

Jerome Trommnau

»Methodik zur Bewertung und Optimierung der Automatisierungseignung des Zusammenbaus von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen«

Jerome Trommnau

»Methodik zur Bewertung und Optimierung der Automatisierungseignung
des Zusammenbaus von Bauteilkombinationen mit forminstabilen
Einzelteilen«

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl^{1,2}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer^{1,3}

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai Peter Birke⁴

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Marco Huber^{1,2}

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Stuttgart

² Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart

³ Institut für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) der Universität Stuttgart

⁴ Institut für Photovoltaik (*ipv*) der Universität Stuttgart

Kontaktadresse:

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12
70569 Stuttgart
Telefon 0711 970-1100
info@ipa.fraunhofer.de
www.ipa.fraunhofer.de

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2022

D 93

2022

Druck und Weiterverarbeitung:

Fraunhofer Verlag Mediendienstleistungen, Stuttgart, Jahr des Drucks
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.



Dieses Werk steht, soweit nicht gesondert gekennzeichnet,
unter folgender Creative-Commons-Lizenz:
Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen
International 4.0 (CC BY-NC-ND 4.0).

Methodik zur Bewertung und Optimierung der Automatisierungseignung des Zusammenbaus von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen

Methodology to evaluate and optimize the assembly automation fitness of component combinations containing limp components

Von der Fakultät Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor- Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
M. Sc. Jerome Norman Trommnau
aus Ludwigsburg

Hauptberichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold

Tag der mündlichen Prüfung: 20.07.2022

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2022

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner dreijährigen Zeit als Doktorand im Bereich Leitungssatzentwicklung der Mercedes-Benz AG in Zusammenarbeit mit dem Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF) der Universität Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl, der mich sowohl methodisch als auch wissenschaftlich immer gewinnbringend gefördert hat. Für den Mitbericht sowie den wertvollen wissenschaftlichen Austausch möchte ich mich herzlichst bei Frau Professorin Dr.-Ing. Kristin Paetzold bedanken.

Auf Unternehmensseite gilt mein herausragender Dank Herrn Dr. Rainer König, Abteilungsleiter Entwicklung Leitungssatz und Technologie, Herrn Roland Winter, Teamleiter DMU und Tools, sowie Herrn Bernd Weiß. Bei ihnen bedanke ich mich sowohl für die stets tiefgreifenden fachlichen Diskussionen als auch insbesondere für die fortwährende Unterstützung meiner Arbeit.

Auf Institutsseite gilt mein herausragender Dank Herrn Andreas Frommknecht, der mich entlang des gesamten Prozesses äußerst tatkräftig unterstützt hat.

Namentlich möchte ich mich ebenfalls herzlich bei Herrn Prof. Onorific Jörg Siegert für die stets wertvollen wissenschaftlichen Hinweise bedanken.

Für den fachlichen Austausch sowie den tatkräftigen Beistand bei den Versuchsreihen danke ich insbesondere Herrn Cord Cordes, Frau Katharina Barbu, Herrn Alexander Neb, Herrn Dr.-Ing Johannes Wöbner sowie Herrn Peter Merkel.

Frau Valerie Kissel danke ich herzlich für die orthographische Durchsicht meiner Dissertation.

Mein größter Dank gilt aber meiner Frau Ramona für Ihre Liebe und ihre bedingungslose Unterstützung.

In aufrichtiger Dankbarkeit widme ich diese Arbeit meiner Frau und unserem Nachwuchs.

Jerome Trommnau

Kurzfassung

Die automatisierte Montage von Produkten scheitert meist aufgrund des nicht automatisierungsgerecht ausgelegten Produktdesigns. Insbesondere das Vorhandensein forminstabiler Komponenten stellt die Automatisierung von Montageprozessen vor besondere Herausforderungen. Verbreitete Methoden und Ansätze im Bereich des Design for Assembly (DFA) oder zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands exkludieren die Betrachtung forminstabiler Einzelteile oder streben eine Vermeidung derselben an. Spezifische Produkthanforderungen, wie am Beispiel des Automobilleitungssatzes festzustellen, bedingen jedoch den Einsatz forminstabiler Einzelteile. Resultierend daraus ergibt sich ein hoher Anteil manueller Montageschritte im Fertigungsprozess. Vor diesem Hintergrund wird in der vorliegenden Arbeit eine Methodik zur Bewertung und Optimierung der Automatisierungseignung des Zusammenbaus von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen entwickelt.

Die in der Arbeit beschriebene generische Methodik kombiniert und erweitert verbreitete DFA-Methoden, Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands sowie Ansätze zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile und ermöglicht ex ante die Bewertung und Optimierung der Automatisierungseignung von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen. Das Modell realisiert die Instanziierung montagerelevanter Einflussfaktoren anhand der zu betrachtenden Bauteilkombination. Die entwickelte Klassifizierungs- und Bewertungsmatrix ermöglicht die Zustandsbewertung sowie die einfache als auch systematische Identifikation von Optimierungsbedarfen. Der Anwender wird ferner bei der Optimierung durch implizite Handlungsempfehlungen als auch explizite Gestaltungsrichtlinien unterstützt. Die beschriebene Methode stellt eine zielgerichtete wie auch strukturierte Vorgehensweise zur Anwendung des Modells als auch der Hilfsmittel bereit. Die Validierung an einem praxisnahen Beispiel bestätigt die erfolgreiche und aufwandsarme Anwendbarkeit der Methodik. Final schließt die Arbeit mit der kritischen Reflexion der Ergebnisse.

Abstract

Methodology to evaluate and optimize the assembly automation fitness of component combinations containing limp components

Assembly automation usually fails due to unsuited product design for automation. In particular, the presence of limp components poses particular challenges for the automation of assembly processes. Widespread methods and approaches in the field of Design for Assembly (DFA) or the determination of the automation effort exclude the consideration of limp components or strive to avoid them. However, specific product requirements, as the example of the automotive wire harness illustrates, require the use of limp components. This results in a high proportion of manual assembly steps in the manufacturing process. Against this background, this paper develops a methodology to evaluate and optimize the assembly automation fitness of component combinations containing limp components.

The generic methodology combines and expands common DFA-methods, methods for determining the automation effort and approaches for classifying limp components and enables ex ante the evaluation and optimization of the automation suitability of component combinations with limp components. The model realizes the instantiation of assembly-relevant influencing factors based on the component combination. The developed classification and evaluation matrix enables the status assessment as well as the simple and systematic identification of optimization requirements. Implicit recommendations for action as well as explicit design rules support the user in the optimization process.

The described method provides a targeted and structured approach to the application of the model and the tools. The validation using a practical example confirms the successful and low-effort applicability of the methodology. Finally, the work concludes with a critical review of the results.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	13
Abbildungsverzeichnis	15
Tabellenverzeichnis	19
Symbolverzeichnis.....	23
1 Einleitung.....	25
1.1 Ausgangssituation.....	25
1.2 Problemstellung	27
1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen.....	30
1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung	31
1.5 Aufbau und Gliederung der Arbeit	37
2 Stand der Technik	41
2.1 Begriffe und Definitionen	41
2.2 Automobilleitungssätze	43
2.2.1 Grundfunktion und Komponenten	44
2.2.2 Varianz und Modularisierung	45
2.2.3 Entwicklung und Fertigung von Automobilleitungssätzen	47
2.2.4 Automatisierung in der Leitungssatzfertigung.....	54
2.3 Forschungsanalyse und angrenzende Forschungsgebiete	58
3 Automatisierungsgerechte Produktgestaltung – Grundlagen	65
3.1 Methoden zur montagegerechten Produktgestaltung	66
3.1.1 Boothroyd & Dewhurst Methode.....	67
3.1.2 Lucas Methode	72
3.1.3 Hitachi-AEM	74

3.1.4	Modified Westinghouse Methode.....	76
3.1.5	ProKon Methode	79
3.1.6	Weitere Methoden	82
3.2	Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands.....	83
3.2.1	Ermittlung nach Walther.....	83
3.2.2	Ermittlung nach Deutschländer	85
3.2.3	Ermittlung nach Spingler	87
3.2.4	Ermittlung mithilfe der Automatisierungspotenzialanalyse.....	87
3.3	Ansätze zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile.....	88
3.3.1	Klassifizierung nach Milberg	89
3.3.2	Klassifizierung nach Hoßmann	90
3.3.3	Klassifizierung nach Schneider	92
3.4	Zwischenfazit	95
4	Konzepterstellung.....	99
4.1	Methodenkonzeption	100
4.1.1	Vorgehen und Art der Bewertung.....	100
4.1.2	Produktdesignoptimierung.....	104
4.2	Definition und Abgrenzung der betrachteten Prozessschritte.....	105
4.2.1	Art des Montagesystems	106
4.2.2	Eingrenzung des Leistungsbereichs	108
4.2.3	Montieren	110
4.2.4	Fügen.....	112
4.2.5	Materialbereitstellung.....	114
5	Entwicklung einer generischen Methodik	117

5.1	Eine Methodik und deren Bausteine	117
5.2	Vorgehensweise zur Methodikentwicklung.....	118
5.3	Generisches Einflussfaktorenmodell	121
5.3.1	Einflussfaktorenanalyse	122
5.3.2	Abstrahierung automatisierter Fügeprozesse	126
5.3.3	Prozessschrittzuordnung spezifischer Einflussfaktoren.....	128
5.4	Generische Bewertungsmatrix	145
5.5	Exemplarischer Transfer und Herleitung von Gestaltungsrichtlinien	158
5.5.1	Exemplarischer Transfer von Gestaltungsrichtlinien	158
5.5.2	Exemplarische Herleitung von Gestaltungsrichtlinien.....	161
5.6	Methodenentwicklung	164
6	Validierung der Methodik.....	167
6.1	Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren.....	167
6.2	Versuchsauswahl und Fallbeispiel	173
6.3	Instanziierung des Modells – IST-Zustand	174
6.4	Berechnung der Automatisierungseignungswerte – IST-Zustand.....	178
6.5	Designvariante 1	180
6.5.1	Produktdesignoptimierung	180
6.5.2	Vergleich IST-Zustand mit SOLL-Zustand Designvariante 1.....	181
6.5.3	Versuchsaufbau und Durchführung	182
6.6	Designvariante 2	185
6.6.1	Produktdesignoptimierung	185
6.6.2	Vergleich IST-Zustand mit SOLL-Zustand Designvariante 2.....	187
6.6.3	Versuchsaufbau und Durchführung	188

6.7	Expertendesignvariante	191
6.8	Ergebnisbeschreibung und Interpretation	193
6.8.1	Designvariante 1	194
6.8.2	Designvariante 2	197
6.8.3	Expertendesignvariante	199
6.9	Reflexion der Methodik	200
7	Zusammenfassung und Ausblick	203
7.1	Zusammenfassung	203
7.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	205
8	Literaturverzeichnis	207
9	Anhang	239
9.1	Zusätzliche erläuternde Begriffe und Definitionen	239
9.2	Weitere Erläuterungen zu den Bausteinen einer Methodik	240
9.3	Ergänzende Attributerläuterungen	241
9.3.1	Formänderung	241
9.3.2	Fügebewegung	242
9.3.3	Fixierungen	242
9.4	Validierungsdaten	244
9.4.1	Experteninterviewergebnisse zur Sensitivitätsanalyse	244
9.4.2	Instanzierte Modelle ausgewählter Fallbeispiele	246
9.4.3	Biegesteifigkeitskennzahlbestimmung des Kabelbündels	252
9.4.4	Instanzierte Modelle der Designvarianten	253
9.4.5	Instanziertes Modell der Expertendesignvariante	255

Abkürzungsverzeichnis

A	Automatisiert
APA	Automatisierungspotenzialanalyse
AEM	Assemblability Evaluation Method
B&D	Boothroyd & Dewhurst Methode
CASE	Connected, Autonomous, Shared & Services und Electric
CPS	Cyber-Physisches System
CPPS	Cyber-Physisches Produktionssystem
DFA	Design for Assembly
DFAA	Design for Automatic Assembly
DFE	Design for Fabrication
DFM	Design for Manufacture
DFMA	Design for Manufacture and Assembly
DFR	Design for Recycling
DFS	Design for Service
DFX	Design for X
DOF	Degree of Freedom
E/E-Architektur	elektrische-elektronische Architektur
EAD	Einzeladerabdichtung
FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
Hitachi	Hitachi-AEM
IAO	Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation
IILS	Innovationsinitiative Leitungssatz

IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung
KSL	Kundenspezifischer Leitungssatz
Lucas	Lucas Methode
M	Manuell
MEM	Manufacturing Evaluation Method
MOPF	Modellpflege
MTM	Methods-Time-Measurement
OEM	Original Equipment Manufacturer
ProKon	ProKon Methode
Westinghouse	Westinghouse Methode

Abbildungsverzeichnis

Alle Abbildungen ohne Quellenangaben sind eigene Abbildungen des Verfassers.

Abbildung 1:	Interaktion zwischen Produktentwicklung und Cyber-Physischem Produktionssystem (in Anlehnung an Drossel et al. 2017, S. 220)	26
Abbildung 2:	Causal Loop Diagramm des heutigen Leitungssatzentstehungsprozesses (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020a, S. 4)	29
Abbildung 3:	Wissenschaftsarten (in Anlehnung an Stokes 1997, S. 73)	32
Abbildung 4:	Wissenschaftssystematische Einordnung des Dissertationsvorhabens (in Anlehnung an Ulrich et al. 1976, S. 305).....	33
Abbildung 5:	Forschungsphasen in Bezug zum Aufbau der Arbeit (in Anlehnung an Ulrich 2001, S. 195)	38
Abbildung 6:	Motorleitungssatz (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 388).....	45
Abbildung 7:	Motorleitungssatz Variantenstruktur (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 388)	47
Abbildung 8:	Leitungssatz Entwicklungsprozess	48
Abbildung 9:	Anforderungen an einen Leitungssatz	49
Abbildung 10:	Leitungssatzproduktionsprozess (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 389)	51
Abbildung 11:	Komponenten eines Motorsteuergerätesteckers (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 389).....	53
Abbildung 12:	Prozesszeitanteile in der Leitungssatzfertigung (Schlaich 1988, S. 33; Schmitt 1999, S. 23).....	59

Abbildung 13:	Exemplarische Darstellung eines Montagebretts mit zweidimensionaler Fertigungszeichnung und ausgewählten manuellen Montageschritten	63
Abbildung 14:	Design for X (in Anlehnung an Eskilander 2001, S. 25).....	65
Abbildung 15:	Boothroyd DFMA Ablaufschema (in Anlehnung an Boothroyd 1996, S. 20)	68
Abbildung 16:	α - und β -Symmetrie (in Anlehnung an Boothroyd 2005, S. 236)	70
Abbildung 17:	Lucas DFA-Ablaufschema (in Anlehnung an Miles 1989, S. 33; Swift 1989, S. 132; Miles 1990, S. 367)	72
Abbildung 18:	Hitachi AEM Ablaufschema (in Anlehnung an Miyakawa et al. 1990, S. 356)	75
Abbildung 19:	Westinghouse Methode Ablaufschema.....	77
Abbildung 20:	ProKon Ablaufschema	79
Abbildung 21:	Klassifizierung forminstabiler Einzelteile anhand deren Form (in Anlehnung an Milberg et al. 1986, S. 11; Trommnau et al. 2020b, S. 51)	89
Abbildung 22:	Klassifizierung forminstabiler Einzelteile anhand deren Formmerkmale (in Anlehnung an Hoßmann 1992, S. 55)	90
Abbildung 23:	Darstellung der Biegelinie anhand eines Biegebalkens (in Anlehnung an Schneider 1999, S. 41; Dankert et al. 2013, S. 260)	93
Abbildung 24:	Anforderungsbewertungsmatrix	97
Abbildung 25:	Betrachtungsfokus (grün) der Arbeit (in Anlehnung an Eskilander 2001, S. 25)	99
Abbildung 26:	Abstrahierte Vorgehensweise verbreiteter DFA-Methoden.....	100

Abbildung 27:	Leistungsbereichseinordnung von Montagesystemen (in Anlehnung an Hesse 2012b, S. 16; Hesse et al. 2016, S. 547)	106
Abbildung 28:	Fünf Grundbewegungen nach MTM (in Anlehnung an Robert Bosch GmbH 2010, S. 7)	111
Abbildung 29:	Fertigungsverfahren des Fügens mit Untergruppen des Fertigungsverfahrens Zusammensetzen (in Anlehnung an DIN 8593-1, S. 6).....	113
Abbildung 30:	Dem System der Methodik zugehörige Bausteine (in Anlehnung an Laufenberg 1996, S. 7; Heyn 1999, S. 6)	118
Abbildung 31:	Schema der Methodik im Zusammenspiel mit der realen Welt	119
Abbildung 32:	Fünf Grundbewegungen automatisierter Montageprozesse (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 51)	127
Abbildung 33:	Biegebalken unter Einwirkung einer gleichmäßig angreifenden Linienlast (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 52) ..	131
Abbildung 34:	Mögliche Formänderung beim Greifen eines schaumartigen Einzelteils.....	134
Abbildung 35:	α - und β -Symmetrie einer Leitung mit gecrimpten Kontakten (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 52)	136
Abbildung 36:	Vorgehen zur Klassifikationswertzuweisung anhand getroffener Bewertungsurteile	154
Abbildung 37:	Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 1	170
Abbildung 38:	Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 2	170
Abbildung 39:	Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 3	170
Abbildung 40:	Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 4.....	171
Abbildung 41:	Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 5.....	171

Abbildung 42:	Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 6	171
Abbildung 43:	Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 7	172
Abbildung 44:	OM654 MOPF Kabelkanal mit befestigten Leitungsbündeln (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143).....	174
Abbildung 45:	Darstellung der Abweichung zwischen IST- und SOLL-Lage des Leitungsbündels im Kabelkanal.	175
Abbildung 46:	Serienzustand und Designvariante 1 inklusive Schnappclip (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1144).....	181
Abbildung 47:	Verwendete Fingerkit Konfiguration und Versuchsaufbau für Designvariante 1	183
Abbildung 48:	Versuchsablauf der automatischen Leitungsbündelmontage in Designvariante 1. Abfolge von links nach rechts je Zeile.	184
Abbildung 49:	Gebündelte Einzelleitungen mithilfe eines Kabelbinders mit Tannenbaumclip.....	185
Abbildung 50:	Serienzustand und Designvariante 2 inklusive Clip und Kabelbinder mit Tannenbaumclip.....	186
Abbildung 51:	Versuchsaufbau für Designvariante 2	189
Abbildung 52:	Versuchsablauf der automatischen Leitungsbündelmontage in Designvariante 2. Abfolge von links nach rechts je Zeile.	190
Abbildung 53:	Serienzustand des Kabelkanals und Expertendesignvariante ohne Anwendung der Methodik	191
Abbildung 54:	Start- und Endaufnahme des Versuchs sowie montiertes Leitungsbündel mit und ohne Schnappclip.....	195
Abbildung 55:	Start- und Endaufnahme des Versuchs sowie montiertes Leitungsbündel mit und ohne Clip.	197
Abbildung 56:	Biegesteifigkeitskennzahlbestimmung K_{Bs} des Kabelbündels ..	252

