
ENTWICKLUNG EINER METHODIK ZUR
KONZEPTION HYBRIDER MONTAGESYSTEME
IM UMFELD DER PRODUKTION VON
NKW-ANTRIEBSSTRANGMODULEN

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von

Michael Hübner

Saarbrücken

2024

Tag des Kolloquiums:	30. Oktober 2024
Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Akademischer Mitarbeiter:	Dr.-Ing. Daniel Bruch

Kurzfassung

Die steigende Anzahl an kundenspezifischen Wünschen, die zu einem signifikanten Anstieg an Produktvarianten führt, gepaart mit immer kürzer werdenden Produktlebenszyklen, erfordert ein wachsendes Maß an Flexibilität in produzierenden Unternehmen.

Um diesen Herausforderungen entgegenzutreten, liegt die Lösung in der Konzeptionierung flexibler und damit nachhaltiger Montagearbeitsplätze. Nur durch das ausgewogene Verhältnis zwischen automatisierten und manuellen Arbeitsinhalten können die Effizienz und Produktivität bei geforderter Flexibilität sichergestellt werden. Doch gerade die Suche nach der Balance zwischen automatisierten und manuellen Montagetätigkeiten stellt in der Praxis ein komplexes Problem dar.

Diese Arbeit knüpft hier an und bietet eine Gesamtmethodik zur systematischen Gestaltung von hybriden Montagesystemen. Es wurde ein Methodenbaukasten erarbeitet, der durch die Verwendung von Einzelmethode dem Anwender Unterstützung bei der Analyse, der detaillierten Bewertung der Prozessschritte sowie der anschließenden Konzeptionierung von hybriden Arbeitsplätzen bietet.

Um die entwickelte Gesamtmethodik einem breiten Anwenderkreis zugänglich zu machen, wurde eine anwenderfreundliche App entwickelt. Diese führt den Nutzer verständlich durch die entwickelte Gesamtmethodik und ermöglicht auf diese Art und Weise, Einzelmethode softwaregestützt anzuwenden. Zur Validierung der entwickelten Methodik wurde sie anhand zweier praxisnaher Anwendungsszenarien eingesetzt.

Abstract

The growing number of customer-specific requirements, which are leading to a significant increase in product variants, paired with ever shorter product life cycles, requires a growing degree of flexibility in manufacturing companies.

The solution to these challenges is the design of flexible and therefore sustainable assembly workstations. Efficiency and productivity can only be ensured with the required flexibility through a balanced relationship between automated and manual work content. However, the search for a balance between automated and manual assembly activities is a complex problem in practice.

This work ties in here and offers an overall methodology for the systematic planning of hybrid assembly systems. A method kit was developed that offers the user support in the analysis, the detailed evaluation of the process steps and the subsequent conceptual design of hybrid workstations using individual methods.

A user-friendly app was developed to make the overall methodology accessible to a wide range of users. The app guides the user through the developed methodology in an understandable way and allows individual methods to be used in a software-supported manner. To validate the developed methodology, it was used in two practical application scenarios.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Ingenieur für Produktionstechnologieentwicklung der ZF Friedrichshafen AG am Standort Schweinfurt in enger Kooperation mit dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH (ZeMA) in Saarbrücken. Ich möchte an dieser Stelle die Gelegenheit nutzen, um meinen Dank an alle auszudrücken, die mich bei der Erstellung dieser Dissertation unterstützt haben.

Zunächst möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Müller bedanken, der mich während des gesamten Prozesses unterstützt hat. Seine Unterstützung, Ermutigung und Expertise waren unermesslich und haben dazu beigetragen, dass diese Arbeit ein Erfolg wurde. Ebenso gilt mein Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Thorsten Schüppstuhl für die Übernahme des Zweitgutachtens und für das an meiner Arbeit gezeigte Interesse.

Des Weiteren möchte ich in der ZF Friedrichshafen AG am Standort Schweinfurt dem Abteilungsleiter des Industrial Engineerings Edgar Reinhart und dem Werksleiter Andreas Dorsch danken, ohne deren stetige Unterstützung und ohne den von ihnen gewährten Freiraum die Erstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Bedanken möchte mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Institutes, insbesondere Anne Blum, Philipp Litzenburger, Fabian Adler, Benedikt Kelm, Dr.-Ing. Attique Bashir und Stefan Marx, die mich herzlich aufgenommen und mir während des Forschungsprozesses wertvolle Einblicke und Feedback gegeben haben. Ihre Beiträge haben dazu beigetragen, dass diese Arbeit umfassender und genauer ist.

Ich möchte auch meinen Freunden und meiner Familie danken, die mir in den vergangenen anstrengenden Jahren den Rücken gestärkt. Ihre Unterstützung hat mir geholfen, während des Schreibprozesses durchzuhalten. Schließlich möchte ich mich bei meiner Frau Julia bedanken, die mich während des gesamten Prozesses unterstützt und mir den Rücken freigehalten hat. Ihre unermüdliche Unterstützung, Liebe und Ermutigung haben mir geholfen, meine Ziele zu erreichen und diese Arbeit zu einem erfolgreichen Abschluss zu bringen.

Nochmals vielen Dank an alle, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Ich bin dankbar für eure Unterstützung und schätze es sehr, solch wunderbare Menschen in meinem Leben zu haben.

Dettelbach, Juli 2024

Inhaltsverzeichnis

KURZFASSUNG	II
ABSTRACT.....	III
VORWORT	IV
INHALTSVERZEICHNIS.....	II
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	V
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VIII
TABELLENVERZEICHNIS	X
GENDERHINWEIS.....	XI
1 EINLEITUNG	1
1.1 PROBLEMSTELLUNG.....	2
1.2 ZIELSETZUNG UND FORSCHUNGSFRAGE DER ARBEIT	3
1.3 AUFBAU DER ARBEIT	5
2 GRUNDLAGEN DES BETRACHTUNGSBEREICHS.....	7
2.1 GRUNDLAGEN DER MONTAGETECHNIK.....	7
2.1.1 AUFGABEN DER MONTAGE	7
2.1.2 ARTEN DER MONTAGE	9
2.1.3 MONTAGEGERECHTE PRODUKTGESTALTUNG.....	11
2.2 GRUNDLAGEN DER ARBEITSPLATZGESTALTUNG	14
2.2.1 EBENEN DER FABRIKPLANUNG	14
2.2.2 GESTALTUNGSEINFLÜSSE DES PRODUKTIONSSYSTEMS.....	15
2.2.3 GESTALTUNG VON ARBEITSPROZESSEN	16
2.2.4 MASCHINENSICHERHEIT	18
2.2.5 MENSCH-TECHNIK-INTERAKTION	20
2.2.6 VERFAHREN ZUR ARBEITSZEITERMITTLUNG.....	21
2.2.7 ZEITLICHE OPTIMIERUNGSPOTENZIALANALYSEN.....	25
2.3 GRUNDLAGEN DER LOW-CODE-PROGRAMMIERUNG	28
2.3.1 LOW-CODE-ENTWICKLUNGSPLATTFORMEN	28
2.3.2 MICROSOFT POWER APPS.....	29
2.4 GRUNDLAGEN DER ROBOTIK.....	31
2.4.1 KINEMATISCHE STRUKTUREN VON INDUSTRIEROBOTERN	31
2.4.2 ENDEFFEKTOR	33
2.4.3 GRUNDLAGEN DER MENSCH-ROBOTER-KOLLABORATION	34
2.5 FAZIT ZU DEN GRUNDLAGEN.....	38
3 BESTEHENDE ANSÄTZE DER METHODISCHEN GESTALTUNG VON HYBRIDEN ARBEITSPLÄTZEN	39
3.1 ALLGEMEINE PLANUNGSMETHODEN ZUR MONTAGESYSTEM-GESTALTUNG.....	39
3.1.1 REFA-PLANUNGSSYSTEMATIK ZUR PLANUNG UND EINFÜHRUNG KOMPLEXER PRODUKTIONSSYSTEME	39

3.1.2	SCHMIDT – MONTAGEPLANUNG	41
3.1.3	EVERSHEIM – AUFGABEN BEI DER PLANUNG DER MONTAGE	41
3.1.4	BULLINGER – SYSTEMATISCHE MONTAGEPLANUNG	42
3.1.5	LOTTER – PLANUNGSRICHTLINIE FÜR AUTOMATISCHE MONTAGEANLAGEN	44
3.1.6	KONOLD UND REGER – PLANUNGSLEITFADEN	46
3.1.7	FAZIT ZU DEN ALLGEMEINEN PLANUNGSMETHODEN.....	47
3.2	SPEZIFISCHE ANSÄTZE DER AUFGABENALLOKATION HYBRIDER ARBEITSPLÄTZE.....	49
3.3	ANSÄTZE ZUR TECHNISCHEN AUTOMATISIERBARKEITSBEWERTUNG.....	53
3.4	FAZIT UND HANDLUNGSBEDARF	56
4	KONZEPTION DER METHODISCHEN GESTALTUNG VON HYBRIDEN MONTAGEARBEITSPLÄTZEN	57
4.1	ANALYSEMETHODIK.....	57
4.1.1	MERKMALENTSTEHUNGSBAUM (MEB).....	59
4.1.2	URSACHE-WIRKUNGS-ANALYSE.....	61
4.1.3	MONTAGEVORRANGGRAPH	62
4.1.4	VARIANTENANALYSE.....	63
4.1.5	TOLERANZANALYSE UND TOLERANZKETTEN	64
4.1.6	ZUSAMMENFASSUNG DER ANALYSEMETHODIK.....	68
4.2	BEWERTUNG	70
4.2.1	TECHNISCHE AUTOMATISIERBARKEITSBEWERTUNG	70
4.2.2	ZEITLICHE ARBEITSPLATZPOTENZIALBEWERTUNG	83
4.2.3	ABGLEICH DER TECHNISCHEN AUTOMATISIERBARKEITS- UND ZEITLICHEN ARBEITSPLATZPOTENZIALBEWERTUNG	87
4.3	GESTALTUNG EINES HYBRIDEN MONTAGEARBEITSPLATZES.....	89
4.3.1	FÄHIGKEITS- UND ZEITPOTENZIALBASIERTE ZUTEILUNG DER PROZESSCHRITTE	89
4.3.2	FEINPLANUNG DES PROZESSABLAUFES.....	90
5	UMSETZUNG DES KONZEPTS	101
5.1	TOPOLOGIE DER GESAMTMETHODIK	102
5.2	ASSISTENT ZUR ANWENDUNG DER GESAMTMETHODIK	105
6	VALIDIERUNG - NKW-DRUCKPLATTENMONTAGE.....	107
6.1	BETRACHTUNG VON PRODUKT- UND AUSGANGSSZENARIO	107
6.2	ANALYSE DES VALIDIERUNGSSZENARIOS.....	110
6.2.1	MERKMALENTSTEHUNGSBAUM.....	110
6.2.2	URSACHE-WIRKUNGS-ANALYSE.....	112
6.2.3	MONTAGEVORRANGGRAPH	114
6.2.4	VARIANTENANALYSE.....	116
6.2.5	TOLERANZANALYSE UND TOLERANZKETTEN	118
6.3	BEWERTUNG DES VALIDIERUNGSSZENARIOS.....	123
6.3.1	BEWERTUNG DER TECHNISCHEN AUTOMATISIERBARKEIT	123
6.3.2	ZEITLICHE ARBEITSPLATZPOTENZIALBEWERTUNG	125
6.3.3	ABGLEICH DER TECHNISCHEN AUTOMATISIERBARKEITS- UND ZEITLICHEN ARBEITSPLATZPOTENZIALBEWERTUNG	128
6.4	GESTALTUNG DES NEUEN ARBEITSPLATZES	131
6.4.1	FÄHIGKEITS- UND ZEITPOTENZIALBASIERTE ZUTEILUNG DER PROZESSCHRITTE	131
6.4.2	FEINPLANUNG DES PROZESSABLAUFES.....	134

6.5	FAZIT ZUR VALIDIERUNG DER NKW-DRUCKPLATTENMONTAGE.....	142
7	VALIDIERUNG - VORMONTAGE EWORX.....	144
7.1	BETRACHTUNG VON PRODUKT- UND AUSGANGSSZENARIO	144
7.2	ANALYSE DES VALIDIERUNGSSZENARIOS.....	146
7.2.1	URSACHE-WIRKUNGS-ANALYSE	147
7.2.2	MONTAGEVORRANGGRAPH.....	147
7.3	BEWERTUNG DES VALIDIERUNGSSZENARIOS.....	149
7.4	GESTALTUNG DES NEUEN ARBEITSPLATZES	151
7.4.1	FÄHIGKEITS- UND ZEITPOTENZIALBASIERTE ZUTEILUNG DER PROZESSCHRITTE	152
7.4.2	FEINPLANUNG DES PROZESSABLAUFES.....	152
7.5	FAZIT ZUR VALIDIERUNG VORMONTAGE EWORX.....	156
8	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	158
8.1	ZUSAMMENFASSUNG.....	158
8.2	BEANTWORTUNG DER FORSCHUNGSFRAGEN	160
8.3	AUSBLICK	162
	LITERATURVERZEICHNIS	II
A.	ANHANG	II
A.1	ZUSÄTZLICHE DARSTELLUNGEN.....	II
A.2	VERÖFFENTLICHUNGEN	X
A.3	BETREUTE ABSCHLUSSARBEITEN	X

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1-1: AUFBAU UND KAPITELEINTEILUNG DER ARBEIT	5
ABBILDUNG 2-1: AUFGABEN DER MONTAGE.....	8
ABBILDUNG 2-2: ARTEN DER MONTAGESYSTEME	10
ABBILDUNG 2-3: KOSTENVERURSACHUNG UND KOSTENVERANTWORTUNG.....	12
ABBILDUNG 2-4: PLANUNGSEBENEN EINER FABRIK	14
ABBILDUNG 2-5: MENGENLEISTUNG VON PRODUKTIONSSYSTEMEN.....	15
ABBILDUNG 2-6: ORGANISATIONSFORMEN DER MONTAGE	16
ABBILDUNG 2-7: CE-KONFORMITÄTSPROZESS	19
ABBILDUNG 2-8: INFORMATIONSAUSTAUSCH MENSCH-TECHNIK	21
ABBILDUNG 2-9: METHODEN DER ZEITDATENGEWINNUNG.....	22
ABBILDUNG 2-10: MTM-PROZESSBAUSTEINE	24
ABBILDUNG 2-11: TYPISCHE REALISIERUNGEN VON FREI PROGRAMMIERBAREN HANDHABUNGSGERÄTEN	31
ABBILDUNG 2-12: STRUKTUREINTEILUNG UND AXSEN EINES KNICKARMROBOTERS.....	32
ABBILDUNG 2-13: BAUARTEN VON LOKALSTRUKTUREN	33
ABBILDUNG 2-14: EINTEILUNG VON ENDEFFEKTOREN	33
ABBILDUNG 2-15: AUFBAU GREIFSYSTEM.....	34
ABBILDUNG 2-16: ARBEITSRÄUME VON MENSCH UND ROBOTER.....	35
ABBILDUNG 2-17: MENSCH-ROBOTER INTERAKTIONSGRAD	36
ABBILDUNG 2-18: SICHERHEITSPRINZIPIEN VON ROBOTERSYSTEMEN.....	37
ABBILDUNG 3-1: SYSTEMATIK ZUR PLANUNG UND EINFÜHRUNG KOMPLEXER PRODUKTIONSSYSTEME	40
ABBILDUNG 3-2: AUFGABEN BEI DER PLANUNG DER MONTAGE.....	42
ABBILDUNG 3-3: PROJEKTSTRUKTURPLAN MONTAGEPLANUNG.....	43
ABBILDUNG 3-4: PLANUNGSRICHTLINIE FÜR AUTOMATISCHE MONTAGEANLAGEN	45
ABBILDUNG 3-5: PLANUNGSLEITFADEN	46
ABBILDUNG 3-6: GEGENÜBERSTELLUNG ALLGEMEINER PLANUNGSMETHODEN ZUR MONTAGESYSTEMGESTALTUNG	48
ABBILDUNG 3-7: GEGENÜBERSTELLUNG SPEZIFISCHER ANSÄTZE DER AUFGABENALLOKATION HYBRIDER ARBEITSPLÄTZE.....	51
ABBILDUNG 3-8: LITERATURVERGLEICH LÖSUNGSNEUTRALER KRITERIEN.....	55
ABBILDUNG 4-1: METHODIK ANALYSE – BEWERTUNG – GESTALTUNG	57
ABBILDUNG 4-2: PLANUNGS- UND ANALYSEANSATZ.....	58
ABBILDUNG 4-3: HIERARCHIE VON PRODUKTMERKMALEN.....	59
ABBILDUNG 4-4: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG MEB	61
ABBILDUNG 4-5: ISHIKAWA-DIAGRAMM.....	62
ABBILDUNG 4-6: STRUKTUREN IM MONTAGEVORRANGGRAPH.....	63
ABBILDUNG 4-7: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER TOLERANZKETTE	65

ABBILDUNG 4-8: VORGEHENSWEISE GEWICHTUNG KRITERIEN.....	77
ABBILDUNG 4-9: GEWICHTUNG DER KRITERIEN ZUR TECHNISCHEN AUTOMATISIERBARKEITSBEWERTUNG.....	78
ABBILDUNG 4-10: PRIMÄR- UND SEKUNDÄRBEREICH.....	86
ABBILDUNG 4-11: ABGLEICH AUTOMATISIERBARKEITS- UND POTENZIALBEWERTUNG.....	87
ABBILDUNG 4-12: AUTOMATISIERUNGSGRAD DER PROZESSSCHRITTE.....	89
ABBILDUNG 4-13: ABLAUFDIAGRAMM RISIKOBEWERTUNG UND RISIKOMINDERUNG.....	91
ABBILDUNG 4-14: TOPOLOGIE ZUR TECHNOLOGIEBESTIMMUNG DER MENSCH-TECHNIK- SCHNITTSTELLE.....	97
ABBILDUNG 4-15: ABLAUFBESCHREIBUNG DER ALLGEMEINEN ANFORDERUNGSSPEZIFIZIERUNG.....	98
ABBILDUNG 4-16: ABLAUFBESCHREIBUNG ANFORDERUNGSSPEZIFIZIERUNG DER INFORMATIONSEINGABE.....	99
ABBILDUNG 4-17: ABLAUFBESCHREIBUNG ANFORDERUNGSSPEZIFIZIERUNG DER INFORMATIONSAUSGABE.....	99
ABBILDUNG 5-1: TOPOLOGIE DER GESAMTMETHODIK ZUR KONZEPTION HYBRIDER MONTAGESYSTEME.....	104
ABBILDUNG 5-2: APP HYBRIDE ARBEITSPLATZGESTALTUNG.....	105
ABBILDUNG 6-1: KUPPLUNGSDRUCKPLATTE FÜR NUTZKRAFTFAHRZEUGE.....	107
ABBILDUNG 6-2: AUFBAU KUPPLUNGSDRUCKPLATTE.....	108
ABBILDUNG 6-3: ARBEITSPLATZ AUSGANGSSZENARIO.....	109
ABBILDUNG 6-4: ZIELMERKMAL MEB.....	110
ABBILDUNG 6-5: MEB AUSZUG UNWUCHT.....	111
ABBILDUNG 6-6: ÜBERSICHT ISHIKAWA-DIAGRAMM DRUCKPLATTENMONTAGE.....	113
ABBILDUNG 6-7: MONTAGEVORRANGGRAPH DRUCKPLATTENMONTAGE.....	114
ABBILDUNG 6-8: TOLERANZKETTE FÜGEN GEHÄUSE UND NIET.....	118
ABBILDUNG 6-9: FÜGEFALL NIET UND GEHÄUSE.....	118
ABBILDUNG 6-10: HISTOGRAMME NIETDURCHMESSER UND GEHÄUSEBOHRUNGSDURCHMESSER.....	120
ABBILDUNG 6-11: AUTOMATISIERBARKEITSBEWERTUNG NKW-DRUCKPLATTENMONTAGE.....	123
ABBILDUNG 6-12: PRIMÄR- UND SEKUNDÄRBEREICH DER MONTAGEOBJEKTE.....	126
ABBILDUNG 6-13: ABGLEICH TECHNISCHE AUTOMATISIERBARKEIT MIT ZEITLICHEM OPTIMIERUNGSPOTENZIAL.....	129
ABBILDUNG 6-14: MONTAGEVORRANGGRAPH DER DRUCKPLATTENMONTAGE MIT AUFGABENALLOKATION.....	132
ABBILDUNG 6-15: DEMONSTRATOR QUALITÄTSINSPEKTION ANPRESSPLATTENREIBFLÄCHE (VADER).....	133
ABBILDUNG 6-16: OPTIMIERTER GESAMTPROZESSABLAUF DER NKW-DRUCKPLATTENMONTAGE.....	136
ABBILDUNG 6-17: ARBEITSPLATZ DRUCKPLATTENMONTAGE ERGÄNZENDE TECHNISCHE SCHUTZMAßNAHMEN.....	138
ABBILDUNG 6-18: ARBEITSPLATZ DRUCKPLATTENMONTAGE MIT TECHNOLOGIEN ZUR MENSCH- TECHNIK-INTERAKTION.....	142
ABBILDUNG 6-19: M2 DRUCKPLATTENMONTAGE - GEGENÜBERSTELLUNG AUSGANGSZUSTAND (LINKS) UND OPTIMIERTER HYBRIDER ARBEITSPLATZ (RECHTS).....	143

ABBILDUNG 7-1: PRODUKTDARSTELLUNG eWORX (BEHIND CABIN DESIGN).....	144
ABBILDUNG 7-2: UNTERBAUGRUPPEN AUSGLEICHSBEHÄLTER (LINKS) UND KÜHLMITTELPUMPE (RECHTS).....	145
ABBILDUNG 7-3: 3-D-DARSTELLUNG VORMONTAGEARBEITSPLATZ eWORX.....	146
ABBILDUNG 7-4: ÜBERSICHT ISHIKAWA-DIAGRAMM VORMONTAGE eWORX	147
ABBILDUNG 7-5: MONTAGEVORRANGGRAPH AUSGLEICHSBEHÄLTER	148
ABBILDUNG 7-6:MONTAGEVORRANGGRAPH KÜHLMITTELPUMPE	148
ABBILDUNG 7-7: GRAFISCHER ABGLEICH AUTOMATISIERBARKEITS- UND POTENZIALBEWERTUNG MONTAGE AUSGLEICHSBEHÄLTER	149
ABBILDUNG 7-8: GRAFISCHER ABGLEICH AUTOMATISIERBARKEITS- UND POTENZIALBEWERTUNG MONTAGE KÜHLMITTELPUMPE	150
ABBILDUNG 7-9: VERSUCHSAUFBAU VERSCHRAUBEN BEHÄLTERTRÄGERBLECH MIT AUSGLEICHSBEHÄLTER.....	151
ABBILDUNG 7-10: AUSZUG FÄHIGKEITS- U. ZEITPOTENZIALBASIERTE ZUTEILUNG DER PROZESSSCHRITTE eWORX.....	152
ABBILDUNG 7-11: OPTIMIERTER GESAMTPROZESSABLAUF VORMONTAGE eWORX.....	153
ABBILDUNG 7-12: AUSZUG AUS DER RISIKOBEWERTUNG VORMONTAGE eWORX	154
ABBILDUNG 7-13: AUSZUG SPEZIFIZIERUNG DER ANFORDERUNGEN ZUR MENSCH-TECHNIK- INTERAKTION VORMONTAGE eWORX.....	155
ABBILDUNG 7-14: eWORX VORMONTAGE – GEGENÜBERSTELLUNG AUSGANGSZUSTAND (LINKS) OPTIMIERTER HYBRIDER ARBEITSPLATZ (RECHTS).....	157
ABBILDUNG 0-1: MEB DRUCKPLATTENMONTAGE TEIL 1/2	III
ABBILDUNG 0-2: MEB DRUCKPLATTENMONTAGE TEIL 2/2	IV
ABBILDUNG 0-3: ISHIKAWA-DIAGRAMM DRUCKPLATTENMONTAGE	V
ABBILDUNG 0-4: ISHIKAWA-DIAGRAMM VORMONTAGE eWORX.....	VI
ABBILDUNG 0-5: ENTSCHEIDUNGSBAUM TECHNISCHE SCHUTZMAßNAHME TEIL 1/2.....	VII
ABBILDUNG 0-6: ENTSCHEIDUNGSBAUM TECHNISCHE SCHUTZMAßNAHME TEIL 2/2.....	VIII
ABBILDUNG 0-7: KRITERIEN ZUR TECHNOLOGIEBESTIMMUNG DER MENSCH-TECHNIK- INTERAKTION.....	IX

Abkürzungsverzeichnis

4GL	Programmiersprachen der vierten Generation; fourth generation languages [en.]
AOPD	aktive optoelektronische Schutzeinrichtung; active optoelectronic protective device [en.]
App	Application
CE	Europäische Konformität; Conformité Européenne [fr.]
DMC	DataMatrix-Code
DFA	Design for Assembly
EG	Europäische Gemeinschaft
KC	Key Characteristics
MEB	Merkmalentstehungsbaum
KI	Künstliche Intelligenz
KLT	Kleinladungsträger
LCDP	Low-code development platforms [en.]; Entwicklungsplattformen mit einfacher Programmiersprache
MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
MRL	Maschinenrichtlinie
MTM	Methods Time Measurement
NKW	Nutzkraftwagen
OG	Orientierungsgrad
OZ	Ordnungszustand
PG	Positionierungsgrad
PL	Performancelevel
PSA	Primär-Sekundär-Analyse
PV	Primärvorgänge
REFA	ursprünglich Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung - umbenannt in REFA-Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation
RPZ	Risikoprioritätszahl
SPE	sensitive Schutzeinrichtung; sensitive protective equipment [en.]
SV	Sekundärvorgänge

TCP	Tool-Center-Point
UAS	universelles Analysiersystem
UZSB	Unterezusammenbau
VADER	Vernetzter digitaler Assistent für das datengetriebene Engineering von roboter-basierten Produktionsanlagen
VADER-ROB	Vernetzter digitaler Assistent für das datengetriebene Engineering von roboterba-sierten Produktionsanlagen/Teilprojekt Robotik- und KI-Dienste für die roboti-sierte Produktion
ZSB	Zusammenbau

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: GEGENÜBERSTELLUNG GRUNDBEWEGUNG, BEWEGUNGSFOLGE UND GRUNDTVORGANG	24
TABELLE 2-2: ARCHITEKTONISCHE SCHICHTEN VON LCDP	29
TABELLE 4-1: ERKENNTNISGEWINN AUS DEN EINZELNEN ANALYSEMETHODEN.....	69
TABELLE 4-2: AUSPRÄGUNGEN – ABMESSUNGEN DES FÜGEBAUTEILS	71
TABELLE 4-3: AUSPRÄGUNGEN GEWICHT DES FÜGEBAUTEILS	71
TABELLE 4-4: AUSPRÄGUNGEN FORMSTABILITÄT DES FÜGEBAUTEILS.....	72
TABELLE 4-5: AUSPRÄGUNGEN DER EMPFINDLICHKEIT DES FÜGEBAUTEILS.....	72
TABELLE 4-6: AUSPRÄGUNGEN DER GEOMETRISCHEN GREIFBARKEIT DES FÜGEBAUTEILS	73
TABELLE 4-7: AUSPRÄGUNG ANZAHL VARIANTENFAMILIEN	73
TABELLE 4-8: POSITIONIERUNGS- UND ORIENTIERUNGSGRAD	74
TABELLE 4-9: AUSPRÄGUNGEN BEREITSTELLUNGSART DES FÜGEBAUTEILS.....	74
TABELLE 4-10: AUSPRÄGUNGEN FÜGEGERECHTES FÜGEBAUTEIL UND BASISBAUTEIL	74
TABELLE 4-11: AUSPRÄGUNGEN GENAUIGKEITSANFORDERUNG DES FÜGEVORGANGS.....	75
TABELLE 4-12: AUSPRÄGUNGEN ART DER FÜGEBEWEGUNG	75
TABELLE 4-13: AUSPRÄGUNGEN BENÖTIGTER FÜGEKRÄFTE/-MOMENTE/-SENSITIVITÄT	76
TABELLE 4-14: AUSPRÄGUNGEN ZUGÄNGLICHKEIT FÜGEORT.....	76
TABELLE 4-15: AUSPRÄGUNGEN ZUSATZTÄTIGKEIT	76
TABELLE 4-16: KRITERIENEINTEILUNG IN AUFNEHMEN UND PLATZIEREN.....	80
TABELLE 4-17: AUSZUG AUS EINER DURCHFÜHRUNG DER TECHNISCHE AUTOMATISIERBARKEITSBEWERTUNG.....	82
TABELLE 4-18: ABLEITUNG DES AUTOMATISIERUNGSGRADS AUS DEM OPTIMIERUNGSPOTENZIAL	85
TABELLE 4-19: SCHWERE DES SCHADENS (S)	93
TABELLE 4-20: EXPOSITION UND EINTRITTSWAHRSCHEINLICHKEIT (F x O)	94
TABELLE 4-21: VERMEIDBARKEIT DES SCHADENS (A)	94
TABELLE 4-22: TECHNISCHE SCHUTZMAßNAHMEN NACH EN ISO 12100:2010.....	96
TABELLE 6-1: VARIANTENANALYSE NKW-DRUCKPLATTE	117
TABELLE 6-2: ERGEBNIS TOLERANZANALYSE DRUCKPLATTENMONTAGE	122
TABELLE 6-3: AUSZUG POTENZIALBEWERTUNG NKW-DRUCKPLATTENMONTAGE.....	127
TABELLE 6-4: ERMITTLUNG DER AUFTRETENDEN GEFÄHRDUNGEN.....	136
TABELLE 6-5: ERMITTLUNG DER RISIKOPRIORITÄTSZAHL UND FESTLEGUNG DER TECHNISCHE SCHUTZMAßNAHME	137
TABELLE 6-6: BEDARFE DER INFORMATIONSEINGABE UND -AUSGABE DER DRUCKPLATTENMONTAGE	140
TABELLE 6-7: TECHNOLOGIEAUSWAHL ZUR MENSCH-TECHNIK-INTERAKTION DER DRUCKPLATTENMONTAGE	141

Genderhinweis

In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit bei personenbezogenen Substantiven sowie Pronomen das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechteridentitäten werden dabei ausdrücklich mitgemeint, soweit es für die Aussage erforderlich ist.

1 Einleitung

Angesichts der schwierigen gesamtpolitischen Situation kommt es in der globalisierten Welt zunehmend durch Protektionismus zu ungekannten Lieferschwierigkeiten. Dies führt zur Erschließung von Produktionskapazitäten in Deutschland, um Lieferketten zu verkürzen (Jungkind et al., 2019) und gegenüber politischen Entwicklungen in Niedriglohnländern resilienter zu werden.

Daher müssen sich produzierende Unternehmen am Hochlohnstandort Deutschland erheblichen zusätzlichen kostentechnischen Herausforderungen (Reinhart & Zühlke, 2017) stellen; sie resultieren aus dem globalisierten Wettbewerb sowie aus erhöhten Flexibilitätsanforderungen (Klößner et al., 2015; März & von Langsdorf, 2001) aufgrund kürzerer Produktlebenszyklen (März & von Langsdorf, 2001; Reinhart & Zühlke, 2017; Stern & Jaberg, 2010) sowie aus steigenden Variantenvielfalten (Reinhart & Zühlke, 2017; Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014). Diesen Herausforderungen lässt sich nur begegnen durch Produktionskostenreduzierung, Beherrschung der Variantenvielfalt sowie durch die Fähigkeit, schnell auf Marktveränderungen reagieren zu können (Müller et al., 2013). So ist es unabdingbar, neue zu planende Produktionsprozesse ideal zu gestalten und bestehende Produktionsprozesse kontinuierlich zu optimieren, um wandlungsfähige und höchst produktive Prozesse zu generieren (REFA, Autorenteam, 2013). Hierfür müssen in vorhandenen Prozessen Effizienzreserven durch das Beseitigen von Verschwendung ausgenutzt werden (Becker, 2006).

Der Einsatz von hybriden Montagesystemen birgt ein umfangreiches Potenzial hinsichtlich Produktivität und Flexibilität, wodurch diese Form von Montagesystemen wachsende Bedeutung gewinnt (Lotter, 2012). Dies ist vor allem auf die enge Verflechtung zwischen Mensch und Technik sowie auf die mögliche Nutzbarkeit der Stärken beider Ressourcen zurückzuführen (Krüger et al., 2009). Gleichzeitig bietet die steigende Anzahl am Markt verfügbarer Robotersysteme, die zur Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) fähig sind (Ficuciello et al., 2017), sowie entsprechende Sicherheitssysteme (Bittner et al., 2017) eine zunehmend stärkere Verschmelzung von manuellen und automatisierten Arbeitsvorgängen; sie stellen dem Planungsingenieur damit neue sowie erweiterte Möglichkeiten der fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zur Verfügung. Zeitgleich steht dieser jedoch vor der Herausforderung, wirtschaftlich und ergonomisch sinnvolle sowie technisch machbare Lösungen zu erarbeiten. Hierbei müssen in den verschiedenen Themenbereichen Design- und Technologieentscheidungen getroffen werden, die durch eine Vielzahl an zu berücksichtigenden Aspekten zu einer erhöhten Komplexität führen (Ranz et al., 2018). Oberstes Ziel sollte hierbei die weitestmögliche Reduzierung der Komplexität sein, was jedoch nicht immer realisierbar ist.

Um trotz der Komplexität den Nutzen hybrider Montagesysteme zu ermöglichen, wird eine durchgängige Methodik benötigt, die den Planer von der Ausgangsanalyse bis hin zur Gestaltung des hybriden Arbeitsplatzes bei seinem Vorhaben unterstützt. Ein essenzieller Bestandteil hierbei ist es für die entsprechende Montageaufgabe, das geeignete Verhältnis von automatisierten und manuellen Verrichtungen zu erzielen und somit den passenden Automatisierungsgrad zu bestimmen (Lotter, 2012). Ein weiterer Schlüssel zur wirtschaftlichen Produktion liegt daher in der Auswahl des geeigneten Automatisierungsgrades. In der Praxis zeigt sich jedoch, dass Optimierungen nur intuitiv sowie punktuell ausgewählt und durchgeführt werden. Daher werden Rationalisierungsmöglichkeiten teilweise nicht erkannt sowie Fehlentscheidungen getroffen. (REFA, 1987) Dem Sachverhalt soll durch eine gezielte methodische Planungssystematik entgegengewirkt werden. Ziel der in dieser Arbeit dargestellten Planungsmethodik zur Konzeption hybrider Montagesystemen ist es daher, den Planer durch eine methodische Analyse und Bewertung bei der zielgerichteten Konzeption von Arbeitsplätzen zu unterstützen.

1.1 Problemstellung

In der industriellen Praxis zeigt sich, dass die Optimierung bestehender Arbeitssysteme häufig nicht systematisch und nicht methodisch erfolgt (Jungkind et al., 2019). Dies führt zu Einbußen der Effizienz und der Transparenz während der Durchführung des Optimierungsprozesses. Des Weiteren hat dies zur Konsequenz, dass vorhandene Rationalisierungspotenziale zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit nicht gänzlich ausgeschöpft werden (REFA, 1991). Gerade bei der Planung und Gestaltung hybrider Arbeitsplätze erweist es sich als schwierig, die geeigneten Prozessschritte für eine Automatisierung zu identifizieren und gleichzeitig den adäquaten Automatisierungsgrad für das Zusammenspiel von Mensch und Technik zu definieren. Daher sollte zu Beginn eine Ausgangsanalyse der bestehenden Prozesse und Arbeitsabläufe durchgeführt werden. Hierdurch sollten alle relevanten Informationen über die Produkte, Prozesse und Betriebsmittel gesammelt werden, um ein umfassendes Verständnis zu erlangen. Erst danach lassen sich Arbeitsplätze objektiv bewerten, um Automatisierungslösungen für geeignete Prozessschritte mit dem passenden Maß an Technik zu definieren. Aufgrund von Kapazitätsengpässen und Terminzwängen in Planungsabteilungen werden systematische Vorgehensweisen zur fundierten Lösungsfindung häufig übergangen und die vorhandenen Kapazitäten primär für die technische Realisierung eingesetzt. Jedoch erst eine systematische Vorgehensweise, die eine fundierte Ausgangsanalyse beinhaltet, kann zu einer zielgerichteten Gestaltung von Arbeitsplätzen führen. Um diese Vorgehensweise effektiv umzusetzen, sollen Planer auf Lösungen zurückgreifen können, die eine systematische Analyse, Bewertung und Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen unterstützen. Hierbei könnten

digitale Tools und Software eingesetzt werden, die methodisch Prozesse analysieren und Optimierungspotenziale aufzeigen.

Eine systematische und methodische Vorgehensweise bei Planen und Gestalten von hybriden Arbeitsplätzen führt nicht nur zu einer effektiveren Nutzung der vorhandenen Ressourcen, sondern trägt vor allem bei zu einer zielgerichteten Lösungsfindung.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfrage der Arbeit

Ziel dieser Dissertation ist die Entwicklung einer effizienten und praxisorientierten Methodik zur Konzeptionierung hybrider Montagesysteme. Eine Methodik umfasst dabei ein System von Modellen, Methoden und Werkzeugen, das zur Bewältigung theoretischer und praktischer Herausforderungen entwickelt wird (Heyn, 1999; Laufenberg, 1996). Zentrales Anliegen ist es, mit dieser Methodik Planungsingenieure zu unterstützen, die mit der Konzeption von hybriden Montagesystemen in der industriellen Serienmontage befasst sind.

Diese soll sowohl in der Theorie als auch in der Praxis flexibel anwendbar sein und Unternehmen ermöglichen, hybride Montagesysteme effektiv zu planen und zu implementieren. Die Methodik soll im Speziellen den Anwender unterstützen, eine fundierte Ausgangsanalyse von Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel durchzuführen, um ein ganzheitliches Verständnis des zu optimierenden Arbeitsplatzes zu erhalten. Hierzu sollen geeignete Analysemethoden aufgezeigt werden.

Basierend auf der Ausgangsanalyse soll es dem Anwender möglich sein, eine Bewertung der einzelnen Montageprozessschritte vorzunehmen. Die Betrachtungsebene des Bewertungsprozesses sollte so gewählt sein, dass Potenziale innerhalb eines Prozessschrittes ausgewiesen werden können. Durch die Bewertung sollen Erkenntnisse hinsichtlich der technischen Umsetzbarkeit und des zeitlichen Nutzens einer Automatisierung gewonnen werden. Die Bewertungsergebnisse sollen den Anwender in die Lage versetzen, eine objektive fähigkeits- und nutzenbasierte Zuteilung der Montageprozessschritte zwischen den Ressourcen Mensch und Technik umzusetzen. Nach der fähigkeits- und nutzenbasierten Zuteilung der Prozessschritte ist die Umsetzbarkeit des Konzeptes sicherheitstechnisch zu bewerten und ein Sicherheitskonzept für den entwickelten hybriden Arbeitsplatz abzuleiten. Zur Ausgestaltung des Arbeitsplatzes soll der Anwender der Methodik bei der Wahl geeigneter Technologien zur Mensch-Technik-Interaktion unterstützt werden.

Somit zielt diese Dissertation darauf ab, eine ganzheitliche Methodik zu entwickeln, die von der Ausgangsanalyse bis hin zur Ausgestaltung des Arbeitsplatzes den Planer bei seiner Aufgabe, der Konzeptionierung eines hybriden Arbeitsplatzes, unterstützt.

Nach der Zielsetzung der Arbeit kann folgende Forschungsfrage abgeleitet werden:

Wie kann eine ganzheitliche, methodische Konzeptionierung von hybriden Arbeitsplätzen erfolgen, die sowohl die technische Realisierbarkeit als auch den Nutzen durch die Steigerung des Automatisierungsgrades berücksichtigt?

Aus der Forschungsfrage lassen sich folgende untergeordnete Fragestellungen ableiten:

- *Welche Ausgangsanalyse ist für eine ganzheitliche Systembetrachtung von Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel sowie der nachfolgenden Konzeptionierung erforderlich?*
- *Wie können die technische Realisierbarkeit und der Nutzen durch die Steigerung des Automatisierungsgrades objektiv bewertet werden?*
- *Wie können die geeigneten Prozessschritte, in denen der Mitarbeiter eine technische Unterstützung erhalten soll, identifiziert werden?*
- *Welche Aspekte der Arbeitsplatzgestaltung müssen für einen ganzheitlichen Planungsansatz berücksichtigt werden?*
- *Wie kann die entwickelte Methodik niederschwellig und benutzerfreundlich Anwendern zur Verfügung gestellt werden?*

Randbedingungen und Abgrenzung der Methodik

Die in dieser Arbeit entwickelte Methodik dient zur Konzeptionierung hybrider Montagesysteme, ausgehend von bestehenden manuellen Arbeitsplätzen der Serienmontage von Kleingeräten. Hierbei ist der Fokus der Betrachtung ein Einzelarbeitsplatz, ohne Abhängigkeiten zu vor- oder nachgelagerten Arbeitsstationen zu berücksichtigen. Die Methodik dient im Allgemeinen der gezielten Unterstützung des Mitarbeiters durch Technik, ihr Einsatz ist hierbei nicht auf kollaborationsfähige Robotersysteme beschränkt. Da die Verwendung kollaborationsfähiger Robotersysteme häufig jedoch die komplexeste Form der Zusammenarbeit darstellt, wurde dies sowohl im Grundlagenteil als auch in der Validierung dieser Arbeit verstärkt berücksichtigt. Die Ressourcenallokation erfolgt unter Einbeziehung des zeitlichen Optimierungspotenzials, der technischen Automatisierbarkeit sowie einer Gefahrenanalyse. Da die technischen Aspekte in dieser Arbeit im Vordergrund stehen, erfolgt keine Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit auf Basis der zu tätigen Investitionen. Ebenso umfasst die Methodik keine ergonomischen Gestaltungsgrundsätze zur Arbeitsplatzkonzipierung.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit zur methodischen Gestaltung hybrider Montagesysteme teilt sich in acht Kapitel auf. Die Gliederung und Bezeichnung der einzelnen Kapitel veranschaulicht die *Abbildung 1-1*.

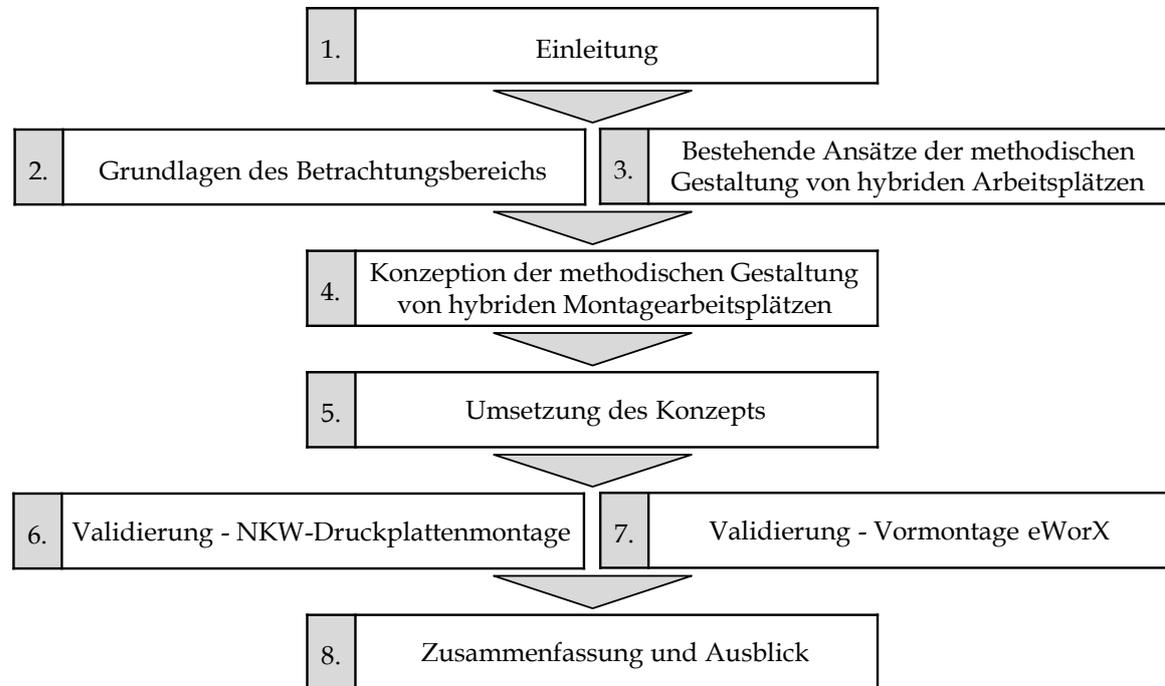


Abbildung 1-1: Aufbau und Kapiteleinteilung der Arbeit

Einleitend wird in *Kapitel 1* die Problemstellung erläutert sowie die sich hieraus ergebende Forschungsfrage zusammen mit der Zielsetzung der Arbeit abgeleitet. Im Anschluss werden in *Kapitel 2* die Grundlagen und Begriffe des Betrachtungsbereichs vermittelt. Diese reichen von der Montagetechnik über die Arbeitsplatzgestaltung, die Low-Code Programmierung bis hin zu den Grundlagen der Robotik sowie im Speziellen der MRK. In *Kapitel 3* werden bestehende Ansätze der methodischen Gestaltung hybrider Arbeitsplätze analysiert. Hierbei werden einschlägige allgemeine Planungsmethoden zur Montagesystemgestaltung sowie spezifische Ansätze zur Aufgabenallokation zwischen Mensch und Technik hinsichtlich deren Eignung zur Gestaltung hybrider Montagesysteme betrachtet. Des Weiteren werden Ansätze zur Bewertung der technischen Automatisierbarkeit sowie zum Beurteilen des Optimierungspotenzials analysiert.

Basierend auf dem eingangs beschriebenen Handlungsbedarf und der Forschungsfrage wird in *Kapitel 4* das Konzept zur methodischen Gestaltung hybrider Arbeitsplätze entwickelt. Dieses teilt sich auf in benötigte Ausgangsanalysemethoden, in die Bewertung des bestehenden Arbeitsplatzes und abschließend in die Gestaltung des zukünftigen hybriden Arbeitsplatzes. Durch die Ausgangsanalyse werden umfangreiche Informationen über Produkt, Montageprozess und den bestehenden Betriebsmitteln gewonnen. Diese

Erkenntnisse werden in der darauffolgenden Bewertungsphase zur Beurteilung der technischen Automatisierbarkeit sowie des vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenzials eingesetzt. Schließlich erfolgt die Gestaltung des hybriden Arbeitsplatzes durch die fähigkeits- und zeitpotenzialbasierte Zuteilung der Prozessschritte sowie unter Berücksichtigung der benötigten Sicherheits- und Interaktionstechnik.

In *Kapitel 5* wird das erarbeitete Konzept realisiert und die Topologie der Gesamtmethodik dargestellt. Des Weiteren wird die Umsetzung der entwickelten Gesamtmethodik in Form eines softwarebasierten Assistenten dargelegt.

Die Validierung des entwickelten Konzeptes wird in Kapitel 6 und 7 anhand zweier bestehender manueller Montagearbeitsplätze vorgenommen. Dies erfolgt ausführlich einerseits manuell in *Kapitel 6* am Validierungsbeispiel der NKW-Druckplattenmontage sowie andererseits in *Kapitel 7* am Validierungsbeispiel der Vormontage des elektrifizierten Nebenabtriebs eWorX mithilfe des entwickelten digitalen Assistenten.

Basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen enthält *Kapitel 8* die Zusammenfassung der Arbeit mit der reflektierenden Betrachtung der Forschungsfrage. Abschließend erfolgt ein Fazit, in dem der weitere Bedarf an Forschung und Entwicklung in diesem Bereich aufgezeigt wird.

2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs

In diesem Kapitel werden die für das Verständnis der hybriden Arbeitsplatzgestaltung relevanten Begriffe und Definitionen erläutert. Die behandelten Grundlagen des Betrachtungsbereiches reichen von der Montagetechnik über die Arbeitsplatzgestaltung, das Toleranzmanagement in der Montage bis hin zur Robotik.

Diese Arbeit entstand in der ZF Friedrichshafen AG in enger Zusammenarbeit mit dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik gGmbH und des Lehrstuhls für Montagesysteme der Universität des Saarlandes von Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller. Die Fachbegriffe rekurren daher auf die am Lehrstuhl sowie in der Fachliteratur verwendete Terminologie.

2.1 Grundlagen der Montagetechnik

Die Begriffe Produktion und Fertigung werden häufig als Synonyme gebraucht. Im Zusammenhang mit der Thematik der Arbeit wird die Montage neben der Fertigung bzw. Teilefertigung als Teil der Produktion gesehen.

Die Fertigung umfasst die wirtschaftliche Herstellung von Werkstücken in benötigter Qualität und Stückzahl. Durch die Wahl eines geeigneten Fertigungsverfahrens wie Drehen, Fräsen oder Schleifen lassen sich die geforderten Abmessungen, Maßtoleranzen sowie Oberflächengüte der Werkstücke für den Kunden, für die weitere Bearbeitung oder für die Montage erzielen. (Fritz & Schulze, 2018)

Der Begriff Montage sowie die Verwendung des Begriffes des Montierens sind in bestehenden Normen sowie Richtlinien nicht gleichermaßen definiert. So beschreibt die VDI 2815 die Montage als „Zusammenbau von Teilen und/oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen in der Fertigung“. (VDI 2815, 1978) Der Vorgang des Montierens wird in dieser Arbeit als Montageprozess bezeichnet. Weitere Termini, die in der Literatur in diesem Kontext genutzt werden, sind Montageoperation und Montagevorgang.

2.1.1 Aufgaben der Montage

Am Lehrstuhl von Rainer Müller für Montagesysteme an der Universität des Saarlandes wird die Montage in Anlehnung an die Fachliteratur (VDI 2815, 1978; Feldhusen & Grote, 2013) in fünf Hauptaufgaben gegliedert. Hierbei nimmt das Fügen neben dem Handhaben, der Inbetriebnahme, den Hilfsprozessen sowie den Sonderoperationen die zentrale Rolle im Montageprozess ein. *Abbildung 2-1* stellt die Aufgaben der Montage mit ihren Untergruppen dar.

Montage				
Handhaben	Fügen	Inbetriebnahme	Hilfsprozesse	Sonderoperationen
Zuführen	Zusammensetzen	Justieren	Speichern	Reinigen
Transportieren	Anpressen, Einpressen	Parametrieren	Menge verändern	Nacharbeit
Sichern	Fügen durch Urformen	Funktionsprüfen	Kontrollieren	Kennzeichnen
	Fügen durch Umformen		Erwärmen, Kühlen	Verpacken
	Fügen durch Schweißen		...	...
	Fügen durch Löten			
	Kleben			
	Textiles Fügen			
	Füllen			

Abbildung 2-1: Aufgaben der Montage in Anlehnung an (Müller, 2021)

Handhaben: Die Teilfunktionen des Handhabens umfassen das Zuführen bzw. Bereitstellen der für den Montageprozess benötigten Montageobjekten in richtiger Position und Orientierung, das Transportieren von Baugruppen zwischen den Arbeitsplätzen bzw. Prozesstationen sowie das Sichern des Montageobjektes während des Montageprozesses. (Müller, 2021; VDI 2860:1990-05, 1990)

Fügen: Als eine Untergruppe der Produktionsverfahren stellt das Fügen die Kernaufgabe der Montage dar; es kann durch verschiedene Verfahren wie Einpressen, Schweißen oder Löten realisiert werden. Nach DIN 8593 wird Fügen wie folgt definiert. „Fügen, oft auch Verbinden genannt, ist das Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter, fester Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt. [...]“ (DIN 8593-0:2003-09, 2003-09)

Die Fügeverfahren lassen sich weiter nach der Art der Lösbarkeit in lösbar, unlösbar oder bedingt lösbar einteilen. So lassen sich bestimmte An- und Einpressverfahren wie Schrauben oder Klammern problemlos lösen. Demgegenüber stehen unter anderem Schweißen, Löten oder das Umformen von beispielsweise Nieten, die sich nur zerstörend lösen lassen. Verfahren wie das Zusammensetzen oder Füllen lassen sich je nach Ausführung nur schwer lösen. (DIN 8593-0:2003-09, 2003-09; Müller, 2021)

Inbetriebnahme: Die Inbetriebnahme versetzt ein Produkt in den betriebsfähigen Zustand. Zu den Tätigkeiten im Rahmen der Inbetriebnahme zählen Justieren, Parametrieren sowie Funktionsprüfen. Je nach Art und Gestaltung des Produktes sind nicht alle dieser Tätigkeiten erforderlich.

Hierbei dient die Justage als planmäßig vorgesehene Tätigkeit in der Montage zum Korrigieren von fertigungs- oder montagebedingten Positionsfehlern.

Durch Parametrieren werden den Steuergeräten, meist mechatronische Baugruppen, Konfigurationswerten übergeben, die das spätere Betriebsverhalten des Produktes definieren.

Zum Überprüfen der grundlegenden Funktionen sowie des korrekten Betriebsverhaltens eines Produktes wird dieses nach dem Zusammenbau einer Funktionsprüfung unterzogen. Dies erfolgt meist in Prüfständen, in denen mehrere Merkmale gleichzeitig abgeprüft werden können. So werden beispielsweise über Aufnahmen mechanische Kundenanschlussmaße abgeprüft, während die Kennlinien des Produktes erfasst werden. (Müller, 2021)

Hilfsprozesse: Prozesse, die für die Durchführung der Montage erforderlich sind, jedoch nicht direkt zum Montagefortschritt beitragen, werden als Hilfsprozesse bezeichnet. Zu ihnen gehören unter anderem das Kontrollieren, Speichern oder Erwärmen. (Müller, 2021)

Sonderoperationen: Alle nicht den Grundfunktionen des Fügens oder der Inbetriebnahme zuordenbaren Tätigkeiten, die dennoch wertsteigernd sind, werden als Sonderoperationen bezeichnet. Hierzu zählen eine Vielzahl von möglichen Operationen wie Beschriften, Konservieren oder unter anderem Verpacken. (Müller, 2021)

Häufig sind in Produktionsunternehmen keine strikten Trennungen zwischen Fertigung und Montage vorhanden. Hierdurch kommt es zu Montagesystemen mit direkt angebundene Fertigungssystemen, die die für die Montage benötigten Werkstücke im Montagetakt fertigen. Anwendung findet dies vor allem bei größeren und schwereren Bauteilen, deren Handling, Lagerung oder Transport aufwendig sind. Um eine derartige Verkettung wirtschaftlich realisieren zu können, müssen die Bearbeitungszeiten aus Fertigung und Montage annähernd gleich bzw. aufeinander abgestimmt sein. Der hieraus entstehende erhebliche Vorteil ist der Wegfall der Zwischentransporte sowie der Lagerhaltung der Werkstücke vor dem Verbau in den Montagen. Durch den Hilfsprozess des Speicherns kann die Fertigung von der Montage für Rüstvorgänge oder Störungsbehebungen entkoppelt werden.

2.1.2 Arten der Montage

Durch den Zusammenbau von Teilen entstehen Produkte unterschiedlicher Komplexität. Deren Montage kann je nach Schwierigkeit der Fügeoperation, Anzahl der Einzelteile und der geforderten Losgrößen durch manuelle, hybride oder automatische Montagesysteme erfolgen. (Konold & Reger, 2003) Diese Montagesysteme unterscheiden sich durch ihre Automatisierungsgrade, die das Verhältnis von manuellen, teilautomatisierten und voll automatisierten Prozessschritten im Gesamtmontageprozess abbilden (Müller, 2021).

Abbildung 2-2 zeigt Auswahlkriterien der unterschiedlichen Montagesysteme. Hieraus ist ersichtlich, dass die manuelle Montage eine hohe Flexibilität bei geringer Investition bietet, dabei allerdings nur für kleine Losgrößen wirtschaftlich einsetzbar ist. Demgegenüber stehen automatische Montagesysteme, die sich hervorragend für umfangreiche Losgrößen eignen, jedoch hohe Investitionen und eine geringe Flexibilität mit sich bringen. Zwischen diesen beiden Extremen liegt die hybride oder halb automatische Montage, bei der zu verrichtende Arbeitsinhalte teilweise sowohl automatisiert als auch manuell erfolgen. (Lotter & Wiendahl, 2012)

manuelle Montage	hybride Montage	automatische Montage
Investment	Investment	Investment
Flexibilität	Flexibilität	Flexibilität
Losgröße	Losgröße	Losgröße

Abbildung 2-2: Arten der Montagesysteme in Anlehnung an (Lotter & Wiendahl, 2012)

Durch Marktanforderungen wie kurze Produktlebenszyklen und wachsende Variantenvielfalten sind häufig in hohem Maß flexible Montagesysteme gefordert. Diese sind bei geringen Losgrößen nur schwer wirtschaftlich automatisierbar, wodurch in weiten Bereichen der industriellen Produktion nach wie vor die manuelle Montage ihre Daseinsberechtigung hat. (Lotter & Schilling, 1994)

Die **manuelle Montage** ist gekennzeichnet durch ausschließlich vom Menschen ausgeführte Montagevorgänge. Im Zentrum des Montageprozesses steht der Mensch, der durch die Verwendung seiner Hände, seiner Fingerfertigkeit, seiner Sinnesorgane sowie seiner Intelligenz die ihm gestellte Montageaufgabe ausführt. Unterstützung findet er durch die Verwendung von Werkzeugen und Vorrichtungen sowie Lehr- und Messmitteln. Um ein positives Arbeitsergebnis hinsichtlich Qualität und Leistung, ohne gesundheitliche Schädigungen der Mitarbeiter sicherstellen zu können, sind die Einhaltung ergonomischer Gestaltungsrichtlinien nach anerkannten arbeitswissenschaftlichen Grundsätzen zwingend erforderlich. (ArbSchG - Arbeitsschutzgesetz, 1996; Lotter & Wiendahl, 2012) Die Anforderungen zum Schutz des Mitarbeiters sind im Arbeitsschutzgesetz (1996) verankert, um den Arbeits- und Gesundheitsschutz nicht nur hinsichtlich physiologischer Belastungen sicherzustellen, sondern auch den psychologischen und sozialen Bedürfnissen des Menschen gerecht zu werden. Durch diese Rechtsvorschrift ist der Arbeitgeber verpflichtet,

gesetzliche Anforderungen bei der Gestaltung von manuellen Montageabläufen und -arbeitsplätzen umzusetzen. (Landau et al., 2001; Landau, 2007)

Eine Kombination aus manuellen und automatischen Vorgängen in einem Montagesystem wird als **hybrides oder teilautomatisches Montagesystem** bezeichnet. Dieses findet in der Regel dann Anwendung, wenn die Automatisierung eines einzelnen Montageprozesses technisch oder wirtschaftlich nicht umsetzbar ist. (Lotter & Schilling, 1994) Häufig werden bei neuen Produkten und anfangs noch moderaten Stückzahlen einzelne Montageprozesse gezielt nicht automatisiert, um die Anfangsinvestitionen möglichst gering zu halten. In späteren Produktlebensphasen mit wachsenden Stückzahlen und besserer Planungssicherheit kann dann durch weitere Investitionen der Automatisierungsgrad der Anlage erhöht und den benötigten Stückzahlen angepasst werden. Diese Vorgehensweise der stufenweisen Nachrüstung zum Erhöhen des Automatisierungsgrads muss bereits bei der Planung der Anlagengrundsysteme berücksichtigt werden. (Lotter & Schilling, 1994) Des Weiteren finden teilautomatisierte Montagesysteme Anwendung, wenn eine technische Unterstützung des Menschen erforderlich ist. Dies kann einerseits bei der Überforderung des menschlichen Leistungsvermögens durch beispielsweise zu schwere Bauteilmassen der Fall sein; auch sicherheitstechnische Gründe, zu denen unter anderem die Handhabung von Gefahrstoffen zählt, können ein solches Montagesystem erforderlich machen. (Schmidt, 2022)

Automatische Montagesysteme zeichnen sich dadurch aus, dass alle durchzuführenden Montagevorgänge voll automatisiert erfolgen. Mitarbeiter sind nicht an den Anlagentakt gebunden und werden lediglich für die Anlagenüberwachung und ggf. für Störungsbehebung sowie für die Materialversorgung benötigt. (Lotter & Wiendahl, 2012) Solche Systeme sind produktspezifische Sondermaschinen, die häufig unter Verwendung von Baukastensystemen entwickelt werden. Die Variantenvielfalt, Komplexität sowie die geforderte Produktionsleistung des zu montierenden Produktes bestimmen den konstruktiven Aufbau des automatischen Montagesystems. Mit wachsender Komplexität von Produkten steigt die Anzahl der für die Montage benötigten Operationen, diese müssen auf eine entsprechende Anzahl von Stationen aufgeteilt werden, um die geforderte Mengenleistung zu erbringen. (Schroll, 2021)

Automatische Montagesysteme bieten somit nur eine geringe Flexibilität und erfordern bei hohem Investitionsaufwand hohe Stückzahlen und lange Produktionslaufzeiten, um wirtschaftlich produzieren zu können. Sie kommen daher hauptsächlich in Großserienmontagen zum Einsatz. (Konold & Reger, 2003; Lotter & Schilling, 1994; Schroll, 2021)

2.1.3 Montagegerechte Produktgestaltung

Durch die Montage wird der größte Teil der anfallenden Kosten bei der Herstellung eines Produktes verursacht. Dennoch hat die Montage selbst nur einen geringen Einfluss auf

die anfallenden Kosten, da diese maßgeblich bereits im Produktentstehungsprozess durch die Konstruktion festgelegt werden (Lotter & Schilling, 1994). Gairola (1981) beziffert, dass die Montage 70 % der für die Herstellung eines Produktes anfallenden Kosten verursacht, für diese jedoch nur zu 13 % verantwortlich ist. Dementgegen steht die Konstruktion, die zwar nur 12 % der Kosten verursacht, aber für 75 % der Kosten verantwortlich ist. *Abbildung 2-3* veranschaulicht diesen Zusammenhang. (Gairola, 1981)

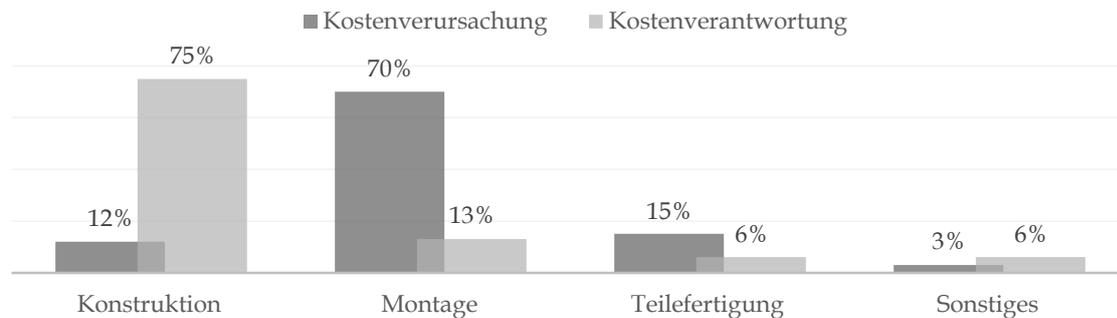


Abbildung 2-3: Kostenverursachung und Kostenverantwortung in Anlehnung an (Gairola, 1981)

Somit zeigt sich, dass bereits in der Produktgestaltung die Voraussetzungen hinsichtlich Handhabbarkeit sowie Fügbarkeit geschaffen werden müssen, damit Bauteile wirtschaftlich und effektiv zu Baugruppen sowie Produkten gefügt werden können. Dies muss in enger Abstimmung zwischen Konstruktion und technischer Produktionsplanung erfolgen, um gemeinsam ein automatisierungsfreundliches Produkt herzustellen, das sowohl handhabungsorientiert (Zuführung, Handhabung, Förderung, Speicherung) und prozessorientiert (Teilefertigung, Montage, Prüfung, Verpackung) gestaltet ist. (Konold & Reger, 2003; Müller, 2021) Zusammengefasst sollte das oberste Ziel eine sowohl funktionale als auch montagegerechte Gestaltung von Teilen, Baugruppen und Produkten sein, um die Montage bei einem Minimum an Zeit und Kosten zu ermöglichen. (Lotter & Schilling, 1994)

Dies bedeutet einerseits, dass ein Produkt die vom Kunden geforderten Funktionen erfüllen muss, andererseits jedoch konstruktiv auch so gestaltet sein sollte, dass es sich in Toleranz, Geometrie, Abmessungen, Werkstoffeigenschaften und technologischen Verfahren mit möglichst geringem Aufwand automatisiert herstellen lässt. (Hesse, 2012) Welche Relevanz das hat, zeigt eine Untersuchung der Automatisierungshemmnisse in der Montage, bei der 355 Firmen befragt wurden. Die häufigste Nennung und das somit größte Automatisierungshemmnis stellt mit 40,1 % die nicht vorhandene montagegerechte Produktgestaltung dar. Gefolgt wird diese von der zweithäufigsten Nennung mit 35,9 %, der schlechten Handhabbarkeit der Einzelteile. (Bäßler, 1988) Um diesen Hemmnissen entgegenzuwirken, wurden über viele Jahre verschiedene Methoden zur montagegerechten

Produktgestaltung entwickelt. Diese Gestaltungsgrundlagen können unter dem Begriff Design for Assembly (DFA) zusammengefasst werden. (Britzke, 2010)

Nach dem von Gairola (1981) entwickelten Maßnahmenkatalog zur Montagevereinfachung von Produkten, Baugruppen und Bauelement sollte der Montageinhalt durch die Reduzierung der Teileanzahl vereinfacht werden. Ebenso sind montagegerechte Verbringungen zu wählen, Funktionen möglichst zusammenzufassen sowie gleiche Bauteile für verschiedene Funktionen einzusetzen. Die anzuwendenden Gestaltungsrichtlinien sollen bei der Konstruktion der Bauteile zusammenfassend dazu dienen,

- Voraussetzungen für die Montage zu schaffen,
 - Bauelemente und -vielfalt zu reduzieren,
 - montagegerechte Baugruppen zu bilden,
 - das Fügen zu erleichtern,
 - Bauelemente handhabungsgerecht zu gestalten,
 - zu kontrollieren sowie Vor- und Nacharbeiten zu vermeiden oder zu erleichtern.
- (Gairola, 1981)

So zeigt sich beispielsweise konkret, dass die Anzahl der zu montierenden Komponenten die Anzahl der Montagevorgänge vorgibt und somit die Montagezeit und -kosten stark beeinflusst. Ebenso wie die konstruktiv definierte Verbindungstechnik einen maßgeblichen Einfluss auf das Montageverfahren hat, wird durch die Bauteilgestaltung der Konstruktion die Handhabungstechnik in der Montage mitbestimmt. (Lotter & Schilling, 1994; Lotter & Wiendahl, 2012)

Somit zielt die montagegerechte Produktgestaltung darauf ab, bereits in der Konstruktion den späteren Montageprozess zu berücksichtigen, um das Produkt mit möglichst unkomplizierten Montageprozessen und minimalem Betriebsmittelaufwand herstellen zu können. Hierbei gilt es, das beste Verhältnis zwischen Produkthanforderungen, Betriebsmitteln und dem Ressourcenaufwand zu finden. (Müller, 2021)

2.2 Grundlagen der Arbeitsplatzgestaltung

Dieses Unterkapitel gibt Aufschluss über die Betrachtungsebene der vorliegenden Arbeit sowie deren Verortung. Des Weiteren wird ein Grundverständnis der Arbeitsplatzgestaltung mit den etablierten Verfahren der Arbeitszeitermittlung in der Montage vermittelt.

2.2.1 Ebenen der Fabrikplanung

Der Bereich der Fabrikplanung umfasst alle zu der Produktion gehörenden Funktionen, die vom Wareneingang bis hin zum Versand sowie in den produktionsunterstützenden Bereichen erforderlich sind. Ebenfalls zählt hierzu die Planung der Werkstruktur mit Arbeitsplätzen, Bereichen, Gebäuden, Werken bis hin zum Fertigungsverbund.

Bei der Planung einer Fabrik werden nach VDI 5200 Blatt 1:2011-02 (2011) in der Regel fünf aufeinanderfolgende Planungsebenen unterschieden, die jeweils an Größe zunehmen. Die erste und unterste Ebene stellt der Arbeitsplatz dar, der den elementaren Produktionsbereich mit Betriebsmitteln und Nebeneinrichtungen umfasst. Hier finden die grundlegenden Produktionsaktivitäten statt. Auf der zweiten Ebene befindet sich das Segment, ein geschlossener Produktionsbereich, der aus mehreren Arbeitsplätzen besteht. Jeder Arbeitsplatz hat dabei definierte Produktionsaufgaben, die innerhalb dieses Segments erfüllt werden. Die dritte Ebene ist das Gebäude, ein architektonisch und räumlich geschlossener Produktionsbereich. Hier werden bestimmte Produktionsaufgaben durchgeführt, die nicht unbedingt abgeschlossen sein müssen. Das Gebäude kann eine einzelne Fabrik im engeren Sinne sein und aus mehreren Segmenten oder Teilsegmenten bestehen. Auf der vierten Ebene befindet sich das Werk, ein örtlich und räumlich geschlossener Produktionsbereich an einem bestimmten Standort. In einem Werk können mehrere Gebäude vorhanden sein. Neben den Gebäuden umfasst das Werk interne Wegeverbindungen, Außenanlagen und die Anbindung an die infrastrukturellen Ressourcen außerhalb des Werks. Die fünfte Ebene ist das Produktionsnetz, das ein Verbund von Standorten eines oder mehrerer Unternehmen sein kann. Dieses Netzwerk kann lokal, regional, überregional oder sogar international konfiguriert sein und dient der Koordination und Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Standorten. (VDI 5200 Blatt 1:2011-02, 2011)

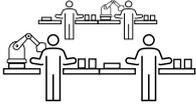
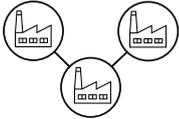
Planungsebene 1	Planungsebene 2	Planungsebene 3	Planungsebene 4	Planungsebene 5
Arbeitsplatz	Segment	Gebäude	Werk	Produktionsnetz
				

Abbildung 2-4: Planungsebenen einer Fabrik

Abbildung 2-4 stellt die beschriebenen fünf Planungsebenen vom Arbeitsplatz bis hin zum Produktionsnetz dar. Die in dieser Arbeit behandelte Methodik beschränkt sich auf die erste Planungsebene und befasst sich mit der Gestaltung von Einzelarbeitsplätzen.

2.2.2 Gestaltungseinflüsse des Produktionssystems

Die zentrale Aufgabe eines Produktionssystems besteht darin, Produkte in der geforderten Menge und Qualität in einer vorgegebenen Zeit herzustellen. Das herzustellende Produkt hat hierbei einen essenziellen Einfluss auf die Gestaltung des Produktionssystems. So haben die Art, Anzahl, Größe und das Gewicht der Einzelteile genau wie die verwendeten Fügeverfahren (bspw.: Schrauben, Schweißen) eine erhebliche Auswirkung auf die Dimensionen sowie auf die bei dem Montagesystem verwendeten Technologien. Ebenso beeinflusst die Menge an zu montierenden Produkten in der geforderten Zeit die Leistung des Produktionssystems, weshalb Technik und Organisation entsprechend abgestimmt werden müssen. (Schmidt, 2022)

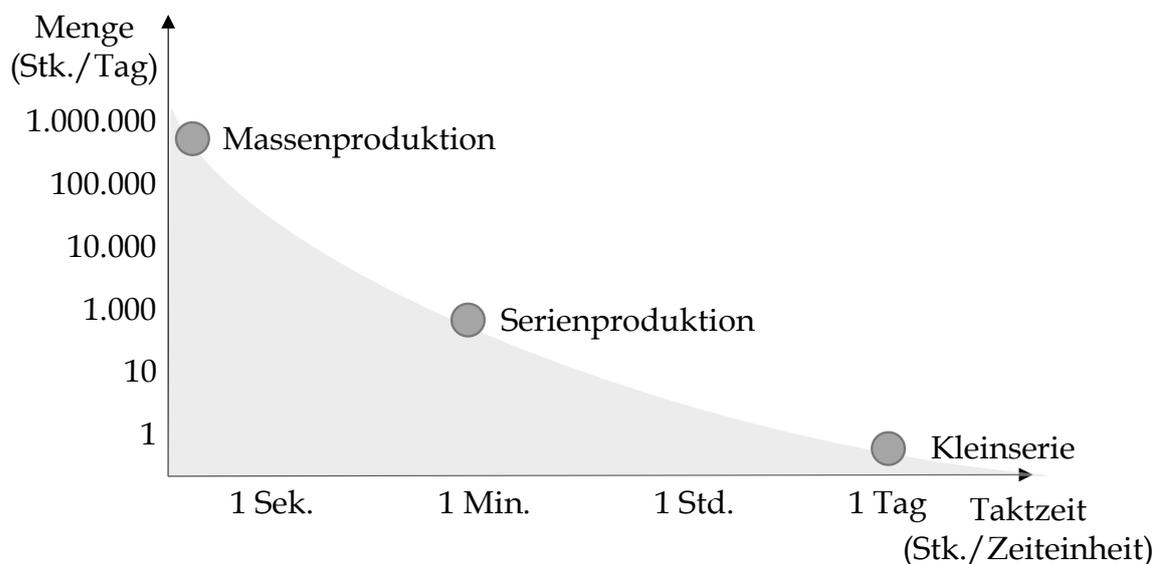


Abbildung 2-5: Mengenleistung von Produktionssystemen in Anlehnung an (Schmidt, 2022)

Die geforderte mengenmäßige Sollausbildung eines Produktes pro Zeiteinheit wird in der Praxis als Taktzeit in Minuten pro Stück oder Sekunden pro Stück ausgedrückt (Konold & Reger, 2003). Es kann zwischen drei verschiedenen Produktionsszenarien für unterschiedliche Produktmengen differenziert werden. Die höchste Ausbringungsmenge stellt hierbei die Massenproduktion dar. Diese fordert einen hohen Automatisierungsgrad, um die benötigten sehr geringen Taktzeiten realisieren zu können. In der Massenproduktion werden Taktzeiten von weniger als eine Sekunde pro Bauteil und Stückzahlen von mehreren 100 000 pro Tag realisiert. Typische Anwendungsfelder finden sich in der Elektronikfertigung. Mittlere Ausbringungsmengen gibt es in der Serienproduktion wie beispielsweise im Automobilbau. Hier werden Taktzeiten im hohen Sekunden- und

Minutenbereich mit Stückzahlen von Hundert bis zu mehreren Tausend Einheiten pro Tag realisiert. Die geringste Ausbringung liegt vor in der Kleinserien- und Einzelproduktion. Hier werden wenige Produkte pro Tag bis hin zu mehrtägigen Produktionen umgesetzt. Beispiele hierfür finden sich im Flugzeugbau. (Schmidt, 2022) Die *Abbildung 2-5* veranschaulicht die drei unterschiedlichen Produktionsszenarien mit ihren Mengenleistungen.

