspezifischen Auswahl von Smart Devices zur Messung psychischer Beanspruchung in der manuellen Montage. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

ARKHIPOV ET AL. 2018

Arkhipov, D.; Battaïa, O.; Cegarra, J.; Lazarev, A.: Operator assignment problem in aircraft assembly lines: a new planning approach taking into account economic and ergonomic constraints. *Procedia CIRP* 76 (2018), S. 63-66.

ASENSIO-CUESTA ET AL. 2012

Asensio-Cuesta, S.; Diego-Mas, J. A.; Canós-Darós, L.: A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (2012) 60, S. 1161-1174.

ASENSIO-CUESTA ET AL. 2019

Asensio-Cuesta, S.; García-Gómez, J. M.; Poza-Luján, J.-L.; Conejero, J. A.: A Game-Theory Method to Design Job Rotation Schedules to Prevent Musculoskeletal Disorders Based on Workers' Preferences and Competencies. *International journal of environmental research and public health* 16 (2019) 23.

AYOUGH ET AL. 2012

Ayough, A.; Zandieh, M.; Farsijani, H.: GA and ICA approaches to job rotation scheduling problem: considering employee's boredom. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 60 (2012) 5-8, S. 651-666.

BAIG & KAVAKLI 2019

Baig, M. Z.; Kavakli, M.: A Survey on Psycho-Physiological Analysis & Measurement Methods in Multimodal Systems. *Multimodal Technologies and Interaction* 3 (2019) 2, S. 1-37.

BAKKER & DEMEROUTI 2017

Bakker, A. B.; Demerouti, E.: Job demands-resources theory: Taking stock and looking forward. *Journal of occupational health psychology* 22 (2017) 3, S. 273-285.

BARTENSCHLAGER & NÜRNBERG 2019

Bartenschlager, A.; Nürnberg, V.: Biotality-Index. Entwicklung Eines Tests Zur Bestimmung Von Individuellen und Arbeitsbezogenen Vitalitätsparametern. Wiesbaden: Springer 2019. ISBN: 978-3-658-25577-0.

BARTHELMEß 1987

Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung. (Dissertation) Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München. Berlin, Heidelberg: Springer 1987. ISBN: 978-3-540-18120-0. (iwb Forschungsberichte 9).

BARTHOLD & SCHÜTZ 2010

Barthold, L.; Schütz, A.: Stress im Arbeitskontext. Ursachen, Bewältigung und Prävention. Originalausgabe. Weinheim: Beltz 2010. ISBN: 978-3-621-28012-9.

BATES ET AL.

Bates, D.; Kliegl, R.; Vasishth, S.; Baayen, H.: Parsimonious Mixed Models: arXiv.

BATTAÏA ET AL. 2015

Battaïa, O.; Delorme, X.; Dolgui, A.; Hagemann, J.; Horlemann, A.; Kovalev, S.; Malyutin, S.: Workforce minimization for a mixed-model assembly line in the automotive industry. *International Journal of Production Economics* 170 (2015), S. 489-500.

BAUA 2019

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA): Gefährdungsbeurteilung bei physischer Belastung - die neuen Leitmerkmalmethoden (LMM): Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) 2019.

BAUR & BLASIUS 2014

Baur, N.; Blasius, J.: Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer 2014. ISBN: 978-3-531-17809-7.

BECK 2020

Beck, A.: Erstellung eines Kriterienkatalogs zur Rotationsplanung in der manuellen Montage. (Bachelorarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

BECK 2022

Beck, B.: Entwicklung eines rollenbasierten Kompetenzmodells von Führungskräften im Zuge der digitalen Transformation. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2022).

BERGMANN & GARRECHT 2021

Bergmann, R.; Garrecht, M.: Organisation und Projektmanagement. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2021. ISBN: 978-3-662-63753-1. (Lehrbuch).

BFW - UNTERNEHMEN FÜR BILDUNG 2017

BFW - Unternehmen für Bildung: Leitfaden für die Erstellung von passgenauen Qualifizierungen. Berufsbildungswerk Gemeinnützige Bildungseinrichtung des DGB GmbH. 2017.

BGHM 2021

BGHM: Beurteilen von Gefährdungen und Belastung. Anleitungshilfe zur systematischen Vorgehensweise, sichere Schritte zum Ziel. Berufsgenossenschaft für Holz und Metall. 2021. (BGHM-Information 102).

BILL 2020

Bill, J.: Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der ergonomischen, fachlichen, sozialen Anforderungsähnlichkeit von Arbeitsplätzen in der manuellen Montage. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

BLAND & ALTMAN 1999

Bland, J. M.; Altman, D. G.: Measuring agreement in method comparison studies. *Statistical Methods in Medical Research* 8 (1999) 2, S. 135-160.

BLÄSING ET AL. 2021

Bläsing, D.; Bornewasser, M.; Hinrichsen, S.: Informativische Assistenzsysteme. In: Bauer, W. et al. (Hrsg.): Arbeit in der digitalisierten Welt. Berlin, Heidelberg: Springer 2021, S. 257-271. ISBN: 978-3-662-62214-8.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L. T.; Chakrabarti, A.: DRM: A Design Research Methodology. London: Springer 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4.

BLEY & BOSSMANN 2005

Bley, H.; Bossmann, M.: Skelettmodelle in der Produktentwicklung und Produktionsplanung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 100 (2005) 9, S. 477-480.

BLICKLE 2019

Blickle, G.: Anforderungsanalyse. In: Nerdinger, F. W. et al. (Hrsg.): Arbeits- und Organisationspsychologie. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2019, S. 235-250. ISBN: 978-3-662-56666-4. (Springer-Lehrbuch).

BLUMBERG & KAUFFELD 2021

Blumberg, V. S.; Kauffeld, S.: Kompetenzen und Wege der Kompetenzentwicklung in der Industrie 4.0. Gruppe. Interaktion. Organisation. Zeitschrift für Angewandte Organisationspsychologie (GIO) 52 (2021) 2, S. 203-225.

BMBF 2018

BMBF: Microelectronics from Germany - Driver of innovation for the digital economy. The German Federal Government's Framework Programme for Research and Innovation 2016-2020. BMBF. 2018.

BÖCKELMANN & SEIBT 2011

Böckelmann, I.; Seibt, R.: Methoden zur Indikation vorwiegend psychischer Berufsbelastung und Beanspruchung — Möglichkeiten für die betriebliche Praxis. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 65 (2011) 3, S. 205-222.

BOENZI ET AL. 2015

Boenzi, F.; Digiesi, S.; Mossa, G.; Mummolo, G.; Romano, V. A.: Modelling Workforce Aging in Job Rotation Problems. IFAC-PapersOnLine 48 (2015) 3, S. 604-609.

BOENZI ET AL. 2016

Boenzi, F.; Digiesi, S.; Facchini, F.; Mummolo, G.: Ergonomic improvement through job rotations in repetitive manual tasks in case of limited specialization and differentiated ergonomic requirements. IFAC-PapersOnLine 49 (2016) 12, S. 1667-1672.

BOGNER ET AL. 2018

Bogner, E.; Löwen, U.; Franke, J.: Bedeutung der zukünftigen Produktion kundenindividueller Produkte in Losgröße 1. In: Redlich, T. et al. (Hrsg.): Interdisziplinäre Perspektiven zur Zukunft der Wertschöpfung. Wiesbaden: Springer 2018, S. 63-75. ISBN: 978-3-658-20264-4.

BOHANNON 2008

Bohannon, R.: Hand-Grip Dynamometry Predicts Future Outcomes in Aging Adults. Journal of Geriatric Physical Therapy 31 (2008) 1, S. 3-10.

BOKRANZ & KASTEN 2003

Bokranz, R.; Kasten, L.: Organisations-Management in Dienstleistung und Verwaltung. Gestaltungsfelder, Instrumente und Konzepte. 4. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag 2003. ISBN: 978-3-322-90378-5.

BONSAI STRATEGY 2022

Bonsai Strategy: Der neue Werteindex: Wie Deutschland denkt und fühlt.

<<https://www.bonsai-research.com/pressemedien/werteindex-groesste-social-media-studie-zum-gesellschaftliche-wandel-heute-veroeffentlicht>> - 03.11.2022.

BORG 1970

Borg, G. A.: Perceived exertion as an indicator of somatic stress. Scan J Rehab Med 2 (1970) 2, S. 92-98.

BÖRNER 2019

Börner, K.: Die Altersabhängigkeit der Beanspruchung von Montagemitarbeitern. Wiesbaden: Springer 2019. ISBN: 978-3-658-26377-5.

BORNEWASSER ET AL. 2018

Bornewasser, M.; Bläsing, D.; Hinrichsen, S.: Informatrische Assistenzsysteme in der manuellen Montage: Ein nützliches Werkzeug zur Reduktion mentaler Beanspruchung? Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 72 (2018) 4, S. 264-275.

BORNEWASSER & HINRICHSEN 2020

Bornewasser, Manfred; Hinrichsen, Sven (Hrsg.): Informatrische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage. Theorie und Praxis. 1. Auflage 2020. Berlin: Springer Vieweg 2020. ISBN: 978-3-662-61373-3.

BORTZ & DÖRING 2006

Bortz, J.; Döring, N.: Forschungsmethoden und Evaluation. für Human- und Sozialwissenschaftler. 4. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-33305-0.

BORTZ & SCHUSTER 2010

Bortz, J.; Schuster, C.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 7. Aufl. Berlin: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-12769-4. (Springer-Lehrbuch).

BÖS & KRELL-RÖSCH 2022

Bös, K.; Krell-Rösch, J.: Fitness auf dem Prüfstand. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2022. ISBN: 978-3-662-63410-3.

BOTTI ET AL. 2017

Botti, L.; Mora, C.; Calzavara, M.: Design of job rotation schedules managing the exposure to age-related risk factors. IFAC-PapersOnLine (2017) 50 (1), S. 13993-13997.

BOTTI ET AL. 2021

Botti, L.; Calzavara, M.; Mora, C.: Modelling job rotation in manufacturing systems with aged workers. *International Journal of Production Research* 59 (2021) 8, S. 2522-2536.

BOTZ 2022

Botz, S.: Validierung und wirtschaftliche Betrachtung einer mitarbeiterorientierten Einsatzplanung in der manuellen Montage bei der MAN Truck & Bus SE. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2022).

BOYSEN ET AL. 2007

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: Produktionsplanung bei Variantenfließfertigung: Planungshierarchie und Elemente einer Hierarchischen Planung. *Journal of Business Economics* 77 (2007) 7-8, S. 759-793.

BOYSEN ET AL. 2009

Boysen, N.; Fliedner, M.; Scholl, A.: Production planning of mixed-model assembly lines: overview and extensions. *Production Planning & Control* 20 (2009) 5, S. 455-471.

BOYSEN ET AL. 2022

Boysen, N.; Schulze, P.; Scholl, A.: Assembly line balancing: What happened in the last fifteen years? *European Journal of Operational Research* 301 (2022) 3, S. 797-814.

BREQUE ET AL. 2021

Breque, M.; Nul, L. de; Petridis, A.: Industry 5.0. Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Luxembourg: Publications Office of the European Union 2021. ISBN: 978-92-76-25308-2. (R&I Paper Series, policy brief).

BROCKMANN 2019

Brockmann, L.: Bewertung von Arbeitsanalyseverfahren hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit in der manuellen Montage. (Bachelorarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2019).

BROOKE 1996

Brooke, J.: SUS — A Quick and Dirty Usability Scale. *Usability Evaluation in Industry* 189 (1996) 194, S. 4-6.

BRUNNER 2020

Brunner, S.: Lean Production – Methode zur Identifizierung von Verschwendung durch physische und psychische Fehlbelastung. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

BUBB ET AL. 2015

Bubb, H.; Bengler, K.; Grünen, R. E.; Vollrath, M.: *Automobilergonomie*. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-8348-1890-4. (ATZ/MTZ-Fachbuch).

BÜHNER & ZIEGLER 2009

Bühner, M.; Ziegler, M.: *Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler*. München: Pearson 2009. ISBN: 978-3-827-37274-1. (Always learning).

BULLINGER 1995

Bullinger, H.-J.: *Arbeitsgestaltung. Personalorientierte Gestaltung marktgerechter Arbeitssysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 1995. ISBN: 978-3-663-07797-8. (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

BULLINGER & LUNG 1994

Bullinger, H.-J.; Lung, M. M.: *Planung der Materialbereitstellung in der Montage*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 1994. ISBN: 978-3-663-11046-0. (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

BUNDESAGENTUR FÜR ARBEIT 2022

Bundesagentur für Arbeit: *Berichte: Blickpunkt Arbeitsmarkt. Entwicklungen in der Zeitarbeit: Nürnberg 2022*.

BUTSCHAN ET AL. 2017

Butschan, J.; Nestle, V.; Munck, J. C.; Gleich, R.: *Kompetenzaufbau zur Umsetzung von Industrie 4.0 in der Produktion*. In: Seiter, M. et al. (Hrsg.): *Betriebswirtschaftliche Aspekte von Industrie 4.0*. Wiesbaden: Springer 2017, S. 75-110. ISBN: 978-3-658-18487-2.

CAMPION & MCCLELLAND 1991

Campion, M. A.; McClelland, C. L.: *Interdisciplinary examination of the costs and benefits of enlarged jobs: A job design quasi-experiment*. *Journal of Applied Psychology* 76 (1991) 2, S. 186-198.

CARNEIRO ET AL. 2019

Carneiro, D.; Novais, P.; Augusto, J. C.; Payne, N.: *New Methods for Stress Assessment and Monitoring at the Workplace*. *IEEE Transactions on Affective Computing* 10 (2019) 2, S. 237-254.

CASTOR ET AL. 2003

Castor, M.; Hanson, E.; Svensson, E.; Nählinder, S.; LeBlaye, P.; MacLeod, I.; Wright, N.; Ågren, L.; Berggren, Peter; Juppet, Valérie; Hilburn, Brian; Ohlsson, Kjell: *GARTEUR Handbook of Mental Workload Measurement: Group for Aeronautical Research and Technology in Europe 2003*.

CHADEGANI ET AL. 2013

Chadegani, A. A.; Salehi, H.; Yunus, M.; Farhadi, H.; Fooladi, M.; Farhadi, M.; Ebrahim, N. A.: A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases. *Asian Social Science* 9 (2013) 5, S. 18-26.

CICCHETTI 1994

Cicchetti, D. V.: Guidelines, criteria, and rules of thumb for evaluating normed and standardized assessment instruments in psychology. *Psychological Assessment* 6 (1994) 4, S. 284-290.

CICEK 2015

Cicek, M.: Wearable Technologies And Its Future Applications. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication* 3 (2015) 4, S. 45-50.

COHRS 2015

Cohrs, C.: Personaleinsatz und Personalfreisetzung. In: Rowold, J. (Hrsg.): *Human Resource Management*. Berlin, Heidelberg: Springer 2015, S. 145-158. ISBN: 978-3-662-45982-9.

COLLIGNON 2021

Collignon, M.: Performance Management und Performance Informationen in der öffentlichen Verwaltung - eine neuroökonomisch inspirierte Perspektive. (Dissertation). *Public und Non-Profit Management*, Universität Potsdam (2021).

CSIKSZENTMIHALYI ET AL. 2014

Csikszentmihalyi, M.; Abuhamdeh, S.; Nakamura, J.: Flow. In: Csikszentmihalyi, M. (Hrsg.): *Flow and the Foundations of Positive Psychology. The Collected Works of Mihaly Csikszentmihalyi*. Dordrecht: Springer 2014, S. 227-238. ISBN: 978-94-017-9087-1.

DAHM 2006

Dahm, M.: *Grundlagen der Mensch-Computer-Interaktion*. München: Pearson-Studium 2006. ISBN: 978-3-827-37175-1. (Informatik).

DALLE MURA & DINI 2022

Dalle Mura, M.; Dini, G.: Job rotation and human–robot collaboration for enhancing ergonomics in assembly lines by a genetic algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 118 (2022) 9-10, S. 2901-2914.

DELLER ET AL. 2008

Deller, J.; Plassmeier, S. C.; Hausmann, E.; Diederichs, Y.: *Personalmanagement im demografischen Wandel. Ein Handbuch für den Veränderungsprozess*. Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-76345-1.

DENKENA ET AL. 2016

Denkena, B.; Dittrich, M. A.; Winter, F.; Wagener, C.: Simulation-based planning and evaluation of personnel scheduling in knowledge-intensive production systems. *Production Engineering* 10 (2016) 4-5, S. 489-496.

DENKENA ET AL. 2017

Denkena, B.; Stobrawa, S.; Jenker, I.: Kompetenzorientierte Arbeitsplatzwechsel. Ein simulationsbasierter Ansatz zur Durchführung von Jobrotation unter Berücksichtigung von Kompetenzen für die Personaleinsatzplanung von Industrieunternehmen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 112 (2017) 10, S. 640-643.

DEUSE & BUSCH 2012

Deuse, J.; Busch, F.: Zeitwirtschaft in der Montage. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 79-107. ISBN: 978-3-642-29061-9. (VDI-Buch).

DGUV 2022

DGUV: DGUV Information 208-033. Muskel-Skelett-Belastungen - erkennen und beurteilen. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. Berlin 2022.

DGUV 2023

DGUV: Muskel-Skelett-System. <<https://www.dguv.de/de/praevention/themen-a-z/muskel-skelett-system/index.jsp>> - 14.01.2023.

DIAS & PAULO SILVA CUNHA 2018

Dias, D.; Paulo Silva Cunha, J.: Wearable Health Devices-Vital Sign Monitoring, Systems and Technologies. *Sensors (Basel, Switzerland)* 18 (2018) 8.

DIAZ-BONE & WEISCHER 2015

Diaz-Bone, R.; Weischer, C.: *Methoden-Lexikon für die Sozialwissenschaften*. Wiesbaden: Springer 2015. ISBN: 978-3-531-16629-2.

DiDOMENICO & NUSSBAUM 2008

DiDomenico, A.; Nussbaum, M. A.: Interactive effects of physical and mental workload on subjective workload assessment. *International Journal of Industrial Ergonomics* 38 (2008) 11-12, S. 977-983.

DIEGO-MAS 2020

Diego-Mas, J. A.: Designing Cyclic Job Rotations to Reduce the Exposure to Ergonomics Risk Factors. *International journal of environmental research and public health* 17 (2020) 3.

DIGIESI ET AL. 2018

Digiesi, S. D.; Facchini, F.; Mossa, G.; Mummolo, G.: Minimizing and Balancing Ergonomic Risk of Workers of an Assembly Line by Job Rotation: a MINLP Model. *International Journal of Industrial Engineering and Management* 9 (2018) 3, S. 129-138.

DILLINGER ET AL. 2022

Dillinger, F.; Bernhard, O.; Reinhart, G.: Competence Requirements in Manufacturing Companies in the Context of Lean 4.0. *Procedia CIRP* 106 (2022), S. 58-63.

DIN 199-1 2021

DIN 199-1: Technische Produktdokumentation (TPD). Teil 1: Begriffe im Dokumentationswesen. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Berlin: Beuth 2021.

DIN EN ISO 10075-1 2017

DIN EN ISO 10075-1: Ergonomische Grundlagen bezüglich psychischer Arbeitsbelastung. Teil 1: Allgemeine Aspekte und Konzepte und Begriffe. Berlin: Beuth 2017.

DIN EN ISO 6385 2016

DIN EN ISO 6385: Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen. Berlin: Beuth 2016.

DIN EN ISO 9241-11 2018

DIN EN ISO 9241-11: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte. Berlin: Beuth 2018.

DIN EN ISO 9241-110 2020

DIN EN ISO 9241-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 110: Interaktionsprinzipien. Berlin: Beuth 2020.

DIN EN ISO 9241-210 2020

DIN EN ISO 9241-210: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion. Teil 210: Menschzentrierte Gestaltung interaktiver Systeme. Berlin: Beuth 2020.

DODE ET AL. 2016

Dode, P.; Greig, M.; Zolfaghari, S.; Neumann, W. P.: Integrating human factors into discrete event simulation: a proactive approach to simultaneously design for system performance and employees' well being. *International Journal of Production Research* 54 (2016) 10, S. 3105-3117.

DOLGUI & PROTH 2013

Dolgui, A.; Proth, J.-M.: Assembly Line Balancing: Conventional Methods and Extensions. *IFAC Proceedings Volumes* 46 (2013) 9, S. 43-48.