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Kabelverarbeitungsanlagen und Prozessschritte (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 390).....	56
Tabelle 2-2:	Verknüpfung manueller Montageschritte am Montagebrett und dazugehöriger Forschung (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 391; Nguyen et al. 2021, S. 380ff).....	62
Tabelle 3-1:	Auflistung montagerelevanter Einflussfaktoren der automatisierten Montage großvolumiger Produkte (in Anlehnung an Walther 1985, S. 109).....	84
Tabelle 3-2:	Einflussfaktoren zur Beurteilung der Automatisierbarkeit (in Anlehnung an Deutschländer 1989, S. 102)	86
Tabelle 3-3:	Einflussfaktoren zur Analyse des Automatisierungspotenzials (in Anlehnung an Neb 2020).....	88
Tabelle 3-4:	Grundklassifizierung forminstabiler Einzelteile im Kontext der Bereitstellung (in Anlehnung an Schneider 1999, S. 40).....	92
Tabelle 4-1:	Pose-Wiederholgenauigkeitsbereiche verbreiteter 6-Achs-Knickarm-Roboter in Abhängigkeit deren Traglastfähigkeit (ABB 2020; DENSO 2020; FANUC 2020; KUKA 2020; Stäubli 2020; YASKAWA 2020).....	109
Tabelle 5-1:	Einflussfaktorenanalyse anhand verbreiteter DFA-Methoden.	123
Tabelle 5-2:	Einflussfaktoren auf automatisierte Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 52).....	129
Tabelle 5-3:	Rangwerte und Gewichtungsfaktoren der Einflussfaktoren auf automatisierte Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1141).....	153

Tabelle 5-4:	Gewichtete Einflussfaktoren auf automatisierte Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 1141)	156
Tabelle 5-5:	Übertragbare generelle Gestaltungsrichtlinien (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1140)	159
Tabelle 5-6:	Übertragbare spezifische Gestaltungsrichtlinien (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1140)	160
Tabelle 5-7:	Generelle Gestaltungsrichtlinien (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143; Trommnau et al. 2020b, S. 53)	162
Tabelle 5-8:	Spezifische Gestaltungsrichtlinien (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143)	164
Tabelle 6-1:	Automatisierungseignungswerte außerhalb der Spannweite der Expertenmeinungen und deren Abstand zum jeweiligen Randwert des nächstgelegenen Quartils	173
Tabelle 6-2:	Instanziertes Modell des Serienzustands entsprechend entwickelter Methodik.....	177
Tabelle 6-3:	Exemplarische Automatisierungseignungswertberechnung für die Grundbewegung Fügen (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143).....	178
Tabelle 6-4:	Automatisierungseignungswertberechnung des Serienzustands (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143).....	179
Tabelle 6-5:	Automatisierungseignungswertvergleich des Serienzustands und der Designvariante 1 (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143f)	182
Tabelle 6-6:	Automatisierungseignungswertvergleich des Serienzustands und der Designvariante 2.....	187
Tabelle 6-7:	Automatisierungseignungswertvergleich des Serienzustands und der Expertendesignvariante.....	192

Tabelle 9-1:	Automatisierungseignungseinschätzungen ausgewählter Fallbeispiele	244
Tabelle 9-2:	Instanziertes Modell des Fallbeispiels 2 entsprechend entwickelter Methodik	246
Tabelle 9-3:	Instanziertes Modell des Fallbeispiels 3 entsprechend entwickelter Methodik	247
Tabelle 9-4:	Instanziertes Modell des Fallbeispiels 4 entsprechend entwickelter Methodik	248
Tabelle 9-5:	Instanziertes Modell des Fallbeispiels 5 entsprechend entwickelter Methodik	249
Tabelle 9-6:	Instanziertes Modell des Fallbeispiels 6 entsprechend entwickelter Methodik	250
Tabelle 9-7:	Instanziertes Modell des Fallbeispiels 7 entsprechend entwickelter Methodik	251
Tabelle 9-8:	Instanziertes Modell der Designvariante 1 entsprechend entwickelter Methodik	253
Tabelle 9-9:	Instanziertes Modell der Designvariante 2 entsprechend entwickelter Methodik	254
Tabelle 9-10:	Instanziertes Modell der Expertendesignvariante entsprechend entwickelter Methodik	255

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
acv_j	Attributklassifikationswert	
α -Symmetrie	Rotationswinkel um eine lotrechte Achse zur Fügeachse	°
β -Symmetrie	Rotationswinkel um die Fügeachse	°
B	Breite	mm
B_F	Bewertungsfaktor	
cv_j	Klassifikationswert der Ausprägung eines Attributs	
d	Durchmesser	mm
E	Elastizitätsmodul	kg/m·s ²
$e_{FügKom}$	Fügekomplexitätsfaktor	
E_{ma}	DFA-Index	
F_G	Gewichtskraft	N
G_{sw}	Gesamtsymmetriewinkel	°
g	Schwerebeschleunigung	m/s ²
H	Höhe	mm
h_{max}	Maximale Durchbiegung	mm
Δh	Längendifferenz	mm
I	Flächenträgheitsmoment	mm ⁴

K_{Bs}	Biegesteifigkeitskennzahl	
L	Länge	mm
m_E	Masse des Einzelteils	kg
M_E	Multiplikator Montageeinfluss	
N_{min}	Theoretisches Minimum an Einzelteilen	
p_a	Gewichtungsfaktor des Attributs	%
p_{CV_m}	Automatisierungseignung	%
q_0	Linienlast	N/m
rv_a	Spezifischer Rangwert eines Attributs	
rv_i	Rangwert des Attributs in Abhängigkeit dessen Klasse	
S_{ME}	Summe der Produkte aus B_F und M_E innerhalb eines Montageaufgabenbereichs	
t_a	Basiszeit	s
t_{ma}	Vorbestimmte Montagezeit	s

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die vierte industrielle Revolution – Bauernhansl (2014, S. 33) bezeichnet die Frage nach deren Eintritt nur noch als rhetorisch. Unternehmen stehen im Spannungsfeld der Komplexitätszunahme hervorgerufen durch personalisierte Produkte, der Forderung nach kurzen Lieferzeiten, Unsicherheiten in Mengenprognosen und damit verbunden der Forderung nach Produktionsflexibilität. Die Antwort zur Beherrschung der steigenden Komplexität heißt Fraktalisierung im Wertschöpfungsnetz. Die nächste Stufe bildet dabei der Einsatz Cyber-Physischer Systeme (CPS) im Produktionsumfeld. CPS ermöglichen mittels eingebetteter Systeme die Kommunikation sowie die autonome und dezentrale Vernetzung zwischen beispielsweise Produktionsanlagen über das Internet und sind in der Lage ihre Umwelt durch Sensorik zu erfassen, Daten auszuwerten und auf die physikalische Welt einzuwirken. (Bauernhansl 2014, S. 14ff)

Die deutsche Automobilbranche wird als Potenzialträger hinsichtlich Forschung, Entwicklung und Einsatz von CPS postuliert (acatech 2011, S. 11). Dort wirken die Spannungsfelder der Komplexitätszunahme nicht erst seit heute. Aus dynamischen Märkten resultiert die Forderung nach schneller Marktreife sowie die Verkürzung von Produktlebenszyklen mit der Herausforderung der wettbewerbsfähigen Produktion individualisierter Fahrzeuge (Steegmüller et al. 2017, S. 27).

Laut acatech (2011, S. 20) präsentiert die automatisierte Produktion ein Hauptanwendungsfeld von CPS. CPS bieten im industriellen Produktionsumfeld Mehrwerte hinsichtlich der Umsetzung kundenindividueller Wünsche, Echtzeitanpassungen auf Marktveränderungen sowie hochflexibler unternehmensübergreifender Kooperationen. (acatech 2011, S. 23)

Mercedes-Benz sieht unter anderem die Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen als entscheidenden Erfolgsfaktor und kategorisiert die Anwendungen der Industrie 4.0 als

Befähiger (Stegmüller et al. 2017, S. 27ff). Stegmüller et al. (2017) zeigen anhand konkreter Beispiele für Automatisierungslösungen, wie einem neuartigen Montagekonzept zur Hinterachsmontage mittels kooperierender Roboterteams, die praxisnahe Umsetzung wandlungsfähiger Produktionssysteme.

Kommunikation und Datendurchgängigkeit sowie, aufbauend darauf, die Realisierung intelligenter Produkte und Produktionsanlagen gelten dabei als wesentliche technische Merkmale von CPS. (Vogel-Heuser 2014, S. 39) Zur Realisierung der Durchgängigkeit von Daten bedarf es zum einen spezifisch definierter Merkmale und zum anderen der Fähigkeit diese über Systemgrenzen hinweg, weitergeben und verarbeiten zu können. Unter intelligenten Produkten werden Produkte verstanden, die ihre Eigenschaften kennen und beispielsweise das Wissen über deren Fertigungsprozess und Montagesequenz in sich tragen (Vogel-Heuser 2014, S. 42).

Als Zukunftsvision werden Daten aus Produktionsprozessen im Entwicklungsprozess neuer Produktgenerationen genutzt. Erhebliches Potenzial liegt hierbei in effizienteren Produktionsprozessen aufgrund optimierter und auf den automatisierten Montageprozess ausgerichteter Produktdesigns (siehe Abbildung 1). Entsprechende Regelkreise und Optimierungsprozesse bedürfen ebenso der Automatisierung zur effizienten Umsetzung derselben. (Drossel et al. 2017, S. 219f)

Kurzgesagt - die Automatisierung der Automatisierung.

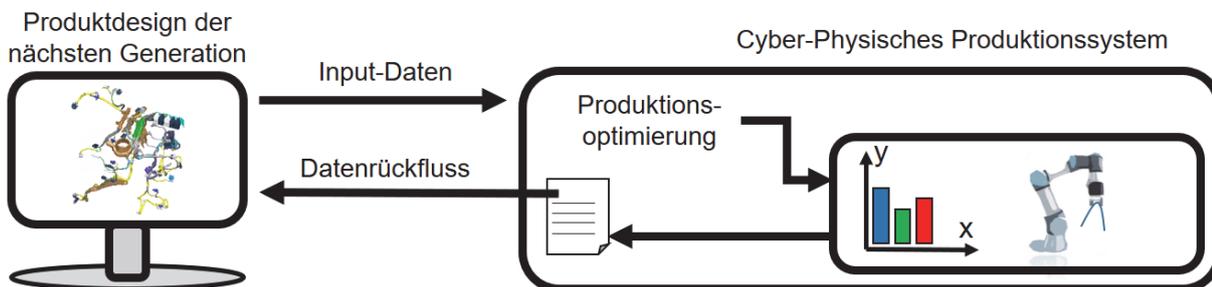


Abbildung 1: Interaktion zwischen Produktentwicklung und Cyber-Physischem Produktionssystem (in Anlehnung an Drossel et al. 2017, S. 220)

Enabler dieser Vision bildet die zuvor erwähnte Durchgängigkeit von Daten zwischen Produktentwicklung, Produktionsplanung und der Produktion selbst sowie die konsequente Ausrichtung des Produktdesigns auf eine automatisierte Montage (Drossel et al. 2017, S. 219f; Wegener 2017, S. 394ff).

1.2 Problemstellung

Die Herausforderungen der Kommunikation und Datendurchgängigkeit sowie die Verwirklichung intelligenter Produkte zur automatisierten Interaktion zwischen Produktentwicklung, Produktionsplanung und Produktion sind nicht gelöst.

Beispielsweise erfolgt die Erfüllung essentieller Anforderungen intelligenter Produkte im Kontext Cyber-Physischer Produktionssysteme (CPPS), wie die Ableitung von Montagesequenzen des Produkts, noch immer manuell. Fechter et al. (2019) und Neb et al. (2020; 2021) beschreiben diesbezüglich Herausforderungen der automatisierten Ableitung von Montagesequenzen basierend auf dem 3-D Modell des Produkts und präsentieren erste Ansätze. Die Fähigkeit des Produkts automatisiert montiert werden zu können bildet dabei die Basisvoraussetzung zur Verwirklichung der Gesamtvision einer durchgängigen Automatisierung.

Insbesondere Produkte im Spannungsfeld der Komplexitätserhöhung verstärken die Erwartungshaltung eines auf eine automatisierte Montagefähigkeit ausgerichteten Produktdesigns (ARENA2036 e.V. 2020, S. 18ff). Der Automobilleitungssatz, als prominentes Produktbeispiel im Umfeld der Automobilindustrie, ist eine der teuersten Komponenten und das teuerste Zukaufteil im Automobil. 55 % aller Leitungssatzvarianten werden personalisiert hergestellt. Entwicklung, Produktion und Montage erfolgen unternehmensübergreifend im Verbund von Original Equipment Manufacturer (OEM), Leitungssatzlieferanten, Komponenten- sowie Anlagenhersteller. Die Komplexitätszunahme ist weiterhin bedingt durch die Forderungen nach kurzen Lieferzeiten sowie Unsicherheiten in Mengenprognosen. (Heurung 2016, S. 32ff; Babel 2019, S. 2; Trommnau et al. 2020a; Nguyen et al. 2021, S. 380).

Konträr zur zuvor erwähnten Erwartungshaltung erfolgen aber bis zu 90 % der Montageprozesse an der Montagelinie manuell wobei diese 70 % der Gesamtfertigungszeit ausmacht (Nguyen et al. 2021, S. 380). Dies ist insbesondere der mangelnden Ausrichtung des Produktdesigns auf eine automatisierte Montage geschuldet (Trommnau et al. 2020a, S. 3f).

Die Innovationsinitiative Leitungssatz (IILS) der ARENA2036 beschreibt das Produkt Automobilleitungssatz dementsprechend als Phänomen im Kontext der Entwicklung von Automatisierungs- und Industrie 4.0-Ansätzen (ARENA2036 e.V. 2020, S. 18).

Ferner illustriert Daimler die derzeitige Transformation des Automobils anhand der Schlagwörter „Connected“, „Autonomous“, „Shared & Services“ und „Electric“ – kurz CASE (Daimler AG 2021b). Diese Transformation beeinflusst entscheidend die Anforderungen an den Leitungssatz. Der Fertigungsprozess des Automobilleitungssatzes wird geprägt sein durch eine vermehrte Überwachung von Prozessparametern sowie Anforderungen an Rückverfolgbarkeit und Prozessdokumentation. Diese Anforderungen sind meist nur durch die Automatisierung von Fertigungsschritten abbildbar. (Heurung 2016; Hammer 2018; Hold 2018; Trommnau et al. 2019) Zusätzlich listen Trommnau et al. (2020a) eine Vielzahl weiterer Einflussfaktoren und Benefits im Kontext der Automatisierung der Leitungssatzfertigung und –montage auf.

Abbildung 2 visualisiert das Spannungsfeld der Komplexitätszunahme, die Kausalität zwischen nicht automatisierungsgerechtem Produktdesign und manueller Fertigung sowie das Erfordernis der Erhöhung des Anteils automatisierter Fertigungsprozesse aufgrund neuer Anforderungen.

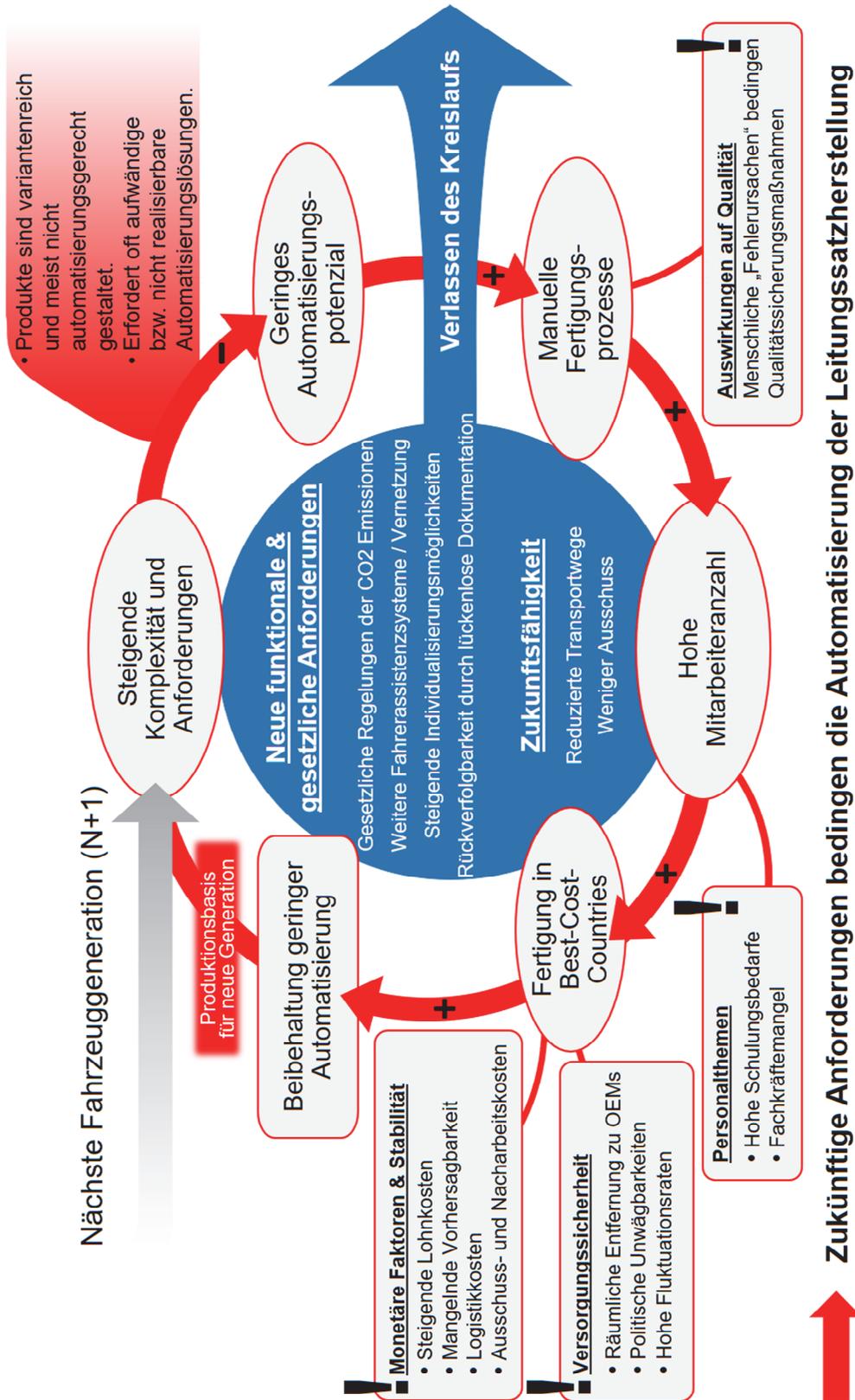


Abbildung 2: Causal Loop Diagram des heutigen Leitungssatzentstehungsprozesses (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020a, S. 4)

Insbesondere der Mangel an Methoden zur automatisierungsgerechten Produktgestaltung mit forminstabilen Komponenten, im Leitungssatz repräsentiert durch Leitungen oder Klebeband, hemmt die Automatisierung der Montage (Duenser et al. 2018, S. 3476; Hinze et al. 2020, S. 310; Trommnau et al. 2020b, S. 50).