Die Gestaltung eines Arbeitssystems wird jedoch zusätzlich durch unterschiedliche Anforderungen an das Montagesystem und die Montageaufgabe geprägt. So sind weitere entscheidende Einflussfaktoren die Komplexität der Montageaufgabe, die Anzahl an montagerelevanten Varianten, der aus der Taktzeit resultierende Automatisierungsgrad, der räumliche Abstand zwischen den Montagestationen sowie weitere indirekte Aufgaben, wie beispielsweise die Materialbereitstellungen. (Landau et al., 2001)

All diese Einflussfaktoren bestimmen die geeignete Organisationsform in der Montage mit. Diese lassen sich anhand der Beweglichkeit des Montageobjektes sowie dessen Transport zwischen den Stationen kategorisieren. Hieraus ergeben sich die fünf Grundorganisationsformen Baustellen-, Einzelplatz-, Reihen-, Fließ- und Taktstraßenmontage innerhalb der Montage. (Landau et al., 2001; Spur & Stöferle, 1986) *Abbildung 2-6* veranschaulicht diesen Zusammenhang.

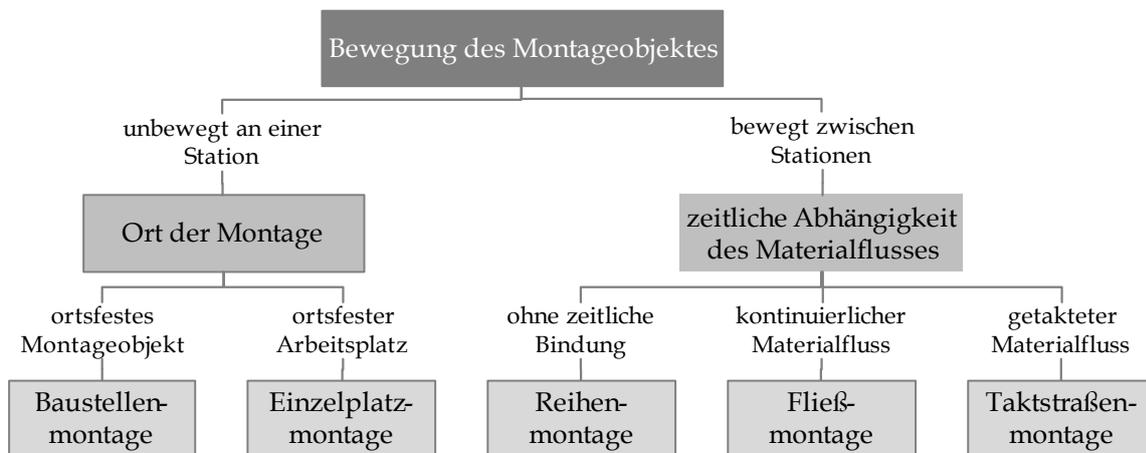


Abbildung 2-6: Organisationsformen der Montage in Anlehnung an (Spur & Stöferle, 1986)

2.2.3 Gestaltung von Arbeitsprozessen

Die Gestaltung von Arbeitsprozessen hat zum Ziel, Voraussetzungen für das Zusammenwirken von Mensch, Technik, Information und Organisation zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe zu definieren. Dabei ist die Erfüllung der Arbeitsaufgabe ebenso essenziell wie die Beachtung der menschlichen Eigenschaften und Bedürfnisse sowie der Wirtschaftlichkeit des Arbeitssystems. (REFA, 1991) Generell sollen Mitarbeiter in effizienten und produktiven Arbeitsprozessen eingesetzt werden, aber zeitgleich ausführbare Tätigkeiten übernehmen, bei denen sie nicht geschädigt werden. Das übergeordnete Ziel der

Arbeitsgestaltung ist somit, die Beschäftigung der Mitarbeiter zu sichern, deren Arbeitsfähigkeit zu erhalten und Arbeit zukunftsfähig zu entwickeln. (Landau, 2007)

Gerade die Gestaltung von effizienten Arbeitsabläufen und Arbeitsprozessen ist ein entscheidender Schritt, um Wettbewerbsvorteile zu erlangen. Um die benötigte Effizienz und Produktivität zu erreichen, sind Arbeitsprozesse unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu gestalten. Dabei müssen Prozessstabilität, Prozessdauer und Prozessergonomie in angemessener Relation zu den getätigten Investitionen stehen (Britzke, 2010). Des Weiteren sind Effizienzreserven durch die Eliminierung jeglicher Verschwendung auszunutzen (Becker, 2006). Somit gilt es, die Wirtschaftlichkeit und damit den Wirkungsgrad von Arbeitssystemen zu erhöhen, um höhere Mengenleistungen bei niedrigeren Kosten in adäquater Qualität erzeugen zu können. Um dieses Ziel zu erreichen, kann Einfluss genommen werden auf das Montageobjekt, auf den Arbeitsprozess, auf die Betriebsmittel sowie deren räumliche Anordnung. (REFA, 1991) Bei einer intelligenten Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine wird der Mensch nicht mehr einseitig dem Takt der Maschine ausgesetzt, sondern Mensch und Maschine erledigen in einer Symbiose die ihnen auferlegte Arbeit gemeinsam. (Jodlbauer, 2018)

Dabei muss jeder Einzelarbeitsplatz, unabhängig von der Montageorganisationsform, den ergonomischen Gestaltungsgrundsätzen entsprechen. Diese Grundsätze haben für die Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen gleichermaßen Bedeutung. Ziel hierbei ist es, die Technik an den Menschen anzupassen (Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014). Hierfür müssen die individuellen Körpermaße und Bewegungsmöglichkeiten der Arbeitenden, einschließlich Geschlecht und ethnische Merkmale, berücksichtigt werden. So sollte die Arbeitshöhe, Sitzhöhe, Greifraumweite und Höhe bei einem Mitarbeiterwechsel problemlos veränderbar sein. Ebenso ist es von Bedeutung, dass dem Mitarbeiter die Möglichkeit gegeben wird, zwischen sitzender und stehender Tätigkeit frei zu wählen. Hierfür kann häufig auf modulare Baukastensysteme zurückgegriffen werden, die auf dem Markt verfügbar sind. (Lotter, 2012)

In der Gestaltung manueller und hybrider Arbeitsplätze sind die Prinzipien der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung von erheblicher Bedeutung und sollten berücksichtigt werden. Von Relevanz ist, Materialien und Vorrichtungen optimal zu platzieren, um einen ergonomisch korrekten und dabei gleichzeitig effektiven und verschwendungsfreien Arbeitsplatz zu schaffen. In dieser Arbeit wird jedoch nicht tiefer auf die ergonomischen Aspekte der Arbeitsplatzgestaltung eingegangen, da sie ein eigenes Forschungsgebiet darstellen.

2.2.4 Maschinensicherheit

Im vorangegangenen *Kapitel 2.2.3* wurden unter anderem die Grundsätze zur Gestaltung manueller Arbeitsplätze dargestellt, die vor allem ergonomische Gesichtspunkte berücksichtigen. Durch die Hybridisierung von Arbeitsplätzen sind jedoch auch maschinensicherheitstechnische Aspekte zu betrachten. So ist zu entscheiden, ob die geplante Technik zur Unterstützung des Mitarbeiters im Sinne der Maschinenrichtlinie (MRL) (2006/42/EG:2006-05-17, 2006) unter den Begriff Maschine fällt und somit eine CE-Zertifizierung erforderlich ist, oder ob die Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung nach dem Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG - Arbeitsschutzgesetz, 1996) zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Mitarbeiter ausreichend ist.

Eine Maschine wird nach MRL (2006, p. 27) u. a. definiert als „eine mit einem anderen Antriebssystem als der unmittelbar eingesetzten menschlichen oder tierischen Kraft ausgestattete oder dafür vorgesehene Gesamtheit miteinander verbundener Teile oder Vorrichtungen, von denen mindestens eines bzw. eine beweglich ist und die für eine bestimmte Anwendung zusammengefügt sind.“ Ist dies der Fall, so ist derjenige Hersteller der Maschine, der diese auf den Markt bringt oder für den Eigengebrauch verantwortlich ist. Der Hersteller oder sein Bevollmächtigter muss sicherstellen, dass für die Maschine, die er in den Verkehr bringen möchte, eine Risikobeurteilung durchgeführt wird. Hierbei sollten die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für die geplante Maschine identifiziert und entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. (2006/42/EG:2006-05-17, 2006)

Um hierfür in der Europäischen Union einen gemeinsamen Rahmen zu schaffen, wurden Normen entwickelt, die sich in die drei hierarchischen Ebenen A-, B- und C-Normen gliedern. Die grundlegenden Aspekte der Maschinensicherheit sind Gegenstand der A-Normen. Diese beinhalten unter anderem die EN ISO 12100, die die Sicherheit von Maschinen nach allgemeinen Gestaltungsgrundsätzen sowie die Risikobeurteilung und Risikominde- rung zum Gegenstand hat. (Glück, 2022)

Die zweite Kategorie, die B-Normen, umfassen die Sicherheitsfachgruppennormen. Diese beschreiben im Gegensatz zu den A-Normen, die grundlegende Sicherheitsanforderungen abdecken, detaillierte technische Lösungen und Methoden die für eine ganze Gruppe von Maschinen, Anlagen oder Geräten verwendet werden können. (Glück, 2022; Gehlen, 2023) Hierzu gehören unter anderem Normen für Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen (EN ISO 13854:2019), Anforderungen an Schutzeinrichtungen wie trennende Schutzeinrichtungen (EN ISO 14120:2015), Stillsetzen im Notfall (EN ISO 13850: 2015) und viele weitere Vorgaben.

Die dritte und umfangreichste Kategorie mit mehr als 600 harmonisierten Normen bilden die C-Normen (Gehlen, 2023). Sie umfassen maschinenspezifische Normen und decken

deren sicherheitsspezifische Aspekte ab. Zu ihnen zählen unter anderem Normen zu Sicherheitsanforderungen für Industrieroboter (EN ISO 10218-1:2011; EN ISO 10218-2:2011) und Werkzeugmaschinen (EN 12417:2001). Diese Normen regeln sicherheitstechnische Aspekte auch weit über diese Bereiche hinaus; sie reichen vom Flugzeugbau über die landwirtschaftlichen Maschinen bis hin zum Bauwesen und haben häufig nur eine Vermutungswirkung für Maschinen. (Muck, 2023)

Die Einhaltung der zuvor beschriebenen A-, B- und C-Normen trägt dazu bei, die geforderten Sicherheits- und Gesundheitsschutzziele nach der EG-Richtlinie zu erreichen und haftungsrechtliche Sicherheitsdefizite zu vermeiden. (Gehlen, 2023)

Somit muss der Nachweis erbracht werden, dass die Maschine nicht nur ihre Funktion erfüllt, sondern auch sicher betrieben werden kann, ohne Verletzungs- oder Gesundheitsrisiken aufzuweisen. Es ist erforderlich, diesen Nachweis zu erbringen und durch das CE-Zeichen nach außen zu visualisieren. (Bernstein, 2016)

Ein zentraler Bestandteil zur Einhaltung der EG-Richtlinie ist daher der CE-Konformitätsprozess und dessen normgerechte Dokumentation. Die Struktur und Prozessorganisation der CE-Kennzeichnung werden in *Abbildung 2-7* dargestellt.

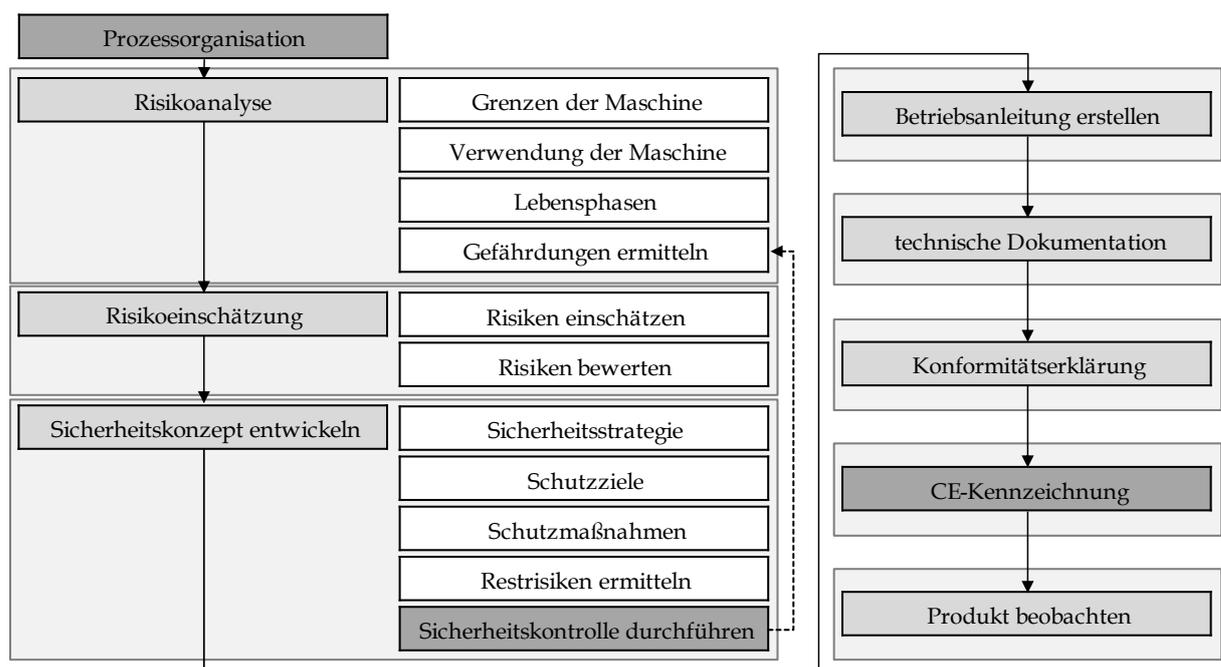


Abbildung 2-7: CE-Konformitätsprozess in Anlehnung an (Gehlen, 2023)

Anhand der Prozessdarstellung ist ersichtlich, dass bereits in der Konzeptions- und Konstruktionsphase die Risikobeurteilung der Maschine durchzuführen ist. Der Maschinenhersteller hat die Pflicht, die mit der Maschine verbundenen Risiken zu erkennen, diese einzuschätzen und zu bewerten. Basierend auf diesen Erkenntnissen ist die Maschine zu konzipieren und gegebenenfalls sind benötigte Sicherheitskonzepte zu entwickeln. Somit

ist die Risikobewertung ein begleitender Prozess, der kontinuierlich bei der Entwicklung einer Maschine durchzuführen ist. (Gehlen, 2023)

Bezogen auf die Konzeption hybrider Montagesysteme sollten somit die Risikoanalyse, die Risikoeinschätzung sowie die Entwicklung des Sicherheitskonzeptes ein fester Bestandteil der Planung des Arbeitsplatzes sein. Die durch den Planer ausgewählte mitarbeiterunterstützende Technik beeinflusst maßgeblich das für den Mitarbeiter entstehende Risiko am Arbeitsplatz. Daher ist frühzeitig zu analysieren, welches Sicherheitskonzept für die eingesetzte Technik erforderlich ist. Das gewählte Sicherheitskonzept kann unter Umständen den Gesamtprozessablauf signifikant beeinflussen, wodurch die Definition des Sicherheitskonzeptes und des idealen Prozessablaufes einen iterativen Prozess darstellt.

2.2.5 Mensch-Technik-Interaktion

Die Mensch-Technik-Interaktion befasst sich mit der zielgerichteten Schnittstelle zwischen dem Menschen und technischen Elementen unter Berücksichtigung energetischer, informatorischer und anthropometrischer Prinzipien. Generell dient eine geeignete Mensch-Technik-Schnittstelle einerseits zur Unterstützung des Informationsverarbeitungsprozesses des Menschen bei der Informationsaufnahme (Entdecken, Erkennen) und andererseits zur Informationsübertragung vom Menschen zur Maschine. Die Informationsabgabe an Mensch-Technik-Schnittstellen erfolgt meist durch ein Eingabegerät, kann jedoch auch durch das natürliche Verhalten des Menschen in Form von Bewegungen oder Gesten erfolgen. (Schlick et al., 2018)

Zur Interaktion zwischen Mensch und Technik werden von beiden Interaktionspartnern Sinne bzw. Sensoren benötigt, um Informationen empfangen zu können. Das Wahrnehmungssystem des Menschen wird daher auch als sensorische Modalität bezeichnet. Nach Luczak (1993) umfasst das menschliche Wahrnehmungssystem neben den allgemein bekannten fünf Modalitäten auditiv (Hören), gustatorisch (Schmecken), olfaktorisch (Riechen), taktil (Fühlen) und visuell (Sehen) noch die Modalitäten kinästhetisch (Muskelstellung), Schmerz (Nervenenden), thermisch (Haut) und vestibulär (Beschleunigungen über das Mittelohr). (Gradmann et al., 2019) Da jedoch nicht alle möglichen menschlichen Wahrnehmungssysteme in der industriellen Praxis derzeit von Relevanz sind, beschränkt sich die Betrachtung dieser Arbeit bezüglich der Informationsaufnahme auf die visuellen, auditiven sowie taktilen bzw. haptischen Modalitäten des Menschen.

Um ein geeignetes kommunikationstechnisches Arbeitssystem zu gestalten, ist es notwendig, abstrahiert dargestellt, Informationseingaben (z. B.: Informationen auf einem Display) in Informationsausgaben (z. B.: auszuführende Tätigkeiten des Mitarbeiters) zu wandeln. Dies erfolgt ebenso in umgekehrter Reihenfolge durch die Eingabe von Informationen durch den Menschen, die zu einer Handlung (Ablaufsteuerung) der Maschine führen.

Andererseits sind die im Produktionsbereich vorliegenden Arbeitsumgebungen, wie Lärm, Klima oder Störlicht, für den Kommunikationsprozess entscheidend und müssen bei der Wahl des geeigneten Kommunikationsmediums berücksichtigt werden. So gilt es, Informationen vom Menschen wahrzunehmen, um Entscheidungen und letztendlich Handlungen ableiten zu können. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass die vom Menschen ausgesendeten Informationen durch die Maschine korrekt empfangen werden. (Weule, 1992) *Abbildung 2-8* stellt den Informationsübertragungsprozess mit der Art der möglichen Informationseingabe sowie der Informationsabgabe in einem Mensch-Technik-System dar.

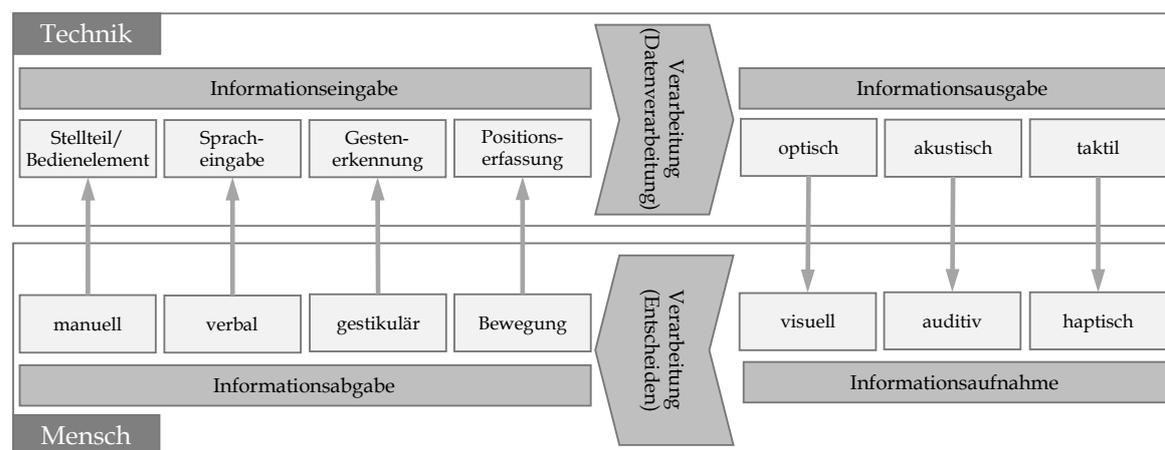


Abbildung 2-8: Informationsaustausch Mensch-Technik in Anlehnung an (Schlick et al., 2018)

2.2.6 Verfahren zur Arbeitszeitermittlung

Das Verwenden zeitwirtschaftlicher Methoden zur Prozessgestaltung spielt eine entscheidende Rolle bei der effizienten Planung und Gestaltung von Arbeitsplätzen, Fertigungs-, Montage- und Logistikprozessen. Dabei werden zeitwirtschaftliche Methoden eingesetzt, um genaue Zeitdaten für geplante Arbeitssysteme festzustellen. Diese können beispielsweise das Ermitteln von Betriebsmittelauslastungen oder des Personalbedarfs sein. Ein weiterer zentraler Aspekt der Zeitwirtschaft besteht darin, verschiedene Planungsszenarien miteinander zu vergleichen und zu bewerten mit dem Ziel, Produktions- und Montageprozesse zu optimieren. Die Zeitdaten dienen als Grundlage, um die verschiedenen Optionen zu analysieren und letztendlich eine geeignete Lösung auszuwählen. Durch diesen Vergleich können potenzielle Probleme oder Engpässe identifiziert und berücksichtigt werden, um die Effizienz und Produktivität der Prozesse zu optimieren. In der Produktion bildet die Zeitwirtschaft die Grundlage für verschiedene Aufgaben. Sie ermöglicht die präzise Terminierung von Produktionsaufträgen, um sicherzustellen, dass sie rechtzeitig abgeschlossen werden. Darüber hinaus werden die Personal- und Betriebsmittelkapazitäten entsprechend verteilt, damit eine reibungslose Durchführung der Aufträge gewährleistet wird. Die Bestimmung der Durchlaufzeiten ist ebenfalls ein bedeutender

Aspekt, der durch die Zeitwirtschaft ermöglicht wird. Ein weiterer Mehrwert der Zeitwirtschaft liegt darin, Ist- und Soll-Zeiten zu vergleichen. Durch diesen Vergleich werden Abweichungen im Fertigungs- und Montageablauf sichtbar, was wiederum die Identifizierung von Schwachstellen und Potenzialen für Verbesserungsmaßnahmen möglich macht. Auf Basis dieser Erkenntnisse können gezielte Maßnahmen ergriffen werden, um Prozesse zu optimieren, Engpässe zu beseitigen und eine höhere Effizienz zu erreichen. (Deuse & Busch, 2012; Heinz & Mesenhöller, 2001)

Insgesamt ist die Zeitwirtschaft ein zentrales Instrument, das bei der Planung, Gestaltung und Optimierung von Prozessen eine essenzielle Rolle spielt. Durch die Nutzung zeitwirtschaftlicher Methoden und das genaue Erfassen von Zeitdaten können Unternehmen ihre Abläufe effizienter gestalten, Engpässe minimieren und letztendlich ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern. (Deuse & Busch, 2012)

Zum Ermitteln von Zeitdaten sind in der Praxis eine Vielzahl Methoden bekannt, die erfolgreich eingesetzt werden. Diese unterscheiden sich unter anderem durch ihre Komplexität und den Durchführungsaufwand. Durch die zahlreichen verfügbaren Zeiterfassungsmethoden sind umfangreiche Kenntnisse der Zeitbeauftragten erforderlich, um für den gewünschten Betrachtungsfall auf die geeignete Erhebungsmethode zurückzugreifen. (Landau et al., 2001) Eine mögliche Einteilung der verwendeten Methoden ist die Art der Datengewinnung (Abbildung 2-9).

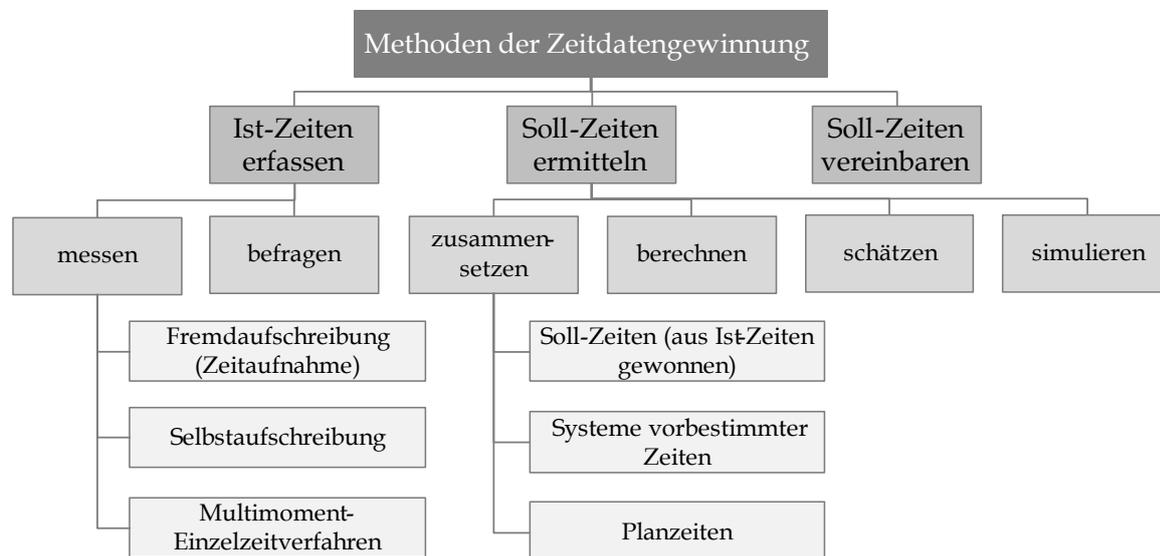


Abbildung 2-9: Methoden der Zeitdatengewinnung in Anlehnung an (Heinz & Mesenhöller, 2001)

Die Datengewinnung lässt sich unterteilen in die Erfassung von Ist-Zeitdaten, das heißt die tatsächliche für einen Arbeitsablauf benötigte Zeit, sowie in Soll-Zeitdaten, anhand derer die Zeiten eines zukünftigen Arbeitsablaufes festgelegt werden. Eine weitere, jedoch

in der Praxis selten eingesetzte Methode zur Zeitdatengewinnung stellt die Soll-Zeitenvereinbarung dar. Hierbei werden die Zeiten auf Basis von Soll-Zeiten ermittelt und im Anschluss die Leistung zwischen dem Mitarbeiter und dem Vorgesetzten gemeinsam vereinbart. (Heinz & Mesenhöller, 2001; REFA, 1997) Im Folgenden werden die beiden Hauptmethoden, die Ist-Zeitenerfassung und die Ermittlung der Soll-Zeiten sowie die unterschiedlichen Vorgehensweisen näher erläutert, die zur Datengewinnung jeweils angewandt werden.

Die **Ist-Zeitenerfassung** teilt sich auf in die messenden Methoden wie die Fremdaufschreibung durch Zeitaufnahme, die Selbstaufschreibung sowie in die Multimomentaufnahme. Zusätzlich lassen sich Ist-Zeiten durch Befragungen erfassen. Die etablierteste Methode der Ist-Zeitenerfassung ist die vor Ort durchgeführte Zeitaufnahme nach REFA. Danach werden in einem Arbeitssystem Arbeitsabläufe systematisch beobachtet, gemessen und zeitlich erfasst. Dabei werden sowohl die Arbeitsmethoden, das Arbeitsverfahren sowie die Arbeitsbedingungen festgehalten. Aus der Erfassung mehrerer Arbeitszyklen wird durch den Zeitstudienbeauftragten der Leistungsgrad des Mitarbeiters festgelegt, woraus anschließend die Normalleistung eruiert wird. Durch die Zugabe von Verteil- und Erholungszeiten wird eine Vorgabezeit für den betrachteten Arbeitsablauf definiert. (Heinz & Mesenhöller, 2001; REFA, Autorenteam, 2013)

Soll-Zeiten bzw. Vorgabezeiten lassen sich ebenfalls durch unterschiedliche Methoden feststellen. So können die Vorgabezeiten durch das Zusammensetzen, durch die Berechnung, das Schätzen und die Simulation bestimmt werden. Das Zusammensetzen von Soll-Zeiten kann ebenfalls wiederum durch verschiedene Verfahren erfolgen. So können sie aus bereits erfassten Ist-Zeiten abgeleitet werden, wenn diese entsprechend aufbereitet und auf den geplanten Arbeitsablauf übertragbar sind.

Zusätzlich werden für ähnliche sich häufig wiederholende Arbeitsabläufe **Plan-Zeiten** verwendet. Bei dieser Methode wird der Zeitbedarf für die Durchführung einer Tätigkeit in Abhängigkeit einer Einflussgröße dargestellt. Eine Einflussgröße könnte beispielsweise die Schraubenlänge sein. Für diese ließe sich aus Plan-Zeittabellen in Abhängigkeit der Schraubenlänge die Durchführungszeit für die Verschraubung bestimmen.

Weitverbreitet sind **Systeme vorbestimmter Zeiten** wie beispielsweise **MTM** (Methods Time Measurement). Da MTM in dieser Arbeit ein zentrales Werkzeug darstellt, wird dieses Verfahren nachfolgend detailliert beschrieben. Grundlegend kommen bei MTM universell verwendbare Mikrobausteine zur Abbildung von Einzelbewegungen zum Einsatz. Diese Mikrobausteine beinhalten vorbestimmte Ausführungszeiten in Abhängigkeit von Einflussgrößen wie Distanzen oder Fügegenauigkeiten. So lassen sich aus diesen Prozessbausteinen Arbeitsabläufe zusammensetzen, die in ihrer Summe die Grundzeit für die Durchführung des Gesamtarbeitsablaufes ergeben. (Heinz & Mesenhöller, 2001)

Komplexität	Grundvorgang	MEK	UAS	
	Bewegungsfolge		Standard-Daten-Basiswerte MTM-2	
	Grundbewegung			MTM-1
Prozesstypologie		Einzelfertigung	Serienfertigung	Mengenfertigung
Merkmal	Zyklik	keine zyklischen Wiederholungen	begrenzt länger zyklische Wiederholungen	permanent kurzzyklische Wiederholungen
	Ablaufinformation	Gesamtablauf	Teilablauf	Bewegungsablauf
	Arbeitsplatz	für nahezu beliebige Produktvarianten/Prozesse	für definiertes Produktspektrum	für eine definierte Produktvariante
	Versorgungsprinzip	Holprinzip	Holprinzip mit Bereitstellung	Bringprinzip
	Arbeitsweisensteuerung	hoch	mittel	gering

Abbildung 2-10: MTM-Prozessbausteine in Anlehnung an (Britzke, 2010)

Um Prozesse in einem geeigneten Detaillierungsgrad darzulegen, stellt MTM für die Prozesstypen Einzelfertigung, Serienfertigung und Mengenfertigung unterschiedliche Prozessauflösungen zur Verfügung (Britzke, 2010). Die *Abbildung 2-10* zeigt die MTM-Prozessbausteine für die unterschiedlichen Prozesstypen mit ihren Merkmalen.

Durch Verwenden von Standard-Daten-Basiswerten (MTM-2) werden die fünf MTM-Grundbewegungen auf die häufig auftretenden Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren reduziert. Somit werden Hinlangen, Greifen und Loslassen zu Aufnehmen und Bringen sowie Fügen zu Platzieren vereint. Unter dem Begriff Grundvorgang lassen sich die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren zusammenführen. Dies ermöglicht es, die gewünschte Feingranularität durch Datenverdichtung zu erzielen. Tabelle 2-1 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen den fünf Grundbewegungen, den Bewegungsfolgen und dem Grundvorgang. (Bokranz & Landau, 2012)

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung Grundbewegung, Bewegungsfolge und Grundvorgang

Grundbewegung	Bewegungsfolge	Grundvorgang
Hinlangen	Aufnehmen	Aufnehmen u. Platzieren
Greifen		
Bringen	Platzieren	
Fügen		
Loslassen	Aufnehmen	
MTM - Grundverfahren	MTM - Standarddaten / Basiswerte	MTM - UAS / MEK

Durch das Zurückgreifen auf die in der Industrie etablierten Systeme mit vorbestimmten Zeiten, den MTM-Standards mit Normalzeiten, können Arbeitsplätze objektiv zeitlich bewertet und es kann eine Vergleichbarkeit von Gestaltungsalternativen gewährleistet

werden. Zu beachten ist, dass es sich hierbei um Normalzeiten auf Basis der MTM-Normalleistung handelt. Die Normalleistung entspricht der dauerhaften Ausübung einer Tätigkeit ohne Arbeitsermüdung durch eine mittelgut geübte Person. Somit wird ein in der Praxis gemessener Wert stark von der Geschicklichkeit, der Anstrengung und der Gleichmäßigkeit der Ausführung des Mitarbeiters beeinflusst (Bokranz & Landau, 2006; Maynard et al., 1948). Daher sollten auf diese Weise ermittelte Zeitwerte nicht als in der Praxis zu erwartende Absolutwerte betrachtet werden.

2.2.7 Zeitliche Optimierungspotenzialanalysen

Die in Kapitel 2.2.6 beschriebenen Verfahren zur Arbeitszeitermittlung haben sich auf das Erfassen der Plan- und Ist-Zeiten eines Arbeitssystems beschränkt. Die im Folgenden vorgestellte Methode baut hierauf auf und ermöglicht es, das zeitliche Optimierungspotenzial sowie den damit verbundenen wirtschaftlichen Wirkungsgrad eines Montagearbeitsplatzes auszuweisen.

Primär-Sekundär-Analyse nach Lotter

Die Distanz, die ein Mitarbeiter zum Bauteil und von der Aufnahmestelle zum Fügeobjekt überbrücken muss, sowie die Art der Materialbereitstellung beeinflussen die Bewegung und damit die Montagezeit des Mitarbeiters erheblich (Schmidt, 2022). Die Primär-Sekundär-Analyse (PSA) knüpft hier an und dient zur Quantifizierung des vorliegenden Rationalisierungs- und Optimierungspotenziales eines Montagesystems. Die Analyse teilt die einzelnen Montagevorgänge ein in wertschöpfende Tätigkeiten, die Primärvorgänge (PV), sowie in nicht wertschöpfende Vorgänge, die Sekundärvorgänge (SV), und bewertet diese zeitlich. (Lotter, 2012) Die zeitliche Bewertung erfolgt hierbei mittels MTM-Prozessbausteinen, durch die manuelle Tätigkeiten in ihre Grundbewegungen zerlegt werden und jeder Grundbewegung ein aus Tabellen ablesbarer vorbestimmter Normalzeitwert zugewiesen werden kann (Konold & Reger, 2003). Die Bewertung der PV und SV erfolgt bei der Feinanalyse für die Serienmontage nach dem MTM-UAS-System (universelles Analyzersystem) mit dessen fünf Grundbewegungen Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen (Lotter, 2012). Durch die MTM-gestützte Prozessbeschreibung können die Prozessschritte im Detail sichtbar und bewertbar gemacht werden. Dies führt zu einer Reduzierung der Komplexität und damit zur Beherrsch- sowie Nutzbarkeit der Prozessanalyse. (Britzke, 2010)

Durch die Formel (2-1), die die Summe der PV ins Verhältnis zur Summe der PV und SV setzt, lässt sich der wirtschaftliche Wirkungsgrad W_M des Montagearbeitsplatzes ermitteln. Der so festgestellte wirtschaftliche Wirkungsgrad eines Montagesystems gibt einerseits Aufschluss über dessen Effizienz und macht andererseits durch die Reduzierung des Anteiles an SV vorhandenes Optimierungspotenzial erkennbar. (Lotter, 2012)

$$W_M = \frac{\sum PV}{\sum PV + \sum SV} \cdot 100[\%] \quad (2-1)$$

Nachfolgend werden die Einteilung in PV und SV der fünf Grundbewegungen sowie die Ermittlung der Grenzwerte zwischen PV und SV für Distanzen nach Lotter (2012) genauer dargestellt.

Grenzwert zwischen PV und SV für Distanzen

Der Aufwand der Montage eines Fügebauteils hängt stark ab von der zu überbrückenden Distanz zwischen Fügeposition und Greifposition. Daher ist die Frage zu klären, welche Distanz vom Mitarbeiter überbrückt werden muss, um zum Fügebauteil zu gelangen, und welche Distanz er nach dem Greifen überbrücken muss, um dieses zur Fügestelle zu bringen. Die Entfernung ist abhängig von der Größe des Füge- und Basisbauteils sowie von der Gestaltung des Arbeitsplatzes. Somit gibt es einen für den Arbeitsplatz optimalen Punkt für die Materialbereitstellung, der als **Grenzwert** gilt. Alle zu überbrückenden Distanzen, die innerhalb des Grenzwertes liegen, gelten als PV, Bewegungen, die über diesen Grenzwert hinaus gehen, gelten als SV.

PV und SV der fünf Grundbewegungen

Unter **Hinlangen** wird der Aufwand für die Bewegung zwischen der Fügeposition und der Greifposition des Fügebauteils verstanden. In der MTM-Analyse werden die Bewegungsfälle A-E nach ihrem unterschiedlichen Kontrollaufwand unterteilt. Der zu bewertende Aufwand für das Hinlangen ist somit abhängig von der zu überbrückenden Distanz sowie vom Kontrollaufwand. Alle über den für den Analysefall definierten Grenzwerte hinausgehenden zu überbrückenden Distanzen und jegliche Kontrollaufwände sind SV.

Das **Greifen** und somit Aufnehmen des Fügebauteils gelten als PV. Entstehen zusätzliche Aufwände durch Nachgreifen etc., sind diese den SV zuzuordnen.

Als **Bringen** wird der Aufwand für die Überbrückung der Distanz zwischen Greifposition und Fügeposition bezeichnet. Hierbei gilt, wie beim Hinlangen, der Aufwand bis zum definierten Grenzwert als PV, jegliche Distanzüberbrückung hierüber hinaus wird den SV zugeordnet.

Das **Fügen** selbst wird in der PSA prinzipiell als PV betrachtet.

Da das **Loslassen** von allen Grundbewegungen den mit Abstand geringsten Aufwand mit sich bringt, gilt zur Vereinfachung der Analyse diese als PV. Fallen nach dem Loslassen Ruhezeiten an, gelten diese als SV.

Somit lässt sich zusammenfassen, dass jegliche nicht dem Idealzustand entsprechende Distanzüberbrückung sowie jeglicher Kontrollaufwand als Verschwendung gelten und somit den PV zuzuordnen sind.

Fazit

Die von Lotter (2012) entwickelte Methode zur Bestimmung des wirtschaftlichen Wirkungsgrads zeigt transparent Arbeitsplätze auf, die ein zeitliches Optimierungspotenzial bieten. Hierdurch lassen sich Prozessschritte identifizieren, die durch eine Umgestaltung des Arbeitsplatzes oder durch den gezielten Einsatz von Technik den Mitarbeiter bei seiner Arbeit unterstützen. Durch die Anwendung dieser Methode lassen sich die vorliegenden Rationalisierungspotenziale quantitativ eruieren und somit die Plausibilität einer Optimierung sicherstellen.

2.3 Grundlagen der Low-Code-Programmierung

2.3.1 Low-Code-Entwicklungsplattformen

Die Entwicklung und Bereitstellung von Software sind traditionell durch langwierige, starre und aufwendige Vorgänge geprägt, wodurch sich die Digitalisierung in Unternehmen als umfangreicher zeitlicher, kostenintensiver und Ressourcen bindender Prozess darstellt. Zusätzliche Schwierigkeiten entstehen durch den wachsenden IT-Fachkräftemangel in Deutschland. (techconsult GmbH, smapOne AG, 2021) So geben 66 % der befragten Unternehmen an, Schwierigkeiten zu haben, freie Stellen für IT-Fachkräfte zu besetzen (Statistisches Bundesamt, 2022). Des Weiteren verschärfen die demografische Entwicklung und die wachsende Nachfrage nach IT-Fachkräften die Situation am IT-Arbeitsmarkt (Bitkom Research, 2022). Um die digitale Transformation dennoch realisieren zu können, müssen agilere Entwicklungsmethoden zur schnelleren, kostengünstigeren und flexibleren Entwicklung von Softwareapplikationen bereitgestellt werden. (techconsult GmbH, smapOne AG, 2021)

Eine Schlüsseltechnologie zur Lösung dieses Konfliktes sind Programmiersprachen der vierten Generation (4GL), die sich durch ein hohes Maß an Interaktivität zwischen Mensch und Computer auszeichnen. Diese Sprachen helfen, den Programmierprozess zu vereinfachen, indem der Entwickler lediglich aufgefordert wird, benötigte Ergebnisse zu beschreiben, ohne dies codieren zu müssen. (Kahanwal, 2013) Die 4GL kommen in Low-code development platforms (LCDP) zum Einsatz. Bei einer LCDP handelt es sich um eine Entwicklungsumgebung mit Designwerkzeugen, mit deren Hilfe es ermöglicht wird, ein Programm grafisch darzustellen, ohne dabei auf klassische Programmiersprachen zurückzugreifen. Bei Low-Code-Softwareentwicklungsansätzen sind wenige bis keine Codierungen erforderlich. Die Entwicklungsplattformen verwenden visuelle Oberflächen mit simplen Logiken, verbunden mit vorkonfektionierten Drag-and-Drop-Funktionen. Dies ermöglicht sowohl professionellen Entwicklern als auch Anwendern ohne detaillierte Programmierkenntnisse, Anwendungen für unterschiedliche Businesszwecke zu realisieren. (techconsult GmbH, smapOne AG, 2021) Somit lassen sich durch die Low-Code-Programmierung selbst mit keiner oder nur geringer Softwareentwicklungserfahrung schnell und effizient Geschäftsanwendungen entwickeln und bereitstellen. (Waszkowski, 2019) Zusätzlich können die entwickelten Anwendungen problemlos mehrkanalig unter anderem als Portal, Browseranwendung oder als mobile Form umgesetzt werden (Doheny & Matchett, 2022).

Eine von techconsult durchgeführte Studie (techconsult GmbH, smapOne AG, 2021) zeigt, dass sich bereits 78 % aller Unternehmen mit dem Thema Low-Code-/No-Code-Entwicklung beschäftigen. Hierbei sind entsprechende Plattformen entweder bereits Bestandteil der Softwareentwicklung, innerhalb der nächsten Jahre geplant oder werden als

Alternativen zur bestehenden Softwareentwicklung in Betracht gezogen. Als Vorteile gelten vor allem hohe Flexibilität und Skalierbarkeit der Applikationen, die Erhöhung der digitalen Kompetenz im Unternehmen, die Sicherstellung einer hohen User-Experience, die Effizienzsteigerung durch schnellere Digitalisierungsumsetzung sowie die Kostenreduktion.

Somit ermöglichen Low-Code-Lösungen ungelernten Anwendern, Applikationen zu entwickeln, Prozesse zu digitalisieren, Arbeiten zu automatisieren und Prozesse zu optimieren. Durch den Verzicht auf professionelle Softwareentwickler lassen sich Softwareentwicklungszeiten und damit Kosten reduzieren. (techconsult GmbH, smapOne AG, 2021)

2.3.2 Microsoft Power Apps

Im Folgenden wird die LCDP der Firma Microsoft vorgestellt, die für die Darstellung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik verwendet wurde. Die Auswahl der Software zur Digitalisierung der Methodik erfolgte auf Basis der bestehenden Softwarearchitektur der ZF Friedrichshafen AG, in der die Arbeit entstand und in der die Validierung durchgeführt wurde.

Die Funktion der 2016 eingeführten Software zielt hauptsächlich auf die Entwicklung spezifischer Applikationen zur Prozessoptimierung und zur Lösung verschiedener Anwendungen in Unternehmen ab, ohne dabei Entwicklerkenntnisse von Mitarbeitern zu fordern. Die Power Platform selbst besteht aus den drei Anwendungen Microsoft Power Automate, Power BI und Power Apps, wobei das Hauptaugenmerk im Folgenden auf Letzteres gelegt wird. (IOZ AG, 2021)

Tabelle 2-2: Architektonische Schichten von LCDP in Anlehnung an (Sahay et al., 2020)

Schicht	Bezeichnung	
1	Application Layer	(Anwendungsebene)
2	Service Integration Layer	(Dienstintegrationsschicht)
3	Data Integration Layer	(Datenintegrationsschicht)
4	Deployment Layer	(Bereitstellungsschicht)

Aus architektonischer Sicht bestehen LCDP aus vier Hauptschichten (siehe *Tabelle 2-2*). Bei der obersten Schicht handelt es sich um die Anwenderschicht, in der der Benutzer in einer grafischen Umgebung die Anwendung durch den Einsatz von Toolboxen und Widgets gestaltet. Zusätzlich lassen sich externe Datenquellen verbinden und durch die zweite Schicht, die Service-Integrationsschicht, aus externen Quellen importieren. Durch die dritte Schicht, die Daten-Integrationsschicht, lassen sich Daten einheitlich bearbeiten, auch wenn diese aus heterogenen Quellen stammen. In der Bereitstellungsebene, der untersten

Schicht, erfolgt die Bereitstellung des Services auf speziellen kompatiblen Cloud-Infrastrukturen. (Sahay et al., 2020)

Um die Vorteile durch den Einsatz von Premium-Funktionen der Microsoft Power Platform zu vermitteln, wurde das amerikanische Marktforschungsunternehmen Forrester Research (2022) von Microsoft mit der Durchführung einer Studie beauftragt. Durch die Befragung von aktuellen Kunden konnte Forrester ein repräsentatives Bild einer Organisation erstellen, das ein globales Unternehmen mit einem Jahresumsatz von 3 Milliarden US-Dollar und 10 000 Mitarbeitern repräsentiert. Die Studie macht deutlich, dass die Kosten für IT-Anwendungsentwicklungen in dem beispielhaften Unternehmen um 45 % gesenkt werden konnten. Als weiterer Vorteil zeigte sich die höhere Skalierbarkeit von Low-Code-Lösungen in Unternehmen. Die Verwendung trägt zur Zunahme der Wiederverwendbarkeit der Codes und der Skalierung von Governance- und Sicherheitsverfahren bei. Das liegt daran, dass durch die Microsoft Power Platform Zugang zu Microsoft Data-verse hergestellt wird, mit dem es möglich ist, das Datenmanagement und die Datenverwaltung zu vereinfachen. Ein weiteres Plus ist die Nutzung durch Citizen Developers. Bei diesen Mitarbeitern handelt es sich um Personen, die nur wenig Erfahrung im professionellen Programmieren besitzen, jedoch ausreichend technisches Verständnis für Low-Code-Software haben. Dies wurde erst durch den Zugriff von Data-verse ermöglicht, da zuvor ein sicheres und effizientes Offenlegen von Daten nur begrenzt möglich war. Daher mussten zahlreiche Anwendungsentwicklungen ausschließlich den IT-Abteilungen überlassen werden. Diese Blockade konnte durch Data-verse gelöst werden, wodurch nun auch Citizen Developers die Chance haben, etwaige Anwendungen zu entwickeln. (Forrester Research, 2022)

Sowohl aufgrund der Vorteile, die in der beschriebenen Studie dargestellt werden, wie die unkomplizierte Erlernbarkeit, die problemlose Programmierung der Verknüpfung beliebiger Datenquellen als auch aufgrund der Kosteneffizienz sowie der Verfügbarkeit der Software in dem Unternehmen, in dem diese Arbeit entstand, wurde die entwickelte Methodik innerhalb der Microsoft Platform als Power App umgesetzt.

2.4 Grundlagen der Robotik

In modernen Produktionssystemen nehmen Industrieroboter eine bedeutende, häufig zentrale Rolle ein. Durch die Möglichkeit, diese Handhabungsgeräte frei zu programmieren, bieten sie ein hohes Maß an Flexibilität und können somit für unterschiedliche Aufgaben wie Werkstücke bewegen, bearbeiten, lackieren oder für Prüfaufgaben eingesetzt werden. (Warnecke, 1996)

2.4.1 Kinematische Strukturen von Industrierobotern

Im Prinzip kann ein Industrieroboter als eine Aneinanderreihung von Gliedern betrachtet werden, die durch Gelenke beweglich miteinander verbunden sind. Hierbei unterscheiden sich diese hauptsächlich durch die Art und Anordnung der verwendeten Gelenke. Diese können als Drehgelenke zur Ausführung von Rotationsbewegungen, als Schubgelenke zur Ausführung von Linearbewegungen oder hybrid aus einer Kombination beider realisiert werden. Aus der realisierten Kombination von Gliedern und Gelenkarten ergibt sich der Arbeitsraum des Robotersystems. *Abbildung 2-11* stellt typische Realisierungen mit den sich daraus ergebenden Arbeitsräumen dar. (Mareczek, 2020)

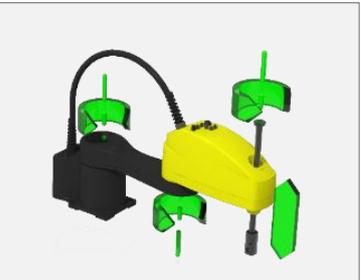
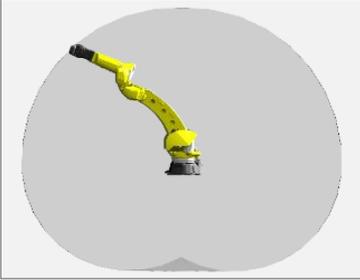
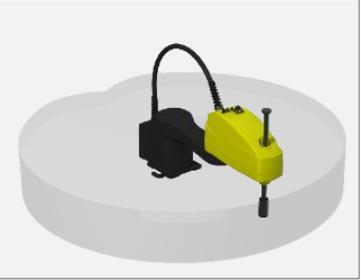
	Rotatorisch	Linear	Hybrid
	Knickarmroboter	kartesisches Portal	SCARA
Gelenkarten			
Arbeitsraum			

Abbildung 2-11: Typische Realisierungen von frei programmierbaren Handhabungsgeräten

Des Weiteren lassen sich Industrieroboter anhand des Aufbaus ihrer kinematischen Ketten unterscheiden. Roboter mit parallelen Strukturen zeichnen sich durch geschlossene kinematische Ketten aus. Offene kinematische Ketten sind am häufigsten verbreitet und kommen bei seriellen Strukturen von klassischen 6-Achs-Industrierobotern (Vertikal-

Knickarmroboter) zum Einsatz. Kombinationen aus seriellen und parallelen Kinematiken werden als hybride Strukturen bezeichnet. Im Folgenden werden nur noch serielle Strukturen betrachtet, da diese für die Umsetzung dieser Arbeit relevant sind.

Die kinematische Struktur eines seriellen 6-Achs-Industrieroboters lässt sich in die Regional- sowie Lokalstruktur unterteilen (Abbildung 2-12). Hierbei haben die Hauptachsen 1-3 (J1-J3) die Funktion, den Tool-Center-Point (TCP) im Raum zu positionieren; sie werden als Regionalstruktur bezeichnet. Die Nebenachsen 4-6 (J4-J6) stellen die Lokalstruktur dar und dienen zur Orientierung des TCP im Raum. (Mareczek, 2020; Weber & Koch, 2022)

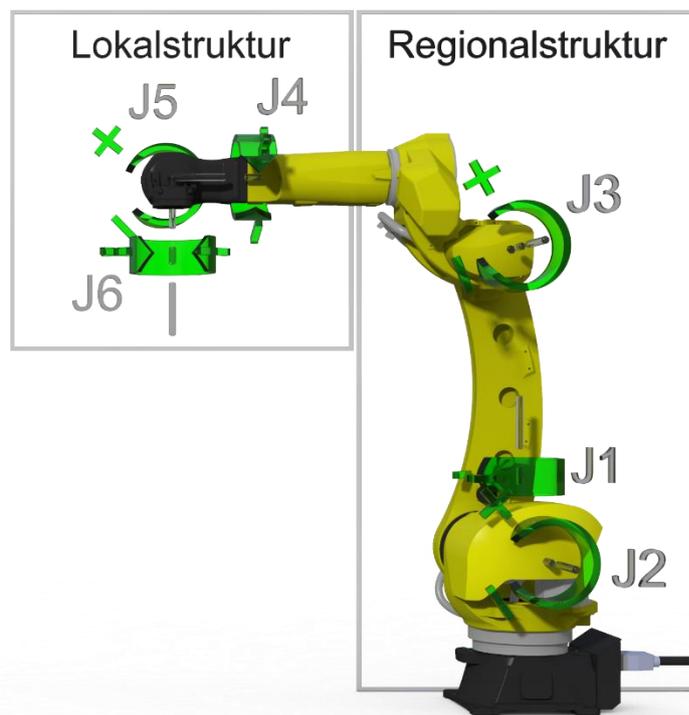


Abbildung 2-12: Struktureinteilung und Achsen eines Knickarmroboters

Für die Lokalstruktur werden meist Bauformen gewählt, bei denen sich alle drei Nebenachsen in einem Punkt schneiden. Diese Bauform wird als Zentralhand (Abbildung 2-13, links) bezeichnet und bietet mathematische Vorteile bei der Rückwärtstransformation. Um das Schneiden der Achsen in einem Punkt zu ermöglichen, sind jedoch aufwendige getriebetechnische Anordnungen nötig. Mit dem steigenden Aufkommen an MRK-Robotern (Bach, 2021; Bill et al., 2022), bei denen sich die Lokalstruktur durch eine Winkelhand (Abbildung 2-13, rechts) auszeichnet, wächst die Bedeutung dieser Bauform. Hierbei werden seriell verbaute Motorgetriebeeinheiten verwendet, die es bauraumbedingt nicht ermöglichen, dass sich alle drei Nebenachsen in einem Punkt schneiden können.

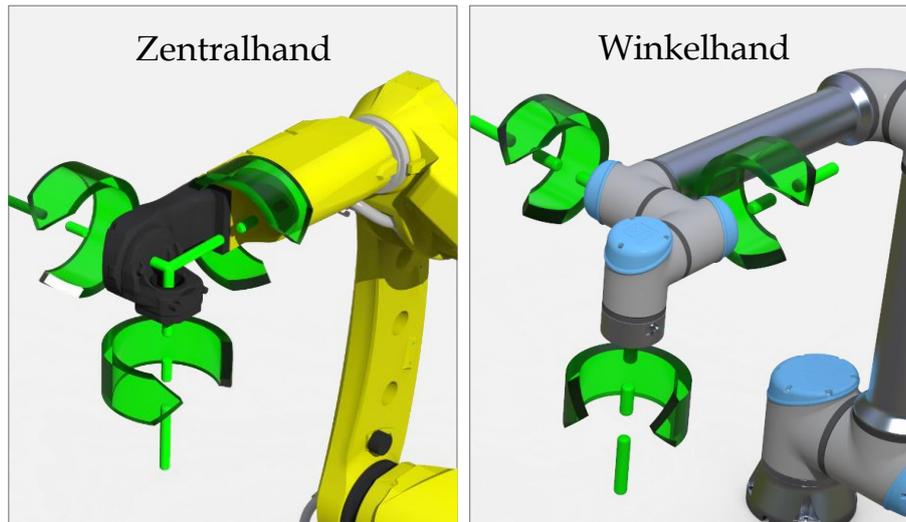


Abbildung 2-13: Bauarten von Lokalstrukturen

2.4.2 Endeffektor

Der Endeffektor, der ausgehend von der Roboterbasis an der entferntesten Stelle der kinematischen Kette angebracht wird, befähigt diesen erst zum Ausführen der gewünschten Tätigkeit. Hierbei dient der Industrieroboter zur Positionierung und Orientierung des Endeffektors in der gewünschten Arbeitsposition. Je nach zu erfüllender Aufgabe können Werkzeuge zum Bearbeiten von Werkstücken, Greifer zum Handling von Bauteilen sowie Prüfmittel zur Durchführung von Prüf- und Messaufgaben angebracht werden. *Abbildung 2-14* stellt die Einteilung von Endeffektoren dar und gibt Beispiele der entsprechenden Gruppen. (Hesse, 2011)

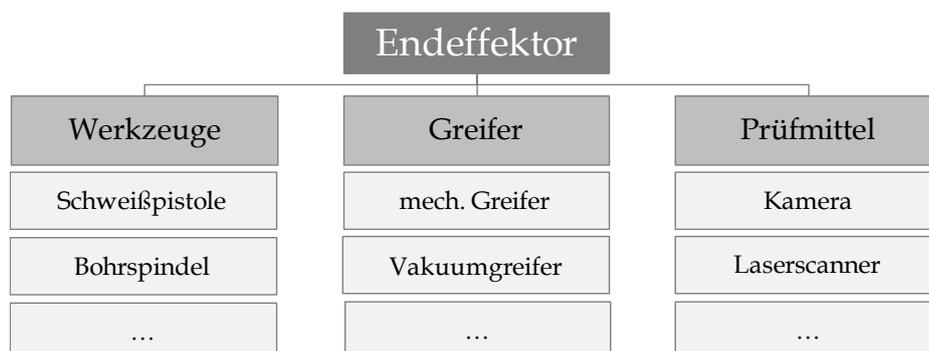


Abbildung 2-14: Einteilung von Endeffektoren

Greifer sind die in der Montagetechnik häufig verwendeten Endeffektoren, da diese das zu fügende Bauteil temporär in der geforderten Lage halten oder es in diese bringen können. Hierbei ist das Greifsystem im direkten Kontakt mit dem zu handhabenden Werkstück und bildet somit die Schnittstelle zwischen Roboter und Bauteil. Um eine sichere Verbindung zwischen Greifer und Werkstück herzustellen, wird sich der physikalischen Wirkprinzipien des Haltens durch Kraft-, Stoff- oder Formschluss bedient. Einen

erheblichen Einfluss auf die Auswahl des geeigneten Greifsystems haben Werkstückeigenschaften wie Material, Geometrie oder Gewicht. Jedoch auch der spätere Anwendungsfall ist für die Auswahl des geeigneten Greifsystems entscheidend. So spielt die Verletzungsvorbeugung bei Greifsystemen für MRK-Anwendungen eine zentrale Rolle. Um bei Kollisionen mit dem Menschen das Risiko einer Verletzung möglichst gering zu halten, werden diese konstruktiv stark verrundet sowie häufig mit dämpfenden Elementen ausgestattet. Des Weiteren werden diese kraft- und leistungsreduziert konstruiert oder die auftretenden Kräfte werden durch integrierte Sensorik überwacht und geregelt. (Hesse, 2011; Müller et al., 2019)

Um den Endeffektor noch weiter zu befähigen, kann dieser um Zusatzmodule ergänzt werden. Diese werden zwischen Roboterflansch und eigentlichem Endeffektor angebracht, um unter anderem Kollisionen zu erkennen und den Roboter so vor Beschädigungen zu schützen, das schnelle Wechseln von Endeffektoren zu ermöglichen oder mechanische Winkel- und Positionsausgleiche zu realisieren. Zur Überwachung und Regelung von Prüf- oder Montagoperationen finden Kraft-Momenten-Sensoren häufig Anwendung. Diese ermitteln die auftretenden Prozesskräfte in mehreren Freiheitsgraden und übertragen diese an die Steuerung.

Die *Abbildung 2-15* veranschaulicht einen typischen Greiferaufbau, bei dem ein Standardparallelgreifersystem mit individuellen Greifbacken und einem manuellen Wechselsystem kombiniert wird.

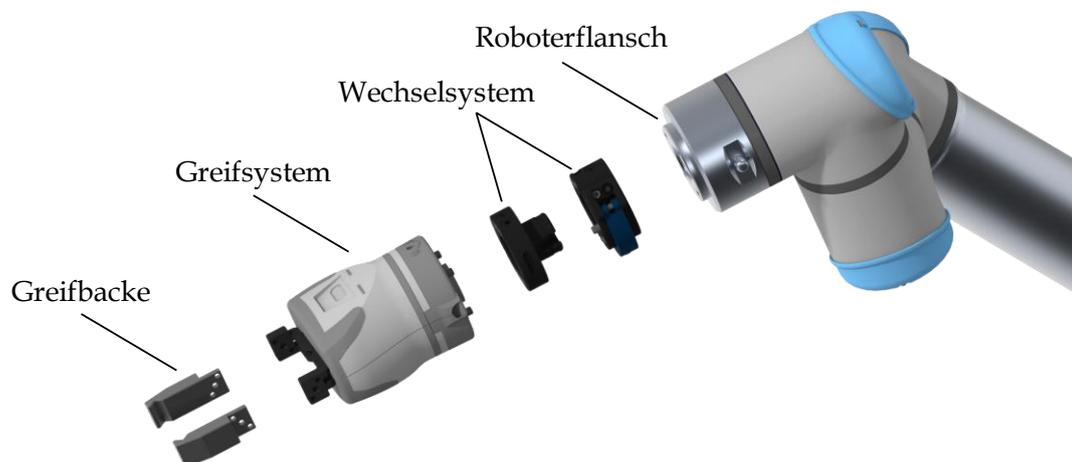


Abbildung 2-15: Aufbau Greifsystem

2.4.3 Grundlagen der Mensch-Roboter-Kollaboration

Einen wachsenden Anteil an Industrierobotern stellen MRK-fähige Robotersysteme dar (Bach, 2021; Bill et al., 2022). Diese sind neben den klassischen Industrierobotern als ein Teil der industriellen Robotik zu sehen und zeichnen sich aus durch besondere

sicherheitstechnische Vorkehrungen, eine intuitive Bedienoberfläche sowie zusätzliche Sensorik.

Die spezielle sicherheitstechnische Konzeptionierung MRK-fähiger Roboter ermöglicht ihnen eine direkte Zusammenarbeit mit dem Menschen. Durch diese Eigenschaft finden sie einen verstärkten Einzug in der Fabrikautomation und werden sowohl in der direkten MRK als auch zur flexiblen und kostengünstigen Automatisierung ohne direkten Kontakt mit dem Menschen eingesetzt. Hierfür werden von den Herstellern unterschiedliche Absicherungsprinzipien verfolgt. (Elkmann, 2013; Glück, 2022)

Zu diesen zählen konstruktive Maßnahmen wie leichtere Bauweisen, um die bewegten Massen sowie die daraus resultierenden Kräfte und Momente möglichst stark zu reduzieren, sowie die verletzungsminimierende Gestaltung durch Oberflächenverrundungen und dem weitest möglichen Wegfall von Stoß- und Scherkanten. Durch Verwenden von integrierter Sensorik lassen sich auftretende Kräfte begrenzen und im Kollisionsfall eine Abschaltung realisieren. Zudem werden Ansätze verfolgt, bei denen die Roboteroberflächen mit Sensorhäuten überzogen werden, durch die der Roboter bereits bei Annäherung ohne einen direkten Kontakt bzw. eine Kollision zum Stillstand gebracht werden kann. (Buxbaum & Kleutges, 2020; Glück, 2022)

Durch den Einsatz von MRK-fähigen Robotersystemen ergeben sich neue Möglichkeiten der Arbeitsplatzgestaltung. Diese reichen von der Koexistenz bis hin zur MRK. Durch die Zusammenarbeit entsteht neben den klassisch getrennten Arbeitsräumen des Roboters und des Menschen ein weiterer Arbeitsraum, der von beiden Arbeitspartnern genutzte gemeinsame Arbeitsraum (vgl. *Abbildung 2-16*). (Bauer et al., 2016)

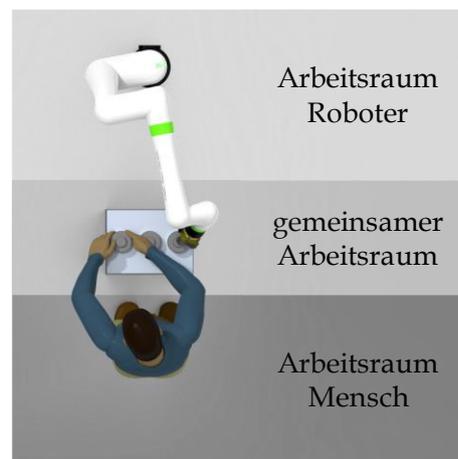


Abbildung 2-16: Arbeitsräume von Mensch und Roboter

Nachfolgend werden die möglichen Formen der Arbeitsplatzgestaltung sowie der Interaktion zwischen Mensch und Roboter beschrieben sowie in *Abbildung 2-17* dargestellt.

Konventionell: MRK-fähige Robotersysteme können wie klassische Industrieroboter betrieben werden, indem der Arbeitsraum durch zusätzliche Sicherheitseinrichtungen von dem des Menschen getrennt wird. Hierdurch wird sichergestellt, dass keine Berührung zwischen Mensch und Roboter im Betrieb erfolgen kann.

Mensch-Roboter-Koexistenz: Bei einer Koexistenz haben sowohl Mensch als auch Roboter einen eigenen Arbeitsraum sowie getrennte Arbeitsinhalte. Die Arbeitsräume sind sicherheitstechnisch nicht voneinander getrennt, wodurch eine Berührung zwischen Mensch und Roboter jederzeit möglich ist. Aufgrund der getrennten Arbeitsinhalte ist dies jedoch nicht notwendig.

Mensch-Roboter-Synchronisierung: Bei einer synchronisierten Arbeitsweise gibt es einen gemeinsamen Arbeitsraum von Mensch und Roboter. Jedoch ist die Arbeitsreihenfolge so aufgeteilt, dass sich immer nur einer der beiden Arbeitspartner im Arbeitsraum befindet.

Mensch-Roboter-Kooperation: Bei der Kooperation zwischen Mensch und Roboter haben diese einen gemeinsamen Arbeitsraum und eine gemeinsame zu verrichtende Tätigkeit. Jedoch ist keine Berührung der beiden Arbeitspartner untereinander erforderlich. Die Arbeitsreihenfolge wird so definiert, dass die zu verrichtenden Tätigkeiten nie gleichzeitig am selben Montageobjekt erfolgen.

Mensch-Roboter-Kollaboration: Die Kollaboration stellt die höchste Form der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter dar. Hierbei erfolgt die zu verrichtende Tätigkeit gleichzeitig im gemeinsamen Arbeitsraum und am gemeinsamen Montageobjekt. (Bauer et al., 2016; Kluy et al., 2022)

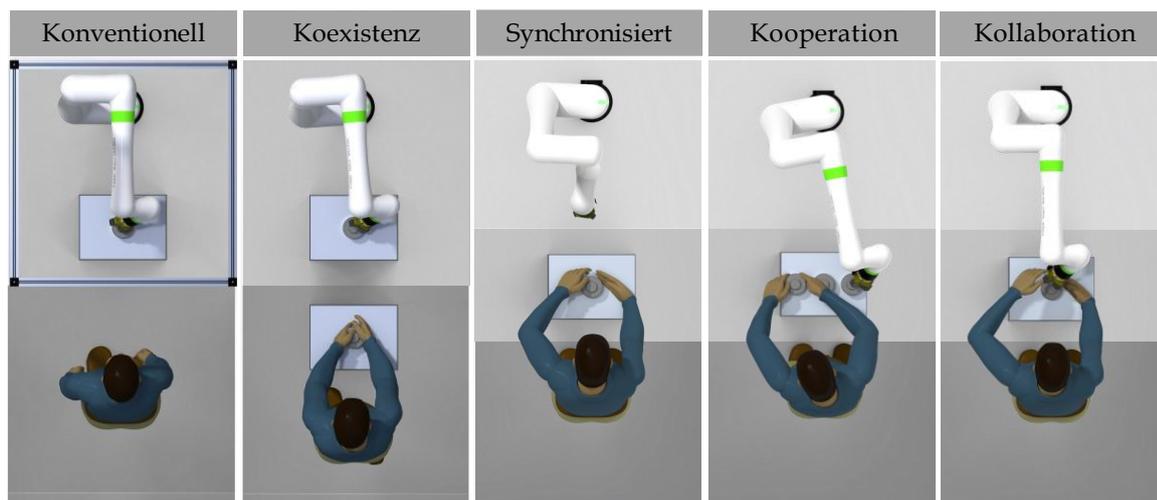


Abbildung 2-17: Mensch-Roboter Interaktionsgrad in Anlehnung an (Bauer et al., 2016)

Eine schwedische Studie mit 78 Teilnehmern, durchgeführt von Salunkhe et al. (2023), untersuchte den aktuellen und geplanten Einsatz von MRK-fähigen Robotersystemen von

KMU bis hin zu OEM. Die Teilnehmer wurden nach bereits umgesetzten MRK-Anwendungen und deren Interaktionsgrad befragt. Es zeigte sich, dass die meisten Anwendungen in einer Mensch-Roboter-Koexistenz (12 %) oder synchronisiert (8 %) realisiert wurden. Ein geringer Anteil der Befragten gab an, MRK-fähige Robotersysteme konventionell (3 %) oder in einer Kooperation (3 %) zu betreiben. Keiner der Befragten machte die Angabe, Anwendungen in der höchsten Interaktionsform, der Kollaboration, bereits implementiert zu haben.

In der DIN EN ISO 10218 werden vier unterschiedliche Sicherheitsprinzipien definiert, mit denen Robotersysteme ausgestattet sein können, um einen schutzzaunlosen Betrieb zu ermöglichen. Im Folgenden werden diese in Anlehnung an die Norm beschrieben und in *Abbildung 2-18* dargestellt.



Abbildung 2-18: Sicherheitsprinzipien von Robotersystemen

Bei der **Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung** ist es notwendig, einen definierten Mindestabstand zwischen Roboter und Mitarbeiter bei entsprechenden Geschwindigkeiten einzuhalten. Die Unterschreitung des geforderten Mindestabstandes muss zum sofortigen Stoppen der Bewegungen des Roboters führen.

Beim **sicherheitsbewerteten überwachten Halt** muss die Bewegung des Roboters gestoppt werden, wenn eine Person den Schutzbereich betritt. Wenn die Person den überwachten Raum verlässt, kann ein automatischer Wiederanlauf des Robotersystems erfolgen.

Die **Handführung** eines Roboters ist durch das Betätigen einer Zustimmungsrückmeldung nahe dem Endeffektor durch den Mitarbeiter möglich. Die Bewegung des Roboters muss mit sicherheitsbewerteten überwachten reduzierten Geschwindigkeiten erfolgen. Bei der Handführung werden die Bewegungen des Mitarbeiters am Endeffektor in Steuersignale des Roboters umgewandelt.

Durch die **Leistungs- und Kraftbegrenzung** des Roboters ist es erforderlich, dass er bei der Überschreitung von Grenzwerten einen Sicherheitshalt auslöst. Des Weiteren muss durch steuerungstechnische Maßnahmen sowie das Design (Roboter mit Endeffektor und

ggf. Werkstück) ein Schaden von Personen beim Kontakt mit dem Roboter sicher verhindert werden. In der DIN ISO/TS 15066 sind die im Falle eines Kontaktes zwischen Mensch und Roboter maximal zulässigen biomechanischen Grenzwerte definiert. Diese werden als quantitative Höchstwerte von Druck und Kraft für den quasistatischen sowie transienten Kontakt der entsprechenden Körperregionen angegeben. (DIN ISO/TS 15066:2017-04, 2017; DIN EN ISO 10218-1:2021-09, 2021)

2.5 Fazit zu den Grundlagen

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen des Betrachtungsbereiches näher beleuchtet, um ein Verständnis für die im Folgenden behandelten Themengebiete herzustellen. Zu Beginn wurden die Montagetechnik mit ihren Aufgaben und die unterschiedlichen Arten von manuell über hybrid bis hin zu voll automatisiert erläutert. Des Weiteren wurde die für die Montage essenziell bedeutende montagegerechte Produktgestaltung und deren Auswirkung auf den Montageprozess dargelegt. *Kapitel 2.2* befasste sich mit der Betrachtungsebene dieser Arbeit, dem Einzelarbeitsplatz; des Weiteren wurden die Grundlagen der Arbeitsprozess- und Arbeitsplatzgestaltung mit den Verfahren der Arbeitszeitermittlung behandelt. Außerdem wurde im Speziellen auf die zu berücksichtigenden maschinensicherheitstechnischen Aspekte sowie die Mensch-Technik-Interaktion am Arbeitsplatz eingegangen. Zusätzlich wurden die sich durch die Low-Code-Programmierung ergebenden Möglichkeiten zur Einbettung der Gesamtmethodik in eine Softwareumgebung dargelegt. Da für hybride Arbeitsplätze der Einsatz von MRK-fähigen Robotersystemen kontinuierlich an Bedeutung gewinnt, wurden die Grundlagen der Robotik und im Speziellen der MRK abschließend näher erläutert.

In *Kapitel 3* werden bestehende Ansätze zur methodischen Gestaltung hybrider Montagesysteme erklärt, gegenübergestellt und entsprechend ihrem Erfüllungsgrad hinsichtlich der in dieser Arbeit gestellten Forschungsfragen bewertet.

3 Bestehende Ansätze der methodischen Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen

In diesem Kapitel werden die für die Arbeit relevanten bestehenden Ansätze des Standes der Forschung vorgestellt und eingeordnet. Beginnend werden in *Kapitel 3.1* relevante allgemeinen Planungssystematiken der Literatur betrachtet und deren Fokus der Arbeitsplatzgestaltung bewertet. Im Weiteren werden in *Kapitel 3.2* spezifische Ansätze der Aufgabenallokation hybrider Arbeitsplätze analysiert. *Kapitel 3.3* befasst sich mit bestehenden Ansätzen der Automatisierbarkeitsbewertung von Montageprozessen. Abschließend werden in *Kapitel 3.4* die analysierten Ansätze reflektiert und der Entwicklungsbedarf wird aufgezeigt.

3.1 Allgemeine Planungsmethoden zur Montagesystemgestaltung

Zur Gestaltung von Prozessen im Produktionsumfeld existieren unterschiedliche Planungssystematiken und -methoden, die in diesem Kapitel bezüglich ihres Aufbaues und der Eignung zur Konzeptionierung sowie Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen näher analysiert werden.