DOLLINGER 2021

Dollinger, C.: Methode zur kosteneffizienten Konfiguration eines Springerpools in der taktgebundenen Montage. (Dissertation) Technische Universität München (2021).

DOMBROWSKI ET AL. 2002

Dombrowski, U.; Horatzek, S.; Zeisig, M.: Situatives mitarbeiterbezogenes Management der Ressource "Wissen". wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 6, S. 312-316.

DOOLEY ET AL. 2017

Dooley, E. E.; Golaszewski, N. M.; Bartholomew, J. B.: Estimating Accuracy at Exercise Intensities: A Comparative Study of Self-Monitoring Heart Rate and Physical Activity Wearable Devices. JMIR mHealth and uHealth 5 (2017) 3, e34.

DÖRING & BORTZ 2016

Döring, N.; Bortz, J.: Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften. Berlin, Heidelberg: Springer 2016. ISBN: 978-3-642-41088-8.

ECKSTEIN 2016

Eckstein, P. P.: Angewandte Statistik mit SPSS. Wiesbaden: Springer 2016. ISBN: 978-3-658-10917-2.

ERPENBECK ET AL. 2017

Erpenbeck, J.; Rosenstiel, L. v.; Grote, S.; Sauter, W.: Handbuch Kompetenzmessung. Erkennen, verstehen und bewerten von Kompetenzen in der betrieblichen, pädagogischen und psychologischen Praxis. 3. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2017. ISBN: 978-3-791-03512-6.

ERPENBECK & SAUTER 2013

Erpenbeck, J.; Sauter, W.: So werden wir lernen! Kompetenzentwicklung in einer Welt fühlender Computer, kluger Wolken und sinnsuchender Netze. Berlin: Springer Gabler 2013. ISBN: 978-3-642-37181-3.

EU COMMISSION 2020

EU Commission: European Commission Report on the Impact of Demographic Change. European Commission. 2020.

EUROPEAN COMMISSION 2016

European Commission: Smart Wearables: Reflection and Orientation Paper. 2016.

EVERSHEIM 1989

Eversheim, W.: Fertigung und Montage. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI 1989. ISBN: 978-3-642-64800-7. (Studium und Praxis Bd. 4).

EVERSHEIM & STEUDEL 1977

Eversheim, W.; Steudel, M.: Montagearbeitsplanerstellung für Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung mit Hilfe der EDV. Opladen: Westdeutscher Verlag 1977. ISBN: 978-3-531-02693-0. (Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Fachgruppe Mathematik, Informatik 2693).

FINCO ET AL. 2020

Finco, S.; Zennaro, I.; Battini, D.; Persona, A.: Considering workers' features in manufacturing systems: a new job-rotation scheduling model. IFAC-PapersOnLine 53 (2020) 2, S. 10621-10626.

FORSMAN ET AL. 2002

Forsman, M.; Hansson, G.-Å.; Medbo, L.; Asterland, P.; Engström, T.: A method for evaluation of manual work using synchronised video recordings and physiological measurements. Applied Ergonomics 33 (2002) 6, S. 533-540.

FRITZSCHE ET AL. 2019

Fritzsche, L.; Ullmann, S.; Bauer, S.; Sylaja, V. J.: Task-based digital human simulation with Editor for Manual work Activities – industrial applications in product design and production planning. DHM and Posturography (2019), S. 569-575.

FRÖHLICH ET AL. 2014

Fröhlich, M.; Ludwig, O.; Kraus, S.; Felder, H.: Changes in Skin Surface Temperature during Muscular Endurance indicated Strain – An Explorative Study. International Journal of Kinesiology & Sports Science 2 (2014) 3, S. 23-27.

GAJEWSKI ET AL. 2018

Gajewski, P. D.; Ferdinand, N. K.; Kray, J.; Falkenstein, M.: Understanding sources of adult age differences in task switching: Evidence from behavioral and ERP studies. Neuroscience and biobehavioral reviews 92 (2018), S. 255-275.

GANIA 2021

Gania, M.: Development of Human-Oriented Simulation Model for Manual Assembly. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2021).

GATTI ET AL. 2011

Gatti, U. C.; Migliaccio, G. C.; Schneider, S.: Wearable Physiological Status Monitors for Measuring and Evaluating Workers' Physical Strain: Preliminary Validation. In: Zhu, Y. et al. (Hrsg.): Computing in Civil Engineering (2011), International Workshop on Computing in Civil Engineering 2011. Miami, Florida, United States, June 19-22, 2011.

Reston, VA: American Society of Civil Engineers 2011, S. 194-201. ISBN: 978-0-784-41182-7.

GIBBS 16.04.2018

Gibbs, S.: Elon Musk drafts in humans after robots slow down Tesla Model 3 production. <<https://www.theguardian.com/technology/2018/apr/16/elon-musk-humans-robots-slow-down-tesla-model-3-production>> - 23.04.2018.

GIESERT 2018

Giesert, M.: Eine Familie stellt sich vor. WAI-basierte Instrumente - Arbeits- und Beschäftigungsfähigkeiten wiederherstellen, erhalten und fördern. 1. Auflage. Berlin: Initiative Neue Qualität der Arbeit, Geschäftsstelle 2018. ISBN: 978-3-882-61242-4.

GILLINOV ET AL. 2017

Gillinov, S.; Etiwy, M.; Wang, R.; Blackburn, G.; Phelan, D.; Gillinov, A. M.; Houghtaling, P.; Javadikasgari, H.; Desai, Milind Y.: Variable Accuracy of Wearable Heart Rate Monitors during Aerobic Exercise. *Medicine and science in sports and exercise* 49 (2017) 8, S. 1697-1703.

GNAHS 2007

Gnahn, D.: Kompetenzen - Erwerb, Erfassung, Instrumente. Bielefeld: Bertelsmann 2007. ISBN: 978-3-763-91944-4. (Studientexte für Erwachsenenbildung).

GOODDAY & FRIEND 2019

Goodday, S. M.; Friend, S.: Unlocking stress and forecasting its consequences with digital technology. *npj Digital Medicine* 2 (2019) 75, S. 1-5.

GOSTELI 2019

Gosteli, M.: EBSCOhost: Eine Ergänzung zu Web of Science und Scopus. <<https://www.uzh.ch/blog/hbz/2019/11/13/ebscohost-eine-ergaenzung-zu-web-of-science-und-scopus/>> - 12.09.2023.

GRÄBLER ET AL. 2021

Gräßler, I.; Roesmann, D.; Pottebaum, J.: Model based integration of human characteristics in production systems: a literature survey. *Procedia CIRP* 99 (2021), S. 57-62.

GROBE-HEITMEYER & WIENDAHL 2004

Große-Heitmeyer, V.; Wiendahl, H.-P.: Einführung. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Variantenbeherrschung in der Montage. Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Berlin: Springer 2004, S. 3-20. ISBN: 978-3-642-62372-1. (Engineering online library).

GRUNDIG 2006

Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 2. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 978-3-446-40642-1.

GÜHNE ET AL. 2021

Gühne, M.; Mischer, M.; Kirsch, T. L.; Pietrzyk, U.; Günther, T.; Hacker, W.: GADIAM. In: Bauer, W. et al. (Hrsg.): Arbeit in der digitalisierten Welt. Berlin, Heidelberg: Springer 2021, S. 145-158. ISBN: 978-3-662-62214-8.

GUK ET AL. 2019

Guk, K.; Han, G.; Lim, J.; Jeong, K.; Kang, T.; Lim, E.-K.; Jung, J.: Evolution of Wearable Devices with Real-Time Disease Monitoring for Personalized Healthcare. Nanomaterials (Basel, Switzerland) 9 (2019) 6.

HÄDER 2015

Häder, M.: Empirische Sozialforschung. Eine Einführung. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer 2015. ISBN: 978-3-531-19674-9.

HÄDER 2019

Häder, M.: Empirische Sozialforschung. Eine Einführung. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer 2019. ISBN: 978-3-658-26985-2.

HALFAR & MICKEN 2019

Halfar, B.; Micken, M.: Leistungsgewandelte Mitarbeiter. In: Becher, B. et al. (Hrsg.): Innovative Unternehmen der Sozial- und Gesundheitswirtschaft. Wiesbaden: Springer 2019, S. 383-404. ISBN: 978-3-658-19503-8. (Sozialwirtschaft innovativ).

HART 2006

Hart, S. G.: Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting 50 (2006) 9, S. 904-908.

HART & STAVELAND 1988

Hart, S. G.; Staveland, L. E.: Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research. In: Hancock, P. A. et al. (Hrsg.): Human Mental Workload // Human mental workload. 1. Aufl. Amsterdam: Elsevier; North-Holland 1988, S. 139-183. ISBN: 978-0-444-70388-0. (Advances in Psychology 52).

HECHENLEITNER & SCHWARZKOPF 2006

Hechenleitner, A.; Schwarzkopf, K.: Kompetenzen - mehr als nur Wissen! Informationsblatt. Staatsministerium für Schulqualität und Bildungsforschung. München 2006.

HEIDL ET AL. 2018

Heidl, M. J.; Boespflug, A.; Wakula, J.: Evaluierung von fünf Screening-Bewertungsverfahren für repetitive physische Belastungen anhand des subjektiven Belastungsempfindens der Arbeitspersonen in der Montage der Automobil-Zulieferindustrie. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 72 (2018) 2, S. 120-129.

HEIDL & BOESPFLUG 2017

Heidl, M. J.; Boespflug, A.: Analysis of the Stress and Strain of Repetitive Assembly Tasks. In: Schlick, C. M. et al. (Hrsg.): Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes. Berlin, Heidelberg: Springer 2017, S. 209-218. ISBN: 978-3-662-53304-8.

HEIMGÄRTNER 2017

Heimgärtner, R.: Interkulturelles User Interface Design. Von der Idee bis zum erfolgreichen Produkt. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-662-48370-1.

HELFRICH 2016

Helfrich, H.: Gütekriterien methodischer Vorgehensweisen. In: Helfrich, H. (Hrsg.): Wissenschaftstheorie für Betriebswirtschaftler. Wiesbaden: Springer 2016, S. 95-103. ISBN: 978-3-658-07035-9.

HESSE 2012a

Hesse, S.: Automatische Montagemaschinen. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 195-272. ISBN: 978-3-642-29061-9. (VDI-Buch).

HESSE 2012b

Hesse, S.: Montagegerechte Produktgestaltung. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 9-48. ISBN: 978-3-642-29061-9. (VDI-Buch).

HEYSE & ERPENBECK 2004

Heyse, V.; Erpenbeck, J.: Kompetenztraining. 64 Informations- und Trainingsprogramme. 1. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2004. ISBN: 3-7910-2263-6.

HEYSE & ERPENBECK 2009

Heyse, V.; Erpenbeck, J.: Kompetenztraining. Informations- und Trainingsprogramme. Stuttgart: Schaffer-Poeschel 2009. ISBN: 978-3-7992-6367-2.

HINRICHSSEN 2020

Hinrichsen, S.: Informatrische Gestaltung der Montage mittels Assistenzsystemen. In: Bornewasser, M. et al. (Hrsg.): Informatrische Assistenzsysteme in der

variantenreichen Montage. Theorie und Praxis. 1. Auflage 2020 Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2020, S. 21-42. ISBN: 978-3-662-61373-3.

HINRICHSEN & BORNEWASSER 2020

Hinrichsen, S.; Bornewasser, M.: Veränderung der Gestaltungsparadigmen industrieller Montagearbeit. In: Bornewasser, M. et al. (Hrsg.): Informatrische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage. Theorie und Praxis. 1. Auflage 2020 Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2020, S. 1-20. ISBN: 978-3-662-61373-3.

HOCHDÖRFFER ET AL. 2018

Hochdörffer, J.; Hedler, M.; Lanza, G.: Staff scheduling in job rotation environments considering ergonomic aspects and preservation of qualifications. Journal of Manufacturing Systems 46 (2018), S. 103-114.

HÖLLTHALER 2021

Höllthaler, G.: Methodik zur Integration digitaler Technologien für Ganzheitliche Produktionssysteme. (Dissertation) Technische Universität München (2021).

HOLZAPFEL 1992

Holzapfel, M.: Wirtschaftlichkeit wissensbasierter Systeme. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 1992. ISBN: 978-3-8244-0129-1.

HOX ET AL. 2017

Hox, J. J.; Moerbeek, M.; van de Schoot, R.: Multilevel Analysis. 3. Aufl. New York: Routledge 2017. ISBN: 978-1-315-65098-2.

HUSSY ET AL. 2013

Hussy, Walter; Schreier, Margrit; Echterhoff, Gerald (Hrsg.): Forschungsmethoden in Psychologie und Sozialwissenschaften für Bachelor. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-34362-9. (Springer-Lehrbuch).

IG METALL 2012

IG Metall: Entgeltrahmenabkommen (ERA). 2012.

ILG 2019

Ilg, P.: VW Zwickau: Elektroautos für Millionen. <<https://www.heise.de/-4451613>> - 06.05.2022.

ISO 29148 - 2018

ISO 29148 - 2018: Systems and software engineering – Life cycle processes – Requirements engineering. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

JEBELLI & LEE 2019

Jebelli, H.; Lee, S.: Feasibility of Wearable Electromyography (EMG) to Assess Construction Workers' Muscle Fatigue. In: Mutis, I. et al. (Hrsg.): Advances in Informatics and Computing in Civil and Construction Engineering. Cham: Springer International Publishing 2019, S. 181-187. ISBN: 978-3-030-00219-0.

JOIKO ET AL. 2010

Joiko, K.; Schmauder, M.; Wolff, G.: Psychische Belastung und Beanspruchung im Berufsleben. Erkennen - gestalten. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. 5. Aufl. Dortmund: Baua 2010. ISBN: 978-3-882-61539-5.

JÜRGENS 1997

Jürgens, U.: Rolling Back Cycle Times: The Renaissance of the Classic Assembly Line in Final Assembly. In: Shimokawa, K. et al. (Hrsg.): Transforming Automobile Assembly. Berlin, Heidelberg: Springer 1997, S. 255-273. ISBN: 978-3-642-64377-4.

KADLETZ 2022

Kadletz, J.: Entwicklung einer Methode zur strukturierten Wirtschaftlichkeitsbewertung von Konzepten der Personaleinsatzplanung. (Bachelorarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2022).

KAISER 2016

Kaiser, A. A.: Entwicklung und Evaluation selbstinstruktiver Körper-Achtsamkeitsprogramme zur Gesundheitsförderung und Erholung am Arbeitsplatz. Pädagogische Hochschule Karlsruhe. 2016.

KALWEIT 2020

Kalweit, L.: Stress in der manuellen Montage. Die Evaluierung von psychischen und physischen Stressoren. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

KATIRAE ET AL. 2021

Katirae, N.; Calzavara, M.; Finco, S.; Battini, D.: Consideration of workforce differences in assembly line balancing and worker assignment problem. IFAC-PapersOnLine 54 (2021) 1, S. 13-18.

KAUFFELD & MARTENS 2019

Kauffeld, S.; Martens, A.: Arbeitsanalyse und -gestaltung. In: Kauffeld, S. (Hrsg.): Arbeits-, Organisations- und Personalpsychologie für Bachelor. Berlin, Heidelberg: Springer 2019, S. 261-303. ISBN: 978-3-662-56012-9.

KESKIN 2021

Keskin, P.: Entwicklung eines nutzerzentrierten User Interface für die Kommunikation der Mitarbeiterrotation in der manuellen Montage. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2021).

KESTEL 1995

Kestel, R.: Variantenvielfalt und Logistiksysteme. Ursachen - Auswirkungen - Lösungen. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 1995. ISBN: 978-3-322-99527-8. (Springer eBook Collection Business and Economics).

KHAN ET AL. 2016

Khan, Y.; Ostfeld, A. E.; Lochner, C. M.; Pierre, A.; Arias, A. C.: Monitoring of Vital Signs with Flexible and Wearable Medical Devices. *Advanced materials* (Deerfield Beach, Fla.) 28 (2016) 22, S. 4373-4395.

KIM ET AL. 2018

Kim, H.-G.; Cheon, E.-J.; Bai, D.-S.; Lee, Y. H.; Koo, B.-H.: Stress and Heart Rate Variability: A Meta-Analysis and Review of the Literature. *Psychiatry investigation* 15 (2018) 3, S. 235-245.

KLIPPER ET AL. 2016

Klipper, J.; Hartwich, H.-D.; Anlauff, W.: Demografieorientierte Gestaltung von Job-Rotation. *Initiative neue Qualität der Arbeit* (2016).

KLIPPERT 2018

Klippert, J.: *Augmented Ergonomics. Theorie und Praxis der systemischen Arbeitsanalyse*. 1. Auflage. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG 2018. ISBN: 978-3-845-29423-0.

KNAUTH

Knauth, P.: *Beanspruchungsmessung*. Universität Karlsruhe .

KNÜLLE 2004

Knülle, E.: *Mitarbeiter krank – was nun? Betriebliches Eingliederungsmanagement. Herausforderung für Unternehmen*. Fachtagung der DVfR (Deutsche Vereinigung für Rehabilitation) (2004).

KOCESKA ET AL. 2017

Koceska, N.; Kozolovska, I.; Koteska, B.; Simjanoska, M.; Madevska Bogdanova, A.; Komadina, R.; Strahovnik, A.; Jost, A.: Evaluation of wearable system for measuring vital parameters in clinical environment. *ICT Innovations 2017, Web Proceedings* (2017), S. 22-29.

KOLB & WERNER 1978

Kolb, M.; Werner, E.: Personaleinsatz. Wiesbaden: Gabler Verlag 1978. ISBN: 978-3-322-86049-1.

KOLTHOFF 2021

Kolthoff, J.-F.: Gesunde Arbeit als Teil der Employer Brand.

<<https://www.humanresourcesmanager.de/recruiting/gesunde-arbeit-als-teil-der-employer-brand/>> - 04.03.2021.

KRATZSCH

Kratzsch, S.: Prozess- und Arbeitsorganisation in Fließmontagesystemen.

(Dissertation) Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan. ISBN: 978-3-802-78654-9. (Schriftenreihe des IWF).

KRELL & WINTER 1997

Krell, G.; Winter, R.: Anforderungsabhängige Entgeltdifferenzierung: Orientierungshilfen auf dem Weg zu einer diskriminierungsfreie(re)n Arbeitsbewertung. In: Krell, G. (Hrsg.): Chancengleichheit durch Personalpolitik. Gleichstellung von Frauen und Männern in Unternehmen und Verwaltungen ; rechtliche Regelungen, Problemanalysen, Lösungen. Wiesbaden: Gabler Verlag 1997, S. 243-262. ISBN: 978-3-409-12229-0.

LACHER 2021

Lacher, L.: Entwicklung einer Methode zur Anforderungsbestimmung von Anforderungen in der manuellen Montage. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2021).

LANDAU ET AL. 2001

Landau, K.; Wimmer, R.; Luczak, H.; Mainzer, J.; Peters, H.; Winter, G.: Anforderungen an Montagearbeitsplätze. In: Landau, K. et al. (Hrsg.): Ergonomie und Organisation in der Montage. München, Hanser 2001, S. 1-82. ISBN: 3-4462-1507-7.

LANDSTAD ET AL. 2002

Landstad, B. J.; Gelin, G.; Malmquist, C.; Vinberg, S.: A statistical human resources costing and accounting model for analysing the economic effects of an intervention at a workplace. *Ergonomics* 45 (2002) 11, S. 764-787.

LANGHOFF & SCHMELZER 2015

Langhoff, T.; Schmelzer, K.-M.: Der Zusammenhang zwischen psychischen Belastungen in der Arbeitswelt und psychischen Erkrankungen. In: Jeschke, S. et al. (Hrsg.): *Exploring Demographics*. Wiesbaden: Springer 2015, S. 529-540. ISBN: 978-3-658-08790-6.

LEITNER ET AL. 1987

Leitner, K.; Greiner, B.; Oesterreich, R.; Volpert, W.; Weber, W. G.: Analyse psychischer Belastung in der Arbeit. Das RHIA-Verfahren; Manual und Antwortblätter. Köln: TÜV Rheinland 1987. ISBN: 3-8858-5454-6.

LEPLAT & CUNY 1977

Leplat, J.; Cuny, X.: Introduction à la psychologie du travail. Paris: Presses Universitaires de France - P.U.F. 1977. (Le psychologue).