Kausal bedingt dieser Mangel an Methoden die ungenügende Ausrichtung des Produktdesigns auf eine automatisierte Montage und resultiert in der mangelnden Fähigkeit des Produkts automatisiert montiert werden zu können. Dies verhindert die Erfüllung der Basisvoraussetzung zur Verwirklichung der Gesamtvision einer durchgängigen Automatisierung.

1.3 Zielsetzung und Forschungsfragen

Zielsetzung des Dissertationsvorhabens ist die Entwicklung einer generischen Methodik zur Bewertung und Optimierung der automatisierten Montage von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen. Die Methodik kann in der Phase der Produktentwicklung eingesetzt werden um ex ante ein, für die automatisierte Montage, geeignetes Produktdesign zu gestalten.

Die Bewertung soll numerisch dargestellt werden. Dies ermöglicht zum einen eine einfache Vergleichbarkeit iterativ optimierter Produktdesigns und zum anderen die unkomplizierte Identifikation von Optimierungsbedarfen. Zur numerischen Darstellung sollen, für den automatisierten Zusammenbau, relevante Einflussgrößen definiert und deren Ausprägungen Zahlenwerte zugeordnet werden.

Die Methodik soll zudem Gestaltungsrichtlinien zur Verfügung stellen. Diese unterstützen den Produktentwickler bei der automatisierungsgerechten Produktgestaltung. Zudem soll sowohl der Transfer bestehender und die Herleitung neuer Gestaltungsrichtlinien, im Kontext der automatisierungsgerechten Produktgestaltung mit forminstabilen Einzelteilen, exemplarisch demonstriert werden. Unternehmen profitieren dabei von der generellen Anwendbarkeit der Gestaltungsrichtlinien sowie der Möglichkeit produktspezifische Gestaltungsrichtlinien eigenständig zu entwickeln.

Die Beschreibung der Zielsetzung des Dissertationsvorhabens resultiert in folgenden Forschungsfragen:

- Wie kann die Eignung zur automatisierten Montage einer Bauteilkombination, mit mindestens einem forminstabilen Einzelteil, messbar gemacht werden?
- Wie muss das Bauteil gestaltet sein, um eine automatisierte Montage zu begünstigen?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen müssen die folgenden Unterforschungsfragen ebenfalls beantwortet werden:

- Wie müssen unterschiedlich geartete forminstabile Einzelteile klassifiziert werden und welche Abstraktionsebene des automatisierten Montageprozesses ist hierbei sinnvoll?
- Wie können methodisch Gestaltungsrichtlinien zur automatisierungsgerechten Bauteilgestaltung der definierten Bauteilklassen entwickelt werden?
- Wie erfolgt die praktische Anwendung der Gestaltungsrichtlinien?

1.4 Wissenschaftstheoretische Positionierung

Ulrich et al. (1976, S. 305) beschreiben den Kern wissenschaftlichen Denkens in der

„bewußte[n] Bereitschaft zur ständigen, kritischen Überprüfung der Richtigkeit der getroffenen Aussagen“.

Übereinstimmend sieht Popper (1999, S. 87f) die Tätigkeit eines wissenschaftlichen Forschers im Aufstellen von Systemen oder Sätzen und deren anschließender systematischer Verifizierung. Hypothesen werden dabei, im Bereich der empirischen Wissenschaften, anhand von Experimenten oder Beobachtungen überprüft (Popper 1999, S. 88).

Empirische Wissenschaften sind als Teilbereich der Wissenschaft zu definieren. Ulrich et al. (1976, S. 305) gliedern Wissenschaft grundlegend in die Kategorien Formal- und Realwissenschaft. Die Realwissenschaften werden wiederum in die Unterkategorien Grundlagen- und Handlungswissenschaften unterteilt. Dies bildet die Ausgangsbasis zur

nachfolgenden Einordnung des Dissertationsvorhabens basierend auf dessen Zielsetzung der methodischen aber auch praxisrelevanten Unterstützung des Produktentwicklungsprozesses.

Den Handlungswissenschaften ordnen Ulrich et al. (1976, S. 305) unter anderem den Bereich der Ingenieurwissenschaften, oder nach Ropohl (2009, S. 161) Technikwissenschaften, zu. Ropohl (2009, S. 162f) sieht in den Technikwissenschaften aber nicht nur einfach angewandte Naturwissenschaften. Die Technikwissenschaften verfolgen, statt des reinen theoretischen Erkenntnisgewinns, das Ziel der praktischen Funktionsfähigkeit. Ihre Qualität ist weniger von der ausschließlichen Wahrheitsfindung als viel mehr vom eigentlichen Erfolg geprägt. (Ropohl 2009, S. 162f) Stokes (1997, S. 73) teilt diesbezüglich verschiedene Arten von Wissenschaft in Abhängigkeit von deren Zielsetzungen ein und bereitet dies visuell in einem Quadrantenmodell auf (siehe Abbildung 3).

Forschung ist inspiriert von:

		Erwägung der Anwendung?	
		Nein	Ja
Streben nach grundlegendem Verständnis?	Ja	Reine Grundlagenforschung (Bohr)	Anwendungsorientierte Grundlagenforschung (Pasteur)
	Nein		Reine anwendungsorientierte Forschung (Edison)

Abbildung 3: Wissenschaftsarten (in Anlehnung an Stokes 1997, S. 73)

Die Zielsetzungen sind dabei der reine Erkenntnisgewinn, wie beispielsweise bei Naturwissenschaften, und die reine Anwendungsorientierung ohne die Schaffung von

weiterem generellen Verständnis. Eine Mischform bildet dabei der sogenannte Pasteur Quadrant, der sowohl nach Erkenntnisgewinn als auch dem Ziel der praktischen Verwendbarkeit strebt. (Stokes 1997, S. 70ff)

Nach Ropohl (2009, S. 163) transformieren Technikwissenschaften naturwissenschaftliches Wissen eigenständig und sind dementsprechend dem Pasteur Quadrant zuzuordnen. Weiter sieht Ropohl (2009, S. 163) die Naturwissenschaften als Hilfswissenschaften der Technikwissenschaften und schreibt dies ebenfalls den Sozial- und Humanwissenschaften zu. Dadurch sind Technikwissenschaften vielmehr als Transdisziplinwissenschaften zu kategorisieren und dementsprechend eine weitere Kategorie im klassischen Bild der Wissenschaftssystematik. (Ropohl 2009, S. 163f) Erlach (2001, S. 20ff) differenziert dabei zwischen Technikwissenschaften und Ingenieurwissenschaften noch schärfer und sieht in der Anwendung von Gestaltungsregeln zur Formgebung einer Konstruktion weder das Feld der angewandten Naturwissenschaften noch der Technikwissenschaften sondern eindeutig das Feld der Ingenieurwissenschaften. In eben diese Kategorie der Ingenieurwissenschaften ist das Dissertationsvorhaben einzuordnen.

Abbildung 4 zeigt die erweiterte Darstellung der klassischen Wissenschaftssystematik zur Einordnung des Dissertationsvorhabens.

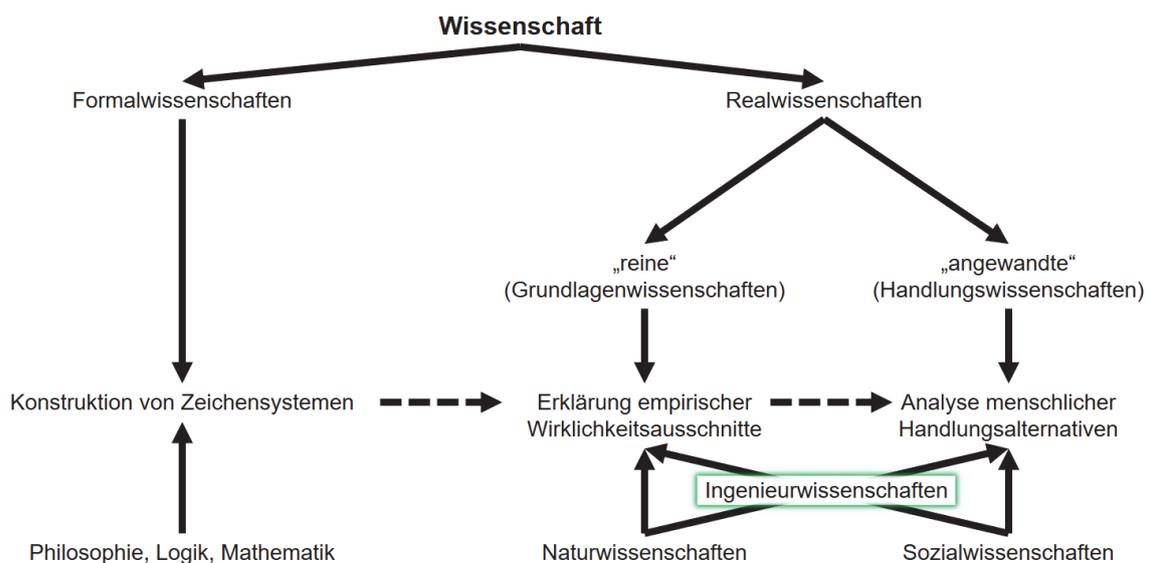


Abbildung 4: Wissenschaftssystematische Einordnung des Dissertationsvorhabens (in Anlehnung an Ulrich et al. 1976, S. 305)

Nach Ulrich et al. (1976, S. 306) sind Aufgabenstellungen im Bereich der Realwissenschaften unter Einbezug dreier Aspekte zu lösen. Dies sind der Entdeckungszusammenhang, der Begründungszusammenhang sowie der Verwendungszusammenhang (Ulrich et al. 1976, S. 306).

Entdeckungszusammenhang:

Ulrich et al. (1976, S. 306) beschreibt den Entdeckungszusammenhang als gedanklichen Bezugsrahmen des wissenschaftlichen Forschungsprozesses. Friedrichs (1990, S. 50) versteht darunter den Anlass des Forschungsprojekts. Der Anlass kann die Untersuchung eines sozialen Problems, das Problem der Theoriebildung oder ein von einem Auftraggeber initiiertes Forschungsvorhaben sein. Den wesentlichen Kern der Phase des Entdeckungszusammenhangs bildet die Problemstrukturierung. Diese erfolgt in der Regel explorativ und erweitert das Vorwissen des Forschers. Eben jenes Vorwissen, bzw. die Spezialisierung, sowie das Interesse des Forschenden am Themengebiet gelten als allgemeine Gründe zur Klärung der Fragestellung warum der Forschende sich der Problemstellung widmet. (Friedrichs 1990, S. 50ff; Raithel 2008, S. 25)

Die Spezialisierung des Verfassers der vorliegenden Dissertation begründet sich in seiner mehrjährigen Tätigkeit als Arbeitsplaner und Fertigungslinienplaner der BSH Hausgeräte GmbH in der Schnittstellenfunktion zwischen Fertigung und Produktentwicklung. Der Fokus lag insbesondere auf der Gestaltung automatisierungsgerechter Produkte zur Realisierung hochautomatisierter Fertigungslinien.

Weiterhin basiert die Erfahrung des Verfassers auf seiner Zeit als Mitarbeiter der Mercedes-Benz AG im Entwicklungsbereich für Automobilleitungssätze. Der Fokus lag ebenfalls auf der Gestaltung automatisierungsgerechter Produkte. Dabei konnte der Autor Erfahrungen im Themenbereich sowohl in unternehmensinternen Projekten als auch im unternehmensübergreifenden Projekt der IILS der ARENA2036 sammeln. Der Autor übernahm dabei die Funktionen als Projektleiter, stellvertretender Projektleiter und Projektmitglied in unterschiedlichen Teilprojekten der IILS.

Das Vorwissen zur Bearbeitung der Aufgabenstellung ist nicht zuletzt entscheidend von den zugrundeliegenden Arbeiten im Bereich der montagegerechten sowie automatisierungsgerechten Produktgestaltung geprägt. Die Arbeit stützt sich auf die Boothroyd & Dewhurst Methode (Boothroyd 1994, S. 505ff), die Lucas Methode (Swift 1989; Sealy et al. 1992), die Hitachi-AEM (Miyakawa et al. 1990; Ohashi et al. 2002), die Westinghouse bzw. Modified Westinghouse Methode (Sturges 1989) sowie die ProKon Methode (MTM-Vereinigung e. V. 2014). (Leaney 1996, S. 47; Beiter et al. 2000, S. 2; Klein et al. 2008; Desai et al. 2010, S. 92ff; Esterman et al. 2010; Ezpeleta et al. 2019, S. 1f).

Begründungszusammenhang:

Das Ziel des Begründungszusammenhangs ist die Prüfung der Hypothesen. Die Hypothesenprüfung sollte den Kriterien möglichst exakt, nachprüfbar sowie objektiv genügen. (Ulrich et al. 1976, S. 306; Friedrichs 1990, S. 52f) Raithel (2008, S. 26) sieht die Transformation der Problemstellung in deren einzelne Dimensionen als grundlegende Voraussetzung zur Erfüllung dieses Anspruchs an. Basis zur Transformation ist die Aufarbeitung bestehender Arbeiten im Themengebiet. (Raithel 2008, S. 26)

Bezogen auf das Forschungsvorhaben zählen dazu die Methoden zur Automatisierungsaufwandsermittlung wie nach Walther (1985), Deutschländer (1989), Spingler et al. (2002) sowie die Automatisierungspotenzialanalyse (Wößner et al. 2014). Ebenso müssen die Ansätze zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile nach Milberg et al. (1986), Hoßmann (1992) und Schneider (1999) berücksichtigt und analysiert werden. Die zugrundeliegenden Arbeiten begründen weiterhin den Fokus der Problemuntersuchung und bilden die Basis zur Formulierung von Hypothesen.

Die Datenerhebung sowie deren Auswertung und Interpretation gelten als finaler Schritt der Phase des Begründungszusammenhangs. (Friedrichs 1990, S. 52f; Raithel 2008, S. 26) Popper (1999, S. 93) beschreibt dementsprechend, als eine von vier Richtungen der deduktiven Hypothesenprüfung, die Prüfung mittels empirischer Anwendung. Die Bewährung der Theorie in der Praxis wird dabei anhand wissenschaftlicher Experimente oder der technisch-praktischen Anwendung überprüft (Popper 1999, S. 93).

Im Rahmen der automatisierungsgerechten Produktgestaltung fokussiert die praktische Versuchsdurchführung weniger das Aufstellen statistischer Aussagen als vielmehr die Überprüfung der grundsätzlichen Machbarkeit sowie das Treffen von Aussagen über deren Erfolg. Eine vereinfachte Formulierung der Fragestellung an das Versuchsergebnis könnte lauten:

„Ist ein ursprünglich nicht automatisiert montierbares Produkt nun, aufgrund der durchgeführten Umkonstruktion, automatisiert montierbar?“

oder

„Begünstigt die Umkonstruktion die automatisierte Montage des Produkts?“

Diese Fragestellungen bilden den Anspruch an die Versuche des Forschungsvorhabens sowie die Art der Ergebnisse.

Verwendungszusammenhang:

Unter dem Verwendungszusammenhang oder auch Verwertungs- bzw. Wirkungszusammenhang wird der Zweck sowie die Frage nach der Verwendung der gewonnenen Ergebnisse verstanden. Mögliche Stoßrichtungen sind dabei die praktische Anwendung oder die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Praxis. (Ulrich et al. 1976, S. 306f; Raithel 2008, S. 26).

Die in Kapitel 1.3 erläuterte Zielsetzung der Entwicklung einer generischen Methodik zur Bewertung und Optimierung der automatisierten Montage von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen unterstützt Unternehmen schon in der Phase der Produktentwicklung ein automatisierungsgerechtes Produktdesign zu gestalten. Das Dissertationsvorhaben strebt die Anwendbarkeit der Methodik, insbesondere im Bereich des Automobilleitungssatzentwicklungsprozesses, an. Dies korreliert mit dem in

Kapitel 1.2 aufgezeigten Mangel an Methoden zur automatisierungsgerechten Produktgestaltung, der die heutige Progression, hinsichtlich Montageautomatisierung in der Leitungssatzfertigung, hemmt.

1.5 Aufbau und Gliederung der Arbeit

Als eine Konsequenz der Forschungskonzeption angewandter Wissenschaft postuliert Ulrich (2001, S. 194) sowohl den Beginn als auch das Ende des Forschungsprozesses in der Praxis. Der anwendungsorientierte Forscher sieht in der Erfassung, Untersuchung und Lösung praxisrelevanter Probleme seine wissenschaftliche Hauptaufgabe. Zur Vorgehensweise definiert Ulrich (2001, S. 194f) ein Forschungsprozessmodell angewandter Wissenschaft, bestehend aus sieben Phasen, und kennzeichnet dabei jeweils die Phasen mit Praxisbezug. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich an diesem Forschungsprozessmodell und umfasst alle Phasen des Modells. Abbildung 5 setzt die Forschungsphasen nach Ulrich (2001, S. 195) in Bezug zum Aufbau der Arbeit.

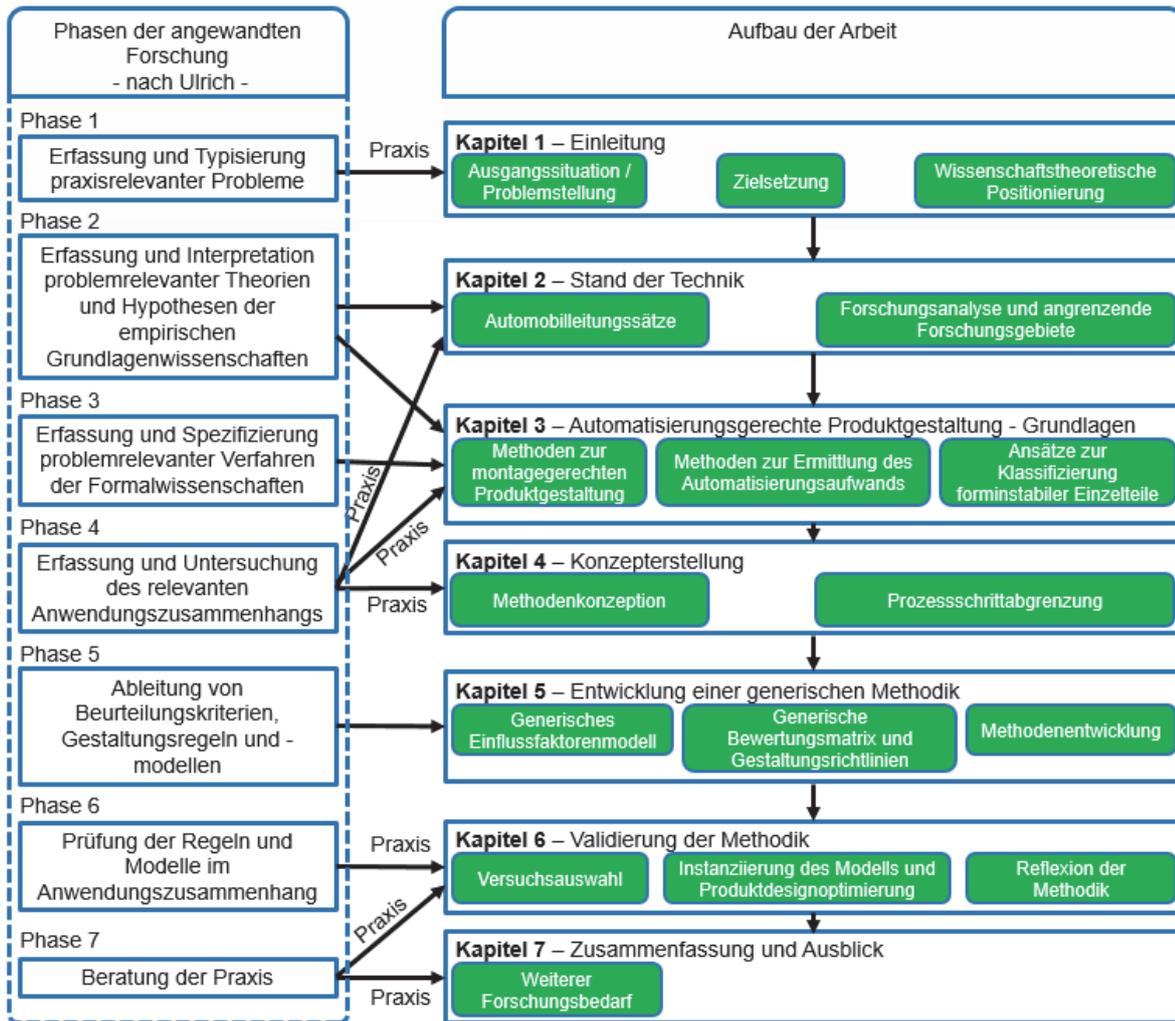


Abbildung 5: Forschungsphasen in Bezug zum Aufbau der Arbeit (in Anlehnung an Ulrich 2001, S. 195)

Kapitel 1 erläutert sowohl Ausgangssituation als auch Problemstellung des Forschungsvorhabens und leitet daraus dessen Zielsetzung ab. Ferner erfolgt die Einordnung der Arbeit in die Wissenschaftssystematik sowie deren Forschungsphasenbezug zu Ulrich (2001, S. 195). Dies bildet das Bearbeitungsfundament des Dissertationsvorhabens.