3.1.1 REFA-Planungssystematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme

Eine etablierte Methode zur Planung von Produktionssystem stellt die REFA-Planungssystematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme dar (siehe *Abbildung 3-1*). Diese baut inhaltlich auf der 6-Stufen-Methode der Systemgestaltung und dem REFA-Standardprogramm „Planung und Steuerung“ auf. Die Planungssystematik dient als verfahrens- und anlagenneutraler Leitfaden, der unabhängig von der Betrachtungsebene anwendbar ist. So lässt sich diese Planungssystematik sowohl auf den gesamten Herstellprozess eines Produktionssystems als auch losgelöst für die Fertigung oder die Montage anwenden. Die sechsstufige Planungssystematik ist so konzipiert, dass in jeder durchzuführenden Planungsstufe verschiedene Analyse- und Konzeptionsaufgaben durchzuführen sind. Um die nächste Planungsstufe zu erreichen, müssen Entscheidungsphasen der vorangegangenen Planungsphase durchlaufen werden. Die von REFA entwickelte Planungssystematik stellt jedoch keinen linearen Prozess dar, sondern erfordert häufig einen iterativen Durchlauf der einzelnen Planungsstufen. Neben der Durchführung beinhaltet die REFA-Planungssystematik eine umfassende Dokumentation der erzielten Analysen, der Planungsergebnisse und der Lösungsvarianten. (REFA, 1987)

Planungsstufe 1	
Analyse Ausgangssituation	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planungsanstoß ▪ Planungsverantwortliche bestimmen ▪ Situationsanalyse durchführen
Planungsstufe 2	
Konkretisierung Planungsaufgabe	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ziele konkretisieren und gewichten ▪ Aufgaben abgrenzen
Planungsstufe 3	
Grobplanung Produktionssystem	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktionsabläufe erarbeiten ▪ Produktionssysteme entwickeln ▪ Lösungsvarianten bewerten und auswählen
Planungsstufe 4	
Feinplanung Produktionssystem	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Teilsysteme detaillieren ▪ Personaleinsatz planen ▪ Realisierungsplan erstellen
Planungsstufe 5	
Systemeinführung	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschaffung veranlassen ▪ Personalschulung durchführen ▪ Produktionssystem installieren ▪ Produktionssystem in Betrieb nehmen
Planungsstufe 6	
Systembetrieb	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systemverhalten analysieren ▪ Abschlussdokumentation erstellen ▪ Erfolgskontrolle durchführen

Abbildung 3-1: Systematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme in
Anlehnung an (REFA, 1987)

Die REFA-Planungssystematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme stellt eine durchgängige Planungsmethodik dar, die alle durchzuführenden Planungsschritte bei der Einführung eines neuen Produktionssystems beinhaltet. Durch die Allgemeingültigkeit der Methodik, unabhängig von der Betrachtungsebene, werden jedoch keine konkreten Lösungsansätze zur gezielten Ausgestaltung von hybriden Arbeitsplätzen und der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Technik gegeben. Es werden lediglich allgemeine Hinweise zur Arbeitsplatzgestaltung sowie zur ergonomischen Gestaltung oder zur Arbeitsstättenverordnung aufgeführt. Die REFA-Planungssystematik beinhaltet zwar eine „Checkliste zur Abschätzung der Automatisierbarkeit von Handhabungsvorgängen“, diese zielt jedoch nicht auf eine Hybridisierung von Arbeitsplätzen ab. Die Checkliste mit ihren elf Kriterien in jeweils drei Ausprägungen legt den Fokus auf die Einschätzung, ob ein Arbeitsplatz sich für eine Automatisierung eignet, bedingt eignet

oder kaum eignet. Ziel ist es hier nicht, einzelne Prozessschritte eines Arbeitsplatzes zu betrachten, sondern den Arbeitsplatz in seiner Gesamtheit.

3.1.2 Schmidt - Montageplanung

Der von Schmidt in dem Buch „Praxisleitfaden Montageplanung“ (Schmidt, 2022) dargestellte Leitfaden zur Montageplanung greift zur systematischen Gestaltung von Arbeitssystemen auf den REFA-Planungsleitfaden (siehe *Kapitel 3.1.1*) zurück. Aus diesem Grund werden die einzelnen Planungsschritte nicht erneut im Detail aufgeführt.

In dem Buch werden in einem separaten Kapitel die REFA-Feinplanung und die Arbeitsplatzgestaltung eingehend behandelt. Es werden zahlreiche Praxisbeispiele für die optimierte Gestaltung von manuellen Arbeitsplätzen angeführt. Des Weiteren werden Gestaltungsregeln für die Arbeit im Nahbereich aufgestellt und erläutert. Hervorzuheben ist die detaillierte grafische Darstellung des Nutzens einer durch den Einsatz von Technik erzielbaren zeitlichen Optimierung durch das Verbessern der Materialbereitstellung sowie durch das Reduzieren von Greifdistanzen. Dies wird beispielhaft durch das Richten und Vereinzeln von Bauteilen mittels Vibrationswendelförderer dargestellt sowie durch MTM-Berechnungen untermauert. Auf die Bewertung der technischen Realisierbarkeit einer möglichen Mitarbeiterunterstützung wird jedoch nicht eingegangen.

3.1.3 Eversheim - Aufgaben bei der Planung der Montage

Die von Eversheim (1987) publizierte Methode zur Montageplanung (siehe *Abbildung 3-2*) konzentriert sich zu Beginn auf die durchzuführende **Montageaufgabe**, die durch die konstruktive Produktgestaltung sowie die geforderte Stückzahl geprägt ist. Im nächsten Schritt der Montageplanung wird ausgehend von der Produktstruktur die **Montagestruktur** festgelegt. Somit wird der Montagebereich der Baugruppen und Unterbaugruppen definiert. Der nächste Planungsschritt befasst sich mit der Planung der **Montagebereiche**. Zunächst erfolgt die Ermittlung der geeigneten Organisationsform sowie des Montageablaufes für die Durchführung der gestellten Montageaufgabe. Anschließend werden in den einzelnen Montagebereichen die benötigten Arbeitsplätze und Montagestationen festgelegt. Aus dieser Festlegung ergeben sich die an den einzelnen Arbeitsplätzen spezifisch durchzuführenden Montagevorgänge. Auf Grundlage des so festgelegten Arbeitsumfanges je Montagestation lässt sich der benötigte Personal- und Betriebsmittelbedarf ermitteln. (Eversheim, 1981)

Eversheim stellt eine Methode zur Planung von Montagesystemen vor, bei der der Schwerpunkt auf der Vorgehensweise zur Bestimmung der geeigneten Organisationsform sowie der Strukturierung der Montagebereiche liegt. Es werden Hinweise zur Auswahl von zweckmäßigen Betriebsmitteln, bezogen auf die geforderten zu montierenden

Stückzahlen pro Jahr gegeben, ohne auf eine konkrete Automatisierbarkeit von Montagevorgängen oder die Konzeptionierung von hybriden Arbeitsplätzen einzugehen.

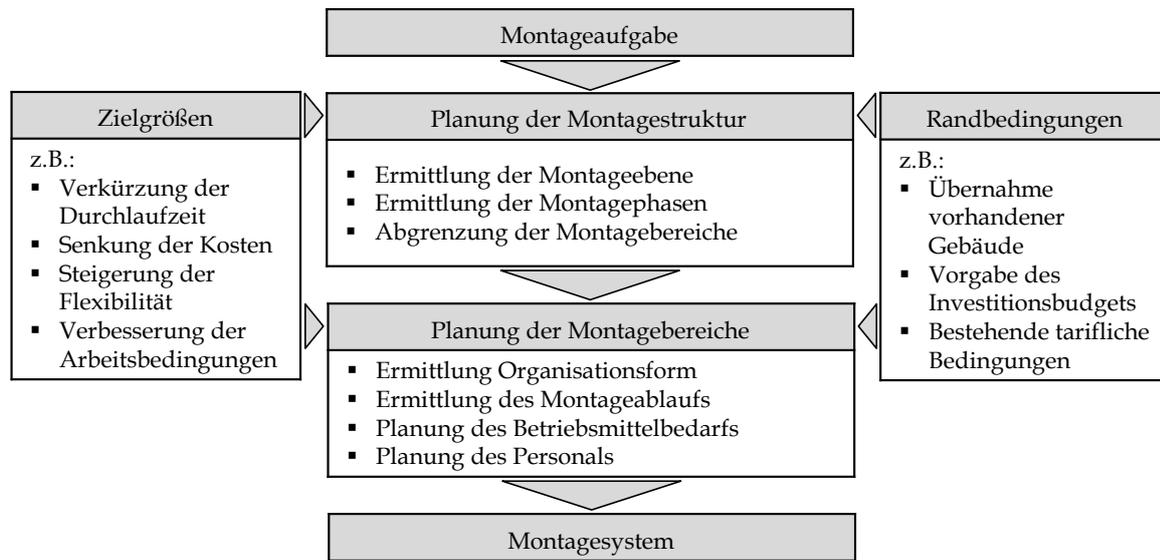


Abbildung 3-2: Aufgaben bei der Planung der Montage in Anlehnung an (Eversheim, 1981)

3.1.4 Bullinger – systematische Montageplanung

Die von Bullinger (Bullinger et al., 1986) vorgestellte systematische Montageplanung definiert sieben Teilaufgaben in Form eines hierarchischen Projektstrukturplanes (siehe *Abbildung 3-3*), die im Rahmen der Montageplanung durch eine Ablauforganisation zu erfüllen sind. Der Projektstrukturplan ist zur Planung von Neuprodukten, Produktänderungen sowie für Rationalisierungsvorhaben anwendbar und wird im Nachfolgenden kurz vorgestellt.

Beginnend werden mit der **Projektorganisation** die Projektleitung und das Projektteam bestimmt. Des Weiteren erfolgen die Grobterminplanung sowie die Erstellung eines Pflichtenheftes zur Dokumentation sämtlicher Anforderungen. In der darauffolgenden **Konzeptionsphase** werden produkt-, produktions- und personalbezogene Daten gesammelt und analysiert, um gemeinsam mit den an der Montageplanung beteiligten Bereichen ein Zielsystem zu definieren. Somit werden bereits in der Konzeption die Planungsziele festgelegt und Prinziplösungen erarbeitet. Ausgehend von der Produktstruktur werden in der **Ablaufplanung** die Montageablaufstrukturen sowie die Arbeitsinhalte definiert. Die Festlegung der Arbeitsinhalte umfasst die Gliederung der in der Montage durchzuführenden Tätigkeiten. Die Montageablaufstruktur stellt die definierten durchzuführenden Tätigkeiten in eine Reihenfolgenbeziehung. Im anschließenden **Montagesystementwurf** erfolgt die Einplanung der durchzuführenden Teilaufgaben der Montage auf die Arbeitsplätze. Des Weiteren werden Prinzipanordnungen konzipiert, die unter anderem Technik, Organisation und Materialbereitstellung berücksichtigen und in Layouts

dargestellt werden. Nach dem Entwurf des Montagesystems erfolgt die konkrete **Ausarbeitung** und Gestaltung der manuellen und automatischen Montagestationen. Diese mündet nach der Freigabe der Planungsergebnisse in der **Realisierung**, bei der die Betriebsmittel beschafft, der Personaleinsatz geplant und die Aufbau- und Anlaufbetreuung erfolgt. Abschließend folgt der **Betrieb** des Montagesystems, indem das Arbeitssystem betreut und Rationalisierungs- sowie Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden. (Bullinger et al., 1986)

1. Projektorganisation	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Projektmanagement ▪ Hilfsmittel der Projektorganisation ▪ Projektplanung ▪ Projektüberwachung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prinzipieller Projektablauf
2. Konzeption	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Planungsdaten ▪ Planungsziele ▪ Prinziplösung ▪ Montagekostenkalkulation 	
3. Ablaufplanung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erzeugnisstrukturierung ▪ Montageablaufstruktur ▪ Daten der Montageablaufstruktur ▪ Kapazitätsteilung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bildung der Arbeitsinhalte
4. Montagesystementwurf	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Technik ▪ Organisation ▪ Prinzipanordnung ▪ Materialbereitstellung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Layout ▪ Auswahl des Montagesystems ▪ Simulation ▪ Einplanung des Produktionsprogrammes
5. Ausarbeitung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Manuelle Montagestationen ▪ Automatische Montagestationen ▪ Überprüfung der Montageplätze 	
6. Realisierung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bereitstellung der Betriebsmittel ▪ Personaleinsatzplanung ▪ Aufbau- und Anlaufbetreuung 	
7. Betrieb	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Controlling ▪ Rationalisierung ▪ Kennzahlen, Problemlösungstechnik 	

Abbildung 3-3: Projektstrukturplan Montageplanung in Anlehnung an (Bullinger et al., 1986)

Die zuvor beschriebene Methodik zur Montagesystemgestaltung bezieht sich vorrangig auf die umfassende Gestaltung kompletter Montagesysteme von der Projektorganisation bis hin zum Betrieb. Daher liegt der von Bullinger gewählte Fokus nicht auf der konkreten Gestaltung von Einzelarbeitsplätzen, sondern auf einer vollumfänglichen Planungshilfe.

Bezogen auf die Einzelarbeitsplatzgestaltung werden im Abschnitt Montagesystementwurf Hilfestellungen in Form von Tabellen zur Auswahl geeigneter Techniken für u. a. Puffersysteme, Transportsysteme oder Materialbereitstellungen gegeben. Im Abschnitt der Ausarbeitung werden Checklisten zur manuellen Arbeitsplatzgestaltung angeführt, ohne jedoch konkret auf die Betriebsmittel- und Arbeitsplatzgestaltung einzugehen. Es erfolgen keine Bewertungen einzelner Prozessschritte bezogen auf ihre Eignung für eine Automatisierung, um Entscheidungshilfen für oder gegen eine Automatisierung zu geben.

3.1.5 Lotter – Planungsrichtlinie für automatische Montageanlagen

Die von Lotter (1986) publizierte elfstufige Planungsrichtlinie (siehe *Abbildung 3-4*) umfasst acht Planungsschritte, die in einem Pflichtenheft zur Festlegung des Montagesystems münden. Die Richtlinie zielt auf die Planung von automatischen Montagesystemen ab, die jedoch auch manuelle Tätigkeiten umfassen können. Im Weiteren werden die acht nötigen Planungsschritte bis hin zur Erstellung des Lastenheftes kurz vorgestellt.

Als Grundlage der systematischen Planung dient eine **Anforderungsliste**, in der Forderungen, wie Produktionsmenge und Produktlebensdauer bezüglich der zu konzipierenden Montageanlage dokumentiert werden. Im anschließenden Planungsschritt wird eine detaillierte **Produktanalyse** durchgeführt. Die Komplexität der Montageanlage wird wesentlich durch das Produkt und dessen Teileanzahl, den Anlieferzustand und dessen Fügeigenschaften mitbestimmt. Auf Basis der Ergebnisse der Produktanalyse werden die anfallenden Kosten für die automatisierte Montage erörtert. Die aus der Produktanalyse gewonnenen Erkenntnisse werden in der **Montageablaufanalyse** eingesetzt; aus dem Produktaufbau und aus den daraus erfolgenden Fügesituationen werden die Fügerangfolgen bestimmt. Auf diese Weise wird aus der Fügerangfolge der Montageablauf festgelegt. In der daran anschließenden **Funktionsanalyse** werden die einzelnen Vorgänge (Ordnen, Zuführen etc.) in ihre Funktionsfolgen gegliedert und ihr Zeitaufwand angesetzt. Im Falle von benötigten manuellen Tätigkeiten sind die Zeitaufwände der Vorgänge durch die Verwendung von Methoden vorbestimmter Zeiten zu ermitteln. Aus der geforderten zu produzierenden Menge und der Nutzungsdauer sowie aus Verfügbarkeit des geplanten Betriebsmittels wird die benötigte **Taktzeit** errechnet. Im nächsten Planungsschritt, der **Layoutplanung**, wird die optimale Anordnung der Montageanlage unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Fläche, des Werkstückflusses und der Materialbereitstellung erarbeitet. Im Anschluss erfolgt die **Personalbedarfsbestimmung** für manuelle Tätigkeiten, die in die Montageanlage integriert sind, sowie für die Anlagenüberwachung. Abschließend wird die Verfügbarkeitsermittlung des automatischen Montagesystems festgestellt, die von Faktoren wie Teilequalität und Anzahl an Stationen stark beeinflusst wird. Aus den Ergebnissen der acht Planungsschritte wird ein Pflichtenheft erstellt, auf dessen Basis Anlagenhersteller angefragt werden können. (Lotter, 1986)

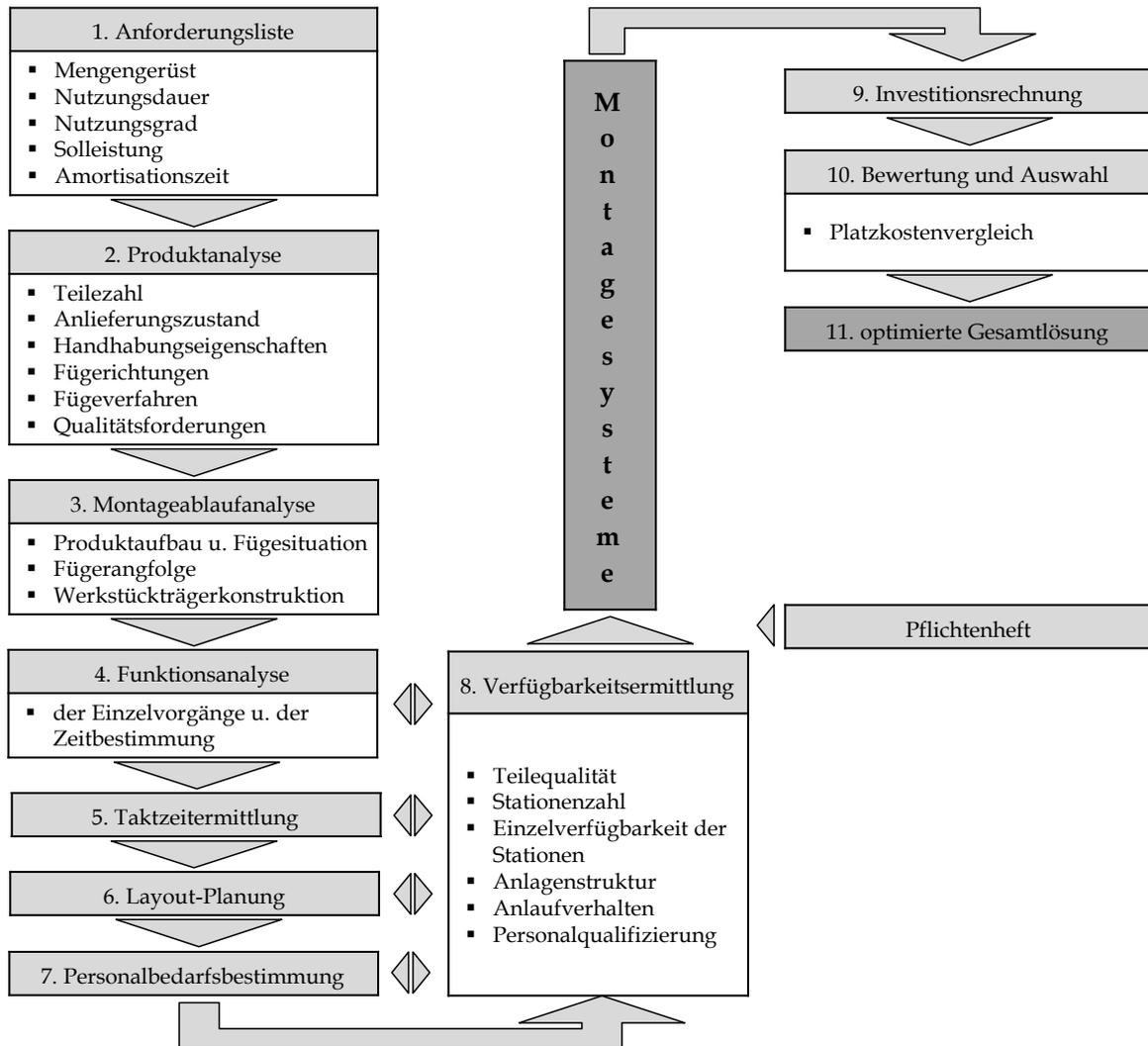


Abbildung 3-4: Planungsrichtlinie für automatische Montageanlagen in Anlehnung an (Lotter, 1986)

Die von Lotter (1986) vorgestellte Planungssystematik für automatische Montageanlagen analysiert systematisch das zu montierende Produkt, um aus dem Produktaufbau und den Fügefällen einen geeigneten Montageablauf abzuleiten. Durch die Anforderungsliste mit den geforderten Stückzahlen und der Taktzeitermittlung werden die Stationen eingeplant und ein Layout sowie ein Pflichtenheft erstellt. Lotter geht in seiner Planungssystematik nicht konkret auf die Ausgestaltung von Einzelarbeitsplätzen ein. Es werden ausschließlich konstruktive Ausführungsbeispiele gegeben. Hinweise zur Integration von manuellen Arbeitsplätzen in einem automatischen Montagesystem werden lediglich im Planungsschritt der Personalbedarfsermittlung gegeben, ohne dass diese jedoch weiter ausgeführt werden.

3.1.6 Konold und Reger - Planungsleitfaden

Der von Konold und Reger (2003) entwickelte Planungsleitfaden zur Planung und Gestaltung eines Montagebereiches ist in fünf Planungsstufen mit jeweils bis zu acht einzelnen durchzuführenden Planungsschritten aufgeteilt (siehe *Abbildung 3-5*). Im Folgenden wird der Planungsleitfaden vorgestellt.

1. Aufgabenstellung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ziele festlegen ▪ Projektverantwortlichen benennen ▪ Terminrahmen vorgeben ▪ Planungsdaten beschaffen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Situationsanalyse durchführen ▪ Aufgaben abgrenzen ▪ verfügbare Hallenfläche vorgeben ▪ zeitlichen Ablauf des Projektes festlegen
2. Grobplanung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Montagesystem-Ausbringung berechnen ▪ Arbeitsabläufe festlegen und Montagestruktur entwickeln ▪ Montageabschnitte bilden ▪ Montagesystem-Alternativen entwickeln ▪ notwendige Hallenfläche ermitteln 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Personalbedarf planen ▪ Lösungsvarianten bewerten und auswählen ▪ Projektkalkulation und Wirtschaftlichkeitsrechnung durchführen
3. Feinplanung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Gesamt- u. Teilsysteme im Detail ausarbeiten ▪ Terminplan erstellen ▪ Ausschreibung durchführen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ kritische Prozesse absichern ▪ Personaleinsatz planen ▪ Wirtschaftlichkeitsnachweis überprüfen
4. Realisierung	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beschaffung veranlassen ▪ Arbeitsplätze nach MTM gestalten ▪ Personal schulen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Montagesystem installieren ▪ Dokumentation erstellen ▪ Ausprobe
5. Fertigungsanlauf	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Systemanlauf analysieren ▪ Fehler beseitigen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Dokumentation gegebenenfalls korrigieren ▪ Abnahme durchführen

Abbildung 3-5: Planungsleitfaden in Anlehnung an (Konold & Reger, 2003)

Im ersten Schritt des Leitfadens werden die **Aufgabenstellung** und die damit verbundenen Ziele definiert. Es werden Projektverantwortliche bestimmt, Terminrahmen vergeben, die benötigten Planungsdaten beschafft sowie Randbedingungen definiert. Im nächsten Planungsschritt, der **Grobplanung**, wird die Ausbringung ermittelt und es werden bereits die Arbeitsabläufe sowie die Montagestruktur festgelegt. Durch das Zusammenfassen von Teilverrichtungen werden Montageabschnitte gebildet und Arbeitsinhalte auf manuelle oder automatische Montagestationen verteilt. Im nächsten Schritt werden mögliche Lösungsvarianten erstellt sowie bewertet und es wird der Personalbedarf geplant. Abschließend erfolgt in der Grobplanung eine kostenmäßige Bewertung des geplanten Montagesystems in Form einer Wirtschaftlichkeitsrechnung. In der darauffolgenden **Feinplanung** werden die in der Grobplanung gewonnenen Erkenntnisse in Form eines Pflichtenheftes dokumentiert und das Montagesystem wird im Detail ausgearbeitet. Da die letzten beiden Planungsschritte **Realisierung** und **Fertigungsanlauf** nicht mehr konkrete Gestaltung von

Montagesystemen behandeln, werden diese im Folgenden nicht weiter in den Blick genommen. (Konold & Reger, 2003)

Der von Konold und Reger (2003) publizierte Planungsleitfaden vertieft die methodische Einzelarbeitsplatzgestaltung nicht im Detail, sondern dient vorrangig zur Planung eines Montagebereiches. Es werden Planungshilfsmittel wie Methoden der Taktzeitermittlung oder die Erstellung von Vorranggraphen vorgestellt sowie Beispiele für Gestaltungsmöglichkeiten von Arbeitsplätzen gegeben, ohne jedoch konkret auf ihre systematische Gestaltung einzugehen.

3.1.7 Fazit zu den allgemeinen Planungsmethoden

Die in *Kapitel 3.1* beschriebenen allgemeinen Planungsmethoden zur Montagesystemgestaltung werden in *Abbildung 3-6* hinsichtlich der Betrachtungsebene, des Anwendungsbereiches, der verwendeten Analysemethoden, der durchzurührenden Bewertungen sowie der methodischen Auswahlhilfe zur Gestaltung hybrider Arbeitsplätze gegenübergestellt und bewertet. Die Kriterien wurden gemäß den gestellten Anforderungen einer Planungsmethodik für die Gestaltung hybrider Montagesysteme ausgerichtet.

Allgemein beziehen sich die Planungsmethoden hauptsächlich auf die Gestaltung von Montagebereichen und reichen zum Teil von der Projektorganisation bis hin zum Betrieb (Bullinger et al., 1986; Konold & Reger, 2003; REFA, 1987). Eine breite Übereinstimmung der Planungsvorgehensweisen lässt sich an ihrer Aufbaustruktur erkennen. So können die analysierten Planungsmethoden inhaltlich in drei Hauptplanungsschritte gegliedert werden. Schritt eins stellt die **Ausgangsanalyse** dar, bei der die zu lösende Aufgabe formuliert wird. In Schritt zwei, der **Grobplanung**, erfolgt die Erarbeitung möglicher Lösungen mit darauffolgender Eingrenzung auf wenige zielführende Lösungsansätze. Im dritten Schritt, der **Feinplanung**, wird eine konkrete Lösung ausgearbeitet, das Ergebnis umgesetzt und bewertet. (Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014) In einigen Planungsmethoden knüpft ein weiterer Schritt, die Realisierung, zusätzlich an die drei Hauptplanungsschritte an. Häufig laufen die beschriebenen Vorgänge bei der Planung komplexer Produktionssysteme jedoch nicht linear ab, sondern erfordern mehrere iterative Durchläufe einzelner Planungsphasen, um das angestrebte Ergebnis zu erzielen (REFA, 1987).

Spezifisch zeigt sich, dass die bestehenden Planungsmethoden hauptsächlich auf die Montagesystemgesamtstruktur mit der korrekten Stationsaufteilung abzielen und lediglich teilweise die Gestaltung von Arbeitsplätzen betrachten. In nur geringem Umfang behandeln die analysierten Methoden die Betrachtungsebene der Einzelprozessschritte am Arbeitsplatz (Schmidt, 2022). Lediglich Lotter (1986) weist in seiner Methode zur Planung automatisierter Montageanlagen darauf hin, dass im Falle von beinhalteten manuellen Vorgängen die entstehenden Aufwände mit Hilfe von Methoden vorbestimmter Zeiten zu ermitteln sind. Eine Betrachtung auf Ebene von Teilprozessschritten erfolgt nicht.

Hinsichtlich der verwendeten Analyseansätze werden in allen Methoden die Produktstruktur sowie die Produktvarianten analysiert und Montagevorranggraphen aus den gewonnenen Erkenntnissen abgeleitet. Die analysierten Methoden betrachten jedoch nur bedingt die konkreten Zusammenhänge zwischen Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel oder führen Fehlereinflussanalysen durch. Außerdem wird in keiner der Methoden spezifisch auf die Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen und die Wahl des geeigneten Sicherheits- und Interaktionskonzeptes sowie auf die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Technik eingegangen.

Planungsmethoden		Bewertungskriterien					
		Aufgaben bei der Planung der Montage (Eversheim, 1981)	Systematische Montageplanung nach Bullinger (Ammer et al., 1986)	Planungsrichtlinie für automatische Montageanlagen (Lotter, 1986)	Planungssystematik zur Planung und Einführung komplexer Produktionssysteme (REFA, 1987)	Planungsleitfaden (Konold & Reger, 2003)	Montageplanung (Schmidt, 2022)
Betrachtungsebene	Stationsaufteilung und Montagestruktur	●	●	●	●	●	●
	Gesamtarbeitsplatz	●	●	●	●	●	●
	Einzelprozessschritte am Arbeitsplatz	○	○	○	○	○	○
	Teilprozessschritte am Arbeitsplatz	○	○	○	○	○	○
Anwendungsbereich	Neuplanung von Montagesystemen	●	●	●	●	●	●
	Optimierung bestehender Montagesysteme	○	●	●	●	●	●
	Unterstützung bei der Gestaltung von Arbeitsplätzen	○	○	●	●	●	●
	Spezifische Konzeptionierung hybrider Arbeitsplätze	○	○	○	○	○	○
Analyse	Analyse der Produktstruktur	●	●	●	●	●	●
	Durchführung einer Variantenanalyse	●	●	●	●	●	●
	Erstellung eines Montagevorranggraphen	●	●	●	●	●	●
	Durchführung einer Fehlereinflussanalyse	○	○	○	○	○	○
	Analyse der Produkt, Prozess u. Betriebsmittelzusammenhänge	○	○	○	○	○	○
	Durchführung einer Zeitanalyse	●	●	●	●	●	●
Bewertung	Bewertung der technischen Automatisierbarkeit	○	○	●	●	○	○
	Bewertung des zeitlichen Optimierungspotentials	○	○	●	○	○	●
	Bewertung der Wirtschaftlichkeit	●	●	●	●	●	●
Auswahlhilfe	Unterstützung bei der Wahl des Interaktionskonzeptes	○	○	○	○	○	○
	Unterstützung bei der Wahl des Sicherheitskonzeptes	○	○	○	○	○	○

Bewertungsskala: ● zutreffend ● teilweise zutreffend ○ nicht zutreffend

Abbildung 3-6: Gegenüberstellung allgemeiner Planungsmethoden zur Montagesystemgestaltung

3.2 Spezifische Ansätze der Aufgabenallokation hybrider Arbeitsplätze

In diesem Unterkapitel werden spezifische Ansätze analysiert, die sich mit der Aufgabenteilung zwischen Mensch und Technik im Umfeld der Montage befassen. Der Schwerpunkt dieser Arbeiten sowie die Entscheidungsbasis der Ressourcenzuteilung werden im Folgenden zusammengefasst vorgestellt.

Beumelburg (2005) entwickelte in ihrer Arbeit ein Verfahren zur fähigkeitsorientierten und optimierten Montageablaufplanung in der MRK. Der Entwicklungsschwerpunkt liegt auf der temporär optimierten Montageablaufplanung, bei der unter Berücksichtigung der Fähigkeiten von Mensch und Roboter die Zuteilung der Arbeitsinhalte erfolgt. Das entwickelte Verfahren wird in Form eines softwarebasierten Werkzeugs abgebildet. (Beumelburg, 2005)

Die von Fechter (2022) publizierte Arbeit zur Entscheidungsfindung im Zuge der Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze legt den Fokus auf die automatisierte Ressourcenauswahl und Arbeitsteilung für die MRK. Die entwickelte Methode hat zum Ziel, sinnvolle technische und wirtschaftliche Systemalternativen zu generieren und diese zu bewerten, um, losgelöst vom Erfahrungsstand des Planers, manuellen Prozessschritten passende Ressourcen zuzuordnen. Es erfolgt eine iterative quantitative und qualitative automatisierte Bewertung von Lösungsalternativen unter Berücksichtigung des Montageprozesses und des zu montierenden Produktes. Die entwickelte Methode wurde beispielhaft als Softwarelösung umgesetzt. (Fechter, 2022)

Schröter (2018) veröffentlichte eine Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in der MRK auf Basis der fähigkeitsorientierten Zuordnung von Montagetätigkeiten. Diese identifiziert Montageprozessschritte mit einer hohen Eignung für eine MRK unter der sicherheitstechnischen Berücksichtigung der maximal zulässigen Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters, was eine direkte Auswirkung auf die Produktivität des Arbeitssystems hat. Die entwickelte Methodik wurde in Form eines softwarebasierten Planungswerkzeuges realisiert. (Schröter, 2018)

Die von Müller (2016) veröffentlichte Systematik zur Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter basiert auf einem Fähigkeitsvergleich der beiden Ressourcen. Die Veröffentlichung zeigt jedoch, dass der Fähigkeitsvergleich lediglich als Grundlage der Beurteilung dient, weitere quantitative Aspekte wie Kosten und Zeit, aber auch nur schwierig bewertbare Aspekte wie Akzeptanz, Ergonomie und Layout für eine Beurteilung zu berücksichtigen sind. (Müller et al., 2016)

Takata (2011) stellt in seiner Publikation ein kostenbasiertes Konzept zur Zuordnungsplanung hybrider Montagesysteme vor. Hierbei wird davon ausgegangen, dass durch Produktänderungen nicht an allen Stationen eines Montagesystems Anpassungen

erforderlich sind. Aus dieser Annahme heraus wird abgeleitet, dass Prozesse, an denen erhebliche Änderungen notwendig sind und damit eine hohe Flexibilität erforderlich ist, durch Menschen auszuführen sind. Montageabschnitte, in denen keine zusätzlichen hohen Investitionen durch Anpassungen aufgrund von Produktänderungen zu erwarten sind, werden automatisierten Systemen zugeordnet. Die Zuteilungsplanung erfolgt mit dem Ziel der Minimierung der Gesamtproduktionskosten auf Basis der Prognose möglicher zukünftiger Modelländerungen sowie der erwarteten Nachfrage. (Takata & Hirano, 2011)

Glogowski (2017) stellt ein Konzept für ein aufgabenbasiertes Simulationswerkzeug für kollaborative Montagesysteme vor. Dieses dient zur fähigkeitsorientierten Verteilung von Aufgaben auf Menschen und Roboter. Die simulationsbasierte Fähigkeitsbeurteilung des Menschen erfolgt unter den Gesichtspunkten der Ergonomie, Sicherheit und der Wirtschaftlichkeit. Der Roboter und seine Peripherie werden hinsichtlich der Automatisierbarkeit der Verrichtung simuliert. Die Gestaltung des Gesamtprozesses erfolgt durch das Zusammenführen der beiden Simulationsergebnisse. Des Weiteren berücksichtigt die Planungssystematik die Erfüllung der Arbeitsschutzanforderungen sowie die Verwendung der Ergebnisse zur Mitarbeiterqualifizierung und Akzeptanzförderung von MRK-Systemen. (Glogowski et al., 2017)

Fazit

Die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten und in *Kapitel 3.2* beschriebenen spezifischen Ansätze zur Allokation von Aufgaben im Umfeld von hybriden Arbeitsplätzen werden in *Abbildung 3-7* gegenübergestellt. Die Bewertungskriterien umfassen den Betrachtungsbereich, die Betrachtungsebene sowie die Basis der Ressourcenzuteilung. Die Kriterien orientieren sich an den dargelegten Grundlagen des Betrachtungsbereiches und an den gestellten Anforderungen dieser Arbeit. Der Vergleich zeigt, dass sich der primäre Forschungsfokus auf die methodische Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Roboter beschränkt. Eine Übertragbarkeit auf hybride Arbeitsplätze im Allgemeinen ist nur bedingt möglich. Der von Takata publizierte Ansatz der monetären Aufgabenallokation (Takata & Hirano, 2011) ist zwar auf hybride Arbeitsplätze im Allgemeinen anwendbar und nicht restriktiv bezüglich Roboterarbeitsplätzen, jedoch beschränkt sich die vorgestellte Vorgehensweise lediglich auf die Zuteilung von Stationen einer Montagelinie aus ausschließlich monetären Gesichtspunkten.

Des Weiteren beschränken sich die gewählten Betrachtungsebenen der Arbeiten hauptsächlich auf Einzelarbeitsplätze und nicht auf die am Arbeitsplatz zu verrichtenden Einzelprozessschritte. Eine detaillierte Analyse auf Teilprozessschrittebene wird nicht vorgenommen. Dies hat zur Konsequenz, dass die Zuteilung von Teilverrichtungen zwischen

Mensch und Technik innerhalb eines Prozessschrittes nicht bewertet und somit nicht durchgeführt werden kann.

Verfahren der Ressourcenallokation							
Bewertungskriterien							
Betrachtungsbereich	Mensch-Roboter Arbeitsplatz	●	●	●	●	●	●
	Hybrider Arbeitsplatz allgemein	○	◐	○	○	●	◐
Betrachtungsebene	Stationsaufteilung und Montagestruktur	○	○	○	◐	◐	○
	Gesamtarbeitsplatz	●	●	●	●	●	●
	Einzelprozessschritte am Arbeitsplatz	●	●	●	●	○	●
	Teilprozessschritte am Arbeitsplatz	○	○	○	○	○	○
Basis der Ressourcenzuteilung	Fähigkeit der Ressource	●	●	●	●	○	●
	Zeitoptimierung	●	●	●	◐	○	◐
	Wirtschaftlichkeit	●	◐	○	◐	●	●
	Ergonomie	◐	◐	◐	◐	○	●
	Arbeitsschutz	◐	○	●	○	○	●
	Akzeptanz	○	○	○	◐	○	◐
	Bewertung der techn. Automatisierbarkeit	●	●	◐	○	○	●
Layout	○	○	○	◐	○	◐	

Bewertungsskala: ● zutreffend ◐ teilweise zutreffend ○ nicht zutreffend

Abbildung 3-7: Gegenüberstellung spezifischer Ansätze der Aufgabenallokation hybrider Arbeitsplätze

Zusätzlich zeigt sich, dass die fähigkeitsbasierte Zuteilung der Prozessschritte unter anderem auf Basis der technischen Automatisierbarkeitsbewertung erfolgt (Beumelburg, 2005; Fechter, 2022; Glogowski et al., 2017). Dies bildet die Bewertungsgrundlage zu der

Frage, ob ein bestimmter Schritt im Prozess technisch automatisiert werden kann oder nicht. Jedoch beinhalten die Methodiken keinen Prozess der iterativen Simplifizierung, der zur Optimierung der vorliegenden Ausgangsbedingungen beiträgt.

Ferner sind in den betrachteten Ansätzen keine methodischen Ausgangsanalysen enthalten, durch die Informationen für die spätere Beurteilung gewonnen werden. Jedoch erst durch die ganzheitliche Analyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel kann die Basis für eine fundierte Beurteilung hergestellt werden.

Abschließend lässt sich konstatieren, dass die betrachteten Verfahren eine Ressourcenallokation aufgrund unterschiedlicher Aspekte vornehmen, bezüglich der nachfolgenden Gestaltung der Arbeitsplätze dem Planer jedoch nur begrenzte Unterstützung bieten. Um als durchgängige Planungsverfahren zu dienen, wären Hilfsmittel zur Bewertung des gewählten Sicherheitskonzepts, zur Auswahl möglicher zusätzlicher Sicherheitstechnologien sowie zur Festlegung eines geeigneten Interaktionskonzepts zwischen Mensch und Technik erforderlich.

3.3 Ansätze zur technischen Automatisierbarkeitsbewertung

Die Analyse und Bewertung der technischen Automatisierbarkeit in der Montage stellen ein vielschichtiges und komplexes Problem dar. So ist es notwendig, sowohl die Art der Montageaufgabe wie das Handhaben, Fügen, die Inbetriebnahme und die Hilfsprozesse und Sonderoperationen als auch die zu montierenden Bauteile sowie deren Design genau auf die Eignung einer Automatisierung zu prüfen. Ebenso spielen die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der Automatisierungssysteme, um verschiedene Produkte und Varianten montieren zu können, eine entscheidende Rolle.

Aus diesem Grund wurden die bisher veröffentlichten Methoden zur Beurteilung der technischen Automatisierbarkeit aus den letzten Jahrzehnten im Hinblick auf ihre Bewertungskriterien und die darin aufgeführten Ausprägungen sowie relevante Literatur zur montagegerechten Produktgestaltung analysiert und verglichen. (Hübner et al., 2023). Die einschlägigen fünf Bewertungsverfahren, die zwischen den Jahren 1989 und 2019 erschienen sind, werden im Folgenden genauer vorgestellt.

Deuschländer (1989) entwickelte eine Checkliste zur Beurteilung der Automatisierbarkeit von Montageprozessen, in der er fünf objektbezogene und zehn prozessbezogene Kriterien zur Beurteilung der Automatisierbarkeit heranzieht. Die genannten Kriterien können in jeweils drei Ausprägungsformen auftreten. Nach durchgeführter Bewertung erhält der Nutzer das Ergebnis, dass die Montageautomatisierung einfach realisierbar, realisierbar oder mit großem Aufwand realisierbar ist.

Durch Beumelburg (2005) wurden Kriterien für die fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung zusammengestellt, anhand derer die vier Bereiche Montageprozess, Ergonomie, Bauteil sowie die Teilebereitstellung berücksichtigt werden. Der Montageprozess beinhaltet hierbei zehn Kriterien, die Füge- und Handhabungsprozesse betreffen. Fünf Kriterien der Ergonomie sollen die Arbeitsqualität für den Menschen bewerten. Sechs weitere Kriterien beziehen sich direkt auf die Eigenschaften des Bauteiles und ein weiteres Kriterium ist der Teilebereitstellung zugeordnet. Beumelburg verwendet keine identische Anzahl an Ausprägungen, sondern je nach Kriterium zwischen zwei und fünf Ausprägungen.

Ross (2002) identifizierte in seiner Arbeit 20 Kriterien, die den Aufwand für einen automatisierten Montageprozess bewerten. Diese werden in vier Ausprägungen abgestuft. Des Weiteren beurteilt Ross, dass alle genannten Kriterien den Aufwand zur Realisierung des Montageprozesses beeinflussen. Zusätzlich nimmt er noch eine Einteilung vor hinsichtlich des Aspekts, welche der genannten Kriterien einen Einfluss auf die Teilfunktionen des Handhabens und des Fügens haben.

Der von Ermer (2019) erarbeitete Quick-Check bezieht sich auf die Einführung von MRK-Systemen und umfasst fünf Quick-Check-Kategorien. Diese sind die Kategorie Bauteil mit

fünf Kriterien, die Zu- und Abführung mit drei Kriterien, das Verbesserungspotenzial mit zwei Kriterien, die Sicherheit mit zwei Kriterien und zuletzt Sonstiges mit einem Kriterium. Die Kriterien weisen eine partiell unterschiedliche Anzahl an Ausprägungen auf und werden jeweils mit null bis vier Punkten bewertet. Am Ende des Quick-Checks wird je Kategorie ein prozentualer Wert für die Automatisierbarkeit bezogen auf die Eignung einer MRK-Lösung ausgegeben. Zusätzlich wird noch ein prozentualer Wert für die Gesamteignung angegeben. Der Quick-Check dient somit zur Bewertung von einzelnen Prozessschritten hinsichtlich einer potenziellen MRK-Eignung, ohne den Gesamtprozessablauf sowie den zeitlichen Nutzen einer Optimierung zu berücksichtigen.

Thomas (2017) entwickelte in seiner Arbeit eine Bewertungssystematik für die MRK. Diese umfasst fünf Bewertungsklassen mit unterschiedlichen Kriterien. Die für die technische Automatisierbarkeit relevanten Klassen sind hierbei die Montageaufgabe, die Bauteile und die technischen Gegebenheiten. Die Klasse Bauteile sowie die Montageaufgabe umfassen elf Kriterien. Die technischen Gegebenheiten werden durch neun Kriterien bewertet. Bei der Durchführung bewertet der Anwender aus den Kriterien abgeleitete Abfragen. Diese werden nicht durch Ausprägungen des Kriteriums vordefiniert, sondern von null bis zehn frei bewertet. Des Weiteren fließt die Bewertung der Kriterien durch einen Gewichtungsfaktor unterschiedlich stark in die Gesamtbewertung ein.

Zusätzlich zur Prüfung der bestehenden Automatisierbarkeitsbewertungsverfahren wurde einschlägige Literatur zur montagegerechten Produktgestaltung analysiert, da auch daraus Kriterien für die Beurteilung der Automatisierbarkeit eines Produktes ableitbar sind. So lassen sich die von Konold und Reger (2003), Hesse (2012), Bäßler (1988) und Eversheim (1987) publizierten Verfahren und Richtlinien zur montagefreundlichen Produktgestaltung ebenfalls zur Bewertung der Automatisierbarkeit von Montageprozessen heranziehen.

Die Analyse der vorhandenen Methoden zur Bewertung der Automatisierbarkeit zeigen sich zumeist als stark lösungsorientierte Verfahren, die beispielsweise bereits Gegebenheiten wie MRK-Arbeitsplätze voraussetzen (Beumelburg, 2005; Ermer et al., 2019; Thomas, 2017). Um eine möglichst unkomplizierte und dennoch objektive Bewertung zu ermöglichen, werden aus den vorangegangenen Literaturrecherchen daher ausschließlich lösungsneutrale Kriterien herangezogen. In *Abbildung 3-8* werden die verwendeten lösungsneutralen Kriterien der jeweiligen Autoren tabellarisch gegenübergestellt.

Kriterium	Automatisierbarkeitsbewertung					montagegerechte Produktgestaltung			
	Beumelburg 2005	Deutschländer 1989	Ermer et al. 2019	Ross 2002	Thomas 2017	Bäfler 1988	Eversheim 1987	Hesse 2012	Konold u. Reger 2003
Abmessungen des Fügebauteils	○	●	○	●	●	●	○	●	●
Gewicht des Fügebauteils	○	●	●	○	●	●	○	●	●
Formstabilität des Fügebauteils	●	●	●	●	●	●	○	●	●
Empfindlichkeit des Fügebauteils	●	○	●	●	○	●	○	●	○
Geometrische Greifbarkeit des Fügebauteils	●	○	○	●	●	●	○	●	●
Anzahl Variantenfamilien	○	●	●	●	●	●	○	○	●
Bereitstellungsart des Fügebauteils	●	●	●	○	●	●	○	●	○
Fügegerechtes Fügebauteil und Basisbauteil	○	○	○	●	○	●	●	●	●
Genauigkeitsanforderungen des Fügevorgangs	●	●	○	○	○	●	○	●	●
Art der Fügebewegung	●	●	○	●	○	●	○	○	●
Benötigte Fügekräfte / -momente / -sensitivität	○	○	○	●	○	○	○	○	○
Zugänglichkeit Fügeort	●	●	○	●	○	●	●	●	●
Zusattätigkeiten (z.B. Sichtprüfung, Materialversorgung)	●	●	●	●	●	○	○	●	○

Bewertungsskala: ● zutreffend ○ nicht zutreffend

Abbildung 3-8: Literaturvergleich lösungsneutraler Kriterien (Hübner et al., 2023)

Fazit

Durch die analysierten Ansätze der technischen Automatisierbarkeitsbewertung sowie der montagegerechten Produktgestaltung der letzten Jahrzehnte konnten 13 zielführende Bewertungskriterien abgeleitet werden. Anhand dieser Kriterien lässt sich sowohl das Produkt als auch der Prozess hinsichtlich der Eignung für eine Automatisierung bewerten. Da jedoch nicht allen Kriterien eine gleichermaßen hohe Bedeutung zuteilwird, ist es erforderlich, diese mit einer entsprechenden Gewichtung zu versehen.

3.4 Fazit und Handlungsbedarf

Zu Beginn wurden in *Kapitel 3.1* bestehende etablierte Planungsmethoden zur Montagesystemgestaltung bezüglich ihres Aufbaus und ihrer Eignung zur Planung hybrider Montagesysteme analysiert und bewertet. Hierbei wurde deutlich, dass sich diese Planungsmethoden generell auf die Gestaltung vollständiger Montagebereiche konzentrieren und einen breiten Sektor von der Projektorganisation bis hin zum Betrieb eines Montagesystems abdecken. Die Struktur der betrachteten Planungsmethoden weist eine große Ähnlichkeit auf und lässt sich in die drei Hauptplanungsschritte Ausgangsanalyse, Grobplanung und Feinplanung unterteilen. Im letzten Planungsschritt, der Feinplanung, wird eine konkrete Lösung erarbeitet, bewertet und umgesetzt. Keine der betrachteten ganzheitlichen Methoden weist jedoch in diesem Planungsschritt eine spezifische Vorgehensweise zur Aufgabenallokation auf. Daher wurden in *Kapitel 3.2* veröffentlichte spezifische Vorgehensweisen zur Aufgabenzuteilung zwischen Mensch und Technik betrachtet. Hierbei zeigten die entsprechenden Arbeiten eine Beschränkung auf die Aufgabenverteilung im Speziellen zwischen Mensch und Roboter und wiesen keine durchgängige Methodik zur Arbeitsplatzgestaltung auf. Um eine plausible Aufgabenzuteilung zu realisieren, wurden bestehende Ansätze zur technischen Automatisierbarkeitsbewertung (*Kapitel 3.3*), sowie eine Methode zur zeitlichen Optimierungspotenzialbewertung (*Kapitel 2.2.7*) analysiert.

Aus diesen Betrachtungen lässt sich der Handlungsbedarf einer durchgängigen Methodik zur Konzeptionierung hybrider Arbeitsplätze ableiten. Die zu entwickelnde Methodik soll ausgehend von einer bestehenden manuellen Montageaufgabe das zu montierende Produkt, den bestehenden Montageprozess sowie das derzeit verwendete Betriebsmittel analysieren. Des Weiteren sollte sich das Anwendungsgebiet der Methodik nicht ausschließlich auf MRK-fähige Robotersysteme beschränken, sondern vielmehr generell die mögliche technische Unterstützung am Arbeitsplatz in den Blick nehmen.

Um eine optimale Ausschöpfung der jeweiligen Fähigkeiten von Mensch und Technik zu ermöglichen, sollte die Betrachtungsebene so gewählt werden, dass sowohl ganze Prozessschritte als auch Teilprozessschritte eines Montageprozesses bewertet werden können. Um sowohl die Sinnhaftigkeit als auch Machbarkeit zu beurteilen, sollte die Methodik durch ein Bewertungsverfahren einerseits das bestehende zeitliche Optimierungspotenzial sowie andererseits die technische Realisierbarkeit berücksichtigen. Zusätzlich sollte der Planer bei seiner Entscheidungsfindung unterstützt werden hinsichtlich des geeigneten Sicherheitskonzeptes sowie bei der Auswahl des benötigten Interaktionskonzeptes zwischen Mensch und Technik. Um Prozessplanern einen unkomplizierten und effektiven Zugang zur entwickelten Methodik zu ermöglichen, sollte diese in einem intuitiv anwendbaren softwaregestützten Planungstool zur Verfügung gestellt werden.

4 Konzeption der methodischen Gestaltung von hybriden Montagearbeitsplätzen

Die methodische Vorgehensweise zur Planung und Konzeptionierung eines hybriden Montagearbeitsplatzes wird in diesem Kapitel erläutert. Die Evaluierung eines manuellen Arbeitsplatzes beginnt mit einer fundierten Ausgangsanalyse, die sich aus mehreren etablierten Einzelanalysemethoden zusammensetzt. Diese Herangehensweise ermöglicht eine umfassende Untersuchung des bestehenden Arbeitsplatzes. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen dieser Analysen erfolgt die Bewertung der Einzelprozessschritte. Die Bewertung basiert auf der in dieser Arbeit entwickelten Primärmethode, mit der die Aufgabenallokation auf Grundlage des zeitlichen Optimierungspotenziales und der technischen Realisierbarkeit vorgenommen wird, da die in *Kapitel 3.2* analysierten Ansätze der Aufgabenallokation diese Aspekte nicht zufriedenstellend abdecken. Um anhand dieser Bewertung mögliche Optimierungspotenziale zu identifizieren und Verbesserungsmaßnahmen durch den gezielten Einsatz von Technik zu entwickeln, erfolgt ein Abgleich der Bewertungsergebnisse. In der anschließenden Gestaltungsphase wird die Feinplanung des Prozessablaufes mit der Ausgestaltung des Arbeitsplatzes vorgenommen. In dieser Phase werden die Erkenntnisse der vorangegangenen Phasen genutzt, um die Ressourcen Mensch und Technik unter Berücksichtigung sicherheitstechnischer Restriktionen möglichst effizient einzusetzen und den Arbeitsplatz auszugestalten.

Abbildung 4-1 stellt den Aufbau der Methodik mit ihrem Dreiklang schematisch dar.

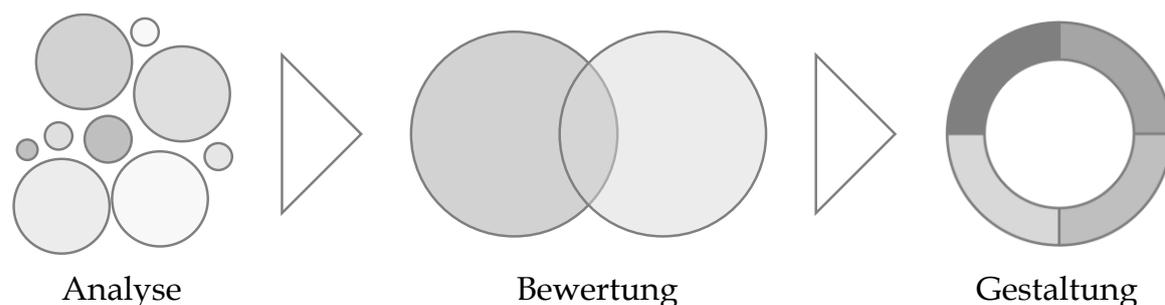


Abbildung 4-1: Methodik Analyse – Bewertung – Gestaltung

4.1 Analysemethodik

Die Basis zur Entwicklung eines hybriden Montagesystems ist eine fundierte Analyse des Produktes hinsichtlich seines Aufbaus und seiner Funktion sowie den an das Produkt gestellten Kundenanforderungen. Ausgehend von der Produktanalyse werden Montageprozesse fähigkeitsbasiert definiert und Betriebsmittel bedarfsgerecht ausgelegt. Ziel ist es, den Montageprozess so zu gestalten, dass ein Optimum hinsichtlich manueller

Verrichtungen und Automatisierung erreicht wird. Dieser Prozess ist jedoch nicht unidirektional, sondern in Optimierungsschleifen durchzuführen. So sollten, wenn möglich, Montageprozesse für die Betriebsmittel optimiert sowie Produkte montageprozessgerecht gestaltet werden. Nur bei einer gemeinsamen Abstimmung zwischen Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel kann ein Optimum hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Funktion und Erfüllung der Kundenanforderungen erzielt werden (Müller, 2021). *Abbildung 4-2* veranschaulicht diesen Analyseansatz.

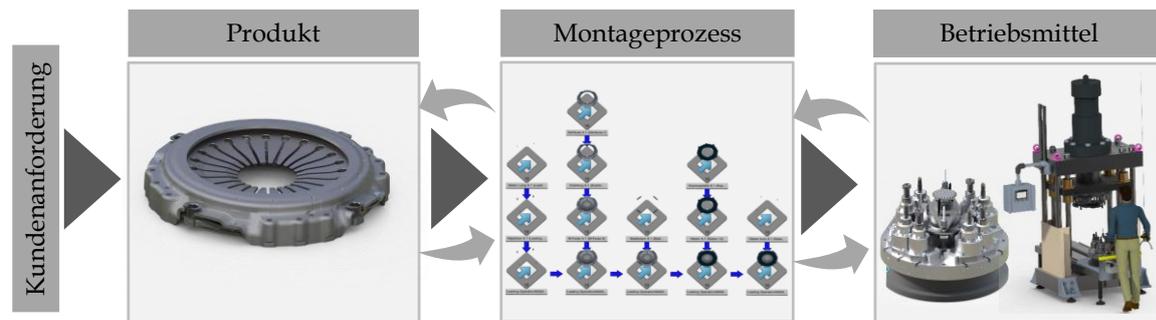


Abbildung 4-2: Planungs- und Analyseansatz

Die Analysemethodik zur Gestaltung von Montagesystemen ist grundsätzlich identisch bei Neuprodukten und bestehenden Produkten sowie bei der Gestaltung von neuen Montagesystemen und bei der Umgestaltung von bestehenden Montagesystemen. Diese geht von der Produktanalyse über die Prozessanalyse bis hin zur Betriebsmittelanalyse. Jedoch müssen bei der anschließenden Gestaltung an bestehenden Montagesystemen sowie Produkten eventuelle Restriktionen hinsichtlich Anpassbarkeit des Produktes, des Montageprozesses sowie des Betriebsmittels in Kauf genommen werden.

So fehlt oftmals die Möglichkeit, Veränderungen an bestehenden Produkten vorzunehmen, um diese montagerechter zu gestalten oder für einen geeigneteren Montageprozess konstruktiv anzupassen. Dies ist bei dem in dieser Arbeit zur Validierung der Gesamtmethodik betrachteten Produkt, der NKW-Druckplatte, der Fall. Konstruktive Änderungen an dem in hoher Stückzahl seit Jahrzehnten gefertigten Produkt würden mehrjährige Prüfstands- sowie Feldversuche nach sich ziehen und sind daher nicht umsetzbar.

Auch die Wiederverwendung von bewährten und sich bereits im Einsatz befindenden Werkzeugen spielt bei der späteren Gestaltung und Optimierung bestehender Montagesysteme eine erhebliche Rolle. Dies ist häufig notwendig, um die erforderlichen Investitionen in einem vertretbaren Rahmen halten zu können.

Kostenintensive sowie Ressourcen bindende Wege sind zur jetzigen Zeit, in der sich die Automobilindustrie im Wandel befindet, nur schwer durchsetzbar. Finanzielle Mittel sowie Entwicklungsressourcen werden für Neuprodukte im Bereich der Elektromobilität benötigt. Gerade deshalb ist es von erheblicher Bedeutung, bestehende Montageprozesse

sowie Betriebsmittel so zu optimieren, dass diese bei steigendem Kostendruck weiterhin effektiv und vor allem wirtschaftlich produzieren. Dies ist häufig das finanzielle Fundament, auf dem der Wandel hin zur Elektromobilität gestaltet wird.

Im Folgenden wird durch die Anwendung von Einzelmethoden die fundierte Ausgangsanalyse von Produkt-, Montageprozess- sowie Betriebsmittel vorgestellt und erläutert. Diese bildet die Basis für die spätere Arbeitsplatzgestaltung und dient dem Anwender zur Herstellung eines umfassenden Verständnisses von Produkt-, Prozess- und Betriebsmittel sowie ihrer Zusammenhänge. Die in dieser Arbeit integrierten Analysemethoden stellen lediglich eine Auswahl aus einer Vielzahl etablierter Methoden dar und wurden speziell selektiert, um ein grundlegendes Wissen für die spätere Bewertung zu erhalten. Die Analyse beginnt mit dem Merkmalsentstehungsbaum und geht über die Ursache- sowie Wirkungsanalyse, den Montagevorranggraphen, die Variantenanalyse bis hin zur Toleranzanalyse.

4.1.1 Merkmalsentstehungsbaum (MEB)

Bei Weitem nicht alle von der Konstruktion auf Zeichnungen oder in Modellen festgelegten Toleranzen sind für den Montageprozess von Bedeutung oder haben bei deren Abweichung einen Einfluss auf das Erfüllen der Produkthanforderung. Das Ziel ist daher die Identifikation der relevanten Toleranzen durch eine ganzheitliche Betrachtung der Merkmale. Um die relevanten Toleranzen zu identifizieren, lässt sich die Methode des Key Characteristic Flowdown anwenden.

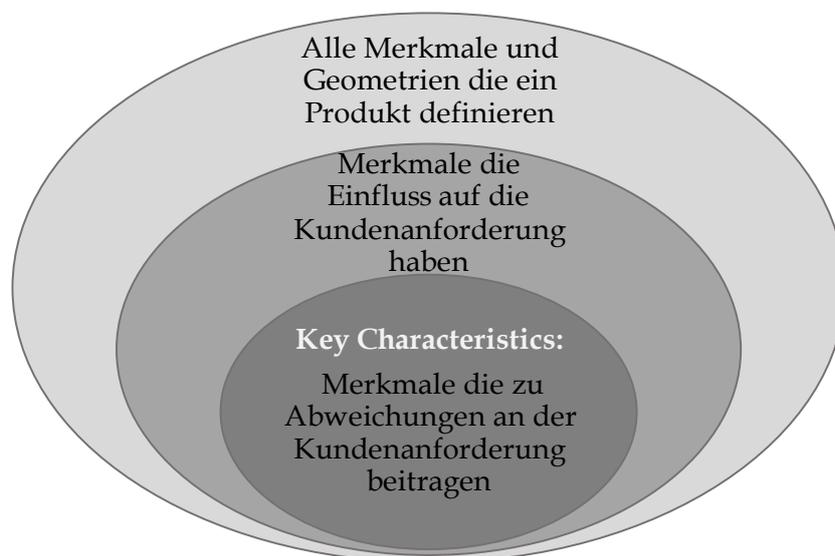


Abbildung 4-3: Hierarchie von Produktmerkmalen in Anlehnung an (Thornton, 2003)

Die **Key Characteristics** (KC) werden durch Thornton (2003, p. 35) definiert als „Ein quantifizierbares Merkmal eines Produktes, einer Baugruppe, eines Einzelteils oder eines

Prozesses, dessen erwartete Abweichungen von dem Sollwert inakzeptable Auswirkungen auf die Funktion, die vom Kunden wahrgenommene Qualität, die Kosten oder die Sicherheit hat“ (vgl. *Abbildung 4-3*). Um genau diese inakzeptablen Auswirkungen zu verhindern, müssen die KC durch Toleranzen begrenzt und im Montageprozess eingehalten werden. Die KC können in den Ebenen Einzelteil, Baugruppe, Produkt sowie in der Ebene des Produktionsprozesses betrachtet werden. (Müller et al., 2009; Thornton, 2003)

Das Wissen über die Beziehungen zwischen den Kundenanforderungen und den KC der Bauteile beziehungsweise der Baugruppen wird in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe im **Key Charakteristik Flowdown** erfasst und in einer Baumstruktur dargestellt. Nach der Top-down-Vorgehensweise werden ausgehend von den Kundenanforderungen und den damit verbundenen KC die für die Montage zu berücksichtigenden Merkmale mit deren Toleranzen abgeleitet. Diese Vorgehensweise hilft, einerseits ein besseres Verständnis für das Produkt und dessen Funktion zu gewinnen und andererseits die Anzahl der zu berücksichtigenden Toleranzen auf ein Minimum zu reduzieren. (Müller et al., 2009; Müller et al., 2012; Thornton, 2003)

Der Grundgedanke des KC-Flowdown wurde von Mende (2020) für die Montage in Form des funktionalen **Merkmalentstehungsbaumes** (MEB) weiterentwickelt und dient als zentrales Mittel zur Visualisierung und Dokumentation der Zusammenhänge zwischen Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmalen sowie deren Wechselwirkungen. Ein wesentlicher Unterschied zwischen dem von Thornton (2003) entwickelten KC-Flowdown, der sich ausschließlich auf quantifizierbare Merkmale beschränkt, und dem von Mende (2020) weiterentwickelten MEB besteht darin, dass in diesem sowohl quantifizierbare als auch nicht quantifizierbare Merkmale definiert werden können. Dies ermöglicht es, den Menschen mit dessen Merkmalen, wie der Hand-Augen-Koordination oder seiner Erfahrung, in die Betrachtung mit einfließen zu lassen.

Zu Beginn einer ganzheitlichen Analyse ist das Herstellen eines fundierten Verständnisses für das zu montierende Produkt mit seiner Funktion und seinem Aufbau sowie hinsichtlich des derzeitigen Montageprozesses erforderlich. Dies lässt sich idealerweise in interdisziplinärer Zusammenarbeit durch die Erstellung eines MEB erarbeiten. Der MEB wird wie der KC-Flowdown hierarchisch durch das Verbinden von Knoten mit Kanten in einer Baumstruktur dargestellt, an dessen Spitze als oberstes Zielmerkmal der Kundenwunsch steht. In der nächsten Ebene werden nach der Top-Down-Vorgehensweise Merkmale, die einen direkten Einfluss auf das Zielmerkmal haben, aufgeführt und mit dem Zielmerkmal verbunden. Diese Vorgehensweise wird für die darauffolgenden Ebenen wiederholt. Im MEB werden für Produkt, Prozess und Betriebsmittel unterschiedliche Symbole verwendet (vgl. *Abbildung 4-4*).

Durch die Erstellung des MEB lässt sich die gesamte Prozesskette von Produkt, Prozess und Betriebsmittel und ihre Zusammenhänge problemlos darstellen und nachvollziehen. Durch diese transparente Darstellung der Merkmalszusammenhänge können zusätzlich Toleranzzusammenhänge aufgezeigt werden. (Mende, 2020)

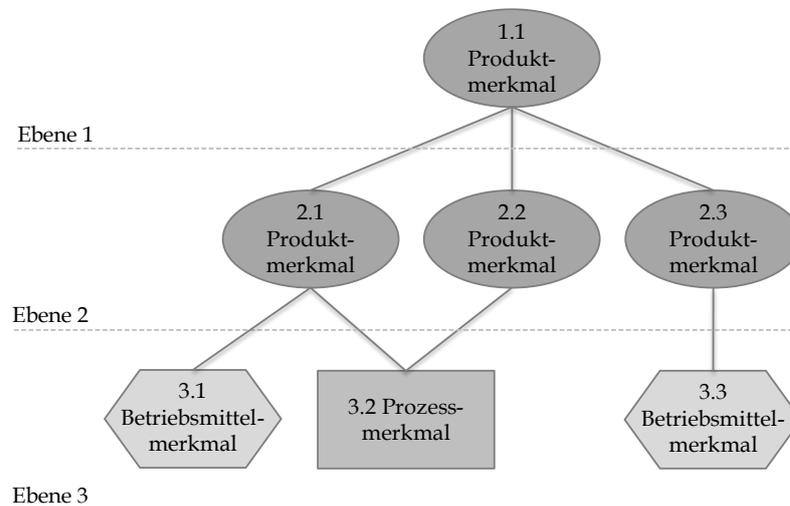


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung MEB

4.1.2 Ursache-Wirkungs-Analyse

Da jedes System bestimmten Einflüssen unterliegt, ist es von Relevanz, diese zu kennen, um durch eine zielgerichtete Systemgestaltung auf sie reagieren zu können. So unterliegen ein Produkt, ein Montageprozess sowie ein Betriebsmittel ebenfalls spezifischen Einflüssen, die es zu identifizieren und zu kategorisieren gilt, um sie in der späteren Montagesystemgestaltung zu kennen und zu berücksichtigen.

Das Wissen über mögliche auf ein Montagesystem wirkende Einflüsse beruht in hohem Maß auf Erfahrungen. Diese lassen sich adäquat in einem aus unterschiedlichen Fachbereichen bestehenden Team von Konstruktion, Produktion und Qualität durch Kreativitätstechniken ermitteln und in einem Ursache-Wirkungs-Diagramm in grafischer Struktur darstellen. Ein derartiges visuelles Werkzeug wird auch als **Ishikawa-Diagramm** bezeichnet und dient zur Analyse von Problemen und ihren Ursachen. (Geiger & Kotte, 2008)

Durch die klare visuelle Darstellung lässt sich die Kommunikation zwischen den Teammitgliedern verbessern, wodurch die Zusammenhänge zwischen der Ursache und dem Problem unkomplizierter nachvollzogen werden können. Zusätzlich lässt sich durch die Möglichkeit der Priorisierung der identifizierten Ursachen ein verstärkter Fokus auf die wahrscheinlichste Ursache der analysierten Probleme legen, um zielgerichtet und effektiv Ideen zur Beseitigung der Ursache zu entwickeln.

Zur Erstellung des Ishikawa-Diagramms werden Haupteinflusskategorien gebildet, die über diagonale Pfeile mit dem zu betrachtenden System verbunden werden und die

Ursache des Problems veranschaulichen. Diese münden auf einem horizontalen Pfeil, der das Problem darstellt. Die Haupteinflussfaktoren, die auf einen Montagearbeitsplatz wirken, lassen sich in Mensch, Maschine, Methode, Material und Umwelt unterteilen. Ausgehend von diesen fünf Haupteinflüssen werden potenzielle untergeordnete Einzeleinflüsse durch pfeilförmige Unterverästelungen den entsprechenden Haupteinflüssen zugeordnet. Alle diese Einflüsse sind Ursachen, die eine bestimmte Wirkung auf den Montageprozess ausüben, daher die Bezeichnung Ursache-Wirkungs-Diagramm. Dieser Aufbau wird in *Abbildung 4-5* schematisch gezeigt. (Helmold, 2022)

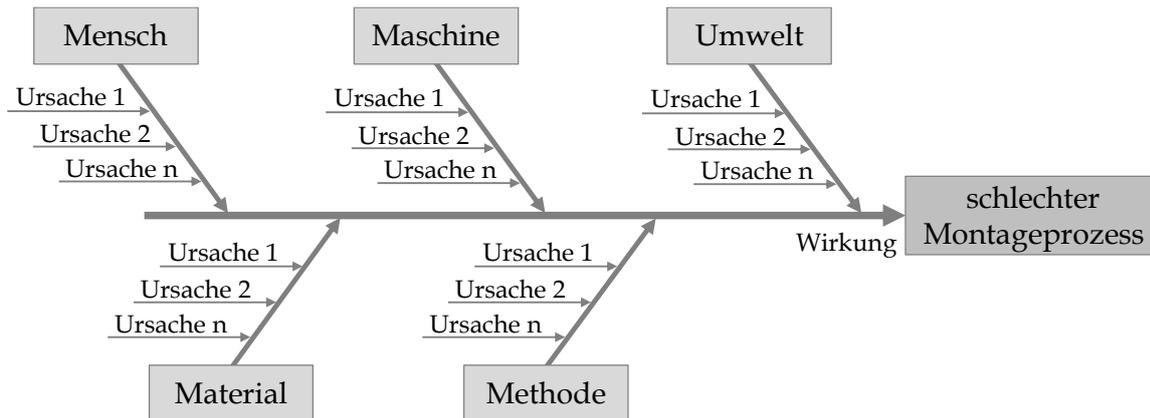


Abbildung 4-5: Ishikawa-Diagramm

4.1.3 Montagevorranggraph

Zur Planung und Festlegung der Montageablaufstruktur ist der **Montagevorranggraph** eine häufig gewählte Darstellungsform. Er stellt den Gesamtprozess, die Montage eines Produktes, in einzelnen logisch sowie zeitlich aufeinanderfolgenden Montageschritten dar. So werden auf Basis der Produktstruktur die einzelnen Montageschritte in Beziehungen zueinander gesetzt, sodass eine netzplanähnliche Struktur entsteht. Die durchzuführenden Verrichtungen haben eine oder mehrere vorangehende oder nachfolgende Verrichtungen. Verrichtungen sind Teilvorgänge, die zur Herstellung eines Produktes benötigt werden und sich plausibel nicht detaillierter in Bearbeitungs- oder Montageschritte aufgliedern lassen (REFA, 1987). In Graphen werden Verrichtungen als Knoten dargestellt und durch Kanten in logische sowie zeitliche Abhängigkeiten zueinander gebracht. Hierbei werden die Montagetätigkeiten zum frühestmöglichen Zeitpunkt ihrer Durchführung eingetragen. Das Ende der Kante, die mit dem Knoten der Verrichtung verbunden ist, stellt die spätestmögliche Verrichtungsgelegenheit dar. (Ammer, 1985; Bullinger et al., 1986; Bornewasser & Hinrichsen, 2020)

Generell wird zwischen drei verschiedenen Strukturen im Montagevorranggraphen unterschieden (vgl. *Abbildung 4-6*). Bei der **einfachen Struktur**, bei der zwei Verrichtungen direkt nacheinander erfolgen, kann die Folgeverrichtung erst ausgeführt werden, wenn

die vorhergehende Verrichtung abgeschlossen ist. Bei **der Verzweigung**, bei der zwei oder mehrere Verrichtungen nach einer Verrichtung durchgeführt werden, besteht die Wahlfreiheit, welche der nachfolgenden parallel angeordneten Verrichtungen als Erstes umgesetzt werden soll. Bei der **Zusammenführung**, bei der zwei oder mehrere Teilverrichtungen vor einer darauffolgenden Verrichtung vorgenommen werden müssen, besteht wieder die Wahlfreiheit bei der Frage, welche der parallel angeordneten Verrichtungen zuerst durchgeführt werden soll. (Bullinger et al., 1986)

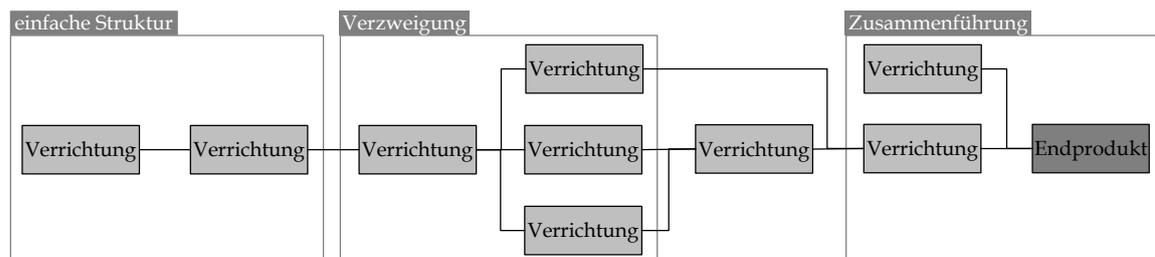


Abbildung 4-6: Strukturen im Montagevorranggraph

Der Montagevorranggraph visualisiert auf diese Weise alle für die Montage eines Produktes durchzuführenden Verrichtungen mit ihren möglichen ausführbaren Verbaureihenfolgen. (Bornewasser & Hinrichsen, 2020) Diese Aufteilung der einzelnen Verrichtungen dient zur Analyse und dem daraus resultierenden Erkenntnisgewinn bezüglich der Prozessstruktur. Durch die detaillierte Analyse anhand von MTM-Prozessbausteinen lassen sich den einzelnen Verrichtungen Zeitwerte zuordnen. Diese zusätzlichen Informationen liefern Erkenntnisse über Dauer, Einfluss- und Bezugsgrößen des Prozesses. (Landau, 2007)

4.1.4 Variantenanalyse

Durch das Erfüllen individueller Kundenbedürfnisse entsteht häufig eine Vielzahl an Produktvarianten. (Britzke, 2010; Kirchner, 2020) Diese Variantenvielfalt und die damit verbundene Breite des Produktionsprogrammes gehören zu den hauptsächlichen Komplexitätstreibern in produzierenden Unternehmen. Dies hat einen starken Einfluss auf zahlreiche Unternehmensbereiche, z. B. auf die Konstruktion durch die Erstellung zusätzlicher technischer Dokumente, den Einkauf durch eine höhere Anzahl an Bestellvorgängen, die Logistik durch benötigte größere Lagerkapazitäten, das Rechnungswesen durch gestiegenen Aufwand in der Kalkulation, den Vertrieb durch aufwendigere Preisgestaltungen sowie im Service durch eine erhöhte Ersatzteilbevorratung. Vor allem aber im Kontext der Produktion stellt die Vielzahl an Produktvarianten eine erhebliche Herausforderung dar. Dies zeigt sich in einer komplexeren Produktionssteuerung, höheren Rüstaufwänden aufgrund kleinerer Losgrößen sowie in zusätzlich benötigten Betriebsmitteln, Prüfprogrammen und Vorrichtungen. (Kirchner, 2020)

Um festlegen zu können, wie viele Varianten eines Bauteiles für einen Montageprozessschritt zu berücksichtigen sind und wie komplex dieser hierdurch ist, müssen diese bezüglich ihrer Merkmale analysiert werden. Von Bedeutung ist das Verständnis über die Frage, wodurch sich eine Variante auszeichnet. Der Begriff „Variante“ wird in der DIN 99 definiert als ein Produkt mit ähnlicher Form oder Funktion, welches einen hohen Anteil an identischen Baugruppen und -teilen aufweist. (DIN 199-1:2002-03, 2002-03) Varianten können jedoch auch durch kundenspezifische konstruktive Merkmale gekennzeichnet sein (Kirchner, 2020). Entscheidend ist jedoch nicht, dass alle Eigenschaften gleich sind, sondern vielmehr, dass alle relevanten Eigenschaften gleich oder ähnlich genug sind, um diese zu einer Varianten zusammenfassen zu können. Dies ist in hohem Maße abhängig vom konkreten Planungszusammenhang. Somit ist sowohl die Beurteilung, welche Eigenschaften eines Bauteiles für den Variantenvergleich herangezogen werden, als auch die Beurteilung, ob die Ausprägung einer Eigenschaft ähnlich oder doch unterschiedlich ist eine subjektive Beurteilung des Bewerter. (Buchholz & Souren, 2008)

Für die Planung eines hybriden Montagesystems ist die fundierte Kenntnis der Variantenvielfalt elementar. Dies bezieht sich einerseits auf die Anzahl und Unterschiede der zu montierenden Baugruppen, welche über den Montagevorranggraphen (4.1.3) zu analysieren und darzustellen sind, und andererseits auf die vorherrschende Variantenvielfalt jedes Einzelteils.