LINDBERG ET AL. 2009

Lindberg, P.; Ody, C.; Feydy, A.; Maier, M. A.: Precision in isometric precision grip force is reduced in middle-aged adults. *Experimental brain research* 193 (2009) 2, S. 213-224.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-642-01422-2.

LINDNER-LOHMANN ET AL. 2012

Lindner-Lohmann, D.; Lohmann, F.; Schirmer, U.: Personalmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-7908-2889-4.

LISSMANN 2013

Lissmann, U.: Forschungs- und Erhebungsmethoden. In: Frey, A. (Hrsg.): Handbuch berufspädagogische Diagnostik. Weinheim: Beltz 2013, S. 87-125. ISBN: 978-3-407-29322-0. (Pädagogik).

LOTTER 1992

Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI 1992. ISBN: 3-1840-1168-2.

LOTTER 2012a

Lotter, B.: Einführung. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 1-8. ISBN: 978-3-642-29061-9. (VDI-Buch).

LOTTER 2012b

Lotter, E.: Hybride Montagesysteme. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 167-194. ISBN: 978-3-642-29061-9. (VDI-Buch).

LOTTER 2012c

Lotter, B.: Manuelle Montage von Großgeräten. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 147-165. ISBN: 978-3-642-29061-9. (VDI-Buch).

LOTTER 2012d

Lotter, B.: Manuelle Montage von Kleingeräten. In: Lotter, B. et al. (Hrsg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012, S. 109-146. ISBN: 978-3-642-29061-9. (VDI-Buch).

LOTTER & MÜLLER 2018

Lotter, E.; Müller, U.: Moderne/smarte Montagearbeitsplätze im Umfeld der Industrie 4.0. In: Wagner, R. M. (Hrsg.): Industrie 4.0 für die Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2018, S. 93-113. ISBN: 978-3-658-21117-2.

LUCZAK 1993

Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. Berlin, Heidelberg: Springer 1993. ISBN: 978-3-662-21634-7. (Springer-Lehrbuch).

LUCZAK 1998

Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 1998. ISBN: 978-3-662-05831-2.

LUTZ 1974

Lutz, L.: Abtakten von Montagelinien. (Dissertation)Universität Stuttgart. Mainz: Krausskopf 1974. ISBN: 3-7830-0083-1. (Produktionstechnik heute 8).

MA ET AL. 2012

Ma, Q. G.; Shang, Q.; Fu, H. J.; Chen, F. Z.: Mental Workload Analysis during the Production Process: EEG and GSR Activity. Applied Mechanics and Materials 220-223 (2012), S. 193-197.

MAIER 2020

Maier, M.: Leitfaden für den arbeitsinhaltlichen und arbeitsorganisatorischen Anlernprozess in der manuellen Montage. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

MANGHISI ET AL. 2020

Manghisi, V. M.; Uva, A. E.; Fiorentino, M.; Gattullo, M.; Boccaccio, A.; Evangelista, A.: Automatic Ergonomic Postural Risk Monitoring On The Factory Shopfloor – The Ergosentinel Tool. Procedia Manufacturing 42 (2020), S. 97-103.

MARINESCU ET AL. 2018

Marinescu, A. C.; Sharples, S.; Ritchie, A. C.; Sánchez López, T.; McDowell, M.; Morvan, H. P.: Physiological Parameter Response to Variation of Mental Workload. *Human factors* 60 (2018) 1, S. 31-56.

MARRENBACH & GEIGER 2019

Marrenbach, D.; Geiger, L.: Job rotation, job enlargement, job enrichment. In: Gerlmaier, A. et al. (Hrsg.): *Handbuch psycho-soziale Gestaltung digitaler Produktionsarbeit*. Wiesbaden: Springer Gabler 2019, S. 359-363. ISBN: 978-3-658-26153-5.

MEHTA & THORNICROFT 2010

Mehta, N.; Thornicroft, G.: Stigmatisation of People with Mental Illness and of Psychiatric Institutions. In: Helmchen, H. et al. (Hrsg.): *Ethics in Psychiatry*. Dordrecht: Springer Netherlands 2010, S. 11-32. ISBN: 978-90-481-8720-1. (International Library of Ethics, Law, and the New Medicine).

MELANSON ET AL. 1996

Melanson, E. L.; Freedson, P. S.; Blair, S.: Physical activity assessment: A review of methods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 36 (1996) 5, S. 385-396.

METTERNICH ET AL. 2018

Metternich, J.; Hertle, C.; Tisch, M.; Jokovic, B.; König, C.; Bruder, R.; Weber, C.; Tenberg, R.; Ardelt, Thomas: Betriebliche Kompetenzentwicklungsansätze zur Weiterentwicklung fachlich-methodischer und sozial-kommunikativer Kompetenzen in produktionsnahen Bereichen. In: Ahrens, D. et al. (Hrsg.): *Kompetenzentwicklung in analogen und digitalisierten Arbeitswelten*. Berlin, Heidelberg: Springer 2018, S. 73-87. ISBN: 978-3-662-54955-1.

METZ & ROTHE 2017

Metz, A. M.; Rothe, H.-J.: *Screening psychischer Arbeitsbelastung. Ein Verfahren zur Gefährdungsbeurteilung*. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer 2017. ISBN: 978-3-658-12572-1.

MILCZAREK ET AL. 2009

Milczarek, M.; Schneider, E.; González, E. R.: OSH in figures. Stress at work - facts and figures. European Agency for Safety and Health at Work. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities 2009. ISBN: 978-92-9191-224-7. (European risk observatory report 9).

MOLICH & NIELSEN 1990

Molich, R.; Nielsen, J.: Improving a human-computer dialogue. *Communications of the ACM* 33 (1990) 3, S. 338-348.

MONDAL ET AL. 2013

Mondal, P. K.; Ahsan, A. N.; Quayum, K. A.: An Approach to Develop an Effective Job Rotation Schedule by Using Genetic Algorithm. International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), 2013. Department of Industrial Engineering and Management, Khulna University of Engineering & Technology. Piscataway: IEEE 2013. ISBN: 978-1-4799-2299-4/13.

MOSSA ET AL. 2016

Mossa, G.; Boenzi, F.; Digiesi, S.; Mummolo, G.; Romano, V. A.: Productivity and ergonomic risk in human based production systems: A job-rotation scheduling model. International Journal of Production Economics 171 (2016), S. 471-477.

MOUSSAVI ET AL. 2016

Moussavi, S. E.; Mahdjoub, M.; Grunder, O.: Reducing production cycle time by ergonomic workforce scheduling. IFAC-PapersOnLine 49 (2016) 12, S. 419-424.

MÜLLER 2022

Müller, N.: Entwicklung einer Methode für den beanspruchungs- und kompetenzorientierten Abgleich zwischen Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden in der manuellen Montage. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2022).

MUSALEK & KIRCHENGAST 2017

Musalek, C.; Kirchengast, S.: Grip Strength as an Indicator of Health-Related Quality of Life in Old Age-A Pilot Study. International journal of environmental research and public health 14 (2017) 12.

NACHREINER FRIEDHELM 2002

Nachreiner Friedhelm, S. W.: Standardization in the Field of Mental Stress - the DIN EN ISO 10075 Series Standards. DIN-Mitteilungen 81 (2002) 8, S. 519-533.

NAKAGAWA & SCHIELZETH 2013

Nakagawa, S.; Schielzeth, H.: A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. Methods in Ecology and Evolution 4 (2013) 2, S. 133-142.

NERDINGER ET AL. 2008

Nerdinger, F. W.; Blickle, G.; Schaper, N.: Arbeits- und Organisationspsychologie. Heidelberg: Springer Medizin 2008. ISBN: 978-3-540-74704-8. (Springer-Lehrbuch).

NERDINGER ET AL. 2019

Nerdinger, F. W.; Blickle, G.; Schaper, N.; Solga, M. (Hrsg.): Arbeits- und Organisationspsychologie. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2019. ISBN: 978-3-662-56666-4. (Springer-Lehrbuch).

NICOLÒ ET AL. 2017

Nicolò, A.; Massaroni, C.; Passfield, L.: Respiratory Frequency during Exercise: The Neglected Physiological Measure. *Frontiers in physiology* 8 (2017), S. 922.

NORTH 2016

North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. 6. Aufl. Wiesbaden: Springer 2016. ISBN: 978-3-658-11642-2.

NOYES & BRUNEAU 2007

Noyes, J. M.; Bruneau, D. P.: A self-analysis of the NASA-TLX workload measure. *Ergonomics* 50 (2007) 4, S. 514-519.

OBERPARLEITER 2021

Oberparleiter, H.: Entwicklung eines Konzepts zur Abfrage von Mitarbeitenden-Feedback in der Produktion hinsichtlich Smart Devices. (Bachelorarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2021).

OCCHIPINTI 1998

Occhipinti, E.: OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics* 41 (1998) 9, S. 1290-1311.

OESTERREICH & VOLPERT 1998

Oesterreich, R.; Volpert, W.: Psychologie gesundheitsgerechter Arbeitsbedingungen. Konzepte, Ergebnisse und Werkzeuge zur Arbeitsgestaltung. 1998.

OPPOLZER 2010

Oppolzer, A.: Gesundheitsmanagement im Betrieb. Integration und Koordination menschengerechter Gestaltung der Arbeit. Hamburg: VSA 2010. ISBN: 3-8996-5394-7.

OTTO & BATAÏA 2017

Otto, A.; Battaïa, O.: Reducing physical ergonomic risks at assembly lines by line balancing and job rotation: A survey. *Computers & Industrial Engineering* 111 (2017), S. 467-480.

OTTO & SCHOLL 2011

Otto, A.; Scholl, A.: Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. *European Journal of Operational Research* 212 (2011) 2, S. 277-286.

OTTO & SCHOLL 2013

Otto, A.; Scholl, A.: Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. *OR Spectrum* 35 (2013) 3, S. 711-733.

PEAKE ET AL. 2018

Peake, J. M.; Kerr, G.; Sullivan, J. P.: A Critical Review of Consumer Wearables, Mobile Applications, and Equipment for Providing Biofeedback, Monitoring Stress, and Sleep in Physically Active Populations. *Frontiers in physiology* 9 (2018).

PÖTSCHKE 2019

Pötschke, M.: Mehrebenenmodelle. In: Apelt, M. et al. (Hrsg.): *Handbuch Organisationssoziologie*. Wiesbaden: Springer 2019, S. 1-30. ISBN: 978-3-658-15953-5. (Springer reference Sozialwissenschaften).

PRABASWARI ET AL. 2019

Prabaswari, A. D.; Basumerda, C.; Utomo, B. W.: The Mental Workload Analysis of Staff in Study Program of Private Educational Organization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 528 (2019) 1.

PRASCH 2010

Prasch, M.: *Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage*: Herbert Utz 2010. ISBN: 3-8316-4033-5.

PRÜMPER ET AL. 1995

Prümper, J.; Hartmannsgruber, K.; Frese, M.: KFZA. Kurz-Fragebogen zur Arbeitsanalyse. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie* 39 (1995) 3, S. 125-132.

PUTZ-ANDERSON ET AL. 1997

Putz-Anderson, V.; Bernard, Bruce P., Burt, Susan; Cole, Libby L., Fairfield-Estill, Cheryl; Fine, Lawrence J., Grant, Katharyn; Gjessing, C.; Jenkins, L.; Hurrell, J. J.; Nelson, N.; Pfirman, Donna; Roberts, Robert; Stetson, Diana; Haring-Sweeney, Marie; Tanaka, Shiro: *Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors. A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back*. NIOSH. 1997.

QUICK ET AL. 1987

Quick, J. D.; Horn, R. S.; Quick, J. C.: Health Consequences of Stress. *Journal of Organizational Behavior Management* 8 (1987) 2, S. 19-36.

RAEZ ET AL. 2006

Raez, M. B.; Hussain, M. S.; Mohd-Yasin, F.: Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications. *Biological procedures online* 8 (2006), S. 11-35.

RAINER 2019

Rainer, G.: Konzeption einer Methode zur Analyse soziologischer Faktoren und deren Auswirkung bei der Zusammenarbeit in der Produktion. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2019).

RAO PABOLU & SHRIVASTAVA 2021

Rao Pabolu, V. K.; Shrivastava, D.: A dynamic job rotation scheduling conceptual framework by a human representing digital twin. *Procedia CIRP* 104 (2021), S. 1367-1372.

RAUNER 2018

Rauner, F.: Berufliche Kompetenzdiagnostik mit COMET. Erfahrungen und Überraschungen aus der Praxis. 1. Aufl. Bielefeld: wbv 2018. ISBN: 978-3-7639-5995-2.

REDLICH 2011

Redlich, T.: Empirische Identifikation von Einflussfaktoren der Offenheit. In: Redlich, T. et al. (Hrsg.): *Wertschöpfung in der Bottom-up-Ökonomie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 83-92. ISBN: 978-3-642-19879-3.

REFA 1978

REFA: Methodenlehre des Arbeitsstudiums. REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. 6. Aufl. München: Hanser 1978. ISBN: 3-4461-2703-8.

REFA 1985

REFA: Methodenlehre der Planung und Steuerung. REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. 4. Aufl. München: Hanser 1985. ISBN: 3-4461-4245-2.

REFA 1991

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation. REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. 1. Aufl. München: Hanser 1991. ISBN: 978-3-446-16351-5.

REINHART 2017

Reinhart, Gunther (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser 2017. ISBN: 978-3-446-44642-7.

REINHART & ZÜHLKE 2017

Reinhart, G.; Zühlke, D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser 2017, S. XXXI-XL. ISBN: 978-3-446-44642-7.

REISINGER 2020

Reisinger, S.: Erstellung eines Anforderungs- und Kriterienkatalogs für Rotationslogiken in der manuellen Montage. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

RENNER ET AL. 2012

Renner, K.-H.; Heydasch, T.; Ströhlein, G.: Forschungsmethoden der Psychologie. Von der Fragestellung zur Präsentation. Wiesbaden: Springer VS 2012. ISBN: 3-5311-6729-4. (Lehrbuch).

RERKJIRATTIKAL & OLAPIRIYAKUL 2021

Rerkjirattikal, P.; Olapiriyakul, S.: Noise-safe job rotation in multi-workday scheduling considering skill and demand requirements. Journal of Industrial and Production Engineering 38 (2021) 8, S. 618-627.

RICHTER 2018

Richter, C.: Modellbasierte Entwicklung von Mensch-Maschine-Schnittstellen im Maschinen- und Anlagenbau. (Dissertation). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2018).

RICHTER & SCHATTE 2008

Richter, G.; Schatte, M.: Psychologische Bewertung von Arbeitsbedingungen Screening für Arbeitsplatzinhaber II - BASA II. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. 2008.

RIECHERT 2015

Riechert, I.: Psychische Störungen bei Mitarbeitern. Berlin, Heidelberg: Springer 2015. ISBN: 978-3-662-43521-2.

ROHMERT 1983

Rohmert, W.: Formen menschlicher Arbeit. In: Rohmert, W. et al. (Hrsg.): Praktische Arbeitsphysiologie. 3. Aufl. Stuttgart: Thieme 1983, S. 5-29. ISBN: 3-1337-0103-7.

ROOHI-AZIZI ET AL. 2017

Roohi-Azizi, M.; Azimi, L.; Heysieattalab, S.; Aamidfar, M.: Changes of the brain's bioelectrical activity in cognition, consciousness, and some mental disorders. Medical journal of the Islamic Republic of Iran 31 (2017), S. 53-59.

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing 2009. ISBN: 978-3-86644-374-7.

ROPOHL 2012

Ropohl, G.: Allgemeine Systemtheorie. Einführung in transdisziplinäres Denken. Berlin: edition sigma 2012. ISBN: 978-3-836-03586-6.

ROSCHER 2008

Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. (Dissertation). Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Universität Stuttgart (2008).

ROSENTHAL & LAWSON 1964

Rosenthal, R.; Lawson, R.: A longitudinal study of the effects of experimenter bias on the operant learning of laboratory rats. *Journal of Psychiatric Research* 2 (1964) 2, S. 61-72.

ROST 2014

Rost, M.: Kompetenzmanagement und dynamic capabilities. Eine empirische Fallstudie bei einem Unternehmen aus der Automobilzulieferindustrie. (Dissertation). 1. Aufl. Lohmar: Eul 2014. ISBN: 978-3-844-10381-6. (4).

RUDOW 2004

Rudow, B.: Das gesunde Unternehmen. Gesundheitsmanagement, Arbeitsschutz und Personalpflege in Organisationen. München: Oldenbourg 2004. ISBN: 3-4862-7554-2.

RUSNOCK & BORGHETTI 2018

Rusnock, C. F.; Borghetti, B. J.: Workload profiles: A continuous measure of mental workload. *International Journal of Industrial Ergonomics* 63 (2018), S. 49-64.

SAINI 2021

Saini, V.: Analyse der Rotationszeiten und der beeinflussenden Kriterien in der manuellen Montage. (Bachelorarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2021).

SANA ET AL. 2019

Sana; Shib Sankar; Ospina-Mateus, H.; Arrieta, F. G.; Chedid, J. A.: Application of genetic algorithm to job scheduling under ergonomic constraints in manufacturing industry. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* (2019) 10, S. 2063-2090.

SANDROCK & STAHN CATHARINA 2017

Sandrock, S.; Stahn Catharina: KPB, Kompaktverfahren Psychische Belastung. Werkzeug zur Durchführung der Gefährdungsbeurteilung. Institut für angewandte Arbeitswissenschaften. Berlin: Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-662-54898-1. (Ifaa-Edition).

SAUTER ET AL. 2018

Sauter, R.; Wolfig, R.; Sauter, W.: Agile Werte- und Kompetenzentwicklung. Wege in eine Neue Arbeitswelt. Berlin, Heidelberg: Gabler Verlag 2018. ISBN: 978-3-662-57304-4.

SCHAEFFER 1961

Schaeffer, R.: Die Multimomentaufnahme — ein rationelles Hilfsmittel der Betriebswirtschaft. (Hrsg.): Moderne Stichprobenverfahren in der Betriebspraxis. Wiesbaden: Gabler Verlag 1961, S. 71-81. ISBN: 978-3-663-12584-6.

SCHAPER 2019a

Schaper, N.: Arbeitsanalyse und -bewertung. In: Nerdinger, F. W. et al. (Hrsg.): Arbeits- und Organisationspsychologie. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2019, S. 385-410. ISBN: 978-3-662-56666-4. (Springer-Lehrbuch).

SCHAPER 2019b

Schaper, N.: Arbeitsgestaltung in Produktion und Verwaltung. In: Nerdinger, F. W. et al. (Hrsg.): Arbeits- und Organisationspsychologie. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2019, S. 411-434. ISBN: 978-3-662-56666-4. (Springer-Lehrbuch).

SCHAUB ET AL. 2013

Schaub, K.; Caragnano, G.; Britzke, B.; Bruder, R.: The European Assembly Worksheet. Theoretical Issues in Ergonomics Science 14 (2013) 6, S. 616-639.

SCHAUFELI & GREENGLASS 2001

Schaufeli, W. B.; Greenglass, E. R.: Introduction to special issue on burnout and health. Psychology & health 16 (2001) 5, S. 501-510.

SCHEER 1978

Scheer, A.-W.: Wirtschaftlichkeitsanalyse von Informationssystemen. In: Hansen, H. R. (Hrsg.): Entwicklungstendenzen der Systemanalyse. München: Oldenbourg 1978, S. 305-329. ISBN: 3-4862-2961-3. (Fachberichte und Referate 6).

SCHETTGEN 1996

Schettgen, P.: Arbeit, Leistung, Lohn. Analyse- und Bewertungsmethoden aus sozioökonomischer Perspektive. Stuttgart: Enke 1996. ISBN: 978-3-432-27221-4. (Basistexte Personalwesen 1).

SCHLICK ET AL. 2010

Schlick, C.; Luczak, H.; Bruder, R.: Arbeitswissenschaft. Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-540-78333-6.

SCHLICK ET AL. 2018

Schlick, C.; Bruder, R.; Luczak, H.: Arbeitswissenschaft. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2018. ISBN: 978-3-662-56037-2.

SCHMAUDER & SPANNER-ULMER 2014

Schmauder, M.; Spanner-Ulmer, B.: Ergonomie. Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation. 1. Aufl. München: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-44139-2. (REFA-Fachbuchreihe Arbeitsgestaltung).