Kapitel 2 beschreibt die relevanten Grundlagen des wesentlichen Anwendungsfelds der Aufgabenstellung, den Automobilleitungssatz. Zur Analyse des Forschungsumfelds erfolgt die Aufarbeitung themenbezogener als auch angrenzender Forschung.

Kapitel 3 setzt sich mit verbreiteten Methoden zur montagegerechten und automatisierungsgerechten Produktgestaltung auseinander, erläutert deren Anwendungsweise und arbeitet die verwendeten Einflussfaktoren heraus.

Weiterhin werden Methoden zur Ermittlung von Automatisierungsaufwänden sowie Klassifizierungsansätze forminstabiler Einzelteile dargestellt und die jeweiligen Klassifizierungs- oder Bewertungskriterien beleuchtet.

Basierend auf der Forschungsanalyse in Kapitel 2 sowie den hervorgehobenen Grenzen der erläuterten Methoden schließt Kapitel 3 mit der Ermittlung des Forschungsbedarfs. Dabei wird deutlich, dass keine der bestehenden Methoden oder Ansätze zur Bewertung und Optimierung der automatisierten Montage von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen geeignet ist.

Kapitel 4 nutzt die vorhandenen Erkenntnisse zur Konzepterstellung sowie zur Abgrenzung des Betrachtungsfokus. Aufgearbeitet wird dabei die Vorgehensweise, sowohl zur Bewertung als auch Optimierung von Produktdesigns hinsichtlich deren automatisierter Montage, in abstrahierter Form. Zudem wird die Art des Montagesystems, dessen Leistungsbereich und die zu betrachtenden Prozessschritte erläutert, definiert und eingegrenzt.

Kapitel 5 beschreibt zunächst die Bausteine einer Methodik und widmet sich anschließend der Entwicklung eines generischen Einflussfaktorenmodells sowie einer generischen Bewertungsmatrix. Der Transfer bestehender sowie die Herleitung neuer Gestaltungsrichtlinien wird exemplarisch demonstriert. Die Methodenentwicklung basiert auf zuvor erwähnter abstrahierter Vorgehensweise. Bestehende und geeignete Ansätze finden in der Methodikentwicklung Anwendung.

Kapitel 6 dient zur Prüfung der Methodik im praktischen Anwendungsfall. Ausgangspunkt bilden dabei typische manuelle Montageprozesse der Automobilleitungssatzfertigung. Die Erprobung sowie die daraus resultierenden Ergebnisse werden nachfolgend, unter Berücksichtigung der Anforderungsdefinition in Kapitel 4, kritisch beleuchtet.

Kapitel 7 fasst die Erkenntnisse zusammen und arbeitet weiteren Forschungsbedarf heraus.

2 Stand der Technik

2.1 Begriffe und Definitionen

Automatisierung:

Automatisieren bezeichnet den Einsatz von Mitteln zur selbsttätigen Ausführung von Funktionen in einem System (DIN IEC 60060-351, S. 41).

Selbsttätig oder auch automatisch beschreibt, im Kontext eines Prozesses, das Abarbeiten oder Ablaufen desselben ohne menschliches Eingreifen (DIN IEC 60060-351, S. 30). Der Automat stellt hierbei ein künstliches System dar. Das Verhalten des Systems wird aufgrund des zugrundeliegenden Programms bestimmt. (DIN IEC 60060-351, S. 31) Die Integration von Automaten in eine technische Anlage ermöglicht die automatische Ausführung definierter Vorgänge. (Ross 2002, S. 11; DIN IEC 60060-351, S. 31ff) Im Bereich der Montage bedeutet Automatisierung die Umwandlung manueller Montageoperationen in selbsttätig ablaufende Montageprozesse ohne Werker (Reinhart 2014, S. 52).

Montieren:

Unter Montage oder Montieren wird das Zusammenbauen verschiedener Einzelteile zu einem Produkt verstanden (Lotter 2012a, S. 1; Almansa et al. 2016, S. 42). Nach DIN 8593-0 erfolgt das Montieren stets unter Anwendung von Fügeverfahren. Zusätzlich zum Fügen kann das Montieren jedoch auch Handhabungs-, Hilfs-, Mess- und Prüfvorgänge beinhalten. (Bäßler 1988, S. 17; Hoßmann 1992, S. 5; Schneider 1999, S. 9; DIN 8593-0, S. 2)

Einzelteil:

Ein Einzelteil definiert einen nicht weiter demontierbaren Gegenstand (DIN EN ISO 10209, S. 84).

Baugruppe:

Mehrere zusammengesetzte Einzelteile bilden eine Baugruppe. Diese dient zur Erfüllung einer oder mehrerer spezifischer Funktionen. (DIN EN ISO 10209, S. 6)

Bauelement:

Unter einem Bauelement wird ein Einzelteil oder eine Baugruppe mit Einzelteilcharakter verstanden (Gairola 1981, S. 1).

Montagegerechte Produktgestaltung:

Die montagegerechte Produktgestaltung verfolgt die Zielsetzung, mittels konstruktiver Maßnahmen, die Montage einer Baugruppe oder eines Produkts mit minimalem technologisch-wirtschaftlichem Aufwand zu realisieren. Dies inkludiert beispielsweise die Minimierung des Zeitbedarfs des Montageprozesses sowie die Reduzierung des dazu notwendigen Personalbedarfs. (Gairola 1981, S. 1; Bäßler 1988, S. 18; Hoßmann 1992, S. 5f)

Automatisierungsgerechte Produktgestaltung:

Unter einer automatisierungsgerechten Produktgestaltung wird eine konstruktive Gestaltung der Einzelteile und Bauelemente eines Produkts verstanden, um dieses mit geringstmöglichem Aufwand automatisiert herstellen zu können. Die automatisierungsgerechte Produktgestaltung unterstützt die automatisierte Montage basierend auf einer konstruktiven Gestaltung der Einzelteile zur Realisierung möglichst einfacher, kurz-dauernder sowie insgesamt möglichst weniger Montageschritte. (Hesse 2012b, S. 10f)

Gestaltungsrichtlinie:

Eine Gestaltungsrichtlinie, Gestaltungsregel (Hoßmann 1992), „Design Guideline“ (engl.) (Boothroyd 2005) oder „Design Rule“ (engl.) (Boothroyd 2005) bezeichnet eine, die konstruktive Gestaltung des Einzelteils, der Baugruppe oder des Produkts beeinflussende, Handlungsanweisung (Hoßmann 1992, S. 26ff; Boothroyd 2005, S. 221ff).

Forminstabil:

Die Begriffe biegeschlaff (Frankenhauser 1985), nicht formstabil (Schneider 1999) und forminstabil sind in der Literatur teils ungenügend voneinander abgegrenzt. Biegeschlaffe Einzelteile besitzen einen geringen Biege widerstand und beschreiben dadurch die Eigenschaften nicht formstabiler bzw. forminstabiler Einzelteile nicht gänzlich.

Forminstabile Einzelteile weisen die Eigenschaft der Gestaltänderung unter geringem externem Krafteinfluss, durch beispielsweise Schwerkraft, Manipulation oder Montage, auf. Die auftretenden Verformungen inkludieren Streckung, Stauchung, Biegung oder Volumenänderung. (Frankenhauser 1985, S. 23; Götz 1991, S. 21; Hoßmann 1992, S. 6; Schneider 1999, S. 6f)

Weitere relevante Begriffe werden in Anhang 9.1 erläutert.

2.2 Automobilleitungssätze

Im Folgenden wird das Produkt Automobilleitungssatz näher erläutert. Vorgestellt werden dabei dessen Grundfunktionen sowie typische Komponenten. Ferner werden die Themenfelder Varianz und Modularisierung sowie der Entwicklungs- und Fertigungsprozess erläutert. Darauf aufbauend erfolgt die Analyse vorhandener Automatisierung in der Leitungssatzfertigung.

2.2.1 Grundfunktion und Komponenten

Ein Leitungssatz, Kabelbaum oder Kabelsatz bezeichnet den Zusammenbau aus elektrischen Leitungen, elektromechanischen und mechanischen Anbauteilen. Der Automobilleitungssatz dient zur fehlerfreien Energie- und Signalübertragung zwischen den elektrischen und elektronischen Komponenten. Diese umfassen Sensoren, Aktoren und Steuergeräte, innerhalb eines Fahrzeugs. Die fehlerfreie Energie- und Signalübertragung muss entlang der gesamten Lebensspanne eines Fahrzeugs (15 bis 20 Jahre) sichergestellt sein. (Reif 2011, S. 450ff, 2014, S. 205f; Süß-Wolf et al. 2014, S. 514ff; Abel et al. 2016, S. 943ff; Babel 2019, S. 1ff; Trommnau et al. 2019, S. 387ff)

Aufgrund der Größe und des hohen manuellen Fertigungsanteils ist der Leitungssatz heutzutage eine der teuersten Komponenten und das teuerste Zukaufteil im Automobil (Heurung 2016, S. 32; Babel 2019, S. 2; Nguyen et al. 2021, S. 380).

Die Gruppe der elektromechanischen Anbauteile eines Leitungssatzes inkludiert unter anderem Steckverbinder, Kabelschuhe sowie Sicherungselemente. Steckverbinder schaffen die Verbindung zwischen den elektrischen und elektronischen Anbauteilen. Im Automobilbereich werden dafür die Enden elektrischer Leitungen typischerweise mit gecrimpten Kontakten bestückt und in die entsprechenden Kontaktgehäusekammern der Steckverbinder eingerastet.

Die Erfüllung zusätzlicher Dichtigkeitsanforderungen bedingt den Einsatz von Einzeladerabdichtungen (EAD) an den Leitungsenden sowie die Bestückung leerer Kammern mit Blindstopfen. (Reif 2011, S. 450ff, 2014, S. 205f; Süß-Wolf et al. 2014, S. 514ff; Abel et al. 2016, S. 943ff; Babel 2019, S. 1ff; Trommnau et al. 2019, S. 387ff; Nguyen et al. 2021, S. 379f)

Leitungsschutzelemente sowie Befestigungs- und Führungselemente bilden die Gruppe der mechanischen Anbauteile eines Leitungssatzes. Leitungsschutzelemente schließen Bandagierungen aus diversen Arten von Bändern oder Schläuchen, wie Klebebänder, Schrumpfschläuche, Geflechschläuche und Wellrohre ein. Clips, Halter und Kabelkanäle realisieren die Befestigung und Führung der Leitungen. (Reif 2011, S. 450ff, 2014, S. 205f;

Süß-Wolf et al. 2014, S. 514ff; Abel et al. 2016, S. 943ff; Babel 2019, S. 1ff; Trommnau et al. 2019, S. 387ff)

Abbildung 6 präsentiert eine Übersicht typischer Leitungssatzbauteile am Beispiel eines OM654 Motorleitungssatzes von Mercedes-Benz.

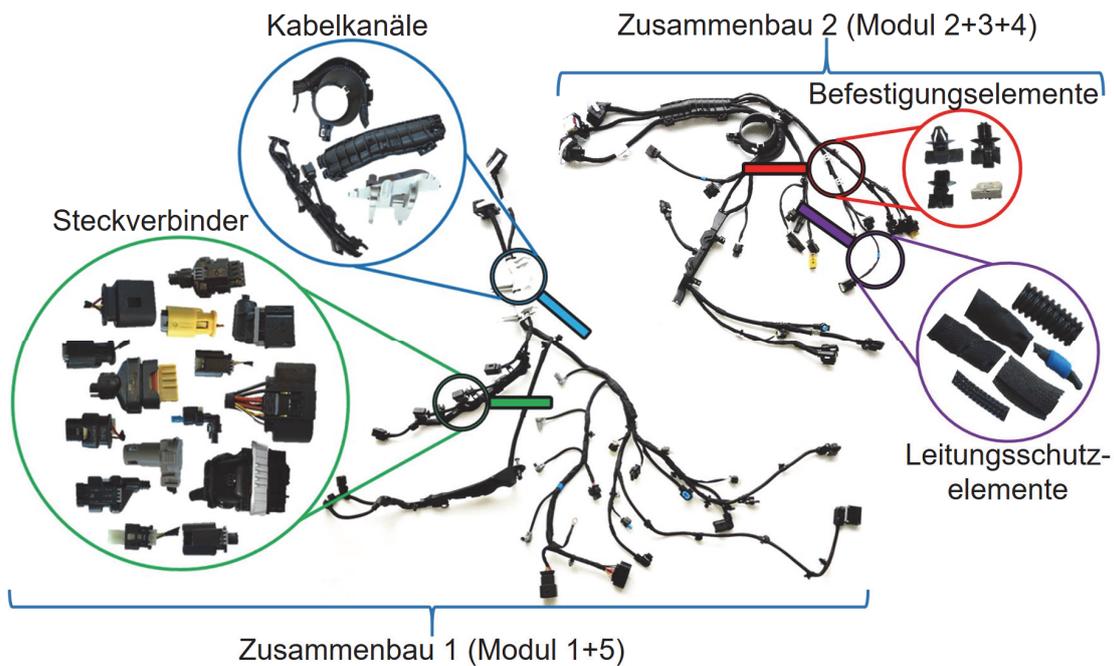


Abbildung 6: Motorleitungssatz (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 388)

2.2.2 Varianz und Modularisierung

In der Regel unterteilt sich der Gesamtleitungsumfang eines Fahrzeugs in die Hauptbereiche Fahrzeugleitungssatz und Motorleitungssatz. Im Gegensatz zum Fahrzeugleitungssatz ist der Motorleitungssatz direkt am Motorblock befestigt und extremeren Einflussfaktoren, wie hohen Temperaturen, Medien und Reibung, ausgesetzt. Dies bedingt den Einsatz zusätzlicher Dichtungs- und Schutzelemente.

Zahlreiche Konfigurationsmöglichkeiten im elektrischen Bereich eines Fahrzeugs erhöhen die Variantenzahl und den Umfang der Leitungssätze. (Reif 2014, S. 205f) Typische

Variantentreiber umfassen die Art des Antriebsstrangs, die Anzahl und Art der Assistenzsysteme sowie Infotainment- und Komfortausstattungen. Der Gesamtleitungsumfang kann eine theoretisch mögliche Anzahl von mehr als einer Milliarde Variationsmöglichkeiten aufweisen. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 514; Abel et al. 2016, S. 958) Beispielsweise ist der Leitungssatzzulieferer Dräxlmaier an der Entwicklung kundenspezifischer Leitungssätze (KSL) mit mehr als eintausend Varianten beteiligt (Klein 2019, S. 60). In Abhängigkeit der Ausstattungsvariante variiert das Leitungssatzgewicht. Ein Leitungssatz eines Audi A8 wiegt heutzutage beispielsweise 36 kg (A2MAC1 EURL 2020). Leitungssatzgewichte erreichen aber auch Bereiche von 60 kg (Ernst et al. 2014, S. 20; Heurung 2016, S. 32; Babel 2019, S. 1).

Die kundenspezifische Einzelfertigung eines Leitungssatzes für ein Fahrzeug ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht sinnvoll und wird in der Praxis auch nicht realisiert. Vielmehr erfolgt eine Unterteilung des Leitungssatzes in Verlegebereiche und eine weitere Untergliederung in Fertigungsmodule. Fertigungsmodule können teils vorgefertigt und anschließend zu KSLs der jeweiligen Verlegebereiche beim Leitungssatzlieferanten komplettiert werden.

Zusätzlich zu den kundenspezifisch konfigurierten Teilen des Gesamtleitungssatzumfangs eines Fahrzeugs existieren sogenannte Stufen- oder Teilleitungssätze. Stufenleitungssätze zeichnen sich durch größere Stückzahlen aus und können ebenfalls modular aufgebaut sein. Ein modularer Aufbau resultiert in der Komplettierung der Fertigungsmodule zu sogenannten Zusammenbauten. Abbildung 7 veranschaulicht die Variantenstruktur am Beispiel eines OM654 Motorleitungssatzes von Mercedes-Benz. Es ist zu beachten, dass spezifische Kombinationen in der Praxis nicht realisiert werden.

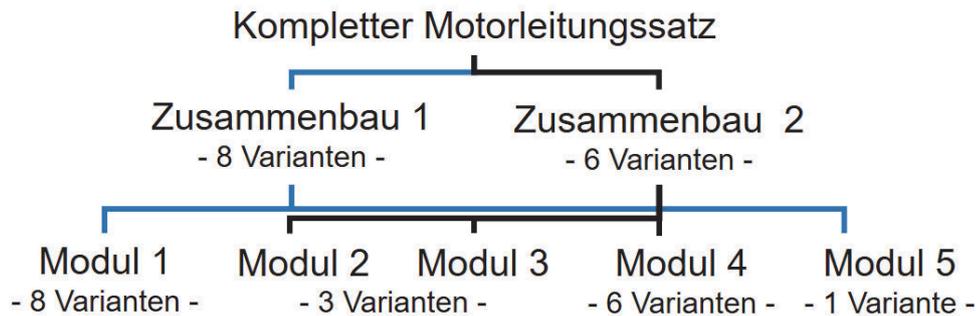


Abbildung 7: Motorleitungssatz Variantenstruktur (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 388)

Typische Verlegebereiche von Stufenleitungssätzen inkludieren Motorblock, Türen, Stoßfänger und Sitze. Dies ist unter anderem dem ausgelagerten Zusammenbau von Leitungssatz und Komponente, im Vergleich zum eigentlichen Fertigungsablauf des Fahrzeugs, geschuldet. (Reif 2014, S. 205f; Süß-Wolf et al. 2014, S. 514ff; Abel et al. 2016, S. 957ff; Tharma et al. 2018, S. 3024)

Zum tieferen Verständnis wird folgend der Entwicklungs- und Fertigungsprozess von Automobilleitungssätzen näher erläutert.