Die Anzahl der Varianten der Einzelteile haben einen starken Einfluss auf die Komplexität des Einzelprozessschrittes. Um die Frage nach der Anzahl an relevanten Varianten, die in einem Prozessschritt verbaut werden sollen, beantworten zu können, sind alle vorliegenden Varianten eines Bauteiles bezüglich ihrer für die Montage relevanten charakteristischen Eigenschaften zu untersuchen. Hierfür sind zunächst die für die Montage relevanten Eigenschaften festzulegen und im Anschluss bezüglich ihrer Ähnlichkeit zu bewerten. Aufgrund dieser Bewertung ist zu entscheiden, ob das Bauteil montagerelevante Unterschiede aufweist und somit zu einer neuen Variante wird oder ob dieses so starke Ähnlichkeiten zu anderen Bauteilen aufweist, dass es einer bestehenden Variantenfamilie zurechenbar ist. Durch die Antwort auf die Frage nach der Anzahl relevanter Varianten kann die benötigte Flexibilität für die Montage des Prozessschrittes bestimmt werden. Dies ist entscheidend, um aus technischer und wirtschaftlicher Sicht die angemessene Zuteilung der Arbeitsinhalte zwischen Mensch und Maschine zu finden.

4.1.5 Toleranzanalyse und Toleranzketten

Produkte haben spezifische Funktionen zu erfüllen; daher muss die Funktionalität im Zentrum der Entwicklung stehen. Um die Funktion von Produkten sicherzustellen, werden Sollvorgaben durch Toleranzen definiert. Hierzu muss die Beziehung zwischen Funktion und Produktion genau analysiert und aufeinander abgestimmt werden. (Bohn &

Hetsch, 2020) Das Toleranzmanagement ist ein allumfassender Prozess zur Betrachtung von Bauteilen in ihrer Funktion, vom Einzelteil bis hin zum komplettierten Produkt, hinsichtlich des Toleranzkonzeptes (Bohn & Hetsch, 2013). Ziel ist eine übergreifende Optimierung von Produkt, Produktionsprozess sowie Betriebsmittel zur Sicherstellung der vom Kunden geforderten Produktqualität sowie -funktion.

Die in einem Montageprozess durch Produkt, Prozess sowie Betriebsmittel auftretenden Abweichungen lassen sich durch die Methode der Toleranzkette ganzheitlich grafisch darstellen. Hierbei werden Merkmale des Montagesystems sowie des Produktes als Knoten und die Abweichung zwischen zwei Merkmalen als ungerichtete Kante dargestellt (siehe *Abbildung 4-7*) Diese unkomplizierte Darstellungsweise hilft, Abweichungen im Montageprozess festzustellen, im Team zu diskutieren und gegebenenfalls zu optimieren. Die Optimierung von Toleranzketten kann durch den Wegfall einzelner Glieder, die Verkürzung von Gliedern sowie die wechselseitige Änderung von Gliedern erfolgen. (Müller et al., 2009; Müller et al., 2012)

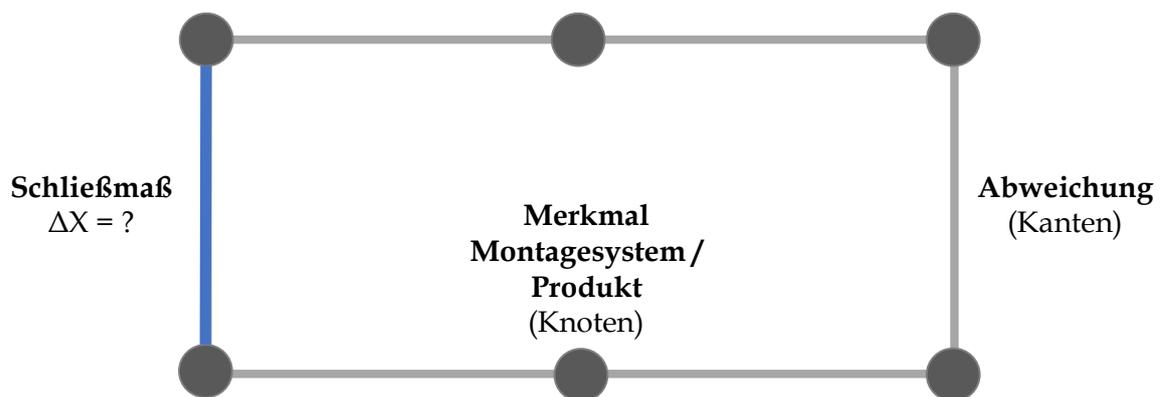


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung einer Toleranzkette

Um die Anforderungen an das Betriebsmittel aus der Toleranzkettenanalyse ableiten zu können, ist eine Toleranzrechnung nötig. Diese gibt Aufschluss, ob die vorhandenen Produkt- sowie Prozesstoleranzen die geforderte Funktion bzw. die geforderte Zusambautoleranz erfüllen (Müller et al. 2012). Die so ermittelte Summentoleranz der Toleranzkette wird als Schließmaß mit entsprechender Schließtoleranz bezeichnet. (DIN 7186-11974-08, 1974)

Die einfachste und mit dem geringsten Aufwand verbundene Möglichkeit der Toleranzkettenberechnung ist die arithmetische oder **Worst-Case-Toleranzrechnung**. Bei dieser Berechnung wird vom schlechtesten möglichen Fall ausgegangen, daher werden bei Einhaltung der Einzeltoleranz die für den Zusammenbau ungünstigsten möglichen Toleranzen addiert (siehe *Formel (4-1)*). Das Ergebnis ist die größtmögliche Summentoleranz. (Bohn & Hetsch, 2020)

$$\text{Summentoleranz} = \sum_{i=1}^n \text{Einzeltoleranz}_i \quad (4-1)$$

Durch das Einführen des Linearitätskoeffizienten a_i können nicht lineare Einflüsse, wie trigonometrische Einflüsse von Einzelmaßen, auf die Schließmaßtoleranz berücksichtigt werden (siehe *Formel (4-2)*). (Mannewitz, 2005)

$$T_a = \sum_{i=1}^k |\alpha_i| \cdot t_i \quad (4-2)$$

Um die absolute Schließmaßtoleranz T_a zu ermitteln, können das arithmetische Höchstschließmaß P_O durch Formel (4-3) und das Mindestschließmaß P_U durch Formel (4-4) berechnet werden. Durch die Differenz beider Schließmaße lässt sich somit die arithmetische Schließmaßtoleranz T_a ermitteln (siehe *Formel (4-5)*) (Mannewitz, 2005)

$$P_O = \sum_{i=1}^n |\alpha_i| \cdot G_{O_{\text{pos}_i}} - \sum_{j=1}^m |\alpha_j| \cdot G_{U_{\text{neg}_j}} \quad (4-3)$$

$$P_U = \sum_{i=1}^n |\alpha_i| \cdot G_{U_{\text{pos}_i}} - \sum_{j=1}^m |\alpha_j| \cdot G_{O_{\text{neg}_j}} \quad (4-4)$$

$$T_a = P_O - P_U \quad (4-5)$$

a_i	Linearitätskoeffizient	t_i	arithmetische Maßkettengliedtoleranz
G_O	Höchstmaß	P_O	Höchstschießmaß
G_U	Mindestmaß	P_U	Mindestschließmaß
T_a	arithmetische Schließmaßtoleranz		

Ein Vorteil dieser Art der Berechnung ist die vollständige Austauschbarkeit einzelner Glieder. Jedoch steigt die Größe des Schließmaßes proportional mit der Zunahme der Anzahl an Gliedern und führt somit gezwungenermaßen zu einer erheblichen Einschränkung der Einzeltoleranzen. Die daraus resultierenden hohen Kosten in der Fertigung sowie die Tatsache, dass sich mit dieser Berechnungsart lediglich unkomplizierte geometrische Zusammenhänge darstellen lassen, führen zu einer mittlerweile eher untergeordneten Bedeutung dieses Verfahrens in der Praxis. (Bohn & Hetsch, 2013; Mannewitz, 2005)

Da das Eintreten des Worst-Case-Szenarios äußerst unwahrscheinlich ist, wird in der Praxis ausgehend von einer Normalverteilung häufig das Root-Sum-Square-Verfahren (siehe

Formel (4-6)) zur **statistischen Toleranzrechnung** angewendet. Diese statistische Addition erzielt eine wesentlich geringere Summentoleranz, wodurch deutlich niedrigere Anforderungen an die Tolerierung der Einzelteile gestellt werden können. (Bohn & Hetsch, 2013)

$$\text{Summentoleranz} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\text{Einzeltoleranz}_i)^2} \quad (4-6)$$

Um die statistische Schließmaßtoleranz zu ermitteln, müssen im Vorfeld statistische Auswertungen über die Fertigungsverteilungen der in der Toleranzkette betrachteten Funktionsmerkmale erhoben werden. Aus der Streuung der Einzelabweichung lässt sich nach Formel (4-7) die Standardabweichung σ_0 des Zusammenbaues errechnen. Mit der errechneten Standardabweichung σ_0 und der Annahmewahrscheinlichkeit, die mit der geforderten Prozessfähigkeit c_p korrespondiert, lässt sich nach Formel (4-8) die statistische Schließmaßtoleranz T_s ermitteln. (Mannewitz, 2005)

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^k \alpha_i^2 \cdot \sigma_i^2} \quad (4-7)$$

$$T_s = 2 \cdot u \cdot \sigma_0 \quad (4-8)$$

a_i Linearitätskoeffizient

σ_0 Standardabweichung des Funktionsmaßes

T_s statistische Schließmaßtoleranz

u Annahmewahrscheinlichkeit in σ -Einheiten der standardisierten Normalverteilung

Bei der Verwendung der statistischen Toleranzrechnung muss das statistisch mögliche, jedoch sehr unwahrscheinliche Eintreten des Worst-Case-Szenarios in Kauf genommen werden. (Bohn & Hetsch, 2013) Die eventuell anfallenden Kosten für Nacharbeit oder der Ausschuss von Bauteilen muss hierbei im angemessenen Verhältnis zu den sich reduzierenden Herstellkosten stehen.

4.1.6 Zusammenfassung der Analysemethodik

Das Ziel der betrachteten Analysemethodik ist es, durch die Auswahl und Anwendung geeigneter, etablierter Analysemethoden ein umfängliches Bild von Produkt, Montageprozess sowie Betriebsmittel zu gewinnen. Durch die Analyse sollen Zusammenhänge, Probleme und Herausforderungen identifiziert, gewonnene Informationen dokumentiert sowie Chancen für Optimierungen erkannt werden. Im Folgenden wird erörtert, welche Informationen durch die Anwendung der Einzelmethoden bezüglich des Produktes, des Montageprozesses und des Betriebsmittels gewonnen werden können.

Der **funktionale MEB** visualisiert und dokumentiert die anhand einer Kausalanalyse gewonnenen Erkenntnisse der Zusammenhänge zwischen Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel, wodurch ein ganzheitliches Bild hergestellt werden kann.

Die **Ursache-Wirkungs-Analyse** identifiziert holistisch die potenzielle Ursache von Problemen. Es werden systematisch die Einflüsse durch das Produkt (Material), den Montageprozess (Methode) und die Betriebsmittel (Maschine, Mensch) erfasst, kategorisiert und visuell dokumentiert.

Mit dem Aufstellen des **Montagevorranggraphen** werden in erster Linie das Produkt und dessen Aufbau analysiert. So werden Erkenntnisse der Verbaureihenfolgen sowie sich daraus ergebenden zeitlichen Abfolgen untersucht und dokumentiert. Zusätzlich kann durch die teilweise durch das Produkt vorgegebene Zwangsmontagereihenfolge bereits der Montageprozess mit seinen zeitlichen Montagereihenfolgen definiert werden.

Aufgrund der Analyse der vorliegenden **Varianten** an unterschiedlichen Bauteilen und Baugruppen werden Erkenntnisse über den Aufwand und über die benötigte Flexibilität für die Montage des Produktes gewonnen. Das Ergebnis der Variantenanalyse beeinflusst in der späteren Konzeptionierung des Arbeitsplatzes teilweise das Betriebsmittel und legt je nach gewähltem Montageprozess fest, welche Flexibilität durch das Betriebsmittel erforderlich ist, um sich auf weitere Varianten einstellen zu können.

Durch die **Toleranz- und Fügeanalyse** lassen sich nicht nur potenzielle Montageprobleme feststellen, sondern auch benötigte Genauigkeitsanforderungen an das Betriebsmittel ableiten. Mithilfe von **Toleranzketten** können die Prozesse transparent dargestellt und analysiert werden.

Der jeweilige Analysebereich, auf den die Einzelmethoden wirken, wird in *Tabelle 4-1* dargestellt. Des Weiteren wird der Erkenntnisgewinn aus der Kausalanalyse des MEB, aus dem Aufstellen des Montagevorranggraphen, aus der Durchführung einer Ursache-Wirkungs- und Variantenanalyse sowie aus einer Toleranz- und Fügeanalyse tabellarisch gegenübergestellt. Diese Gegenüberstellung ermöglicht es, je nach Anforderung und

Komplexität des betrachteten Arbeitsplatzes, zielgerichtet geeignete Analysemethoden auszuwählen und anzuwenden.

Tabelle 4-1: Erkenntnisgewinn aus den einzelnen Analysemethoden

Analyseverfahren		Analysemethoden				
		funktionaler Merkmal- entstehungsbaum	Ursache-Wirkungs- Analyse	Montagevorranggraph	Variantenanalyse	Toleranz- und Fügeanalyse
Analysebereich	Produkt	●	●	●	●	●
	Montageprozess	●	●	○	○	○
	Betriebsmittel	●	●	○	○	●
Erkenntnis über	Betriebsmittelfunktion	●	○	○	○	●
	Produktfunktion	●	○	○	○	◐
	Produktaufbau	◐	○	●	◐	◐
	Fehlereinflüsse	◐	●	○	○	◐
	Montagereihenfolge	○	○	●	○	○
	Zwangsmontagereihenfolgen	○	○	●	○	○
	Montageaufwand/-komplexität	○	◐	●	●	●
	benötigte Flexibilität	○	○	○	●	○
Genauigkeitsanforderungen	○	◐	○	○	●	

Bewertungsskala: ● zutreffend ◐ teilweise zutreffend ○ nicht zutreffend

4.2 Bewertung

Die Effizienz und die Leistungsfähigkeit eines Montagearbeitsplatzes lassen sich häufig durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades steigern. Um einen Arbeitsplatz durch eine Hybridisierung zu optimieren, muss die Unterstützung des Menschen durch die hinzugezogene Technik gezielt erfolgen. Die Automatisierung darf nicht aufgrund des ausschließlichen Automatisierungswillens oder der vermeintlichen Einfachheit der Umsetzung vorgenommen werden. Vielmehr muss der Fokus auf der Prozessverbesserung bei einer zugleich technisch realisierbaren Automatisierung liegen. Um dies zu ermöglichen, sind die einzelnen Prozessschritte eines Montagearbeitsplatzes hinsichtlich ihres vorhandenen Optimierungspotenzials und ihrer technischen Automatisierbarkeit zu bewerten. Im Anschluss muss ein Abgleich zwischen vorhandenem Optimierungspotenzial und der Realisierbarkeit einer Automatisierung erfolgen. Der Abgleich soll dazu beitragen, die geeigneten Prozessschritte zur Prozessoptimierung zu finden und das adäquate Maß an technischer Unterstützung des Mitarbeiters festzulegen.

Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Bewertung der technischen Automatisierbarkeit sowie der Optimierungspotenzialbewertung hergeleitet. Die auf diese Weise gewonnenen Erkenntnisse führen zu einem Abgleich der beiden Bewertungen mit anschließender Interpretation der Ergebnisse.

4.2.1 Technische Automatisierbarkeitsbewertung

Die technische Bewertung der Automatisierbarkeit stellt ein komplexes Problem dar; zu einer diesbezüglichen Entscheidungsfindung bietet sich das Durchführen einer Nutzwertanalyse an. Die Nutzwertanalyse ermöglicht dem Anwender, die verschiedenartigen Handlungsalternativen auf Basis mehrere Kriterien systematisch, transparent und rational zu bewerten, und dient somit zur Entscheidungsfindung bei komplexen Problemen (Nollau & Bucher, 2004; Zangemeister, 1976). Das Erstellen einer Nutzwertanalyse ist jedoch zumeist ein subjektiver Prozess, da sowohl die zur Bewertung herangezogenen Kriterien als auch deren Anzahl vom Ersteller der Nutzwertanalyse abhängen. Des Weiteren ist das Ergebnis vom Anwender beeinflusst, da dieser sich zwischen Ausprägungen der unterschiedlichen Kriterien festlegen muss. Um dies zu erleichtern, ist es entscheidend, die Ausprägungen der Kriterien möglichst deutlich voneinander abgrenzbar zu formulieren.

Zur Erstellung einer Nutzwertanalyse, anhand derer die technische Automatisierbarkeit von Montageprozessen bewertet werden kann, sind objektive und lösungsneutrale Kriterien mit entsprechenden Ausprägungen nötig. Um eine möglichst unkomplizierte und dennoch objektive Bewertung vornehmen zu können, werden aus den vorangegangenen Literaturrecherchen (siehe *Kapitel 3.3*) daher ausschließlich lösungsneutrale Kriterien herangezogen. Diese teilen sich in acht bauteilbezogene und fünf prozessbezogene Kriterien

auf. Den Bewertungskriterien sind jeweils bis zu vier mögliche Ausprägungsstufen zugewiesen. Durch die Aufteilung in bis zu vier unterschiedlichen Ausprägungen werden einerseits die möglichen Zustände der Kriterien ausreichend genau beschrieben und andererseits wird eine starke Trennschärfe zwischen den Ausprägungen erzielt. Dies ermöglicht es dem Anwender, sich eindeutig zwischen den Ausprägungen festzulegen, um das jeweilige Kriterium zu bewerten. Um dies zu verstärken und eine noch größere Abgrenzung zwischen den Ausprägungen zu realisieren, wurden bewusst bei einigen Kriterien nicht alle Ausprägungsstufen befüllt. Im Folgenden werden die einzelnen Kriterien sowie ihre möglichen Ausprägungen vorgestellt; sie wurden bereits als Paper (Hübner et al., 2023) veröffentlicht.

4.2.1.1 Bauteilbezogene Kriterien

Abmessungen des Fügebauteils

Das Kriterium Abmessung bezieht sich auf die minimale oder maximale Ausprägung des Fügebauteils bezüglich seiner Ausdehnung in Länge, Breite oder Höhe und ist in den in *Tabelle 4-2* dargestellten vier Ausprägungen einzuteilen. Das Bauteilhandling von extrem kleinen oder sehr großen Bauteilen stellt hierbei die größte Herausforderung dar.

Tabelle 4-2: Ausprägungen – Abmessungen des Fügebauteils

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
5-100 mm	1-5 mm | 100-300 mm	0.5-1 mm | 300-800 mm	< 0.5 mm > 800 mm

Gewicht des Fügebauteils

Das Gewicht des Fügebauteils wird in die in *Tabelle 4-3* dargestellten vier Gewichtsgruppen eingeteilt. Mit steigendem Bauteilgewicht werden leistungsstärkere Handling- und Greifsysteme sowie damit verbundene aufwendigere Sicherheitskonzepte benötigt. Ebenfalls nehmen mit dem Bauteilgewicht die auftretenden Prozesskräfte bei Fügeoperationen zu. Somit steigt die Komplexität der Automatisierungslösung mit dem Bauteilgewicht.

Tabelle 4-3: Ausprägungen Gewicht des Fügebauteils

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
0-5 kg	5-10 kg	10-30 kg	>30 kg

Formstabilität des Fügebauteils

Je formstabiler ein Bauteil ist, desto schwieriger lässt sich dieses zuführen, greifen, handhaben und fügen. Die Einteilung des Fügebauteils bezüglich seiner Formstabilität erfolgt

in den Abstufungen starr bzw. formstabil (z. B.: Stahlbauteile), Verformung bei hoher Krafteinwirkung (z. B.: Kunststoffbauteile), Verformung bei geringer Krafteinwirkung (z. B.: Kartonagen, Bleche mit geringen Dicken) und formlabil bzw. biegeschlaff (z. B.: Dichtungen, Kabel) (siehe *Tabelle 4-4*).

Tabelle 4-4: Ausprägungen Formstabilität des Fügebauteils

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
Formstabil / starr	verformbar bei hoher Krafteinwirkung	verformbar bei geringer Krafteinwirkung	formlabil / biegeschlaff

Empfindlichkeit des Fügebauteils

Die Empfindlichkeit eines Fügebauteils hat starken Einfluss auf dessen Greifkonzept. Somit erhöhen sich die Aufwände für ein geeignetes Greifkonzept mit steigender Empfindlichkeit des Fügebauteils.

Als **unempfindlich** gelten Bauteile, die robust gegenüber großer Krafteinwirkung von außen sind sowie keinerlei Restriktionen gegenüber Oberflächenbeschädigungen aufweisen. **Kaum empfindliche** Bauteile sind robust gegenüber hohen Krafteinwirkungen, jedoch sind nur geringe Beschädigungen der Oberfläche bei Aufrechterhaltung der Funktionalität zulässig. Bei **empfindlichen Bauteilen** sind nur geringe Krafteinwirkungen zulässig. Größere Krafteinwirkungen führen zur Zerstörung des Bauteils oder zur Beeinträchtigung seiner Funktion. Jegliche Beschädigungen der Oberfläche sind nicht zulässig. Als **sehr empfindlich** werden Bauteile eingestuft, bei denen bereits eine sehr geringe Krafteinwirkung zur Zerstörung des Bauteils oder zu inakzeptablen Beschädigungen der Bauteiloberfläche führt.

Tabelle 4-5: Ausprägungen der Empfindlichkeit des Fügebauteils

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
hohe Kraft zulässig / unempfindliche Oberfläche	hohe Kraft zulässig / geringe Oberflächenbeschädigungen zulässig	geringe Kraft zulässig / keine Oberflächenbeschädigungen zulässig	geringe Kraft führt zu Beschädigung von Bauteil und Oberfläche

Geometrische Greifbarkeit des Fügebauteils

Ein Fügebauteil lässt sich problemlos greifen, wenn es ausgedehnte Wirkflächen in adäquater Greiflage aufweist. Wirkflächen sind definierte Flächenelemente eines Objektes; entscheidend ist hierbei die Art der Berührungsflächen, die in Punkt-, Linien- und Flächenform vorliegen können. (Hesse, 2011)

Eine ideale Greifbarkeit ist gegeben, wenn das zu greifende Bauteil große Wirkflächen in paralleler oder konzentrischer Lage aufweist. Ein Fügebauteil lässt sich nur aufwendig

greifen, wenn es kleine Wirkflächen oder Wirkflächen in ungünstiger Lage aufweist. Ein Fügebauteil lässt sich nur mit erheblichem Aufwand greifen, wenn es lediglich über Wirkflächen von geringer Größe in unvorteilhafter Lage verfügt (siehe *Tabelle 4-6*).

Tabelle 4-6: Ausprägungen der geometrischen Greifbarkeit des Fügebauteils

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
große Wirkfläche und parallele/konzentrische Lage der Greifflächen	kleine Wirkfläche und parallele/konzentrische Lage der Greifflächen	-	kleine Wirkflächen und komplexe Lage der Greifflächen

Anzahl Variantenfamilien

Mit wachsender Anzahl an Fügebauteilvarianten steigt die Komplexität der Automatisierungslösung eines Fügeprozesses. Die erhöhte Anzahl an Varianten führt häufig zu zusätzlich benötigten Rüstteilen, um das Automatisierungssystem auf die unterschiedlichen Bauteilgeometrien anpassen zu können. Daher ist eine fundierte Analyse der Bauteilvarianten empfehlenswert. Es sind aus den Varianten mit geringen geometrischen oder charakteristischen Unterschieden Variantenfamilien zu bilden, durch die ggf. die Anzahl an vorliegenden Varianten reduziert werden kann. *Tabelle 4-7* stellt die Ausprägung des Kriteriums in Abhängigkeit der Variantenanzahl dar.

Tabelle 4-7: Ausprägung Anzahl Variantenfamilien

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
eine	-	zwei	mehr als zwei

Bereitstellungsart des Fügebauteils

Die Bereitstellungsart des Fügebauteiles gibt an, in welchem Ordnungszustand (OZ) dieses für die Montage zur Verfügung gestellt wird. Der Ordnungszustand lässt sich mit *Formel (4-9)* ausdrücken.

$$OZ = OG/PG \quad (4-9)$$

Dieser reicht vom vereinzelt, gerichteten Zustand bis hin zum völlig ungeordneten sich verhakenden Schüttgut. Der Ordnungszustand setzt sich aus dem Orientierungsgrad (OG) und dem Positionierungsgrad (PG) zusammen und lässt sich durch die in *Tabelle 4-8* dargestellten Kenngrößen ermitteln.

Tabelle 4-8: Positionierungs- und Orientierungsgrad in Anlehnung an (VDI 2860:1990-05, 1990)

Positionierungsgrad (PG)		Orientierungsgrad (OG)	
3	Ursprung des körpereigenen Koordinatensystems befindet sich an einem bestimmten Punkt	3	Orientierung des Körpers in allen Rotationsachsen bestimmt
2	Ursprung des körpereigenen Koordinatensystems beliebig auf einer Kurve angeordnet	2	Orientierung des Körpers in zwei Rotationsachsen bestimmt
1	Körper ist beliebig auf einer Fläche (z.B. Ebene, Zylinder) angeordnet	1	Orientierung des Körpers in einer Rotationsachse bestimmt
0	Körper beliebig im Raum angeordnet	0	Orientierung des Körpers in allen Rotationsachsen unbestimmt
Anzahl translatorischer Freiheitsgrade, in denen die Position bestimmt ist		Anzahl rotatorischer Freiheitsgrade, in denen die Orientierung bestimmt ist	

In der für die Montage optimalen Bereitstellung mit der Ausprägung 1 wird das Fügebauteil sowohl translatorisch als auch rotatorisch definiert bereitgestellt (siehe *Tabelle 4-9*). In Ausprägung 2 wird das Bauteil teilgeordnet (z. B.: Stapel) zur Verfügung gestellt. In Ausprägung 3 handelt es sich um chaotisch bereitgestelltes Schüttgut, das sich aufgrund seiner Geometrie nicht ineinander verhaken kann. Die letzte Ausprägung ist gekennzeichnet durch eine chaotische Bereitstellung in Form von Schüttgut, das zum Verhaken neigt.

Tabelle 4-9: Ausprägungen Bereitstellungsart des Fügebauteils

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
OZ = 3/3 völlig geordnet	0/0 < OZ < 3/3 teilgeordnet	OZ = 0/0 völlig ungeordnet/ Verhaken nicht möglich	OZ = 0/0 völlig ungeordnet / Verhaken möglich

Fügegerechtes Fügebauteil (FBT) und Basisbauteil (BBT)

Durch die fügegerechte Gestaltung des Fügebauteils sowie des Basisbauteils können Positionsfehler ausgeglichen und es kann eine problemlosere Montage gewährleistet werden. In Ausprägung 1 weist sowohl das Fügebauteil als auch das Basisbauteil Fügeschrägen/Fügekanten/-anschläge zur Kompensation von Positionsfehlern auf (siehe *Tabelle 4-10*). In Ausprägung 2 weist einer der beiden Fügepartner Fügeschrägen auf. In Ausprägung 3 sind an beiden Fügepartnern keine Fügeschrägen vorhanden, wodurch Positionsfehler durch die Fügepartner selbst nicht ausgeglichen werden können.

Tabelle 4-10: Ausprägungen fügegerechtes Fügebauteil und Basisbauteil

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
FBT und BBT	FBT oder BBT	keine	-

4.2.1.2 Prozessbezogene Kriterien

Genauigkeitsanforderung an den Fügevorgang

Die Genauigkeitsanforderung für den Fügevorgang gibt an, wie genau die beiden Fügepartner zueinander positioniert werden müssen. Mit steigender Genauigkeitsanforderung erhöhen sich die Anforderungen an ein Automatisierungssystem.

Ausprägung 1 zeichnet sich durch keine bis sehr geringe Anforderungen an die Genauigkeit des Fügevorgangs aus (siehe *Tabelle 4-11*). Typischerweise handelt es sich in diesem Fall um eine lediglich ungefähre Lage, in die das Fügebauteil zu bringen ist. Bei Ausprägung 2 liegen nur geringe Anforderungen an die Genauigkeit während des Fügevorganges vor. Daher ist verhältnismäßig viel Spiel zwischen Basisbauteil und Fügebauteil vorhanden. In Ausprägung 4 werden hohe Ansprüche an die Genauigkeit des Fügevorganges gestellt. Daher liegt nur ein sehr geringes bis kein Spiel vor. In dieser Ausprägung ist die Durchführung einer fundierten Toleranzrechnung des betrachteten Prozessschrittes empfehlenswert.

Tabelle 4-11: Ausprägungen Genauigkeitsanforderung des Fügevorgangs

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
keine bis sehr geringe Anforderungen an die Genauigkeit	geringe Anforderungen an die Genauigkeit	-	hohe Anforderungen an die Genauigkeit

Art der Fügebewegung

Mit zunehmender Komplexität der Fügebewegung wächst der Aufwand für eine Automatisierung des Fügevorganges (siehe *Tabelle 4-12*). Der einfachste mögliche Fall ist hierbei eine einzelne ausschließlich lineare oder rotatorische Bewegung. Etwas aufwendiger ist es, wenn mehrere lineare und/oder rotatorische Bewegungen benötigt werden (z. B.: automatischer Schraubprozess). Die komplexeste Ausprägung hinsichtlich der Fügebewegung ist die Bahnbewegung, die meist durch ein freiprogrammierbares Mehrachssystem ausgeführt werden muss.

Tabelle 4-12: Ausprägungen Art der Fügebewegung

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
einzelne lineare oder rotatorische Bewegung	mehrere lineare und/oder rotatorische Bewegungen	Bahnbewegung	-

Benötigte Fügekräfte / -momente / -sensitivität

In Ausprägung 1 genügt eine externe Kraft in Höhe der Gewichtskraft des Fügebauteils, um dieses in die Fügeposition zu bringen (siehe *Tabelle 4-13*). In Ausprägung 2 ist eine geringe zusätzliche Kraft für den Fügevorgang notwendig. In Ausprägung 3 ist eine hohe externe Kraft erforderlich, um den Fügevorgang durchzuführen. In der komplexesten Ausprägung 4 werden Sensitivitäten für die Fügevorgänge benötigt. Diese ziehen meist zusätzlich benötigte Sensoriken nach sich.

Tabelle 4-13: Ausprägungen benötigter Fügekräfte/-momente/-sensitivität

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
reine Gewichtskraft	gering	hoch	Sensitivität

Zugänglichkeit Fügeort

Die Zugänglichkeit zum Fügeort ist für die Umsetzung einer Automatisierungslösung entscheidend. Je besser der Fügeort zu erreichen ist, desto problemloser können die benötigten Lösungen umgesetzt werden. In der für die Montage am besten geeigneten Ausprägung 1 ist der Fügeort von allen Seiten aus frei zugänglich, wodurch keinerlei Einschränkungen vorliegen (siehe *Tabelle 4-14*). In der Ausprägung 2 ist der Fügeort nicht von allen Seiten aus frei zugänglich, jedoch nach wie vor gut erreichbar. In Ausprägung 4 ist die Zugänglichkeit des Fügeortes stark eingeschränkt.

Tabelle 4-14: Ausprägungen Zugänglichkeit Fügeort

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
frei zugänglich	eingeschränkt zugänglich	-	schwer zugänglich

Zusatztätigkeit (z. B. Sichtprüfung, Materialversorgung)

Unter dem Kriterium Zusatztätigkeiten sind periodische Tätigkeiten des Montagemitarbeiters zu verstehen, die nicht direkt dem Montageprozess zuzuordnen sind (z. B.: Sichtprüfungen, Ladungsträgerwechsel). Hierbei ist die Häufigkeit des Eingriffes entscheidend (siehe *Tabelle 4-15*).

Tabelle 4-15: Ausprägungen Zusatztätigkeit

Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
Eingriff maximal 1 x pro Schicht	Eingriff 2 x - 4 x pro Schicht	Eingriff nach 10 - 60 min	Eingriff nach <10 min

4.2.1.3 Gewichtung der Kriterien

Um die Vollständigkeit der in *Kapitel 4.2.1.1* und *4.2.1.2* vorgestellten Kriterien sicherzustellen und diese nach ihrer Bedeutung für die technische Realisierbarkeit einer Automatisierung zu gewichten, wurde eine anonyme Expertenbefragung mit 51 Teilnehmern aus dem Bereich der Montagetechnik in Forschung und Industrie durchgeführt. (Hübner et al., 2023)

Der erste Teil der Umfrage erfolgte zweigeteilt. Hier mussten die Teilnehmer zu Beginn die bauteilbezogenen Kriterien und im Anschluss die prozessbezogenen Kriterien mittels einer Nutzwertanalyse (Eisenführ & Weber, 2010; Zangemeister, 1976) durch einen Paarvergleich bewerten. Die Bewertung der Kriterien erfolgte anhand einer an Saaty (1980) angelehnten reziproken Skala. Durch die Aufteilung in zwei separate paarweise Vergleiche konnte die Dominanz der bauteil- und prozessbezogenen Kriterien unabhängig voneinander bewertet werden. Im zweiten Teil der Umfrage bekamen die Teilnehmer noch die Möglichkeit eventuell fehlende Kriterien zu ergänzen. Hierdurch wurde die Vollständigkeit der aufgeführten Kriterien sichergestellt.

	Evaluationsmatrix				normalisierte Matrix				Gewicht	
	$\mathbf{a_1}$	$\mathbf{a_2}$	...	$\mathbf{a_n}$	$\mathbf{a_1}$	$\mathbf{a_2}$	...	$\mathbf{a_n}$	$\mathbf{r_i}$	\mathbf{w}
$\mathbf{a_1}$	$\mathbf{a_{11}=1}$	$\mathbf{a_{12}}$	...	$\mathbf{a_{1n}}$	$\mathbf{a_{11}/c_1}$	$\mathbf{a_{12}/c_2}$	...	$\mathbf{a_{1n}/c_n}$	$\mathbf{r_1}$	$\mathbf{w_1=r_1/n}$
$\mathbf{a_2}$	$\mathbf{a_{21}=1/a_{12}}$	$\mathbf{1}$	...	$\mathbf{a_{2n}}$	$\mathbf{a_{21}/c_1}$	$\mathbf{a_{22}/c_2}$	...	$\mathbf{a_{2n}/c_n}$	$\mathbf{r_2}$	$\mathbf{w_2=r_2/n}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
$\mathbf{a_n}$	$\mathbf{a_{n1}=1/a_{1n}}$	$\mathbf{a_{n2}}$	...	$\mathbf{a_{nn}=1}$	$\mathbf{a_{n1}/c_1}$	$\mathbf{a_{n2}/c_2}$	...	$\mathbf{a_{nn}/c_n}$	$\mathbf{r_n}$	$\mathbf{w_n=r_n/n}$
$\mathbf{c_i}$	$\mathbf{c_1 = \sum_{i=1}^n a_{i1}}$	$\mathbf{c_2 = \sum_{i=1}^n a_{i2}}$	...	$\mathbf{c_n}$	$\mathbf{1}$	$\mathbf{1}$	...	$\mathbf{1}$	\mathbf{n}	$\mathbf{1}$

Abbildung 4-8: Vorgehensweise Gewichtung Kriterien in Anlehnung an (Riedl, 2005)

Ziel des nächsten Schrittes war es, durch die Auswertung der Umfrageergebnisse bei den Paarvergleichen den betrachteten Kriterien Gewichte zuzuordnen. Um bei der Auswertung der Umfrageergebnisse unempfindlicher gegenüber Ausreißern zu sein, wurde der Median der Umfrageergebnisse gebildet. Im nächsten Schritt wurden die Umfrageergebnisse der prozess- sowie bauteilbezogenen Kriterien in eine Matrizendarstellung übertragen, um ihren Gewichtungsvektor (Eigenvektormethode siehe (Saaty, 1994)) zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden die Ergebnisse in eine Evaluationsmatrix eingetragen und deren Spaltensumme (c_i) gebildet. Zur Normierung der Evaluationsmatrix wurden die Paarvergleichswerte durch die Spaltensumme geteilt, wodurch die normalisierte Matrix mit einer neuen Spaltensumme von 1 entsteht. Darauf folgend wurden die Zeilenwerte der normalisierten Matrix zur Zeilensumme (r_i) aufaddiert. Im letzten Schritt wurden die

Zeilensummen (r_i) durch die Anzahl der Elemente (n) geteilt, um das Gewicht (w) bzw. den Eigenvektor (w) des entsprechenden Kriteriums (a_n) zu erhalten. Die *Abbildung 4-8* stellt die beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der Gewichtung dar.

Um die separat gewichteten bauteil- und prozessbezogenen Kriterien vergleichbar und damit interpretierbar darstellen zu können, wurden diese im Anschluss normiert. *Abbildung 4-9* zeigt die normierten bauteil- und prozessbezogenen Kriterien ihrer Gewichtung nach angeordnet.

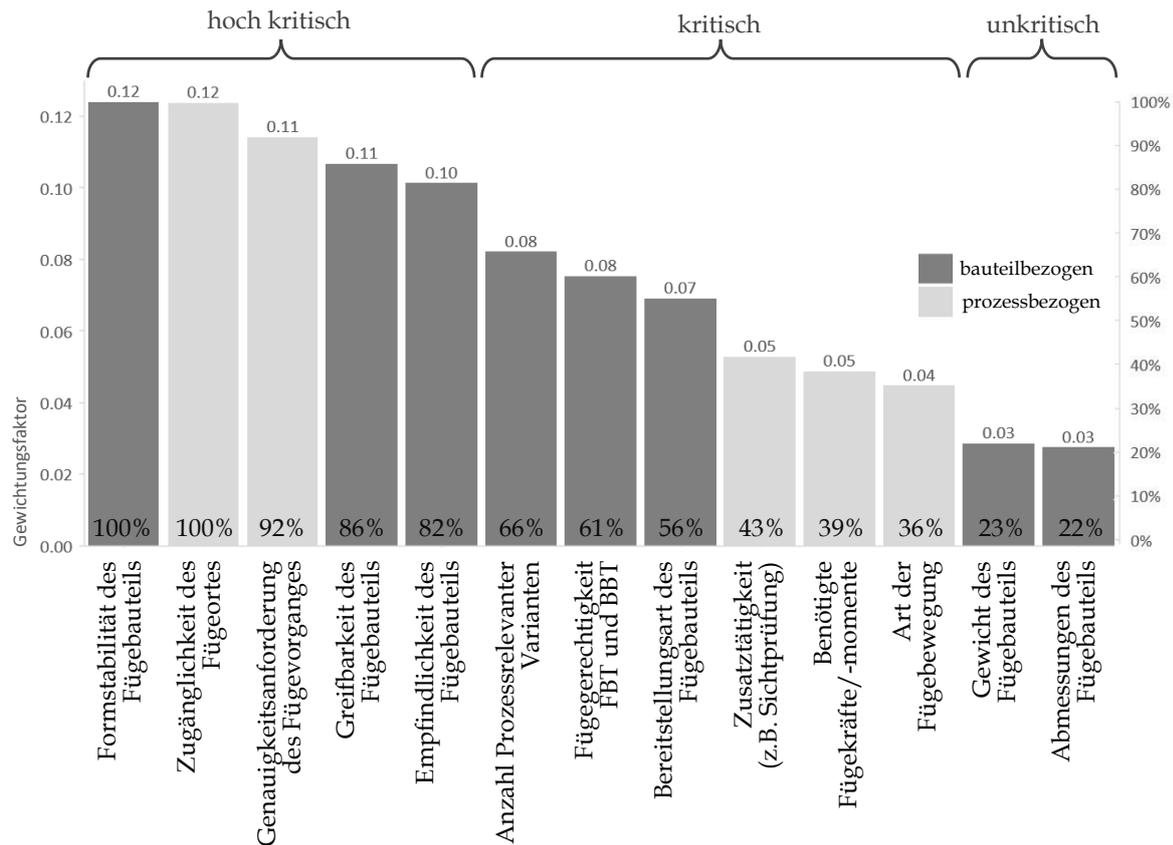


Abbildung 4-9: Gewichtung der Kriterien zur technischen Automatisierbarkeitsbewertung

Hierbei repräsentieren die Kriterien „Formstabilität des Fügebauteils“ und „Zugänglichkeit des Fügeortes“ mit dem Gewichtungsfaktor von jeweils 0,12 die bedeutendsten Kriterien, wodurch diese jeweils 100 % darstellen. Ebenso werden drei weitere Kriterien, die mit über 80 % bewertet wurden, als hochkritisch eingestuft. Dem gegenüber wird den Kriterien „Gewicht“ sowie „Abmessungen des Fügebauteils“ mit 23 % und 22 % nur eine geringe Gewichtung zuteil, wodurch diese als unkritisch eingeschätzt werden. Den übrigen sechs Kriterien wird mit einer Bewertung zwischen 36 % und 66 % eine mittlere Gewichtung zugemessen, wodurch diese als kritisch erachtet werden.

Durch die Expertenumfrage und die daraus ableitbare Einteilung der Kriterien in unkritisch, kritisch und hochkritisch lassen sich Komplexitätstreiber einer Automatisierung

identifizieren. Durch das Wissen, welche niedrig bewerteten bauteil- und/oder prozessbezogenen Kriterien ein Automatisierungshemmnis darstellen, lassen sich Simplifizierungsmaßnahmen ableiten, durch die eine Automatisierbarkeit gesteigert werden kann. Zusätzlich kann anhand der differenzierten Betrachtung von Aufnehmen und Platzieren eindeutig bestimmt werden, welcher konkrete Teilprozessschritt für die Automatisierung ein Hemmnis darstellt.

Die Gruppierung der Kriterien in die genannten drei Klassen ist nötig, da nicht alle niedrig bewerteten Kriterien direkt ein Abbruchkriterium für die Realisierbarkeit einer Automatisierung bilden. So lassen sich unkritische Kriterien trotzdem wirtschaftlich realisieren, da für diese Fälle marktübliche Standardprodukte vorhanden sind. Dies liegt vor allem an den breiten Produktpaletten der Hersteller, die für nahezu alle Bauteildimensionen und -massen geeignete Standard-Handhabungssysteme sowie Endeffektoren anbieten. (KUKA AG, 2023; SCHUNK SE & Co. KG, 2023)

Bei niedrig bewerteten kritischen Kriterien ist eine wirtschaftliche Realisierung nur noch erschwert möglich, da lösungsspezifische und meist komplexe Hardware benötigt wird, die jedoch auf dem Markt weitestgehend verfügbar ist. Bei niedrig bewerteten hochkritischen Kriterien hingegen ist eine wirtschaftliche technische Realisierung nahezu ausgeschlossen, da Sonderlösungen entwickelt werden müssen. In diesem Fall sollte eine Simplifizierung von Produkt oder Prozess angestrebt werden.

Somit dient die Bewertung der Automatisierbarkeit einerseits zur Einordnung der technischen Realisierbarkeit und andererseits ermöglicht diese dem Anwender, Automatisierungshemmnisse zu erkennen, um durch sukzessive Anpassungen an Produkt und Prozess eine Automatisierung zu erleichtern bzw. zu ermöglichen.

4.2.1.4 Unterteilung der Kriterien in Aufnehmen und Platzieren

Die Durchführung einer manuellen Montageaufgabe durch einen Mitarbeiter beschränkt sich im Wesentlichen auf die Bewegungsfolgen des **Aufnehmens** und des **Platzierens** eines Fügebauteils. Hierbei beinhaltet das Aufnehmen nach Standard-Daten-Basiswerten (MTM-2) die Bewegungen Hinlangen, Greifen und Bringen und die Bewegungsfolge Platzieren das Fügen sowie das Loslassen des Fügebauteils. (Britzke, 2010)

Hinsichtlich der Bewertung der technischen Automatisierbarkeit von manuellen Montagetätigkeiten sind die Prozessschritte in die Teilprozessschritte Aufnehmen und Platzieren zu unterteilen und bezüglich ihrer jeweiligen Automatisierbarkeit zu bewerten. Diese feinere Unterteilung ermöglicht es, dass bei der Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen auch nur Teile eines Prozessschrittes automatisiert werden können. So kann beispielsweise die Bereitstellung für den Mitarbeiter ideal gestaltet werden, indem ein

Vibrationswendelförderer dem Mitarbeiter die Bauteile positioniert und orientiert zur Verfügung stellt und dieser die Platzierung der Fügebauteile übernimmt.

Die in Kapitel 4.2.1.1 und 4.2.1.2 detailliert erläuterten Kriterien zur Bewertung der Automatisierbarkeit beziehen sich entweder nur auf den Teilprozess Aufnehmen (z. B.: Bereitstellungsart des Fügebauteils) oder Platzieren (z. B.: Art der Fügebewegung) eines Fügebauteils oder haben gleichermaßen Gültigkeit für beide Teilprozesse (z. B.: Gewicht des Fügebauteils). Einen Sonderfall stellt hierbei das Kriterium Zusatztätigkeiten dar. Diese können sowohl beim Aufnehmen als auch beim Platzieren auftreten. Jedoch besteht auch die Möglichkeit, dass diese bei einem Prozessschritt nicht vorkommen oder nur in einem der beiden Teilprozesse zum Tragen kommen. Da Zusatztätigkeiten nicht in jedem Prozessschritt erforderlich sind, ist deren Bewertung optional. Tabelle 4-16 stellt die Bewertungskriterien mit ihrer Gültigkeit für die Teilprozessschritte Aufnehmen und Platzieren dar. Durch diese detaillierte Betrachtung können Empfehlungen hinsichtlich des optimalen Automatisierungsgrades des Arbeitsplatzes abgeleitet werden, um die Potenziale von Mensch und Maschine bestmöglich auszuschöpfen.

Tabelle 4-16: Kriterieneinteilung in Aufnehmen und Platzieren

Kriterium	Aufnehmen	Platzieren
Abmessungen des Fügebauteils	●	●
Gewicht des Fügebauteils	●	●
Formstabilität des Fügebauteils	●	●
Empfindlichkeit des Fügebauteils	●	●
Geometrische Greifbarkeit des Fügebauteils	●	●
Anzahl Variantenfamilien	●	●
Bereitstellungsart des Fügebauteils	●	○
Fügegerechtes Fügebauteil und Basisbauteil	○	●
Genauigkeitsanforderungen des Fügevorgangs	○	●
Art der Fügebewegung	○	●
Benötigte Fügekräfte / -momente / -sensitivität	○	●
Zugänglichkeit Fügeort	○	●
Zusatztätigkeiten (z.B. Sichtprüfung, Materialversorgung)	◐	◐

Bewertungsskala: ● zutreffend ◐ teilweise zutreffend ○ nicht zutreffend

4.2.1.5 Durchführung der technischen Automatisierbarkeitsbewertung

Zur Bewertung der technischen Automatisierbarkeit dient eine gewichtete Nutzwertanalyse. Aufgrund der Verwendung einer Nutzwertanalyse lässt sich die Komplexität der Entscheidungsfindung durch eine strukturierte und systematische Bewertung von Alternativen, in diesem Fall die Ausprägungen der Kriterien (Kapitel 4.2.1.1 und 4.2.1.2),

reduzieren. Die klare Abgrenzung der Ausprägungsstufen der Kriterien sowie deren Gewichtung (Kapitel 4.2.1.3) durch Experten aus Forschung und Industrie dienen zur Verringerung der Subjektivität der Bewertung.

Die Durchführung der Bewertung erfolgt für jeden Prozessschritt, indem dieser anhand der bauteil- und prozessbezogenen Kriterien in den Ausprägungsstufen a_r von 1 bis 4 bewertet wird. Anschließend wird das Bewertungsergebnis mit dem Gewichtungsfaktor w_r des dazugehörigen Kriteriums v_r multipliziert. Das Aufsummieren des jeweiligen gewichteten Kriteriums ergibt den Gesamtwert bzw. Nutzwert $v(a)$ des Prozessschrittes (siehe Formel (4-10)). Hierbei gilt das Gewicht > 0 sowie die Summe aller Gewichte immer 1 bzw. 100 %. (Eisenführ & Weber, 2010)

$$v(a) = \sum_{r=1}^m w_r v_r(a_r) \quad \text{mit} \quad \sum_{r=1}^m w_r = 1 \quad (4-10)$$

Zur konkreten Durchführung der technischen Automatisierbarkeitsbewertung wählt der Anwender die Ausprägungsstufe von 1 bis 4 des Kriteriums aus, die dem ihm vorliegenden Bauteil bzw. Prozess am nächsten kommt. Die Bewertung erfolgt hierbei für das Aufnehmen und Platzieren jedes Prozessschrittes differenziert (siehe Kapitel 4.2.1.4), wobei einige Kriterien sowohl das Aufnehmen als auch das Platzieren bewerten (z. B.: Formstabilität des Fügebauteils). Andere Kriterien hingegen beziehen sich ausschließlich auf das Aufnehmen oder das Platzieren (z. B.: Genauigkeitsanforderungen des Fügevorganges). Nach erfolgter Bewertung werden die Ergebnisse gewichtet und nach Formel (4-10) ihr Gesamtwert errechnet. Im Anschluss kann der Wert für eine prozentuale Automatisierungsempfehlung, bezogen auf die maximal erreichbare Punktzahl, ausgegeben werden. Die Automatisierungsempfehlung kann durch die differenzierte Betrachtung sowohl für den Gesamtprozessschritt als auch einzeln für das Aufnehmen und Platzieren ausgesprochen werden. Eine Automatisierungsempfehlung von 100 % würde dementsprechend bei jedem Kriterium eine Bewertung mit der bestmöglichen Ausprägung von 4 voraussetzen.

Die Tabelle 4-17 veranschaulicht auszugsweise exemplarisch die Durchführung der technischen Automatisierbarkeitsbewertung für den Prozessschritt der „Montage einer Druckfeder“. Die dargestellten Zahlen sollen zur Verdeutlichung der Vorgehensweise und der Vorteile der technischen Automatisierbarkeitsbewertung dienen. Durch das Kriterium „Gewicht des Fügebauteils“ zeigt sich, dass diesem sowohl für das Aufnehmen als auch für das Platzieren eine gleichermaßen hohe Bedeutung zuteilwird. Hingegen ist das Kriterium „Greifbarkeit des Fügebauteils“ nur für das Aufnehmen relevant. Ähnlich verhält es sich mit den Kriterien „Zugänglichkeit des Fügeortes“ und „Art der Fügebewegung“. Diese haben nur einen Einfluss auf das Platzieren des Fügebauteils, nicht aber auf das Aufnehmen, wodurch diese nicht zu bewerten sind. Durch diese gesonderte

Bewertung lässt sich eine einzelne Automatisierbarkeitsempfehlung für das Aufnehmen und Platzieren aussprechen, woraus sich gezielte Aussagen über eine mögliche manuelle, teilautomatisierte oder voll automatisierte Durchführung des Prozessschrittes ableiten lassen.

Tabelle 4-17: Auszug aus einer Durchführung der technische Automatisierbarkeitsbewertung

Kriterien	bauteilbezogene Kriterien						...	prozessbezogene Kriterien						Summe gewichtet	Automatisierbarkeitsempfehlung	
	Gewicht des Fügebauteils			Greifbarkeit des Fügebauteils				Zugänglichkeit des Fügeortes			Art der Fügebewegung				einzel	gesamt
	a_r	w_r	$a_r \cdot w_r$	a_r	w_r	$a_r \cdot w_r$		a_r	w_r	$a_r \cdot w_r$	a_r	w_r	$a_r \cdot w_r$		$v(a)$	
Aufnehmen	3	0.03	0.09	1	0.11	0.11	-	-	-	-	-	-	1.40	58%	70%	
Platzieren	3	0.03	0.09	-	-	-	4	0.12	0.48	4	0.04	0.16	3.02	82%		

In dem hier gewählten Beispiel erzielte das Aufnehmen einen Wert von 58 %, wohingegen das Platzieren mit 82 % eine deutlich höhere Automatisierbarkeitsempfehlung aufweist. Zusätzlich kann noch die Automatisierungsempfehlung von 70 % für den Gesamtprozess ausgewiesen werden, der Aufnehmen und Platzieren beinhaltet und somit eine Vollautomatisierung des Prozessschrittes darstellt.

Fazit

Durch die vorgestellte Bewertung anhand von lösungsneutralen bauteil- sowie prozessbezogenen Kriterien lassen sich einzelnen Montageprozessschritte unkompliziert und objektiv hinsichtlich ihrer technischen Automatisierbarkeit bewerten. Die Gewichtung der Kriterien ermöglicht es, die Bedeutung einzelner Kriterien zu berücksichtigen und im Rahmen des Bewertungsgesamtkontextes widerzuspiegeln. Durch die Evaluierung der Kriterien in Bezug auf deren Relevanz für das Aufnehmen und Platzieren kann die technische Automatisierbarkeit innerhalb eines Prozessschrittes für das Aufnehmen und Platzieren separat ausgewiesen werden.

Da sich nicht alle Tätigkeiten an einem Montagearbeitsplatz ausschließlich auf das Fügen von Bauteilen und damit auf die Vervollständigung des Montageobjektes beschränken, ist es nötig, auch andere Tätigkeiten wie das Sichtprüfen hinsichtlich ihrer Eignung für eine Automatisierung zu bewerten. Die in Kapitel 4.2.1 vorgestellte technische Automatisierbarkeitsempfehlung ist jedoch für die Beurteilung von Hilfsprozessen und Sonderoperationen nicht anwendbar. Da diese Prozesse vielschichtig und branchenabhängig sind, empfiehlt es sich, in solchen Fällen die Automatisierbarkeit anhand von bereits umgesetzten Lösungen oder anhand von am Markt verfügbaren Standardlösungen (z. B.: Laserbeschriftungsanlagen, Schraubspindeln) zu beurteilen. Hierfür ist jedoch Expertenwissen und/oder Erfahrung nötig. Sind diese Möglichkeiten nicht gegeben, sollte die Automatisierbarkeit durch praktische Versuche belegt werden.

4.2.2 Zeitliche Arbeitsplatzpotenzialbewertung

Zur Gestaltung wirtschaftlicher Montagesysteme hat das Unterlassen von Verschwendung durch vermeidbare Bewegungen des Menschen, des Montageobjektes sowie des Betriebsmittels bei allen durchzuführenden Handhabungs- und Fügevorgängen oberste Priorität (Lotter, 2012). Um sich diesem Ziel einer optimalen, verschwendungsfreien Montage anzunähern, ist das Zusammenspiel einer montagegerechten Produktgestaltung sowie einer optimalen Arbeitsplatz- und Montagekonzeptgestaltung erforderlich. Da jedoch häufig, gerade bei vorhandenen Produkten und zu optimierenden Montagekonzepten, kein Einfluss mehr auf die Produktgestaltung genommen werden kann, liegt ein signifikanter Anteil des Rationalisierungs- und Optimierungspotenzials in der Arbeitsplatz- und Montagekonzeptgestaltung. Um dieses Potenzial zu heben und einen Arbeitsplatz hinsichtlich seines wirtschaftlichen Wirkungsgrades beurteilen zu können, wurde durch Bruno Lotter (2012) die PSA entwickelt, die in *Kapitel 2.2.7* näher vorgestellt wurde. Diese lässt die Rückschlüsse zu, dass zur Optimierung und Rationalisierung von manuellen Arbeitsplätzen in der Serienfertigung ein detailliertes Wissen über den wirtschaftlichen Wirkungsgrad jedes einzelnen Montageprozessschrittes wesentlich ist. Hierdurch kann wiedergespiegelt werden, wie hoch die Wertschöpfung des Mitarbeiters in den einzelnen Prozessschritten ist. Um eine detaillierte Aussage über das Optimierungs- und Automatisierungspotenzial hinsichtlich der Gestaltung eines hybriden Arbeitsplatzes treffen zu können, wurde die von Lotter erstellte PSA in dieser Arbeit weiterentwickelt. Wie in *Kapitel 2.2.7* erläutert, werden durch Lotter die PV sowie SV des Arbeitsplatzes ermittelt und hieraus wird der wirtschaftliche Wirkungsgrad eines Arbeitsplatzes abgeleitet.

4.2.2.1 Bewertung des zeitlichen Optimierungspotenziales für das Aufnehmen und Platzieren

Um jedoch für die Hybridisierung eines Arbeitsplatzes das passende Maß an technischer Unterstützung eines Mitarbeiters zu definieren, ist eine detailliertere Betrachtung der Prozessschritte nötig. Die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren der MTM-Standards finden sich gleichermaßen in technischen Montagesystemen wieder. So werden durch technische Systeme ebenfalls Handhabungsaufgaben sowie Fügeoperationen ausgeführt, um die Montage von Fügebauteilen zu ermöglichen. Dies lässt den Schluss zu, dass bei einem hybriden Arbeitsplatz nicht nur ganze Prozessschritte durch eine Automatisierung ausgeführt werden können, sondern ebenso einzelne Bewegungsfolgen. Somit zeigen die Auflösung und zeitliche Bewertung jedes einzelnen Prozessschrittes hinsichtlich seines Optimierungspotenziales für das Aufnehmen und Platzieren auf, wie hoch das Potenzial in den beiden Bewegungsfolgen ist. Hierdurch kann für die Hybridisierung abgeleitet werden, ob eine Automatisierung zur Optimierung der Greifbedingungen und/oder des Fügeprozesses zielführend ist. Zu berücksichtigen ist, dass das Optimierungspotenzial in

diesem Fall lediglich eine Aussage über das zeitliche Potenzial zulässt und keine Aussagekraft bezüglich der technischen Realisierbarkeit hat.

Die im Folgenden verwendeten Begriffe Teilautomatisierung und Vollautomatisierung beziehen sich nicht, wie in *Kapitel 2.1.2 Arten der Montage* beschrieben, auf einen vollständigen Arbeitsplatz oder eine Montagelinie, sondern auf einen einzelnen Prozessschritt (z. B.: Niet setzen) an einem Arbeitsplatz. Aus der Analyse der einzelnen Prozessschritte können folgende Konstellationen abgeleitet werden.

Ein niedriges zeitliches Optimierungspotenzial hinsichtlich des Aufnehmens und des Fügens spricht für eine adäquate Gestaltung des Arbeitsplatzes und der Greifbedingungen. Dies ist eher ein Hinweis dafür, dass dieser Arbeitsschritt weiterhin **manuell** ausgeführt werden sollte.

Bei einem hohen zeitlichen Optimierungspotenzial hinsichtlich des Aufnehmens und einem gleichzeitig niedrigen Potenzial des Platzierens sollte der Fokus auf die Optimierung der Greifbedingungen sowie der zu überbrückenden Distanz zwischen Aufnahme und Fügeposition gelegt werden. In diesem Fall könnte durch eine **Teilautomatisierung** des Montageschrittes ein Potenzial hinsichtlich des Aufnehmens erschlossen werden. So könnte beispielsweise das Montageobjekt durch einen Vibrationswendelförderer vereinzelt und lageorientiert dem Mitarbeiter zur Verfügung gestellt werden. Hierdurch würde der nicht wertschöpfende Prozess des Vereinzeln und Nachgreifens beim Aufnehmen aus einem Kleinladungsträger (KLT) oder einer Griffschale entfallen.

Ein niedriges zeitliches Optimierungspotenzial bezüglich des Aufnehmens und ein hohes Potenzial hinsichtlich des Platzierens weist auf eine Teilautomatisierung des Fügeprozesses hin. Daher ist der vorliegende manuelle Prozess des Aufnehmens durch den Mitarbeiter ohne oder mit geringer Verschwendung durchführbar und das erschließbare Potenzial liegt im Fügeprozess. Eine Teilautomatisierung des reinen Fügeprozesses ist jedoch häufig nicht möglich, da das zu fügende Bauteil durch das Automatisierungssystem aufgenommen werden muss, um es im Anschluss automatisiert zu fügen. Daher ist bei einer derartigen Konstellation oft nur eine Vollautomatisierung des Prozessschrittes zielführend, was jedoch eine höhere Investition nach sich zieht.

Ein gleichzeitig hohes zeitliches Optimierungspotenzial hinsichtlich des Aufnehmens und Platzierens ist ein Hinweis darauf, den Arbeitsschritt sowohl bezüglich der Zuführung als auch des Fügevorgangs zu optimieren und somit diesen Prozessschritt zu **vollautomatisieren**.

Tabelle 4-18 enthält die Darstellung des zuvor beschriebenen Zusammenhangs zwischen den vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenzialen des Aufnehmens und des Platzierens sowie dem daraus ableitbaren Automatisierungsgrad des einzelnen Prozessschrittes.

Hierbei ist zu beachten, dass der abgeleitete Automatisierungsgrad ausschließlich auf dem vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenzial basiert und keine Automatisierbarkeitsbewertung berücksichtigt. Es kann dennoch plausibel sein, auch Prozessschritte mit einem niedrigen Optimierungspotenzial gänzlich zu automatisieren, wenn eine adäquate Automatisierbarkeit gepaart mit der Möglichkeit, Prozessschritte zu parallelisieren, gegeben ist. Diese Entscheidung kann jedoch nur aufgrund der Kenntnis des Gesamtprozessablaufes getroffen werden.

Tabelle 4-18: Ableitung des Automatisierungsgrads aus dem Optimierungspotenzial

	Aufnehmen	Platzieren	Automatisierungsgrad
Potential	niedrig	niedrig	manuell
	hoch	niedrig	teilautomatisiert
	niedrig	hoch	teil- / vollautomatisiert
	hoch	hoch	vollautomatisiert

4.2.2.2 Durchführung der zeitlichen Arbeitsplatzpotenzialbewertung

Zur Durchführung der Bewertung sind die ermittelten und in Form eines Montagevorranggraphen (*Kapitel 4.1.3*) dokumentierten Einzelprozessschritte des Montageprozesses nach MTM-2 in Aufnahmen und Platzieren zu unterteilen und zeitlich zu bewerten. Durch die Verwendung von Standard-Daten-Basiswerten (MTM-2) kann so einerseits ein Überblick über die Istprozesszeiten hergestellt werden und gleichzeitig können die in *Kapitel 4.2.1.4* beschriebenen Vorzüge der Aufteilung in Aufnahmen und Platzieren realisiert werden. Im nächsten Schritt wird ein fiktiver Idealzustand des zu bewertenden Arbeitsplatzes definiert. Hierfür ist ein Grenzwert für die optimale Distanz vom Bereitstellungs-ort des Fügebauteiles in Relation zur Größe des Fügebauteiles zu definieren. Die so festgelegte Distanz stellt den Radius eines Dreiviertelkreises um das Montageobjekt dar und definiert den Primärbereich. Der Sekundärbereich stellt hingegen den maximalen Greifbereich des Mitarbeiters um das Montageobjekt dar. *Abbildung 4-10* visualisiert exemplarisch den Zusammenhang zwischen Primär- und Sekundärbereich eines Arbeitsplatzes.

Nachdem die Primär- und Sekundärbereiche definiert wurden, wird der fiktive Idealzustand des Arbeitsplatzes hergestellt. In diesem werden die Distanzen des bereitgestellten Materials so weit reduziert, dass diese sich innerhalb des Primärbereiches befinden. Des Weiteren wird die Annahme getroffen, dass alle Materialien vereinzelt, positioniert und orientiert zur Verfügung gestellt werden, wodurch keinerlei Kontroll- und Vereinzlungsaufwand für den Mitarbeiter entstehen. Ebenso können im fiktiven Idealzustand optimierte Montagehilfen wie Fügemasken oder Hebezeuge zum Einsatz kommen. Nachdem alle Prozessschritte in Form eines Idealzustandes vorliegen, sind diese ebenfalls durch MTM-2 zu analysieren und somit zeitlich zu bewerten.

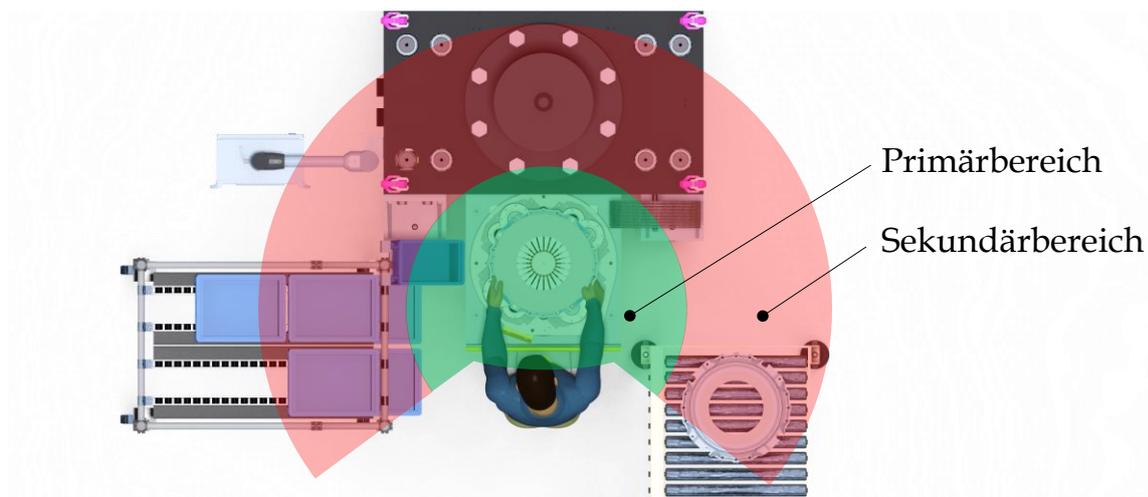


Abbildung 4-10: Primär- und Sekundärbereich

Im letzten Schritt der Potenzialbewertung werden die zeitlichen Differenzen zwischen dem Ist- und dem Idealzustand der einzelnen Prozessschritte errechnet. Die so ermittelte Differenz stellt das vorhandene Optimierungspotenzial dar. Da die Prozessmodellierung mittels MTM-2 durchgeführt wurde, liegen die Ergebnisse nicht nur für den Grundzyklus jedes Prozessschrittes vor, sondern feingranular für die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren. Somit können die genauen Potenzialbereiche innerhalb eines Prozessschrittes ermittelt werden.

Fazit

Die Anwendung des standardisierten MTM-Verfahrens ermöglicht es, einen vollständigen Überblick der Istprozesszeiten zu erhalten. Durch das anschließende Bilden eines fiktiven Idealzustandes werden für Anwender bereits Optimierungsmöglichkeiten des Arbeitsplatzes erkennbar. Die folgende Potenzialermittlung der einzelnen Prozessschritte anhand ihrer Aufteilung in Aufnehmen und Platzieren quantifiziert transparent und detailliert das vorliegende zeitliche Optimierungspotenzial. Die so gewonnenen Prozesskenntnisse stellen eine elementare Säule zur zielgerichteten Automatisierungslösung und damit zur Prozessverbesserung dar.

4.2.3 Abgleich der technischen Automatisierbarkeits- und zeitlichen Arbeitsplatzpotenzialbewertung

Die in Kapitel 4.2.1 erläuterte Vorgehensweise zur Durchführung einer Automatisierbarkeitsbewertung erlaubt dem Anwender, Rückschlüsse auf die technische Realisierbarkeit einer Automatisierung einzelner Prozessschritte zu ziehen. Des Weiteren lässt sich jedem einzelnen Prozessschritt durch die in Kapitel 4.2.2 dargestellte Optimierungspotenzialbewertung das zeitliche Rationalisierungspotenzial zuordnen. Aufgrund der feingranularen Bewertung der Prozessschritte mittels MTM-2 liegen die Daten zusätzlich für die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren vor.

Die separate Betrachtung der durchgeführten Bewertungen lassen jedoch noch keinen fundierten Rückschluss auf die Wahl der geeigneten Prozessschritte mit dem Ziel einer Automatisierung zu. Erst die grafische Darstellung ermöglicht es, die einzelnen Prozessschritte mit den aus der vorangegangenen Bewertung gewonnenen Daten durch eine gemeinsame Skala miteinander vergleichbar zu machen. So können die Daten unkompliziert und verständlich in eine visuelle Form übersetzt werden. Hierfür bietet sich die Visualisierung anhand eines kombinierten Diagramms an. Die kombinierte Darstellung der Bewertungsergebnisse jedes Prozessschritts ermöglicht es, die Datenreihen miteinander zu vergleichen, um Korrelationen zwischen dem vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenzial und der technischen Realisierbarkeit zu identifizieren. Erst durch diese zusammenhängende Betrachtung von Automatisierbarkeitsbewertung und Optimierungspotenzialbewertung kann ein klares Bild bezüglich des vorhandenen zeitlichen Potenzials und des Aufwands der technischen Realisierung erstellt werden. So lassen sich die gewonnenen Bewertungsergebnisse in ihrer Aufteilung in Aufnehmen und Platzieren grafisch darstellen.

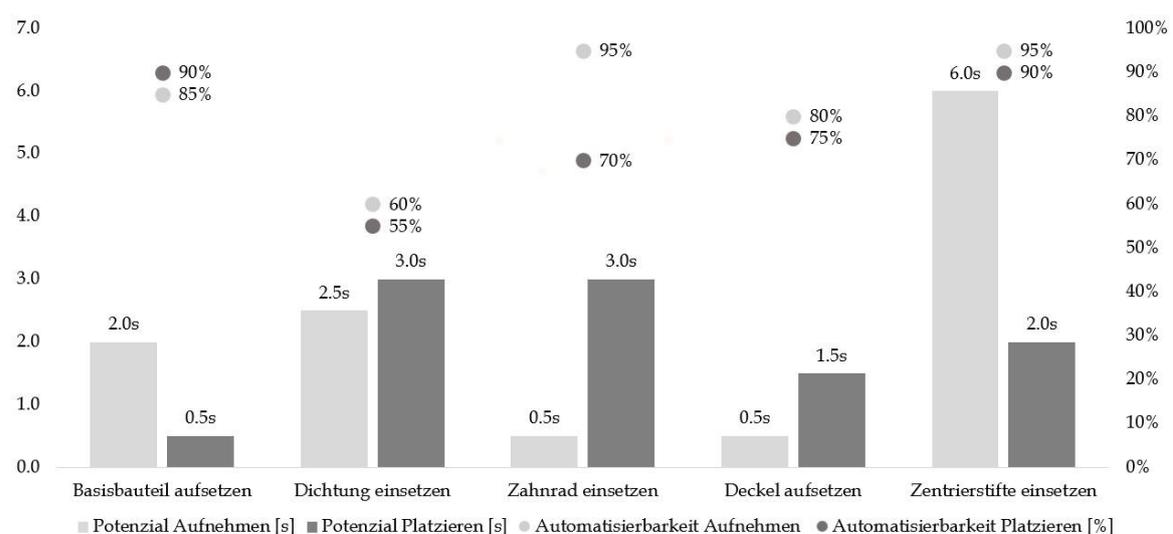


Abbildung 4-11: Abgleich Automatisierbarkeits- und Potenzialbewertung

Dies ermöglicht es, Rückschlüsse auf die Plausibilität und gleichzeitig die Umsetzbarkeit einer Automatisierung zu ziehen, um die geeigneten Prozessschritte bzw. Teilprozessschritte für eine Automatisierung zu identifizieren.

Die *Abbildung 4-11* enthält zur Verdeutlichung eine mögliche grafische Darstellung von Prozessschritten mit dem Ziel des Abgleiches der Automatisierbarkeits- und Potenzialbewertung.

Hierbei werden die einzelnen Prozessschritte auf der Abszisse aufgetragen und die zeitlichen Potenziale in den Anteilen Aufnehmen und Platzieren in Balkenform dargestellt. Über den entsprechenden Balken der zugehörigen Prozessschritte werden die Ergebnisse der Automatisierbarkeitsbewertung ebenfalls in Aufnehmen und Platzieren in Form von Punkten visualisiert. So lassen sich diese direkt miteinander vergleichen.

Im Zuge des Vergleiches können zwei Extremkonstellationen auftreten. Eines dieser Extreme veranschaulicht der Montageprozess „Dichtung einsetzen“, der durch ein hohes zeitliches Potenzial, aber durch eine niedrige Automatisierbarkeit gekennzeichnet ist. In diesem Fall ist mit einem hohen technischen Aufwand bzw. einer komplexen Realisierung zu rechnen, um das vorliegende zeitliche Potenzial zu heben. Das andere Extrem wird durch den Montageprozess „Deckel aufsetzen“ repräsentiert. Hier zeigt sich eine adäquate Automatisierbarkeit des Prozessschrittes, jedoch gepaart mit einer erzielbaren niedrigen zeitlichen Optimierung. In dieser Konstellation sollte abgewogen werden, ob die zu erzielende zeitliche Optimierung im angemessenen Verhältnis zum technischen Aufwand einer Realisierung steht. Den beiden Extremen gegenüber stehen Montageprozesse wie „Zentrierstifte einsetzen“, die sowohl ein sehr gutes Optimierungspotenzial als auch eine unkomplizierte Automatisierbarkeit aufweisen und somit priorisiert behandelt werden sollten.