SCHMIDT 2002

Schmidt, G.: Einführung in die Organisation. Wiesbaden: Gabler Verlag 2002. ISBN: 978-3-409-21504-6.

SCHMIDTKE & JASTRZEBSKA-FRACZEK 2013

Schmidtke, H.; Jastrzebska-Fraczek, I.: Ergonomie. Daten zur Systemgestaltung und Begriffsbestimmungen. München: Hanser 2013. ISBN: 978-3-44643-480-6.

SCHOLZ 2014

Scholz, C.: Personalmanagement. Informationsorientierte und verhaltenstheoretische Grundlagen. 6. Aufl. München: Franz Vahlen 2014. ISBN: 978-3-800-64869-6. (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

SCHUH ET AL. 2020

Schuh, G.; Kelzenberg, C.; Helbig, J.; Graberg, T.: Kompetenzprofile in einer digital vernetzten Produktion. Veränderungen in Kompetenzanforderungen und Handlungsempfehlungen für eine anforderungsgerechte Weiterbildung in der metallverarbeitenden Industrie. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung 2020.

SCHULZ ET AL. 2004

Schulz, P.; Schlotz, W.; Becker, P.: Trier Inventar zum chronischen Stress (TICS). Göttingen: Hogrefe 2004.

SCHÜTZE ET AL. 2018

Schütze, A.; Helwig, N.; Schneider, T.: Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0. Journal of Sensors and Sensor Systems 7 (2018) 1, S. 359-371.

SCHWEIBENZ & THISSEN 2003

Schweibenz, W.; Thissen, F.: Qualität im Web. Benutzerfreundliche Webseiten durch Usability Evaluation. Berlin: Springer 2003. ISBN: 3-5404-1371-5. (X.media.press).

SHAPIRO & WILK 1965

Shapiro, S. S.; Wilk, M. B.: An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). *Biometrika* 52 (1965) 3/4, S. 596-611.

SHARMA & GEDEON 2012

Sharma, N.; Gedeon, T.: Objective measures, sensors and computational techniques for stress recognition and classification: a survey. *Computer methods and programs in biomedicine* 108 (2012) 3, S. 1287-1301.

SHNEIDERMAN 1998

Shneiderman, B.: *Designing the user interface. Strategies for effective human-computer interaction*. 3. Aufl. Reading, Mass, Bonn: Addison-Wesley 1998. ISBN: 978-0-201-69497-0.

SNIJDERS & BOSKER 2012

Snijders, T. A.; Bosker, R. J.: *Multilevel analysis. An introduction to basic and advanced multilevel modeling*. 2. Aufl. Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington DC: Sage 2012. ISBN: 978-1-84920-200-8.

SOLBAKK ET AL. 2008

Solbakk, A.-K.; Fuhrmann Alpert, G.; Furst, A. J.; Hale, L. A.; Oga, T.; Chetty, S.; Pickard, N.; Knight, R. T.: Altered prefrontal function with aging: insights into age-associated performance decline. *Brain research* 1232 (2008), S. 30-47.

SPENGLER ET AL. 2019

Spengler, T.; Metzger, O.; Volkmer: *Moderne Personalplanung*. Wiesbaden: Springer 2019. ISBN: 978-3-658-25934-1.

SPRENGER 2020

Sprenger, F.: *Entwicklung einer Methode zur Identifikation der Anforderungsähnlichkeit von Arbeitsplätzen in der manuellen Montage*. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2020).

SPUR 2014

Spur, G.: *Handbuch Fügen, Handhaben und Montieren*. 2. Aufl.: Hanser 2014. ISBN: 978-3-446-42827-0.

STANIĆ 2010

Stanić, S.: *Fahrzeugendmontage - Herausforderung für den demografischen Wandel*. (Dissertation) Universität Kassel, Institut für Arbeitswissenschaften. Kassel: University Press 2010. ISBN: 978-3-89958-914-6. (Schriftenreihe Personal- und Organisationsentwicklung 8).

STATISTISCHES BUNDESAMT 2015

Statistisches Bundesamt: Bevölkerung Deutschlands bis 2060. 13. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt 2015. (Destatis - wissen.nutzen).

STELZER 2022

Stelzer, W.: Konzeptionierung und Gestaltung eines vollautomatisierten Kennzahlensystems zur Steuerung der logistischen Regressierung. (Semesterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2022).

STIER 1999

Stier, W.: Empirische Forschungsmethoden. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 1999. ISBN: 978-3-540-65295-3. (Springer-Lehrbuch).

STORM 2020

Storm, A.: Gesundheitsreport 2020. Stress in der modernen Arbeitswelt. DAK-Gesundheit. Heidelberg: medhochzwei, Heidelberg 2020. ISBN: 978-3-86216-633-6. (Beiträge zur Gesundheitsökonomie und Versorgungsforschung Band 33).

STORM 2022

Storm, Andreas (Hrsg.): DAK-Gesundheitsreport 2022. Analyse der Arbeitsunfähigkeitsdaten. Risiko Psyche: Wie Depressionen, Ängste und Stress das Herz belasten. DAK-Gesundheit. Hamburg: medhochzwei 2022. (Beiträge zur Gesundheitsökonomie und Versorgungsforschung 39).

SÜDWESTMETALL 2022

Südwestmetall: Wie ist die Entgeltstruktur von ERA?
<<https://www.suedwestmetall.de/tarif/era/era-entgeltstruktur>> - 13.06.2022.

TATTERSALL & FOORD 1996

Tattersall, A. J.; Foord, P. S.: An experimental evaluation of instantaneous self-assessment as a measure of workload. Ergonomics 39 (1996) 5, S. 740-748.

TAYLOR & WALLICHS 1914

Taylor, F. W.; Wallichs, A.: Die Betriebsleitung insbesondere der Werkstätten. Berlin, Heidelberg: Springer 1914. ISBN: 978-3-662-24219-3.

TECHNIKER KRANKENKASSE 2021

Techniker Krankenkasse: Gesundheitsreport. Arbeitsunfähigkeiten. (20 Jahre Gesundheitsberichterstattung der TK). Hamburg 2021.

TEUBNER ET AL. 2019

Teubner, S.; Rimpau, C.; Reinhart, G.: Approaching Dynamic and Individual Worker Information Systems. In: Dimitrov, D. et al. (Hrsg.): International Conference on Competitive Manufacturing (COMA 19). Stellenbosch 2019, S. 795-801. ISBN: 978-0-7972-1779-9.

TEUBNER 2021

Teubner, S.: Dynamisches und individuelles Werkerinformationssystem für die manuelle Serienmontage. (Dissertation) Technische Universität München (2021).

TEUCKE ET AL. 2020

Teucke, M.; Heuermann, A.; Thoben, K.-D.; Freitag, M.: Einsatz mobiler Computersysteme im Rahmen von Industrie 4.0 zur Bewältigung des demografischen Wandels. In: Hompel, M. ten et al. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer 2020, S. 1-31. ISBN: 978-3-662-45537-1. (Springer Reference Technik).

THARMMAPHORNPHILAS & NORMAN 2004

Tharmaphornphilas, W.; Norman, B. A.: A Quantitative Method for Determining Proper Job Rotation Intervals. *Annals of Operations Research* 128 (2004) 1-4, S. 251-266.

TONELLI ET AL. 2013

Tonelli, F.; Paolucci, M.; Anghinolfi, D.; Taticchi, P.: Production planning of mixed-model assembly lines: a heuristic mixed integer programming based approach. *Production Planning & Control* 24 (2013) 1, S. 110-127.

TROPSCHUH ET AL. 2019

Tropschuh, B.; Vernim, S.; Reinhart, G.: Ableitung von Kompetenzanforderungen. Methode für die manuelle, digitalisierte Montage. *wt Werkstattstechnik online* 109 (2019) 3, S. 142-147.

TROPSCHUH ET AL. 2020

Tropschuh, B.; Aranda Diez, M.; Waldherr, S.; Reinhart, G.: Psychische Beanspruchung in der manuellen Montage. Messung von Vitalwerten mithilfe von Smart Devices. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020) 10, S. 703-706.

TROPSCHUH ET AL. 2021a

Tropschuh, B.; Dillinger, F.; Korder, S.; Maier, M.; Gärtner, Q.; Vernim, S.: Industrie 5.0 – ein menschenzentrierter Ansatz. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (2021) 6, S. 387-392.

TROPSCHUH ET AL. 2021b

Tropschuh, B.; Niehues, S.; Reinhart, G.: Measuring physical and mental strain during manual assembly tasks. CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 104 (2021), S. 968-974.

TROPSCHUH ET AL. 2021c

Tropschuh, B.; März, L.; Hagemann, F.; Schaplewski, N.: Simulation Concept of Production Environments – An Employee-oriented Approach. (Hrsg.): International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Melbourne, 17.10.2021 - 20.10.2021: IEEE 2021, S. 1817-1822. ISBN: 978-1-6654-4207-7.

TROPSCHUH ET AL. 2022a

Tropschuh, B.; Brunner, S.; Dillinger, F.; Hagemann, F.: An Approach to Analyze Human-caused Work Errors. Procedia CIRP 106 (2022), S. 9-14.

TROPSCHUH ET AL. 2022b

Tropschuh, B.; Windecker, S.; Reinhart, G.: Study-based evaluation of accuracy and usability of wearable devices in manual assembly. Production & Manufacturing Research 10 (2022) 1, S. 569-582.

TROPSCHUH & REINHART 2020

Tropschuh, B.; Reinhart, G.: Concept for an Employee-Specific Resource Planning in Manual Assembly. (Hrsg.): AHFE 2020: Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering. Proceedings of the ahfe: Springer 2020, S. 409-416. ISBN: 978-3-030-51040-4.

TROUDI 2021

Troudi, R.: Prototypical development of a web application for communication with employees in manual assembly. (Bachelorarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2021).

ULMER 2017

Ulmer, G.: Gehaltssysteme erfolgreich gestalten. IT-unterstützte Lohn- und Gehaltsfindung. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2017. ISBN: 978-3-662-55199-8.

ULRICH 1982

Ulrich, H.: Anwendungsorientierte Wissenschaft. Die Unternehmung 36 (1982) 1, S. 1-10.

ULRICH & HILL 1976a

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil 1). WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium. Zeitschrift für Studium und Forschung (1976) 5, S. 304-309.

ULRICH & HILL 1976b

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil 2). WiSt – Wirtschaftswissenschaftliches Studium. Zeitschrift für Studium und Forschung (1976) 5, 345-340.

URBAN & MAYERL 2011

Urban, D.; Mayerl, J.: Regressionsanalyse: Theorie, Technik und Anwendung. Lehrbuch ; Neu: jetzt auch mit logistischer Regression. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer 2011. ISBN: 978-3-531-17345-0. (Lehrbuch).

VDI-RICHTLINIE 2860 1990

VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen. Begriffe, Definitionen, Symbole. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik. 1990.

VERNIM 2020

Vernim, S.: Anforderungsermittlung für das Montagepersonal in der digitalen Transformation. (Dissertation) Technische Universität München (2020).

WALCH 09.02.2011

Walch, D.: Belastungsausgleich durch intelligente Job Rotation in der Intralogistik. (Konferenzvortrag). Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München. München (09.02.2011).

WALLNER 2020

Wallner, J.: Stigmatisierung von Menschen mit einer psychischen Erkrankung. In: Riedel, A. et al. (Hrsg.): Ethik im Gesundheitswesen. Berlin, Heidelberg: Springer 2020, S. 1-14. ISBN: 978-3-662-58685-3. (Springer Reference Pflege – Therapie – Gesundheit).

WANG ET AL. 2017

Wang, R.; Blackburn, G.; Desai, M.; Phelan, D.; Gillinov, L.; Houghtaling, P.; Gillinov, M.: Accuracy of Wrist-Worn Heart Rate Monitors. JAMA cardiology 2 (2017) 1, S. 104-106.

WARNECKE ET AL. 1975

Warnecke, H.-J.; Löhr, H.-G.; Kiener, W.: Montagetechnik. Schwerpunkt der Rationalisierung. Mainz: Krausskopf 1975. ISBN: 3-7830-0098-x. (Buchreihe Produktionstechnik heute 7).

WARNECKE 1995

Warnecke, H.-J.: Der Produktionsbetrieb 2. Berlin, Heidelberg: Springer 1995. ISBN: 978-3-540-58397-4.

WEBER & GESING 2019

Weber, U.; Gesing, S.: Feelgood-Management als Umsetzung der Agilität. In: Weber, U. et al. (Hrsg.): Feelgood-Management. Wiesbaden: Springer 2019, S. 9-12. ISBN: 978-3-658-23976-3. (essentials).

WELTERMANN ET AL. 2020

Weltermann, B. M.; Kersting, C.; Pieper, C.; Seifried-Dübön, T.; Dreher, A.; Linden, K.; Rind, E.; Ose, C.; Jöckel, K.-H.; Junne, F.; Werners, B.; Schroeder, V.; Bois, J.-M.; Siegel, A.; Thielmann, A.; Rieger, M. A.; Kasten, S.: IMPROVEjob - Participatory intervention to improve job satisfaction of general practice teams: a model for structural and behavioural prevention in small and medium-sized enterprises - a study protocol of a cluster-randomised controlled trial. *Trials* 21 (2020) 1, S. 532.

WENTURA & POSPESCHILL 2015

Wentura, D.; Pospeschill, M.: Multiple Regression. In: Wentura, D. et al. (Hrsg.): *Multivariate Datenanalyse*. Wiesbaden: Springer 2015, S. 33-51. ISBN: 978-3-531-17118-0.

WERNER 2021

Werner, L.: *Analyse und Optimierung des betrieblichen Präventions- und Integrationsprozesses in der BMW Technologie-Montage des Werks Münchens*. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2021).

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 7. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-41878-3.

WIENDAHL & WIENDAHL 2020

Wiendahl, H.-P.; Wiendahl, H.-H.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 9. Aufl. München: Hanser 2020. ISBN: 978-3-446-44661-8.

WIESNER 1980

Wiesner, H.: *Die Techniken des Personalmanagements*. Wiesbaden: Gabler Verlag 1980. ISBN: 978-3-322-85327-1.

WILSON & LAING 2018

Wilson, S.; Laing, R.: *Wearable Technology: Present and Future*. University of Otago. 2018.

WINDECKER 2021

Windecker, S.: Model- and Study-Based Evaluation of the Accuracy, Acceptance, and Usability of Wearable Devices in Production Environments. (Masterarbeit). Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2021).

WITTEMANN 2017

Wittemann, P.: Konzeption eines Verfahrens zur Ableitung ergonomischer Gestaltungslösungen für fähigkeitsgerechte Arbeitsplätze. (Dissertation) Technische Universität Darmstadt (2017).

WOHLIN 2014

Wohlin, C.: Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In: Shepperd, M. (Hrsg.): Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering. London, 13.-14.05.2014. New York: ACM 2014, S. 1-10. ISBN: 978-1-450-32476-2. (ACM Digital Library).

WONGWIEN & NANTHAVANIJ 2013

Wongwien, T.; Nanthavanij, S.: Ergonomic Workforce Scheduling With Productivity And Employee Satisfaction Consideration. (Hrsg.): Proceedings of the 2013 (4th) International Conference on Engineering, Project, and Production Management. 2013.10.23: Association of Engineering, Project, and Production Management 2013, S. 1108-1116.

YAMAMOTO ET AL. 2019

Yamamoto, A.; Nakamoto, H.; Bessho, Y.; Watanabe, Y.; Oki, Y.; Ono, K.; Fujimoto, Y.; Terada, T.; Ishikawa, Akira: Monitoring respiratory rates with a wearable system using a stretchable strain sensor during moderate exercise. *Medical & biological engineering & computing* 57 (2019) 12, S. 2741-2756.

YENER & CAN 2018

Yener, Y.; Can, G. F.: A Mathematical Model for Determining Job Rotation Strategy Considering Mental and Physical Fatigue. *Ergonomics International Journal* 2 (2018) 9.

YOON ET AL. 2016

Yoon, S.-Y.; Ko, J.; Jung, M.-C.: A model for developing job rotation schedules that eliminate sequential high workloads and minimize between-worker variability in cumulative daily workloads: Application to automotive assembly lines. *Applied Ergonomics* (2016) 55, S. 8-15.

YOUSIF ET AL. 2019

Yousif, H. A.; Zakaria, A.; Rahim, N. A.; Salleh, A. F.; Mahmood, M.; Alfarhan, K. A.; Kamarudin, L. M.; Mamduh, S. M.; Hasan, Ali Majid; Hussain, Moaid K.: Assessment of Muscles Fatigue Based on Surface EMG Signals Using Machine Learning and Statistical Approaches: A Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 705 (2019) 1, S. 12010.

ZÄH & DAUB 2022

Zäh, M. F.; Daub, R.: Mensch und Produktion. (Vorlesungsskript) Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften; (iwb). München 2022.

Vorveröffentlichungsverzeichnis

Vorläufige Inhalte dieser Arbeit wurden vorab in Buch- und Zeitschriftenbeiträgen sowie auf Konferenzen publiziert, die unterhalb aufgelistet sind.

TROPSCHUH ET AL. 2023

Tropschuh, B.; Cegarra, J.; Battaïa, O.: Integrating physiological and mental aspects in employee scheduling: an overview for practitioners in production management. *International Journal of Production Research* (2023), S. 1-14.

TROPSCHUH ET AL. 2022c

Tropschuh, B.; Windecker, S.; Reinhart, G.: Study-based evaluation of accuracy and usability of wearable devices in manual assembly. *Production & Manufacturing Research* 10 (2022) 1, S. 569-582.

TROPSCHUH ET AL. 2022b

Tropschuh, B.; Maier, M.; Dillinger, F.; Korder, S.: Manufacturing-Related Social Sustainability in Learning Factories. *SSRN Electronic Journal* (2022).

TROPSCHUH ET AL. 2022a

Tropschuh, B.; Brunner, S.; Dillinger, F.; Hagemann, F.: An Approach to Analyze Human-caused Work Errors. *Procedia CIRP* 106 (2022), S. 9-14.

TROPSCHUH & BECK 2022

Tropschuh, B.; Beck, B.: Development of a Competence-based Role Model for Managers considering current Megatrends. In: Herberger, D. et al. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2022)*: publish-Ing. 2022.

TROPSCHUH ET AL. 2021c

Tropschuh, B.; März, L.; Hagemann, F.; Schaplewski, N.: Simulation Concept of Production Environments – An Employee-oriented Approach. (Hrsg.): *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Melbourne, Australia, 17.10.2021 - 20.10.2021: IEEE 2021, S. 1817-1822. ISBN: 978-1-6654-4207-7.

TROPSCHUH ET AL. 2021b

Tropschuh, B.; Niehues, S.; Reinhart, G.: Measuring physical and mental strain during manual assembly tasks. CIRP Conference on Manufacturing Systems. Procedia CIRP 104 (2021), S. 968-974.

TROPSCHUH ET AL. 2021a

Tropschuh, B.; Dillinger, F.; Korder, S.; Maier, M.; Gärtner, Q.; Vernim, S.: Industrie 5.0 – ein menschenzentrierter Ansatz. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 116 (2021) 6, S. 387-392.

Tropschuh, B.; Dillinger, F.; Gärtner, Q.; Korder, S.; Bauer, H.; Kagerer, M.: Structure of a Socio-Technical Learning and Innovation Factory. In: Nazir, S. et al. (Hrsg.): Advances in Human Factors in Training, Education, and Learning Sciences. Cham: Springer International Publishing 2021, S. 3-11. ISBN: 978-3-030-79999-1. (Lecture Notes in Networks and Systems)

TROPSCHUH ET AL. 2020b

Tropschuh, B.; Aranda Diez, M.; Waldherr, S.; Reinhart, G.: Psychische Beanspruchung in der manuellen Montage. Messung von Vitalwerten mithilfe von Smart Devices. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 115 (2020) 10, S. 703-706.

TROPSCHUH & REINHART 2020

Tropschuh, B.; Reinhart, G.: Concept for an Employee-Specific Resource Planning in Manual Assembly. (Hrsg.): AHFE 2020: Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering. Proceedings of the ahfe. [S.l.]: Springer 2020, S. 409-416. ISBN: 978-3-030-51040-4.