2.2.3 Entwicklung und Fertigung von Automobilleitungssätzen

Entwicklungsprozess von Automobilleitungssätzen:

Die Vernetzung und Lage der elektrischen und elektronischen Komponenten im Fahrzeug, die elektrische-elektronische Architektur (E/E-Architektur), bildet die Ausgangsbasis des Leitungssatzentwicklungsprozesses. (Reif 2011, S. 154) Resultierend aus der E/E-Architektur erfolgt die Erstellung von Schaltplänen zwischen allen elektrischen und elektronischen Komponenten. Generiert und differenziert werden dabei System- und Kabelschaltpläne. Systemschaltpläne visualisieren die elektrische Verschaltung zugehörig zu einer Systemfunktion. Kabelschaltpläne fassen die Leitungen entsprechend deren Zusammengehörigkeit hinsichtlich Leitungsverlegung zusammen und dienen der Dokumentation und Festlegung grundsätzlicher Daten wie Leitungsfarben, Querschnitte und Kontakte. Die Erstellung von Kabelschaltplänen setzt das Vorhandensein der

räumlichen Struktur des Leitungssatzes, die Topologie, zwingend voraus. (Abel et al. 2016, S. 959ff)

Die Festlegung der Topologie läuft in der Regel parallel und iterativ zur Schaltplanentwicklung ab. Erstellt wird dabei ein vollständiges 3D-Modell des Leitungssatzes im Fahrzeug. Der Konstruktionsprozess an sich umfasst die Festlegung aller Leitungssatzkomponenten und inkludiert damit die Auswahl und Konstruktion von Leitungsschutzelementen sowie Befestigungs- und Führungselementen wie Bändern, Schläuchen, Clips, Haltern und Kabelkanälen.

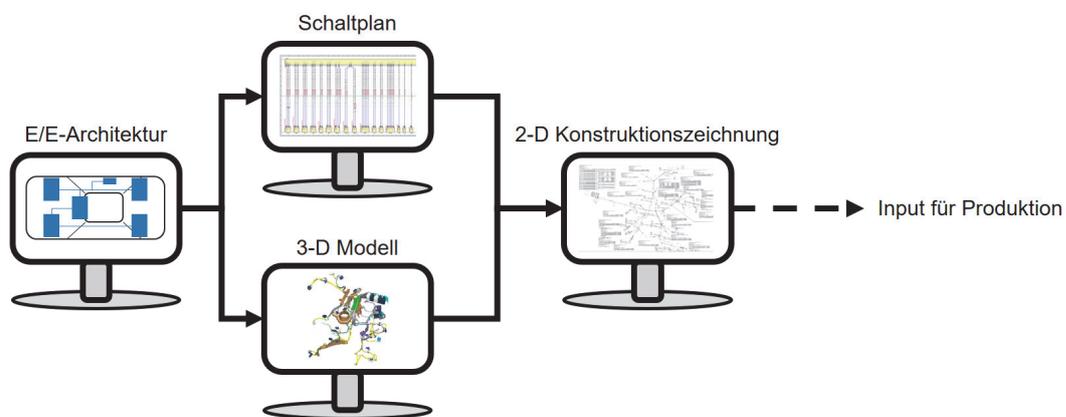


Abbildung 8: Leitungssatz Entwicklungsprozess

Aus der Kombination von Schaltplan und 3D-Modell erfolgt die Erstellung einer 2-D Konstruktionszeichnung, die Kabellängen, Leitungsfarben, Stecksysteme sowie die Belegung der Stecksysteme mit den jeweiligen Einzelleitungen dokumentiert. Die vollständige Übertragung aller Informationen auf die 2-D Konstruktionszeichnung resultiert in einer, vom Original Equipment Manufacturer (OEM), freizugebenden Zeichnung, der sogenannten Freigabezeichnung. Diese bildet die Grundlage des Leitungssatzproduktionsprozesses. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 520f; Abel et al. 2016, S. 972; Trommnau et al. 2019, S. 389).

Herausforderungen im Entwicklungsprozess:

Neben den allgemeinen Anforderungen im Automobilbereich wie Kosten- und Gewichtseinsparungen berücksichtigt der Entwicklungsprozess von Automobilleitungssätzen diverse weitere Anforderungen. Zu diesen zählen die Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse, wie Medien und Temperaturen, sowie die Fähigkeit Relativbewegungen von Bauteilen gegeneinander, ohne Beschädigung über die geforderte Lebensdauer, ausgleichen zu können. Weiterführende Anforderungen resultieren aus Fertigungs- und Montagevorgaben sowie aus Sicherheits- und Zertifizierungsvorschriften. Abbildung 9 führt typische, im Leitungssatzentwicklungsprozess zu berücksichtigende, Einflussfaktoren auf. (Reif 2011, S. 542ff, 2014, S. 206; Süß-Wolf et al. 2014, S. 521; Abel et al. 2016, S. 943; Heurung 2016, S. 32ff; Druhm et al. 2018, S. 56ff)

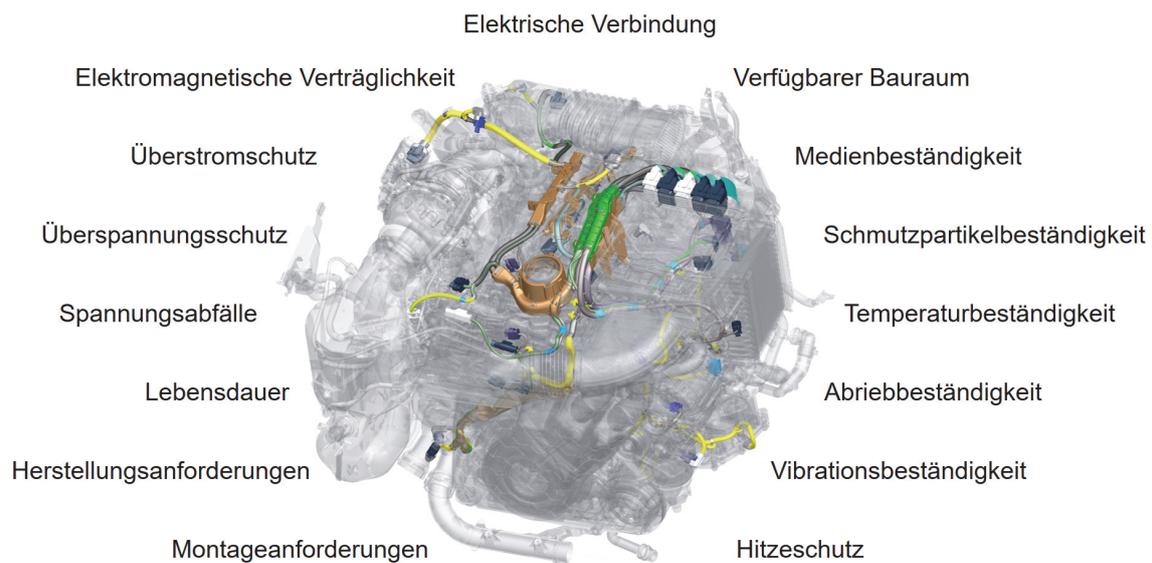


Abbildung 9: Anforderungen an einen Leitungssatz

Weitere Anforderungen ergeben sich aus der laufenden Integration angepasster elektronischer Funktionalitäten sowie die Beherrschung der Varianz. (Heurung 2016, S. 32)

Gestaltungsrichtlinien im Entwicklungsprozess bei Mercedes-Benz Cars:

Neben der zuvor erläuterten allgemeinen Vorgehensweise zur Entwicklung von Leitungssätzen berücksichtigt Mercedes-Benz Cars im Leitungssatzentwicklungsprozess auch Fertigungsprozessanforderungen. Diese dienen insbesondere zur Realisierung automatisierter Fertigungsprozesse auf am Markt vorhandener Anlagentechnik.

Die zu berücksichtigenden Gestaltungsrichtlinien basieren dabei typischerweise auf dem Transfer anlagenspezifischer Parameter in konkrete Auslegungskriterien zur Leitungssatzentwicklung. Innerhalb definierter Fertigungsmodule werden dabei unter anderem zulässige Minimal- und Maximallängen von Einzelleitungen, die Anzahl unterschiedlicher Kontaktteile und Einzeladerabdichtungen sowie zulässige Minimal- und Maximalnennquerschnitte von Einzelleitungen berücksichtigt. Ferner bedingt dies den Einsatz spezifischer Komponenten, wie beispielsweise spezifischer Steckverbinder, die auf den jeweiligen Anlagen verarbeitet werden können. Weitere Anforderungen umfassen die zulässige Vernetzungsstruktur innerhalb definierter Teilbereiche eines Fertigungsmoduls sowie die dazugehörige Belegung der Kontaktkammern der Steckverbinder.

Eine typische Vorgehensweise zur Berücksichtigung der anlagenspezifischen Auslegungskriterien besteht in der Aufspaltung eines zu fertigenden Leitungssatzes in automatisiert fertigbare und nicht automatisiert fertigbare Fertigungsmodule, wie ebenfalls Trommnau et al. (2020b, S. 53) beschreiben. Die automatisiert fertigbaren Fertigungsmodule fassen dabei, zu möglichst hohen Anteilen, die anlagenspezifischen Parameter erfüllenden Umfänge zusammen. Die nicht automatisiert fertigbaren Fertigungsmodule fassen die restlichen, nicht anlagenspezifischen Parameter erfüllenden, Umfänge zusammen, beispielsweise resultierend aufgrund elektrischer Anforderungen. Diese Vorgehensweise ist für eine wesentliche Veränderung des Produkts Leitungssatz im Vergleich zu früheren Leitungssatzgenerationen verantwortlich.

Fertigungsprozess von Automobilleitungssätzen:

Europäische OEMs beziehen das Zulieferprodukt Automobilleitungssatz aus Ländern wie Rumänien, Polen, Serbien, Tunesien und Marokko (Spahr 2017, S. 6; Fritz Dräxlmaier 2020; LEONI AG 2020; Trommnau et al. 2020a, S. 27ff). Die Leitungssatzfertigung ist dabei nach wie vor von einem hohen manuellen Montageaufwand geprägt, der nach Klein (2019, S. 60) etwa 80 % des Zeitaufwands ausmacht. (Janouch 2011; Heurung 2016, S. 32).

Der Fertigungsprozess ist in die sechs Hauptabschnitte Vorfertigung, Supermarkt, Montagelinie, Prüfbereich, Verpackung sowie Fertigwarenlager unterteilbar. Die zur Produktion notwendigen Inputs setzen sich aus der Bestellanforderung des OEMs, den notwendigen Daten wie beispielsweise Lastenheft, Zeichnungen und Stücklisten, den elektrischen Leitungen sowie allen notwendigen elektromechanischen und mechanischen Anbauteile, der zu fertigenden Leitungssätze, zusammen (siehe Abbildung 10).

Unterschiede im Fertigungsprozess ergeben sich aufgrund der Art des Leitungssatzes sowie des Fertigungskonzepts des Lieferanten. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 521ff; Abel et al. 2016, S. 956ff; Sharma et al. 2018, S. 335ff; Trommnau et al. 2019, S. 389; Nguyen et al. 2021, S. 379f)

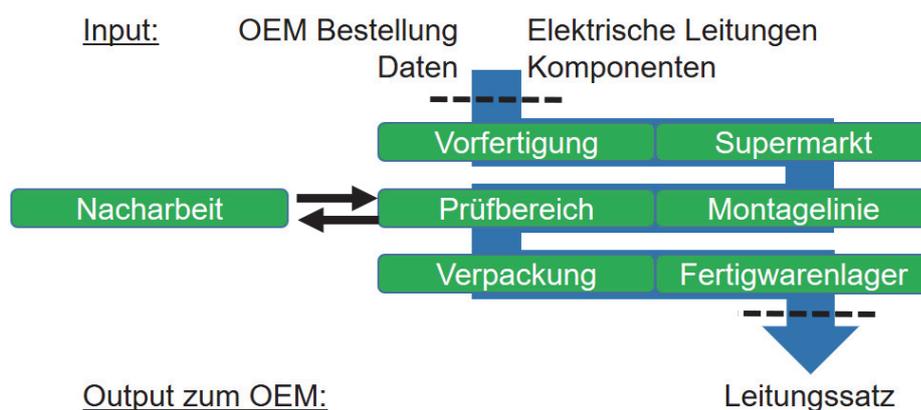


Abbildung 10: Leitungssatzproduktionsprozess (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 389)

Zu den typischen Leitungsbearbeitungsschritten der Vorfertigung zählen das Schneiden und Abisolieren, falls nötig das Bestücken mit EADs, das Anschlagen von Kontakten sowie das Verdrillen von Einzelleitungen. Weitere Bearbeitungsschritte umfassen das Lötens und Aufbringen von Schrumpfschläuchen, wie es für die Herstellung von Kabelschuhen üblich ist. Auch Montageoperationen wie die Vormontage von Steckverbindern, das Einsetzen von Blindstopfen oder das Ausstanzen von Dichtmatten erfolgen im Bereich der Vorfertigung. Notwendige Materialien und Anbauteile beziehen die Bearbeitungsstationen, meist mittels Kanban-System, aus dem Wareneingangslager.

Die Vorfertigung dient ebenfalls zur Herstellung von Teilmodulen oder Modulen. Dafür erfolgt die Bestückung der Steckverbinderkontaktkammern mit Einzelleitungen und deren anschließende Bündelung beispielsweise mittels Klebeband. In der Vorfertigung hergestellte Komponenten werden entweder in Zwischenpuffern gelagert oder im Supermarkt der Montagelinie bereitgestellt. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 523ff; Abel et al. 2016, S. 956; Trommnau et al. 2019, S. 389)

In unmittelbarer Nähe der Montagemitarbeiter befindet sich der Supermarkt. Dieser dient als Materiallager der Montagelinie mit allen notwendigen Materialien und Anbauteilen zur Komplettierung des Leitungssatzes. Dazu gehören sowohl in der Vorproduktion hergestellte Komponenten als auch Anbauteile direkt aus dem Wareneingangslager. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 523)

Die Montagelinie selbst stellt den Bereich entlang der Leitungssatzfertigung mit dem höchsten Mitarbeiterinsatz und dem größten Zeitanteil dar. Dieser beträgt laut Heisler et al. (2020, S. 193) und Nguyen et al. (2021, S. 380) bis zu 70 % der Gesamtproduktionszeit. Der manuelle Anteil beträgt hierbei bis zu 90 %.

Die Komplettierung des Leitungssatzes erfolgt an sogenannten Montagebrettern, die fortlaufend entlang der einzelnen Montagestationen rotieren. Typischerweise sind die Montagebretter mit zweidimensionalen Fertigungszeichnungen, Steckergehäuseaufnahmen, Clipaufnahmen und Montagegabeln bestückt. Das Montagelinienlayout, kreisförmig oder geradlinig, ist sowohl von der Art und Größe des Leitungssatzes als auch von dem Fertigungskonzept abhängig.

Montageaufgaben an der Montagelinie umfassen das Komplettieren von Steckergehäusen sowie das Einstecken derselben in deren entsprechende Aufnahmen auf dem Montagebrett. Weitere Aufgaben sind das Verlegen von elektrischen Leitungen entlang deren vorgegebener Verlegewege. Dies erfolgt, basierend auf der entsprechenden zweidimensionalen Fertigungszeichnung, entlang der auf dem Montagebrett befestigten Montagegabeln. Selbige Tätigkeiten werden ebenso für das Platzieren vorgefertigter Teilmodule auf dem Montagebrett durchgeführt. Weitere Aufgaben umfassen das Einstecken von elektrischen Leitungen in die Kontaktkammern der Steckergehäuse, das Ummanteln und Bündeln von Leitungen beispielsweise mittels Klebeband, Schläuchen oder Wellrohren (siehe Abbildung 6) sowie die Befestigung mechanischer Anbauteile wie Clips, Kabelkanäle und Halter am Leitungssatz. Die Komplexität einzelner Montageaufgaben exemplarisch aufzeigend bildet Abbildung 11 die Komponenten eines Motorsteuergerätesteckers ab.



Abbildung 11: Komponenten eines Motorsteuergerätesteckers (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 389)

Wiederum abhängig von der Art des Leitungssatzes und des Fertigungskonzepts erfolgen weitere Tätigkeiten wie die Anwesenheitskontrolle von Clips, Schäumprozesse sowie die Montage von Sicherungsboxen. (Reif 2011, S. 450ff, 2014, S. 205f; Süß-Wolf et al. 2014,

S. 521ff; Abel et al. 2016, S. 956ff; Sharma et al. 2018, S. 335ff; Trommnau et al. 2019, S. 389f)

Im Anschluss an die Montagelinie gliedert sich der Prüfbereich. Eine 100 % Funktions- und Vollständigkeitsprüfung auf speziellen Prüftischen, auf die der Leitungssatz aufgelegt wird, entspricht dem Regelfall. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 524; Abel et al. 2016, S. 958) Präventivmaßnahme gegen Beschädigung und Verschleiß der Steckverbinderkontakte ist die Verwendung gesonderter Prüfaufnahmen. Diese berühren die Kontakte ohne vollständiges Einstecken. (TSK Prüfsysteme GmbH 2020) Die Prüfung selbst inkludiert mindestens die elektrische Funktionsprüfung (Bi et al. 2018, S. 2705). Weitere Prozesse umfassen die Überprüfung auf Vollständigkeit, die Verriegelungsprüfung aller Sekundärverriegelungen sowie bei Dichtigkeitsanforderungen die Leckagensuche mittels Druckluftbeaufschlagung der Steckverbinder. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 524; Abel et al. 2016, S. 958; Babel 2019, S. 126ff; Nguyen et al. 2021, S. 379f). Im Fehlerfall ist ein dokumentierter Nacharbeitsprozess sowie die erneute Prüfung des reparierten Leitungssatzes obligatorisch. Die Nacharbeit bedingt typischerweise die Verwendung von Spezialwerkzeug sowie das Entfernen und wieder Montieren bzw. Anbringen diverser Anbauteile und Klebeband. (Trommnau et al. 2019, S. 389)

Finale Schritte der Leitungssatzfertigung bestehen aus der Markierung mittels Etikettierung, der Verpackung sowie der Lagerung im Fertigwarenlager und des Versands des Leitungssatzes. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 524f)

2.2.4 Automatisierung in der Leitungssatzfertigung

Der Anteil automatisierter Fertigungsschritte variiert signifikant zwischen den Bereichen Vorfertigung und Montage. Prozessschritte wie das Ablängen, das Abisolieren, das Aufstecken von EADs, das Anbringen von gecrimpten Kontakten sowie das Verdrillen von Einzelleitungen erfolgen heutzutage typischerweise automatisiert. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 522ff; Abel et al. 2016, S. 956; Komax Holding AG 2020; Nguyen et al. 2021, S. 379f)

Zur Situationsanalyse listet Tabelle 2-1 am Markt verfügbare Kabelverarbeitungsanlagen sowie deren Prozessschritte auf. In Reflexion von Kapitel 2.2.3 ermöglicht eine entsprechende Leitungssatzkonzeption die automatisierte Herstellung von Leitungssätzen bis zur vollständigen Kontaktkammerbestückung. Alle aufgeführten Kabelverarbeitungsanlagen sind dem Bereich der Vorfertigung zuzuordnen.