Zusätzlich ermöglicht die Differenzierung zwischen Aufnehmen und Platzieren dem Anwender, eine detaillierte Betrachtung des Montageprozesses durchzuführen. Gerade bei der Gestaltung von hybriden Arbeitsplätzen können so zielgerichtet technische Unterstützungen des Mitarbeiters abgeleitet und implementiert werden. So lassen sich wie im Fall „Zentrierstift einsetzen“ beispielsweise erhebliche Potenziale durch die Integration eines Vibrationswendelförderers erschließen. Der eingesetzte Vibrationswendelförderer könnte dem Mitarbeiter das Zuführen, Richten und Vereinzeln der Zentrierstifte und somit den Teilprozessschritt Aufnehmen erleichtern. So ließe sich der komplexere Teilprozessschritt des Platzierens, der eventuell Sensitivitäten voraussetzt, weiterhin durch einen Mitarbeiter ausführen. Diese Art der getrennten Betrachtung von Aufnehmen und Platzieren unterstützt den Anwender dabei, die passende Aufteilung der Prozessschritte zwischen Mensch und Technik zu finden. (Hübner et al., 2023)

Fazit

Durch die beschriebene Vorgehensweise des Abgleiches lassen sich Prozesse mit erheblichem Potenzial und hoher oder niedriger Automatisierbarkeit systematisch identifizieren und zielgerichtete Automatisierungsempfehlungen ableiten. Die feingranulare Aufteilung in Aufnehmen und Platzieren ermöglicht es, zusätzlich Automatisierungsempfehlungen auch für Teilprozessschritte auszusprechen. So kann der Planer anhand der entwickelten Bewertungsmethode fundierte Entscheidungen zur Optimierung des vorliegenden Montageprozesses treffen und hierbei die beiden entscheidenden Faktoren Nutzen sowie Machbarkeit objektiv bewerten.

4.3 Gestaltung eines hybriden Montagearbeitsplatzes

In Kapitel 4.2 wurde die Vorgehensweise zur Bewertung der technischen Automatisierbarkeit sowie der zeitlichen Arbeitsplatzpotenzialbewertung erarbeitet. Diese führte zu einem Abgleich der beiden Bewertungsverfahren, wodurch einerseits die Realisierbarkeit und andererseits die Plausibilität einer technischen Unterstützung transparent dargestellt wurde. Mit diesen gewonnenen Erkenntnissen werden im Folgenden die zukünftigen Prozessabläufe festgelegt.

4.3.1 Fähigkeits- und zeitpotenzialbasierte Zuteilung der Prozessschritte

Jedes zu planende oder zu optimierende Montagesystem weist individuelle Herausforderungen auf, mit denen der Planer im Prozess der Gestaltung des Systems konfrontiert wird. Zur Festlegung des zukünftigen hybriden Montageablaufes ist sowohl eine fundierte Ausgangsanalyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel erforderlich (vgl. Kapitel 4.1) als auch die Erkenntnis, welcher Prozessschritt bzw. Teilprozessschritt sich für eine Automatisierung technisch eignet und zeitlich optimierungswürdig ist. Diese Informationen allein genügen jedoch nicht, um einen idealen Prozess zu gestalten. Zusätzlich muss der Planer eine Vielzahl an arbeitsplatzübergreifenden Randbedingungen, wie zeitliche Abhängigkeiten zu anderen Stationen und layouttechnische Restriktionen hinsichtlich Platz und Zugänglichkeit, berücksichtigen. In der Gestaltung hybrider Montagesysteme ist es die Aufgabe des Planers, geeignete Prozessschritte bzw. Teilprozessschritte zu wählen, in denen dem Mitarbeiter eine technische Unterstützung zuteilwird.

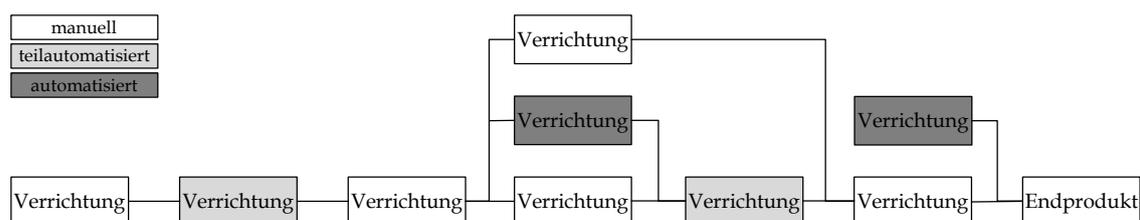


Abbildung 4-12: Automatisierungsgrad der Prozessschritte

Ziel ist eine bedarfsgerechte Arbeitsplatzoptimierung. Bei dieser sollte so wenig wie möglich automatisiert werden, um die Kosten niedrig zu halten, gleichzeitig jedoch so viel wie nötig automatisiert werden, um die gewünschte Zieltaktzeit und die entsprechende Effizienz zu erreichen. Somit ist das oberste Ziel, die Balance zwischen Automatisierung und Kosten zu finden. Um dies zu ermöglichen, lassen sich aus dem in *Kapitel 4.2.3* dargestellten Abgleich Teilprozessschritte identifizieren, die sich hierzu eignen. Durch die Bewertung der Automatisierbarkeit können indirekt die Kosten für die Umsetzung einer Automatisierung abgeschätzt werden. Je ungünstiger die Eignung für eine Automatisierbarkeit ist, desto höher sind die zu erwartenden Kosten einer Umsetzung, da schwer zu automatisierende Aufgaben häufig aufwendigere Betriebsmittelentwicklungen erfordern.

Zeitgleich werden die mit der Maßnahme verbundenen erreichbaren zeitlichen Optimierungspotenziale ausgewiesen. Aus diesen Informationen lassen sich Teilprozessschritte bestimmen, durch deren Optimierung eine effizientere Nutzung der Ressource Mensch und damit eine Optimierung des Gesamtmontagesystems ermöglicht wird. Zur Dokumentation und Visualisierung der gewählten optimierten Prozessschritte bietet sich die Darstellung in Form eines Montagevorranggraphen an (siehe *Abbildung 4-12*). In diesem lassen sich die Prozessschritte mit ihrem geplanten Automatisierungsgrad darstellen als unverändert manuell, optimiert durch die technische Unterstützung innerhalb eines Prozessschrittes (teilautomatisiert) oder automatisiert durch die Automatisierung eines ganzen Prozessschrittes. Hierdurch wird eine Gesamtübersicht über den geplanten zukünftigen Prozess sowie das Zusammenspiel zwischen manuellen, teilautomatisierten und automatisierten Prozessschritten ermöglicht.

4.3.2 Feinplanung des Prozessablaufes

Nachdem in *Kapitel 4.3.1* unter Berücksichtigung der zu erzielenden Taktzeit eine fähigkeits- und zeitpotenzialbasierte erste Zuteilung der Prozessschritte erfolgt ist, wird in der folgenden Feinplanung der exakte Prozessablauf definiert. Die Feinplanung des Prozessablaufes stellt hierbei ein komplexes und vielschichtiges Problem dar, dessen Lösung meist durch mehrere iterativen Schleifen erfolgt. Oftmals treten nach der initialen Zuweisung der Prozessschritte in der darauffolgenden Feinplanung des Ablaufs zahlreiche Schwierigkeiten auf, die es zu bewältigen gilt. Neben den üblichen Herausforderungen, wie zu hohen Umsetzungskosten, layouttechnischen Restriktionen aufgrund von Platzmangel oder auch ergonomischen Problemen, gilt es, im Kontext der hybriden Montage noch weitere Aufgaben zu lösen. So treten durch die enge Verschmelzung der Arbeitsabläufe von Mensch und Technik Herausforderungen bezüglich des zu realisierenden Sicherheitskonzeptes sowie des Mensch-Technik-Interaktionskonzeptes auf. Um den Planer speziell bei diesen Herausforderungen zu unterstützen, wurde der Schwerpunkt dieser Arbeit auf die methodische Bestimmung des geeigneten Sicherheitskonzeptes sowie auf die Technologieauswahl zur Mensch-Technik-Interaktion gelegt.

4.3.2.1 Festlegung des Sicherheitskonzeptes

Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise zur Festlegung eines Sicherheitskonzeptes soll den Planer in der frühen Phase seiner Planungstätigkeit unterstützen, einen geeigneten Prozessablauf sowie das bereits notwendige Sicherheitskonzept zu definieren. Dies ist erforderlich, da es gerade bei hybriden Arbeitsplätzen und bei der engen Kooperation zwischen Mensch und Technik zu sicherheitstechnischen Restriktionen und damit ggf. zu veränderten Prozessabläufen, Taktzeiten und Flächenbedarfen kommen kann. Da jedoch der Planer nur in den seltensten Fällen ein Sicherheitsexperte ist, ist es essenziell wichtig, ihn bei der Auswahl des geeigneten Sicherheitskonzeptes bestmöglich zu unterstützen. Ausdrücklich ist zu erwähnen, dass die dargestellte Methode keinesfalls das EG-Konformitätserklärungsverfahren nach der Maschinenrichtlinie (MRL) (2006/42/EG:2006-05-17, 2006) mit daraus folgender CE-Kennzeichnung ersetzt.

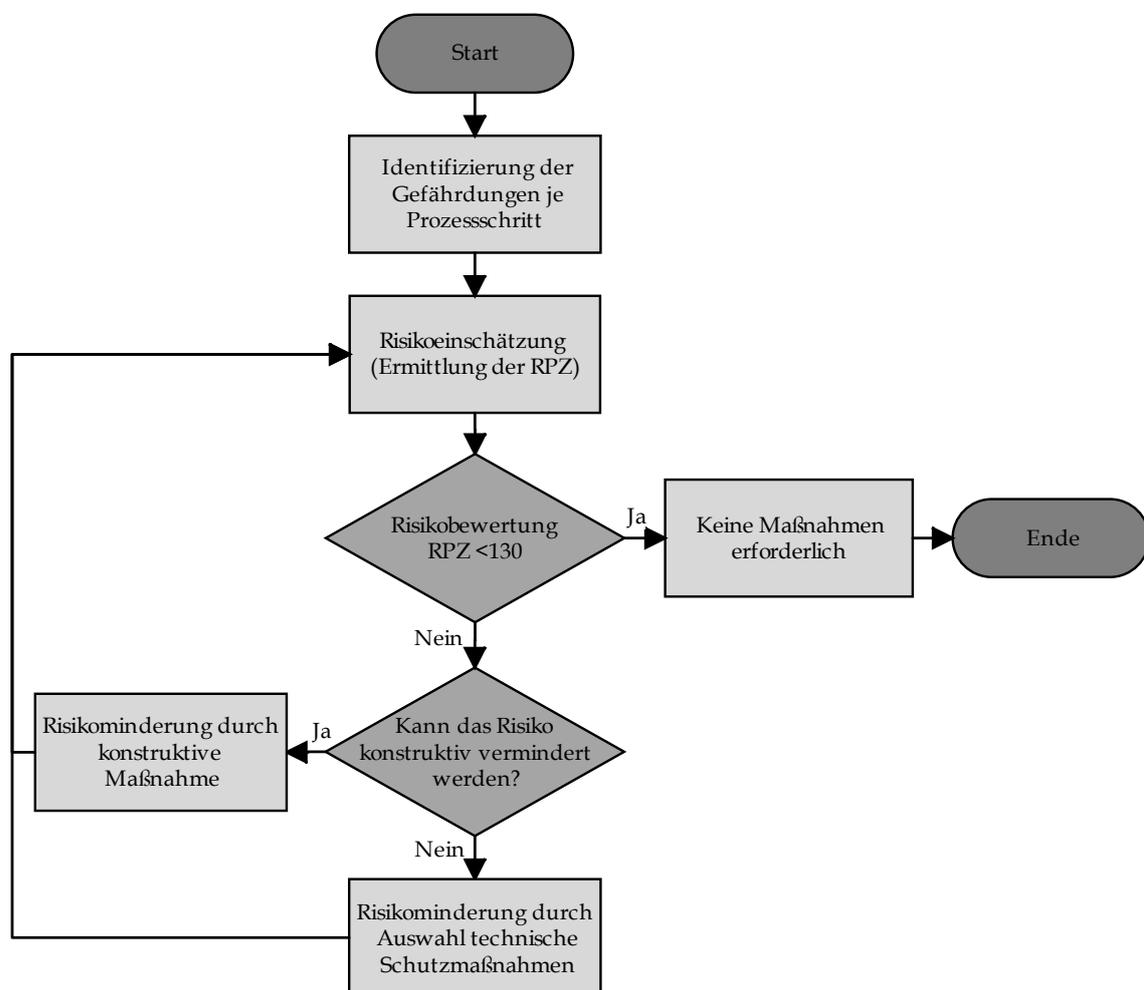


Abbildung 4-13: Ablaufdiagramm Risikobewertung und Risikominderung

Die generelle Vorgehensweise zur Festlegung des Sicherheitskonzeptes beginnt mit der Identifizierung der vorliegenden Gefährdungen je Prozessschritt, gefolgt von der Bewertung des daraus resultierenden Risikos. Anschließend ist zu beurteilen, ob das ermittelte

Risiko akzeptabel ist oder ob weitere risikomindernde Maßnahmen zu ergreifen sind. Sind risikomindernde Maßnahmen erforderlich, so gilt es, zu prüfen, ob das Risiko konstruktiv reduziert werden kann. Ist dies der Fall, sind diese umzusetzen und anschließend ist eine erneute Risikoabschätzung durchzuführen. Können die vorliegenden Gefährdungen nicht durch eine inhärent sichere Konstruktion ausreichend vermindert werden, so sind geeignete technische Schutzmaßnahmen zu treffen. Zur Auswahl einer geeigneten technischen Schutzmaßnahme empfiehlt sich der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und im Anhang (siehe *Abbildung 0-5 und Abbildung 0-6*) enthaltene Entscheidungsbaum für technische Schutzmaßnahmen.

Die beschriebene Vorgehensweise zur Risikobewertung, Risikominderung und Auswahl einer geeigneten zusätzlichen technischen Schutzmaßnahme ist in einem Ablaufdiagramm (siehe *Abbildung 4-13*) dargestellt und wird im Weiteren detailliert erörtert.

Nachdem durch den Planer der neue Prozessablauf definiert und die geplanten technischen Maßnahmen den einzelnen Prozessschritten zugewiesen wurden, gilt es, die sich daraus ergebenden Gefährdungen zu identifizieren und deren Risiko einzuschätzen. Die Identifizierung der auftretenden Gefährdungen erfolgt dabei, angelehnt an die Risikobeurteilung nach DIN EN ISO 12100:2011 (2011), für alle relevanten Lebensphasen des Arbeitsplatzes. Um alle auftretenden Gefährdungen zu identifizieren, bietet sich die Zuhilfenahme der in Anhang B der Norm enthaltenen Checkliste an. Die identifizierten Gefährdungen sind im Anschluss den einzelnen Prozessschritten zuzuordnen. Das von den Gefährdungen ausgehende Risiko in den betrachteten Prozessschritten ist im Anschluss einzuschätzen. Hierbei ist das Risiko eine Funktion des aus der Gefährdung resultierenden Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens ist dabei abhängig von der Häufigkeit und Dauer der Gefährdungsexposition, der Eintrittswahrscheinlichkeit des Gefährdungsereignisses und der Möglichkeit der Vermeidung oder Begrenzung des Schadens (DIN EN ISO 12100:2011-03, 2011).

Zur Risikoeinschätzung kommen unterschiedliche sowohl qualitative als auch quantitative Beurteilungsverfahren zum Einsatz. Zu den quantitativen Verfahren zählen Risikographenmethoden wie die Gefährdungsbaumanalyse (Hauptmanns et al., 2004), die sich zur Analyse komplizierter Ursachengefüge eignen. Diese erweisen sich jedoch als erheblich aufwendig und finden daher hauptsächlich bei Anlagen mit größeren Risikopotenzialen Anwendung. Zu den qualitativen Verfahren zählen Risikographenmethoden wie die Risikoeinschätzung mittels Risikograph nach DIN EN ISO 13849-1 (2016), die zur Ermittlung des erforderlichen Performancelevels (PL) für Steuerungen eingesetzt wird. Ebenso zählen zu den qualitativen Verfahren neben den Risikographenmethoden eine Vielzahl an Methoden, bei denen das Risiko durch eine Risikomatrix beurteilt wird. Zu diesen Verfahren gehört unter anderem die Risikoeinschätzung mittels Risikomatrix nach Nohl

(1988) sowie die Risikoeinschätzung mittels Risikozahlen nach Reudenbach (Reudenbach & Kälble, 2016), aus denen aufgrund der Risikoeinschätzung ein Handlungsbedarf für eine Risikominderung abgeleitet werden kann. (Mössner, 2012)

Des Weiteren zählt hierzu die praxisbewährte Methode der Ermittlung einer Risikoprioritätszahl (RPZ) nach einer von der Berufsgenossenschaft (BG RCI, 2020) empfohlenen Vorgehensweise. Diese wird im Folgenden näher erläutert und dient zur Beurteilung der vorliegenden Gefährdungen von hybriden Arbeitsplätzen in der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik.

Tabelle 4-19: Schwere des Schadens (S)

Schwere des Schadens (S)		
Bewertung	Schwere	Auswirkung, Schadensausmaß
10	sehr schwer	Schwerste Verletzung mit bleibendem Schaden bzw. möglicherweise tödliche Verletzung
8	schwer	Schwere Verletzung mit umfangreicher medizinischer Behandlung. Eventuell mit lang anhaltendem oder gar bleibendem Schaden in geringen Umfang.
5	mäßig	Verletzung, welche medizinischen Behandlung erfordert und zu temporären Einschränkungen führen kann, jedoch keine bleibenden Schäden zu erwarten.
2	gering	Reversibel: Erste Hilfe mit anschließender kurzzeitiger Einschränkung
1	keine	Keine Verletzung zu erwarten

Die Ermittlung der RPZ erfolgt in der gewählten Methode dreistufig durch die Beurteilung der jeweiligen Ausprägungen der Kriterien „Schwere des Schadens“, der kombinierten Beurteilung von „Exposition und Eintrittswahrscheinlichkeit“ sowie die „Vermeidbarkeit des Schadens“. Die Auswahl der entsprechenden Ausprägung liegt hierbei zu einem erheblichen Teil im Ermessen des Beurteilers.

Beginnend ist das Schadensausmaß und damit die Schwere des zu erwartenden Schadens (S) in eine der fünf Ausprägungen der *Tabelle 4-19* einzuordnen. Diese reichen von „keine Verletzung zu erwarten“ bis hin zu „schwerste Verletzungen mit bleibendem Schaden“.

Im Anschluss gilt es, mithilfe der in *Tabelle 4-20* dargestellten Matrix den kombinierten Wert für die Gefährdungsexposition und Eintrittswahrscheinlichkeit ($F \times O$) zu bestimmen. Hierzu werden die Gefährdungsexposition (F) anhand der prozentualen Dauer des Aufenthaltes im Gefahrenbereich sowie die Eintrittswahrscheinlichkeit (O) des gefährdenden Ereignisses von „vernachlässigbar“ bis hin zu „sehr wahrscheinlich“ beurteilt.

Tabelle 4-20: Exposition und Eintrittswahrscheinlichkeit (F x O)

Exposition und Eintrittswahrscheinlichkeit (F x O)					
Eintrittswahrscheinlichkeit (O) des gefährdenden Ereignisses	Gefährdungsexposition (F): Aufenthalt im Gefahrenbereich in % der Arbeitszeit / Schicht				
	100%	50%	25%	10%	5%
sehr wahrscheinlich	10	10	9	9	8
wahrscheinlich	10	9	8	7	6
weniger wahrscheinlich	7	6	5	4	3
unwahrscheinlich	5	4	3	2	1
vernachlässigbar	3	2	2	1	1

Die final benötigte Angabe zur Ermittlung der RPZ ist die Einschätzung zur Vermeidbarkeit des Schadens (A), die mithilfe der in *Tabelle 4-21* aufgeführten Bewertungskriterien erfolgt. Die Vermeidbarkeit des Schadens ist abhängig von der Geschwindigkeit des Auftretens der Gefährdung sowie von der Wahrnehmbarkeit des Risikos und der anschließenden Möglichkeit, der Gefahr ganz oder teilweise auszuweichen. Die Geschwindigkeit des Auftretens teilt sich hierbei in drei Stufen von „langsam“ bis „plötzlich“, die Risikowahrnehmung und Möglichkeit, der Gefahr auszuweichen, teilt sich auf in die Stufen von „gut“ bis „schlecht“.

Tabelle 4-21: Vermeidbarkeit des Schadens (A)

Vermeidbarkeit des Schadens (A)			
Geschwindigkeit des Auftretens	Risikowahrnehmung und die Möglichkeit, der Gefahr auszuweichen		
	gut	mittel	schlecht
L (langsam)	2	4	6
R (rasch)	4	6	8
P (plötzlich)	6	8	10

Nach der subjektiven Beurteilung und Einstufung der „Schwere des Schadens“, der Beurteilung von „Exposition und Eintrittswahrscheinlichkeit“ sowie der „Vermeidbarkeit des Schadens“ lässt sich mit *Formel (4-11)* die vorliegende RPZ ermitteln.

$$RPZ = S \cdot (F \cdot O) \cdot A \quad (4-11)$$

S Schwere des Schadens

O Eintrittswahrscheinlichkeit

F Exposition

A Vermeidbarkeit des Schadens

Nach erfolgter Einstufung des Risikos bezüglich des Schadensausmaßes und der Eintrittswahrscheinlichkeit gilt es, zu beurteilen, ob das Risiko, das nun durch die RPZ quantifiziert werden kann, gering ist bzw. so weit reduziert wurde, dass ein akzeptables Restrisiko

vorliegt. Durch folgende Werte wird die Schwelle des akzeptablen Restrisikos definiert:

$RPZ \geq 130$		<i>(Risiko nicht akzeptabel)</i>
$100 < RPZ < 130$		<i>(Risiko tolerabel / weitere risikomindernde Maßnahmen empfehlenswert)</i>
$RPZ < 100$		<i>(Risiko tolerabel / keine weiteren Maßnahmen erforderlich)</i>

Wird der RPZ-Grenzwert von 130 unterschritten, gilt das vorliegende Restrisiko als tolerabel, weshalb keine weiteren Maßnahmen zu ergreifen sind, insofern die gesetzlichen Mindestanforderungen erfüllt wurden. Dennoch ist es auch in diesen Fällen empfehlenswert, durch zusätzliche Maßnahmen eine weitere Risikominderung von $RPZ < 100$ zu erwirken. Wird der festgelegte Wert für das Grenzkrisiko jedoch überschritten, sind zwingend weitere Maßnahmen zur Risikoreduktion erforderlich. Zusätzlich ist bei einer Schadensschwere von $S = 8$ oder $S = 10$ mindestens eine Maßnahme zur Risikominderung unabhängig von der ermittelten RPZ zu ergreifen.

Ist dies der Fall, sollten im ersten Schritt konstruktive Maßnahmen für eine inhärente Sicherheit geprüft werden. Somit sollten vom Planer Maßnahmen ergriffen werden, die konstruktiv die Sicherheit erhöhen und somit das Risiko für den Mitarbeiter reduzieren. Ist dies möglich, ist im Anschluss eine erneute Risikoabschätzung erforderlich, um das noch vorliegende Restrisiko zu ermitteln. Ist keine weitere konstruktive Optimierung zielführend oder nach erneuter Prüfung das vorliegende Risiko nach wie vor nicht akzeptabel, müssen ergänzende technische Schutzmaßnahmen implementiert werden.

Um dem Planer bei der Auswahl der geeigneten Schutzmaßnahme bestmöglich zu unterstützen, wurde in dieser Arbeit ein Entscheidungsbaum (siehe *Abbildung 0-5 und Abbildung 0-6*) entwickelt, mit dessen Hilfe gezielt technische Schutzmaßnahmen getroffen werden können. Mithilfe des Entscheidungsbaums lässt sich der komplexe Entscheidungsprozess zur Auswahl der geeigneten Sicherheitstechnik bezogen auf die vorliegende Gefährdung unkompliziert und transparent ableiten. Hierfür werden dem Planer gezielt Fragen gestellt, die er mit Ja und Nein beantworten muss, um letztendlich einen Vorschlag für eine geeignete Sicherheitstechnik zu bekommen.

Die vorgeschlagenen technischen Schutzmaßnahmen lehnen sich an die allgemeinen Gestaltungsgrundsätze zur Sicherheit von Maschinen nach EN ISO 12100:2011 (2011) an und teilen sich in trennende und nicht trennende Schutzeinrichtungen. Des Weiteren werden die nicht trennenden Schutzeinrichtungen nach deren Verwendung in den Normalbetrieb

sowie in den Sonderbetrieb, wie Einrichten, Instandhaltung etc., unterteilt (siehe *Tabelle 4-22*).

Tabelle 4-22: Technische Schutzmaßnahmen nach EN ISO 12100:2010

trennende Schutzeinrichtungen	nicht trennende Schutzeinrichtungen	
	Normalbetrieb	Sonderbetrieb
feststehende trennende Schutzeinrichtung	Zweihandschaltung	Verriegelungseinrichtung
einstellbare trennende Schutzeinrichtung	sensitive Schutzeinrichtung (SPE)	Zustimmungseinrichtung / Steuerungseinrichtung mit selbsttätiger Rückstellung
verriegelte trennende Schutzeinrichtung	aktive optoelektronische Schutzeinrichtung (AOPD)	durch Formschluss wirkende Schutzeinrichtung
verriegelte trennende Schutzeinrichtung mit Zuhaltung	Begrenzungseinrichtung	Schrittschaltung

Nachdem für jeden Prozessschritt, dessen Risiko zu mindern ist, anhand des Entscheidungsbaums zusätzliche Schutzmaßnahmen getroffen wurden, sind diese zusammenzuführen. Das Zusammenführen von Schutzmaßnahmen ist erforderlich, da Gefährdungen in unterschiedlichen Prozessschritten häufig durch dieselbe Schutzmaßnahme gemindert werden können. Um dies zu ermöglichen, sind Kenntnisse des Gesamtprozessablaufes sowie des sowohl bestehenden als auch geplanten zukünftigen Arbeitsplatzes erforderlich. Daher ist es notwendig, zu beurteilen, welche Gefährdungen durch die Integration einer zusätzlichen gemeinsamen Schutzmaßnahme gemindert bzw. eliminiert werden können und welche Auswirkungen dies auf das Layout des Arbeitsplatzes sowie des Gesamtprozessablaufs hat.

Zur Verifizierung des festgelegten Sicherheitskonzeptes des Arbeitsplatzes ist die RPZ erneut zu ermitteln. Hierfür werden die eingangs über der Akzeptanzschwelle liegenden Prozessschritte erneut bezüglich deren Risiko geprüft und es wird bewertet, ob diese durch die getroffenen Maßnahmen nun in einem akzeptablen Rahmen ($RPZ < 130$) liegen. Ist dies nicht gegeben, ist das Sicherheitskonzept des Arbeitsplatzes erneut zu überarbeiten und ggf. zusätzliche technische Schutzmaßnahmen zu ergreifen.

Die entwickelte Methode zur Festlegung des Sicherheitskonzeptes an hybriden Montagearbeitsplätzen bietet eine systematische Herangehensweise zur Risikoanalyse und -bewertung. Durch die detaillierte Risikoanalyse auf Prozessschritzebene können bereits in der frühen Phase der Arbeitsplatzgestaltung sicherheitstechnische Restriktionen, die durch die geplante Technik entstehen können, identifiziert und in der weiteren Planung berücksichtigt werden. Des Weiteren ermöglicht die Methode dem Planer, zur Risikominderung strukturiert technische Schutzmaßnahmen auszuwählen und diese in die weitere Arbeitsplatzgestaltung einfließen zu lassen. Auf diese Weise erhöht die Methode die Effizienz sowie Effektivität des Planers bei der Arbeitsplatzgestaltung und trägt dazu bei, hybride Arbeitsplätze sicher zu machen.

4.3.2.2 Technologieauswahl zur Mensch-Technik-Interaktion

Insbesondere im Kontext der hybriden Montage, in der eine enge Verflechtung zwischen Mensch und Technik stattfindet, ist ein geeignetes Interaktionskonzept entscheidend für die erfolgreiche Implementierung derartiger Arbeitsplätze. Daher wird in diesem Unterkapitel eine Methode vorgestellt, die die systematische Technologieauswahl von Assistenzsystemen zur Gestaltung einer Mensch-Technik-Schnittstelle aufzeigt. Die entwickelte Methode dient der Bestimmung der geeigneten Technologie zur Umsetzung des Informationsaustausches und setzt die Kenntnis des Bedarfes an Informationsaustausch voraus.

Um den Planer bei der komplexen Aufgabe, der Auswahl einer für den Montageprozess geeigneten Informationsübertragungstechnologie, bestmöglich zu unterstützen, soll die Auswahl anhand eines methodischen Fähigkeitsabgleiches erfolgen. Für die Durchführung des Fähigkeitsvergleiches werden die Attribute der auf dem Markt verfügbaren und für die industrielle Anwendung geeigneten Informationseingabe- und Informationsausgabegeräte in einer Datenbank gespeichert. Die Datensätze der dokumentierten Technologien mit ihren spezifischen Attributen lassen sich bei Technologieänderungen oder Neuerscheinungen so jederzeit an die neuen Gegebenheiten angleichen. Auf der anderen Seite sind durch den Anwender die Anforderungen an die Technologien zu definieren. Diese teilen sich in allgemeine Anforderungen, Anforderungen an die Informationseingabe sowie Anforderungen an die Informationsausgabe. Zur Bestimmung der geeigneten Technologie erfolgt im Anschluss ein Korrelationsvergleich zwischen den Attributen der zur Verfügung stehenden Technologien und den Anforderungen, die an diese durch den Montageprozess gestellt werden (vgl. *Abbildung 4-14*).

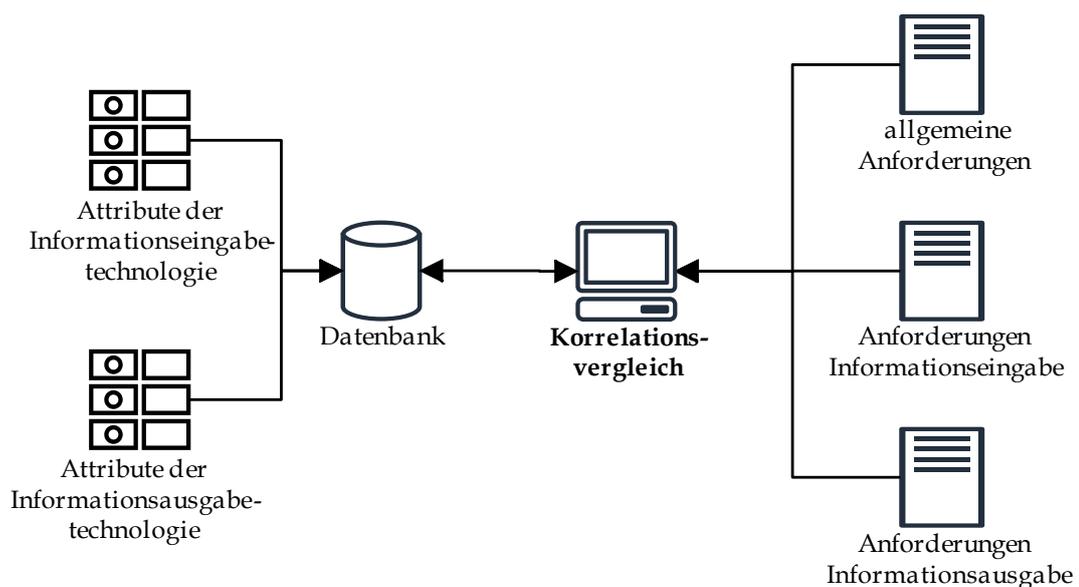


Abbildung 4-14: Topologie zur Technologiebestimmung der Mensch-Technik-Schnittstelle

Zu Beginn sind, für alle Prozessschritte geltend, die allgemeinen Anforderungen des Montagearbeitsplatzes an die Ein- und Ausgabetechnologien zu spezifizieren (siehe *Abbildung 4-15*).

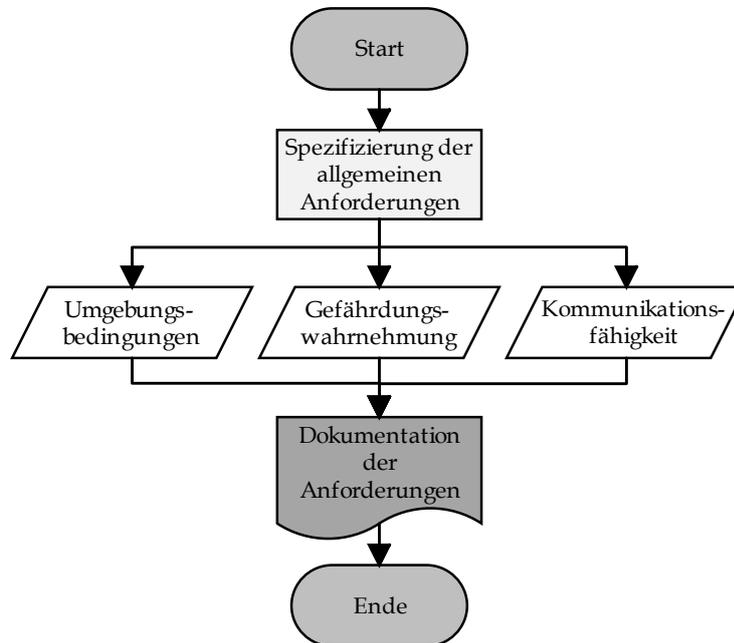


Abbildung 4-15: Ablaufbeschreibung der allgemeinen Anforderungsspezifizierung

Diese gelten für den gesamten Arbeitsplatz und umfassen die Umgebungsbedingungen Lärm, Störlicht, Schmierstoffe und Öle, starke Verunreinigungen sowie Erschütterungen und Vibration. Zusätzlich ist zu dokumentieren, ob der Arbeitsplatz eine erhöhte Gefährdungswahrnehmung des Mitarbeiters erfordert und ob dessen Kommunikationsfähigkeit zu anderen Mitarbeitern während der Nutzung der Assistenz erforderlich ist. Nachdem dies erfolgt ist, sind die spezifischen Anforderungen jeder Verrichtung an die Informationseingabetechnologien zu dokumentieren (siehe *Abbildung 4-16*).

Hierzu ist vorab zu prüfen, ob der Bedarf zur Informationseingabe der entsprechenden Verrichtung vorliegt. Besteht der Bedarf, innerhalb eines Prozessschrittes Informationen vom Mitarbeiter an die Maschine zu übergeben, sind diese zu spezifizieren. Die zu spezifizierenden Anforderungen für die Informationseingabe sind die Informationsart und -menge, die räumliche Verteilung, die Zugänglichkeit sowie die Dauer und Häufigkeit der Informationseingabe. Die so gewonnenen Erkenntnisse jeder Verrichtung sind zu dokumentieren.

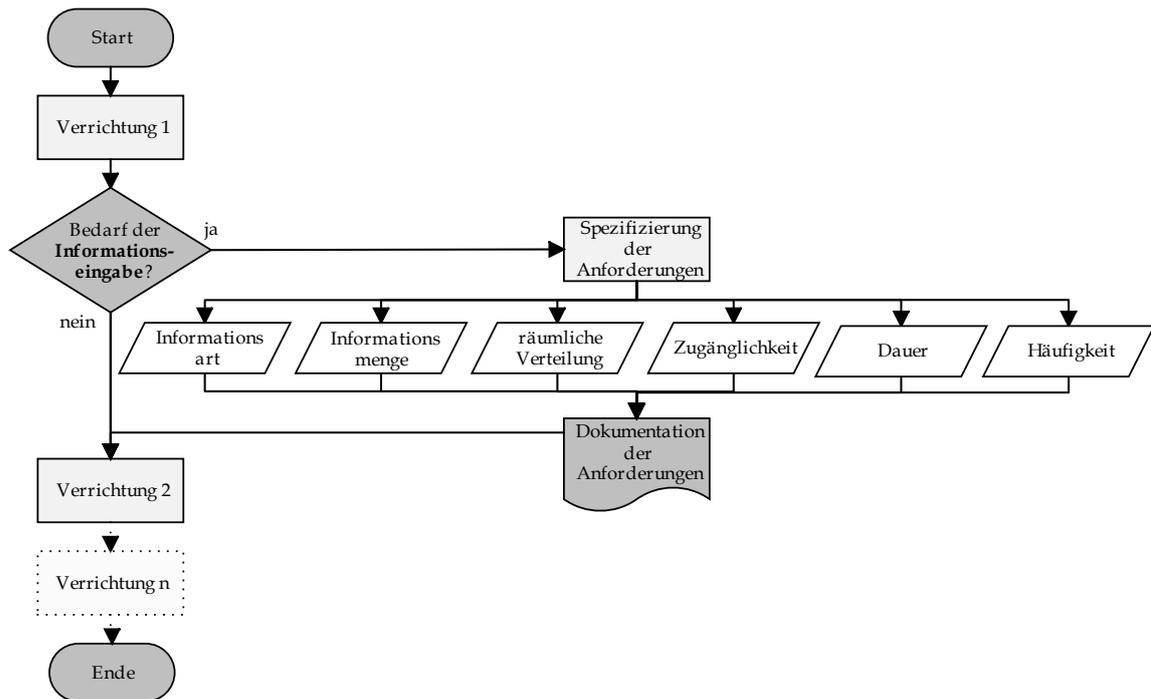


Abbildung 4-16: Ablaufbeschreibung Anforderungsspezifizierung der Informationseingabe

Analog der zuvor beschriebenen Vorgehensweise für die Informationseingabe verhält es sich mit der anschließend durchzuführenden Bewertung der Anforderungen zur Informationsausgabe (siehe *Abbildung 4-17*).

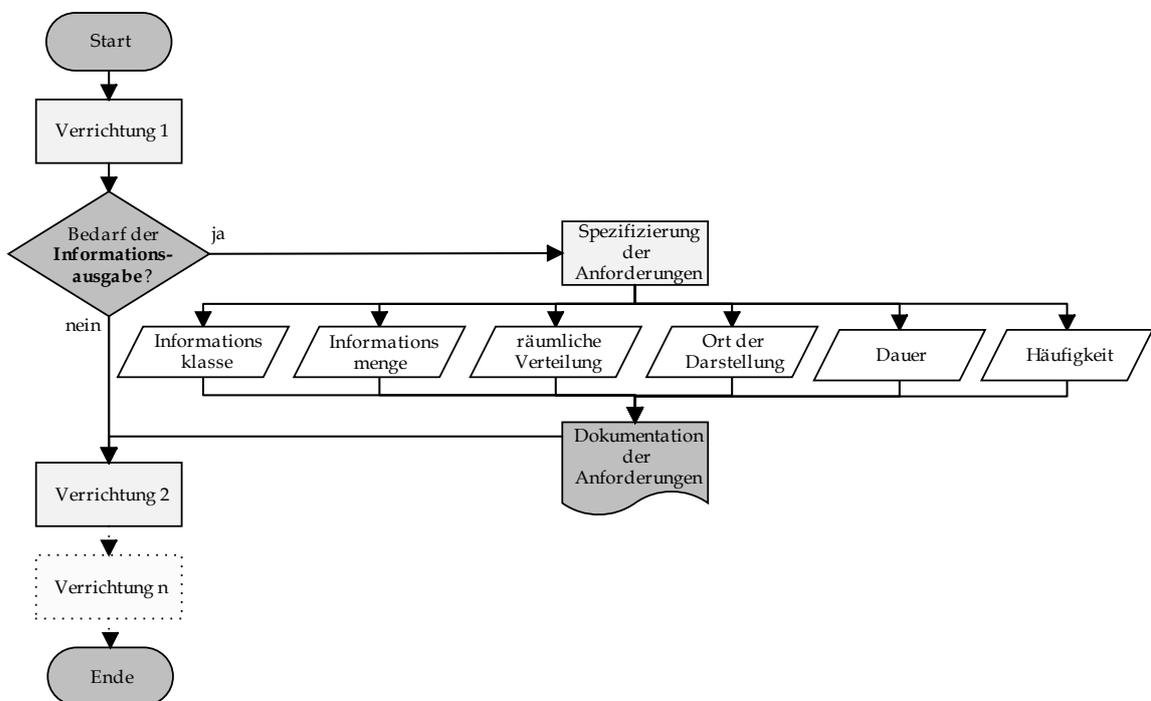


Abbildung 4-17: Ablaufbeschreibung Anforderungsspezifizierung der Informationsausgabe

Zu diesem Zweck sind die spezifischen Anforderungen jedes Prozessschrittes ebenfalls schriftlich festzuhalten. Die spezifischen Anforderungen sind hier die Informationsklasse, die Informationsmenge, die räumliche Verteilung, der Ort der Informationsdarstellung sowie die Dauer und Häufigkeit der darzustellenden Informationen.

Die möglichen Ausprägungen der allgemeinen Anforderungen sowie der spezifischen Anforderungen an die Informationseingabe und -ausgabetechnologien können aus *Abbildung 0-7* im Anhang dieser Arbeit entnommen werden.

Anhand der durch den Anwender dokumentierten Anforderungen und anhand der in der Datenbank gespeicherten Attribute der Ein- und Ausgabetechnologien ist es möglich, einen fähigkeitsbasierten Abgleich durchzuführen. Durch den Fähigkeitsabgleich werden den Anforderungen entsprechende Technologien ausgewählt, die eine zielgerichtete Interaktion zwischen Mensch und Technik ermöglichen.

Durch die entwickelte Methode zur Technologieauswahl für die Mensch-Technik-Interaktion erhält der Planer eine gezielte Unterstützung, um geeignete Technologien für die am Arbeitsplatz bestehenden Bedarfe systematisch und objektiv auszuwählen. Die Methodik bietet eine strukturierte Herangehensweise, die durch gezielte Fragen die Anforderungen spezifiziert und so den Auswahlprozess erleichtert. Dadurch trägt die Methode dazu bei, vorliegende Randbedingungen zu berücksichtigen und den Planer bei der Gestaltung des hybriden Arbeitsplatzes zu unterstützen.

5 Umsetzung des Konzepts

Bei der Gestaltung von hybriden Montagesystemen ist für den beauftragten Planungsingenieur die Beherrschbarkeit der Systemkomplexität eine der größten Herausforderungen. Die Komplexität des Systems ergibt sich durch die Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten des Automatisierungsgrades der einzelnen Prozessschritte, die zusammen mit dem durch ihre Umsetzung erzielten Nutzen im Gesamtkontext des Arbeitsplatzes betrachtet werden müssen. So ist für jeden Prozessschritt die Entscheidung zu treffen, welcher Automatisierungsgrad zum Durchführen der Montagetätigkeit der geeignetste ist.

Dies kann zum einen die ausschließlich manuelle Ausführung der Montagetätigkeit des Prozessschrittes durch den Mitarbeiter sein. Zum anderen stellt die Teilautomatisierung von Prozessschritten eine weitere Option dar. Somit werden Teile des Prozessschrittes automatisiert, um den Mitarbeiter bei seiner Montagetätigkeit zu unterstützen. Dies kann die Unterstützung beim Aufnehmen der Fügebauteile sein, z. B. durch das Vorvereinzeln und Richten oder das Platzieren der Fügebauteile. Die dritte Möglichkeit besteht in einer Vollautomatisierung des Prozessschrittes. In diesem Fall wird sowohl das Aufnehmen als auch das Platzieren des Fügebauteiles automatisiert, wodurch der Mitarbeiter keinerlei Montagetätigkeiten in diesem Prozessschritt auszuführen hat. Somit ist die Entscheidung zu treffen, welche Prozessschritte des Montageprozesses eines hybriden Arbeitsplatzes durch den Mitarbeiter manuell, teilautomatisiert oder voll automatisiert umzusetzen sind.

Die Herausforderung hierbei ist es, den geeigneten Automatisierungsgrad jedes einzelnen Prozessschrittes unter Berücksichtigung der technischen Automatisierbarkeit und des vorliegenden Optimierungspotenzials zu definieren. Durch den Planer ist somit die Frage zu beantworten, welcher zeitliche und damit wirtschaftliche Nutzen aus einer Prozessoptimierung durch eine Automatisierung zu erzielen ist, und zeitgleich ist zu klären, ob sich dies auch technisch realisieren lässt. Dabei ist es ebenfalls entscheidend, den zeitlichen Gesamtmontageablauf, die Koordination von automatisierten und manuellen Montageinhalten sowie das Sicherheitskonzept zu berücksichtigen. Um dies zu ermöglichen, wird die im Folgenden dargestellte Gesamtmethodik als ein modularer Methodenbaukasten mit Einzelmethoden eingestuft, die den Anwender bei seiner Entscheidungsfindung unterstützt.

Um die konzipierte Methodik problemlos anwenden zu können und somit einen niederschweligen Einstieg für einen breiteren Anwenderbereich zu ermöglichen, wurde die Gesamtmethodik in einen intuitiv bedienbaren Assistenten via Microsoft PowerApps übertragen (siehe *Kapitel 5.2*).

5.1 Topologie der Gesamtmethodik

Ziel der Planungsmethodik zur Gestaltung hybrider Arbeitsplätze ist es, systematisch eine fundierte Automatisierungsempfehlung für die einzelnen Prozessschritte eines Arbeitsplatzes auszusprechen. Für den Anwender stellt eine flexible adaptive Topologie in Form eines Methodenbaukastens für diesen Zweck den größten Mehrwert dar. Die im Folgenden vorgestellte Planungsmethodik (siehe *Abbildung 5-1*) begleitet den Planungsingenieur von der Analyse des Ausgangsszenarios über die Bewertungsphase hin zur Konzeptionierung bzw. Gestaltungsphase und unterstützt ihn systematisch auf dem Weg zum anwendungsspezifisch ideal gestalteten Arbeitsplatz.

Im Methodenbaukasten wird zwischen notwendigen bewertenden Primärmethoden und optional analysierenden Sekundärmethoden unterschieden, die die Funktion haben, die Empfehlungsfindung zu präzisieren. Die Sekundärmethoden dienen der Analyse und ermöglichen es dem Anwender, systematisch und gezielt Informationen über Produkt, Prozess und Betriebsmittel zu gewinnen. Durch die modular aufgebaute Gesamtmethodik lassen sich diese je nach benötigtem Informationsgrad und vorhandener Planungskapazität flexibel anwenden. Somit müssen nicht alle Sekundärmethoden zwingend genutzt werden, um die zentrale Primärmethode einsetzen zu können. Dies reduziert den Bearbeitungsaufwand, erlaubt aber zeitgleich die Einbindung weiterer situationsbedingt notwendiger Methoden. Die Gesamtmethodik ist in drei zentrale Phasen unterteilt. Diese sind die Analyse-, Bewertungs- und Gestaltungsphase.

Die erste Hauptphase widmet sich der ganzheitlichen Betrachtung von Produkt, Montageprozess und des Betriebsmittels unter Anwendung bewährter Methoden. Dabei werden die folgenden Sekundärmethoden verwendet, um Zusammenhänge und Einflüsse zu verstehen und zu dokumentieren:

- funktionaler Merkmalentstehungsbaum (*Kapitel 4.1.1*)
- Ishikawa-Diagramm (*Kapitel 4.1.2*)
- Montagevorranggraph (*Kapitel 4.1.3*)
- Variantenanalyse (*Kapitel 4.1.4*)
- Toleranz- und Fügeanalyse (*Kapitel 4.1.5*)

Somit tragen Sekundärmethoden dazu bei, ein fundiertes Verständnis des bestehenden Arbeitsplatzes zu erhalten und dies zu dokumentieren. Zusätzlich unterstützen sie den Entscheidungsprozess bezüglich der Durchführung der technischen Automatisierbarkeitsbewertung. Ebenso empfiehlt es sich, sie insbesondere bei schlecht bewerteten, hoch kritischen Kriterien anzuwenden, um die Ergebnisse zu quantifizieren und damit zu konkretisieren. Darüber hinaus dienen die Sekundärmethoden zur Ableitung der Montageschritte, um auf dieser Grundlage die Arbeitsinhalte jedes Prozessschrittes mithilfe von MTM-2 zu analysieren. (Hübner et al., 2023)

Die daraus gewonnenen Erkenntnisse stellen das Fundament der zweiten Hauptphase, der Bewertungsphase, dar. In der Bewertungsphase werden die einzelnen Prozessschritte durch die Primärmethoden bezüglich ihrer technischen Automatisierbarkeit (*Kapitel 4.2.1*) und des vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenzials (*Kapitel 4.2.2*) bewertet. Zeigt sich bei der Bewertung der Automatisierbarkeit, dass Zusatz Tätigkeiten (bspw. Sichtprüfungen) oder Fügevorgänge durchzuführen sind, die nicht zum Zusammensetzen (bspw. Kleben) gehören, empfiehlt es sich, ihre Automatisierbarkeit anhand von Versuchen zu verifizieren. Die auf diese Weise gewonnenen Ergebnisse führen zu einem Abgleich (*Kapitel 4.2.3*) der technischen Automatisierbarkeit und des vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenzials; auf Grundlage des Abgleichs wird eine Automatisierungsempfehlung für die einzelnen Prozessschritte ausgesprochen.

Nachdem durch die Ergebnisse der Bewertungsphase ein klares Bild vom zeitlichen Nutzen und der technischen Realisierbarkeit einer Automatisierung vorliegt, fließen diese Informationen in die Gestaltungsphase ein. Hier erfolgt die fähigkeits- und zeitpotenzialbasierte Zuteilung der Arbeitsinhalte auf Mensch und Technik.

Im Anschluss wird der iterative Prozess der Definition des Gesamtprozessablaufes durchgeführt. Die Iteration ist erforderlich, da eine Wechselwirkung zwischen der Zuteilung der Prozessschritte und der Feinplanung des Arbeitsplatzes besteht. So werden in der Feinplanung auf Basis des definierten Prozessablaufes unter anderem geeignete Technologien zur Mensch-Technik-Interaktion ausgewählt und Sicherheitskonzepte entwickelt. Diese können den Gesamtprozess beeinflussen und erfordern gegebenenfalls eine Anpassung des Ablaufs. Nachdem unter Berücksichtigung aller Aspekte der Prozessablauf final definiert wurde, ist die Konzeption des hybriden Montagearbeitsplatzes erfolgreich abgeschlossen.

Resümierend unterstützt die entwickelte Planungsmethodik für hybride Montagearbeitsplätze den Planungsingenieur systematisch durch die Analyse-, Bewertungs- und Gestaltungsphase hin zu einem optimal gestalteten, anwendungsspezifischen Arbeitsplatz. Dabei ermöglicht der flexibel gestaltete Methodenbaukasten eine angepasste Nutzung von Primär- und Sekundärmethoden, um ein umfassendes Verständnis des Arbeitsplatzes zu erhalten, die geeigneten Prozessschritte für eine Automatisierung zu identifizieren und den hybriden Arbeitsplatz effizient zu gestalten.

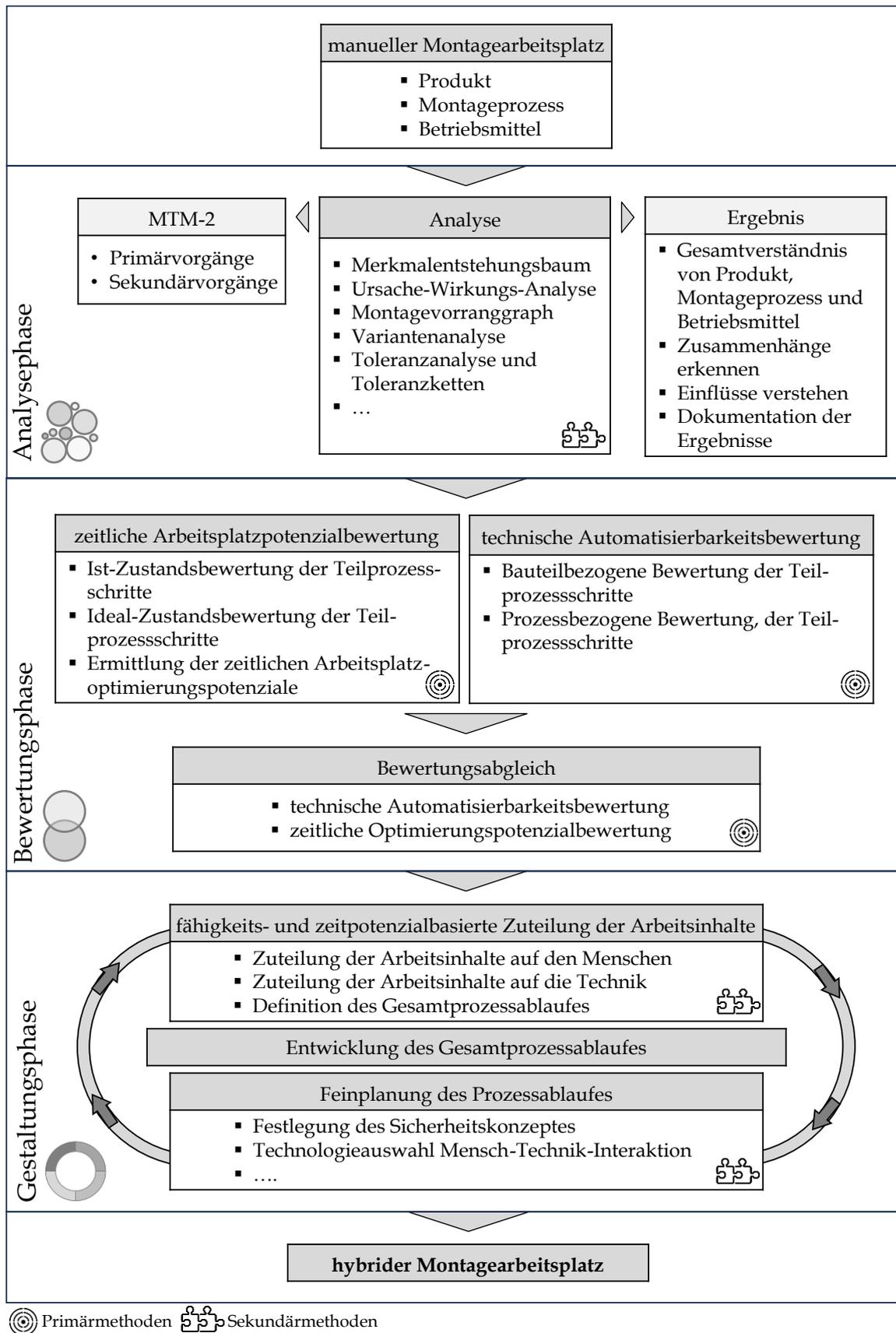


Abbildung 5-1: Topologie der Gesamtmethodik zur Konzeption hybrider Montagesysteme

5.2 Assistent zur Anwendung der Gesamtmethodik

Um die zuvor entwickelte und beschriebene Gesamtmethodik zur hybriden Arbeitsplatzgestaltung für den Endanwender aus der Industrie problemlos nutz- und anwendbar zu machen, ist es entscheidend, die Methodik unkompliziert und verständlich zu vermitteln. Insbesondere im schnelllebigem Produktionsumfeld, das durch zunehmend kürzere Produktlebenszyklen (Lotter & Wiendahl, 2012; Schmauder & Spanner-Ulmer, 2014) stetige Veränderung erfährt, müssen Arbeitsplätze fortwährend angepasst und umgestaltet werden. Vor allem hier herrscht jedoch ein starker Zeitdruck, wodurch im Tagesgeschäft meist keine Zeit für aufwendige Literaturrecherchen und methodische Analyse bleibt. Daher ist es entscheidend, dem Prozessplaner einen niederschweligen und effektiven Zugriff auf die entwickelte Methodik zu ermöglichen.

Ziel ist es daher, die Gesamtmethodik in einen digitalen Assistenten abzubilden, der den Anwender zielgerichtet durch die Methodik führt. Dieser soll das benötigte theoretische Wissen sowie die Vorgehensweise zur Durchführung der Einzelmethoden bzw. Bewertungen unkompliziert und verständlich vermittelt bekommen. Um die Nutzbarkeit weiter zu erhöhen, soll es dem Anwender ermöglicht werden, flexibel am Arbeitsplatz sowie mobil direkt in der Produktion auf den Assistenten zugreifen zu können. Um dies zu realisieren, muss die Anwendung wahlweise über Browser, Desktopversionen und mobile Endgeräte nutzbar sein.

Um die oben genannten Ziele zu erreichen, wurde die entwickelte Methodik in Form einer mobilen Applikation (App) mit Microsoft Power Apps (siehe *Kapitel 2.3.2*) umgesetzt. Dies ermöglicht es, sowohl mobil als auch per Browser schnell sowie problemlos auf die Anwendung und damit auf die benötigten Informationen zugreifen zu können. Aufgrund der klaren Struktur ist die Anwendung leicht verständlich und bedarf keiner umfangreichen Erfahrung oder Schulung seitens des Benutzers. *Abbildung 5-2* visualisiert auszugsweise die entwickelte Anwendung.

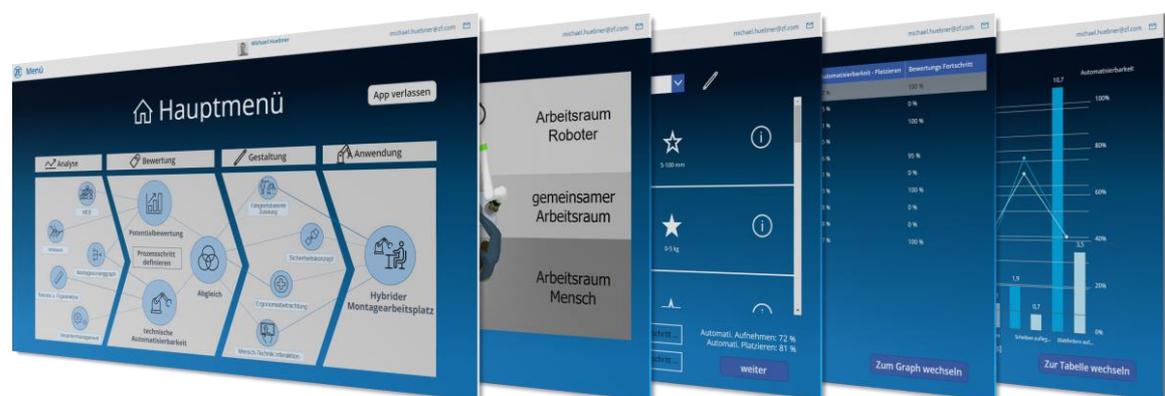


Abbildung 5-2: App hybride Arbeitsplatzgestaltung

In der entwickelten Anwendung wird der Benutzer systematisch durch die Methodik geführt und kann, wenn benötigt, detaillierte Informationen zu den integrierten Methoden aufrufen. Somit dient die App zusätzlich als digitales Nachschlagewerk, das grundlegendes Wissen zur hybriden Arbeitsplatzgestaltung vermittelt.

Durch eine Datenbankverknüpfung mit integrierten User- und bereichsbezogenen Suchfunktionen lassen sich Projekte anlegen, bearbeiten und speichern. So kann jederzeit auf bereits realisierte Projekte und die daraus gewonnenen Erkenntnisse im Unternehmen zugegriffen oder die Bearbeitung bereits begonnener Projekte fortgesetzt werden.

Die Bewertung der technischen Automatisierbarkeit und des zeitlichen Optimierungspotenziales jedes Prozessschrittes kann direkt in der Anwendung durchgeführt werden. Hierbei erfolgt automatisiert die Berechnung der Ergebnisse. Der Abgleich der berechneten Ergebnisse kann auf zwei unterschiedliche Weisen ausgewiesen werden. Einerseits können die ermittelten Ergebnisse in einer grafischen Darstellung zusammengeführt und visualisiert werden. Andererseits lassen sich diese auch tabellarisch ausgeben, wodurch ein detaillierter Überblick über die Daten mit einer deutlichen Vergleichbarkeit erzielt werden kann. Beide Auswertemethoden können durch den Anwender nach Bedarf eingesetzt werden.

Auf Basis des Abgleiches werden im Anschluss durch den Anwender die Prozessschritte dem Menschen bzw. der Technik zugewiesen. Nach der Zuweisung erfolgt die Ermittlung des sich hieraus ergebenden Risikos für den Menschen innerhalb der betroffenen Prozessschritte. Dies erfolgt durch eine softwaregestützte Identifizierung der Gefährdungen mit anschließender Risikobewertung. Auf Grundlage dieser Bewertung und prozessbedingten Gegebenheiten werden technische Schutzmaßnahmen empfohlen. Zudem ist die App mit einer Datenbank verknüpft, durch die eine gezielte Technologieauswahl zur Mensch-Technik-Interaktion aufgrund eines Korrelationsvergleichs möglich ist. Vom Nutzer werden hierfür lediglich Anforderungen beschrieben, um geeignete Technologievorschläge zu erhalten.

Die entwickelte Anwendung bietet eine umfassende und benutzerfreundliche Plattform für die hybride Arbeitsplatzgestaltung, von der Projektverwaltung über die Arbeitsplatzbewertung bis hin zur Risikobeurteilung und Technologieauswahl und unterstützt somit Anwender dabei, ihre Prozesse effizient sowie sicher zu gestalten.

6 Validierung – NKW-Druckplattenmontage

Die Validierung der entwickelten Methodik zur Konzeption hybrider Montagesysteme erfolgt anhand der NKW-Druckplattenmontage. Dieses Validierungsszenario wurde gezielt gewählt, da es sich aufgrund der vom Mitarbeiter benötigten Sensitivität sowie der Vielzahl an stark dimensionsunterschiedlichen Bauteilen um einen komplexen Montageprozess handelt. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden ausführlich dargestellt. Nach der Anwendung der Einzelmethoden am Validierungsszenario wird am Ende des jeweiligen Unterkapitels eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse in Form eines kurzen Fazits präsentiert.

6.1 Betrachtung von Produkt- und Ausgangsszenario

Im Folgenden werden das Validierungsprodukt, die NKW-Druckplatte, sowie das Validierungsszenario mit den entsprechenden Betriebsmitteln vorgestellt. Als Validierungsprodukt dient die Kupplungsdruckplatte (vgl. *Abbildung 6-1*) für Nutzkraftfahrzeuge.



Abbildung 6-1: Kupplungsdruckplatte für Nutzkraftfahrzeuge

Diese stellt als Teil des Kupplungssystems einen entscheidenden Baustein im Antriebsstrang dar. Die Kupplungsdruckplatte dient zur Übertragung des Motordrehmomentes über die Kupplungsscheibe auf die Eingangswelle des Getriebes. Fest mit dem Schwungrad verschraubt, besteht die Druckplatte hauptsächlich aus einem Gehäuse aus Blech, einer Anpressplatte aus Guss sowie einer Tellerfeder mit integrierten Betätigungshebeln, der Membranfeder. Die axial verschiebbare Anpressplatte wird im eingekuppelten Zustand durch die Membranfeder gegen die Reibbeläge der Kupplungsscheibe und das Schwungrad gepresst. Die Kraftcharakteristik der Membranfeder bestimmt die zum Öffnen der Kupplung notwendigen Betätigungskräfte. Um einen Freilauf zwischen Anpressplatte und Reibbelag beim Öffnen der Kupplung zu gewährleisten, werden Blattfedern mit dem Gehäuse sowie der Anpressplatte vernietet. Die Blattfedern sorgen mit ihrer

ausgeübten Kraft für einen stetigen Kontakt zwischen Anpressplatte und Membranfeder, wodurch die Anpressplatte bei Betätigung der Membranfeder sicher folgt. (ZF Friedrichshafen, 2023)

Der Montageprozess der NKW-Druckplatte beginnt mit dem manuellen Abzählen und anschließenden Auflegen von jeweils vier kurzen Flachkopfnieten und vier Näpfchen auf die hydraulisch gelagerten Stempel des Nietunterwerkzeuges. Über die aufgelegten Nieten wird das bereits vormontierte ZSB-Gehäuse gelegt. Dieses wurde während des Vernietungsprozesses des vorherigen Bauteiles durch Einlegen des Drahringes sowie der Membranfeder in das Gehäuse vorbereitet. Durch die Betätigung eines Zweihandschalters wird über einen zentrischen Spannsterne die Membranfeder nach unten gezogen und zusammen mit dem Gehäuse auf der Vorrichtung vorgespannt. Im Anschluss werden jeweils drei Blattfedern mit ihrer Bohrung an einem Ende über die Flachkopfnieten des Gehäuses gesteckt und axial so verdreht, dass die Bohrungen des anderen Endes deckungsgleich mit denen der Näpfchen sind. Das Auflegen der Anpressplatte erfolgt unterstützt durch ein handgeführtes Lastaufnahmemittel. Der Mitarbeiter positioniert hierbei die Bohrungen in den Laschen der Anpressplatte fluchtend mit den Bohrungen der Näpfchen und denen der Blattfederpakete. Dies erfordert ein hohes Maß an Feingefühl im Umgang mit dem Lastaufnahmemittel sowie eine gute Augen-Hand-Koordination. Nach der korrekten Positionierung wird jeweils ein langer Flachkopfniet in die vier Bohrungen der Anpressplatte durch die Blattfederpakete und die Näpfchen geführt. Abschließend werden noch vier Scheiben über die kurzen Flachkopfnieten des Gehäuses positioniert. Die Explosionsdarstellung (siehe *Abbildung 6-2*) stellt den beschriebenen Montageprozess einer NKW-Druckplatte in ihrer Reihenfolge von unten nach oben dar.

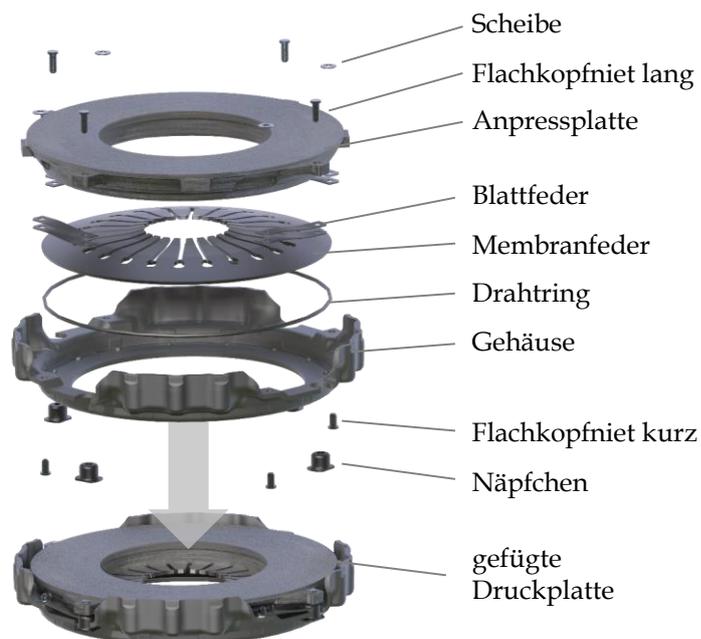


Abbildung 6-2: Aufbau Kupplungsdruckplatte

Nach vollständiger Bestückung des Unterwerkzeugs wird dieses durch Betätigen des Zweihandschalters über ein Linearachssystem in die Nietformmaschine eingefahren und unter dem Oberwerkzeug positioniert. Anschließend wird das Oberwerkzeug auf das Unterwerkzeug verfahren und die dazwischenliegende Druckplatte durch Umformen der Nieten gefügt. Die Entnahme der fertig montierten Druckplatte erfolgt automatisiert auf der Rückseite der Nietpresse durch einen Industrieroboter. Dieser handhabt die Druckplatte durch die Stationen des Auswuchtens, der Kraft-Weg-Kennlinien- und Funktionsprüfung, des Laserbeschriftens sowie des Konservierens bis hin zur Übergabe an eine angetriebene Rollenbahn. Diese sorgt abschließend für den Abtransport sowie für die Pufferung der fertigen Druckplatte vor dem manuellen Verpack- sowie Prüfarbeitsplatz.

Das **Hauptbetriebsmittel** zur Montage der NKW-Druckplatte ist eine hydraulische Nietformmaschine, auf deren Unterwerkzeug durch einen Mitarbeiter alle für den Zusammenbau benötigten Komponenten aufgelegt und vorgespannt werden.

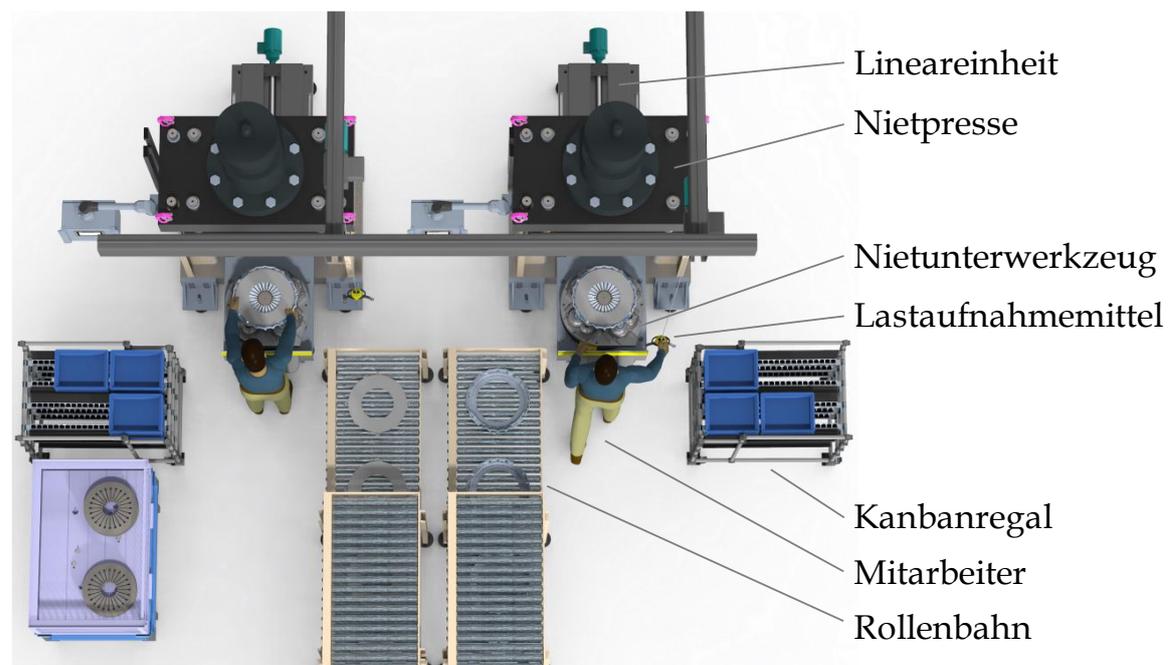


Abbildung 6-3: Arbeitsplatz Ausgangsszenario

Um den geforderten Linientakt einhalten zu können, wurden an der in dieser Arbeit betrachteten Montagelinie die Endmontagestationen dupliziert. Der Endmontagearbeitsplatz wird von zwei Mitarbeitern mit identischen Arbeitsinhalten bedient und besteht im Wesentlichen aus zwei hydraulischen Nietformmaschinen, zwei angetriebenen Rollenbahnen, zwei Kanban-Regalen sowie zwei Lastaufnahmemitteln.

Kleinteile wie Flachkopfniete, Näpfchen und Blattfedern werden direkt aus einem KLT entnommen und abgezählt. Drahringe und Membranfedern werden in Gitterboxen

angeliefert und in Montagenähe bevorratet. Die Andienung von Gehäusen und Anpressplatten erfolgt über angetriebene Rollenbahnen aus der direkt angeschlossenen zerspannenden Fertigung. Das Handling der ca. 25 kg schweren Anpressplatten wird durch ein handgeführtes Lastaufnahmemittel unterstützt. Der Aufbau des Arbeitsplatzes sowie die Anordnung der Betriebsmittel sind in *Abbildung 6-3* dargestellt.

6.2 Analyse des Validierungsszenarios

Nachdem das Validierungsprodukt sowie das Validierungsszenario näher vorgestellt wurden, wird in der ersten Phase der Gesamtmethodik die Analyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel durchgeführt. Die Anwendung der Sekundärmethoden wird im Weiteren am Beispiel der NKW-Druckplattenmontage verdeutlicht.

6.2.1 Merkmalentstehungsbaum

Zu Beginn der Analyse wird in interdisziplinärer Zusammenarbeit ein **funktionaler Merkmalentstehungsbaum** (MEB) erarbeitet. Dieser dient als zentrales Mittel zur Dokumentation und zum Visualisieren der Zusammenhänge zwischen Produkt-, Prozess- und Betriebsmittelmerkmalen sowie deren Wechselwirkungen. An dessen Spitze steht das Zielmerkmal, im Falle der NKW-Druckplatte die Vollständigkeit und Funktion der Druckplatte. In der nächsten Ebene werden nach der Top-Down-Vorgehensweise Merkmale, die einen direkten Einfluss auf das Zielmerkmal haben, dargestellt und mit dem Zielmerkmal verbunden. So haben auf das Zielmerkmal, das in der Vollständigkeit und Funktion der Druckplatte besteht, die Produktmerkmale Montierbarkeit beim Kunden die Funktion die Übertragung und Trennung von Drehmoment, die Lebensdauer, die Produktunwucht sowie die Vollständigkeit aller Teile direkten Einfluss. *Abbildung 6-4* stellt das Zielmerkmal mit dessen fünf Einflussmerkmalen dar.