TROPSCHUH ET AL. 2020a

Tropschuh, B.; Korder, S.; Dillinger, F.; Bauer, H.; Reinhardt, G.: Activity-based shop floor management – A concept to enhance flexibility. In: Nyhuis, P. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1st Conference on Production Systems and Logistics (CPSL 2020): Hannover: Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover 2020.

TROPSCHUH ET AL. 2019

Tropschuh, B.; Vernim, S.; Reinhart, G.: Ableitung von Kompetenzanforderungen. Methode für die manuelle, digitalisierte Montage. wt Werkstattstechnik online 109 (2019) 3, S. 142-147.

DILLINGER ET AL. 2021

Dillinger, F.; Kagerer, M.; Brandl, F.; Bauer, H.; Tropschuh, B.; Korder, S.; Reinhart, G.: Managing the Systemic Transition from a Learning Factory for Lean Production (LSP) to an Innovation Lab for Smart & Lean Processes at iwB (TUM). SSRN Electronic Journal (2021).

DILLINGER ET AL. 2022

Dillinger, F.; Tropschuh, B.; Dervis, M. Y.; Reinhart, G.: A Systematic Approach to Identify the Interdependencies of Lean Production and Industry 4.0 Elements. *Procedia CIRP* 112 (2022), S. 85-90.

MAIER ET AL. 2020

Maier, M.; Tropschuh, B.; Teubner, S.; Reinhart, G.: Methode zur Gestaltung des Anlernprozesses in der manuellen Montage. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020) 10, S. 682-686.

KORDER ET AL. 2019

Korder, S.; Tropschuh, B.; Reinhart, G.: A Competence-Based Description of Employees in Reconfigurable Manufacturing Systems. In: Ameri, F. et al. (Hrsg.): *Advances in Production Management Systems. Production Management for the Factory of the Future*. Cham: Springer International Publishing 2019, S. 257-264. ISBN: 978-3-030-29999-6. (566).

VERNIM ET AL. 2019

Vernim, S.; Korder, S.; Tropschuh, B.: Sind unsere Mitarbeiter für einen Einsatz in der digitalen Fabrik richtig qualifiziert? Ermittlung zukünftiger Mitarbeiteranforderungen in der Smart Factory. In: Bosse, C. K. et al. (Hrsg.): *Arbeit 4.0 im Mittelstand. Chancen und Herausforderungen des digitalen Wandels für KMU*. [S.l.]: GABLER 2019, S. 71-90. ISBN: 978-3-662-59473-5

Studienarbeitsverzeichnis

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin dieser Arbeit die im Folgenden chronologisch aufgeführten studentischen Arbeiten. In ihnen wurden verschiedene Fragestellungen in den Themenbereichen Kompetenzen und Anforderungen in der manuellen Montage, Belastung und Beanspruchung, Personaleinsatzplanung sowie Interaktionsschnittstellen untersucht. Deren Ergebnisse sind zum Teil in die vorliegende Arbeit eingeflossen, siehe Abbildung 0-1 und Abbildung 0-2.

| Name | Jahr | Typ | Titel der Studienarbeit | Mitwirkung |
|----------------------|------|-----|--|--|
| Jan Kadletz | 2022 | BA | Entwicklung einer Methode zur strukturierten Wirtschaftlichkeitsbewertung von Konzepten der Personaleinsatzplanung | Kapitel 7.2 |
| Wolfgang Stelzer | 2022 | SA | Konzeptionierung und Gestaltung eines vollautomatisierten Kennzahlensystems zur Steuerung der logistischen Regressierung | Kapitel 6.1 |
| Nicola Müller | 2022 | MA | Entwicklung einer Methode für den beanspruchungs- und kompetenzorientierten Abgleich zwischen Arbeitsplätzen und Mitarbeitenden in der manuellen Montage | Kapitel 5.1, Kapitel 6.2 |
| Simon Botz | 2022 | MA | Validierung und wirtschaftliche Betrachtung einer mitarbeiterorientierten Einsatzplanung in der manuellen Montage bei der MAN Truck & Bus SE | Kapitel 4.1 Kapitel 6.1, Kapitel 7.1, Kapitel 7.2 |
| Benedict Beck | 2022 | MA | Entwicklung eines rollenbasierten Kompetenzmodells von Führungskräften im Zuge der digitalen Transformation | Kapitel 5.1 |
| Susanne Windecker | 2021 | MA | Model- and Study-Based Evaluation of the Accuracy, Acceptance, and Usability of Wearable Devices in Production Environments | Kapitel 5.2 |
| Mohamed Gania | 2021 | MA | Development of Human-Oriented Simulation Model for Manual Assembly | Kapitel 5.1 |
| Hannah Oberparleiter | 2021 | BA | Entwicklung eines Konzepts zur Abfrage von Mitarbeitenden-Feedback in der Produktion hinsichtlich Smart Devices | Kapitel 5.2 |
| Lukas Lacher | 2021 | SA | Entwicklung einer Methode zur Anforderungsbestimmung von Anforderungen in der manuellen Montage | Kapitel 5.1 |
| Lea Werner | 2021 | MA | Analyse und Optimierung des betrieblichen Präventions- und Integrationsprozesses in der BMW Technologie-Montage des Werks Münchens | Kapitel 5.1, Kapitel 7.1 |
| Pinar Keskin | 2021 | MA | Entwicklung eines nutzerzentrierten User Interface für die Kommunikation der Mitarbeiterrotation in der manuellen Montage | Kapitel 6.2 |

Abbildung 0-1: Übersicht der betreuten Studienarbeiten (Teil 1)

| | | | | |
|-------------------------|------|----|--|-------------|
| Roumaissa Troudi | 2021 | BA | Prototypical development of a web application for communication with employees in manual assembly | Kapitel 6.2 |
| Vishal Saini | 2021 | BA | Analyse der Rotationszeiten und der beeinflussenden Kriterien in der manuellen Montage | Kapitel 5.1 |
| Philipp Angermann | 2020 | MA | Entwicklung einer Zielfunktion zur Bewertung von Job-Rotationsplänen | Kapitel 5.3 |
| Felicitas Sprenger | 2020 | MA | Entwicklung einer Methode zur Identifikation der Anforderungsähnlichkeit von Arbeitsplätzen in der manuellen Montage | Kapitel 5.1 |
| Stefan Brunner | 2020 | MA | Lean Production – Methode zur Identifizierung von Verschwendung durch physische und psychische Fehlbelastung | Kapitel 7.2 |
| Lukas Kalweit | 2020 | MA | Stress in der manuellen Montage. Die Evaluierung von psychischen und physischen Stressoren | Kapitel 5.2 |
| Marta Aranda-Diez | 2020 | MA | Methode zur anwendungsspezifischen Auswahl von Smart Devices zur Messung psychischer Beanspruchung in der manuellen Montage | Kapitel 5.2 |
| Philipp Angermann | 2020 | SA | Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Bewertung eines Rotationsplans in der manuellen Montage | Kapitel 5.3 |
| Maria Maier | 2020 | MA | Leitfaden für den arbeitsinhaltlichen und arbeitsorganisatorischen Anlernprozess in der manuellen Montage | Kapitel 5.1 |
| Julian Bill | 2020 | MA | Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der ergonomischen, fachlichen, sozialen Anforderungsähnlichkeit von Arbeitsplätzen in der manuellen Montage | Kapitel 5.1 |
| Renata Amirato Chiquito | 2020 | BA | Entwicklung einer Methode zur psychischen Arbeitsplatzbewertung in der manuellen Montage | Kapitel 5.2 |
| Alexander Beck | 2020 | BA | Erstellung eines Kriterienkatalogs zur Rotationsplanung in der manuellen Montage | Kapitel 5.3 |
| Lukas zur Nedden | 2020 | BA | Konzeption eines anreizorientierten Entlohnungssystems in der manuellen Montage | Verständnis |
| Stefan Reisinger | 2020 | MA | Erstellung eines Anforderungs- und Kriterienkatalogs für Rotationslogiken in der manuellen Montage | Kapitel 5.3 |
| Günther Rainer | 2019 | MA | Konzeption einer Methode zur Analyse soziologischer Faktoren und deren Auswirkung bei der Zusammenarbeit in der Produktion | Kapitel 5.3 |
| Lioba Brockmann | 2019 | BA | Bewertung von Arbeitsanalyseverfahren hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit in der manuellen Montage | Kapitel 5.2 |
| Nicola Müller | 2019 | BA | Flexible Arbeitszeitmodelle im Kontext von Industrie 4.0 | Verständnis |

Legende: MA: Masterarbeit, SA: Semesterarbeit, BA: Bachelorarbeit

Abbildung 0-2: Übersicht der betreuten Studienarbeiten (Teil 2)

Die Autorin dankt an dieser Stelle allen Studierenden herzlich für das umfassende Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Anhang

A. Ergänzendes Material zum Stand der Erkenntnisse

| 1. Was | | 2. Wo |
|----------------------|---------------------------|------------------|
| Employee scheduling | Personnel allocation | assembly |
| Employee planning | Personnel deployment | production |
| Employee allocation | Personnel assignment | manufacturing |
| Employee deployment | Staff scheduling | Manual assembly |
| Employee assignment | Staff planning | Montage |
| Job rotation | Staff allocation | Manuelle Montage |
| rostering | Staff deployment | Produktion |
| Workforce scheduling | Staff assignment | |
| Workforce planning | Human resource scheduling | |
| Workforce allocation | Human resource planning | |
| Workforce deployment | Human resource allocation | |
| Workforce assignment | Human resource deployment | |
| Personnel scheduling | Human resource assignment | |
| Personnel planning | Einsatzplanung | |

Abbildung A-1: Suchwörter der strukturierten Literaturrecherche

| | Kriterium 1 | | | Kriterium 2 | | | Kriterium 3 | |
|------------------------------------|--|-----------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| | 1.1: Beschreibung der Belastung | | 1.2: Beschreibung der Kompetenzen | 2.1: Messung der Beanspruchung | | 2.2: Prognose der Beanspruchung | 3.1: Generierung von Personal-einsatzplänen | 3.2: Kommunikation der Einsatzpläne |
| | physisch | psychisch | | physisch | psychisch | | | |
| AZIZI ET AL. (2015) | - | - | ● | - | - | - | ● | - |
| DENKENA ET AL. (2016) | - | - | ● | - | - | - | ● | - |
| DENKENA ET AL. (2017) | - | - | ● | - | - | - | ● | - |
| MALACHOWSKI & KORYTKOWSKY (2019) | - | - | ● | - | - | - | ◐ | - |
| ÖZDER ET AL. (2019) | - | - | ● | - | - | - | ● | - |
| MOURTZIS ET AL. (2020) | - | - | ● | - | - | - | - | - |
| AYOUGH ET AL. (2021) | - | - | ● | - | - | - | ● | - |
| GRÄBLER ET AL. (2021) | - | - | ● | - | - | - | ● | - |
| BOENZI ET AL. (2013) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| OTTO & SCHOLL (2018) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| HUANG & PAN (2014) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| YOON ET AL. (2016) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| SONG ET AL. (2016) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| RATTANAMANEE & LAORAKSAKIAT (2019) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| SANA ET AL. (2019) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| RODRIGUES ET AL. (2020) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| RINALDI ET AL. (2021) | ● | - | - | - | - | - | ◐ | - |
| Legende | | | | | | | | |
| - | wird nicht betrachtet | | nicht erwähnt oder alle gleich | | | wird nicht betrachtet | | |
| ◐ | nur einzelne Aspekte werden analysiert | | ja/nein-Unterscheidung | | | wird in Teilaspekten berücksichtigt | | |
| ● | Arbeitsplatz wird komplett betrachtet | | differenziert berücksichtigt | | | wird komplett betrachtet | | |

Abbildung A-2: Übersicht der kompetenzorientierten und der belastungsorientierten Ansätze

B. Ergänzendes Material zu Befragung der Experten und Expertinnen

| Tätigkeitsfeld | Funktion |
|-----------------------------|----------------------|
| Vormontage | Segmentleiter:in |
| Hauptmontage (Abschnitt c) | Segmentleiter:in |
| Hauptmontage (Abschnitt c) | Teamkoordinator:in |
| Einfahrabteilung | Teamkoordinator:in |
| Nacharbeit | Segmentleiter:in |
| Nacharbeit | Teamkoordinator:in |
| Prozessplanung Vormontage | Mitarbeitende/r |
| Prozessplanung Hauptmontage | Mitarbeitende/r |
| Gesundheitswesen | Betriebsarzt/-ärztin |

Abbildung B-3: Experten und Expertinnen der Befragung zu Anforderungen an eine beanspruchungs- und kompetenzorientierte Personaleinsatzplanung sowie zur Validierung (BOTZ 2022)

C. Ergänzendes Material zu Baustein 1

| Tätigkeitsfeld | Funktion |
|---------------------|--|
| Softwareentwicklung | Chief Technology Officer (CTO), Technische/r Geschäftsführer:in |
| Softwareentwicklung | Entwickler:in |
| Automobilhersteller | Abteilungsleiter:in Montage |
| Automobilhersteller | Betriebsingenieur:in Montage |
| Automobilhersteller | Betriebsingenieur:in Montage |
| Automobilhersteller | Werksleiter:in |
| Automobilhersteller | Prozessplaner:in |
| Wissenschaft | Professor:in |
| Wissenschaft | Professor:in |
| Wissenschaft | Professor:in |

Abbildung C-4: Experten und Expertinnen der Befragung zu menschorientierten Arbeitssystemen

| | Kriterium | Prasch (2010) | Anneken (2006) | Fritzsche et al. (2017) | Adenauer (2004), Knülle (2004) | DGUV (2022) | Wittemann (2017) | Walch (2011) | Schmidtke & Jastrzebska-Fraczek (2013) |
|--------------------------------------|---|--|-----------------------|-------------------------------|--|------------------------------|---|-----------------------------|--|
| Nacken-/Arm | Belastung des Nackens | Belastung des Nackens | Kopf-/ Halsbewegungen | Bewegung Kopf/ Nacken/HWS | Kopf-/ Halsbewegungen | | | Belastung des Nackens | |
| | Beweglichkeit der Arme | Beweglichkeit der Arme | | | Armbewegungen | | | Beweglichkeit der Arme | |
| Rumpfbelastung | Beugen | Beweglichkeit des Rumpfes | Rumpfbewegung Bücken | Rumpf | Geneigt/Gebückt | Rumpfbeuge | Beugung | Beweglichkeit des Rumpfs | |
| | Drehen/ Torsion | | | | Drehen | | Torsion >30° | | Torsion |
| | Rumpfeigung | | | | | | Rumpfeigung | | Rumpfeigung |
| Hand-Finger-Armkräfte | Belastung Hände/Arme | Belastung Unterarm, Hand | Handbewegungen | | Hand-/ Fingerbewegungen | Repetition, Handkraft | Hantieren mit Handwerkzeugen | Belastung der Arme, Hände | |
| | Drehen Hände/Arme | | Drehen | Drehen Hand, Arm | Armbewegungen | Klopfen, Drücken | Drehen Unterarm | | |
| | Reichen | | Reichen | | | | | | |
| | Hand/Arm-Vibration | Drehbewegung, Vibrationen | | Vibrationen | | Hand-Arm-Vibrationen | Hand-Arm-Vibrationen | | |
| | Feinmotorik | Belastung Finger | Feinmotorik | | Feinmotorik | | Leichter Druck | | |
| Belastung | | Fingerbewegungen | hohe Fingerkräfte | | | Erhöhter Druck | Belastung Finger | | |
| Stehen, Gehen, Sitzen, Knien, Hocken | Knien | Bewegung Knie | Knien | Knien | Knien | Knien, Fersensitz | Knien | Bewegung Knie | Knien |
| | Hocken | | Hocken | Hocken | Hocken | Hocken | Hocken | | |
| | Steigen | | Steigen | Steigen | | Steigen | Steigen | | |
| | Liegen | | | Liegen | Liegen | | | | |
| | Stehen | Stehen | Stehen | Stehen | Stehen | Stehen | Stehen | Stehen | Stehen |
| | Kriechen | | | | Kriechen | | | | |
| | Klettern | | | | Klettern | | | | |
| | Gehen | Gehen | Gehen | | Gehen | Gehen | Gehen | | |
| | Sitzen | Sitzen | Sitzen | Sitzen | Sitzen | Sitzen | Sitzen | | Sitzen |
| Körpergröße | Körpergröße | | | | | | | | |
| Handhabung von Lasten | Handhabung von Lasten | Handhabung von Lasten | Heben, Tragen | Heben, Halten, Tragen | Heben, Tragen | Heben, Halten, Tragen | Heben, Halten, Tragen, Umsetzen | Lasthandhabung nach der LMM | Heben |
| | Bein-/ Fußbewegung | | | | Bein-/Fußbewegung | | | | |
| | Schieben, Ziehen | Schieben, Ziehen | Schieben, Ziehen | Schieben, Ziehen | Schieben, Ziehen | Schieben, Ziehen | Schieben, Ziehen | Arme, Schulter | Schieben, Ziehen |
| | Ganzkörperkräfte Vibration | | | Ganzkörperkräfte Vibrationen | Vibrationen/ Ganzkörpererschütterung | Ganzkörperkräfte Vibrationen | Ganzkörpervibration | | |
| | Canal-Länge über Schulterhöhe | über Schulterhöhe | | über Schulter | | | über Schulterhöhe | über Schulter | über Schulter |
| Überkopf | | | Überkopf | | Überkopf | Überkopf | | Überkopfarbeit | |
| Umgebungsbedingungen | Lärm | Lärm | | Lärm | Schall/Lärm | | Lärm | | |
| | Nässe | Nässe | | Feuchtarbeit | Nässe/Schmutz | | Feuchtarbeit | | |
| | Elektromagn. Felder | | | | | | Elektromagn. Felder | | |
| | Klima (Hitze/ Kältearbeit) | Klima | | Hitzearbeit / Kältearbeit | Klima | | Hitze | | |
| | Beleuchtung | Beleuchtung | | | Licht | | | | |
| | Gefährdung am Arbeitsplatz | Unfallgefahren am Arbeitsplatz | | | Unfallgefährdung | | Einsatz rotierender Maschinen, etc. | | |
| | Schutzausrüstung | Schutzausrüstung | | | Arbeitsschutzmitteln | | | | |
| | Gase/Dämpfe/ Stäube Flüssigkeiten/ Feststoffe | Gefahrstoffe Flüssigkeiten/ Feststoffe | | | Gase/Dämpfe/Stäube Flüssigkeiten/ Feststoffe | | Gase, Dämpfe, Stäube Lösungsmittel, Lacke | | |
| Arbeitsorganisation | Taktbindung | Taktbindung | | Taktbindung | Taktbindung | | Starre Taktbindung | Taktbindung | Taktbindung |
| | Normalschicht | | | | Normalschicht | | Normalschicht | | |
| | Wechselschicht | Schichtarbeit | | Schichtarbeit | Nachtschicht | | Wechselschicht | | |
| | Dauernachtschicht | | | | Akkord | | Dauernachtschicht | | Dauernachtschicht |
| | Teamarbeitsplatz isolierter AP | | | | Teamarbeitsplatz isolierter AP | | | | soz. Isolierung |
| Informationsaufnahme | Informationsaufnahme | Informationsaufnahme | | | | | | Informationsaufnahme | |
| | Farbsehen | | | Farbsehen | Sehen | | Farbsehen | | Farbtauglichkeit |
| | Sehfähigkeit | | | Sehen | Sehen | | Sehen | | Sehleistung |
| | Hörfähigkeit | | | Hören | Hören | | Spracherkennung | | Hörfähigkeit |
| | Sprechen | | | | Sprechen | | | | |
| | Tasten/Fühlen | | | | Tasten/Fühlen | | | | |
| | Gestik/Mimik | | | | Gestik/Mimik | | | | |
| | Riechen | | | | Riechen | | | | |
| | Lesen, Schreiben, Rechnen | | | | Lesen, Schreiben, Rechnen | | | | |
| Beweg- und Stellungsempfinden | | | | Beweg- und Stellungsempfinden | | | | | |
| Sonstiges | Fahr-/ Steuertätigkeit | Fahr-/ Steuertätigkeit | | | | | Fahr-/ Steuertätigkeit | | |
| | Staplerfähigkeit | | | | | | mit Staplerfähigkeit | | |
| | Gleichgewicht | | Gleichgewicht | | Gleichgewicht | | | | |
| Phys. Ausdauer | | | | Phys. Ausdauer | | | | | |