Im Gegensatz zur Vorfertigung beträgt der manuelle Prozessschrittanteil am Montagebrett bis zu 90 % (Janouch 2011; Süß-Wolf et al. 2014, S. 523; Heurung 2016; Nguyen et al. 2021, S. 380). Einen Zwischenbereich bilden handgeführte Bündelgeräte zum Setzen von Kabelbindern oder Klebeband (HellermannTyton GmbH 2020; Kabatec GmbH & Co. KG 2020).

Die finale Funktions- und Vollständigkeitsprüfung erfolgt, bis auf Handhabungsschritte wie dem Auflegen des Leitungssatzes auf den Prüftisch, visueller Prüfaufgaben sowie dem Einstecken von Steckergehäusen oder Anbauteilen in spezifische Aufnahmen, größtenteils automatisiert (Bi et al. 2018, S. 2705; Babel 2019, S. 126ff; Trommnau et al. 2019, S. 389f; Nguyen et al. 2021, S. 380).

Tabelle 2-1: Kabelverarbeitungsanlagen und Prozessschritte (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 390)

	Ablängen	Abisolieren	Einzeladerabdichtung aufschieben	Kontakt anschlagen	Verdrillen	Einzelleitungen einstecken	Verdrillte Leitungen einstecken
Komax „Iota“	x						
Schleuniger „Cut-Series“	x						
ramatech „RS“	x						
Schleuniger „UniStrip“		x					
Sai Paradise Machine Tools „SM“		x					
Komax „Kappa“	x	x					
Schleuniger „Strip-Series“	x	x					
ramatech „Speedy“	x	x					
Sai Paradise Machine Tools „Strip-Series“	x	x					
Schleuniger „UniCrimp“				x			
Schleuniger „StripCrimp“		x		x			
Sai Paradise Machine Tools „CSC“	x	x		x			
Komax „Alpha“ / „Gamma“	x	x	x	x			
Schleuniger „CrimpCenter“	x	x	x	x			
Komax „bt“					x		
Schleuniger „WireTwister 3300“					x		
Komax „Alpha 488 S“	x	x	x	x	x		
Komax „Sigma 688 ST“	x	x	x	x	x		
Komax „Zeta“ / „Omega“	x	x	x	x		x	

Herausforderungen der automatisierten Fertigung:

Im Wesentlichen begründen sich die Herausforderungen der automatisierten Leitungsfertigung in der hohen Variantenvielfalt, dem forminstabilen Charakter einiger Komponenten wie beispielsweise der Leitungen oder des Klebebands, der Komplexität sowie der beträchtlichen Teileanzahl innerhalb eines Leitungssatzes. Trotz insgesamt

hoher Stückzahlen hemmt insbesondere die Herstellung von KSLs die automatisierte Fertigung. Als weitere Problematik legt die Analyse bestehender Kabelverarbeitungsanlagen (siehe Tabelle 2-1) deren geringe Flexibilität hinsichtlich des Einsatzgebietes sowie einen grundsätzlichen Mangel an technischen Automatisierungslösungen offen. (Schlaich 1988, S. 35; Janouch 2011; Süß-Wolf et al. 2014, S. 525; Hold 2018, S. 38; Klein 2019, S. 60; OICA 2020; Nguyen et al. 2021, S. 380)

Veränderte Produktanforderungen sowie die Forderung nach Rückverfolgbarkeit und Dokumentation von Prozessschritten bilden die Prämisse zur Erhöhung des Automatisierungsgrads der Leitungssatzfertigung. Zugleich bestärken Themen wie die Miniaturisierung von Leitungen und Kontakten und der damit verbundenen Beschädigungsgefahr während der Montage diese Vorgehensweise. (Abel et al. 2016, S. 953f; Druhm et al. 2018, S. 60; Hold 2018, S. 39; Kuhn et al. 2019; Trommnau et al. 2020a; Nguyen et al. 2021, S. 380) Erweiternd dazu stellen Trommnau et al. (2020a) eine umfassende Aufarbeitung der Gründe für die Automatisierung in der Leitungssatzfertigung und –montage bereit. Die Ergebnisse korrelieren dabei eindeutig mit der von Kuhn et al. (2019) erarbeiteten Fallstudie.

Im Folgenden wird die zuvor erläuterte Problematik bestehender Kabelverarbeitungsanlagen sowie der Mangel technischer Automatisierungslösungen näher beleuchtet.

Starr automatisierte Kabelverarbeitungsanlagen (siehe Tabelle 2-1) ziehen schon bei einfachen Änderungen meist aufwändige manuelle Rüst- und Einstellprozesse nach sich. Exemplarisch aufzuführen sind die Maßkontrolle des abisolierten Leitungsendes, die Crimpkraft und –höhenüberprüfung, der Kontakt-Auszugstest sowie die Erstellung von Schliffbildern der Crimpverbindung. (Süß-Wolf et al. 2014, S. 518; Babel 2019, S. 28f; Trommnau et al. 2019, S. 390)

Weitere Einschränkungen liegen in der zu verarbeitenden Variantenvielfalt begründet. Limitationen existieren dabei bezüglich Leitungsanzahl sowie deren Farben und Durchmesser. Korrelierend dazu verändert sich die Anzahl benötigter EADs sowie der Kontakte. Anlagenerweiterungen mit zusätzlichen Bearbeitungsstationen werden typischerweise aufgrund des ungünstigen Kosten-/ Nutzenverhältnisses negiert. Gleiches

gilt für Anlagen, die Prozessschritte von der Kabeltrommel bis hin zum Bestücken der Kontaktgehäuse automatisiert ausführen. (Trommnau et al. 2019, S. 390)

Hinzu kommt, dass für das automatisierte Einstecken verdrellter Leitungen in die Kontaktkammern der Steckverbinder heutzutage keine Anlagen am Markt existieren (siehe Tabelle 2-1). Verdrehte Leitungen bedingen daher manuelle Steckvorgänge. Die Modulkonzeptionierung bestimmt dementsprechend die Möglichkeit sowie den Anteil einer automatisierten Kontaktkammerbestückung.

Auch Fädelprozesse ziehen derzeit manuelle Montageprozesse nach sich. Geflechtsschläuche, Tüllen, Wellrohre und Schrumpfschläuche sind hierbei als typische Vertreter zu erwähnen. (Trommnau et al. 2019, S. 390)

2.3 Forschungsanalyse und angrenzende Forschungsgebiete

Zur umfassenden Aufarbeitung des Forschungsumfelds wird zunächst themenbezogene als auch angrenzende Forschung analysiert. Anschließend werden die betroffene Montageaufgabe sowie die dabei verwendeten Leitungssatzkomponenten in Kombination mit relevanter Forschung zusammenfassend dargestellt.

In den 80er und 90er Jahren erfolgt die Ermittlung der zeitintensivsten Prozesse in der Leitungssatzfertigung. Die Konfektionierung von Leitungen, das Kabelverlegen auf dem Montagebrett sowie das Bündeln von Einzelleitungen mit Klebeband stellen sich als Fokusgebiete heraus. (Schlaich 1988, S. 33; Schmitt 1999, S. 23) Abbildung 12 zeigt die Übersicht der Prozesszeitanteile. Neuere öffentlich zugängliche Studien sind dazu nicht verfügbar. Vereinzelt Abgleiche, wie mit Bauer et al. (2015), bestätigen dennoch Einzelwerte. Beispielsweise beansprucht das Bündeln von Einzelleitungen teilweise mehr als 30 % des Prozesszeitanteils der Leitungssatzfertigung (Bauer et al. 2015, S. 2).

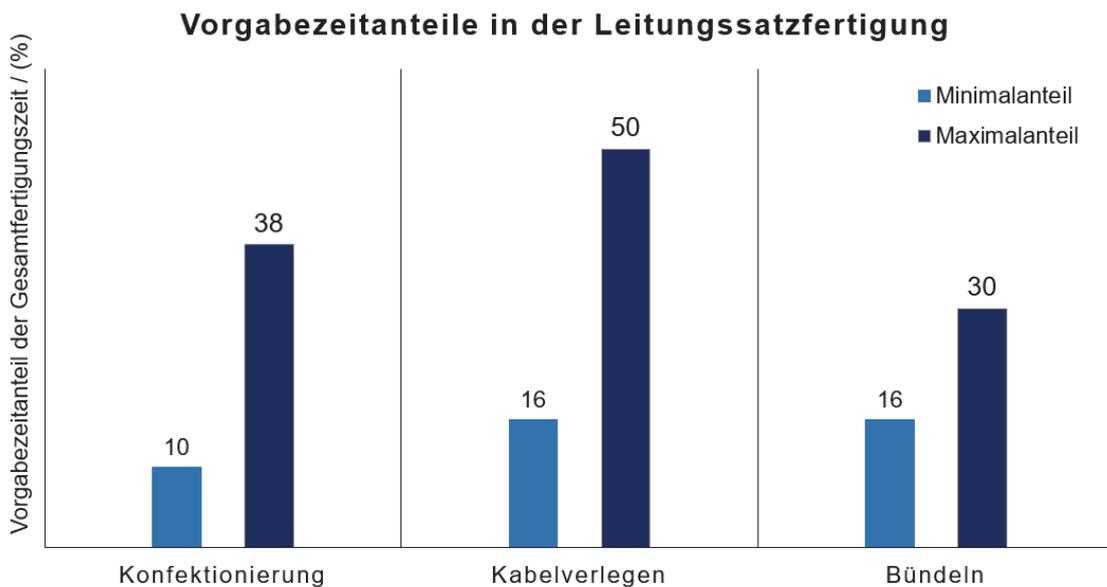


Abbildung 12: Prozesszeitanteile in der Leitungssatzfertigung (Schlaich 1988, S. 33; Schmitt 1999, S. 23)

Da automatisierte Anlagen heutzutage hauptsächlich im Bereich der Vorfertigung eingesetzt werden und Anlagen, wie eine Komax „Omega“, eine automatisierte Prozessfolge bis hin zur Bestückung von Kontaktkammern realisieren ist ein reduzierter Prozesszeitanteil im Bereich Konfektionierung sowie für das Kabelverlegen auf dem Montagebrett anzunehmen. Entsprechend steigt der prozentuale Prozesszeitanteil zum Bündeln der Leitungen. (Trommnau et al. 2019, S. 390)

Zur gesamtheitlichen Übersicht im Bereich Automatisierung der Leitungssatzfertigung erfolgt die Aufarbeitung bestehender Forschung und Konzepte. Eine umfassende Übersicht stellen dazu (Trommnau et al. 2019) und (Nguyen et al. 2021) bereit. Aufgrund des hohen manuellen Montageanteils am Montagebrett werden insbesondere direkt damit verknüpfte Ansätze im Folgenden analysiert.

Erste Konzepte zur automatisierten Leitungssatzfertigung erarbeiten Hölzl (1985) und Schlaich (1988) am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) sowie am Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation (IAO). Im Laborversuch wird das automatisierte Konfigurieren eines Montagebretts mit Verlegehilfen und Steckeraufnahmen, die Bestückung mit Schneidklemmverbindern, das Verlegen von Leitungen und Bündeln derselben mit Kabelbindern sowie das Anschlagen

von Steckverbindern mit anschließender Entnahme des Leitungssatzes vom Montagebrett automatisiert dargestellt. (Hölzl 1985, S. 189ff; Schlaich 1988, S. 85ff) Es gilt dabei zu beachten, dass Schneidklemmverbinder in der Regel nicht mehr im Automobilleitungssatz eingesetzt werden.

Aufbauend auf diesen Arbeiten entwickelt Emmerich (1992, S. 107ff) eine Pilotanlage zum beidseitigen Abisolieren und Anschlagen von gecrimpten Kontakten sowie zum Einstecken derselben in die Kontaktkammer des Steckverbinders.

Bis heute ist das automatisierte Verlegen von Leitungen auf einem Montagebrett Forschungsgegenstand (Klein et al. 2016). Der Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) realisiert mithilfe eines Roboters das automatisierte Greifen, Verlegen und Einstecken von gecrimpten Einzelleitungen auf einem Montagebrett. Die Verlege- und Steckaufgabe erfolgt unter Benutzung eines eigens entwickelten und im 3-D Druckverfahren hergestelltem Greifsystems sowie mittels handgeführter Bahnplanung. (Heisler et al. 2017b, S. 188ff)

Schmitt (1999) widmet sich der automatisierten Bündelung von Einzelleitungen mit Klebeband am Fraunhofer IPA. KABATEC präsentiert im Jahr 2018 einen Roboter mit Endeffektor zum Setzen von Spot-Tapes. (Einert et al. 2013; Trommnau et al. 2019, S. 391) Kobayashi et al. (2014) stellen einen Algorithmus zur Optimierung der Bündelungsrute sowie der Anpassung des Layouts des Montagebretts bereit. Trommnau (2019) optimiert den derzeitigen Bündelungsmechanismus hinsichtlich dessen Platzbedarfs. Ibáñez et al. (2021) und Palomba et al. (2021) nutzen die Mensch-Roboter-kollaboration zur Prozesszeitreduzierung des Bündelprozesses.

Um die Korrektheit von Montagevorgängen oder die Anwesenheit von Anbauteilen in der Leitungssatzfertigung sicherzustellen, erarbeiten Hesse (2012a, S. 238ff) und Beck et al. (2016) Konzepte unter Zuhilfenahme optischer Erkennungssysteme oder Näherungssensoren.

Cankut (2011) stellt einen theoretischen Ansatz einer automatisierten Leitungssatzfertigung unter Verwendung eines Crimpautomaten sowie mehreren Robotern vor. Ein Crimpautomat übernimmt die Fertigungsschritte ablängen, abisolieren sowie die Bestückung der Leitungsenden mit gecrimpten Kontakten. Die Roboter bestücken das

Montagebrett mit Steckergehäusen, verlegen und bandagieren die Leitungen und entnehmen den Leitungssatz anschließend vom Montagebrett. (Cankut 2011, S. 30f) Die praktische Validierung des theoretischen Ansatzes steht jedoch noch aus.

Heisler et al. (2017a; 2020) stellen konzeptuelle Ansätze mittels Funktionserweiterung bestehender Crimpautomaten oder alternative Umhüllungsprozesse von Leitungsbündeln mittels Sprühprozess vor.

Webb et al. (2010) erarbeiten einen grundlegend produktverändernden Ansatz mittels der Substitution von Rundleitern durch Flachleiter, erkennen dabei aber fundamentale Schwierigkeiten bezüglich der Herstellung der Verbindung zwischen den Komponenten und der daraus resultierenden physischen Architektur des Flachleiters. Als Schlussfolgerung empfehlen Webb et al. (2010) daher nur eine modulare Substitution.

Resümierend listet Tabelle 2-2 typische manuelle Montagevorgänge am Montagebrett der Leitungssatzfertigung auf und verknüpft diese mit den jeweiligen Hauptkomponenten sowie dazugehöriger Forschung. Kapitel 2.2.3 erläutert dazu ausführlich die am Montagebrett ausgeführten Montageaufgaben in Verbindung mit deren jeweiligen Komponenten. Ferner dient Abbildung 13 zur Illustration ausgewählter Montageaufgaben mittels exemplarischer Darstellung eines Montagebretts, bestückt mit einer zweidimensionalen Fertigungszeichnung, Steckergehäuseaufnahmen sowie Montagegabeln.

Erweiternd erfolgt die Verknüpfung angrenzender Forschung wobei sich deren Anforderungen stark von den Anforderungen an den Leitungssatz im Fahrzeug oder dessen Fertigung unterscheiden können. (Trommnau et al. 2019, S. 391)

Tabelle 2-2: Verknüpfung manueller Montageschritte am Montagebrett und dazugehöriger Forschung (in Anlehnung an Trommnau et al. 2019, S. 391; Nguyen et al. 2021, S. 380ff)

Aufgabe	Komponente	Forschung	(Pilot) Station	Angrenzende Forschung
Verlegen	Leitung	Hözl 1985; Schlaich 1988; Heisler et al. 2017b	Hözl 1985; Schlaich 1988; Heisler et al. 2017b	RITTAL GmbH & Co. KG 2017; System Automazione Srl 2021; BJB GmbH & Co. KG 2021; Warnecke et al. 1993; Busi et al. 2017
Einstecken	Leitung (mit Kontakt)	Emmerich 1992; Heisler et al. 2017b; Tunstel et al. 2020	Emmerich 1992; Heisler et al. 2017b; Tunstel et al. 2020	Nakagaki et al. 1996; Kim 2005; Chen et al. 2016; Song et al. 2017; Gregorio et al. 2018; Yumbra et al. 2020
Platzieren	Steckergeh.	Schlaich 1988	Schlaich 1988	Spenrath 2021
Platzieren	Vormontierter Leitungssatz	-	-	Acker et al. 2005; Koo et al. (2008; 2010); Jiang et al. (2010; 2015); Tamada et al. 2013; Shah et al. (2016; 2018); Lv et al. 2017 Hinze et al. 2020; Wnuk et al. 2020
Zus.-bau (siehe Abbildung 11)	Steckverb.	-	-	Axmann Technology AG 2021
Bündeln	Kabelbinder	Schlaich 1988	Shenzhen Tech. Co., Ltd. 2018; HellermannTyton GmbH 2020; Schlaich 1988	-
Bündeln	Klebeband	Schmitt 1999; Kobayashi et al. 2014; Trommnau 2019; Ibáñez et al. 2021; Palomba et al. 2021	Ünitek Elektrik A.Ş. 2018; Schmitt 1999; Ibáñez et al. 2021; Palomba et al. 2021	Yuan et al. 2016
Bündeln	Wellrohr, Schlauch	-	-	Liebsch et al. 2017; Heisler et al. 2020
Zus.-bau	Fixierelement, Kabelkanal	-	-	RNA Automation Ltd 2017
Prüfung	Leitungssatz	Hesse 2012a, S. 238ff; Beck et al. 2016	-	Denecke et al. 2021; True Soltec Co., Ltd 2021