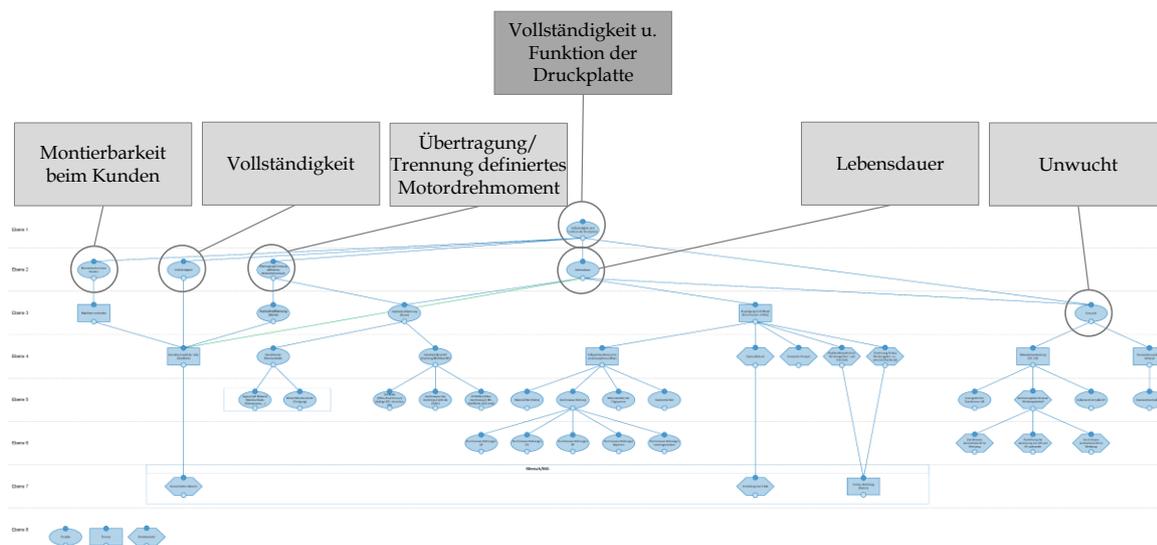


Abbildung 6-4: Zielmerkmal MEB

In den Unterverzweigungen der folgenden Ebenen werden die definierten Einzelmerkmale weiter hinsichtlich ihrer Einflussfaktoren analysiert und in so entstehenden Teilbäumen dargestellt. Hierbei wird zwischen Produktmerkmalen, Prozessmerkmalen und Betriebsmittelmerkmalen durch die Verwendung von unterschiedlichen Symbolen unterschieden.

Abbildung 6-5 stellt beispielhaft einen Auszug aus dem MEB, den Teilbaum des Produktmerkmals Unwucht, dar. Die detaillierte Darstellung des MEB ist unter „Zusätzliche Darstellungen“ dem Anhang zu entnehmen (siehe *Abbildung 0-1* und *Abbildung 0-2*). Dieser verdeutlicht, dass die Unwucht des Produktes maßgeblich durch den Prozess der Mittelachszentrierung von Anpressplatte und Gehäuse sowie durch die Vorzentrierung der Membranfeder im Gehäuse beeinflusst wird. In der nächsten Ebene lässt sich erkennen, wie wiederum diese beiden Merkmale beeinflusst werden. So zeigt sich, dass die Vorzentrierung der Membranfeder im Gehäuse vom vorgelagerten Zerspanungsprozess, nämlich dem Innenzentriermaß des Gehäuses, beeinflusst wird und somit in der Montage auf ein Produktmerkmal des Gehäuses zurückzuführen ist. Die Mittelachszentrierung von Anpressplatte und Gehäuse ist einerseits abhängig von den Produktmerkmalen Innendurchmesser der Anpressplatte sowie Außendurchmesser des Gehäuses, jedoch auch von den Zentrierdurchmessern des Oberwerkzeuges, bei denen es sich um Betriebsmittelmerkmale handelt. Die Zentrierdurchmesser im Werkzeugoberteil lassen sich bei weiterer Betrachtung noch in die Betriebsmittelmerkmale des Zentrierdurchmessers des Gehäuses und der Anpressplatte sowie deren Ausrichtungen zueinander unterteilen.

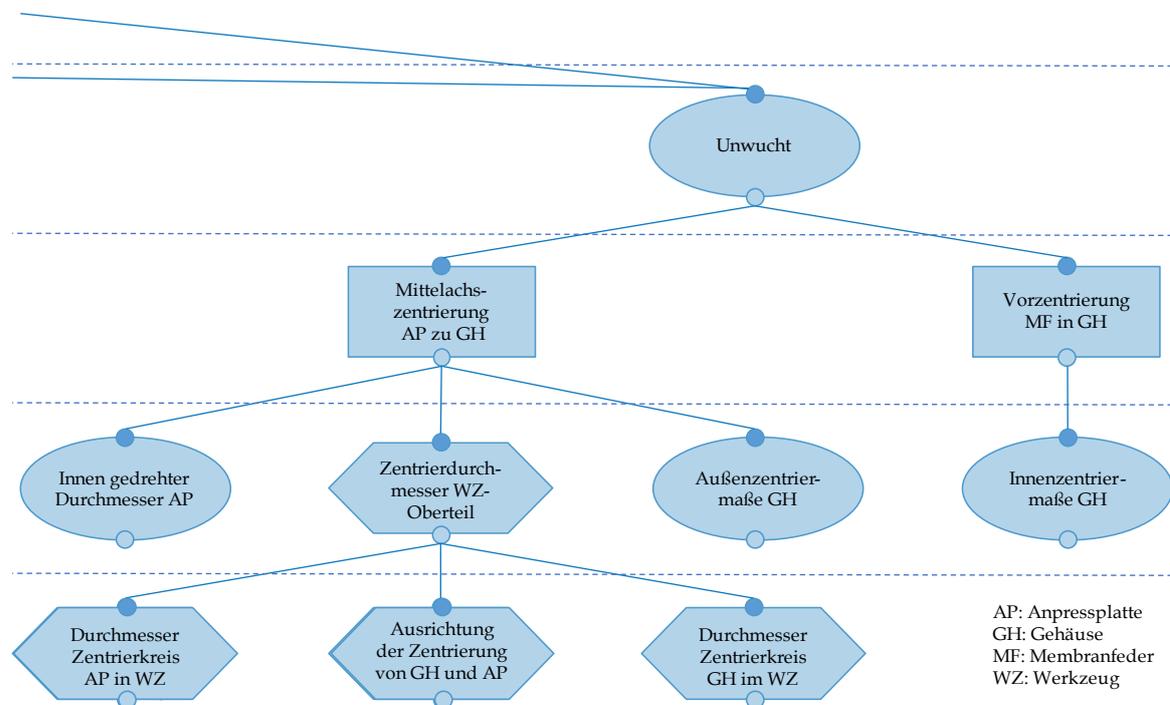


Abbildung 6-5: MEB Auszug Unwucht

Zusammenfassend lässt sich folgern, dass die vom Kunden wahrgenommene Qualität, in diesem Fall die Unwucht und Schwingung im Antriebsstrang, maßgeblich durch die richtige Zentrierung der drei massegrößten Bauteile (Gehäuse, Membranfeder, Anpressplatte) beeinflusst wird. Diese Merkmale werden primär durch die in der Montage verwendeten Nietwerkzeuge sowie durch die vorgelagerte Teilefertigung geprägt.

Fazit

Das Aufstellen eines funktionalen MEB bedarf eines bestimmten Aufwandes an Ressourcen, da es sich empfiehlt, diesen in interdisziplinärer Zusammenarbeit mit anderen Abteilungen wie Qualität und Entwicklung zu ermitteln. Jedoch erst durch die gemeinsame Diskussion, ausgehend vom Zielmerkmal, werden die Einflussmerkmale herausgearbeitet und durch die Top-down-Vorgehensweise erfolgt die Definition der entsprechenden Einflussfaktoren. Dies ermöglicht allen Beteiligten, ein fundiertes Verständnis für Produkt, Prozess sowie Betriebsmittel zu erhalten. Die so gewonnenen Erkenntnisse tragen dazu bei, an einem späteren Zeitpunkt die für die korrekte Montage entscheidenden Einflussfaktoren zu kennen und in der Planungs- und Gestaltungsphase zu berücksichtigen.

6.2.2 Ursache-Wirkungs-Analyse

Das Erkennen von Ursachen, die eine negative Auswirkung auf den betrachteten Montageprozess haben, ist von erheblicher Bedeutung, um durch gezielte Gegenmaßnahmen einen stabilen Prozess auslegen zu können. So wurde in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen Arbeitsvorbereitung und Qualitätsabteilung ein **Ishikawa-Diagramm** erstellt, das die Einflüsse aufzeigt, die eine negative Auswirkung auf den Montageprozess der NKW-Druckplattenmontage haben. Die vollumfängliche Darstellung des erarbeiteten Ishikawa-Diagrammes ist im Anhang dieser Arbeit unter „Zusätzliche Darstellungen“ als *Abbildung 0-3* zu finden. Das erstellte Ishikawa-Diagramm (*Abbildung 6-6*) veranschaulicht deutlich die in diesem Fall betrachtete quantitativ stark unterschiedliche Verteilung der möglichen Einflussfaktoren.

Es zeigt sich, dass die **Umwelt** sowie die gewählte **Methode** nur einen kaum erkennbaren Einfluss auf das Ergebnis der Druckplattenmontage haben. Hieraus lässt sich ableiten, dass Umwelteinflüsse wie Temperaturschwankungen oder Verunreinigungen sowie die vorgegebene Methode das Ergebnis der Druckplattenmontage nicht wesentlich beeinflussen und dass generell ein stabiler Montageprozess vorliegt.

Den mit Abstand größten Einfluss auf den Montageprozess hat in diesem Fall der **Mensch**. Dieser beeinflusst durch den manuellen Rüstvorgang sowie durch das manuelle nicht überwachte Auflegen der Einzelteile auf das Nietunterwerkzeug signifikant das Montageergebnis.

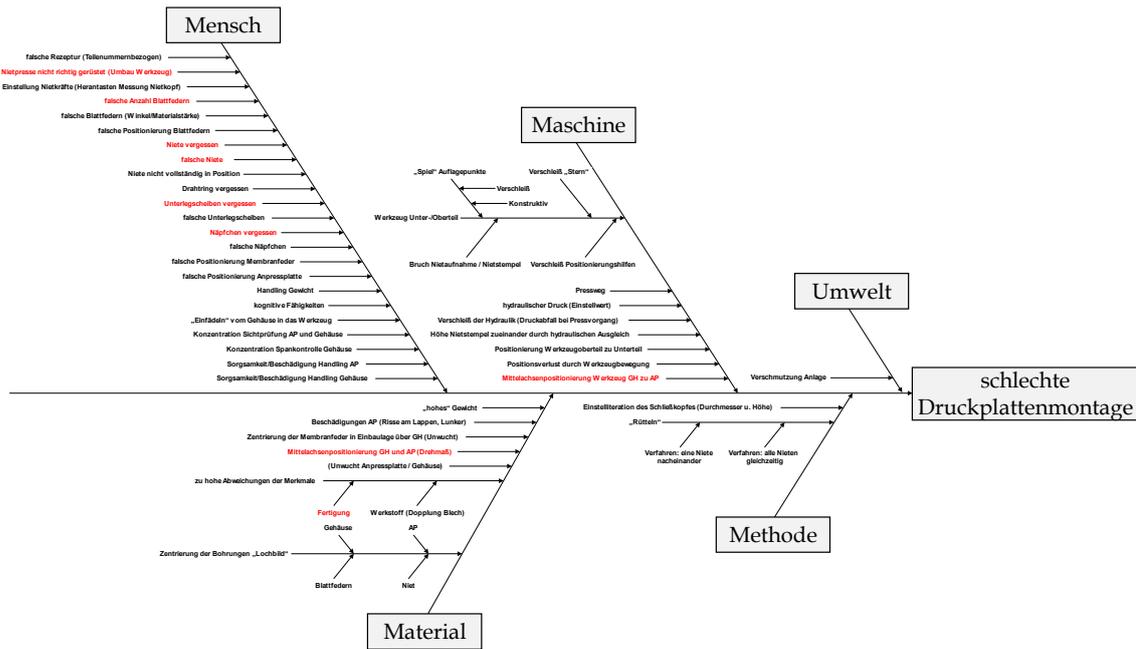


Abbildung 6-6: Übersicht Ishikawa-Diagramm Druckplattenmontage

Darüber hinaus ist die **Maschine**, im Fall der Druckplattenmontage die Nietpresse, ein bedeutender Beitragsleister für die korrekte Montage der NKW-Druckplatte. Hier sind es vor allem die Positionierung der Nietstempel zueinander und deren Verschleiß sowie die Ausrichtung des Oberwerkzeugs zum Unterwerkzeug, was zu einem negativen Montageergebnis führen kann.

Einen ebenfalls signifikant starken Einfluss auf das Montageergebnis zeigt sich anhand der Qualität der für die Montage bereitgestellten **Materialien**. Hier ist es hauptsächlich die Maßhaltigkeit der angelieferten Bauteile, die über eine erfolgreiche Montage entscheiden. Da die Qualität der Einzelteile durch Vorprozesse oder durch die Qualität der Zukaufteile bestimmt wird, kann durch die Gestaltung der Montage hierauf kein Einfluss genommen werden.

Insgesamt birgt der Mensch durch inkorrekte Rüstvorgänge sowie durch Verwenden der falschen Anzahl von Teilen das größte Fehlerpotenzial und hat somit den stärksten Einfluss auf das Montageergebnis. Hier wird ein Verbesserungspotenzial durch die Integration von Sensorik zur Prozessüberwachung erkennbar, durch die fehlerhafte Arbeitsinhalte des Mitarbeiters eruiert werden könnten. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, durch eine Automatisierung oder Teilautomatisierung von Arbeitsinhalten fehleranfällige Arbeitsinhalte des Mitarbeiters vollständig entfallen zu lassen.

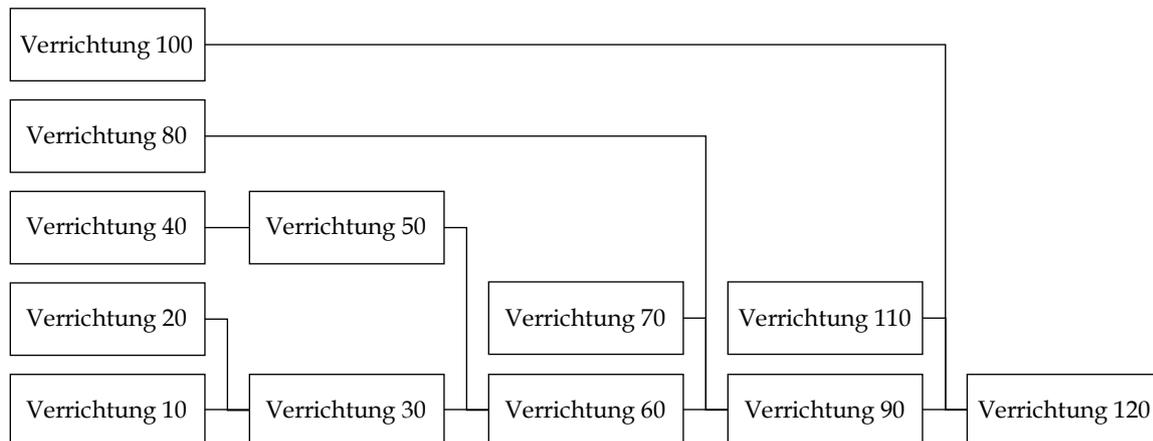
Fazit

Die Durchführung einer Ursache-Wirkungs-Analyse vor Beginn der Arbeitsplatzgestaltung bietet die Gelegenheit, die Einflussfaktoren auf ein negatives Montageergebnis

frühzeitig zu identifizieren. Dies führt einerseits zu einem besseren Prozessverständnis und andererseits kann auf diese Weise in der späteren Planungsphase durch zielgerichtete Gegenmaßnahmen den negativen Einflussfaktoren entgegengewirkt werden. Durch das farbliche Hervorheben von Ursachen mit potenziell hohen Einflüssen im Ishikawa-Diagramm lässt sich eine Kategorisierung sowie Priorisierung von Ursachen problemlos umsetzen.

6.2.3 Montagevorranggraph

Im Folgenden werden die zur Komplettierung einer Kupplungsdruckplatte nötigen Montageschritte anhand des Montagevorranggraphen (Abbildung 6-7) visualisiert und anschließend analysiert. Es werden die einzelnen Verrichtungen in ihrer logischen sowie zeitlichen Reihenfolge in Form von Knoten dargestellt sowie nach ihrer frühestmöglichen Umsetzung angeordnet und mit Kanten verbunden. Das Ende der Kante stellt jeweils den spätestmöglichen Ausführungszeitpunkt der Verrichtung dar.



Nr.	Verrichtung	Nr.	Verrichtung
10	Nieten kurz in Unterwerkzeug	70	Blattfedern auflegen
20	Näpfchen in Unterwerkzeug	80	Sichtprüfung Anpressplatte
30	Gehäuse in Unterwerkzeug	90	Anpressplatte auf Gehäuse
40	Drahtring in Gehäuse	100	Nieten lang in Anpressplatte
50	Membranfeder in Gehäuse	110	Unterlegscheiben über Niet kurz
60	Spannvorgang Membranfeder	120	Nietvorgang auslösen

Abbildung 6-7: Montagevorranggraph Druckplattenmontage

Zu Beginn der Montage können die Nieten kurz oder die Näpfchen auf das Unterwerkzeug aufgelegt werden. Im Montagevorranggraphen ist dies durch die parallele Anordnung der Verrichtungen 10 und 20 dargestellt. Nachfolgende Verrichtung 30, das Auflegen des Gehäuses, kann jedoch erst erfolgen, wenn sowohl die Nieten als auch die Näpfchen kurz auf das Unterwerkzeug aufgelegt wurden. Verrichtung 40, das Einlegen des Drahtringes in das Gehäuse, kann bereits zu Beginn der Montage erfolgen. Das Einlegen

der Membranfeder, Verrichtung 50, kann jedoch erst nach dem Einlegen des Drahringes durchgeführt werden, da sich dieser zwischen Gehäuse und Membranfeder befinden muss. Das Vormontieren von Drahring und Membranfeder vor dem Umsetzen des Gehäuses ist realisierbar, hat jedoch zur Konsequenz, dass sich bei der Montage des Gehäuses der Drahring und die Membranfeder bereits im Gehäuse befinden, wodurch das Gewicht des zu handhabenden Bauteiles erhöht wird. Vor der Durchführung der Verrichtung 60, dem Vorspannen der Membranfeder, müssen alle eben analysierten Verrichtungen beendet sein.

Verrichtung 90, das Auflegen der Anpressplatte, kann erst durchgeführt werden, nachdem die Membranfeder vorgespannt wurde und Operation 70, das Auflegen der Blattfedern, abgeschlossen ist. Zusätzlich muss vor dem Verbau noch die Verrichtung 80, die Sichtprüfung der zerspannten Oberflächen bezüglich Materialabplatzungen, Lunkern etc. erfolgt sein. Diese Qualitätsprüfung kann bereits zu Beginn der Montage vorgenommen werden, muss jedoch vor der Montage des Bauteils abgeschlossen sein. Der Verbau der Anpressplatte ist nur nach positiver Bewertung des Zerspannungsergebnisses zulässig. Verrichtung 110, das Auflegen der Unterlegscheiben, kann ebenfalls erst nach Beendigung des vorangegangenen Arbeitsschrittes, des Auflegens der Blattfedern umgesetzt werden. Dieser Montageschritt ist jedoch unabhängig vom Auflegen der Anpressplatte und kann daher davor oder danach erfolgen. Vor dem Auslösen des finalen Nietvorganges, Verrichtung 120, müssen die Nieten lang, Operation 90, in die Bohrungen der Anpressplatte eingesetzt werden. Dies kann jederzeit ab Beginn der Montage durchgeführt werden. Wenn sie jedoch in Form einer Vormontage bereits vor dem Aufsetzen der Anpressplatte erfolgt, hat dies zur Konsequenz, dass beim Aufsetzen der Anpressplatte alle vier Nieten gleichzeitig zusammen mit der Anpressplatte zu fügen sind, wodurch eine signifikant höhere Positioniergenauigkeit erforderlich ist. Wird dies nach dem Aufsetzen der Anpressplatte durchgeführt, können die Nieten einzeln gefügt werden, wodurch der Fügeprozess deutlich vereinfacht wird.

Fazit

Durch das Erstellen des Montagevorranggraphen sind für den Anwender einerseits die möglichen Verbaureihenfolgen mit ihren vorhandenen Restriktionen klar erkennbar und andererseits wird dieses Wissen transparent dokumentiert sowie gleichzeitig visualisiert. Dies stellt einen elementaren Wissensbaustein dar, auf den in der späteren Arbeitsplatzgestaltung zurückgegriffen werden kann.

6.2.4 Variantenanalyse

Die Analyse der vorliegenden Variantenvielfalt ist ein entscheidender Faktor zur Einschätzung der Realisierungskomplexität einer Automatisierungslösung. Daher sind sowohl die Anzahl der Varianten des zu montierenden Produktes als auch deren Einzelteile bezüglich ihrer Beschaffenheit auf Ähnlichkeit zu analysieren. Diese Information wird zu einem späteren Zeitpunkt unter anderem zur Bewertung der technischen Automatisierbarkeit benötigt und dient dazu, das Kriterium „Anzahl an Variantenfamilien“ konkret zu quantifizieren. Am Validierungsszenario werden die Varianten der NKW-Druckplatte sowie ihre Einzelteile bezüglich der Merkmale, Abmessungen sowie der daraus ableitbaren Variantenfamilien tabellarisch dargestellt (siehe *Tabelle 6-1*).

Ein Ziel der Variantenanalyse ist es, spezifische Merkmale der Bauteile und Baugruppen zu bestimmen, die ähnlich oder ähnlich genug sind, um diese zu einer Variantenfamilie zusammenzufassen. Da dies jedoch stark vom Planungszusammenhang abhängt und somit häufig eine konkrete Lösung impliziert (z. B.: Zentrischgreifer mit Griffposition am Innendurchmesser), ist es erforderlich, in der Analysephase lösungsneutral vorzugehen und sich nicht bereits auf ein Merkmal zu beschränken. Demzufolge werden pro Bauteil jeweils die charakteristischen Merkmale definiert und die Anzahl der sich daraus ergebenden Variantenfamilien wird dokumentiert. Die Vorgehensweise und die daraus gewonnenen Erkenntnisse der Variantenanalyse werden am Beispiel der NKW-Druckplatte auszugsweise im Folgenden beschrieben.

Auf der zur Validierung herangezogenen Montagelinie M2 werden 109 unterschiedliche Varianten der NKW-Druckplatten gefertigt. Bei genauer Betrachtung lassen sich diese auf fünf Baugrößen mit 12 unterschiedlichen Kombinationen der Kleinteile wie Blattfedern, Näpfchen und Nieten reduzieren. Die hauptsächlichen Variantentreiber sind die Anpressplatte mit 46 Varianten und die Membranfeder mit 33 Varianten. Diese Bauteile sind entscheidend für die Erfüllung des spezifischen Kundenwunsches nach der Funktion „Übertragung und Trennung eines definierten Motordrehmomentes“ (siehe *Kapitel 6.2.1*). Um die spezifischen Kundenwünsche nach einem auf sie abgestimmtes Produkt zu erfüllen, werden die Anpressplattenrohteile zu geometrisch geringfügig unterschiedlichen Anpressplattenfertigteilen zerspannt. Dies führt zwar zu einer neuen zu berücksichtigenden Teilenummer, jedoch hat dies durch die geringe maßliche Veränderung für die Montage eine untergeordnete Bedeutung. So lässt sich die Anpressplatte bezogen auf den Außendurchmesser von 46 Varianten auf nur zwei Variantenfamilien reduzieren. Ebenso verhält es sich bei der Betrachtung der Membranfeder, die einen signifikanten Einfluss auf die Anpresskraft der Druckplatte hat. Diese liegt in verschiedenen Größen vor, die sich durch ihren Innen- und Außendurchmesser sowie durch die Stärke des Blechs unterscheiden. Jedoch weisen auch diese Bereiche mit starken geometrischen Gemeinsamkeiten auf, die es ermöglichen, sie zu vier Teilefamilien zusammenzufassen.

Tabelle 6-1: Variantenanalyse NKW-Druckplatte

Material	Varianten	Merkmal	Abmessungen	Variantenfamilien
NKW-Druckplatte	109	Baugröße	407 mm - 450 mm	5
		Kombination Kleinteile	-	12
Membranfeder	33	Außendurchmesser	362 mm / 395 mm / 412 mm	3
		Mittellochdurchmesser	114,6 mm - 120,1 mm	31
		Tellerfläche	74 mm - 97 mm	4
		Blechdicke	4,4 mm - 5,5 mm	11
		Gewicht	2,7 kg - 4,5 kg	2
Gehäuse	9	Innendurchmesser	318 mm / 320 mm	2
		Außendurchmesser	450 mm / 475 mm / 476 mm	3
		Höhe	76,5 mm / 83 mm	2
		Gewicht	8 kg	1
Anpressplatte	46	Innendurchmesser	215 mm - 288 mm	5
		Außendurchmesser	407 mm / 450 mm	2
		Höhe	39,05 mm - 50,45 mm	25
		Gewicht	15 kg - 27 kg	3
Blattfeder	7	Kröpfung	keine / 5,5 mm / 6,5 mm / 9,5 mm	4
		Länge	103 mm / 115 mm	2
		Breite	20 mm / 23,5 mm	2
		Blechdicke	1,2 mm / 1,3 mm / 1,4 mm	3
Näpfchen	2	Durchmesser	32 mm / 38 mm	2
		Länge	15,5 mm / 21 mm	2
		Breite	22 mm / 28 mm	2
		Höhe	20,5 mm / 22 mm	2
Niet	4	Nietdurchmesser	10 mm	1
		Kopfdurchmesser	15 mm	1
		Länge	18 mm - 31 mm	4
Scheibe	5	Außendurchmesser	18 mm / 22 mm	2
		Mittellochdurchmesser	10,4 mm / 10,5 mm	1
		Blechdicke	1,5 mm	1
Drahtring	2	Durchmesser	362 mm / 396 mm	2
		Drahtstärke	5 mm	1

Durch die Kleinteile lassen sich zwei unterschiedliche Fälle aufzeigen; einerseits anhand der Nieten, die in vier Varianten vorliegen und sowohl identische Niet- als auch Nietkopfdurchmesser aufweisen und sich lediglich in deren Länge unterscheiden. Diese können so zu einer Variantenfamilie zusammengefasst werden. Anders verhält es sich hingegen bei der Betrachtung der Näpfchen. Diese liegen zwar nur in zwei unterschiedlichen Varianten vor, können auf Basis ihrer geometrischen Beschaffenheit jedoch nicht zu einer Variantenfamilie vereint werden.

Fazit

Wird eine automatisierte Montagelösung angestrebt, ist die Kenntnis über die vorliegende Varianz der Montageobjekte unabdingbar. Ferner ist durch die Variantenanalyse die Zusammenfassung von Varianten zu Variantenfamilien möglich. Dies ist zwar mit einem erheblichen zeitlichen Aufwand für die Prüfung an technischen Zeichnungen verbunden, jedoch kann nur so eine fundierte Aussage über die vorliegende Komplexität und die benötigte Flexibilität in der Montage getroffen werden.

6.2.5 Toleranzanalyse und Toleranzketten

Zur Visualisierung und Dokumentation werden die Toleranzketten der Fügeprozesse aufgestellt und deren Toleranzen analysiert. Dies dient einerseits zum besseren Verständnis des Füge- und Montageprozesses mit seinen montagerelevanten Toleranzen und andererseits als Basis der Diskussion möglicher Optimierungs- und Automatisierungsansätze. Im Folgenden wird exemplarisch die Toleranzkette „Niet mit Gehäuse fügen“ aufgestellt und die arithmetische sowie statistisch Toleranzrechnung durchgeführt.

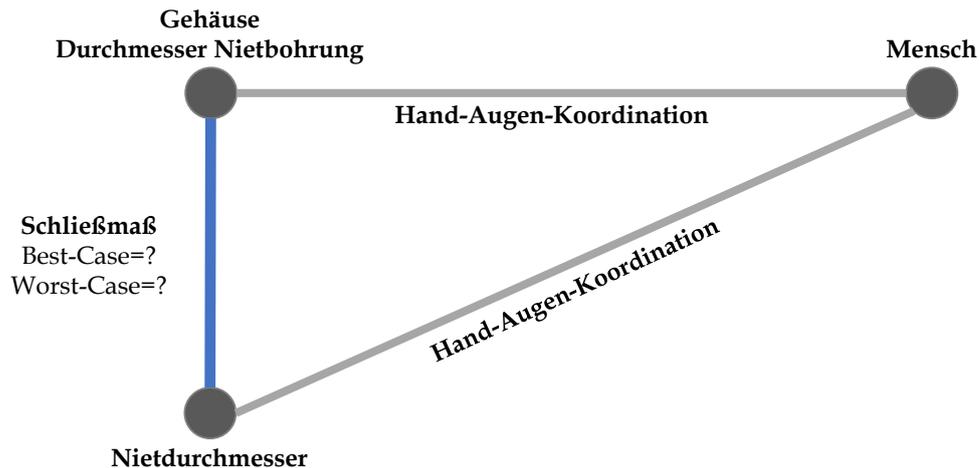


Abbildung 6-8: Toleranzkette Fügen Gehäuse und Niet

Zu Beginn wird die Toleranzkette des manuellen Fügeprozesses von Gehäuse und Niet aufgestellt (siehe *Abbildung 6-8*). Dieser Fügeprozess erfolgt über die Hand-Augen-Koordination des Mitarbeiters, der die Bohrungen des Gehäuses visuell so ausrichtet, dass diese mit den vorher auf Nietstempeln aufgestellten Nieten fluchten. Es gilt, das Schließmaß zu ermitteln, das das theoretische Lochspiel zwischen Gehäusebohrung und Niet darstellt.

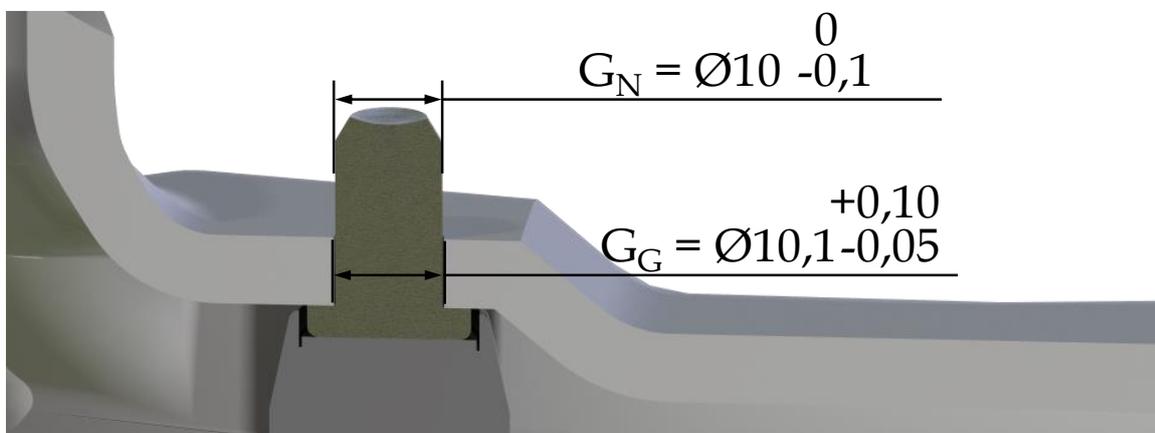


Abbildung 6-9: Fügefall Niet und Gehäuse

Die Datenbasis zur **arithmetischen Berechnung** des Best-Case- und Worst-Case-Lochspiels sind die durch den Konstrukteur auf den technischen Zeichnungen festgelegten Maße und Toleranzen. Der betrachtete Fügefall ist in *Abbildung 6-9* im Schnitt dargestellt.

Das Höchstschließmaß P_O sowie das Mindestschließmaß P_u errechnen sich wie folgt.

$$P_O = G_{G,max} - G_{N,min} = 10,2 \text{ mm} - 9,9 \text{ mm} = 0,3 \text{ mm} \quad (6-1)$$

$$P_u = G_{G,min} - G_{N,max} = 10,05 \text{ mm} - 10,0 \text{ mm} = 0,05 \text{ mm} \quad (6-2)$$

Da bei der Positionierung der beiden Fügepartner das Fluchten der Nietmittelachse und der Gehäusebohrungsmittelachse anzupeilen ist, reduziert sich das Spiel um die Hälfte. Somit ergibt sich im **Best Case** (Formel (6-3)) und im **Worst Case** (Formel (6-4)) ein radial zur Verfügung stehendes Spiel zwischen Niet und Gehäusebohrung von

$$P_{O,0,5} = P_O \cdot 0,5 = 0,3 \text{ mm} \cdot 0,5 = 0,15 \text{ mm} \quad (6-3)$$

$$P_{u,0,5} = P_u \cdot 0,5 = 0,05 \text{ mm} \cdot 0,5 = 0,025 \text{ mm}. \quad (6-4)$$

Um die Prozesssicherheit eines automatisierten Fügeprozesses gewährleisten zu können, ist maßgeblich das Einhalten des Worst-Case-Spieles von Bedeutung.

Aus dem minimal und maximal zur Verfügung stehenden Spiel lässt sich die arithmetische Schließmaßtoleranz $T_{a;0,5}$ (Formel (6-5)) errechnen.

$$T_{a;0,5} = P_{O,0,5} - P_{u,0,5} = 0,125 \text{ mm} \quad (6-5)$$

Die zuvor durchgeführte arithmetische Worst-Case-Betrachtung stellt eine unkomplizierte und mit wenig Aufwand durchführbare Möglichkeit der Spielberechnung zwischen den Fügepartnern dar. Durch die Betrachtungsweise der denkbar schlechtesten Toleranzfälle stellt dies jedoch hohe Ansprüche an die Genauigkeit des Systems. Um ein realistisches Bild der in der Praxis auftretenden Verteilungen und Abweichungen zu erhalten, wurden mehr als 200 Messungen des Gehäusebohrungsdurchmessers und des Nietdurchmessers über einen längeren Zeitraum mit unterschiedlichen Chargen durchgeführt. Die Histogramme stellen die Streuung sowie die Verteilung der beiden Merkmale Nietdurchmesser (*Abbildung 6-10, links*) und Gehäusebohrungsdurchmesser (*Abbildung 6-10, rechts*) dar.

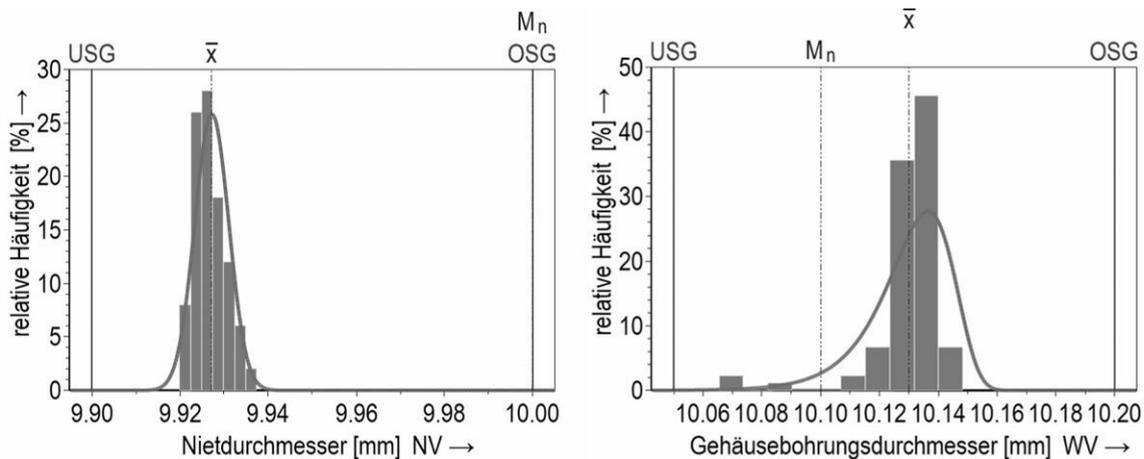


Abbildung 6-10: Histogramme Nietdurchmesser und Gehäusebohrungsdurchmesser

Aus den gemessenen Werten lassen sich die Standardabweichungen des Nietdurchmessers $\hat{\delta}_N$ und der Gehäusebohrung $\hat{\delta}_G$ ermitteln.

$$\hat{\delta}_G = 0,0118 \text{ mm} \quad \hat{\delta}_N = 0,0038 \text{ mm}$$

Aus den so ermittelten Standardabweichungen der Einzelteile kann nun die Standardabweichung des Funktionsmaßes (6-6) errechnet werden.

$$\sigma_0 = \sqrt{\sum_{i=1}^k \alpha_i^2 \cdot \sigma_i^2} = \sqrt{1 \cdot (0,0118 \text{ mm})^2 + 1 \cdot (0,0038 \text{ mm})^2} = 0,0124 \text{ mm} \quad (6-6)$$

Durch den angestrebten Prozessfähigkeitskennwert c_p von 1,67 ergibt sich ein Quantil von ca. 5 (siehe Formel (6-7)), mit dem sich die statistische Schließmaßtoleranz T_s nach Formel (6-8) bestimmen lässt.

$$\text{Quantil bei } c_p = 1,67 \quad u_{1,67} \approx 5 \quad (6-7)$$

$$T_{s;1,67} = 2 \cdot u_{1,67} \cdot \sigma_0 = 2 \cdot 5 \cdot 0,0124 \text{ mm} = 0,124 \text{ mm} \quad (6-8)$$

Durch das Toleranzmittelmaß des Nietdurchmessers C_1 und der Gehäusebohrung C_2 lässt sich nach Formel (6-9) das theoretische Spiel der beiden Fügepartner bei Toleranzmittellage ermitteln.

$$C_1 = 9,95 \text{ mm} \quad C_2 = 10,125 \text{ mm}$$

$$C_0 = C_2 - C_1 = 10,125 \text{ mm} - 9,95 \text{ mm} = 0,175 \text{ mm} \quad (6-9)$$

Da bei der Positionierung der beiden Fügepartner wieder das Fluchten der Nietmittellachse und der Gehäusebohrungsmittellachse anzupeilen ist, reduziert sich auch hier die zulässige Abweichung um die Hälfte.

$$\sigma_{0,0,5} = 0,5 \cdot \sigma_0 = 0,5 \cdot 0,0124 \text{ mm} = 0,0062 \text{ mm} \quad (6-10)$$

$$T_{s;0,5;1,67} = 0,5 \cdot T_{s;1,67} = 0,5 \cdot 0,124 \text{ mm} = 0,062 \text{ mm} \quad (6-11)$$

$$C_{0,0,5} = 0,5 \cdot C_0 = 0,5 \cdot 0,175 \text{ mm} = 0,0875 \text{ mm} \quad (6-12)$$

Somit kann das statistisch minimale ($P_{u;stat;0,5}$) und maximale ($P_{o;stat;0,5}$) radial zur Verfügung stehende Lochspiel ermittelt werden.

$$P_{u;stat;0,5} = C_{0,0,5} - u \cdot \sigma_{0,0,5} = 0,0875 - 5 \cdot 0,0062 = 0,0565 \text{ mm} \quad (6-13)$$

$$P_{o;stat;0,5} = C_{0,0,5} + u \cdot \sigma_{0,0,5} = 0,0875 + 5 \cdot 0,0062 = 0,1185 \text{ mm} \quad (6-14)$$

Die hier dargestellte statistische sowie arithmetische Toleranzrechnung zeigt, dass bei einem stabilen Fertigungsprozess die real auftretenden Abweichungen zwischen den beiden Fügepartnern meist weitaus geringer ausfallen als in einer statistischen Worst-Case-Betrachtung ermittelt.

Das in diesem Fall errechnete Minimalspiel zwischen Niet und Bohrung liegt bei einer arithmetischen Worst-Case-Betrachtung bei $P_{u,0,5} = 0,025 \text{ mm}$. Im statistischen Fall mit real ermittelten Werten bei $P_{ustat;0,5} = 0,0565 \text{ mm}$. Somit zeigt sich, dass in diesem Fall das statistische Minimallochspiel 2,26-mal größer ist als das arithmetisch ermittelte. Die für die Montage benötigte Systemgenauigkeit hat einen signifikanten Einfluss auf die Systemauslegung und die damit verbundenen Investitionen. Daher ist eine genaue Analyse der Fügepartner mit deren auftretenden Abweichungen von für die Montageplanung sehr wertvoll.

Tabelle 6-2 stellt das Gesamtergebnis der arithmetischen Best-Case- und Worst-Case-Betrachtung der einzelnen Montageschritte mit ihrer Bewertung der Genauigkeitsanforderungen an den Fügeprozess gegenüber. Diese Gegenüberstellung hilft zu einem späteren Zeitpunkt, die Automatisierbarkeit der einzelnen Prozessschritte in der Nutzwertanalyse objektiv bewerten zu können. Der Einfluss von Fügenschrägen etc. wird in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt, da dies die Lösungsneutralität der Automatisierbarkeitsbewertung durch eine sofortige technische Lösung (z. B.: Ausgleichselemente an den Greifsystemen) beeinflussen würde.

Tabelle 6-2: Ergebnis Toleranzanalyse Druckplattenmontage

Prozessschritt	Merkmal	Best-Case [mm]	Worst-Case [mm]	Genauigkeitsanforderung des Fügevorgangs
Niet auf Werkzeug	Durchmesser	0,61	0,41	geringe Anforderungen
Näpfchen auf Werkzeug	Durchmesser	0,50	-0,05	hohe Anforderungen
Gehäuse auflegen	Lochbild	0,15	-0,84	hohe Anforderungen
	Durchmesser	0,15	0,03	
Blattfedern auflegen	Durchmesser	0,34	0,11	hohe Anforderungen
Nieten in Anpressplatte	Durchmesser	0,23	0,08	hohe Anforderungen
Anpressplatte auflegen	Lochbild	0,34	-0,82	hohe Anforderungen
Scheiben auflegen	Durchmesser	0,34	0,20	hohe Anforderungen

Fazit

Die Durchführung einer derartigen Toleranzanalyse erfordert einen hohen zeitlichen Aufwand. Deshalb sollte diese nur für Prozessschritte durchgeführt werden, bei denen enge Fügetolerierungen zu erwarten sind und eine Automatisierung generell in Betracht gezogen werden kann. Aus diesem Grund wurde auf eine Toleranzrechnung der Fügeprozesse Drahting in Gehäuse einlegen sowie Membranfeder in Gehäuse einlegen im hier dargestellten Validierungsszenario verzichtet. Diese Fügevorgänge weisen mehrere Millimeter Spiel auf und stellen somit keine bis sehr geringe Anforderungen an die Genauigkeit des Fügevorgangs.

6.3 Bewertung des Validierungsszenarios

Die nachfolgende Bewertung des manuellen Arbeitsplatzes der Druckplattenendmontage bezüglich seiner Eignung, seiner Teilprozessschritte sowie der Automatisierbarkeit einzelner Prozessschritte erfolgt in drei Schritten. In den ersten beiden Schritten werden die technische Automatisierbarkeit sowie das vorliegende Optimierungspotenzial jedes Prozessschritts bewertet. Im Anschluss führen die so gewonnenen Erkenntnisse zu einem Abgleich der Automatisierbarkeits- und Potenzialbewertung. Dieser Abgleich ermöglicht es, die am besten geeigneten Prozessschritte für eine Automatisierung auszuwählen und so eine effektive und wirtschaftliche Automatisierungslösung zu entwickeln.

6.3.1 Bewertung der technischen Automatisierbarkeit

Zur Bewertung der technischen Automatisierbarkeit der NKW-Druckplattenmontage wurden die im Montagevorranggraphen (Kapitel 6.2.3) identifizierten Prozessschritte in die Bewertungsvorlage aufgenommen. Anschließend wurden die Prozessschritte durch die gewichtete Nutzwertanalyse anhand von 8 bauteilbezogenen und 5 prozessbezogenen Kriterien bewertet. Dies erfolgte für jeden Prozessschritt separat für die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren.

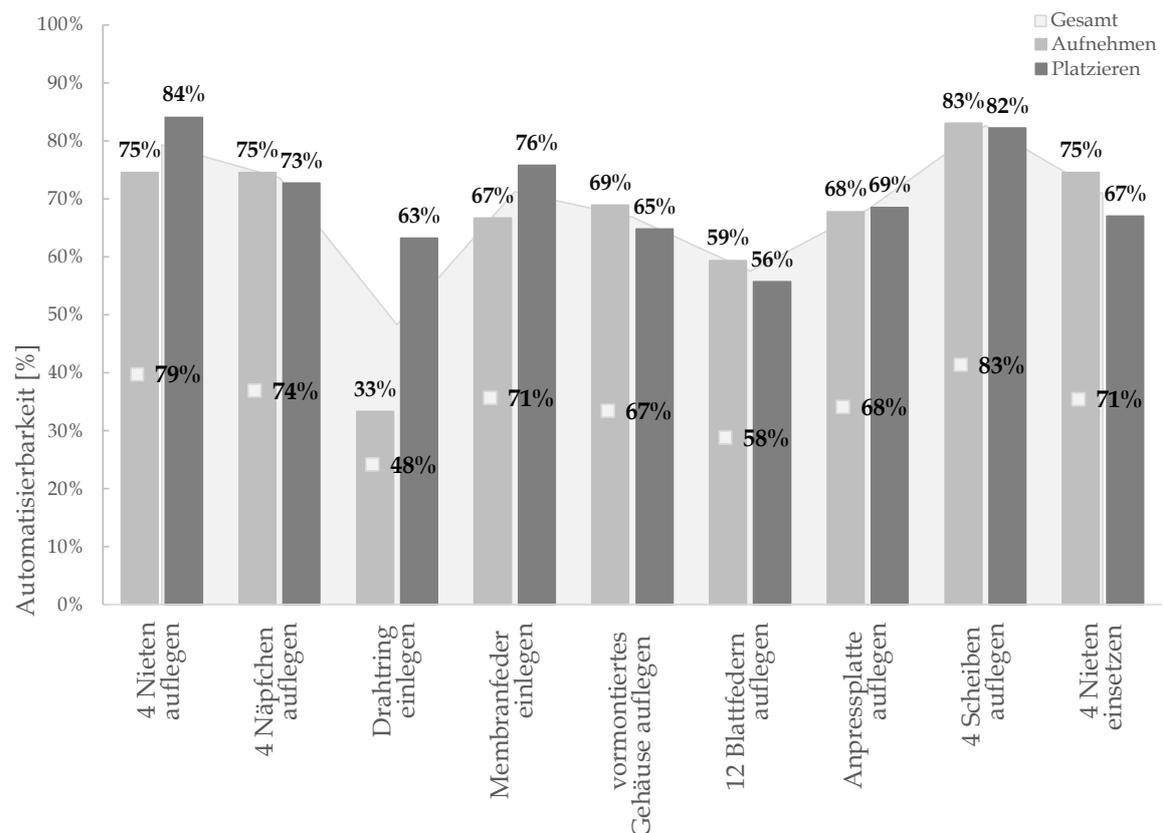


Abbildung 6-11: Automatisierbarkeitsbewertung NKW-Druckplattenmontage

Abbildung 6-11 stellt das Gesamtergebnis jedes Prozessschrittes hinsichtlich dessen Automatisierbarkeit in Prozent grafisch dar. Zusätzlich veranschaulicht die Grafik die

technische Eignung der Teilprozessschritte Aufnehmen und Platzieren des Montageobjektes bezüglich einer Automatisierung. So kann transparent visualisiert werden, welcher Prozessschritt oder Teilprozessschritt sich mehr oder weniger für eine Automatisierung empfiehlt.

Bei dem im Montagevorranggraphen erfassten Prozessschritt 80 „Sichtprüfung der Anpressplatte“ handelt es sich um den Hilfsprozess des Prüfens, der notwendig ist, um die Montage durchzuführen, der jedoch keinen Montagefortschritt zur Vervollständigung des Produktes erzielt. Da es sich hierbei um keinen Fügeprozess handelt, kann die Automatisierbarkeit dieses Prozessschrittes nicht anhand der in dieser Arbeit vorgestellten technischen Automatisierbarkeitsbewertung (*Kapitel 4.2.1*) beurteilt werden. Daher empfiehlt es sich, falls vorhanden, auf ähnliche bereits umgesetzte Lösungen zurückzugreifen oder die Automatisierbarkeit anhand eines Versuches zu verifizieren.

An den Prozessschritten „4 Nieten auflegen“ und „4 Nieten einsetzen“ zeigt sich, dass eine differenzierte Betrachtung nach Aufnehmen und Platzieren einen erheblichen Mehrwert bietet. Die beiden zu montierenden Nieten sowie deren Anlieferzustand sind nahezu identisch. Dies führt zu einer identischen Bewertung der beiden Montageschritte hinsichtlich des Aufnehmens mit jeweils 75 %. Durch die stark differenten Fügeaufgaben unterscheiden sich jedoch die Werte der Automatisierbarkeitsbewertungen des Platzierens. So sind in einem Fall lediglich die vier Nieten auf einen Nietstempel mit relativ großem Spiel aufzulegen, wobei zusätzlich Fugeschrägen an Basis- sowie Fügebauteil vorhanden sind, was eine verhältnismäßig hohe Automatisierbarkeitsbewertung von 84 % zur Folge hat. Demgegenüber steht der letzte Prozessschritt, bei dem vier Nieten durch die Bohrungen der Anpressplatte, des Gehäuses sowie dreier Blattfedern zu führen sind. Hier liegt eine deutlich engere Tolerierung vor; außerdem sind keine Fugeschrägen am Basisbauteil vorhanden, was die Automatisierbarkeit erschwert und sich in einem deutlich niedrigeren Bewertungsergebnis von 67 % zeigt. Diese erheblichen Unterschiede in der Realisierbarkeit einer Automatisierung lassen sich durch die ganzheitliche Betrachtung eines Prozessschrittes nicht derart transparent darstellen. In einer Gesamtbetrachtung liegen die Ergebnisse der Automatisierbarkeitsbewertung für „4 Nieten auflegen“ mit 79 % und „4 Nieten einsetzen“ mit 71 % nahe beieinander und repräsentieren somit nicht die stark differenten technischen Realisierbarkeiten des automatisierten Platzierens der Bauteile.

Anhand des Prozessschrittes „Drahring einlegen“ lässt sich ebenfalls der Mehrwert der differenzierten Betrachtung in Teilprozessschritten erläutern. So zeigt sich durch die Bewertung, dass das Aufnehmen des Drahringes mit 33 % und das Platzieren mit 63 % deutlich unterschiedliche Automatisierungsergebnisse aufweisen. Die ungünstige Automatisierbarkeit des Drahringes bezüglich des Aufnehmens ist vor allem auf seinen Anlieferzustand zurückzuführen. Die Anlieferung erfolgt in Gitterboxen als Schüttgut. Durch die an einer Stelle offene Gestaltung des Drahringes neigt dieser dazu, sich ineinander zu

verhaken. Dieses Verhalten hat zur Konsequenz, dass dieser nicht ohne Anpassung des Anlieferzustandes automatisiert aufgenommen werden kann. Durch die systematische Bewertung sowie das daraus resultierende transparente Anzeigen der Automatisierungshemmnisse lassen sich die angedachten Lösungen iterativ verbessern und die Automatisierung vereinfachen. Somit kann die Automatisierbarkeitsbewertung ebenfalls zur sukzessiven Simplifizierung der Automatisierungslösung herangezogen werden. In dem hier beschriebenen Fall des Drahringes wäre eine klare Simplifizierungsmaßnahme des Prozesses die Änderung des Anlieferzustandes der Bauteile. Falls keine Änderung der Ausgangsbedingungen möglich ist, lässt das Ergebnis der Bewertung Rückschlüsse auf eine mögliche Teilautomatisierung der Prozessschritte zu. So könnte der Montagemitarbeiter die Drahringe aus der Gitterbox entnehmen und anschließend über eine Vorrichtung einem automatisierten System übergeben, durch das die besser automatisierbare Platzierung des Bauteiles übernommen wird.

Fazit

Durch die systematische Bewertung der technischen Automatisierbarkeit anhand von lösungsneutralen Kriterien kann die technische Realisierbarkeit einer Montageautomatisierung beurteilt werden. Dabei können Simplifizierungsmaßnahmen anhand von niedrig bewerteten Kriterien abgeleitet werden, um Automatisierungslösungen problemloser und wirtschaftlicher umsetzen zu können. Die Bewertung erfolgt je Montageprozessschritt in zwei Teilprozessen, dem Aufnehmen und Platzieren. Durch diese Aufteilung können Rückschlüsse auf das Automatisierungspotenzial innerhalb der einzelnen Prozessschritte gezogen werden, um gezielt Hybridisierungen und damit Automatisierungen von Teilprozessschritten umzusetzen.

Insgesamt soll die Bewertung dazu beitragen, automatisierbare Prozesse aufzuzeigen und durch eine Simplifizierung die Automatisierung zu erleichtern, um diese wirtschaftlicher realisieren zu können.

6.3.2 Zeitliche Arbeitsplatzpotenzialbewertung

Zu Beginn der zeitlichen Arbeitsplatzpotenzialbewertung wird ein 2D-Übersichtslayout des Montagearbeitsplatzes erstellt. Auf diesem werden die Standorte der für die Montage benötigten Materialien und Montagehilfsmittel örtlich markiert. Im Anschluss werden der Primär- (grün) und Sekundärarbeitsbereich (rot) im Layout entsprechend der Bauteilgröße markiert. In dem hier dargestellten Validierungsszenario, der NKW-Druckplatte, entspricht der Bauteildurchmesser ca. 450 mm. Aus diesem Grund wurde der Primärbereich, der den Idealabstand der Materialbereitstellung zum Fügeort darstellt, mit einem Durchmesser von 750 mm um das Zentrum der Montagevorrichtung gewählt. Der Sekundärbereich hingegen umfasst den über den Primärbereich hinausgehenden, aber noch im Greifbereich des Mitarbeiters liegenden Raum. Die so erstellte Übersicht visualisiert

einfach und transparent die Materialbereitstellung sowie deren Erreichbarkeit für den Mitarbeiter (vgl. *Abbildung 6-12*). Dies ermöglicht eine schnelle und effektive Bewertung des Arbeitsplatzpotenzials und erleichtert die Planung von Optimierungsmaßnahmen.

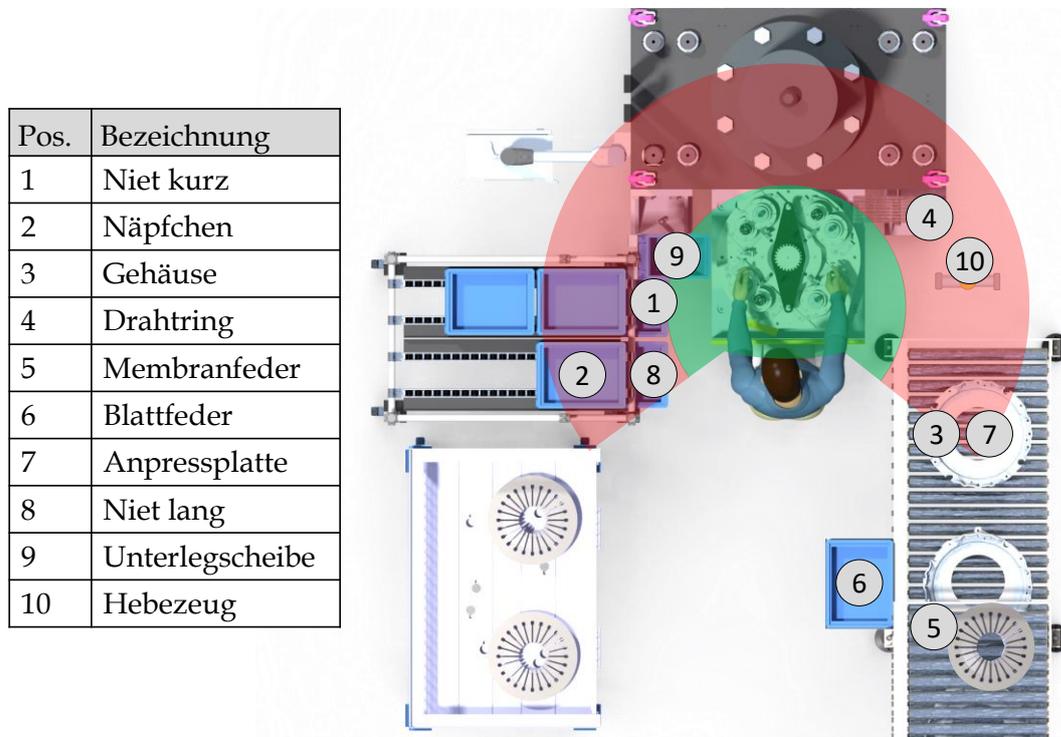


Abbildung 6-12: Primär- und Sekundärbereich der Montageobjekte

Im Anschluss werden die real vorliegenden Greifabstände zu den Materialien und zum Fügeort vermessen; des Weiteren werden der Anlieferzustand und damit die Greifbedingungen der Materialien dokumentiert. Auf Basis der ermittelten Werte werden die einzelnen Montagevorgänge dem Montagevorranggraphen entsprechend (siehe *Kapitel 6.2.3*) anhand des MTM-2 Verfahrens in die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren unterteilt und zeitlich bewertet. Durch die Anwendung des standardisierten MTM-Verfahrens entsteht ein klares Bild der Prozesszeiten der einzelnen Montagevorgänge. Diese Bewertung stellt den Istzustand und somit das Ausgangsszenario dar.

Im nächsten Schritt wird ein fiktiver Idealzustand des Montagearbeitsplatzes gebildet. Somit werden die Materialien gedanklich im Primärbereich angeordnet, auch wenn dies physisch für alle Materialien gleichzeitig nicht möglich ist. Des Weiteren wird im Idealzustand die Annahme getroffen, dass die Bereitstellung der Fügebauteile vereinzelt in orientierter und positionierter Form erfolgt, wodurch jegliche Vereinzelnung und Kontrollmaßnahmen durch den Mitarbeiter entfallen. Im Anschluss wird der optimierte Idealzustand ebenfalls mit dem MTM-2 Verfahren analysiert, sodass sich Prozesszeiten für die einzelnen Montagevorgänge für die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren ergeben.

Die *Tabelle 6-3* stellt auszugsweise die Ergebnisse der Potenzialbewertung für die Prozessschritte „Nieten und Näpfchen in Unterwerkzeug einlegen“ sowie „Blattfedern auflegen und Anpressplatte mit Hebezeug“ umsetzen dar.

Tabelle 6-3: Auszug Potenzialbewertung NKW-Druckplattenmontage

Nr.	Verrichtung	Ist-Stand [s]	Soll-Stand [s]	Dauer SV [s]	Potenzial	Potenzial rel. Ges.
10	Nieten kurz in Unterwerkzeug	5,5	4,4	1,1	20%	2%
	4 Nieten aufnehmen	2,4	1,3	1,1	45%	2%
	4 Nieten platzieren	3,1	3,1	0,0	0%	0%
20	Näpfchen in Unterwerkzeug	8,2	4,9	3,3	41%	7%
	4 Näpfchen aufnehmen	3,6	1,3	2,3	64%	5%
	4 Näpfchen platzieren	4,6	3,6	1,1	23%	2%
70	Blattfedern auflegen	24,9	10,8	14,2	57%	31%
	12 Blattfedern aufnehmen	13,3	2,6	10,7	80%	23%
	12 Blattfedern platzieren	11,6	8,1	3,5	30%	8%
80	Anpressplatte mit Hebezeug auf Vorrichtung	15,5	7,9	7,6	49%	17%
	Anpressplatte Aufnehmen	3,4	1,3	2,1	61%	5%
	Anpressplatte Platzieren	12,2	6,6	5,6	46%	12%

Aus *Tabelle 6-3* lassen sich die ermittelten Prozesszeiten der einzelnen Verrichtungen des Istzustandes mit ihren zeitlichen Anteilen für das Aufnehmen und Platzieren entnehmen. Dem ist der fiktive Idealzustand (Sollzustand) gegenübergestellt, der die Primärvorgänge repräsentiert. Da der Istzustand sowohl Primär- als auch Sekundärvorgänge umfasst, lassen sich aus der Differenz des Istzustandes und des Sollzustandes die Dauer der ausschließlichen Sekundärvorgänge und somit das Optimierungspotenzial in Sekunden ermitteln. Aus der so ermittelten Dauer der Sekundärvorgänge ist es möglich, das Potenzial in Prozent des Prozessschrittes sowie die Optimierungspotenzialanteile für das Aufnehmen und Platzieren auszuweisen. Ebenso lassen sich die einzelnen zeitlichen Potenziale in ein Verhältnis zu den insgesamt erzielbaren Potenzialen setzen (siehe *Tabelle 6-3* Potenzial rel. Ges.). Hierdurch ist einerseits ersichtlich, welcher Prozessschritt das größte Optimierungspotenzial birgt, und andererseits, ob diese Verbesserung durch die Optimierung des Aufnehmens und/oder des Platzierens zu erzielen ist. Die so ermittelten zeitlichen Arbeitsplatzoptimierungspotenziale werden zusammen mit der Bewertung der technischen Automatisierbarkeit (*Kapitel 6.3.1*) zur weiterführenden Bewertung des Validierungsszenarios herangezogen. Hierfür wird im nachfolgenden *Kapitel 6.3.3* die Vorgehensweise des Abgleiches der beiden Bewertungsergebnisse näher beschrieben.

Fazit

Insgesamt ist die zeitliche Arbeitsplatzpotenzialbewertung ein nützliches Werkzeug zur Verbesserung von Arbeitsprozessen. Sie ermöglicht einerseits einen transparenten Blick auf den vorliegenden Istzustand des Arbeitsplatzes und deckt andererseits vorhandenes Optimierungspotenzial auf und quantifiziert dieses konkret. Durch die Quantifizierung des vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenziales können Prozesse mit hohem

Potenzial identifiziert und priorisiert werden. Um die Methode der Potenzialbewertung anwenden zu können, ist jedoch ein fundiertes Wissen und Erfahrung im Bereich der MTM-Analyse erforderlich. Wenn diese Kenntnisse nicht direkt beim Anwender vorhanden sind, ist die Unterstützung durch Experten aus dem Fachbereich der Arbeitszeitdatenermittlung empfehlenswert.

6.3.3 Abgleich der technischen Automatisierbarkeits- und zeitlichen Arbeitsplatzpotenzialbewertung

Um die Wirtschaftlichkeit manueller Arbeitsplätze zu erhöhen, ist es nötig, den Mitarbeiter bestmöglich durch Automatisierungslösungen an geeigneter Stelle zu unterstützen. Hierfür ist einerseits das Wissen über das vorhandene zeitliche Arbeitsplatzoptimierungspotenzial sowie über die technische Realisierbarkeit einer Automatisierung erforderlich. Dieses Wissen wurde durch die Anwendung der Bewertungsmethoden in den vorangegangenen *Kapiteln* 6.3.1 und 6.3.2 für den Endmontagearbeitsplatz der NKW-Druckplattenmontage gewonnen. Durch die konsequent getrennte Bewertung sowohl des zeitlichen Arbeitsplatzoptimierungspotenziales als auch der technischen Automatisierbarkeit jedes einzelnen Prozessschrittes liegt diese Information für die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren vor. Um die so gewonnenen Daten übersichtlich und vergleichbar darstellen zu können, wurden diese in ein kombiniertes Diagramm überführt. Die kombinierte Darstellung der Bewertungsergebnisse ermöglicht es, die Datenreihen miteinander zu vergleichen, um Korrelationen zwischen dem vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenzial und der technischen Realisierbarkeit zu identifizieren.

Die *Abbildung 6-13* visualisiert die zeitlichen Optimierungspotenziale in Sekunden sowie die technische Automatisierbarkeit in Prozent der neun bewerteten Prozessschritte der NKW-Druckplattenendmontage.

Die Grafik hebt das erschließbare zeitliche Hauptoptimierungspotenzial von 10,7 s klar hervor, das durch die Optimierung des Teilprozessschritts Blattfedern aufnehmen erzielbar ist. Das hohe Potenzial ergibt sich aus den umfangreichen manuellen Aufgaben, die bei der Handhabung von Blattfedern als Schüttgut aus dem Ladungsträger entstehen, wie das Entnehmen, Richten und das Abzählen zu vier Stapeln mit je drei Stück. Die Bewertung der Automatisierbarkeit mit lediglich 59 % zeigt jedoch, dass die Automatisierung dieses Teilprozessschrittes mit einigen Hürden verbunden ist. Bei der detaillierten Betrachtung der durchgeführten Automatisierbarkeitsbewertung werden zwei kritische Bewertungspunkte deutlich erkennbar: einerseits der Anlieferzustand der Bauteile als Schüttgut und andererseits die gleichzeitig vorliegende hohe Bauteilvarianz. Da eine Reduzierung der Varianten an den vorliegenden Altprodukten nicht durchsetzbar ist, muss das angedachte System die Variantenkomplexität beherrschen können.

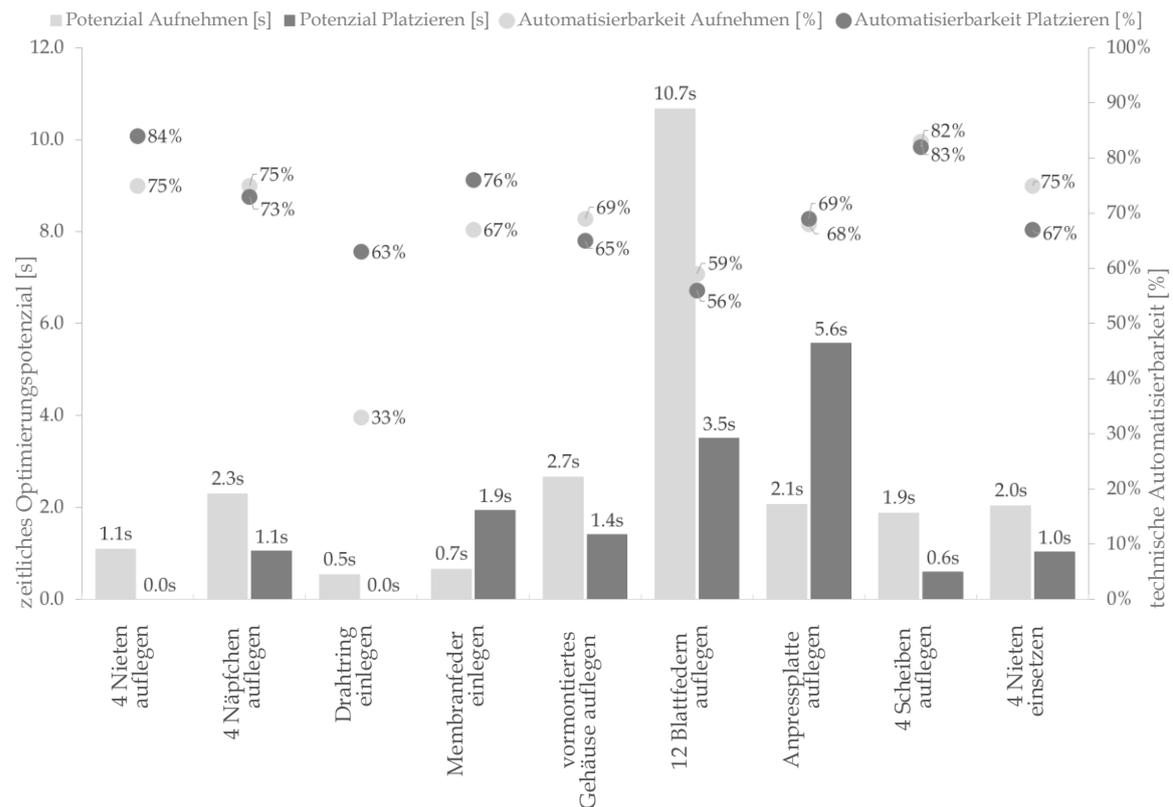


Abbildung 6-13: Abgleich technische Automatisierbarkeit mit zeitlichem Optimierungspotenzial

Ein weiteres deutliches Optimierungspotenzial von 5,6 s ist am Teilprozessschritt des „Platzierens der Anpressplatte“ ersichtlich. Zusätzlich liegt ein zeitliches Optimierungspotenzial von 2,1 s für das „Aufnehmen der Anpressplatte“ vor. Dies ist vor allem auf das verwendete Lastaufnahmemittel zurückzuführen. Aufgrund des Bauteilgewichtes von ca. 35 kg wird die Anpressplatte vom Mitarbeiter durch ein mechanisches Spannsystem aufgenommen und mit einem schienengeführten Elektrokettzug manipuliert. Durch die vielen Freiheitsgrade des Kettenzuges und der Länge der Kette ist die exakte Platzierung der Anpressplatte durch den Mitarbeiter sehr aufwendig. Die Automatisierungsbewertung hinsichtlich des Aufnehmens und des Platzierens mit 68 % und 69 % deutet auf eine mit erhöhtem Aufwand realisierbare Automatisierung hin. Als Automatisierungshemmnisse konnten durch die Automatisierbarkeitsbewertung vor allem der nicht orientierte und positionierte Anlieferzustand sowie die hohen Genauigkeitsanforderungen des Fügevorganges identifiziert werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse lassen sich Ideen entwickeln, die nicht auf eine vollständige Automatisierung abzielen, sondern darauf ausgerichtet sind, die Mitarbeiter bestmöglich zu unterstützen.

Außerdem besteht ein erhebliches Potenzial zur zeitlichen Optimierung beim Aufnehmen der Kleinteile. Insbesondere können im ersten Prozessschritt Einsparungen von 1,1 s für das Aufnehmen der Niete, von 2,3 s für das Aufnehmen der Näpfchen, von 1,9 s für das Aufnehmen der Scheiben sowie im letzten Prozessschritt von 2 s für das Aufnehmen der

Nieten erzielt werden. Im Gegensatz dazu bietet das Platzieren der Kleinteile nur begrenzte Möglichkeiten zur zeitlichen Optimierung. Ursache hierfür ist der vom Mitarbeiter umzusetzende Kontrollaufwand bei den Bauteilen. Er muss die Bauteile aus dem Schüttgut entnehmen, abzählen und ausrichten, bevor er diese platzieren kann. Aufgrund der hohen Automatisierbarkeit von 75 % bis 82 % beim Aufnehmen der Kleinteile kann geschlossen werden, dass gezielte Maßnahmen zur Verbesserung der Bauteilzuführung an den Mitarbeiter wirtschaftlich sinnvoll sind, um eine zeitliche Optimierung zu erreichen.

Fazit

Zur Implementierung automatisierter Lösungen ist die Identifizierung der geeigneten Prozessschritte einer potenziellen Automatisierung ein entscheidender Erfolgsfaktor. Zur Identifizierung dieser Prozessschritte ist eine genaue Analyse mit anschließender Bewertung der vorhandenen Prozessschritte erforderlich. Durch die fundierte Bewertung können ineffiziente und Rationalisierungspotenzial versprechende Prozessschritte erkannt werden. Entscheidend ist, dass nicht alle Prozessschritte für eine Automatisierung gleichermaßen geeignet sind, weshalb eine sorgfältige Bewertung der Automatisierbarkeit der Prozessschritte zusätzlich von Bedeutung ist. Basierend auf der Ausgangsanalyse und den Ergebnissen der Prozessschrittbewertung können anschließend geeignete Automatisierungslösungen entwickelt und implementiert werden. So können auf der Erkenntnisgrundlage des Abgleiches der technischen Automatisierbarkeits- und der zeitlichen Arbeitsplatzpotenzialbewertung Ideen generiert werden, um die Arbeitsprozesse von Mitarbeitern zu optimieren. Dies bedeutet nicht, dass eine vollständige Automatisierung zwingend erforderlich ist, sondern, dass zielgerichtet Technologien eingesetzt werden können, die den Mitarbeiter in seinem Arbeitsablauf unterstützen und ihm helfen, effizienter und produktiver zu arbeiten.

Die Bewertung sowie der anschließende Abgleich der Prozesse ermöglichen es auch, potenzielle Hemmnisse für die Automatisierung zu identifizieren und zu analysieren. Durch die Identifizierung solcher Hemmnisse können geeignete Optimierungsmaßnahmen ergriffen werden, um die Automatisierbarkeit der Prozesse zu verbessern mit dem Ziel, diese wirtschaftlicher zu realisieren. Der Abbau von Automatisierungshemmnissen kann somit dazu beitragen, die Vorteile der Automatisierung vollständig zu nutzen, um die Effizienz und Produktivität in der Montage zu steigern.

6.4 Gestaltung des neuen Arbeitsplatzes

Durch die in *Kapitel 6.3* durchgeführte Bewertung der NKW-Druckplattenendmontage konnten Prozessschritte identifiziert werden, die ein hohes zeitliches Optimierungspotenzial gepaart mit einer guten Automatisierbarkeit aufweisen. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die finale Entscheidung bezüglich der zu automatisierenden Prozessschritte durch den Planer auf Grundlage seines Wissens über den Gesamtprozess sowie über die prozessübergreifenden Gesamtzusammenhänge zu treffen ist. So muss er zwischen dem zu erschließenden zeitlichen Optimierungspotenzial und dem damit verbundenen Implementierungsaufwand abwägen. In diesem Fall wird die zu erzielende reduzierte Montagezeit durch andere in der Druckplattenmontagelinie taktzeitbestimmende Prozesse begrenzt. Somit weist die Bewertung mehr zeitliche Potenziale aus, als für das Erreichen der Zieltaktzeit benötigt wird. Daher muss durch den Planer die Entscheidung getroffen werden, welche Prozess- oder Teilprozessschritte bezüglich des Gesamtprozessablaufes am sinnvollsten zu automatisieren sind. Die durchgeführte Bewertung und Gegenüberstellung unterstützt ihn bei seiner Entscheidungsfindung in erheblichem Umfang.

6.4.1 Fähigkeits- und zeitpotenzialbasierte Zuteilung der Prozessschritte

Durch die gesamtheitliche Betrachtung des Arbeitsplatzes sowie durch die zuvor durchgeführten Analysen und Bewertungen konnten Prozessschritte definiert werden, die zukünftig automatisiert erfolgen sollten. Zusätzlich konnten durch die differenzierte Betrachtung in „Aufnehmen und Platzieren“ Teilprozessschritte bestimmt werden, bei denen der Mitarbeiter technische Unterstützung erfahren sollte. Der in *Abbildung 6-14* dargestellte Montagevorranggraph visualisiert den gewählten Automatisierungsgrad der entsprechenden Prozessschritte in den Stufen manuell, teilautomatisiert und automatisiert.

Unter Berücksichtigung der verhältnismäßig schwierigen Automatisierbarkeit des Aufnehmens von Blattfedern (Verrichtung 70) wird dieser Teilprozessschritt aufgrund des vorliegenden hohen zeitlichen Optimierungspotenzials von bis zu 10,7 s dennoch für eine Teilautomatisierung gewählt. Der Mitarbeiter erhält in diesem Prozessschritt die technische Unterstützung für das Zuführen, Vereinzeln, Abzählen sowie Paketieren der Blattfedern durch eine Zuführeinheit mit integriertem Handling. Durch diese Maßnahme werden sowohl eine Optimierung von 23 % des vorhandenen zeitlichen Potenzials als auch eine Qualitätsverbesserung erzielt. Der in der Ursache Wirkungsanalyse (*Kapitel 6.2.2*) häufig auftretende durch den Menschen verursachte Einfluss des Fehlers „Falsche Anzahl Blattfedern“ lässt sich somit eliminieren.