Abbildung C-5: Ergebnisübersicht der recherchierten physischen Aspekte für die AP- und MA-Profile

| Autor:innen | Titel |
|---|---|
| WITTEMANN (2017) | Konzeption eines Verfahrens zur Ableitung ergonomischer Gestaltungslösungen für fähigkeitsgerechte Arbeitsplätze |
| PRASCH (2010), ARBEITSKREIS ERGONOMIE (2002) | Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage, Anforderungs- und Belastbarkeits-Analyse (ABA) |
| JUNG (2011) | Personalwirtschaft |
| GLOYSTEIN & HILDERING (2017) | Leitfaden für die Erstellung von passgenauen Qualifizierungen |
| MIEBACH (2016) | Handbuch Human Ressource Management |
| DOLLINGER & REINHART (2016) | A Competence Based Approach to Support the Working Force Within Assembly Lines |
| NORTH ET AL. (2013) | Kompetenzmanagement in der Praxis - Mitarbeiterkompetenzen systematisch identifizieren, nutzen und entwickeln |

Abbildung C-6: Übersicht der Quellen zur Identifikation der allgemeinen Angaben in den Profilen

Vergleich Belastungen – Leistungsvoraussetzungen

| | | Merkmale | MA01 | AP01 | AP02 |
|-------------------------------|-------------------------------------|--|------|------|------|
| 1. Körperhaltungen | | | | | |
| M101 | Bein-System | Stehen | 1 | 1 | 1 |
| M102 | Bein-System | Sitzen | 3 | 3 | 3 |
| M103 | Bein-System | Gehen | 2 | 2 | 2 |
| M104 | Bein-System | Steigen | 4 | 5 | 1 |
| M105 | Bein-System | Knien | 0 | 4 | 1 |
| M106 | Bein-System | Hocken | 1 | 2 | 1 |
| M107 | Bein-System | Liegen | 1 | 1 | 1 |
| M108 | Wirbelsäule | Beugung: gebeugt 20° - 60° | 0 | 0 | 1 |
| M109 | Wirbelsäule | Beugung: gebückt > 60° | 5 | 2 | 2 |
| M110 | Wirbelsäule | Torsion > 30° (statisch (> 5 sec)) | 1 | 1 | 2 |
| M111 | Wirbelsäule | Seitliche Rumpfeigung > 20° | 1 | 2 | 1 |
| M112 | Halswirbelsäule/Nacken | Statische Belastung des Nackens | 1 | 1 | 1 |
| M113 | Schulter-Arm-System (über Schulter) | Arm über Schulterhöhe > 90° | 2 | 1 | 2 |
| M114 | Schulter-Arm-System (Überkopf) | Arm Überkopf > 110° (Streckung der Halswirbelsäule) | 1 | 1 | 1 |
| 2. Aktionskräfte | | | | | |
| M201 | Hand-Finger-Arm-System | Belastung der Finger/Hand: leichter Druck (bis 40 N) | 0 | 0 | 0 |
| M202 | Hand-Finger-Arm-System | Belastung der Finger/Hand: erhöhter Druck (> 40 N) bzw. Kraftbetontes Greifen | 2 | 1 | 1 |
| M203 | Hand-Finger-Arm-System | Ein-/Auswärtsdrehen des Unterarms | 1 | 1 | 1 |
| M204 | Hand-Finger-Arm-System | Belastung der Arme | 3 | 2 | 3 |
| M205 | Hand-Finger-Arm-System | Beweglichkeit der Arme | 4 | 2 | 1 |
| M206 | Hand-Finger-Arm-System | Feinmotorik | 1 | 1 | 1 |
| M207 | Vibrationen | Ganzkörpervibration | 2 | 2 | 1 |
| M208 | Vibrationen | Hand-Arm-Vibration | 1 | 1 | 2 |
| M209 | Schulter-Arm-Ganzkörper-System | Aufbringen hoher Ganzkörperkräfte | 1 | 2 | 0 |
| 3. Lasthandhabung | | | | | |
| M301 | Lastenhandhabung | Heben & Umsetzen, Tragen, Halten | 2 | 2 | 1 |
| M302 | Lastenhandhabung | Ziehen und Schieben | 0 | 0 | 0 |
| 4. Arbeitsumgebung | | | | | |
| M401 | Lärm | 80 bis 85 dB(A) | 1 | 1 | 3 |
| M402 | Lärm | ≥ 85 dB(A) | 1 | 1 | 0 |
| M403 | Beleuchtung | Beleuchtung nicht ausreichend für die Arbeitsaufgabe | 3 | 2 | 1 |
| M404 | Klima | Hitzearbeit | 0 | 0 | 0 |
| M405 | Klima | Kältearbeit | 1 | 1 | 0 |
| M406 | Bewegungsfreiheit | Räumliche Enge, behinderte Bewegungsfreiheit | 1 | 1 | 1 |
| 5. Arbeitsorganisation | | | | | |
| M501 | Schicht | Normalschicht | 2 | 2 | 1 |
| M502 | Schicht | Wechselschichtsysteme | 1 | 1 | 0 |
| M503 | Schicht | 3-Schicht mit Nachtschicht | 1 | 1 | 1 |
| M504 | Schicht | Dauernachtschicht | 1 | 3 | 1 |
| M505 | Arbeitsablauf | Taktbindung | 0 | 2 | 0 |
| M506 | Arbeitsablauf | Zeitdruck | 2 | 1 | 4 |
| M507 | Arbeitsablauf | Arbeitsunterbrechungen, Störungen | 3 | 0 | 1 |
| M508 | Kommunikation & Kooperation | Isolierter Arbeitsplatz | 3 | 2 | 3 |
| M509 | Kommunikation & Kooperation | Sprachkenntnisse nötig | 2 | 1 | 1 |
| M510 | Vollständigkeit | Aufgaben werden nicht von Beginn bis Ende ausgeführt, kein sichtbares Ergebnis | 1 | 1 | 1 |
| M511 | Handlungsspielraum | Festgelegtes Arbeitstempo | 2 | 2 | 0 |
| M512 | Handlungsspielraum | Festgelegter Arbeitsablauf | 3 | 4 | 1 |
| M513 | Handlungsspielraum | Festgelegte Ausführung/Arbeitsschritte | 4 | 4 | 3 |
| M514 | Handlungsspielraum | Arbeitszeit > Arbeitspensum (zu wenig Arbeit) | 3 | 1 | 3 |
| M515 | Handlungsspielraum | Arbeitszeit < Arbeitspensum (zu viel Arbeit) | 1 | 0 | 1 |
| M516 | Variabilität | Überwiegend einformige Verrichtungen | 1 | 1 | 1 |
| M517 | Informationsaufnahme | Große Informationsmenge | 2 | 1 | 0 |
| M518 | Informationsaufnahme | Schlechte Informationsstruktur | 1 | 1 | 1 |
| M519 | Informationsangebot | Ausreichende Rückmeldung über Arbeitsabläufe | 1 | 1 | 1 |
| 6. Wahrnehmung | | | | | |
| M601 | Sehen | Sehschärfe nah | 1 | 1 | 1 |
| M602 | Sehen | Sehschärfe fern | 4 | 2 | 3 |
| M603 | Sehen | Räumliches Sehen | 1 | 1 | 1 |
| M604 | Sehen | Farbsehen | 1 | 0 | 1 |
| M605 | Hören | Geräusch-/Spracherkennung | 1 | 2 | 0 |
| M606 | Gleichgewicht | Gleichgewicht | 2 | 2 | 1 |
| 7. Arbeitssicherheit | | | | | |
| M701 | Arbeitssicherheit | Gefährdung am Arbeitsplatz | 2 | 2 | 1 |
| M702 | Arbeitssicherheit | Tragen von Schutzausrüstung | 1 | 1 | 1 |
| M703 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Gase, Dämpfe, Aerosole, Stäube, Rauch | 4 | 3 | 4 |
| M704 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Flüssigkeiten, Feststoffe (Öle, Fette, Emulsionen, Lösungsmittel, Lacke) | 0 | 0 | 1 |
| M705 | Gefahr- und Betriebsstoffe | Feuchtarbeit | 2 | 3 | 0 |
| M706 | Fahr- und Steuertätigkeit | Fahr- und Steuertätigkeit | 0 | 0 | 0 |

| | | |
|---|-------------|-------------|
| Vergleich Anforderungs- und Fähigkeitsprofile: Anteil erfüllter Merkmale | 51/62 | 52/62 |
| prozentualer Anteil | 82% | 84% |
| | AP01 | AP02 |

| | | |
|------------------------|------|------|
| 1. Körperhaltungen | 71% | 143% |
| 2. Aktionskräfte | 89% | 89% |
| 3. Lastenhandhabung | 100% | 100% |
| 4. Arbeitsumgebung | 100% | 83% |
| 5. Arbeitsorganisation | 74% | 74% |
| 6. Wahrnehmung | 83% | 100% |
| 7. Arbeitssicherheit | 83% | 83% |

| Legende | |
|---------|--------------------------|
| | Genauere Übereinstimmung |
| | Übererfüllung |
| | Untererfüllung |

Abbildung C-7: Vergleich der AP-Belastungen und MA-Leistungsvoraussetzungen

D. Ergänzendes Material zu Baustein 2

| Tätigkeitsfeld | Funktion |
|-----------------------------|----------------------|
| Vormontage | Segmentleiter:in |
| Hauptmontage (Abschnitt c) | Segmentleiter:in |
| Hauptmontage (Abschnitt c) | Teamkoordinator:in |
| Einfahrabteilung | Teamkoordinator:in |
| Nacharbeit | Segmentleiter:in |
| Nacharbeit | Teamkoordinator:in |
| Prozessplanung Vormontage | Mitarbeitende/r |
| Prozessplanung Hauptmontage | Mitarbeitende/r |
| Vormontage | Teamkoordinator:in |
| Vormontage | Betriebsingenieur:in |
| Vormontage | Betriebsingenieur:in |
| Gesundheitswesen | Betriebsarzt/-ärztin |

Abbildung D-8: Experten und Expertinnen der Befragung zum Thema Wearables zur Beanspruchungsmessung und Restriktionen in der manuellen Montage

Studie zur Erfassung physischer und psychischer Beanspruchung

In diesem Abschnitt werden die Dokumente zur einheitlichen Gestaltung der Studiendurchführung dargestellt. Dabei werden der Ablauf der Studie (Abbildung D-9, Abbildung D-10), die Arbeitsplatzbeschreibung (Abbildung D-11) und die Werkendeninformation einer Produktvariante gezeigt (Abbildung D-12).

Studie BeKoMi
Barbara Tropschuh

Ablaufplan Studie

Vorab

Fragebögen zu Leistungsvoraussetzungen vorab online

Vor Ort

1. Probandeneinwilligung
2. Covid-19-Sicherheitsunterweisung
3. **Handkraftmessung** (sitzend auf Stuhl)
 - Der Patient sitzt auf dem Stuhl, die Arme sind nicht abgestützt.
 - Das Ellenbogengelenk ist 90 ° flektiert, der Unterarm in der Neutralposition und das Handgelenk befindet sich 0-30 ° in der Dorsalextension.
 - 1. „on/off“ drücken, sollte dann ausschauen wie hier -->
 - 2. „Test“ drücken
 - o Probanden 1x maximal drücken lassen
 - o Wert aufschreiben
 - o „reset“ drücken
 - noch **2x wiederholen**
4. Anlegen der Messgeräte
 - a. Brustgurt -> vorher etwas mit Wasser befeuchten
 - b. EMG Hemd -> Kontrolle, ob Sensoren vom Hemd auf dem Brustgurt liegen
 - c. Fitnessstracker anlegen (Bedienung kurz erklären)

1. **Runde 0: Training** (10-15 min)
Versuchsleiter erklärt Arbeitsschritte (siehe AP-Beschreibung), Proband:in darf selbst testen. So viel Hilfe wie nötig geben (Jeder soll es lernen). Jeder aber nur 1 Durchlauf. Fragen, ob Proband sich sicher fühlt

2. **Runde 1 Taktzeit 7:30 min**: Montagefehler notieren und notieren, ob Arbeitsinhalt in Taktzeit geschafft wurde
3. Werkerinfo 1
4. GoPro starten
5. MuscleMonitor + Fitnessstracker starten (Zeit notieren)
6. Fragebögen
 - a. Nasa TLX
 - b. Borg
 - c. ISA
7. **Werkerinfo weiterschalten**



1
0.0kg

| | |
|---|-------------------|
| Runde 1 und Runde 2 randomisieren | |
| Ziel: Fertig werden mit Montage! | Zeit-Ankündigung: |
| | Halbzeit: 3.45 |
| | 1 min: 6.30 |

Abbildung D-9: Ablaufplan der Studie (Seite 1/2)

Studie BeKoMi
Barbara Tropschuh



8. **Runde 2 Taktzeit 5:45 min**: Montagefehler notieren und notieren, ob Arbeitsinhalt in Taktzeit geschafft wurde

9. Werkerinfo 2

10. MuscleMonitor + Fitnesstracker starten (Zeit notieren)

11. Fragebögen

- a. Nasa TLX
- b. Borg
- c. ISA

Ziel: Fertig werden mit Montage!

Zeit-Ankündigung:

Halbzeit: 2.53

1 min: 4.45

12. GoPro ausschalten
13. Geräte ausziehen & ausschalten

Danach:

- Geräte desinfizieren, APs desinfizieren
- T-Shirt ggf. waschen
- GoPro überspielen/ Speicherkarte tauschen
- Daten von Myontec exportieren

Geräte Laden

- Tablets (1x Werkerinfo, 1x Fragebogen)
- Fitnesstracker, GoPro, Sensor EMG-Hemd (2x)

Abbildung D-10: Ablaufplan der Studie (Seite 2/2)

Arbeitsplatzbeschreibung

Arbeitsplatz – Montage Kotflügelträger, Schläuche & Stecker

Montage:

- Werkerinformationssystem lesen, Orientierung finden
Fließrichtung identifizieren (erklären, wie Werkerinfo zu lesen ist)
- Kotflügelträger und Schraube aus dem Regal nehmen,
Bauteilnummer mit Nummer im Werkerinfosystem vergleichen/kontrollieren
- Positionen der Kotflügelträger aus Werkerinfo ablesen und am Achsträger mit Hilfe des Maßbands abmessen & an der vorgegebenen Positione per Hand anschrauben
- Vorgang mit 2. Kotflügelträger wiederholen
- Ratsche aus dem Regal holen und Schrauben festziehen
- Schrauben und Muttern aus dem Regal nehmen und an den vorgegebenen Positionen (mit Maßband abmessen) per Hand anschrauben
→ Auf Ausrichtung achten (Vgl. Werkerinfo)
→ Vorgang mit 2. Schrauben-Mutter-Kombination wiederholen
- Position der Schläuche dem Werkerinformationssystem entnehmen
- Schläuche und Schlauchschellen (je 2x) aus dem Regal nehmen
- Schlauchende auf die am Achsträger befestigten Stangen pressen und mit Schlauchschelle befestigen
- Schlauchschellen mit Schraubenzieher festdrehen (am Schlauch anpressen)
- Stecker (2x) aus dem Regal nehmen und an die passenden am Achsträger befestigten Enden clipsen
- Kabelenden der Stecker jeweils am Achsträger entlang legen und an den zwei vorgegebenen Positionen mit Kabelbindern befestigen
→ Positionierung aus Werkerinfosystem beachten
- Zange aus Regal holen und überstehende Enden der Kabelbinder mit Zange abknipsen

Demontage:

- Schrauben mit Muttern wieder abschrauben und ins Regal in die vorgegebenen Boxen zurücklegen
- Schrauben zur Befestigung der Kotflügelträger mit Ratsche wieder lockern, abschrauben und alle Teile wieder zurück ins Regal in die vorgegebenen Fächer legen
- Aus dem Regal entnommenes Werkzeug, wie Ratsche oder Maßband, wieder an die vorgegebene Stelle im Regal legen
- Kabelbinder zur Befestigung der Kabel mit der Zange abknipsen
- Stecker ausclipsen und zurück ins Regal in die vorgegebene Box legen
- Schlauchschellen mit dem Schraubenzieher lockern
- Schlauchschellen und Schläuche vom Achsträger entfernen und zurück in die vorgegebenen Boxen im Regal legen
- Aus dem Regal entnommenes Werkzeug wieder an die vorgegebene Stelle im Regal legen

Abbildung D-11: Strukturierte Beschreibung des Montageablaufs der Studie am nachgebauten Arbeitsplatz

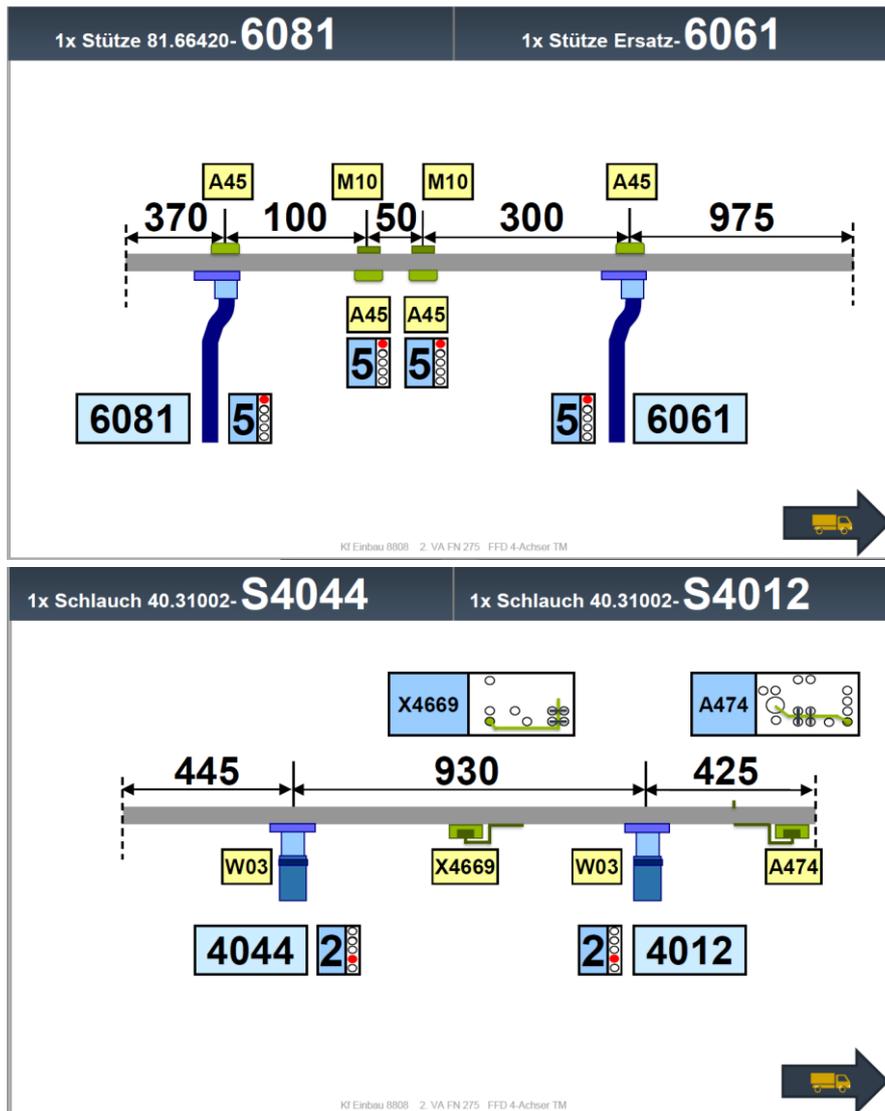


Abbildung D-12: Zweiteilige Werkendeninformation der Studie für eine der beiden Produktvarianten