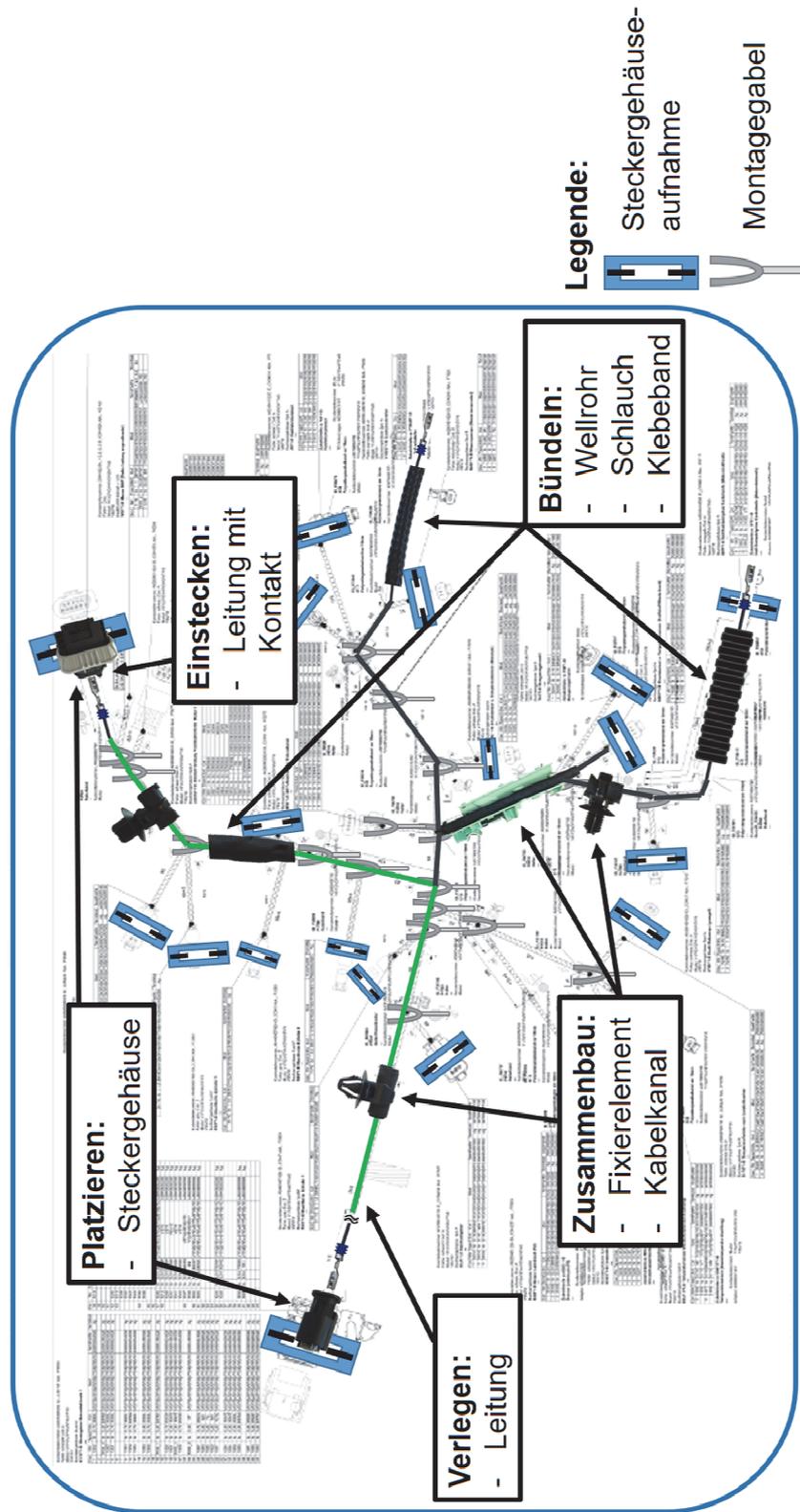


Abbildung 13: Exemplarische Darstellung eines Montagebretts mit zweidimensionaler Fertigungszeichnung und ausgewählten manuellen Montageschritten

3 Automatisierungsgerechte Produktgestaltung – Grundlagen

Die Wahl des Produktdesigns kann unterschiedliche Ziele, wie die Vereinfachung der Herstellbarkeit, Montagefähigkeit oder automatisierten Montagefähigkeit, verfolgen. Weitere Fokusgebiete betreffen die Zuverlässigkeit, Wartungsfreundlichkeit, Recyclbarkeit sowie Qualität des Produkts.

„Design for X“ bezeichnet die Ausrichtung des Produktdesigns auf ein Fokusgebiet. (Gatenby et al. 1990, S. 2f; Huang 1996, S. 2f; Chiu et al., S. 171f; Vajna et al. 2018, S. 33) Abbildung 14 illustriert die von Eskilander (2001, S. 25) aufgearbeitete Zuordnung der Produktdesign Fokusgebiete. Da auch im deutschen Sprachgebrauch die Verwendung der englischen Begrifflichkeiten in diesem Themengebiet üblich ist, wird dies beibehalten.

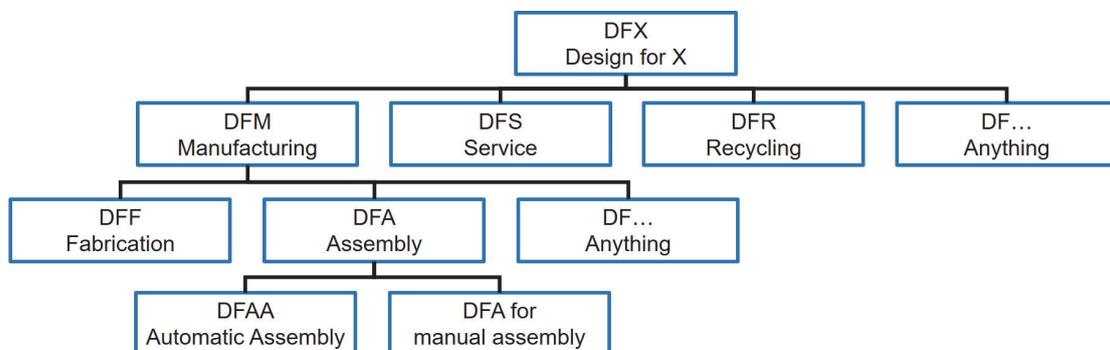


Abbildung 14: Design for X (in Anlehnung an Eskilander 2001, S. 25)

Die Herstellung industrieller Produkte bedingt meist den Zusammenbau derselben aus verschiedenen Einzelteilen. Ziel einer effizienten Produktion ist dabei die Minimierung des Fertigungsaufwands. Zur Zielerreichung gilt es, sowohl die Anzahl an Montageschritten als auch deren Zeitanteile so niedrig wie möglich zu halten. (Hesse 2012b, S. 9ff) Dies führt zur Steigerung der Produktivität und Reduzierung der Fertigungszeit. Weitere Ziele

der Produktion umfassen die Erleichterung menschlicher Arbeit, das Senken von Kosten und die Optimierung der Qualität. Eine Möglichkeit all diese Ziele zu erreichen, besteht in der Substitution manueller Prozessschritte durch Automatisierung. (Heinrich et al. 2015, S. 5f)

Obwohl heutzutage die Komponenten eines Produkts meist automatisiert gefertigt werden, ist der anschließende Montageprozess in der Regel von einem hohen manuellen Aufwand geprägt. (Boothroyd 2005, S. 1ff; Lotter 2012a, S. 1ff) Das Produktdesign beeinflusst entscheidend sowohl Fertigungs- als auch Montageprozesse, aufgrund der Anzahl und Gestalt der Komponenten oder der Wahl der Werkstoffe, und legt ebenfalls einen wesentlichen Anteil der späteren Produktkosten fest. (VDI 2235, S. 3ff; Boothroyd 1994, S. 1f)

Um eine wirtschaftlich automatisierte Montage zu realisieren, muss sowohl das Produktdesign als auch das Design der Einzelteile gezielt dafür ausgelegt werden. Für den Menschen vermeintlich einfache Montageaufgaben können die Prozessautomatisierung vor komplexe Aufgaben stellen. Beispielsweise bedingt die Erkennung und Handhabung eines leicht asymmetrischen Teils die Verwendung eines Bilderkennungssystems zur anschließenden lagerichtigen Montage desselben. (Boothroyd 2005, S. 257f) Die automatisierungsgerechte Produktgestaltung beschäftigt sich daher mit der Fragestellung wie sowohl die Einzelteile als auch das Produkt konstruktiv gestaltet sein müssen, um eine möglichst einfache automatisierte Montage zu realisieren. (Hesse 2012b, S. 10f) Hierfür werden im nachfolgenden Abschnitt verbreitete Design for Assembly Methoden betrachtet.

3.1 Methoden zur montagegerechten Produktgestaltung

Im industriellen Einsatz sind hauptsächlich fünf Design for Assembly Methoden verbreitet und erprobt. Zu diesen zählen die Boothroyd & Dewhurst Methode (Boothroyd 1994, S. 505ff), die Lucas Methode (Swift 1989; Sealy et al. 1992), die Hitachi-AEM (Miyakawa et al. 1990; Ohashi et al. 2002), die Westinghouse bzw. Modified Westinghouse Methode (Sturges 1989) sowie die ProKon Methode (MTM-Vereinigung e. V. 2014). (Leaney 1996,

S. 47; Beiter et al. 2000, S. 2; Klein et al. 2008; Desai et al. 2010, S. 92ff; Esterman et al. 2010; Ezpeleta et al. 2019, S. 1f). Im Folgenden werden die Methoden sowie die berücksichtigten Einflussfaktoren zur Bewertung der Montagegerechtheit aufgeführt und erläutert.

3.1.1 Boothroyd & Dewhurst Methode

Geoffrey Boothroyd legt in den frühen 70er Jahren die Basis der Design for Manufacture and Assembly (DFMA) Methode. In Zusammenarbeit mit Peter Dewhurst wird diese zur heute bekannten DFMA Methode weiterentwickelt. (Boothroyd Dewhurst, Inc. 2020) Die DFMA Methode verfolgt das Ziel bestehende Fertigungsprozesse bestmöglich zu nutzen und die Komponentenzahl eines Produkts zu reduzieren. Die Gestaltung der Einzelteile eines Produkts zielt dabei auf die Realisierung möglichst einfacher Montagevorgänge ab. Grundgerüst der Methode bildet die quantitative Bewertung der Fertigungs- und Montageprozesse bestehender Produktdesignkonzepte. (Boothroyd 1996, S. 20; Eskilander 2001, S. 51)

Startpunkt der DFMA Methode bildet die Analyse des bestehenden Konzeptentwurfs unter Verwendung des Design for Assembly (DFA) Ansatzes sowie der Erarbeitung von Empfehlungen zur Simplifizierung der Produktstruktur. Anschließend erfolgt eine Kostenbewertung sowohl des Ausgangskonzepts als auch der optimierten Variante. In diesem Schritt gilt es, die aus wirtschaftlicher Sicht geeignetsten Materialien und Prozesse zu definieren. Der Design for Manufacture (DFM) Ansatz widmet sich folgend der Optimierung der Gestaltung der Einzelteile bezogen auf deren Fertigungsprozess. (Boothroyd 1996, S. 21ff) Abbildung 15 zeigt die Ablaufschritte der DFMA zusammengefasst.

Das DFA unterscheidet mehrere Spezialgebiete. Dazu zählen die manuelle Montage, die automatisierte Hochgeschwindigkeitsmontage, die robotergestützte Montage und insbesondere die Montage von Leiterplatten sowie die manuelle Montage von Leitungssätzen. Die spezifische quantitative Analysemethoden sind nur für das jeweilige Spezialgebiet

gesondert anwendbar. (Boothroyd 1994, S. 510f; Eskilander 2001, S. 51; Boothroyd 2005; Boothroyd et al. 2011, S. 135ff)

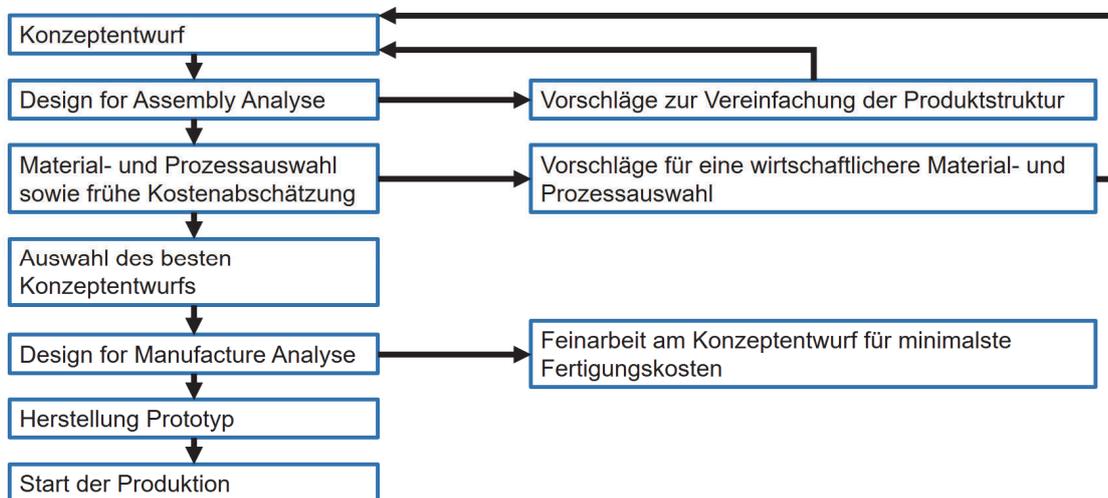


Abbildung 15: Boothroyd DFMA Ablaufschema (in Anlehnung an Boothroyd 1996, S. 20)

Die quantitative Analyse der manuellen Montage nutzt den sogenannten DFA-Index E_{ma} . Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen einer theoretisch idealen Montage im Vergleich zur aktuellen Montage. Je niedriger der Wert, desto höher der Gestaltungsbedarf.

Der DFA-Index E_{ma} errechnet sich aus dem theoretischen Einzelteilminimum N_{min} , einer idealen Basiszeit t_a und der vorbestimmten Montagezeit t_{ma} des Produkts (siehe Formel 1).

$$E_{ma} = \frac{(N_{min} \cdot t_a)}{t_{ma}} \quad (1)$$

Das theoretische Einzelteilminimum N_{min} wird mithilfe dreier Fragen ermittelt. Die Negation jeder Frage, ausschließlich unter Montagegesichtspunkten, ermöglicht den theoretischen Entfall des Einzelteils.

Die Fragen lauten hierbei wie folgt:

- Bewegt sich das Einzelteil relativ zu allen anderen schon montierten Einzelteilen während des regulären Betriebszustands des finalen Produkts? (Kleine Bewegungen, die durch den Einsatz von elastischen Gelenken kompensiert werden können, zählen nicht dazu)
- Muss das Einzelteil zwingend aus einem anderen Material als die übrigen Einzelteile bestehen? (Beispielsweise zur Isolierung oder Schwingungsdämpfung)
- Muss das Einzelteil zwingend von allen anderen Einzelteilen getrennt werden, da sonst die Montage anderer Einzelteile (die eine der vorherigen Fragestellungen erfüllen) verhindert würde?

Die Basiszeit t_a ist definiert als die durchschnittliche Montagezeit während der Handhabung eines Einzelteils ohne Behinderungen aufgrund dessen Designs und wird als vorgegebener Faktor dem der Methode zur Verfügung gestellten Leitwerk entnommen.

Die Berechnung der vorbestimmten Montagezeit t_{ma} basiert auf einer Bauteilkategorisierung der zu montierenden Einzelteile, hauptsächlich abhängig von deren Gestalt. Im Bereich der manuellen Montage erfolgt dafür die Aufspaltung jedes Montageschritts in zwei Unterprozesse. Dies sind der Unterprozess Handhaben sowie der Unterprozess Einfügen und Befestigen. Die vorbestimmte Montagezeit eines Unterprozesses wird entsprechend der jeweiligen Bauteilkategorie dem vorgegebenen Leitwerk entnommen und anschließend die Einzelmontagezeiten aus Handhaben sowie Einfügen und Befestigen zur Ermittlung der vorbestimmten Montagezeit t_{ma} summiert. (Boothroyd 1994, S. 505ff, 1996, S. 21ff; Eskilander 2001, S. 51ff; Boothroyd 2005, S. 229ff)

Hauptinflussfaktor auf die manuelle Handhabung zur Kategorisierung bildet die Einzelteilsymmetrie. Diese differenziert die Symmetrie des Einzelteils um dessen Fügeachse (β -Symmetrie; kurz: β) sowie die Symmetrie um eine beliebige lotrechte Achse der Fügeachse (α -Symmetrie; kurz: α). Angegeben wird dabei der Rotationswinkel, um den das Einzelteil rotiert werden muss, bis dieses wieder eine erlaubte Fügeposition erreicht. Daraus berechnet sich der Gesamtsymmetriewinkel G_{sw} (siehe Formel 2). Je niedriger der Gesamtsymmetriewinkel G_{sw} , desto kürzer die benötigte Zeit zur Handhabung des Einzelteils. (Boothroyd 2005, S. 232ff)

$$G_{sw} = \alpha + \beta \quad (2)$$

Abbildung 16 veranschaulicht α - und β -Symmetrie anhand verschiedener Beispiele.

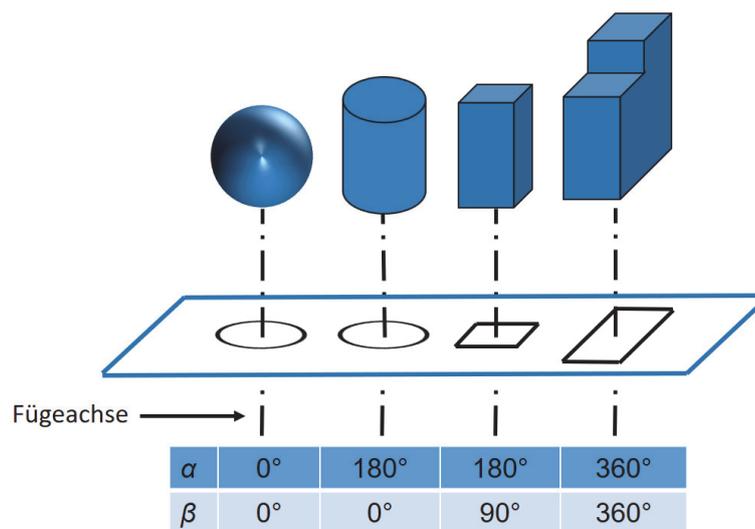


Abbildung 16: α - und β -Symmetrie (in Anlehnung an Boothroyd 2005, S. 236)

Weitere Einflussfaktoren auf die manuelle Handhabung sind:

Abmaß des Einzelteils; Dicke und Gewicht; Gefahr des Verklemmens oder Verhakens; Gefahr des Zerbrechens; Flexibilität; ob das Einzelteil rutschig oder klebrig ist; Notwendigkeit der Nutzung beider Hände oder eines Werkzeugs zum Greifen; Notwendigkeit einer optischen Vergrößerung oder einer zusätzlichen mechanischen Hilfestellung (Boothroyd 2005, S. 231).

Die Hauptklassifizierung des manuellen Einfügens und Befestigens erfolgt anhand der Notwendigkeit des Festhaltens des Einzelteils während nachfolgender Fügeprozesse. Wird das Einzelteil direkt durch oder nach dem Fügeprozess befestigt, erfolgt die Haupt-

klassifizierung anhand des Befestigungsprozesses, der in Befestigung mittels Schnappverbindung, Schraubprozess oder durch plastische Deformation unterteilt wird. (Boothroyd 2005, S. 234ff)

Weitere Einflussfaktoren auf das manuelle Einfügen und Befestigen sind:

Zugänglichkeit der Fügestelle; Bedienungsfreundlichkeit des Montagewerkzeugs; Sichtbarkeit der Fügestelle; Einfachheit des Ausrichtens und Positionierens während der Montage; Einstecktiefe; Fügekräfte (Boothroyd 2005, S. 233f)

Die DFA Spezialgebiete der Hochgeschwindigkeitsautomatisierung sowie der roboterassistierten Montage bedienen sich ebenfalls einer Klassifizierung zur Bewertung der Automatisierungsgerechtigkeit.