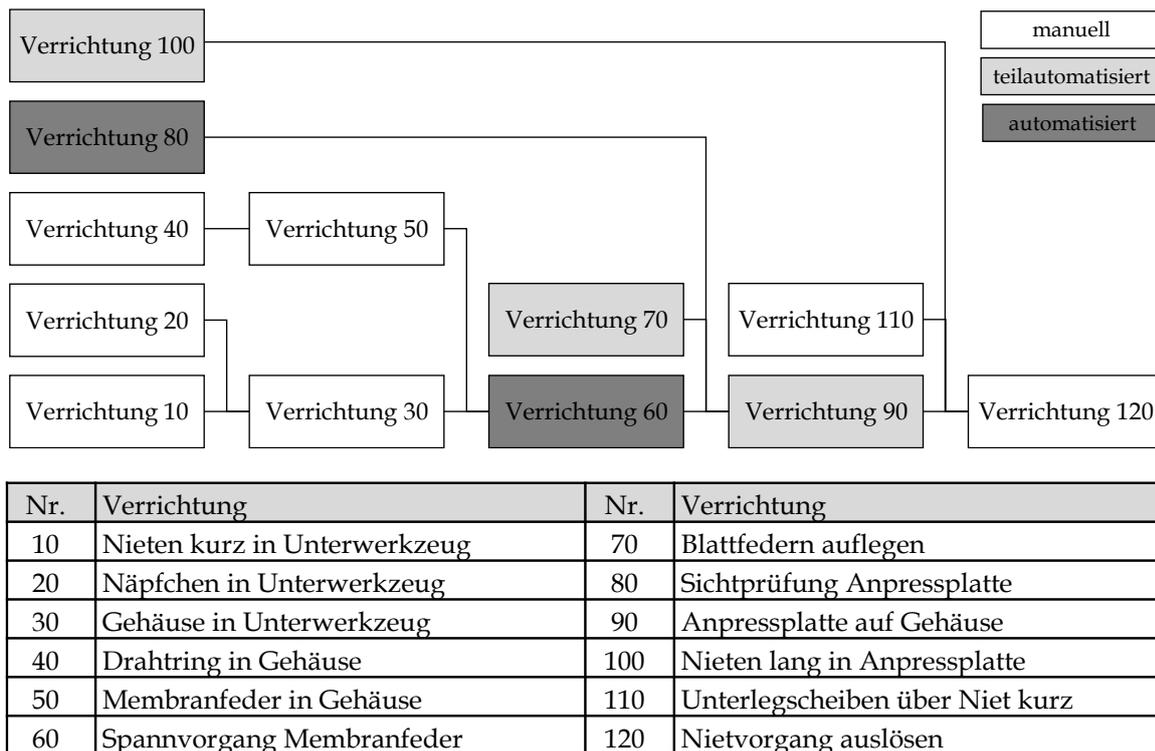


Abbildung 6-14: Montagevorranggraph der Druckplattenmontage mit Aufgabenallokation

Des Weiteren wird Verrichtung 90, das Aufnehmen und Aufsetzen der Anpressplatte, teilautomatisiert. So wird zukünftig die Anpressplatte durch ein automatisiertes Handling aufgenommen und gerichtet bis kurz über die Fügestelle transportiert. Ab dieser Position übernimmt der Mitarbeiter den Fügeprozess, da aufgrund der Toleranzanalyse und der sich daraus ergebenden Fügetoleranzen ein automatisiertes Fügen nicht erfolgen kann. Für den letztendlichen Fügevorgang dieses Teilprozessschritts werden die sensitiven Fügefähigkeiten des Mitarbeiters benötigt. Die hier angedachten technischen Unterstützungen des Mitarbeiters sollten bereits in diesem Projektstadium jeden Planer auf die wesentliche Änderung des bestehenden Arbeitsplatzes mit den hieraus neu zu betrachtenden Gefährdungen für den Mitarbeiter hinweisen. Die für den neuen optimierten Arbeitsplatz eventuell benötigten zusätzlichen Schutzmaßnahmen werden nach einer detaillierten Risikobewertung in der Feinplanung berücksichtigt.

Als weitere Optimierung des Arbeitsplatzes soll die während des Prozesses des Spanns der Membranfeder (Verrichtung 60) benötigte Ortsbindung des Mitarbeiters entfallen. Hierfür soll die im Ausgangsszenario enthaltene Zweihandschaltung wegfallen, wodurch eine Taktzeitreduzierung von 2,5 s erzielbar ist. Um dies zu ermöglichen, sind jedoch im Folgenden alternative Schutzmaßnahmen zu definieren.

Um die letzten noch benötigten Sekunden zur Erreichung der Zieltaktzeit zu realisieren, wird das Aufnehmen der Nieten optimiert. Hierfür wird dem Mitarbeiter ein Vibrationswendelförderer zum Vereinzeln, Richten und Zuführen der Nieten zur Verfügung

gestellt. Dieser bringt die Nieten gerichtet in den Primärarbeitsraum des Mitarbeiters. Durch diese getroffene Maßnahme reduziert sich das Setzen der Nieten in die Anpressplatte um 2 s.

Wie in *Kapitel 6.3.1* erläutert, lässt sich der Prozessschritt 80 „Sichtprüfung der Anpressplatte“ nicht anhand der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Bewertung der technischen Automatisierbarkeit beurteilen. Um die Automatisierbarkeit dieses Prozessschrittes dennoch verifizieren zu können, wurde ein Demonstrator (siehe *Abbildung 6-15*) zur Qualitätsinspektion der Reibfläche aufgebaut.



Abbildung 6-15: Demonstrator Qualitätsinspektion Anpressplattenreibfläche (VADER ¹)

Durch diesen Demonstrator lassen sich sowohl die Qualitätsinspektion der Reibfläche als auch das Interaktionskonzept zwischen Mensch und Technik sowie das umzusetzende Sicherheitskonzept erproben. Teile des so entstandenen Demonstrators wurden im

¹ Gefördert durch die Bundesrepublik Deutschland Fördermaßnahme: KoPa 35c - Digitalisierung der Fahrzeughersteller und Zulieferindustrie Zuwendungsgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Verbundprojekt „Vernetzter digitaler Assistent für das datengetriebene Engineering von roboterbasierten Produktionsanlagen“ (VADER) und in dem damit verbundenen Teilvorhaben „Robotik- und KI-Dienste für die robotisierte Produktion“ (VADER-ROB) entwickelt.

Im Versuchsaufbau wurde ein kollaborationsfähiger FANUC CRX-5iA Roboter zur Manipulation eines Kamerasystems mit zugehöriger Beleuchtung eingesetzt. Die Tischablage stellt die im Serienbetrieb verwendeten Rollentransportbänder nach. Ziel ist es, die aktuell durch den Mitarbeiter erfolgte Sichtprüfung der Oberflächengüte der Druckplatte durch eine vollautomatische KI-basierte Prüfung zu ersetzen. Diese beinhaltet die Beurteilung der Zerspanungsgüte der Anpressplattenreibfläche sowie ihre Inspektion auf Fehlstellen und Lunker. Um die Machbarkeit dieser Prüfung zu belegen und das Interaktionskonzept sowie das Sicherheitskonzept zu erproben, wurde der in *Abbildung 6-15* dargestellte Versuchsaufbau gewählt. Durch den eingesetzten Roboter wird das Kamerasystem zur Bauteiloberfläche des Prüfbauteils, der NKW-Druckplatte, positioniert. An unterschiedlichen Prüfpositionen werden Aufnahmen der Bauteiloberfläche gemacht. Die Auswertung der so generierten Bilddaten erfolgt auf Basis eines durch supervised learning trainierten KI-Algorithmus.

6.4.2 Feinplanung des Prozessablaufes

Zur Definition eines effizienten Prozessablaufes ist das fundierte Wissen des mit der Planung betrauten Mitarbeiters, über zeitliche Abhängigkeiten sowie Restriktionen unabdingbar. So liegen im Fall der NKW-Druckplattenmontage zeitliche Restriktionen bezüglich der Zugänglichkeit des Nietwerkzeuges vor, da für den Mitarbeiter während des Nietvorganges (Verrichtung 121) keine Möglichkeit der Montage auf dem Nietwerkzeug besteht. Um den Mitarbeiter dennoch möglichst effizient zu nutzen, wurden ihm Prozessschritte zugeteilt, die er während des automatisierten Nietvorganges durchführen kann. Im Konkreten wird die Zeit genutzt, um eine Vormontage für die nächste zu montierende Druckplatte durchzuführen. So erfolgen das Einlegen des Drahringes im Gehäuse (Verrichtung 40), das Einsetzen der Membranfeder (Verrichtung 50) sowie das Fügen der Nieten in die Anpressplatte während des laufenden Nietvorganges. Um alle während der Pressenlaufzeit möglichen Vormontagetätigkeiten durchführen zu können, wurde der Mitarbeiter im Prozessschritt Nieten lang in Bohrungen Anpressplatte fügen technisch unterstützt. So wurde ihm das Aufnehmen der Nieten durch ein automatisiertes Orientieren und Positionieren vereinfacht, wodurch eine Zeitersparnis von 2 s realisiert werden konnte. Ebenso wurde der Prozessschritt Sichtprüfung der Anpressplatte (Verrichtung 80) automatisiert und somit im Gesamtablauf parallelisiert.

Zusätzlich gestattet die separate Betrachtung von Aufnahmen und Platzieren, an dieser Stelle dem Mitarbeiter die Teilprozessschritte Aufnehmen der Nieten (Verrichtung 10)

und Näpfchen (Verrichtung 20) zuzuweisen. Das Aufnehmen dieser Bauteile ermöglicht es dem Mitarbeiter nach dem Einlaufen des leeren Nietunterwerkzeuges, direkt mit dem Platzieren der Niete (Verrichtung 11) und Näpfchen (Verrichtung 21) zu beginnen. Durch die ergriffenen Maßnahmen konnte die prozessbedingte Wartezeit während des automatisierten Nietvorgangs optimal genutzt werden.

Anschließend erfolgt die Platzierung des während der Pressenlaufzeit vormontierten ZSB-Gehäuses (Verrichtung 30) über die Niete und Näpfchen. Nachdem das Gehäuse eingesetzt wurde, wird der Spannvorgang (Verrichtung 60) der Membranfeder ausgelöst. Dieser erfolgt aufgrund des geänderten Sicherheitskonzeptes nicht mehr mit ortsbindender Zweihandsteuerung, sondern per Starttaster und Absicherung durch ein Sicherheitslichtgitter. Durch diese Maßnahme kann das Aufnehmen der Blattfedern parallel zum automatisierten Spannvorgang (Verrichtung 61) erfolgen. Um das Aufnehmen der Blattfedern (Verrichtung 70) zu vereinfachen, wird der Mitarbeiter durch ein Zuführsystem unterstützt. Dieses vereinzelt, orientiert und paketierte die Blattfedern in der gewünschten Anzahl. Durch diese technische Unterstützung entfällt für den Mitarbeiter die Notwendigkeit des Ausrichtens und Abzählens der Blattfedern, was zu einer Reduzierung der Zeit für das Aufnehmen von 10,7 s führt. Das anschließende Platzieren der aufgenommenen Blattfedern (Verrichtung 71) erfolgt ohne weitere technische Unterstützung.

Nachdem ein Portalsystem die Anpressplatte bereits automatisiert in den Greifbereich des Mitarbeiters zugeführt hat (während eines geschlossenen Schutzkreises parallel zu Verrichtung 70), übernimmt dieser manuell die weitere Handhabung des Systems (Verrichtung 90). Durch die automatisierte Zuführung und die verbesserte Vorausrichtung der Anpressplatte wird der Mitarbeiter bei seinem sensitiven Fügevorgang (Verrichtung 91) bestmöglich unterstützt. In den beiden letzten Schritten der Montage erfolgt die manuelle Positionierung der Scheiben über die Niete (Verrichtung 110), gefolgt vom abschließenden Auslösen des Nietvorgangs (Verrichtung 120).

Bei der Wahl der jeweiligen Optimierungs- bzw. Automatisierungsmaßnahmen wurde darauf geachtet, die technische Unterstützung so zu wählen, dass einerseits die gewünschte Prozessleistung und damit Zieltaktzeit erreicht werden und zeitgleich der Mitarbeiter möglichst effizient eingesetzt wird. Im Speziellen bedeutet dies, den Mitarbeiter möglichst hoch auszulasten und ihm, wo es möglich und nötig ist, technische Unterstützung zuteilwerden zu lassen. Die *Abbildung 6-16* veranschaulicht den optimierten Gesamtprozessablauf der NKW-Druckplattenendmontage.

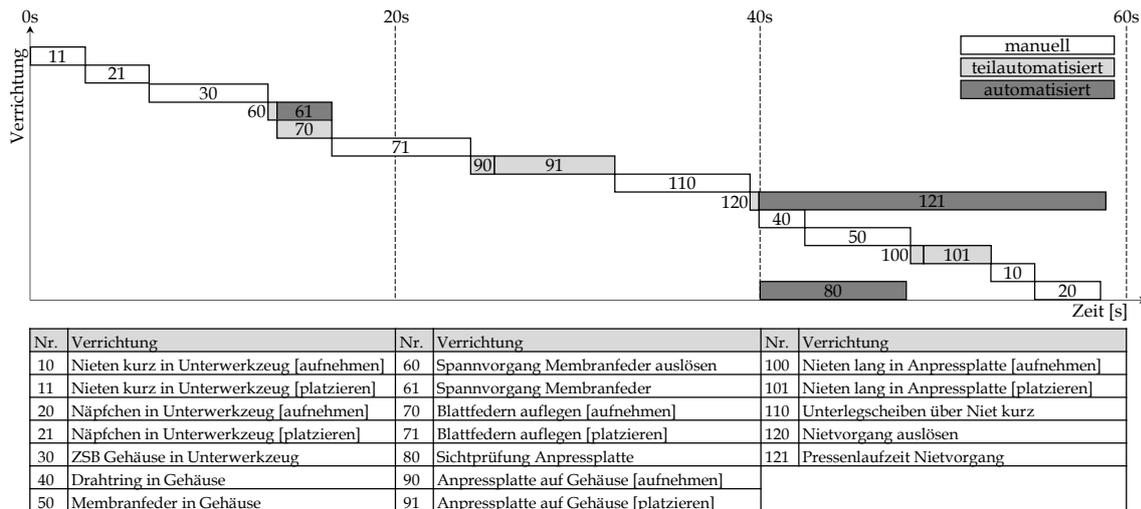


Abbildung 6-16: Optimierter Gesamtprozessablauf der NKW-Druckplattenmontage

6.4.2.1 Festlegung des Sicherheitskonzeptes

Nachdem die einzelnen Prozessschritte mit den technischen Optimierungsmaßnahmen in einen Gesamtprozessablauf gebracht wurden, gilt es nun, das geeignete Sicherheitskonzept für die Zusammenarbeit von Mensch und Technik festzulegen. Hierzu wurde, wie in der unter Kapitel 4.3.2.1 dargestellten Ablaufbeschreibung ausgeführt, mit der Ermittlung der zu erwartenden Gefährdungen begonnen. Diese wurden systematisch anhand der im Montagevorranggraphen festgelegten Einzelverrichtungen zusammen mit deren Gefährdungsursprung ermittelt und dokumentiert. Bei der Ermittlung der Gefährdungen wurden lediglich die Gefährdungen betrachtet, mit denen der Mitarbeiter bei der Ausübung seiner Tätigkeit konfrontiert wird.

Tabelle 6-4: Ermittlung der auftretenden Gefährdungen

Nr.	Verrichtung	Gefährdung	Gefährdungsursprung
10	Nieten kurz in Unterwerkzeug	-	-
20	Näpfchen in Unterwerkzeug	-	-
30	Gehäuse in Unterwerkzeug	-	-
40	Drahring in Gehäuse	-	-
50	Membranfeder in Gehäuse	-	-
60	Spannvorgang Membranfeder	Quetschen / Scheren	Spannstern und Membranfeder
70	Blattfedern auflegen	Quetschen / Scheren	Handlingssystem zum Paketieren der Blattfedern
80	Sichtprüfung Anpressplatte	Quetschen / Scheren / Stoßen	Kollision mit Roboter
90	Anpressplatte auf Gehäuse	Quetschen / Scheren / Stoßen	Umsetzen von Band zu Werkzeugschlitten
		Quetschen / Scheren	Absetzen Anpressplatte auf Werkzeug
100	Nieten lang in Anpressplatte	Quetschen / Scheren	Vereinzelungszylinder Ende Vibrationsförderer
110	Unterlegscheiben über Niet kurz	-	-
120	Nietvorgang auslösen	Quetschen / Scheren / Erfassen	Einfahren Werkzeugschlitten unter Presse
		Quetschen / Scheren	Durchführung Pressvorgang

Am Validierungsbeispiel der NKW-Druckplattenmontage zeigte sich, dass es sich in diesem Fall ausschließlich um mechanische Gefährdungen wie Quetschen oder Scheren

handelt. Die *Tabelle 6-4* stellt die ermittelten Gefährdungen sowie deren Gefährdungsurprung bezogen auf die durchzuführende Verrichtung dar.

Im Anschluss an die Identifizierung der auftretenden Gefährdungen ist es notwendig, das aus den Gefährdungen resultierende Risiko für den Mitarbeiter in Form einer Eingangsbewertung abzuschätzen. Dies erfolgte anhand der in *Kapitel 4.3.2.1* vorgestellten Methode zur Ermittlung der RPZ. Die Ermittlung der RPZ erfolgte hierbei dreistufig durch die Beurteilung der „Schwere des Schadens“ (S), der kombinierten Beurteilung von „Exposition und Eintrittswahrscheinlichkeit“ (F x O) sowie der „Vermeidbarkeit des Schadens“ (A). Das Ergebnis der Einzelbewertungen, sowie die Einschätzung des Risikos je Prozessschritt ist in *Tabelle 6-5* ersichtlich.

Tabelle 6-5: Ermittlung der Risikoprioritätszahl und Festlegung der technischen Schutzmaßnahme

Nr.	Verrichtung	Eingangsbewertung				technische Schutzmaßnahme	Ausgangsbewertung			
		S	F x O	A	RPZ		S	F x O	A	RPZ
10	Nieten kurz in Unterwerkzeug	-	-	-	-	-	-	-	-	-
20	Näpfcchen in Unterwerkzeug	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30	Gehäuse in Unterwerkzeug	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	Drahtring in Gehäuse	-	-	-	-	-	-	-	-	-
50	Membranfeder in Gehäuse	-	-	-	-	-	-	-	-	-
60	Spannvorgang Membranfeder	8	6	4	192	AOPD	8	2	4	64
70	Blattfedern auflegen	5	3	10	150	AOPD	5	1	10	50
80	Sichtprüfung Anpressplatte	2	8	4	64	-	2	8	4	64
90	Anpressplatte auf Gehäuse	8	10	6	480	AOPD	8	2	6	96
		8	7	6	336	Zweihandschaltung	8	2	6	96
100	Nieten lang in Anpressplatte	2	6	10	120	-	2	6	10	120
110	Unterlegscheiben über Niet kurz	-	-	-	-	-	-	-	-	-
120	Nietvorgang auslösen	10	6	6	360	AOPD	10	1	6	60
		10	5	6	300	AOPD	10	2	6	120

AOPD: aktive optoelektronische Schutzeinrichtung

Durch die ermittelten RPZ zeigt sich, dass das neue Handhabungsportal zum automatisierten Umsetzen (RPZ 480) und zum mitarbeitergeführten Absetzen (RPZ 336) der Anpressplatte ein erhebliches Risiko für ihn darstellt; des Weiteren erweist sich das bereits im Ausgangsszenario umgesetzte automatisierte Spannen der Membranfeder (RPZ 192) sowie das Einfahren (RPZ 360) und Verpressen (RPZ 300) der ZSB-Druckplatte auf dem Nietwerkzeug als ein erhebliches Risiko für den Mitarbeiter. Darüber hinaus birgt das neue Handhabungssystem zur Stapelung der vereinzelt Blattfedern (RPZ 150) ein geringes, jedoch zu minderndes Risiko. Das sich aus der automatisierten Sichtprüfung der Anpressplatte ergebende Risiko konnte aufgrund der zu erwartenden geringen Schwere des Schadens als niedrig eingestuft werden (RPZ 64); künftig soll die Sichtprüfung durch einen kollaborationsfähigen Roboter erfolgen. Die Schwere des Schadens konnte in dem hier vorliegenden Szenario der Mensch-Roboter-Koexistenz gering bewertet werden, da einerseits ein Robotersystem mit Leistungs- und Kraftbegrenzung gewählt wurde sowie andererseits zusätzlich anhand des Demonstrators die real auftretenden Kräfte und

Drücke nach DIN ISO/TS 15066 ermittelt wurden. Ebenso wurde der am Ende des Vibrationswendelförderers angebrachte Pneumatikzylinder zur Vereinzelung der Nieten betrachtet (RPZ 120). Durch seine geringe Maximalkraft konnte die zu erwartende Schwere des Schadens auch in diesem Fall als gering eingestuft werden, weshalb auch hier keine weiteren risikomindernden Maßnahmen zu ergreifen sind.

Im Anschluss an die Risikobewertung sind für die Prozessschritte mit einer RPZ > 130 risikomindernde Maßnahmen zu ergreifen. Hierzu sind durch den Planer im ersten Schritt konstruktive Änderungen zur Erzielung einer inhärenten Sicherheit zu betrachten. Sind diese, wie im hier dargestellten Validierungsbeispiel nicht möglich, sind zusätzliche technische Schutzmaßnahmen zu treffen. Zu Auswahl der geeigneten technischen Schutzmaßnahmen wurde für jeden Prozessschritt mit einer RPZ > 130 anhand des in dieser Arbeit entwickelten Entscheidungsbaumes (siehe Anhang *Abbildung 0-5* und *Abbildung 0-6*) eine entsprechende Schutzmaßnahme ausgewählt. Das Ergebnis der systematischen Auswahl der technischen Schutzmaßnahme kann *Tabelle 6-5* entnommen werden. Nach Festlegung der entsprechenden technischen Schutzmaßnahme ist zu beurteilen, ob das vorliegende Risiko durch die getroffene Maßnahme ausreichend gemindert wurde. Hierfür wurde eine erneute Risikoanalyse für die entsprechenden Prozessschritte unter Berücksichtigung der getroffenen Maßnahmen durch eine Ausgangsbewertung durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse sind ebenfalls in *Tabelle 6-5* ersichtlich.

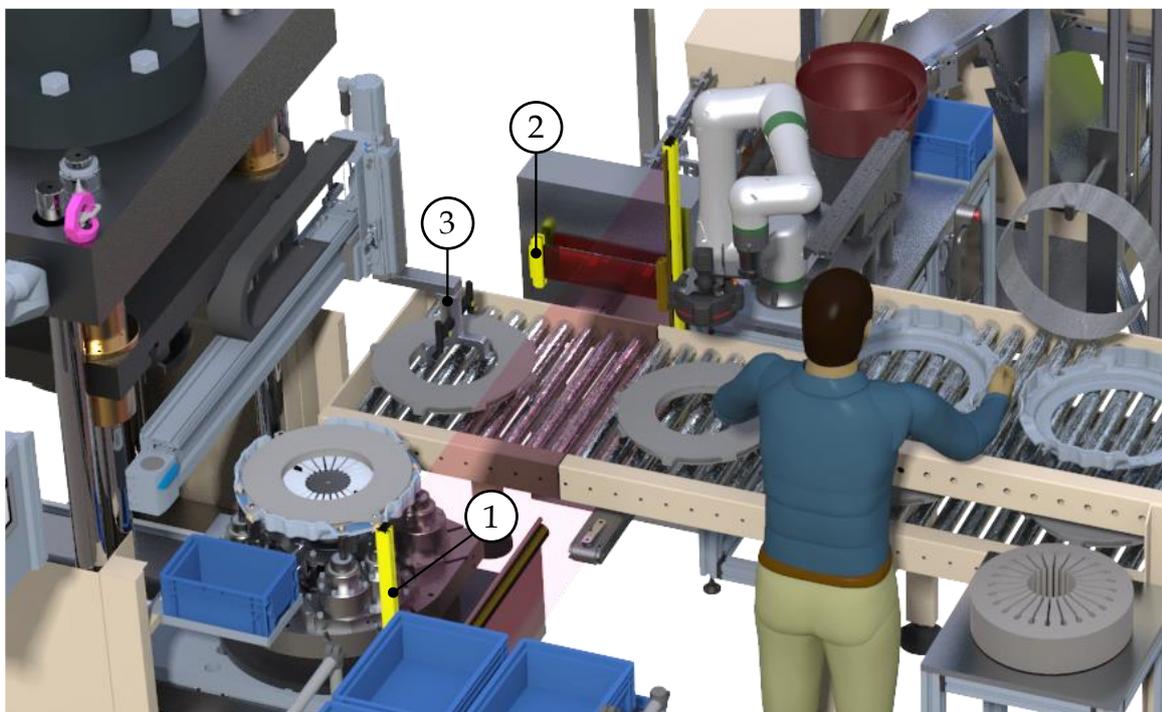


Abbildung 6-17: Arbeitsplatz Druckplattenmontage ergänzende technische Schutzmaßnahmen

Die festgelegten technischen Schutzmaßnahmen konnten unter Berücksichtigung des Gesamtprozessablaufes auf drei Maßnahmen reduziert werden. Deren Anbringung am Arbeitsplatz wird durch *Abbildung 6-17* visualisiert.

So konnten der Spannvorgang der Membranfeder, das Umsetzen der Anpressplatte sowie das Einfahren des Nietwerkzeuges mit anschließendem Verpressen durch eine aktive optoelektronische Schutzeinrichtung (AOPD), in diesem Fall ein Lichtgitter (1); abgesichert werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass durch die Verwendung einer technischen Schutzmaßnahme die Risiken in mehreren Prozessschritten gemindert werden konnten. Zusätzlich wurde ein weiteres Lichtgitter (2) eingesetzt, das den Eingriff zum Handhabungssystem der Blattfedern absichert. Um ein Quetschen und Scheren beim sensiblen Absetzen der Anpressplatte durch den Mitarbeiter zu verhindern, wurde der Greifer des Handhabungsportales mit einer Zweihandsteuerung (3) ausgestattet. Durch die Integration der drei genannten zusätzlichen technischen Schutzmaßnahmen konnte das Risiko ausreichend gemindert werden.

6.4.2.2 Technologieauswahl zur Mensch-Technik-Interaktion

Nach erfolgter Definition des Prozessablaufes sowie nach der Festlegung eines geeigneten Sicherheitskonzeptes gilt es nun, den Mitarbeiter bei seiner Tätigkeit bestmöglich zu unterstützen. Hierzu ist es notwendig, dass er die erforderlichen Informationen am Arbeitsplatz zur Verfügung gestellt bekommt und die Informationen zielgerichtet an die Maschine übertragen kann. Um dies zu realisieren, ist ein Konzept für die Interaktion zwischen Mensch und Technik zu entwickeln und es sind die geeigneten Technologien zur Mensch-Technik-Interaktion zu bestimmen. Um dies dem Planer problemlos zu ermöglichen, wurde in *Kapitel 4.3.2.2* die Methode des fähigkeitsbasierten Abgleiches zwischen den prozessbedingten Anforderungen und einer Technologiedatenbank vorgestellt. Zur Validierung der Methode wird diese im Folgenden am Beispiel der NKW-Druckplattenmontage durchgeführt.

Zur Bestimmung geeigneter Mensch-Technik-Interaktionstechnologien werden zu Beginn die Bedarfe der Informationseingabe innerhalb jedes Prozessschrittes dokumentiert. Somit wird durch den Planer definiert, welche Informationen vom Mitarbeiter innerhalb des entsprechenden Prozessschrittes an die Maschine zu übertragen sind. In dem hier vorgestellten Validierungsszenario handelt es sich vorrangig um Quittier- und Auslösehandlungen (Verrichtung 60 und 120), die nach erfolgreicher Ausführung von manuellen Montageinhalten den weiteren Fortschritt im Prozessablauf bestätigen. Jedoch auch gelegentliches Markieren von Fehlerbereichen sowie die Klassifizierung der aufgenommenen Bilddaten der automatisierten Sichtprüfung (Verrichtung 80) sind Informationen, die vom Mitarbeiter an die Maschine zu übertragen sind.

Tabelle 6-6: Bedarfe der Informationseingabe und -ausgabe der Druckplattenmontage

Nr.	Verrichtung	Bedarfe Informationseingabe	Bedarfe Informationsausgabe
10	Nieten kurz in Unterwerkzeug	keine	Meldung (Arbeitsbereich frei)
20	Näpfcchen in Unterwerkzeug		keine
30	Gehäuse in Unterwerkzeug		
40	Drahtring in Gehäuse		
50	Membranfeder in Gehäuse		
60	Spannvorgang Membranfeder	Quittieren / Auslösen	Meldung (Spannen abgeschlossen)
70	Blattfedern auflegen	keine	keine
80	Sichtprüfung Anpressplatte	Klassifizieren IO/ NIO	Status Prüfergebnis IO / NIO
		Labeln / Markieren von Bereichen	Fehlerdarstellung (Foto) / Prüfergebnis
90	Anpressplatte auf Gehäuse	keine	Darstellung Eingabe Labeln
			Markierung Fehler
100	Nieten lang in Anpressplatte	keine	Meldung (Arbeitsbereich frei)
110	Unterlegscheiben über Niet kurz		keine
120	Nietvorgang auslösen	Quittieren / Auslösen	
-	Arbeitsplatzbedienung allgemein	Rüstdaten	Meldungen (Anlagenstatus)
		Fehlerquittieren	detaillierter Fehlerbericht
		Handbedienung	Anlagenzustand

In gleicher Weise verhält es sich mit der Bedarfsermittlung zur Informationsausgabe, die ebenfalls je Prozessschritt durch den Planer zu dokumentieren ist. Zu diesen zählen Meldungen und Hinweise, die dem Mitarbeiter zur Bestätigung der Freigabe des nächsten Bearbeitungsschrittes (Verrichtung 10, 60 und 90) dienen. Des Weiteren sind Prüfergebnisse mit einer konkreten Fehlervisualisierung sowie die Markierung der fehlerhaften Stellen auf dem Bauteil Informationen, die von der Maschine an den Mitarbeiter zu übertragen sind (Verrichtung 80). *Tabelle 6-6* stellt die Bedarfe je Prozessschritt zur Informationseingabe und Informationsausgabe der Druckplattenmontage dar.

Nachdem die Prozessschritte, in denen ein Informationsaustausch zwischen Mensch und Technik erfolgen soll, festgelegt wurden, sind die Anforderungen an diese zu spezifizieren. Hierzu werden im ersten Schritt die global am Arbeitsplatz sowohl für die Ein- als auch Ausgabe gültigen Bedingungen bewertet. Anschließend werden die prozessschritt-spezifischen Anforderungen definiert. Somit werden Inhalte, wie die Informationsart oder die Informationsmenge je Prozessschritt, dokumentiert.

Ist dies sowohl für die Informationseingabe als auch -ausgabe erfolgt, werden die so erfassten Anforderungen einem Korrelationsvergleich mit den in der Technologiedatenbank hinterlegten Attributen der verfügbaren Technologien unterzogen. Als Ergebnis werden dem Planer Technologien vorgeschlagen, die aufgrund ihrer Übereinstimmung sich als am besten geeignet erweisen. Das Ergebnis der Technologieauswahl des hier betrachteten Validierungsszenarios der NKW-Druckplattenmontage sowie die an die Technologie gestellten Anforderungen sind *Tabelle 6-7* zu entnehmen.

Tabelle 6-7: Technologieauswahl zur Mensch-Technik-Interaktion der Druckplattenmontage

Nr.	Verrichtung	Anforderungen	Anforderungsspezifizierung Informationseingabe						Technologie zur kognitiven Assistenz
			Informationsart	Informationsmenge	räumliche Verteilung	Zugänglichkeit	Dauer der Nutzung	Häufigkeit der Nutzung	
60	Spannvorgang Membranfeder	Quittieren / Auslösen	binär	gering	stationär	immer/ frei	kürzer 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Schalter/Taster/Sensor Tastatur
80	Sichtprüfung Anpressplatte	Klassifizieren IO/ NIO	binär	gering	stationär	immer/ frei	kürzer 2 h/Schicht	weniger als 10x/Schicht	Schalter/Taster/Sensor Tastatur
		Labeln / Markieren von Bereichen	Anwahl Daten	viel	stationär	eingeschränkt akzeptabel	kürzer 2 h/Schicht	weniger als 10x/Schicht	Maus Tastatur Touchscreen
120	Nietvorgang auslösen	Quittieren / Auslösen	binär	gering	stationär	immer/ frei	kürzer 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Schalter/Taster/Sensor Tastatur
	(Anlagenstatus) Bedienung	Eingabe Rüsten Quittieren Handverfahren	Anwahl Daten, numerische, binär	viel	stationär	immer/ frei	kürzer 2 h/Schicht	weniger als 10x/Schicht	Maus Tastatur Touchscreen
Nr.	Verrichtung	Anforderungen	Anforderungsspezifizierung Informationsausgabe						Technologie zur kognitiven Assistenz
			Informationsklasse	Informationsmenge	Räumliche Verteilung	Ort der Info Darstellung	Dauer der Nutzung	Häufigkeit der Nutzung	
10	Nieten kurz in Unterwerkzeug	Meldung (Bereich frei)	Warnung / Status	gering	stationär	Arbeitsplatz allgemein	kürzer 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Meldeleuchte
60	Spannvorgang Membranfeder	Meldung (Spannen abgeschlossen)	Warnung / Status	gering	stationär	Arbeitsplatz allgemein	kürzer 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Meldeleuchte
80	Sichtprüfung Anpressplatte	Status Prüfergebnis IO / NIO	Warnung / Status	gering	stationär	Arbeitsplatz allgemein	länger 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Meldeleuchte
		Fehlerdarstellung Bild / Prüfergebnis	Hilfe/Hinweis Informationen	viel	stationär	Arbeitsplatz allgemein	länger 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Monitor
		Darstellung Eingabe Labeln	Hilfe/Hinweis Informationen	viel	stationär	Arbeitsplatz allgemein	kürzer 2 h/Schicht	weniger als 10x/Schicht	Monitor
		Markierung Fehler	Hilfe/Hinweis Informationen	gering	stationär	am Bauteil / auf der Arbeitsfläche	kürzer 2 h/Schicht	weniger als 10x/Schicht	Laser
90	Anpressplatte auf Gehäuse	Meldung (Bereich frei)	Warnung / Status	gering	stationär	Arbeitsplatz allgemein	kürzer 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Meldeleuchte
	Anlagenstatus	Meldungen / Status	Warnung / Status	gering	stationär	Arbeitsplatz allgemein	länger 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Meldeleuchte
		detaillierter Fehlerbericht	Hilfe/Hinweis Informationen	viel	stationär	Arbeitsplatz allgemein	länger 2 h/Schicht	mehr als 10x/Schicht	Monitor

Nachdem geeignete Technologien den gestellten Anforderungen entsprechend gewählt wurden, ist es die Aufgabe des Planers, deren Position am Arbeitsplatz zu bestimmen. Dies sollte so erfolgen, dass eingesetzte Technologien, wenn möglich, in unterschiedlichen Prozessschritten mehrfach Verwendung finden. Dadurch lässt sich der verwendete Bestätigungstaster (1) sowohl für das Auslösen des Spannvorganges der Membranfeder (Verrichtung 60) als auch für das Auslösen des Nietvorganges (Verrichtung 120) einsetzen. Gleichmaßen verhält es sich mit der Meldeleuchte (3), diese signalisiert in mehreren Prozessschritten (Verrichtung 10, 60 und 90), dass automatisierte Prozessschritte abgeschlossen sind und eine Übernahme der Tätigkeit durch den Mitarbeiter erfolgen kann. Die höchsten Anforderungen dieses Arbeitsplatzes hinsichtlich einer Mensch-Technik-Interaktion wird an die automatisierte Sichtprüfung der Anpressplatte (Verrichtung 80) gestellt. Hier wird einerseits der Status des Prüfergebnisses durch zwei instinktiv erfassbare Meldeleuchten (4) visualisiert. Zusätzlich ist es erforderlich, dass durch einen robotergeführten Kreislaser (6) im Falle einer Fehlerdetektion die fehlerhafte Stelle für den Mitarbeiter auf dem Bauteil kenntlich gemacht wird. Die vermeintliche Fehlerstelle ist im Anschluss durch den Mitarbeiter nachzuprüfen und über die Taster (2) als IO oder NIO zu klassifizieren. Um eine stetige Verbesserung der automatisierten Prüfung zu ermöglichen, sind eine Visualisierung der Bildaufnahme und die Möglichkeit des Labelns von Bildbereichen über den Bildschirm (5) erforderlich. Des Weiteren ermöglicht der Touchscreen

(7) dem Mitarbeiter, die Anlage zu bedienen, Handbewegungen auszuführen sowie Informationen über Anlagenzustände, Meldungen und Störungen zu empfangen. *Abbildung 6-18* stellt den neu gestalteten Arbeitsplatz der Druckplattenmontage mit den eingesetzten Technologien zur Mensch-Technik-Interaktion dar.

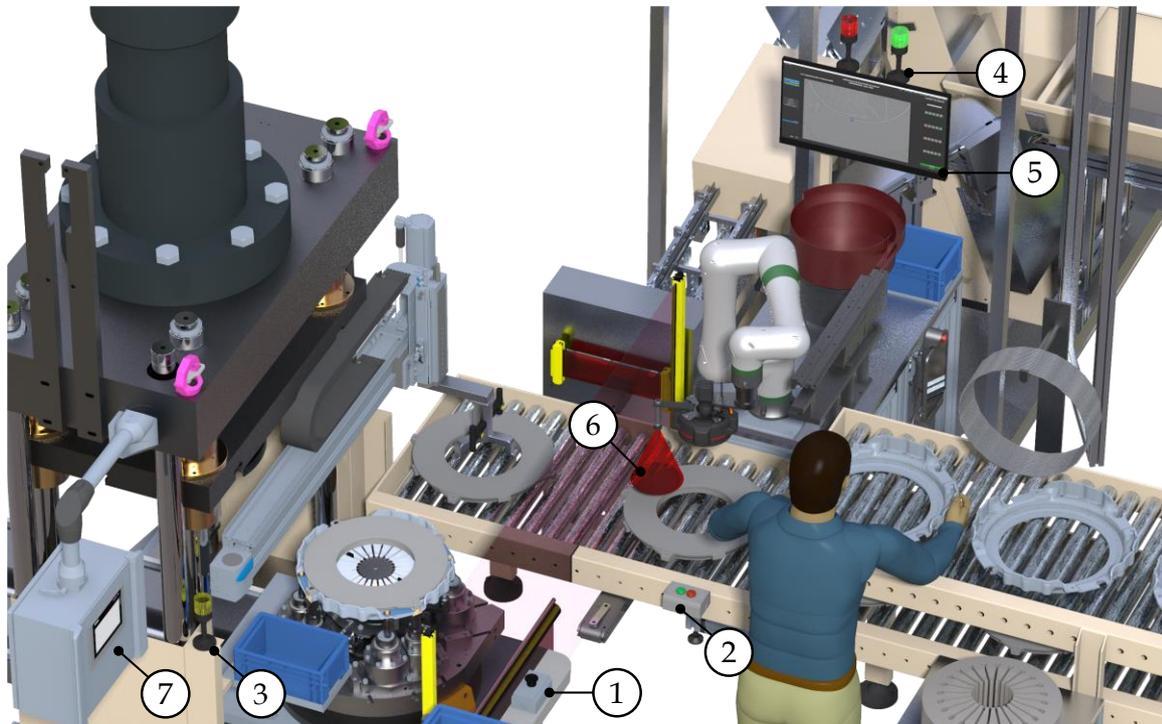


Abbildung 6-18: Arbeitsplatz Druckplattenmontage mit Technologien zur Mensch-Technik-Interaktion

6.5 Fazit zur Validierung der NKW-Druckplattenmontage

Die Validierung der vorgestellten Methodik zur Konzipierung hybrider Arbeitsplätze am Beispiel der NKW-Druckplattenmontage zeigte, dass erst durch eine fundierte Ausgangsanalyse ein ganzheitliches Verständnis von Produkt, Prozess und Betriebsmittel hergestellt werden konnte. Im Speziellen die Erstellung des Merkmalentstehungsbaums zusammen mit Experten aus Produktion und Qualität gab Aufschluss über die Entstehung der Zielmerkmale während des Montageprozesses. Durch die verwendeten Analysemethoden konnten zudem kritische Prozessschritte identifiziert werden, die aufgrund ihrer Tolerierung nicht für eine Automatisierung geeignet sind. Die Analysephase diente so dem Erkenntnisgewinn, auf dessen Basis die Bewertung der Prozessschritte beruhte. Durch die Bewertungsphase konnte im Anschluss das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand auf Grundlage der technischen Automatisierbarkeitsbewertung und der zeitlichen Optimierbarkeitsbewertung objektiv dargelegt werden, um geeignete Teilprozessschritte für eine Hybridisierung zu identifizieren.

Die Validierung zeigte jedoch auch, dass nötige Hilfsprozesse der Montage wie Kontrollieren, in diesem Fall die Sichtprüfung der Anpressplatte, nicht anhand der in dieser Arbeit vorgestellten Methode zur Bewertung der technischen Automatisierbarkeit beurteilbar sind. In diesem Fall wurde die Automatisierbarkeit durch Versuche erprobt.

Nachdem die Entscheidungsgrundlage für den Planer vorlag, war es dessen Ermessen, welche Potenziale er heben wollte. Diese Entscheidung war stark abhängig von der benötigten Zieltaktzeit des Arbeitsplatzes und den zur Verfügung stehenden finanziellen Mitteln. Weitere wissenschaftliche Arbeiten könnten an dieser Stelle anknüpfen, um den Planer bei dessen Entscheidungsfindung hinsichtlich des wirtschaftlichen Optimums zu unterstützen.

Die Feinplanung des Arbeitsplatzes erfolgte, nachdem der Zielprozessablauf durch den Planer festgelegt wurde. Hier zeigte sich der Mehrwert der entwickelten Methoden zur Festlegung des Sicherheitskonzeptes und der Technologieauswahl der Mensch-Technik-Interaktion. Durch deren Anwendung konnte bereits in der Planungsphase ein Sicherheits- sowie Interaktionskonzept erarbeitet werden, die den Prozessablauf, die Taktzeiten sowie den Flächenbedarf signifikant beeinflussten.

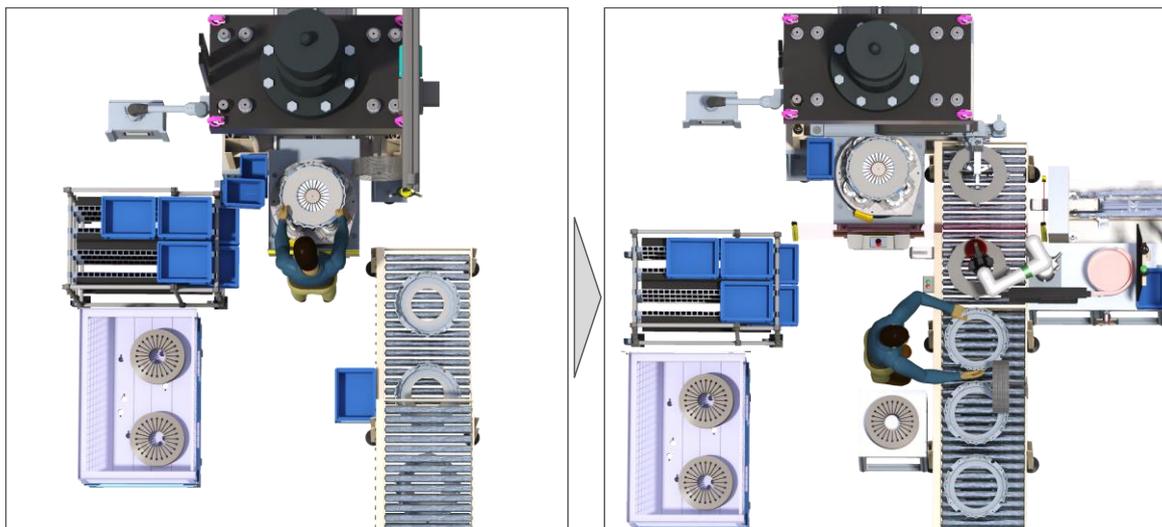


Abbildung 6-19: M2 Druckplattenmontage – Gegenüberstellung Ausgangszustand (links) und optimierter hybrider Arbeitsplatz (rechts)

Somit konnte anhand der Validierung belegt werden, dass die entwickelte Methodik für den Planer bei seiner Aufgabe der Konzipierung eines hybriden Arbeitsplatzes eine essenzielle Unterstützung darstellt. Die Methodik unterstützt den Planer bei der systematischen Ausgangsanalyse über die Bewertung zur Identifizierung geeigneter Prozessschritte bis hin zur Gestaltung des neuen Arbeitsplatzes. *Abbildung 6-19* stellt vergleichend das Ausgangsszenario und den anhand der validierten Methodik neu konzipierten Arbeitsplatz der NKW-Druckplattenmontage dar.

7 Validierung – Vormontage eWorX

Um die Übertragbarkeit, Zuverlässigkeit und Eignung der entwickelten Methodik auch anhand des digitalen Assistenten zu belegen, wurde in einem zweiten Validierungsszenario die Optimierung eines bestehenden manuellen Arbeitsplatzes erprobt. Dieses Validierungsszenario wurde zudem gewählt, da dessen Montage komplexe Bauteile beinhaltet, die mit Hilfswerkzeugen zu montieren sind. Die Vorgehensweise und die daraus resultierenden Ergebnisse werden im Folgenden dargelegt.

7.1 Betrachtung von Produkt- und Ausgangsszenario

Zur Validierung der entwickelten Methodik dient eine manuelle Vormontagestation des Neuproduktes eWorX (siehe *Abbildung 7-1*). Bei diesem Produkt handelt es sich um einen elektrifizierten Nebenantrieb im Bereich der Nutzfahrzeugtechnik. Dieser dient als standardisierte Schnittstelle in elektrischen Nutzkraftfahrzeugen für den Betrieb von Arbeitsaufbauten wie Abrollkippern oder Ladekränen. Das Produkt umfasst einen elektrischen Motor samt Steuereinheit und Leistungselektronik; es enthält unter anderem eine Hydraulikpumpe sowie einen Kühlkreislauf. (ZF Friedrichshafen, 2023)



Abbildung 7-1: Produktdarstellung eWorX (behind cabin design)

Da eine Validierung anhand der Montage des Gesamtproduktes aufgrund der Vielzahl an Montageschritten im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist, wird sich im Folgenden auf einen Vormontagearbeitsplatz der bestehenden manuellen Montagelinien beschränkt. An

diesem Montagearbeitsplatz werden die zwei Baugruppen Ausgleichsbehälter und Kühlmittelpumpe vormontiert.

Zur Vormontage des Ausgleichsbehälters wird im ersten Montageschritt der Ausgleichsbehälter in die Montagevorrichtung eingelegt. Anschließend folgen das Auflegen, Positionieren und vierfache Verschrauben des Behälterschutzbleches mit dem Ausgleichsbehälter. Alle Schraubvorgänge werden hierbei manuell durchgeführt und drehmomentüberwacht durch den Mitarbeiter. Nach der Verschraubung wird eine Schutzkappe auf den Auslass geschoben und durch eine Klemmschelle (klein) fixiert. Die Montage der Klemmschellen wird hierbei unter Zuhilfenahme einer Schlauchklemmenzange vorgenommen. Im Anschluss ist die Baugruppe zu wenden und das Behälterträgerblech über den Ausgleichsbehälter zu schieben. Der Ausgleichsbehälter wird auf dem Behälterträgerblech durch vier Schraubvorgänge fixiert. Abschließend erfolgt das Aufschieben des Kühlerschlauchstutzens mit der Fixierung durch eine Klemmschelle (groß). Die linke Seite der *Abbildung 7-2* visualisiert den Produktaufbau der Unterbaugruppe Ausgleichsbehälter in Form einer Explosionsdarstellung.

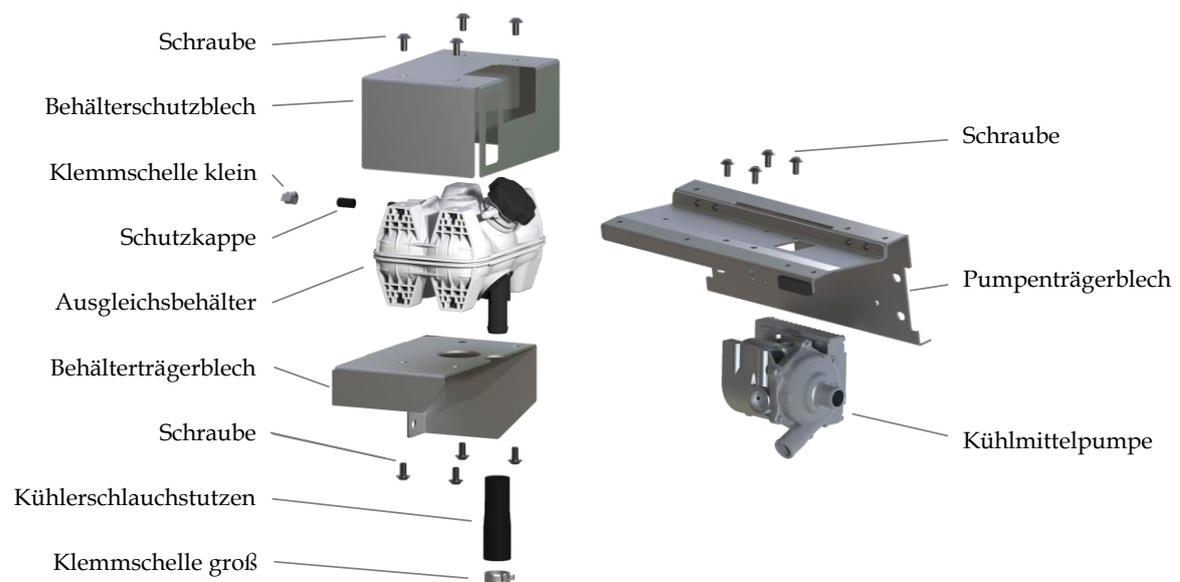


Abbildung 7-2: Unterbaugruppen Ausgleichsbehälter (links) und Kühlmittelpumpe (rechts)

Zur Vormontage der Unterbaugruppe Kühlmittelpumpe (siehe *Abbildung 7-2 rechts*) wird die Kühlmittelpumpe vom Mitarbeiter in eine Montagevorrichtung eingelegt und der DMC-Code auf dem Typenschild der Kühlmittelpumpe mittels Handscanner eingelesen. Anschließend erfolgt das gerichtete Auflegen des Pumpenträgerblechs auf die Kühlmittelpumpe. Darauffolgend wird das Trägerblech durch den Mitarbeiter unter Zuhilfenahme eines Drehmomentschlüssels mittels vier Schrauben mit der Kühlmittelpumpe verschraubt.

7.2 Analyse des Validierungsszenarios

Eine substantielle Ausgangsanalyse von Produkt, Prozess und Betriebsmittel stellt das Fundament der Planung eines Montagearbeitsplatzes dar. Jedoch sollte diese zielgerichtet erfolgen, um die Verschwendung von Zeit und damit von Planungsressourcen zu vermeiden. So wurde in dem hier dargestellten Validierungsszenario, der unkomplizierten Montage zweier Unterbaugruppen mit Absicht auf die Erstellung eines MEB verzichtet. Aufgrund der Neuheit des Produktes und der Tatsache, dass es momentan noch keine weiteren zu berücksichtigenden Varianten gibt, konnte zusätzlich auf eine Variantenanalyse verzichtet werden. *Abbildung 7-3* stellt den bestehenden analysierten Vormontagearbeitsplatz von Kühlmittelpumpe und Ausgleichsbehälter des elektrifizierten Nebenabtriebs eWorX in 3D dar.

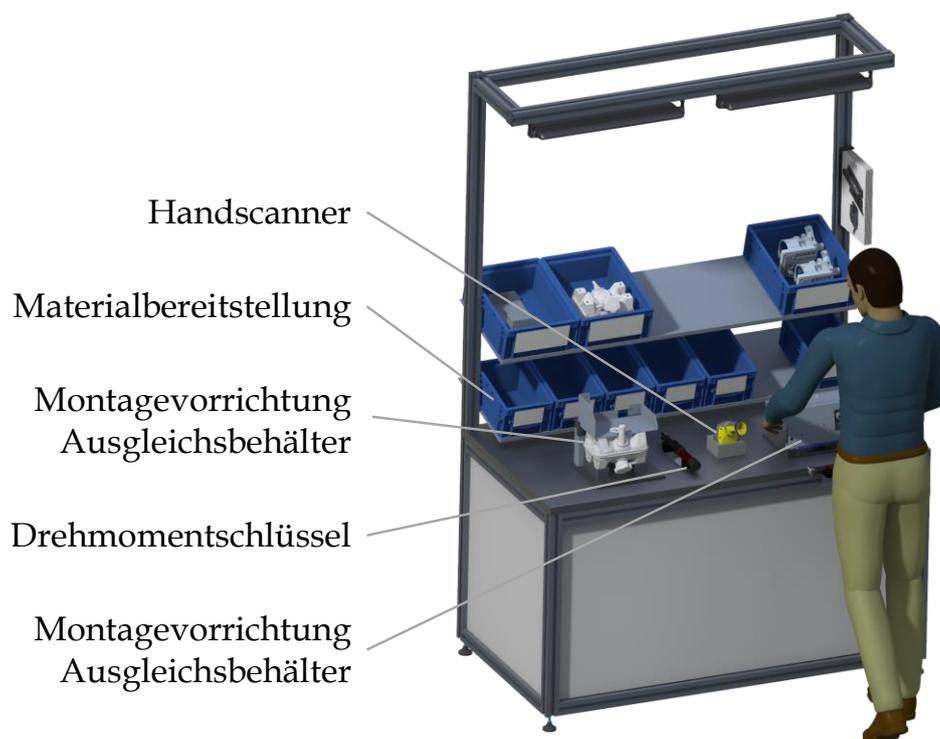


Abbildung 7-3: 3-D-Darstellung Vormontagearbeitsplatz eWorX

Die Durchführung der Analysen erfolgte mithilfe der in der App dargestellten Sekundärmethoden. Die Sekundärmethoden, die der Analyse dienen, werden in der App als Anleitungen abgebildet. Die Anleitungen erleichtern dem Benutzer die Durchführung der Analysemethoden, indem sie ihn anweisen und als digitales Nachschlagewerk zur Verfügung stehen. Die Durchführung der Analyse sowie die Dokumentation der Ergebnisse sind momentan noch kein Bestandteil der Anwendung. Daher sind die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse in einem separaten Dokument festzuhalten.

Die erlangten Erkenntnisse der durchgeführten Analysen des vorgestellten Arbeitsplatzes werden im Folgenden beschrieben.

7.2.1 Ursache-Wirkungs-Analyse

Die Ursache-Wirkungs-Analyse zeigt, welche Ursachen die Vormontage des Ausgleichsbehälters sowie der Kühlmittelpumpe negativ beeinflussen. Da in diesem Fall beide Vormontagen an einem Arbeitsplatz ausgeführt werden, wurden die Einflüsse in einem gemeinsamen Ishikawa-Diagramm (siehe Anhang *Abbildung 0-4*) dargestellt. In Übersichtsdarstellung *Abbildung 7-4* des erarbeiteten Diagramms ist deutlich erkennbar, dass die Haupteinflüsse durch den Menschen und das Material verursacht werden.

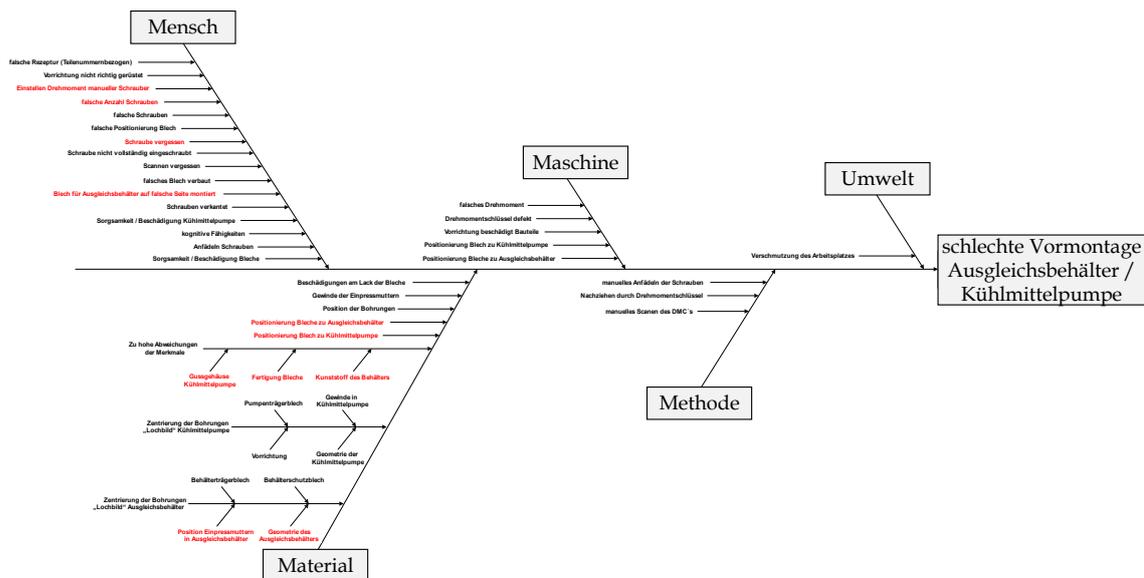


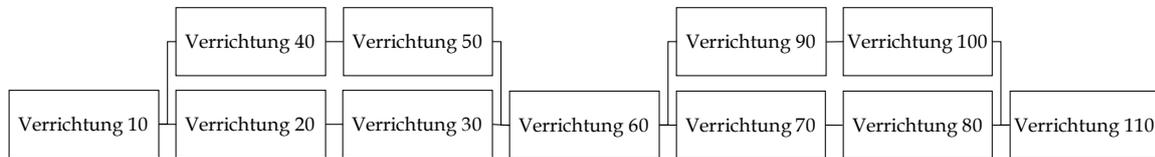
Abbildung 7-4: Übersicht Ishikawa-Diagramm Vormontage eWorX

Im Speziellen zeigt sich, dass durch den Menschen ein falsch eingestelltes Drehmoment des manuellen Drehmomentschlüssels sowie die falsche Anzahl an Schrauben zu den stärksten Einflussfaktoren auf eine schlechte Montage gehören. Weitere wichtige Einflussfaktoren sind auf das Material zurückzuführen. So beeinflussen die Positionierung des Behälterträger- sowie Behälterschutzbleches zum Ausgleichsbehälter sowie die Positionierung der Bohrbilder der zu verbindenden Komponenten das Montageergebnis erheblich. Analog verhält es sich mit der Positionierung der Kühlmittelpumpe zum Pumpenträgerblech. Aufgrund dieser Erkenntnisse empfiehlt es sich, vor der Automatisierbarkeitsbewertung eine Toleranz- und Toleranzkettenanalyse durchzuführen, um in Bezug auf die Genauigkeitsanforderungen aussagefähig zu sein.

7.2.2 Montagevorranggraph

Um die möglichen Montagereihenfolgen sowie die durchzuführenden Verrichtungen mit deren Abhängigkeiten zu visualisieren, wurde der in *Abbildung 7-5* dargestellte Montagevorranggraph erstellt. Der Montagevorranggraph zeigt, dass die zeitliche Abfolge der Montage der Schutzkappe (Verrichtung 20) und der Klemmschelle klein (Verrichtung 30) sowie der Verschraubung des Behälterschutzbleches (Verrichtung 50) frei wählbar sind.

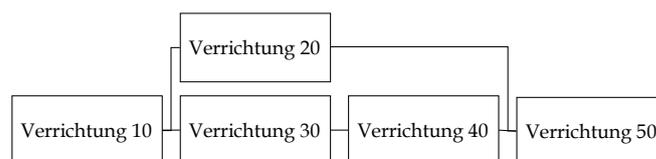
Diese müssen lediglich vor dem Wenden des Behälterschutzblesches (Verrichtung 60) abgeschlossen sein. Ebenso verhält es sich mit der Montage des Kühlerstutzens (Verrichtung 90) und der Klemmschellenmontage (Verrichtung 100) sowie der Verschraubung des Behälterträgerbleches (Verrichtung 80).



Nr.	Verrichtung	Nr.	Verrichtung
10	Ausgleichsbehälter in Vorrichtung einlegen	70	Behälterträgerblech auflegen
20	Schutzkappe aufchieben	80	Verschrauben Behälterträgerblech
30	Klemmschelle klein montieren	90	Kühlerschlauchstutzen aufchieben
40	Behälterschutzblech über Ausgleichsbehälter	100	Klemmschelle groß montieren
50	Verschrauben Behälterschutzblech	110	UZSB Ausgleichsbehälter entnehmen
60	Ausgleichsbehälter wenden		

Abbildung 7-5: Montagevorranggraph Ausgleichsbehälter

Die Montagereihenfolge der zweiten Baugruppe des betrachteten Arbeitsplatzes, die Kühlmittelpumpe, wird anhand des in *Abbildung 7-6* dargestellten Montagevorranggraphen und den darin dargestellten Verrichtungen ersichtlich. Neben dem Verschrauben der Kühlmittelpumpe (Verrichtung 40) mit dem Pumpenträgerblech ist in diesem Montageprozess noch der Prozess des Scannens (Verrichtung 20) des auf der Kühlmittelpumpe angebrachten DMC enthalten. Hierfür ist vom Mitarbeiter ein Handscanner aufzunehmen und der auf dem Typenschild der Kühlmittelpumpe angebrachte DMC zum Zweck der Rückverfolgbarkeit zu scannen. Der Scannvorgang kann vor oder nach dem Verschrauben des Pumpenträgerbleches erfolgen.



Nr.	Verrichtung	Nr.	Verrichtung
10	Kühlmittelpumpe in Vorrichtung einlegen	40	Verschrauben Pumpenträgerblech
20	Scannvorgang DMC Kühlmittelpumpe	50	UZSB Kühlmittelpumpe entnehmen
30	Pumpenträgerblech auf Kühlmittelpumpe		

Abbildung 7-6: Montagevorranggraph Kühlmittelpumpe

Die beiden erstellten Montagevorranggraphen dienen einerseits dazu, die Reihenfolge und den zeitlichen Verlauf der einzelnen Montageprozessschritte zu visualisieren, und werden andererseits in der erstellten Anwendung als Basisaufteilung zur Prozessbewertung und Neugestaltung verwendet.

7.3 Bewertung des Validierungsszenarios

Zur Bewertung der Prozessschritte des vorliegenden Validierungsszenarios hinsichtlich ihrer Eignung für eine Automatisierung wurden im ersten Schritt, abgeleitet aus den erstellten Montagevorranggraphen, die Einzelprozessschritte in der Anwendung erfasst. Diese strukturierte Herangehensweise stellt sicher, dass alle relevanten Prozessschritte aufgenommen und zu einem späteren Zeitpunkt bewertet werden. Dies erfolgte sowohl für die Montage des Ausgleichsbehälters als auch für die Kühlmittelpumpe. Im nächsten Schritt ging es um die softwaregestützte Bewertung der technischen Automatisierbarkeit jedes Prozessschrittes bezogen auf die Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren. Die Softwareunterstützung ermöglichte eine schnelle und problemlose Bewertung der Bewegungsfolgen und zudem eine unmittelbare detaillierte Einschätzung darüber, welche Teilprozessschritte sich besonders gut für eine Automatisierung eignen und welche aufgrund von technischen Herausforderungen weniger automatisierungsfreundlich sind. Hierbei wurden zwei Prozessschritte identifiziert, die durch das objektive Bewertungsverfahren anhand der in Kapitel 4.2.1 vorgestellten Kriterien nicht bewertbar sind. Es ist nicht sinnvoll die Automatisierbarkeit des Prozessschrittes „Scanvorgang DMC Kühlmittelpumpe“ sowie die Prozessschritte, die einen Schraubvorgang beinhalten mit den vorgestellten Kriterien zu bewerten. Etablierte am Markt verfügbare technische Lösungen lassen sich durch Erfahrung anhand von ähnlichen umgesetzten Lösungen bewerten. So lassen sich Handscanner durch automatisiert getriggerte Scanner und Handschrauber durch Schraubspindeln ersetzen.

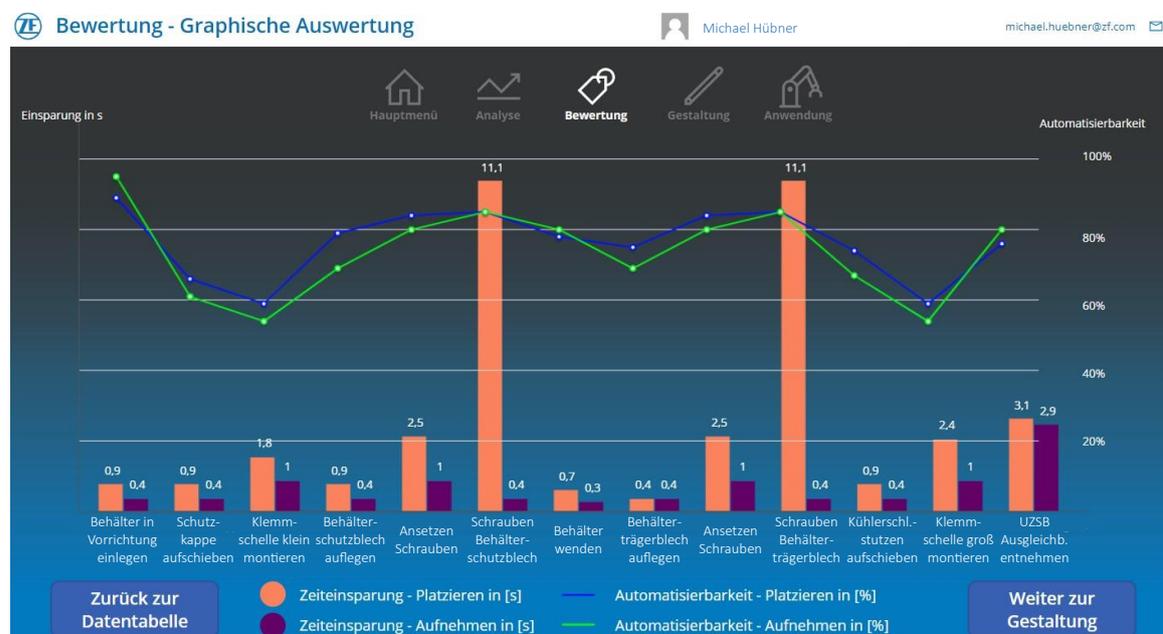


Abbildung 7-7: Grafischer Abgleich Automatisierbarkeits- und Potenzialbewertung Montage Ausgleichsbehälter

Nach erfolgter Bewertung der technischen Automatisierbarkeit wurde das vorliegende zeitliche Optimierungspotenzial für jeden Prozessschritt ermittelt, wobei erneut der Fokus auf den Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren lag. Zur Ermittlung der benötigten Ist- und Soll-Zeiten wurde eine MTM-2-Analyse durchgeführt. Aufgrund der hier vorliegenden Bauteildimensionen von ca. 200 mm wurde der Primärbereich, der den Idealabstand der Materialbereitstellung zum Fügeort darstellt, mit einem Durchmesser von 300 mm um das Zentrum der Montagevorrichtung gewählt. Zur Ermittlung der Primär- und damit Idealzeiten wurde die MTM-Analyse mit idealen Greifwegen von 150 mm und vereinzelt sowie lageorientierten Fügebauteilen durchgeführt. Durch die aus den Bauteildimensionen abgeleiteten Primär- und Sekundärarbeitsbereiche sowie durch die auf deren Basis festgestellten Ist- und Soll-Zeiten konnten die Sekundärvorgänge ermittelt werden. Durch die ermittelten Sekundärvorgänge konnten die Potenziale zur Zeitersparnis und somit zur Effizienzsteigerung identifiziert werden.

Um dem Anwender einen Abgleich der technischen Automatisierbarkeit und des zeitlichen Optimierungspotenziales zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse tabellarisch sowie grafisch zusammengeführt und ausgegeben. Die tabellarischen Darstellungen bieten eine detaillierte Übersicht der Einzelwerte, während die grafischen Darstellungen (siehe *Abbildung 7-7 und Abbildung 7-8*) dem Anwender einen visuellen Vergleich der Einzelprozessschritte ermöglichen.



Abbildung 7-8: Grafischer Abgleich Automatisierbarkeits- und Potenzialbewertung Montage Kühlmittelpumpe

Durch die softwaregeführte Bewertung und die Verwendung von vordefinierten Kriterien konnte eine erhebliche Zeitersparnis und damit eine Effizienzsteigerung im

Bewertungsprozess erzielt werden. Zudem konnte das Ergebnis der Bewertung transparent dargestellt und dokumentiert werden. Dies führt zu einer unkomplizierten Nachvollziehbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse, wodurch eine fundierte Grundlage für weiterführende Entscheidungen hinsichtlich der Implementierung von zielgerichteten Automatisierungstechnologien geschaffen werden konnte.

7.4 Gestaltung des neuen Arbeitsplatzes

Durch die softwaregestützte Bewertung konnten schnell und transparent Prozessschritte identifiziert werden, die ein hohes zeitliches Optimierungspotenzial aufweisen. Auffällig erwiesen sich in diesem Fall aufgrund der Dauer sowie Häufigkeit der Vorgänge die Schraubprozesse. Die Dauer der Primärvorgänge und damit das zeitliche Optimierungspotenzial konnten durch die angewendete Methode objektiv quantifiziert werden. Die technische Automatisierbarkeit der Schraubvorgänge hingegen konnte lediglich basierend auf Erfahrung subjektiv bewertet werden. Um hier die Automatisierbarkeit und damit praktische Umsetzbarkeit validieren zu können, wurden Schraubversuche durchgeführt. Diese umfassten das mehrfache automatisierte Verschrauben der betrachteten Bauteile unter Zuhilfenahme eines FANUC CRX-5iA-Roboter mit einer automatisierten Schraubspindel.



Abbildung 7-9: Versuchsaufbau Verschrauben Behälterträgerblech mit Ausgleichsbehälter

Abbildung 7-9 zeigt den Versuchsaufbau zur Validierung des Schraubprozesses des Behälterträgerbleches mit dem Ausgleichsbehälter. Durch den praktischen Versuch konnten die Automatisierbarkeit, Robustheit sowie Prozessstabilität der Schraubprozesse validiert werden.

7.4.1 Fähigkeits- und zeitpotenzialbasierte Zuteilung der Prozessschritte

Im Anschluss an die zuvor durchgeführte Bewertung und der durchgeführten Schraubversuche konnte auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine fähigkeits- und zeitpotenzialbasierte Zuteilung der Prozessschritte vorgenommen werden. In dieser wurden alle Prozessschritte, die das Verschrauben beinhalten, sowie der Scanprozess als vollautomatisierbar eingestuft und somit der Technik zugewiesen. Zudem konnte durch die differenzierte Betrachtungsweise in Aufnehmen und Platzieren das Ansetzen der Schrauben als ein Prozessschritt identifiziert werden, bei dem der Mitarbeiter durch technische Maßnahmen Unterstützung erfahren sollte. Des Weiteren konnten Prozessschritte wie das Klemmschellenmontieren mit einem hohen zeitlichen Optimierungspotenzial festgestellt werden, die aufgrund ihrer schwierigen technischen Automatisierbarkeit jedoch mit Absicht nicht zur Prozessoptimierung herangezogen wurden. *Abbildung 7-10* stellt auszugsweise die fähigkeits- und zeitbasierte Zuteilung der Prozessschritte dar.

Prozessname	Prozessschritt	Aufnehmen Zuteilung	Platzieren Zuteilung
In Vorrichtung einlegen	1	Mensch	Mensch
Schutzkappe aufchieben	2	Mensch	Mensch
Klemmschelle klein montieren	3	Mensch	Mensch
Behaelterschutzblech auflegen	4	Mensch	Mensch
Schrauben f. Behälterschutzblech anfüdeln	5	Technik	Mensch
Verschrauben Behaelterschutzblech	6	Technik	Technik
Ausgleichsbehälter wenden	7	Mensch	Mensch

Abbildung 7-10: Auszug fähigkeits- u. zeitpotenzialbasierte Zuteilung der Prozessschritte eWorX

7.4.2 Feinplanung des Prozessablaufes

Im nächsten Planungsschritt, der Feinplanung des Prozessablaufes, konnte auf die gewonnenen Erkenntnisse der zuvor durchgeführten Betrachtungen zurückgegriffen werden, um einen optimierten Prozessablauf zu gestalten. Ziel der Gestaltung war es, sowohl den

Mitarbeiter als auch die Technik möglichst hoch auszulasten und damit die eingesetzten Ressourcen effizient zu nutzen.