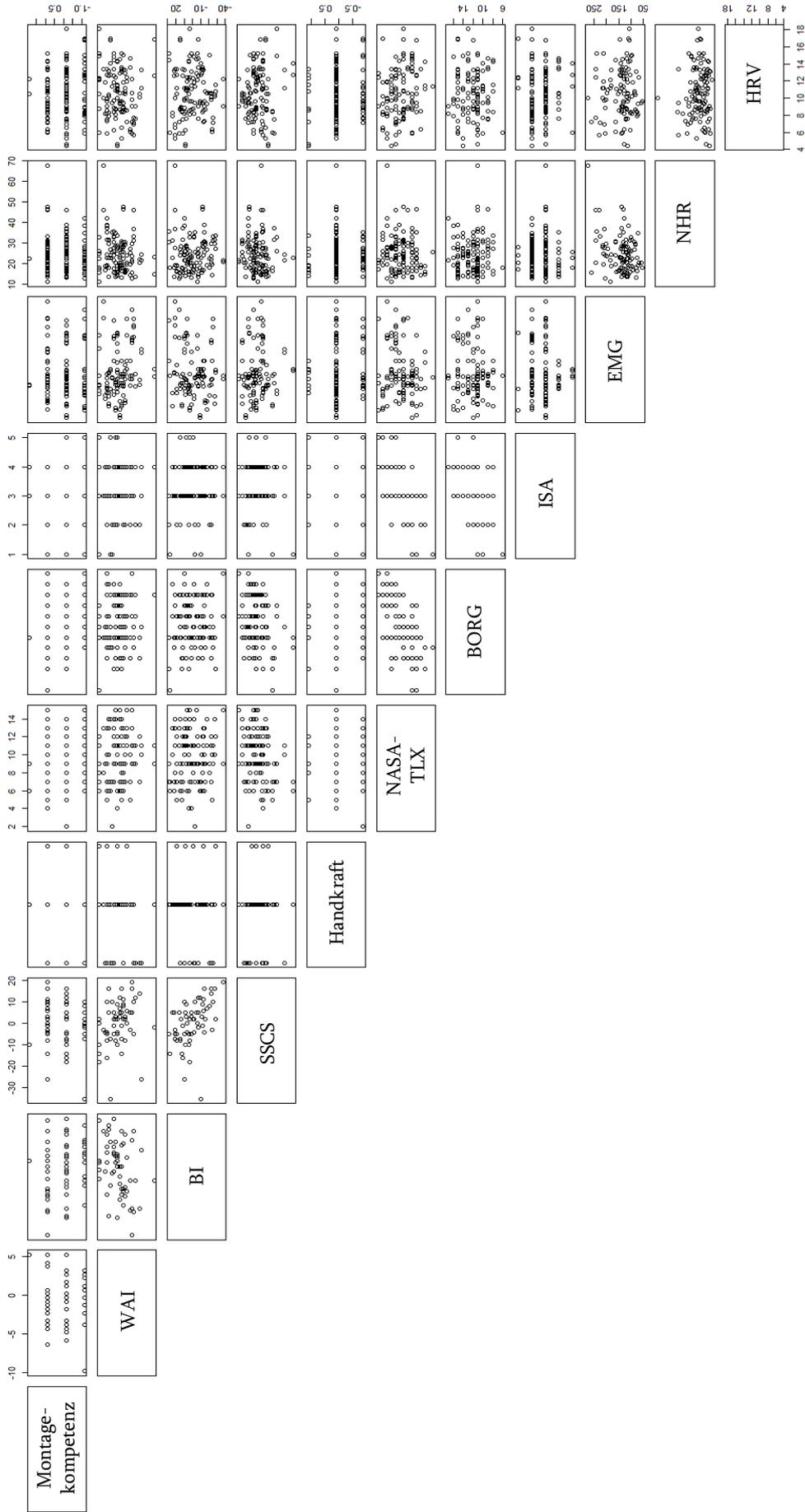


Abbildung D-13: Übersicht der Korrelationsanalyse

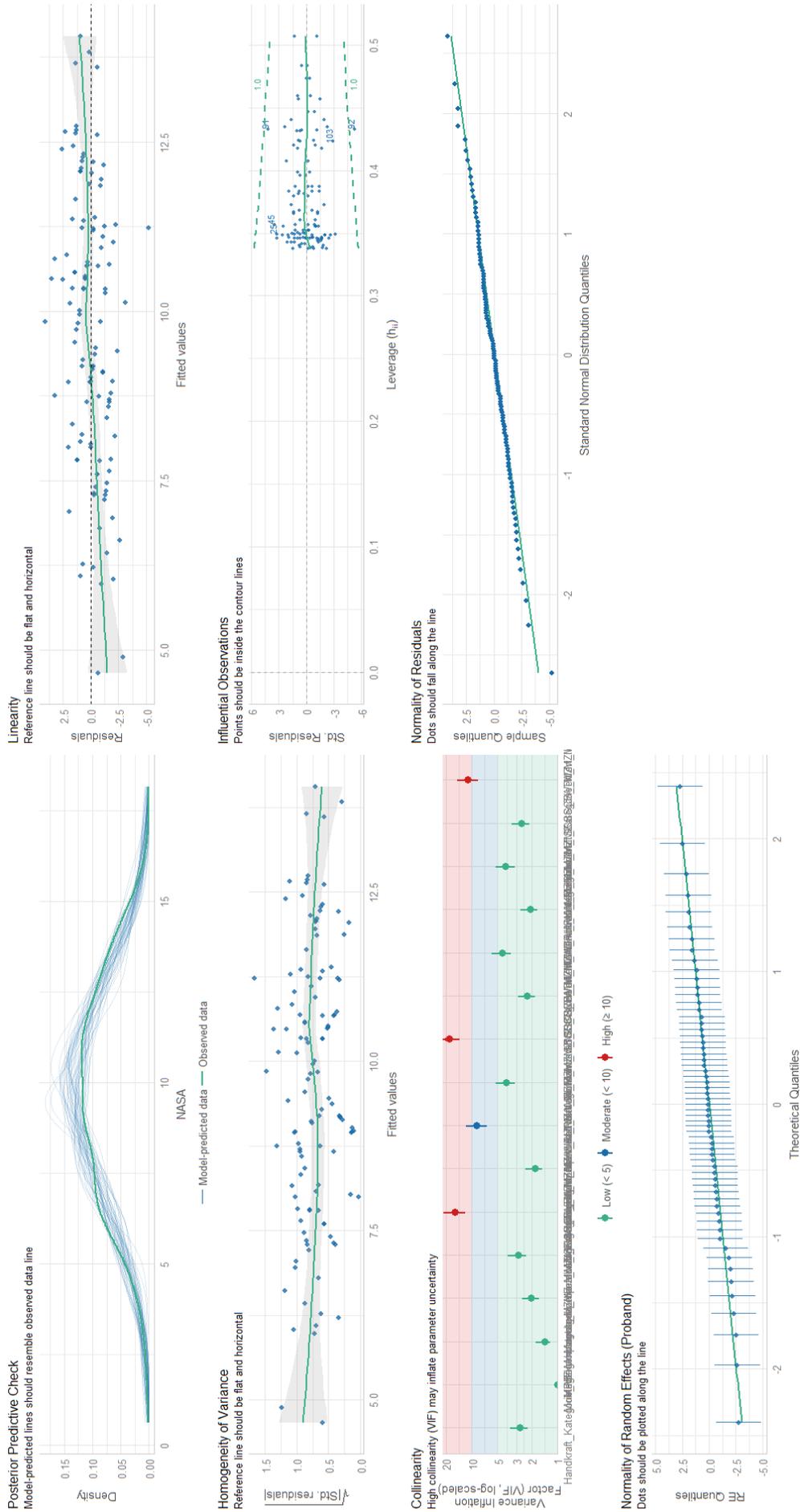


Abbildung D-14: Übersicht der Voraussetzungsprüfung NASA-RTLX

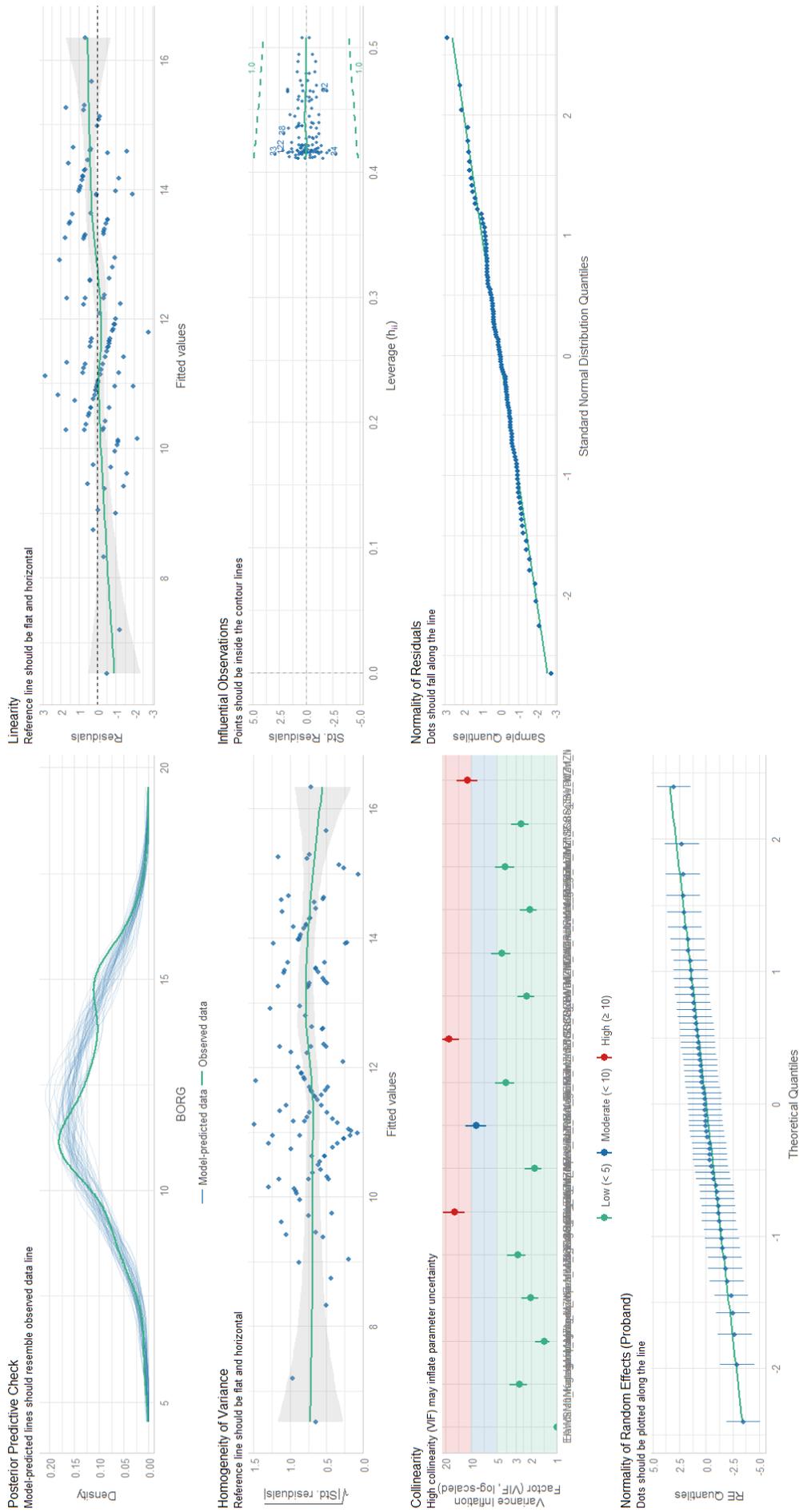


Abbildung D-15: Übersicht der Voraussetzungsprüfung Borg

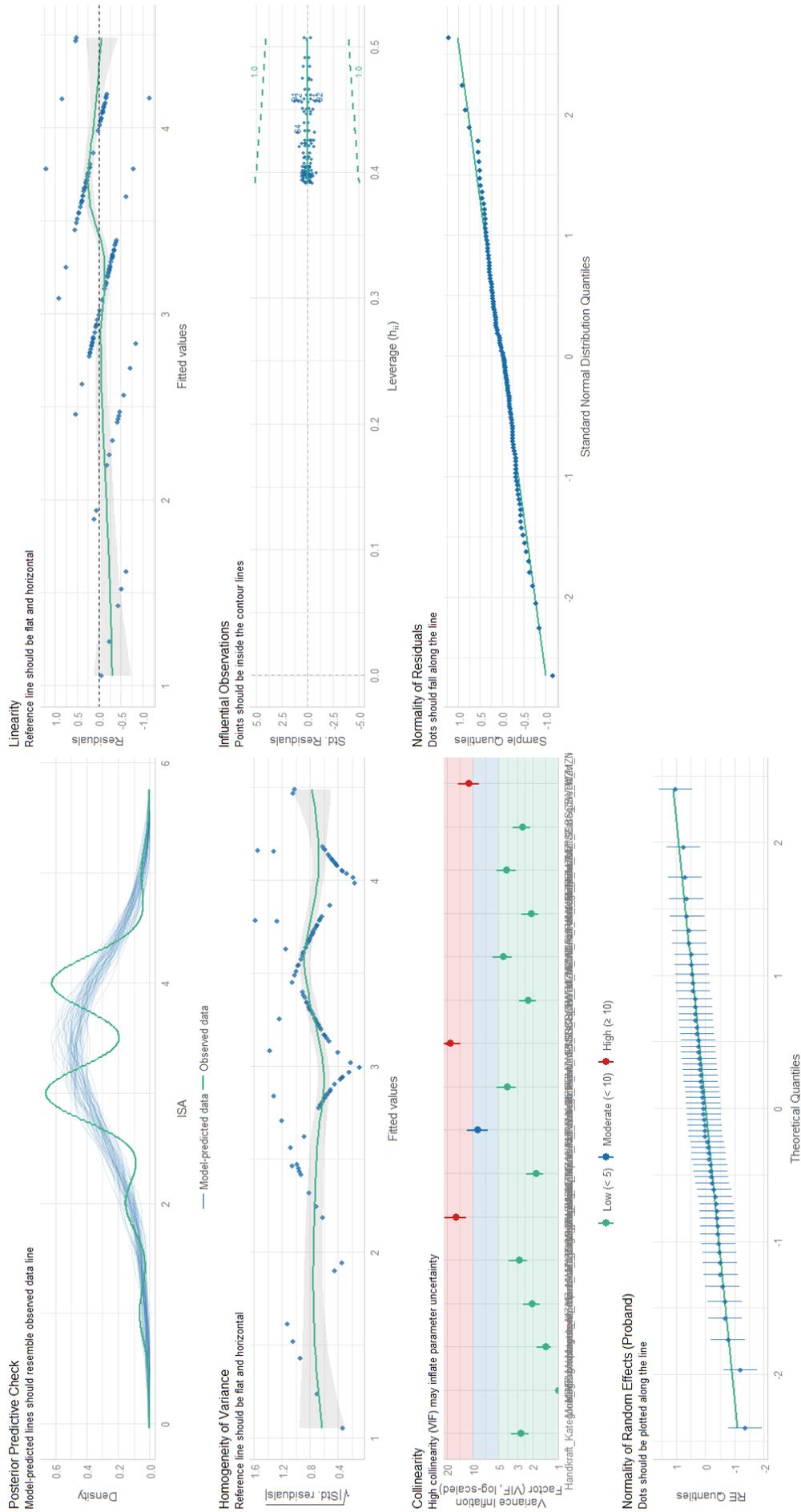


Abbildung D-16: Übersicht der Voraussetzungsprüfung ISA

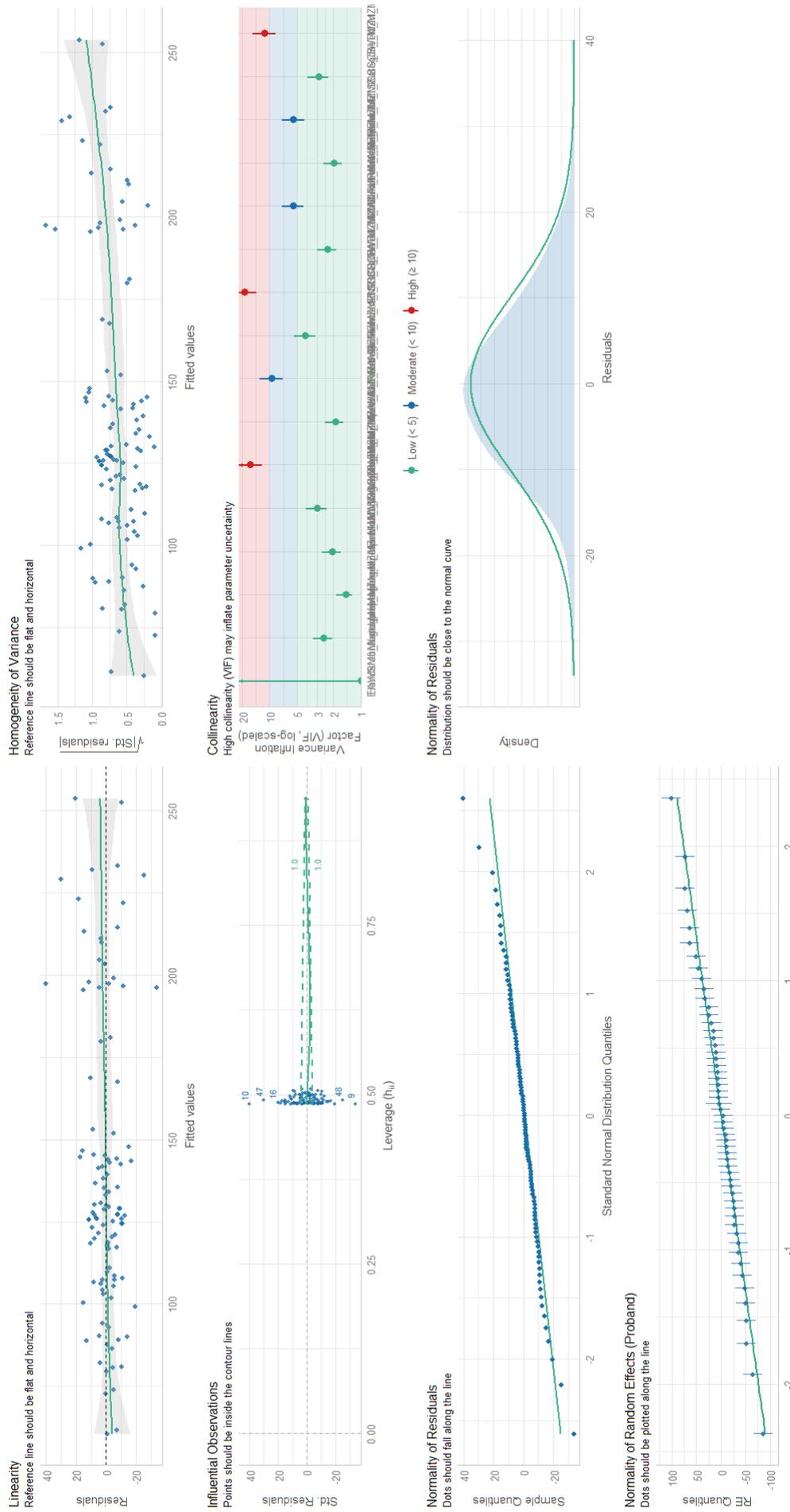


Abbildung D-17: Übersicht der Voraussetzungsprüfung EMG

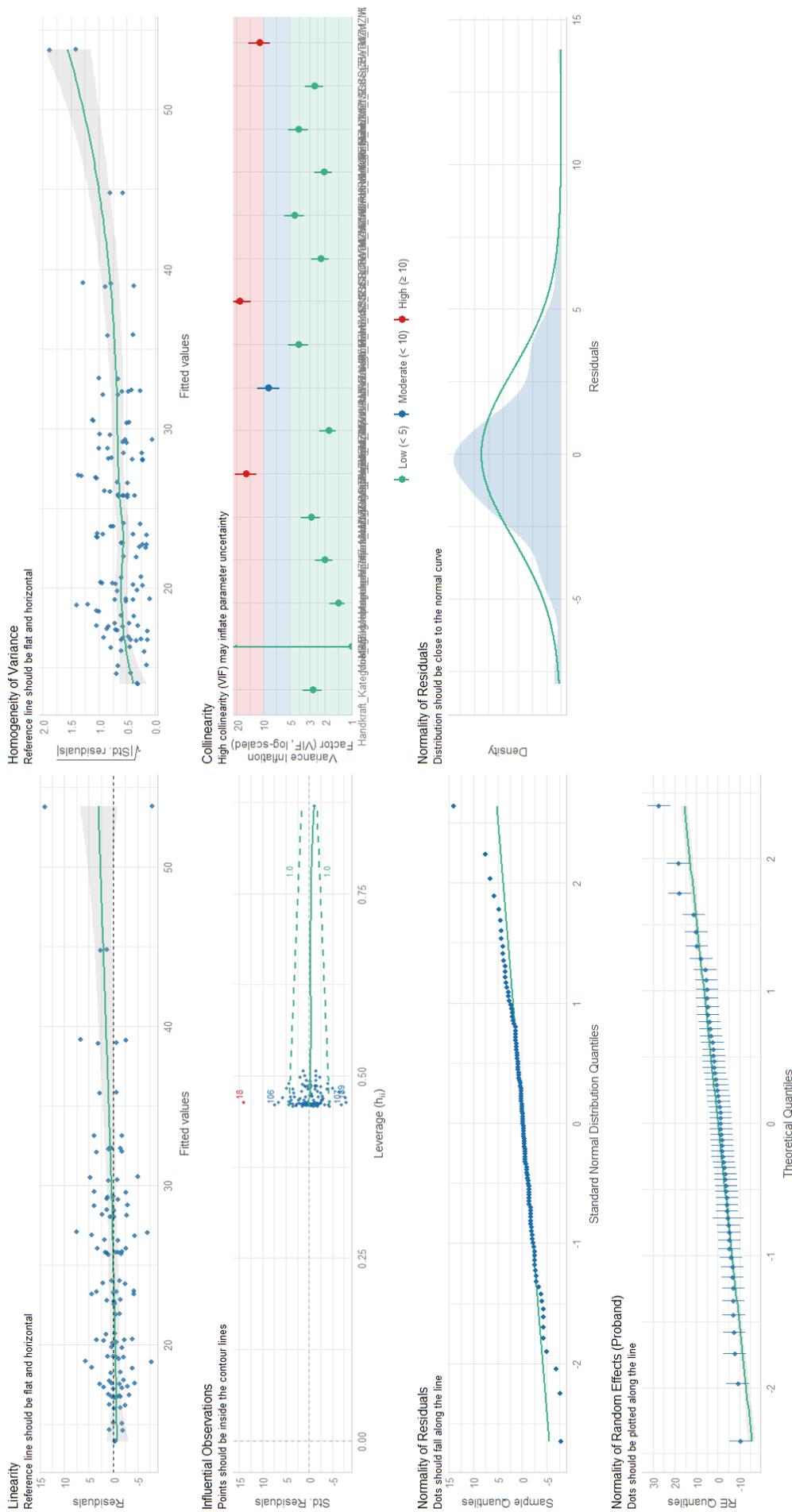


Abbildung D-18: Übersicht der Voraussetzungsprüfung NHR

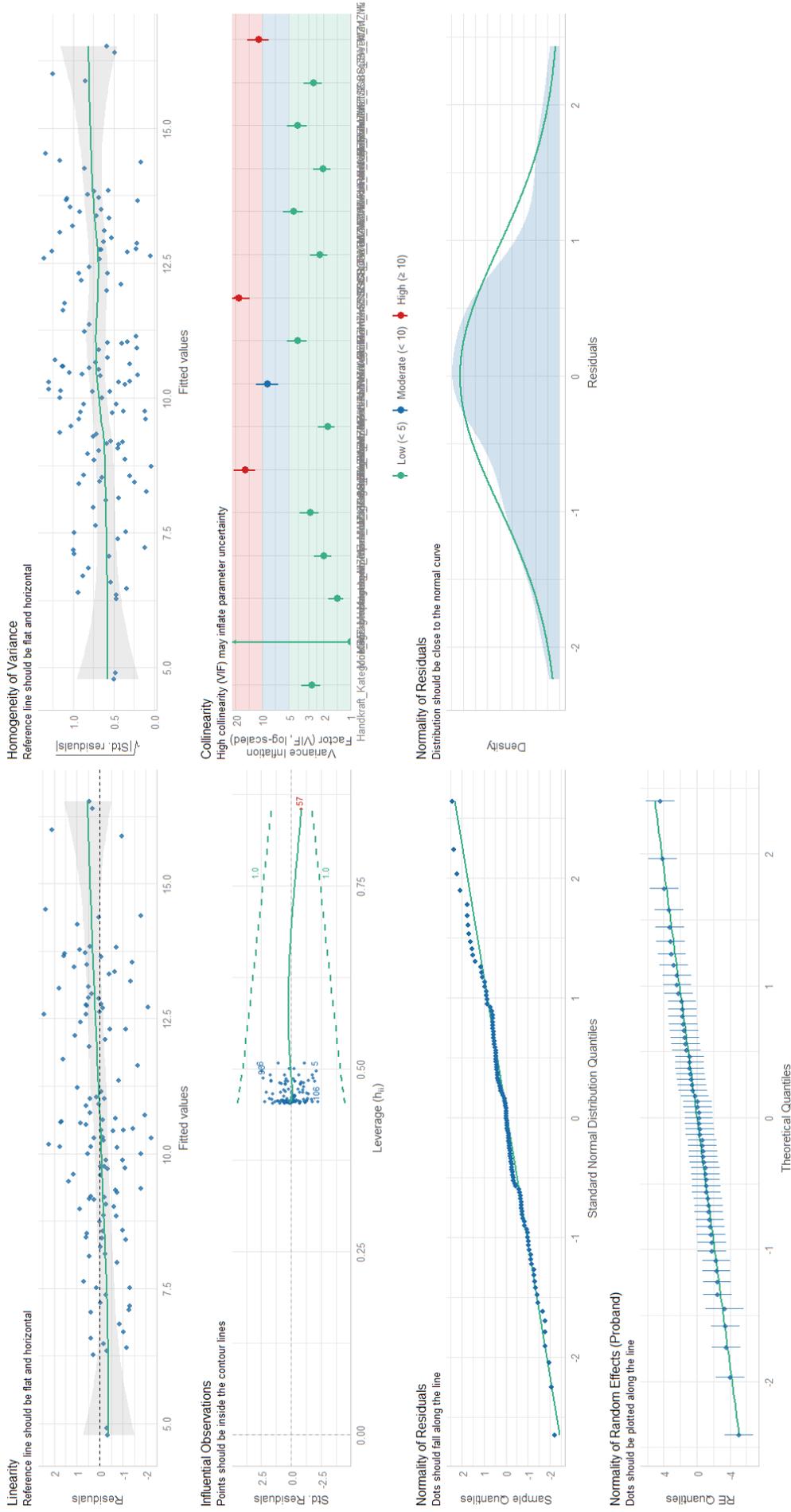


Abbildung D-19: Übersicht der Voraussetzungsprüfung HRV

| EAWS | | | | | |
|---------------------|-----------|------------|-----------|---------|-----------|
| Random Effects | | | | | |
| | Variance | Std. Dev. | | | |
| Proband (Intercept) | 3,363 | 1,834 | | | |
| Residual | 1,662 | 1,289 | | | |
| Fixed Effects | | | | | |
| | Estimate | Std. Error | df | t value | Pr(> t) |
| Intercept | 10,443549 | 0,656932 | 87,968256 | 15,897 | < 2e-16 |
| MK | -1,123466 | 0,399043 | 44,999996 | -2,815 | 0,0072 |
| WAI | -0,098842 | 0,121521 | 44,999996 | -0,813 | 0,42028 |
| SSCS | 0,057722 | 0,039086 | 44,999996 | 1,477 | 0,14669 |
| HK | -1,138961 | 0,864028 | 44,999996 | -1,318 | 0,19411 |
| EAWS | 0,036331 | 0,012618 | 60,000002 | 2,879 | 0,00552 |
| MK*WAI | 0,048958 | 0,133493 | 44,999996 | 0,367 | 0,71553 |
| MK*SSCS | 0,082573 | 0,055262 | 44,999996 | 1,494 | 0,1421 |
| WAI*SSCS | 0,003661 | 0,011952 | 44,999996 | 0,306 | 0,76079 |
| MK*HK | -0,541437 | 1,158002 | 44,999996 | -0,468 | 0,64235 |
| WAI*HK | 0,195313 | 0,31035 | 44,999996 | 0,629 | 0,53231 |
| SSCS*HK | 0,020282 | 0,114692 | 44,999996 | 0,177 | 0,86043 |
| MK*WAI*SSCS | -0,014688 | 0,017966 | 44,999996 | -0,818 | 0,41794 |
| MK*WAI*HK | -0,984853 | 0,769666 | 44,999996 | -1,28 | 0,20725 |
| MK*SSCS*HK | -0,391565 | 0,308812 | 44,999996 | -1,268 | 0,21133 |
| WAI*SSCS*HK | -0,053231 | 0,037204 | 44,999996 | -1,431 | 0,1594 |
| MK*WAI*SSCS*HK | -0,056506 | 0,06479 | 44,999996 | -0,872 | 0,38777 |
| R2 nach Nakagawa | | | | | |
| | Rsqr | upper CL | lower CL | VIF | Toleranz |
| Modell | 0,231 | 0.420 | 0.187 | 1,3 | 0,8 |
| MK | 0,099 | 0.214 | 0.023 | 1,1 | 0,9 |
| MK*SSCS | 0,03 | 0.115 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| SSCS | 0,029 | 0.114 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI*SSCS*HK | 0,027 | 0.110 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| HK | 0,023 | 0.103 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| EAWS | 0,022 | 0.101 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*HK | 0,022 | 0.100 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*SSCS*HK | 0,022 | 0.100 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*SSCS*HK | 0,01 | 0.075 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*SSCS | 0,009 | 0.072 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI | 0,009 | 0.072 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI*HK | 0,005 | 0.061 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*HK | 0,003 | 0.053 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI | 0,002 | 0.049 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI*SSCS | 0,001 | 0.047 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| SSCS*HK | 0 | 0.043 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |

Abbildung D-20: Hierarchisch lineares Modell zur Prädiktion physischer Beanspruchung mittels Borg-Skala

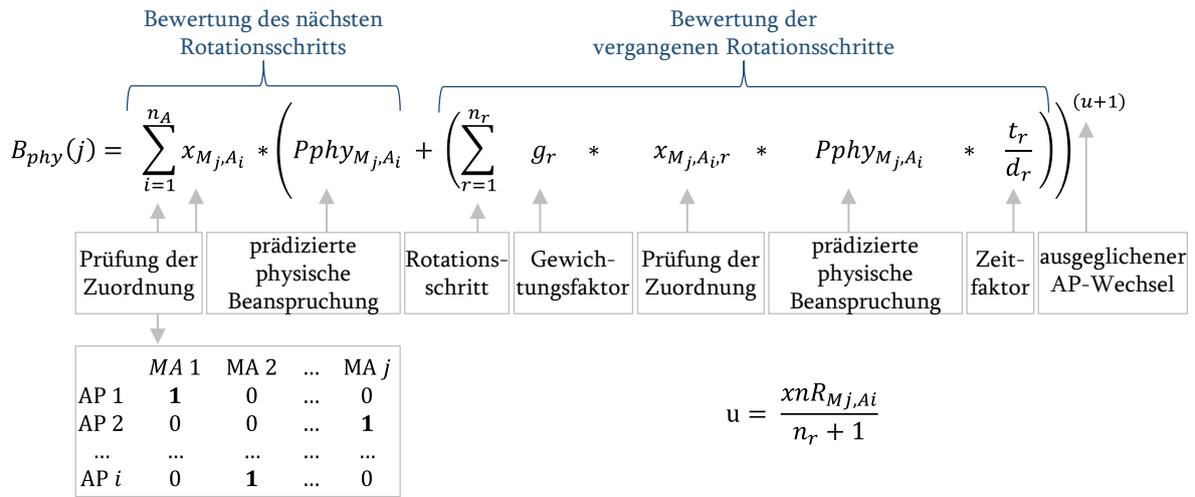
| KPB | | | | | |
|---------------------|-----------|------------|-----------|---------|----------|
| Random Effects | | | | | |
| | Variance | Std. Dev. | | | |
| Proband (Intercept) | 3,334 | 1,826 | | | |
| Residual | 3,569 | 1,889 | | | |
| Fixed Effects | | | | | |
| | Estimate | Std. Error | df | t value | Pr(> t) |
| Intercept | 3,369441 | 1,575082 | 65,56224 | 2,139 | 0,036146 |
| MK | -1,173364 | 0,440833 | 45 | -2,662 | 0,010742 |
| WAI | 0,071652 | 0,134247 | 45 | 0,534 | 0,596155 |
| SSCS | 0,071306 | 0,043179 | 45 | 1,651 | 0,105616 |
| HK | 1,44252 | 0,954513 | 45 | 1,511 | 0,137713 |
| KPB | 0,688525 | 0,171048 | 59,999999 | 4,025 | 0,000162 |
| MK*WAI | -0,105397 | 0,147473 | 45 | -0,715 | 0,478491 |
| MK*SSCS | 0,025447 | 0,061049 | 45 | 0,417 | 0,678788 |
| WAI*SSCS | 0,003246 | 0,013204 | 45 | 0,246 | 0,806911 |
| MK*HK | -1,059857 | 1,279273 | 45 | -0,828 | 0,411769 |
| WAI*HK | -0,358572 | 0,342851 | 45 | -1,046 | 0,301214 |
| SSCS*HK | 0,169216 | 0,126703 | 45 | 1,336 | 0,18842 |
| MK*WAI*SSCS | -0,022504 | 0,019848 | 45 | -1,134 | 0,262873 |
| MK*WAI*HK | 1,039784 | 0,850268 | 45 | 1,223 | 0,227738 |
| MK*SSCS*HK | 0,330454 | 0,341153 | 45 | 0,969 | 0,337902 |
| WAI*SSCS*HK | 0,076341 | 0,041101 | 45 | 1,857 | 0,069804 |
| MK*WAI*SSCS*HK | -0,036426 | 0,071576 | 45 | -0,509 | 0,613302 |
| R2 nach Nakagawa | | | | | |
| | Rsqr | upper CL | lower CL | VIF | Toleranz |
| Modell | 0,264 | 0.447 | 0.212 | 1,4 | 0,7 |
| MK | 0,08 | 0.190 | 0.013 | 1,1 | 0,9 |
| KPB | 0,65 | 0.169 | 0.007 | 2,9 | 0,4 |
| WAI*SSCS*HK | 0,041 | 0.133 | 0.001 | 1,0 | 1,0 |