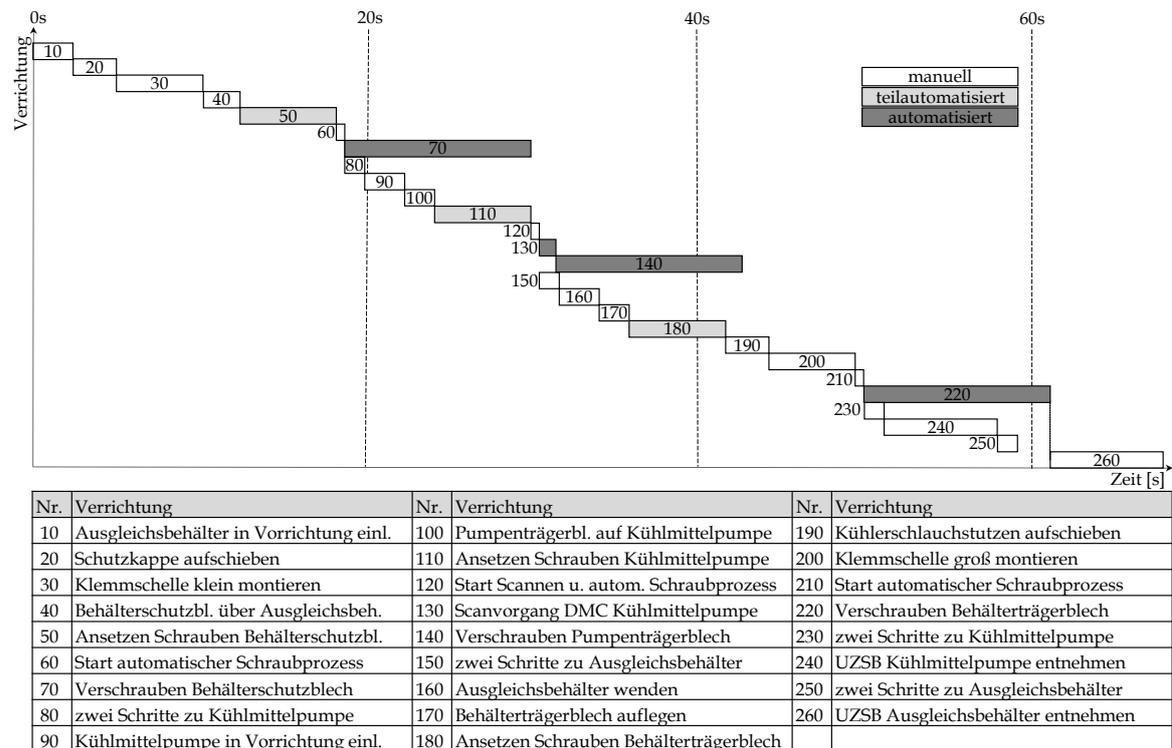


Abbildung 7-11: Optimierter Gesamtprozessablauf Vormontage eWorX

Ausgehend von ausschließlich manuellen Schraubprozessen konnte durch die Verwendung von automatisierten Schraubspindeln, die durch ein Handlingsystem positioniert werden, die Schraubprozesse (Verrichtung 70, 140 und 220) voll automatisiert werden. Die reine Verwendung von automatisierten Schraubspindeln hätte die Prozesszeit des Verschraubens von 22 s auf 11 s je vier Schrauben reduziert, jedoch würde dies den Mitarbeiter weiterhin an den Prozess binden. Durch die zusätzliche Automatisierung des Schraubspindelhandlings konnten in der Prozessablaufplanung Arbeitsvorgänge parallelisiert werden. So wurde es möglich, dass der Mitarbeiter wechselseitig Bauteile in den beiden Vorrichtungen vormontiert und der Schraubprozess an der jeweils freien Montagestation parallel automatisiert ausgeführt wird. Durch den Einsatz der automatisierten Schraubspindel in drei Prozessschritten konnte die eingesetzte Technologie effizient genutzt werden. Des Weiteren konnte der Scanvorgang des DMC der Kühlmittelpumpe (Verrichtung 130) ebenfalls automatisiert werden. So konnte der manuelle Scanprozess mittels Handscanner durch einen am Handlingsystem montierten Scanner ersetzt werden. Dies ermöglichte eine Taktzeitreduzierung um 3,6 s, da dieser Vorgang so ebenfalls automatisiert und parallelisiert ablaufen kann. Um den Mitarbeiter bestmöglich beim Ansetzen der Schrauben (Verrichtung 50, 110 und 180) zu unterstützen, wird dieser Prozessschritt teilautomatisiert. So werden die Schrauben vereinzelt und gerichtet im Nahbereich

des Mitarbeiters angedient, wodurch dieser Prozessschritt um 3,5 s schneller erfolgen kann. Auf diese Weise konnte durch diese Maßnahme eine Taktzeitreduzierung um weitere 10,5 s erzielt werden. Auf eine Vollautomatisierung der Schraubenzuführung wurde verzichtet, da dies zwar eine weitere Taktzeitreduzierung ermöglichen, jedoch im Gesamtablauf zu geringeren Auslastungen des Mitarbeiters führen würde. Auf Basis der MTM-2-Analyse konnten zusätzlich Optimierungspotenziale durch die bessere Positionierung von Materialien und damit die Verkürzung von Greifwegen identifiziert werden.

Durch alle geplanten Optimierungsmaßnahmen des Arbeitsplatzes konnte die Montagezeit beider Unterbaugruppen ausgehend von der bestehenden manuellen Montagezeit von 165 s durch die Hybridisierung des Arbeitsplatzes auf 68 s reduziert werden. Somit wird für die hybride Montage nur noch 41 % der ursprünglichen manuellen Montagezeit benötigt.

7.4.2.1 Festlegung des Sicherheitskonzeptes

Zur Festlegung des Sicherheitskonzeptes wurden zu Beginn alle auftretenden Gefährdungen des geplanten Montageablaufes je Prozessschritt dokumentiert und deren Eingangsrisiko durch die Errechnung der RPZ ermittelt (siehe *Abbildung 7-12*). Potenzielle Gefährdungen wurden in den Prozessschritten des Verschraubens mittels robotergeführter Schraubspindel identifiziert. In diesen Prozessschritten besteht die Gefahr eines Stechens zwischen Werkzeugbit und der Hand des Mitarbeiters (RPZ 480) sowie eines Quetschens oder Stoßens bei einer Kollision mit dem Roboter (RPZ 480). Als weitere mögliche Gefährdungen wurden die Vereinzelnzylinder (RPZ 240) am Ende der Nietzuführung identifiziert.

Gestaltung - Fähigkeitsbasierte Zuteilung - Gefährdungen Michael Hübner michael.huebner@zf.com

Hauptmenü Analyse Bewertung **Gestaltung** Anwendung

Bitte wählen Sie den jeweiligen Prozessschritt aus für welchen Sie Gefährdungen hinzufügen möchten. Durch das Info-Icon linksstehend neben den Gefährdungen können Sie auf die Gefährdungsgruppierungen zugreifen und im Textfeld eintragen. Anschließend bewerten Sie bitte die jeweilige Gefährdung durch die Faktoren, womit automatisch eine Risikoprioritätszahl zugeordnet wird. Bestätigen Sie Ihre Eingaben mit der Schaltfläche und kontrollieren Sie Ihren Eintrag in der Auflistung.

Prozessschritt wählen: 10 Verschrauben Behälterträgerblech

Gefährdung hier eintragen: Gefährdung bitte einzeln hinzufügen...

Exposition und Eintrittswahrscheinlichkeit: 8

Schwere des Schadens: 2

Vermeidbarkeit des Schadens: 4

Risikoprioritätszahl: 64

Gefährdung und RPZ des Prozessschrittes speichern

Alles definiert!

RPZ der Gefährdung: 64

- Prozessschritt: 10
Gefährdung: Stechen zwischen
RPZ der Gefährdung: 64
- Prozessschritt: 10
Gefährdung: Stoßen mit Roboter
RPZ der Gefährdung: 64
- Prozessschritt: 6
Gefährdung: Quetschen mit Roboter
RPZ der Gefährdung: 64

Abbildung 7-12: Auszug aus der Risikobewertung Vormontage eWorX

Nach erfolgreicher Ermittlung der Eingangsrisikoprioritätszahl wurden technische Schutzmaßnahmen zur Reduzierung der Gefährdungen mithilfe des digital abgebildeten Auswahlbaumes definiert. So wurden Begrenzungseinrichtungen sowohl für den Roboter als auch für die Vereinzlungszylinder definiert. Durch diese Maßnahmen ist die permanente Zugänglichkeit durch den Mitarbeiter weiterhin gegeben. Im Speziellen wurde für den Roboter eine Leistungs- sowie Kraftbegrenzung gewählt, wodurch das Schadensausmaß erheblich reduziert werden konnte. Für den Vereinzlungszylinder wurde eine Begrenzung der Kolbenfläche sowie des Pneumatikdruckes zur Reduzierung der Gefährdung festgelegt. Nach Festlegung der begrenzenden Schutzmaßnahmen wurde die RPZ erneut ermittelt, um die Wirksamkeit der getroffenen Schutzmaßnahmen zu bewerten. Diese Bewertung ergab, dass sowohl die Gefährdung durch den Roboter (RPZ 64) als auch durch den Vereinzlungszylinder (RPZ 80) durch die getroffenen Maßnahmen unterhalb des Grenzwertes < 130 liegen und damit keine weiteren Maßnahmen erforderlich sind.

7.4.2.2 Technologieauswahl zur Mensch-Technik-Interaktion

Nachdem durch die Festlegung des Sicherheitskonzepts der finale Prozessablauf wie geplant umgesetzt werden konnte, sind im Anschluss geeignete Technologien zur Mensch-Technik-Interaktion zu definieren. Um dies systematisch durchzuführen, werden durch den Anwender die Bedarfe an Ein- und Ausgabetechnologien je Prozessschritt in der Anwendung dokumentiert. Darauffolgend werden die allgemeinen am Arbeitsplatz vorherrschenden Bedingungen sowie die prozessschrittspezifischen Anforderungen (vgl. *Abbildung 7-13*) an die Ein- und Ausgabetechnologien abgefragt und dokumentiert.

Abbildung 7-13: Auszug Spezifizierung der Anforderungen zur Mensch-Technik-Interaktion Vormontage eWorX

Anschließend erfolgt der Korrelationsvergleich mit den in der Datenbank hinterlegten Ein- und Ausgabetechnologien und deren Attributen. Nach dem Korrelationsvergleich werden dem Planer in einer Übersicht den Anforderungen entsprechende Technologien zur Mensch-Technik-Interaktion vorgeschlagen.

Aufgrund des vorliegenden Bedarfes wurde für die sichere Prozessführung ein Monitor ausgewählt, der zur Visualisierung der durchzuführenden Montagetätigkeiten dient. Zusätzlich wird ein Pick-by-light-System dazu verwendet, dem Mitarbeiter einerseits das Greifen des richtigen Montagematerials zu signalisieren und andererseits eine sensorbasierte Bestätigung des Greifvorganges zu ermöglichen. Des Weiteren wurden Taster zur Bestätigung des Abschlusses eines Prozessschrittes als Eingabetechnologien gewählt, um der Maschine die Visualisierung der nächsten Prozessschritte sowie den Start der automatisierten Schraubvorgänge zu signalisieren. Um den Abschluss der automatisierten Vorgänge und damit die Bearbeitungsfreigabe für den Mitarbeiter als Signal anzuzeigen, wurden projizierende Leuchtpots gewählt.

7.5 Fazit zur Validierung Vormontage eWorX

Durch die zusätzliche Methodvalidierung anhand der beschriebenen Vormontage der Kühlmittelpumpe sowie des Ausgleichsbehälters des elektrifizierten Nebenabtriebs eWorX konnte die Übertragbarkeit der entwickelten Methodik belegt werden.

Bei einer darüber hinaus ohne Softwareunterstützung durchgeführten Anwendung der Methodik in dem beschriebenen Validierungsfall konnte die Verbesserung durch den Einsatz von Software testweise erprobt werden. So konnte in diesem Fall eine Effizienzsteigerung von 57 % durch die Beschleunigung des Bewertungsprozesses ermittelt werden. Dies konnte hauptsächlich auf die durch Auswahlfenster vereinfachte und systemgeführte Bewertung, die durchgängige Übernahme der Prozessschrittbezeichnungen sowie die automatisierte Erstellung von Übersichten und Diagrammen zurückgeführt werden. Zudem konnte eine Minimierung von Eingabebefehlen durch hinterlegte Validierungs- und Prüfregele an Eingabe- und Auswahlfeldern festgestellt werden.

Somit ermöglichte die entwickelte softwaregestützte Anwendung der Methodik eine unkompliziertere Datenerfassung, -verwaltung und -analyse, was zu einer fundierten und nachvollziehbaren Entscheidungsfindung hinsichtlich der Auswahl geeigneter Prozessschritte führt. Zudem konnten eine signifikante Steigerung der Effizienz durch Zeitersparnis sowie eine Fehlerreduzierung konstatiert werden.

Am konkreten Validierungsbeispiel konnten Teilprozessschritte mit einem hohen zeitlichen Optimierungspotenzial gepaart mit einer adäquaten technischen Automatisierbarkeit durch die Anwendung der Methodik systematisch identifiziert werden. Jedoch wurden auch in diesem Validierungsszenario zwei Prozessschritte ermittelt, welche durch die

Kriterien der Automatisierbarkeitsbewertung nicht bewertbar sind. Diese beinhalteten die Schraubprozesse, sowie den Scanvorgang des DMC's der Kühlmittelpumpe. So musste hier die Automatisierbarkeit durch die Kenntnis der etablierten, am Markt verfügbaren technischen Lösungen abgeschätzt werden.

Durch den Abgleich zeigten sich im Wesentlichen die manuellen Schraubprozesse, das Aufnehmen der Schrauben sowie der Scanprozess als geeignet. So konnte auf Basis dieser Erkenntnisse ein optimierter hybrider Prozessablauf gestaltet werden. Zusätzlich ermöglichten die in die Methodik integrierten Methoden der Auswahl geeigneter Sicherheitseinrichtungen sowie Technologien zur Mensch-Technik-Interaktion, den Arbeitsplatz auszugestalten.

Durch die Anwendung der Methodik und durch den gezielten Einsatz von Technologien zur Unterstützung des Mitarbeiters bei seinen Montagetätigkeiten konnte eine signifikante Effizienzsteigerung des Vormontagearbeitsplatzes eWorX erzielt werden. So wurde durch die Hybridisierung und Umgestaltung des Arbeitsplatzes (vgl. *Abbildung 7-14*) die Montagetaktzeit um 59 % reduziert.

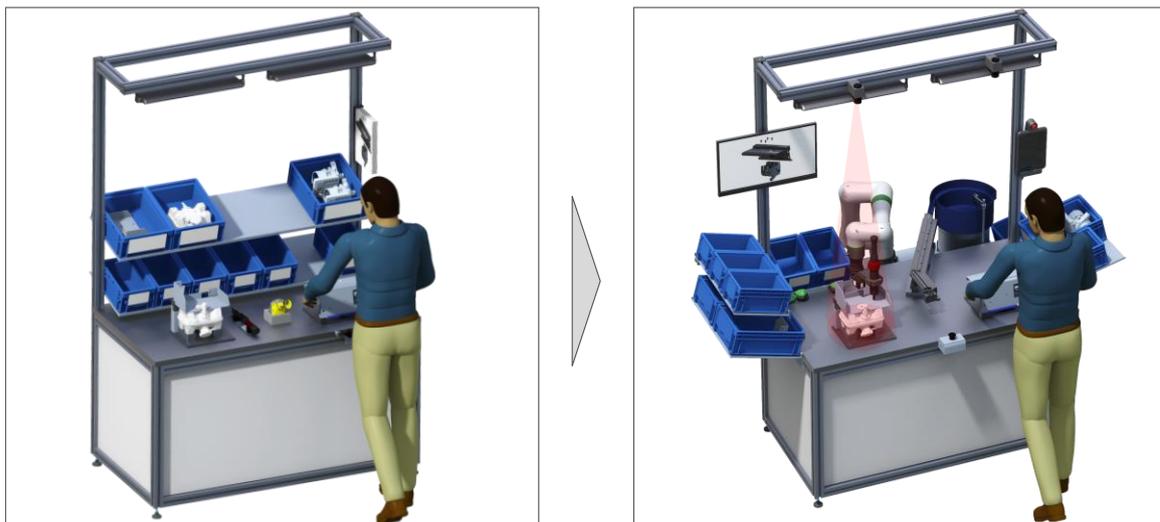


Abbildung 7-14: eWorX Vormontage – Gegenüberstellung Ausgangszustand (links) optimierter hybrider Arbeitsplatz (rechts)

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Ein Schlüssel, um am Hochlohnstandort Deutschland weiterhin bestehen zu können, liegt in der Beherrschung der effizienten Produktion kundenspezifischer Produkte. Dem kundenspezifischen Wunsch nach individuellen und damit variantenreichen Produkten kann in Deutschland nicht mit ausschließlich manuellen Arbeitsplätzen begegnet werden. Diese Herangehensweise führt zwangsläufig zu einer Verlagerung oder Direktansiedlung von Produktionsstätten in Best-Cost-Countries. Ebenso wenig ist eine Vollautomatisierung bei geringen bis mittleren Stückzahlen sowie einer hohen Varianz zielführend. Die Lösung dieses Dilemmas liegt in einer zielgerichteten Teilautomatisierung bzw. der Hybridisierung von Arbeitsplätzen. Somit gilt es, Arbeitsplätze möglichst effizient zu gestalten, indem eine ideale Balance zwischen den Ressourcen Mensch und Technik gefunden wird. Jedoch erweist sich gerade dies, die zielgerichtete Automation und damit die Wahl der geeigneten Prozessschritte, bei denen der Mitarbeiter eine technische Unterstützung erfahren sollte, in der Praxis als äußerst herausfordernd. Eigene Erfahrungen aus der industriellen Praxis bestätigen, dass Hybridisierungen an Arbeitsplätzen oft sporadisch und nicht systematisch durchgeführt werden, wodurch das volle Potenzial hybrider Montagesysteme nur teilweise ausgeschöpft wird.

Mit der Zielsetzung dieser Arbeit, der Entwicklung einer Methodik zur Konzipierung hybrider Montagesysteme, wird diesen Herausforderungen begegnet, indem eine systematische Aufgabenallokation auf Basis der technischen Realisierbarkeit und des zeitlichen Optimierungspotenzials durchgeführt wird.

Die entwickelte Methodik verfolgt einen modularen Ansatz, der sowohl aus einzusetzenden Primärmethoden als auch aus ergänzenden Sekundärmethoden besteht. So beinhaltet die Methodik Sekundärmethoden zur Ausgangsanalyse, um ein Gesamtverständnis von Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel zu erhalten. Diese können optional, je nach erforderlichem Informationsgrad und bereits vorliegendem Wissensstand, angewendet werden. Demgegenüber stehen die Primärmethoden, die der Bewertung der technischen Automatisierbarkeit sowie der Ermittlung des zeitlichen Optimierungspotenzials dienen. Durch die Anwendung der Primärmethoden und ihrer detaillierten Aufteilung in Teilprozessschritte erhält der Anwender wertvolle Erkenntnisse über potenzielle Zeitersparnisse sowie die technische Realisierbarkeit von

Optimierungsmaßnahmen, selbst innerhalb einzelner Prozessschritte. Diese Betrachtungsebene ermöglicht es, die Ressourcen Mensch und Technik optimal aufzuteilen und dem Menschen bedarfsgerecht auch innerhalb eines Prozessschrittes technische Unterstützung zuteilwerden zu lassen.

Des Weiteren beinhaltet die entwickelte Methodik Sekundärmethoden, die dem Anwender bei der Ausgestaltung des Arbeitsplatzes assistieren. Dies umfasst eine Methode zur Festlegung des Sicherheitskonzeptes sowie zur Wahl der geeigneten Interaktionstechnologie zwischen Mensch und Technik. Gerade die Definition eines geeigneten Sicherheitskonzeptes erweist sich in der Praxis als iterativer Prozess zwischen der Zuteilung der Prozessschritte und der Bewertung des sich aus dieser Zuteilung ergebenden Risikos für den Menschen.

Somit stellt die entwickelte Methodik eine systematische Vorgehensweise dar, die den Planer von der Analyse über die Zuteilung der Arbeitsinhalte bis hin zur Ausgestaltung des konzipierten hybriden Arbeitsplatzes unterstützt. Um diese Methodik einem breiteren Kreis an Anwendern zugänglich zu machen, wurde sie in Form einer Softwareanwendung implementiert und bereitgestellt. Durch die Verwendung der Software konnte eine Effizienzsteigerung durch die Beschleunigung des Bewertungsprozesses sowie durch die Reduzierung der vom Menschen verursachten Fehler erzielt werden.

Zur Validierung dienten ein Montagearbeitsplatz für NKW-Druckplatten sowie der Vormontagearbeitsplatz für Kühlmittelpumpen und Ausgleichsbehälter für elektrifizierte Nebenabtriebe aus dem Bereich der Nutzfahrzeugtechnik. Auf Grundlage der durchgeführten Validierung konnte belegt werden, dass die entwickelte Methodik sowohl für deren Zweck geeignet ist als auch erfolgreich auf andere Montagearbeitsplätze übertragen werden kann.

8.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Folgenden wird die in *Kapitel 1.2* aus der Zielsetzung der Arbeit abgeleitete Forschungsfrage sowie die untergeordneten Fragestellungen beantwortet.

Wie kann eine ganzheitliche, methodische Konzeptionierung von hybriden Arbeitsplätzen erfolgen, die sowohl die technische Realisierbarkeit als auch den Nutzen durch die Steigerung des Automatisierungsgrades berücksichtigt?

Um eine ganzheitliche Konzipierung von hybriden Arbeitsplätzen zu realisieren, wurde in dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, die es dem Anwender ermöglicht, von der Ausgangsanalyse über die Bewertung des Arbeitsplatzes bis hin zur Gestaltung des neuen Arbeitsplatzes methodische Unterstützung zu erhalten. Hierbei erfolgt die Auswahl der geeigneten Prozessschritte für eine Automatisierung auf Basis einer Automatisierbarkeitsbewertung anhand von lösungsneutralen bauteil- und prozessbezogenen Kriterien sowie aufgrund des vorliegenden zeitlichen Optimierungspotenziales.

Welche Ausgangsanalyse ist für eine ganzheitliche Systembetrachtung von Produkt, Montageprozess und Betriebsmittel sowie der nachfolgenden Konzeptionierung erforderlich?

Um ein ganzheitliches Bild des bestehenden Produktes, des Montageprozesses und des Betriebsmittels zu erhalten, wurden fünf etablierte Analysemethoden in die Gesamtmethodik dieser Arbeit integriert. Diese sind der Merkmalentstehungsbaum, die Ursache-Wirkungs-Analyse, der Montagevorranggraph, die Variantenanalyse sowie die Toleranz- und Toleranzkettenanalyse. Diese gelten im Kontext der Gesamtmethodik als Sekundärmethoden und können je nach erforderlichen Erkenntnissen angewendet werden. Der aus den genannten Einzelmethoden erzielbare Erkenntnisgewinn wird in *Kapitel 4.1.6*, der Zusammenfassung der Analysemethodik, tabellarisch dargestellt.

Wie können die technische Realisierbarkeit und der Nutzen durch die Steigerung des Automatisierungsgrades objektiv bewertet werden?

Um die technische Realisierbarkeit bewerten zu können, wurden lösungsneutrale bauteil- und prozessbezogene Kriterien festgelegt, anhand derer sich die Automatisierbarkeit auf Teilprozessebene bewerten lässt. Zur Gewichtung der Kriterien wurde eine Umfrage in Industrieunternehmen und in Forschungsabteilungen durchgeführt und deren Ergebnisse in das Bewertungsverfahren eingearbeitet. In der Validierung zeigte sich jedoch auch, dass es innerhalb der Montage Prozessschritte (z.B.: Sichtprüfungen) gibt, welche nicht mithilfe des entwickelten Bewertungsverfahrens bewertbar sind. In diesen Fällen sind Abschätzungen oder Erprobungen durch Versuche nötig. Um den Nutzen einer Automatisierung quantifizieren zu können, wurde eine Methode entwickelt, die es ermöglicht, anhand von MTM-2-Prozessdaten das zeitliche Optimierungspotenzial jedes Teilprozessschrittes aufzuzeigen. Auf diese Weise kann objektiv quantifiziert werden, welcher zeitliche Nutzen

durch die Steigerung des Automatisierungsgrades oder der gestaltungstechnischen Anpassung des Arbeitsplatzes erzielt werden kann.

Wie können die geeigneten Prozessschritte, in denen der Mitarbeiter eine technische Unterstützung erhalten soll, identifiziert werden?

Um geeignete Prozessschritte für eine Automatisierung zu identifizieren, erfolgt in der entwickelten Methodik ein tabellarischer sowie grafischer Abgleich der aus den Bewertungsmethoden gewonnenen Erkenntnissen. So wird die technische Realisierbarkeit in Form der Automatisierbarkeitsbewertung, dem Nutzen gegenübergestellt, der durch das vorliegende Optimierungspotenzial repräsentiert wird. Dieser Abgleich erfolgt auf Teilprozessebene in den Bewegungsfolgen Aufnehmen und Platzieren, wodurch Potenziale auch innerhalb eines Prozessschrittes identifiziert und gehoben werden können. Dadurch erfolgt die Aufgabenallokation zwischen Mensch und Technik auf Basis der Automatisierbarkeit und des zeitlichen Optimierungspotenziales.

Welche Aspekte der Arbeitsplatzgestaltung müssen für einen ganzheitlichen Planungsansatz berücksichtigt werden?

Ein ganzheitlicher Ansatz zur Planung hybrider Montagesysteme umfasst eine fundierte Ausgangsanalyse, eine anschließende Bewertung des Arbeitsplatzes sowie die Gestaltung des neuen Arbeitsplatzes. Diese Vorgehensweise wurde im *Kapitel 4* umgesetzt, in dem die vorhandenen Ansätze zur Gestaltung hybrider Arbeitsplätze aufgearbeitet (siehe *Kapitel 3*) und in die Methodik dieser Arbeit integriert wurden.

Neben der adäquaten Zuteilung der Prozessschritte zwischen Mensch und Technik stellt die Entwicklung eines geeigneten Sicherheitskonzeptes einen der wichtigsten Bestandteile der Gesamtmethodik dar, der in der Planung jedoch häufig vernachlässigt wird. Zudem sollte ein geeignetes Mensch-Technik-Interaktionskonzept Bestandteil der Methodik sein. Um einen ganzheitlichen Ansatz zu verfolgen, sollten zudem wirtschaftliche sowie ergonomische Gesichtspunkte in der Planung berücksichtigt werden. Da die technischen Aspekte der hybriden Arbeitsplatzgestaltung im Fokus dieser Arbeit stehen, wurden die beiden letztgenannten Aspekte nicht behandelt.

Wie kann die entwickelte Methodik niederschwellig und benutzerfreundlich Anwendern zur Verfügung gestellt werden?

Um eine niederschwellige und benutzerfreundliche Anwendung der Methodik zu ermöglichen, wurde diese in einer PowerApp abgebildet. Diese dient einerseits als digitales Nachschlagewerk und ermöglicht es dem Anwender zudem, softwaregestützt den Arbeitsplatz hinsichtlich einer möglichen Hybridisierung zu bewerten und die gewonnenen Erkenntnisse datenbankbasiert zu dokumentieren.

8.3 Ausblick

Die entwickelte Methodik ermöglicht es dem Anwender, Potenziale der zeitlichen Optimierung zu identifizieren und technische Realisierbarkeiten zu bewerten, um darauf basierend Prozessschritte zuzuweisen. Zukünftige Forschungen könnten die Integration von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen mittels mathematischer Modelle vorantreiben, um einen Dreiklang zwischen zeitlichem Nutzen, technischer Realisierbarkeit und Wirtschaftlichkeit herzustellen. Des Weiteren könnten diese Modelle automatisiert die optimale Zuteilung der Prozessschritte für den Nutzer ermitteln.

Im Bereich der Arbeitsplatzgestaltung könnten Methoden zur ergonomischen Ausgestaltung des Arbeitsplatzes sowie zur Bedarfsermittlung für die Mensch-Technik-Interaktion in die Gesamtmethodik eingebunden werden. Durch Erweiterungen des Methodenbaukastens ließe sich der Anwender noch effizienter und umfassender bei seiner anspruchsvollen Arbeit, der Konzipierung von hybriden Arbeitsplätzen, unterstützen.

Literaturverzeichnis

2006/42/EG:2006-05-17, 2006. *Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Maschinenrichtlinie)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Ammer, E.-D., 1985. *Rechnerunterstützte Planung von Montageablaufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung*, Berlin, Heidelberg: Springer.

ArbSchG - Arbeitsschutzgesetz, 1996. *Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit*. Bonn: Bundesamt für Justiz.

Bach, T., 2021. *Global Collaborative Robot (Cobot) Market. Analysis and Forecast 2018-2023*, Odense: Universal Robots.

Bäßler, R., 1988. *Integration der montagegerechten Produktgestaltung in den Konstruktionsprozess*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Bauer, W. et al., 2016. *Leichtbauroboter in der manuellen Montage - einfach einfach anfangen*, Stuttgart: Fraunhofer Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation IAO.

Becker, H., 2006. *Phänomen Toyota: Erfolgsfaktor Ethik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Bernstein, H., 2016. *Sicherheits- und Antriebstechnik - Umweltgerechte Konstruktion und Normung der Maschinensicherheit*. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Beumelburg, K., 2005. *Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation*, Heimsheim: Joset Jetter Verlag.

BG RCI, 2020. *Informationsschrift Erstellen von Risikobeurteilungen für Maschinen*. Langenhagen: Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie.

Bill, M., Müller, C., Kraus, W. & Bieller, S., 2022. *IFR International Federation of Robotics - Presentation World Robotics 2022*. [Online]

Available at: https://ifr.org/downloads/press2018/2022_WR_extended_version.pdf
[Zugriff am 6. Juli 2023].

- BIS Research, 2018. *Global Collaborative Robot (Cobot) Market - Analysis and Forecast, 2018-2023: Focus on Industry and Application*. Fremont: BIS Research Inc.
- Bitkom Research, 2022. *Bitkom-Studie zum Arbeitsmarkt für IT-Fachkräfte: Anzahl zu besetzender IT-Stellen in der Gesamtwirtschaft*, Berlin: Bitkom e. V.
- Bittner, C., Bode, H. & Christ, A., 2017. *Das Sicherheitskompendium - Pilz*. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage Hrsg. Ostfildern: Pilz GmbH & Co. KG.
- Bohn, M. & Hetsch, K., 2013. *Toleranzmanagement im Automobilbau*. München: Carl Hanser Verlag.
- Bohn, M. & Hetsch, K., 2020. *Funktionsorientiertes Toleranzdesign - Angewandte Form- und Lagetolerierung im Maschinen-, Fahrzeug- und Gerätebau*. München: Carl Hanser Verlag.
- Bokranz, R. & Landau, K., 2006. *Produktionsmanagement von Arbeitssystemen: MTM Handbuch*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Bokranz, R. & Landau, K., 2012. *Handbuch Industrial Engineering: Produktionsmanagement mit MTM*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.
- Bornewasser, M. & Hinrichsen, S., 2020. *Informatorische Assistenzsysteme in der variantenreichen Montage: Theorie und Praxis*. Berlin: Springer Vieweg.
- Britzke, B., 2010. *MTM in einer globalisierten Wirtschaft - Arbeitsprozesse systematisch gestalten und optimieren*. München: mi-Wirtschaftsbuch, FinanzBuch Verlag GmbH.
- Buchholz, M. & Souren, R., 2008. *Variantenvielfalt: definitorische Überlegungen zu einem zentralen Beriff des Variantenmanagements*. Ilmenau: proWiWi Ilmenauer Schriften zur Betriebswirtschaftslehre.
- Bullinger, H.-J. et al., 1986. *Systematische Montageplanung - Handbuch für die Praxis*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Buxbaum, H.-J. & Kleutges, M., 2020. Evolution oder Revolution? Die Mensch-Roboter-Kollaboration. In: H. Buxbaum, Hrsg. *Mensch-Roboter-Kollaboration*. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH, pp. 15-33.
- Deuse, J. & Busch, F., 2012. Zeitwirtschaft in der Montage. In: B. Lotter & H. Wiendahl, Hrsg. *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- Deuschländer, A., 1989. *Integrierte rechnergestützte Montageplanung*, Münschen, Wien: Carl Hanser Verlag.
- DIN 199-1:2002-03, 2002-03. *CAD-Modell, Zeichnungen und Stücklisten - Teil 1: Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 7186-11974-08, 1974. *Statistische Tolerierung - Begriffe, Anwendungsrichtlinien und Zeichnungsangaben*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN 8593-0:2003-09, 2003-09. *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 10218-1:2021-09, 2021. *Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 12100:2011-03, 2011. *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN EN ISO 13849-1:2016-06, 2016. *Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- DIN ISO/TS 15066:2017-04, 2017. *Roboter und Robotergeräte - Kollaborierende Roboter*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Doheny, R. & Matchett, C., 2022. *Magic Quadrant for IT Service Management Platforms*, Stamford: Gartner, Inc.
- Eisenführ, F. & Weber, M., 2010. *Rationales Entscheiden*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Elkmann, N., 2013. Sichere Mensch-Roboter-Kooperation: Normenlage, Forschungsfelder und neue Technologien. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 67, pp. 143-149.
- EN 12417:2001, 2001. *Sicherheit von Werkzeugmaschinen - Bearbeitungszentren*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- EN ISO 10218-1:2011, 2011. *Roboter für Industrieumgebung - Sicherheit - Teil 1: Roboter*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- EN ISO 10218-2:2011, 2011. *Roboter für Industrieumgebung - Sicherheit - Teil 2: Industrierobotersystem und Integration*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

EN ISO 13850: 2015, 2015. *Sicherheit von Maschinen – Not-Halt – Gestaltungsleitsätze*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

EN ISO 13854:2019, 2019. *Sicherheit von Maschinen – Mindestabstände zur Vermeidung des Quetschens von Körperteilen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

EN ISO 14120:2015, 2015. *Sicherheit von Maschinen - Trennende Schutzeinrichtungen - Allgemeine Anforderungen an Gestaltung, Bau und Auswahl von feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Ermer, A.-K., Seckelmann, T. & Barthelmey, A., 2019. A Quick-Check to Evaluate Assembly Systems HRI Potential. In: *Tagungsband des 4. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*. Berlin: Springer Vieweg, pp. 128-137.

Eversheim, W., 1981. *Organisation in der Produktionstechnik: Band 4. Fertigung und Montage*. Düsseldorf: VDI-Verlag.

Eversheim, W., 1987. *Strategien zur Rationalisierung der Montage - Einzel- und Kleinserienproduktion komplexer Produkte*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

FANUC Deutschland GmbH, kein Datum www.fanuc.eu. [Online] [Zugriff am 28. Mai 2021].

Fechter, M., 2022. *Entwicklung einer automatisierten Methode zur Grobplanung hybrider Montagearbeitsplätze*, Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Feldhusen, J. & Grote, K.-H., 2013. *Konstruktionslehre - Methoden und Anwendungen erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Ficuciello, F., Ruggiero, F. & Finzi, A., 2017. *Human Friendly Robotics: Springer Proceedings in Advanced Robotics 7*. Cham: Springer International Publishing.

Forrester Research, 2022. *The Total Economic Impact Of Microsoft Power Platform Premium Capabilities*, Cambridge: Forrester Research, Inc.

Fritz, A. H. & Schulze, G., 2018. *Fertigungstechnik 12. Auflage*. Berlin: Springer Vieweg.

Gairola, A., 1981. *Montagegerechtes Konstruieren: Ein Beitrag zur Konstruktionsmethodik*, Darmstadt: Diss. TH Darmstadt.

Gehlen, P., 2023. *Sicherheitsfibel zur Maschinensicherheit - Funktionale Sicherheit und Sicherheitsfunktionen Erläuterungen zu DIN EN IEC 62061 (VDE 0113-50), DIN EN ISO 13849-1 und DIN EN ISO 12100*. Berlin: VDE Verlag.

- Geiger, W. & Kotte, W., 2008. *Handbuch Qualität - Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme - Perspektiven*. Wiesbaden: Vieweg Verlag.
- Glogowski, P. et al., 2017. Task-based Simulation Tool for Human-Robot Collaboration within Assembly Systems. *Tagungsband des 2. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*.
- Glück, M., 2022. *Mensch-Roboter-Kooperation erfolgreich einführen: Grundlagen, Leitfaden, Applikationen*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Gradmann, M. et al., 2019. Mensch-Roboter-Interaktion. In: R. Müller, et al. Hrsg. *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. München: Carl Hanser Verlag, pp. 169-276.
- Hauptmanns, U., Knetsch, T. & Marx, M., 2004. *Gefährdungsbäume zur Analyse von Unfällen und Gefährdungen*, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft GmbH.
- Heinz, K. & Mesenhöller, E., 2001. Zeitdaten zur Gestaltung der Montage. In: K. Landau & H. Luczak, Hrsg. *Ergonomie und Organisation in der Montage*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Helmold, M., 2022. Performance Management to Focus on Value-Added Activities. In: M. Helmold, Hrsg. *Strategic Performance Management - Achieving Long-term Competitive Advantage through Performance Excellence*. Cham: Springer International Publishing.
- Hesse, S., 2011. *Greifertechnik - Effektoren für Roboter und Automaten*. München: Carl Hanser Verlag.
- Hesse, S., 2012. Montagegerechte Produktgestaltung. In: B. Lotter & H. Wiendahl, Hrsg. *Montage in der Industriellen Produktion: Ein Buch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Vieweg.
- Heyn, M., 1999. *Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen*, Aachen: Shaker Verlag GmbH.
- Hübner, M. et al., 2023. Konzeptionierung eines Methodenbaukastens zur Automatisierungsempfehlung auf Grundlage einer potentialbasierten Montageprozessbewertung. *Automation 2023: 24. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik*, pp. 1047-1060.

- Hübner, M. et al., 2023. Conception of a flexible modular method for automation recommendation on the basis of a potential-based assembly process evaluation. *MHI Montage Handhabung Industrierobotik - Fachkolloquium Chemnitz*.
- IFR International Federation of Robotics, 2021. *www.ifr.org*. [Online]
Available at: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>
[Zugriff am 6. Juli 2023].
- IOZ AG, 2021. *www.ioz.ch*. [Online]
Available at: <https://www.ioz.ch/blog/weshalb-man-sich-die-microsoft-power-platform-genauer-anschauen-sollte/>
[Zugriff am 10. Juni 2023].
- Jodlbauer, H., 2018. *Diagitale Transformation der Wertschöpfung*. Stuttgart: W. Kohlhammer GmbH.
- Jungkind, W., Könneker, M., Pläster, I. & Reuber, M., 2019. *Handbuch der Prozessoptimierung - Die richtigen Werkzeuge auswählen und zielsicher einsetzen*. Darmstadt: Carl Hanser Verlag.
- Kahanwal, B., 2013. Abstraction Level Taxonomy of Programming Language Frameworks. *IJPLA - International Journal of Programming Languages and Applications*.
- Kirchner, E., 2020. *Werkzeuge und Methoden der Produktentwicklung: Von der Idee zum erfolgreichen Produkt*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- Klößner, M. et al., 2015. Entwicklung eines Werkzeuges zur anwendungsfallorientierten Auswahl servicerobotischer Systeme. *Fachtagung Mechatronik, Aachen: Inst. für Getriebetechnik und Maschinendynamik*, pp. 1-6.
- Kluy, L. et al., 2022. Mensch-Roboter-Kollaboration in KMU - Potenziale identifizieren, analysieren und realisieren. In: V. Nitsch, Hrsg. *Digitalisierung der Arbeitswelt im Mittelstand I*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, pp. 55-97.
- Konold, P. & Reger, H., 2003. *Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung*. Wiesbaden: Vieweg Praxiswissen Vieweg+Teubner Verlag.
- Krüger, J., Lien, T. & Verl, A., 2009. Cooperation of human and machines in assembly lines. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, pp. 628-646.

KUKA AG, 2023. *kuka.com*. [Online]

Available at: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter>

[Zugriff am 12. Juli 2023].

Landau, K., 2007. *Lexikon Arbeitsgestaltung: Best Practice im Arbeitsprozess*. Wiesbaden: Universum-Verlag.

Landau, K., Luczak, H. & Pornschlegel, H., 2001. *Ergonomie und Organisation in der Montage*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.

Landau, K. et al., 2001. Die Arbeit im Montagebetrieb. In: K. Landau & H. Luczak, Hrsg. *Ergonomie und Organisation in der Montage*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, pp. 1-138.

Laufenberg, L., 1996. *Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des Simultaneous Engineering*, Aachen: Shaker Verlag GmbH.

Lotter, B., 1986. *Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

Lotter, B., 2012. Die Primär-Sekundär-Analyse. In: B. Lotter & H. Wiendahl, Hrsg. *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 49-78.

Lotter, B., 2012. Manuelle Montage von Kleingeräten. In: B. Lotter & H. Wiendahl, Hrsg. *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 109-146.

Lotter, B. & Schilling, W., 1994. *Manuelle Montage: Planung - Rationalisierung - Wirtschaftlichkeit*. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH.

Lotter, B. & Wiendahl, H.-P., 2012. *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Lotter, E., 2012. Hybride Montagesysteme. In: B. Lotter & H. Wiendahl, Hrsg. *Montage in der industriellen Produktion - Ein Handbuch für die Praxis*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 167-193.

Luczak, H., 1993. *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- Mannewitz, F., 2005. *Baugruppenfunktions- und prozessorientierte Toleranzaufweitung*. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG.
- Mareczek, J., 2020. *Grundlagen der Roboter-Manipulatoren - Band 1. Modellbildung von Kinematik und Dynamik*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- März, L. & von Langsdorf, P., 2001. Flexibilität und Marktorientierung in der Montage. In: E. Westkämper, H. Bullinger, P. Horvath & E. Zahn, Hrsg. *Montageplanung - effizient und marktgerecht*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, pp. 3-10.
- Maynard, H., Stegemerten, G. & Schwab, J., 1948. *Methodes-Time Measurement*. New York, Toronto, London: Mc Graw - Hill Book Company, INC..
- Mende, L. M., 2020. *Merkmalentstehungs- und -wechselwirkungsanalyse (MEWA) für das prozessorientierte Toleranzmanagement in der Montage*, Saarbrücken: Diss., Universität des Saarlandes.
- Mössner, T., 2012. *Risikobeurteilung im Maschinenbau - Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin*, Dortmund, Dresden: Bonifatius GmbH.
- Muck, S., 2023. *Verzeichnis der harmonisierten Normen mit Vermutungswirkung für Maschinen*. [Online]
Available at: www.maschinen-sicherheit.info
[Zugriff am 4. April 2024].
- Müller, R., 2021. Montagegerecht. In: B. Bender & K. Gericke, Hrsg. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, pp. 725-754.
- Müller, R., Esser, M. & Janßen, C., 2009. Umfassendes Toleranzmanagement - Eine Notwendigkeit für wirtschaftliche Montageprozesse. *wt Werkstattstechnik online* 99 H.9, pp. 632-636.
- Müller, R. et al., 2012. *Tolerance Management for Assembly – Not a Matter of Product Size*. Chamomix, Springer, pp. 97-104.
- Müller, R. et al., 2019. *Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration*. München: Carl Hanser Verlag.
- Müller, R., Vette, M. & Mailahn, O., 2016. Process-oriented task assignment for assembly processes with human-robot interaction. *CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems*, pp. 210-215.

- Müller, R. et al., 2013. Wandlungsfähiges Montagesystem für Großbauteile am Beispiel der Flugzeugstrukturmontage. *Zukunftsfähige Montagesysteme: wirtschaftlich, wandlungsfähig und rekonfigurierbar*, pp. 251-259.
- Nohl, J., 1988. Entwurf eines Verfahrens für die Durchführung von Sicherheitsanalysen. *Moderne Unfallverhütung*, Band 32.
- Nollau, H.-G. & Bucher, M., 2004. *Geschäftsprozessoptimierung im Mittelstand*. Lohmar, Köln: Eul.
- Ranz, F. et al., 2018. A Morphology of Human Robot Collaboration Systems for Industrial Assembly. *51st CIRP Conference on Manufacturing Systems*, pp. 99-104.
- REFA, Autorenteam, 2013. *REFA Kompakt-Grundausbildung 2.0*. Darmstadt: REFA Bundesverband e.V. - Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung.
- REFA, 1987. *Methodenlehre der Betriebsorganisation: Planung und Gestaltung komplexer Produktionssysteme*. München: Carl Hanser Verlag.
- REFA, 1991. *Methodenlehre der Betriebsorganisation: Arbeitsgestaltung in der Produktion*. 1. Hrsg. München: Hanser.
- REFA, V. f. A. B. u. U. e. V., 1997. *Datenermittlung, Methodenlehre der Betriebsorganisation*. München: Carl Hanser Verlag.
- Reinhart, G. & Zühlke, D., 2017. Von CIM zu Industrie 4.0. In: G. Reinhart, Hrsg. *Handbuch Industrie 4.0 - Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Carl Hanser Verlag.
- Reudenbach, R. & Kälble, B., 2016. *Sichere Maschinen in Europa - Teil 3 - Risikobeurteilung und Sicherheitskonzept*. Bochum: DC Verlag.
- Riedl, R., 2005. Der Analytic Hierarchy Process. Ein geeignetes Verfahren für komplexe Entscheidungen in der Wirtschaftsinformatik?. *HMD Prax. Wirtsch.*, pp. 104-114.
- Ross, P., 2002. *Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung*, München: Herbert Utz Verlag GmbH.
- Saaty, T., 1980. *The analytic hierarchy process. Planning priority setting, resource allocation*, New York: McGrawHill.

- Saaty, T., 1994. *Fundamentals of decision making and priority theory with the analytic hierarchy process*, Pittsburg: RWS Publications.
- Sahay, A., Indamutsa, A., Di Ruscio, D. & Pierantonio, . A., 2020. Supporting the understanding and comparison of low-code development platforms. *46th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA)*, pp. 171-178.
- Salunkhe, O. et al., 2023. Bridging the Hype Cycle of Collaborative Robot Applications. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 14 9, pp. 678-690.
- Schlick, C., Bruder, R. & Luczak, H., 2018. 6. Ergonomische Gestaltung. In: C. Schlick, R. Bruder & H. Luczak, Hrsg. *Arbeitswissenschaft*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, pp. 551-601.
- Schmauder, M. & Spanner-Ulmer, B., 2014. *Ergonomie: Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. Darmstadt: Carl Hanser Verlag.
- Schmidt, M., 2022. *Praxisleitfaden Montageplanung - Grundlagen und Methoden der effizienten Gestaltung von Montagearbeitsplätzen*. München: Carl Hanser Verlag.
- Schroll, S., 2021. *Kompaktwissen Betriebs-, Fertigungs- und Montagetechnik*. s.l.:Herne : Kiehl.
- Schröter, D., 2018. *Entwicklung einer Methodik zur Planung von Arbeitssystemen in Mensch-Roboter-Kooperationen*, Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- SCHUNK SE & Co. KG, 2023. *schunk.com*. [Online]
Available at: https://schunk.com/de/de/greiftechnik/c/PUB_8293
[Zugriff am 12. Juli 2023].
- Spur, G. & Stöferle, T., 1986. *Handbuch der Fertigungstechnik Band 6: Fabrikbetrieb*. München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Statistisches Bundesamt, 2022. *Unternehmen haben zunehmend Schwierigkeiten bei der Besetzung von IT-Stellen*, Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- Stern, T. & Jaberg, H., 2010. Der Faktor Mensch im Innovationsprozess – Soft Skills für die richtige Einstellung und die Innovationsbereitschaft. In: *Erfolgreiches Innovationsmanagement: Erfolgsfaktoren - Grundmuster - Fallbeispiele*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, pp. 23-107.

Takata, S. & Hirano, T., 2011. Human and robot allocation method for hybrid assembly systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 60, pp. 9-12.

techconsult GmbH, smapOne AG, 2021. *Low-Code-/No-Code-Development - Enabler der digitalen Transformation*, Kassel: techconsult GmbH.

Thomas, C., 2017. *Entwicklung einer Bewertungssystematik für die Mensch-Roboter-Kollaboration*, Aachen: Shaker Verlag.

Thornton, A. C., 2003. *Variation Risk Management - Focusing Quality Improvements in Product Development and Production*. Hoboken: John Wiley & Sons Inc.

VDI 2815, 1978. *VDI 2815 Blatt1:1978-05*. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure.

VDI 2860:1990-05, 1990. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

VDI 5200 Blatt 1:2011-02, 2011. *Fabrikplanung - Planungsvorgehen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

Warnecke, H.-J., 1996. Flexible Montagetechnik - Technik, Organisation, Betriebswirtschaft. In: H. Warnecke, Hrsg. *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Waszkowski, R., 2019. Low-code platform for automating business processes in manufacturing. *IFAC International Federation of Automatic Control*, pp. 376-381 .

Weber, W. & Koch, H., 2022. *Industrieroboter - Methoden der Steuerung und Regelung*. München: Carl Hanser Verlag.

Weck, M. & Brecher, C., 2006. *Werkzeugmaschinen 4 - Automatisierung von Maschinen und Anlagen*. Berlin: Springer Vieweg.

Weule, H., 1992. Mensch-Maschine-Kommunikation. In: *Nahtstellen in der Fabrik*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, pp. 1-19.

Zangemeister, C., 1976. *Nutzwertanalyse in der Systemtechnik: Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen*, München: Wittemann.

ZF Friedrichshafen, A., 2023. *Antriebskomponenten - eVorX*. [Online]

Available at: https://www.zf.com/products/de/cv/products_64099.html

[Zugriff am 22. November 2023].

ZF Friedrichshafen, A., 2023. *Antriebskomponenten - Kupplungssysteme*. [Online]
Available at: https://www.zf.com/products/de/trucks/products_29059.html
[Zugriff am 6. Juli 2023].

A. Anhang

A.1 Zusätzliche Darstellungen

- MEB Druckplattenmontage Teil 1/2
- MEB Druckplattenmontage Teil 2/2
- Ishikawa-Diagramm Druckplattenmontage
- Ishikawa-Diagramm Vormontage eWorX
- Entscheidungsbaum technische Schutzmaßnahme Teil 1/2
- Entscheidungsbaum technische Schutzmaßnahme Teil 2/2
- Kriterien zur Bestimmung von Technologien zum Informationsaustausch

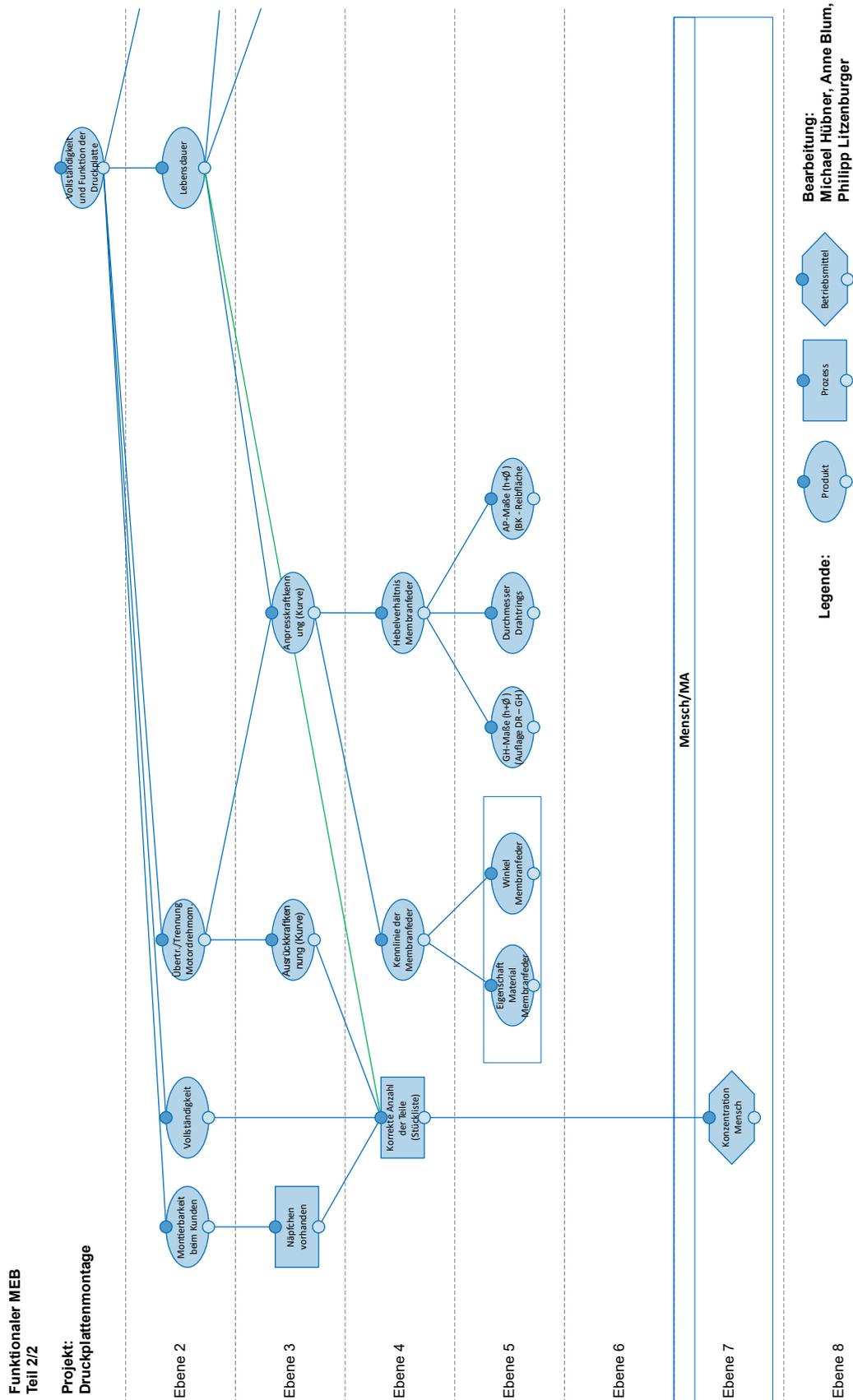


Abbildung 0-2: MEB Druckplattenmontage Teil 2/2

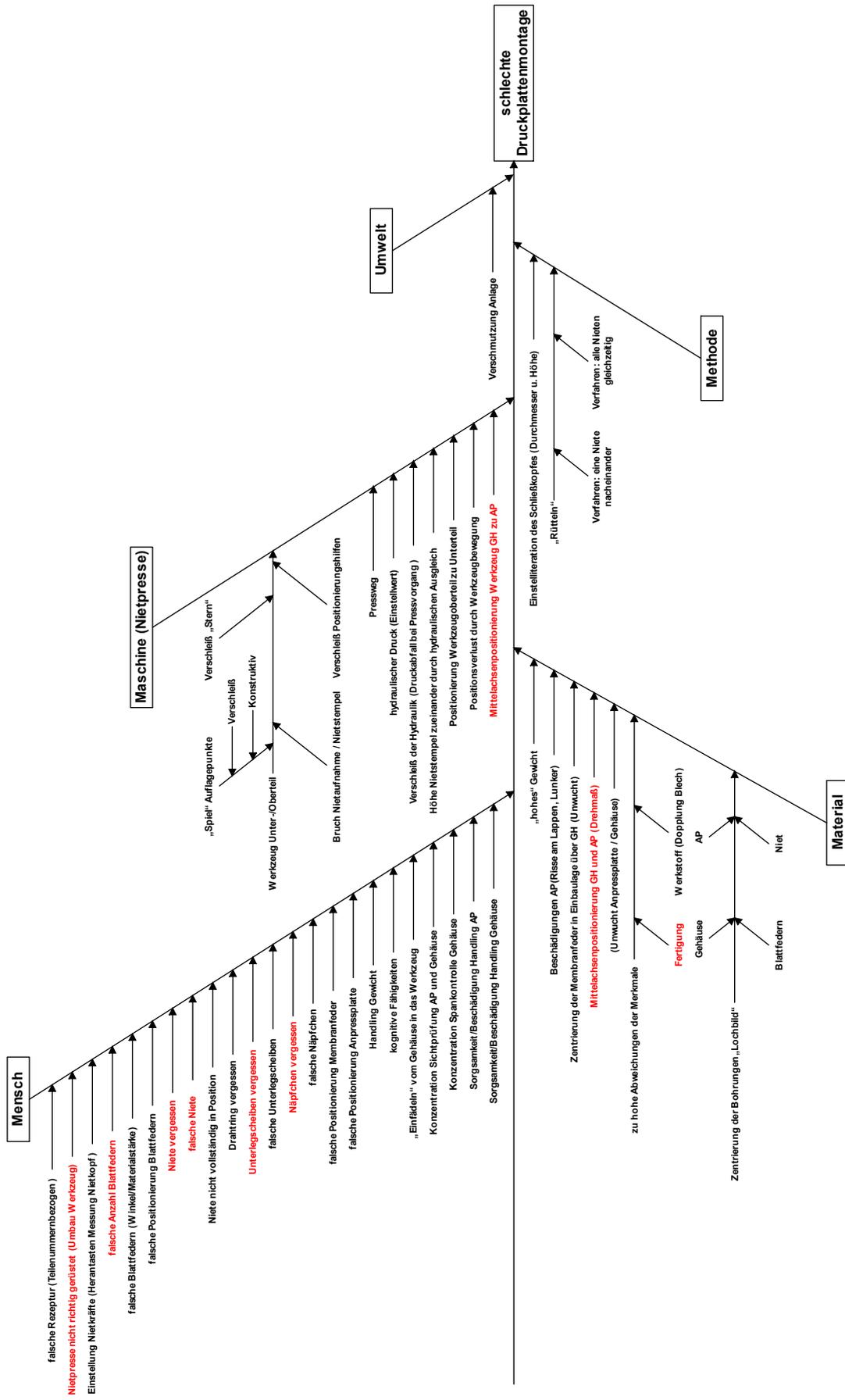


Abbildung 0-3: Ishikawa-Diagramm Druckplattenmontage

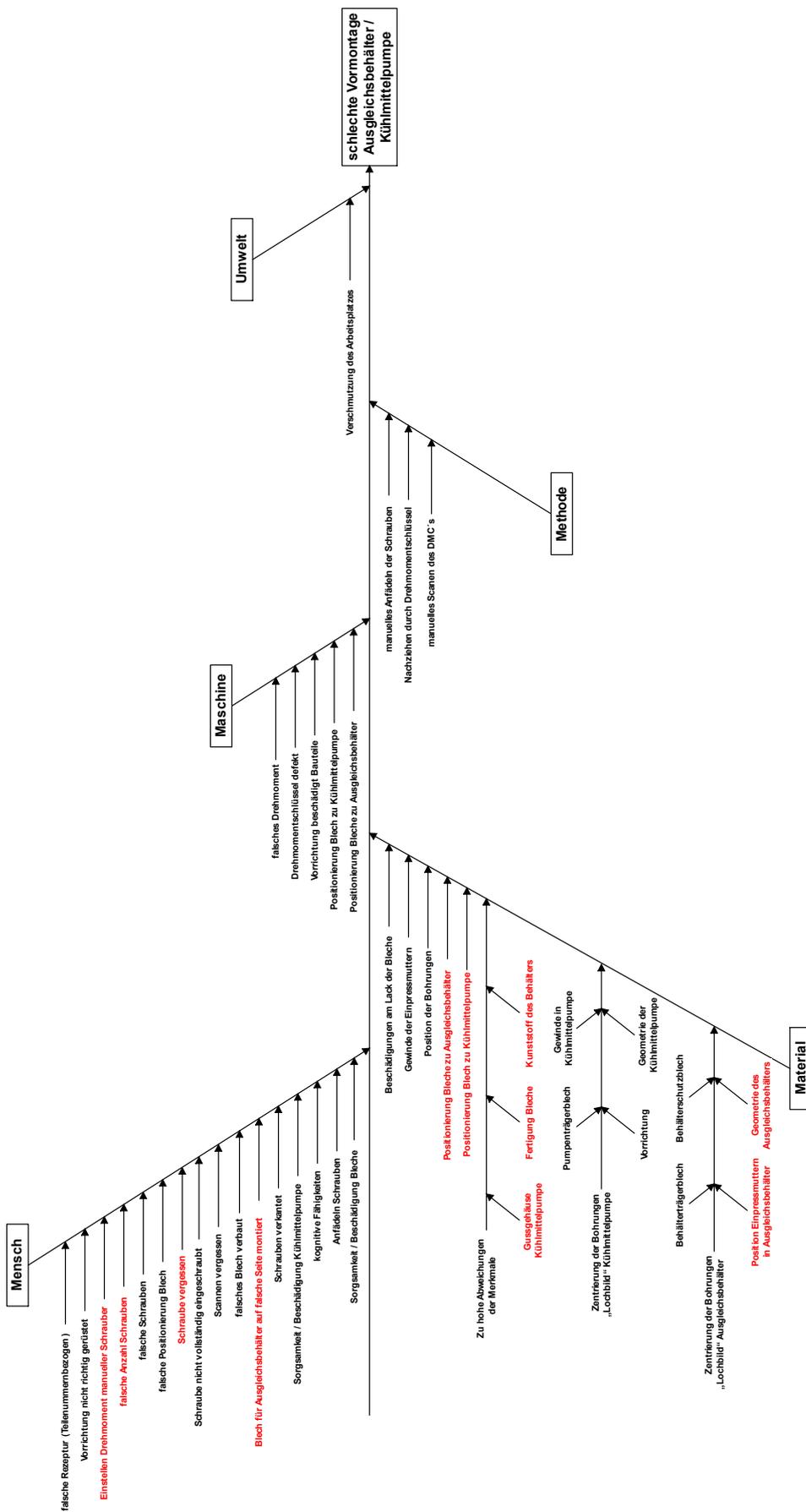


Abbildung 0-4: Ishikawa-Diagramm Vormontage eWorX

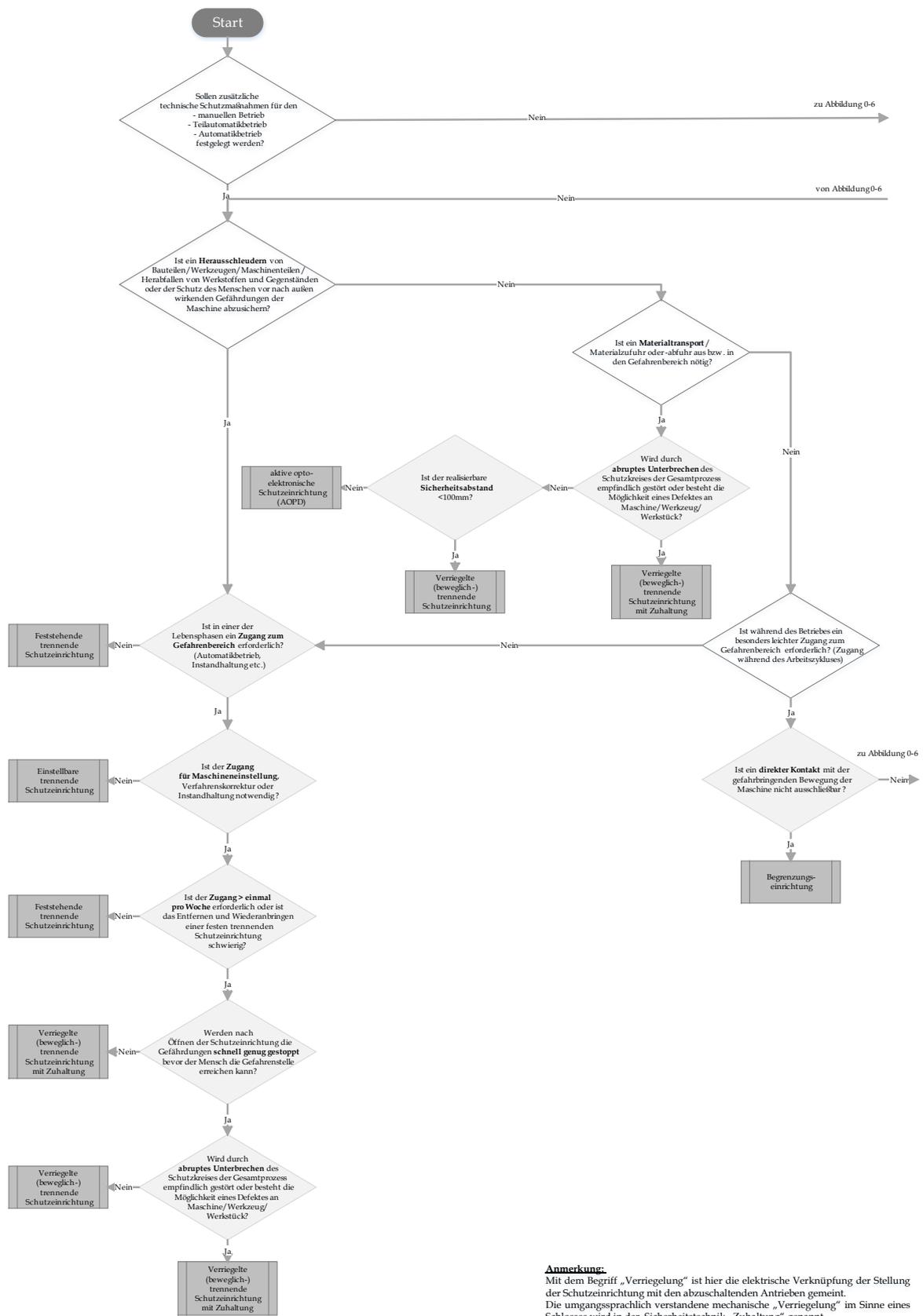
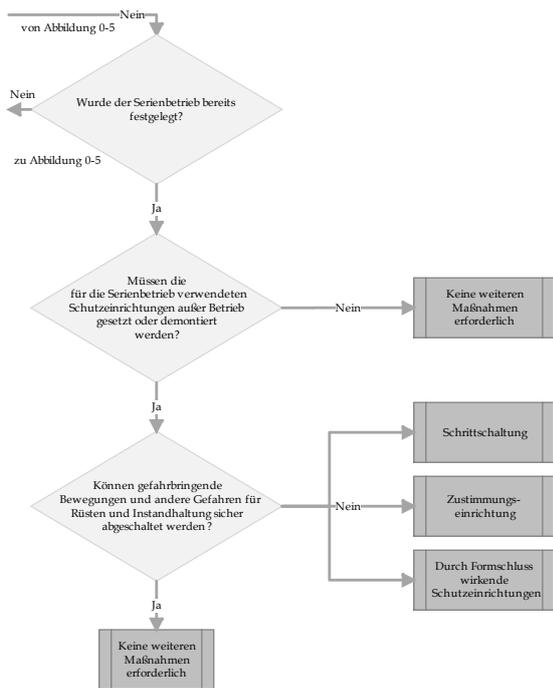


Abbildung 0-5: Entscheidungsbaum technische Schutzmaßnahme Teil 1/2



Anmerkung:

- **Zugangsabsicherung:** Der reine Zugang zu einem Gefahrenbereich / zu einer Zelle / zu einem Arbeitsraum wird abgesichert. Die Anwesenheit eines Menschen in dem beschriebenen Raum wird nicht überwacht. Zur Wiederbetriebnahme der Maschine ist ein Quittieren außerhalb des Gefahrenbereichs notwendig.
- **Zugriffsabsicherung:** Das Eingreifen / Hineinlangen in einen Gefahrenbereich / in eine Zelle / in einen Arbeitsraum wird abgesichert. Ausführungen mit Steuerfunktion sind möglich (z.B. für automatischen Wiederanlauf)
- **Arbeitsraumüberwachung / Hintertretschutz:** Überwachung eines Gefahrenbereichs / einer Zelle / eines Arbeitsraums auf die Anwesenheit eines Menschen. Ein Wiederanlauf der Maschine / Gefahrenbewegung ist nicht durch quittieren möglich.
- **AOPD:** Die aktive optoelektronische Schutzvorrichtung ist eine berührungslos wirkende Schutzvorrichtung bei der optische Strahlen auf ein Empfangselement gesendet werden. Diese detektieren eine Unterbrechung des Strahlengangs (z.B.: Ein-/Mehrstrahl-Sicherheitslichtschranken, Sicherheitslichtvorhang)
- **SPE:** Ist eine sensitive Ausrüstung, die zum Nachweis von Personen oder Körperteilen ein Signal an das Steuersystem übermittelt. Das Signal kann z.B. zur Annäherungsmeldung oder der Anwesenheitsmeldung verwendet werden.

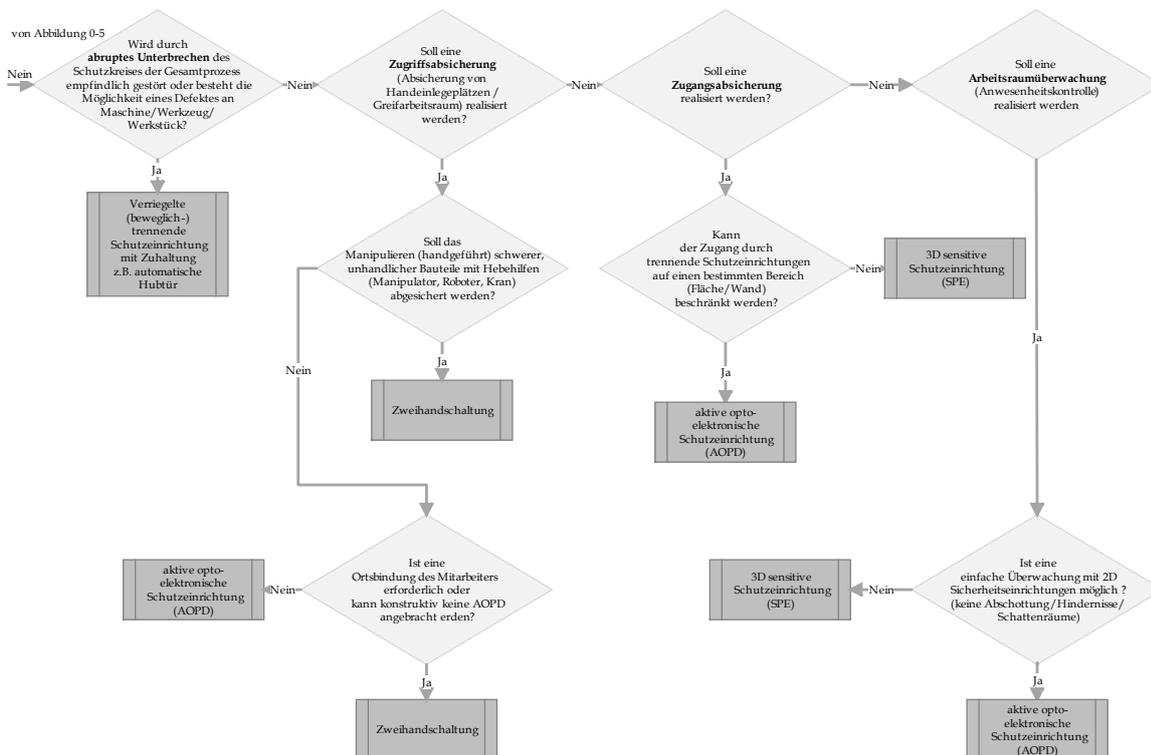


Abbildung 0-6: Entscheidungsbaum technische Schutzmaßnahme Teil 2/2

allgemeine Anforderungen an Informationseingabe- und Informationsausgabetechnologien			
Umgebungsbedingungen	Erfordert der Arbeitsplatz erhöhte Aufmerksamkeit für die Gefährdungswahrnehmung im Umfeld?	Kommunikationsfähigkeit am Arbeitsplatz notwendig?	
Lärm	Ja	Ja	
Störlicht	Nein	Nein	
Schmierstoffe / Öle			
starke Verunreinigungen			
Erschütterungen/Vibrationen			
spezifische Anforderungen an Informationsausgabetechnologien			
Informationsklasse	Informationsmenge	räumliche Verteilung	Ort / Position der Informationsdarstellung
Alarm	gering (instinktiv erfassbar)	stationär	am Bauteil / auf der Arbeitsfläche
Warnung / Status	mittel (Ein bis zwei Blick)	limitiert mobil (z.B.: kabelgebunden)	am Arbeitsplatz allgemein
Hilfe/Hinweis/allgem. Informationen	viel (mehrmaliges oder langes Hinschauen)	mobil	
spezifische Anforderungen an Informationseingabetechnologien			
Informationsart	Informationsmenge	räumliche Verteilung	Zugänglichkeit
Binär (Ja/Nein; IO/NIO; 0/1)	gering (instinktiv erfassbar)	stationär	immer / frei
numerische Daten	mittel (Ein bis zwei Blick)	limitiert mobil (z.B.: kabelgebunden)	eingeschränkt akzeptabel
textuelle Informationen	viel (mehrmaliges oder langes Hinschauen)	mobil	
Bild- und Videodaten			
Audiodaten			
Anwahl von Daten			
1D- /2D-Codes			
			Häufigkeit der Assistenznutzung
			mehr als 10x/Schicht
			weniger als 10x/Schicht

Abbildung 0-7: Kriterien zur Technologiebestimmung der Mensch-Technik-Interaktion

A.2 Veröffentlichungen

Michael Hübner, Fabian Adler, Benedikt Kelm, Anne Blum, Rainer Müller; Konzeptionierung eines Methodenbaukastens zur Automatisierungsempfehlung auf Grundlage einer potentialbasierten Montageprozessbewertung. VDI Kongress Baden Baden: AUTOMATION 2023: 24. Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik, pp. 1047-1060.

Michael Hübner, Benedikt Kelm, Fabian Adler, Anne Blum, Rainer Müller; Conception of a flexible modular method for automation recommendation on the basis of a potential-based assembly process evaluation. MHI Montage Handhabung Industrierobotik - Fachkolloquium Chemnitz.

Tobias Masiak, Michael Hübner; KI-basierte Detektion von Oberflächendefekten an Membranfedern - Der Weg von der klassischen Bildverarbeitung zur KI-gestützten Bildanalyse - Vorteile, Herausforderungen und Ausblick hinzu synthetischen Bilddaten. 16. Montage-Tagung - Montagetechnik und Montageorganisation, Saarbrücken 2024, pp. 99-112.

A.3 Betreute Abschlussarbeiten

Lucas Springer, Bachelor-Thesis: Entwicklung und Simulation einer automatisierten Roboterstation für die Konservierung von Führungshülsen, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, ZF Friedrichshafen AG, Röntgenstr. 2, 97424 Schweinfurt, 2022

Paul Zimmer, Bachelor-Thesis: Erarbeitung eines Systems zur Werkzeugverschleiß- und Brucherkennung mit Methoden moderner Sensorik und des maschinellen Lernens/KI, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, ZF Friedrichshafen AG, Röntgenstr. 2, 97424 Schweinfurt, 2023

Simon Schwengber, Bachelor-Thesis: Digitalisierung von Maschinen und Anlagen mittels 3D Scan, HFH Hamburger Fern-Hochschule, ZF Friedrichshafen AG, Röntgenstr. 2, 97424 Schweinfurt, 2023

Azucena Gomez, Bachelor-Thesis: design and robot simulation of a handling cell for clutch hubs, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, ZF Friedrichshafen AG, Röntgenstr. 2, 97424 Schweinfurt, 2023

Robin Griesemer, Praktikum dualer Student Robotik: diverse Unterstützung in der Versuchsdurchführung, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, ZF Friedrichshafen AG, Röntgenstr. 2, 97424 Schweinfurt, 2023

Pascal Hain, Bachelor-Thesis: Darstellung eines Methodikbaukastens zur hybriden Arbeitsplatzgestaltung mittels Microsoft Power Apps und Anwendung anhand eines

Produktes, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, ZF Friedrichshafen AG, Röntgenstr. 2, 97424 Schweinfurt, 2024

Maximilian Haas, Bachelor-Thesis: Konzeption und Implementierung eines MRK-Prüfsystems zur KI-Gestützten optischen Oberflächen- und Rauheitsprüfung, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, ZF Friedrichshafen AG, Röntgenstr. 2, 97424 Schweinfurt, 2024

Christoph Ott, Bachelor-Thesis: MRK-Prüfsystem zur KI-gestützten optischen Anomalie-Detektion von Anpressplatten basierend auf realen sowie synthetischen Daten, Technische Hochschule Würzburg-Schweinfurt, ZF Friedrichshafen AG, Röntgenstr. 2, 97424 Schweinfurt, 2024