| SSCS | 0,032 | 0.119 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| HK | 0,027 | 0.110 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| SSCS*HK | 0,021 | 0.099 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*HK | 0,018 | 0.092 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*SSCS | 0,016 | 0.087 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI*HK | 0,013 | 0.082 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*SSCS*HK | 0,011 | 0.077 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*HK | 0,008 | 0.070 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI | 0,006 | 0.064 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI | 0,003 | 0.055 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*SSCS*HK | 0,003 | 0.054 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*SSCS | 0,002 | 0.050 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI*SSCS | 0,001 | 0.044 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |

Abbildung D-21: Hierarchisch lineares Modell zur Prädiktion psychischer Beanspruchung mittels NASA-RTLX

| KPB | | | | | |
|---------------------|------------|------------|-----------|---------|----------|
| Random Effects | | | | | |
| | Variance | Std. Dev. | | | |
| Proband (Intercept) | 0,3768 | 0,6139 | | | |
| Residual | 0,2361 | 0,4859 | | | |
| Fixed Effects | | | | | |
| | Estimate | Std. Error | df | t value | Pr(> t) |
| Intercept | 1,623268 | 0,4092267 | 68,074348 | 3,967 | 1,78E-04 |
| MK | -0,1409821 | 0,1370664 | 44,999997 | -1,029 | 0,3092 |
| WAI | -0,0092904 | 0,0417409 | 44,999997 | -0,223 | 0,8249 |
| SSCS | 0,0240271 | 0,0134254 | 44,999997 | 1,79 | 0,0802 |
| HK | 0,3572078 | 0,296783 | 44,999997 | 1,204 | 0,235 |
| KPB | 0,1885246 | 0,0439882 | 60,000001 | 4,286 | 6,70E-05 |
| MK*WAI | 0,0220316 | 0,0458531 | 44,999997 | 0,48 | 0,6332 |
| MK*SSCS | -0,0033144 | 0,0189819 | 44,999997 | -0,175 | 0,8622 |
| WAI*SSCS | 0,0002982 | 0,0041055 | 44,999997 | 0,073 | 0,9424 |
| MK*HK | -0,1987172 | 0,3977594 | 44,999997 | -0,5 | 0,6198 |
| WAI*HK | -0,015135 | 0,1066013 | 44,999997 | -0,142 | 0,8877 |
| SSCS*HK | 0,0795733 | 0,0393954 | 44,999997 | 2,02 | 0,0494 |
| MK*WAI*SSCS | 0,0019007 | 0,0061712 | 44,999997 | 0,308 | 0,7595 |
| MK*WAI*HK | 0,0158902 | 0,2643707 | 44,999997 | 0,06 | 0,9523 |
| MK*SSCS*HK | -0,0624311 | 0,1060733 | 44,999997 | -0,589 | 0,5591 |
| WAI*SSCS*HK | 0,0040094 | 0,0127792 | 44,999997 | 0,314 | 0,7552 |
| MK*WAI*SSCS*HK | -0,0055739 | 0,0222547 | 44,999997 | -0,25 | 0,8034 |
| R2 nach Nakagawa | | | | | |
| | Rsqr | upper CL | lower CL | VIF | Toleranz |
| Modell | 0,276 | 0.456 | 0.222 | 1,4 | 0,7 |
| EAWS | 0,055 | 0.155 | 0.004 | 1,1 | 0,9 |
| SSCS*HK | 0,052 | 0.150 | 0.003 | 1,1 | 0,9 |
| SSCS | 0,041 | 0.133 | 0.001 | 1,0 | 1,0 |
| HK | 0,019 | 0.094 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK | 0,014 | 0.083 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*SSCS*HK | 0,005 | 0.059 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*HK | 0,003 | 0.054 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI | 0,003 | 0.054 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI*SSCS*HK | 0,001 | 0.047 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*SSCS | 0,001 | 0.046 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*SSCS*HK | 0,001 | 0.045 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI | 0,001 | 0.044 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*SSCS | 0 | 0.043 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI*HK | 0 | 0.042 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| WAI*SSCS | 0 | 0.041 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |
| MK*WAI*HK | 0 | 0.041 | 0.000 | 1,0 | 1,0 |

Abbildung D-22: Hierarchisch lineares Modell zur Prädiktion psychischer Beanspruchung mittels ISA

E. Ergänzendes Material zu Baustein 3



| | | | |
|----------------|---|----------------------|--|
| B_{phy} | physische Beanspruchung pro Mitarbeiter | u | Exponent vergangener Rotationsschritte, Werte zwischen 0 bis 1 |
| M_j | Mitarbeitende j | t_r | Dauer einer Rotation (z. B. 1 Schicht = 8h) |
| A_i | Arbeitsplätze i | d_r | Zeit seit Beginn des letzten Einsatzes an dem Arbeitsplatz, Vielfaches von 24 $\rightarrow d = r * 24$ |
| i | Laufvariable für Arbeitsplätze | $P_{phy_{M_j, A_i}}$ | prädizierte physische Beanspruchung von Mitarbeitenden M_j an den Arbeitsplätzen A_i |
| j | Laufvariable für Mitarbeitende | xnR_{M_j, A_i} | Zähl-Matrix (Summation aller vergangenen Rotationen + nächste geplante Rotation) |
| n_A | Anzahl aller Arbeitsplätze | g_r | Gewichtungsfaktor für vergangene Rotationsschritte (z. B. $g_1 = 3$) |
| r | Variable für vergangene Rotationsschritte | | |
| x_{M_j, A_i} | Zuordnung der Mitarbeitenden M_j zu Arbeitsplätzen A_i | | |
| n_r | Nummer der vergangenen Rotationsschritte, die in die Bewertung einfließen | | |

Abbildung E-23: Formel zur Prädiktion physischer Beanspruchung

F. Ergänzendes Material zur prototypischen Implementierung

| Tätigkeitsfeld | Funktion |
|----------------|----------------------|
| Vormontage | Segmentleiter:in |
| Vormontage | Teamkoordinator:in |
| Vormontage | Betriebsingenieur:in |
| Vormontage | Betriebsingenieur:in |
| Produktion | Werksleiter:in |
| Nacharbeit | Teamkoordinator:in |

Abbildung F-24: Experten und Expertinnen der Befragung zum ersten und zweiten Prototyp der Werkenden-Applikation