Einflussfaktoren auf das automatisierte Handhaben sind:

Einzelteilsymmetrie; Abmaß des Einzelteils; Gefahr des Verklemmens oder Verhakens; Gefahr des Zerbrechens; Flexibilität; ob das Einzelteil klebrig ist (Boothroyd 2005, S. 261ff).

Einflussfaktoren auf das automatisierte Einfügen sind:

Notwendigkeit des Festhaltens; Art des Befestigungsprozesses; Einfachheit des Ausrichtens und Positionierens; einachsige Fügeführung; Fügekräfte

(Boothroyd 2005, S. 261ff).

Zur Unterstützung des Produktentwicklungs- sowie des Optimierungsprozesses der Produktgestaltung stellt die Boothroyd & Dewhurst Methode sowohl generelle als auch spezifische, in Prosa formulierte, Gestaltungsrichtlinien zur Verfügung. Diese basieren auf den verwendeten Einflussfaktoren. (Boothroyd 2005)

3.1.2 Lucas Methode

Die Lucas Methode entsteht aus der Zusammenarbeit der Hull Universität und Lucas Engineering & Systems in den 80er Jahren. Das grundsätzliche Ziel der Methode fokussiert die Minimierung der Einzelteilanzahl des Produkts, ähnelt damit der Boothroyd & Dewhurst Methode und ermöglicht eine quantitative Bewertung von Produktdesignkonzepten.

Die Lucas Methode differenziert zwischen manueller und automatisierter Montage, trennt dabei aber nicht die Bereiche der robotergestützten sowie automatisierten Montage. (Miles 1989, S. 33; Swift 1989; Leaney et al. 1992, S. 13f) Das Ablaufschema der Lucas Methode ist in Abbildung 17 dargestellt.

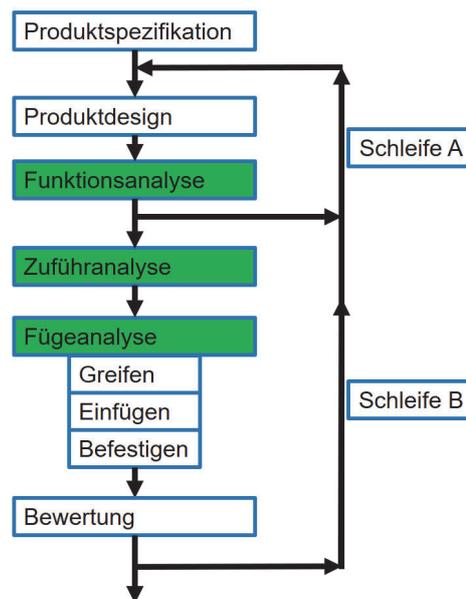


Abbildung 17: Lucas DFA-Ablaufschema (in Anlehnung an Miles 1989, S. 33; Swift 1989, S. 132; Miles 1990, S. 367)

Die Produktanalyse umfasst die Phasen Funktionsanalyse, Zuführanalyse sowie Fügeanalyse. Die Fügeanalyse segmentiert nochmals feiner die Schritte Greifen, Einfügen und Befestigen.

Schleife A ordnet alle Einzelteile des Produkts den zwei Hauptkategorien, primäre Produktfunktion und sekundäre Produktfunktion, zu. Einzelteile, die nur sekundäre Funktionen übernehmen, gilt es zu eliminieren. Die Bewertungskriterien entsprechen nahezu denen der Boothroyd & Dewhurst Methode. (Miles 1989, S. 33f; Leaney et al. 1992, S. 14; Leaney 1996, S. 51f)

Das in Schleife A hinsichtlich Teileanzahl optimierte Produktdesign wird folgend der Zuführanalyse unterzogen. Diese unterscheidet zwischen manueller Handhabung und automatisierter Zuführung. (Leaney et al. 1992, S. 14; Sealy et al. 1992, S. 4)

Einflussfaktoren auf die manuelle Handhabung sind:

Größe und Gewicht; Flexibilität; ob das Einzelteil klebrig ist, Gefahr des Verklemmens oder Verhakens; ob das Einzelteil scharfe Kanten hat, rau oder schwer zu greifen ist; Einzelteilsymmetrie (Sealy et al. 1992, S. 4; Chan et al. 2005).

Einflussfaktoren auf die automatisierte Zuführung sind:

Art der Zuführtechnologie; Einfachheit des Ausrichtens; Einzelteilsymmetrie (Miles 1989, S. 33f; Sealy et al. 1992, S. 4; Leaney 1996, S. 52).

Die Greifanalyse erfolgt nur bei automatisierter Zuführung und bewertet die Eignung des Einzelteils automatisiert gehalten und zur Fügestelle gebracht zu werden. Im Gegensatz betrachtet die anschließende Fügeanalyse sowohl manuelles als auch automatisiertes Fügen (Miles 1989, S. 34; Sealy et al. 1992).

Einflussfaktoren auf das manuelle und automatisierte Einfügen sind:

Notwendigkeit des Festhaltens; Art des Befestigungsprozesses; einachsige Füge-richtung; Anzahl der Fügstellen (Sealy et al. 1992; Chan et al. 2005).

Weitere Einflussfaktoren auf das manuelle Einfügen sind:

Sichtbarkeit der Fügestelle, Einfachheit des Ausrichtens; Fügekräfte (Chan et al. 2005).

Zusätzlich notwendige Prozesse wie beispielsweise Schweißen oder Kleben werden abschließend beurteilt. (Sealy et al. 1992)

Die finale Bewertung kennzeichnet Handlungsbedarf, der in Schleife B als Input zur Optimierung des Produktdesigns Verwendung findet.

(Miles 1989, S. 33ff; Swift 1989; Miles 1990, S. 366ff; Leaney et al. 1992, S. 13ff; Sealy et al. 1992; Leaney 1996, S. 50ff; Chan et al. 2005)

3.1.3 Hitachi-AEM

Die ursprüngliche Version der Hitachi-AEM (Assemblability Evaluation Method) entsteht in den 60er Jahren. Zehn Jahre später wird die neue Hitachi-AEM aus der Verknüpfung der ursprünglichen Hitachi-AEM Version und der Hitachi-MEM (Machinability Evaluation Method) entwickelt. Die neue Version bewertet die Montagegerechtheit eines Produkts oder Produktkonzepts anhand zweier Kennzahlen.

Der Bewertungsfaktor E beurteilt hierbei die Komplexität der einzelnen Montagevorgänge. Der Kostenbewertungsfaktor K dient zur Abschätzung von Einsparungen in der Montage bezüglich des Ausgangsproduktkonzepts und des optimierten Produktkonzepts. (Miyakawa et al. 1990, S. 355ff; Leaney et al. 1992, S. 9ff) Konträr der Boothroyd & Dewhurst Methode sowie der Lucas Methode unterscheidet die Hitachi-AEM nicht zwischen manueller und automatisierter Montage. Dies ist der unterstellten starken Korrelation zwischen montagegerechtem Produktdesign und der daraus resultierenden vereinfachten Montage, unabhängig des verwendeten Verfahrens, geschuldet. Ferner wird der Einsatz der Methode, trotz gegebenenfalls mangelnder Kenntnis über spätere Fertigungsverfahren, angestrebt. (Miles 1989, S. 32; Leaney 1996, S. 43) Das Ablaufschema der Hitachi-AEM ist in Abbildung 18 dargestellt.

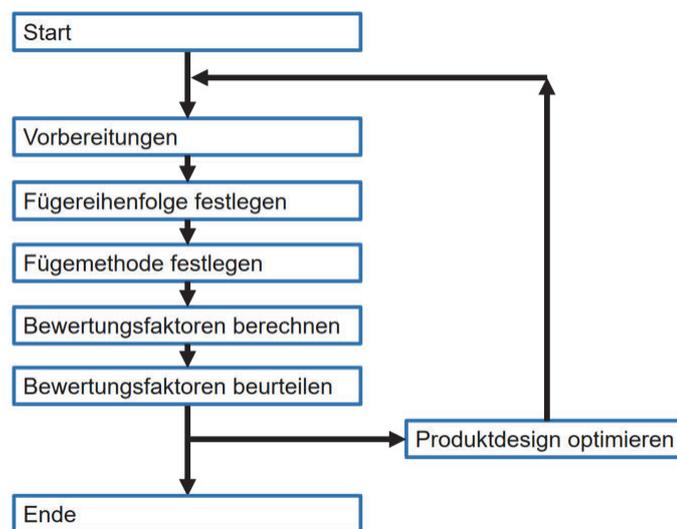


Abbildung 18: Hitachi AEM Ablaufschema (in Anlehnung an Miyakawa et al. 1990, S. 356)

Die Produktbewertung beginnt mit der Bereitstellung aller notwendiger Daten wie Konzept, Konstruktions- oder Montagezeichnungen sowie sonstiger montagerelevanter Produktdaten. Hierauf erfolgt die Festlegung der Fügereihenfolge der Einzelteile sowie die dazu notwendige Fügemethode.

Einflussfaktoren auf das manuelle und automatisierte Fügen sind:

Fügerichtung; Notwendigkeit des Festhaltens; Art des Befestigungsprozesses, Bearbeitungsschritte.

Alle, von einer einachsig nach unten gerichteten Fügerichtung, abweichenden Fügebewegungen sowie zusätzlich notwendige Operationen zur Montage werden mit Strafpunkten bewertet. Differenziert werden zwanzig verschiedene Operationen. (Miyakawa et al. 1990, S. 355ff; Leaney et al. 1992, S. 9ff; Leaney 1996, S. 49f; Elemér et al. 2002, S. 159ff; Ohashi et al. 2002, S. 568)

Die finale Berechnung der Bewertungsfaktoren E und K sowie deren Vergleich mit den jeweiligen Schwellenwerten geben Aufschluss über Optimierungsbedarf hinsichtlich der

Montagegerechtheit oder einer Reduktion der Teileanzahl. Trotz der fehlenden Unterscheidung zwischen manueller und automatisierter Montage wird anhand des Vergleichs mit dem Schwellenwert ergänzend die Tendenz zur manuellen oder automatisierten Montage manifestiert. (Miyakawa et al. 1990, S. 355; Leaney et al. 1992, S. 11; Shimada et al. 1992, S. 53ff; Leaney 1996, S. 50)

3.1.4 Modified Westinghouse Methode

Mit dem Ziel die Komplexität einer manuellen Montageoperation messbar zu machen, entwickelt Sturges (1989) in Zusammenarbeit mit dem Westinghouse Productivity and Quality Center den Design for Assembly Calculator. Die Berechnung der Montageoperationskomplexität ist daher auch als Westinghouse Methode bekannt (Sturges 1989; Beiter et al. 2000, S. 2; Ezpeleta et al. 2019, S. 675).

Sturges (1989, S. 237) motiviert das Verständnis manueller Montageoperationen und die dazu notwendige Geschicklichkeit als Schlüsselement des automatisierungsgerechten Produktdesigns (Sturges 1989, S. 237).

Ausgangsbasis der Methodenentwicklung bilden empirische Gestaltungsrichtlinien sowohl zur montagegerechten Gestaltung der Einzelteile als auch des Produkts. Fragestellungen zur korrekten Anwendung sowie Messbarkeit der Gestaltungsrichtlinien führen zum Ansatz der Komplexitätsquantifizierung von Montageoperationen. (Sturges 1989, S. 239f) Das Ablaufschema der Westinghouse Methode ist in Abbildung 19 dargestellt.

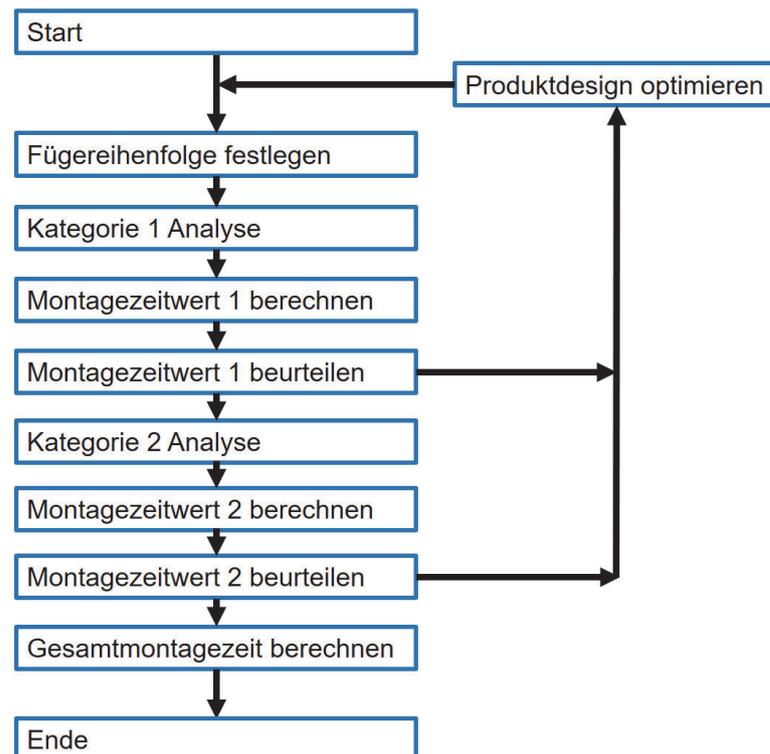


Abbildung 19: Westinghouse Methode Ablaufschema

Die Berechnung der Montageoperationskomplexität basiert auf der Verknüpfung spezifischer Gestaltungsmerkmale der Einzelteile und den daraus resultierenden Montagezeiten. Dies ermöglicht die Berechnung der Montagezeit eines jeden Einzelteils des Produkts. (Sturges 1989, S. 242ff; Sturges et al. 1992, S. 68) Die Methode differenziert Einflussfaktoren, die das Erreichen, Greifen und Bringen des Einzelteils in den Montagebereich sowie die eigentliche Montageoperation beeinflussen. Zusammengefasst werden alle Einflussfaktoren in neun Unterkategorien. Nachfolgend werden die Einflussfaktoren auf das Erreichen, Greifen und Bringen sowie auf die Montageoperation aufgeführt.

Einflussfaktoren auf das Erreichen, Greifen und Bringen sind:

Vorhandensein von Erkennungsmerkmalen zur Bauteilorientierung; Greif- und Bring-Distanzen; Abmaß des Einzelteils; Form des Einzelteils; Gewicht, Gefahr des Verklemmens oder Verhakens, Gefahr des Zerbrechens oder Verkratzens, Flexibilität, ob das Einzelteil

scharfe Kanten hat, ob das Einzelteil klebrig ist; Notwendigkeit der Nutzung eines Werkzeugs (Sturges 1989, S. 244ff).

Einflussfaktoren auf die Montageoperation sind:

Fügetoleranz; Fügerichtung; Notwendigkeit des Festhaltens; Art des Befestigungsprozesses; Art der Befestigungsmethode (Sturges 1989, S. 248ff).

Zur Komplexitätsberechnung der Montageoperation erfolgt die Kategorisierung jedes Einzelteils unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren und resultierend die Bestimmung des jeweiligen Montagezeitwerts mittels des „Assembly Calculator“. Der „Assembly Calculator“ ist eine physische Drehscheibe, die alle notwendigen Informationen zur Bestimmung des Montagezeitwerts enthält. Die Montagezeit berechnet sich gesondert für das Erreichen, Greifen und Bringen sowie für die eigentliche Montageoperation. Die Montagegerechtheit wird folgend ebenfalls mit dem „Assembly Calculator“ bestimmt und mittels einer zur Verfügung gestellten Bereichsskala bewertet. Grundsätzlich gilt: Je höher der Zahlenwert, desto größer der Optimierungsbedarf. Final erfolgt die Summierung aller Montagezeiten. (Sturges 1989, S. 248ff)

Die Modified Westinghouse Methode ist die vereinfachte Version der Westinghouse Methode und unterscheidet sich anhand der strukturierten Vorgehensweise zur Erstellung eines Fügereihenfolgediagramms sowie der Bestimmung und Unterscheidung notwendiger und nicht notwendiger Einzelteile des Produkts. Diese Vorgehensweise zur Einzelteilreduzierung ähnelt dabei der Boothroyd & Dewhurst Methode. Die Kalkulation wird ferner mittels Reduzierung der Anzahl der Montagezeitwerte sowie deren Tabellarisierung erleichtert. (Beiter et al. 2000, S. 2; Hinckley 2001, S. 41ff; Ezpeleta et al. 2019, S. 677)

3.1.5 ProKon Methode

Der Begriff ProKon setzt sich aus den Anfangsbuchstaben der Wörter **P**roduktionsgerechte **K**onstruktion zusammen. Die ProKon Methode verfolgt das Ziel der montagegerechten Produktgestaltung. (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 1) Erkenntnisse aus den Bereichen Arbeitsorganisation, Konstruktion sowie Fertigungs- und Arbeitsplanung bilden die Ausgangsbasis der Methode (Klein et al. 2008, S. 83f). Die Produktgestaltanalyse unterscheidet zwischen manueller und automatisierter Montage und berücksichtigt teils unterschiedliche Einflussfaktoren. (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 10ff) Das Ablaufschema der ProKon Methode präsentiert Abbildung 20.

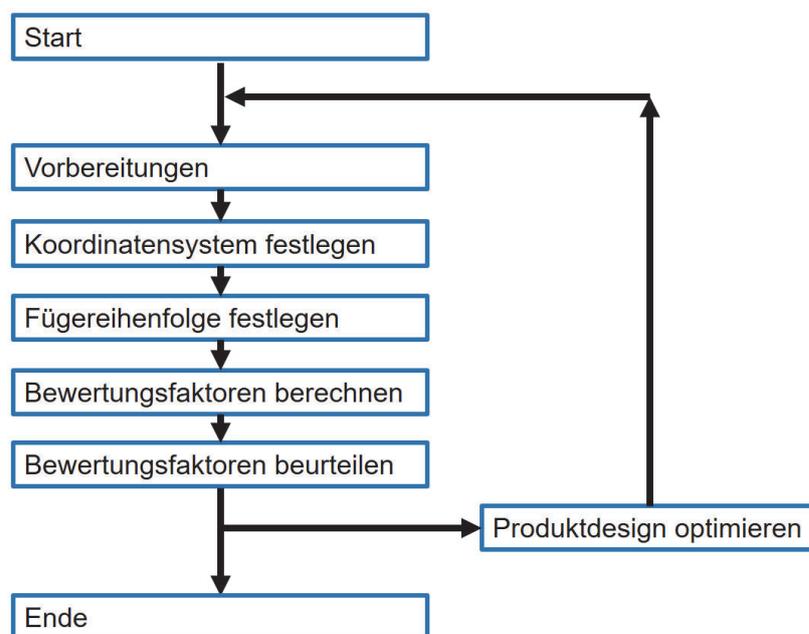


Abbildung 20: ProKon Ablaufschema

Der erste Schritt der Vorbereitungen dient zur Bereitstellung montagerelevanter Produktdaten wie Konzept-, Konstruktions- oder Montagezeichnungen. Wird keine IST-Analyse eines bestehenden Produkts ausgeführt, muss jedes Einzelteil auf dessen Notwendigkeit geprüft und ggf. eliminiert werden. Zu eliminierende Einzelteile sind definiert als nur zur Befestigung oder Verbindung dienende Einzelteile. Notwendige

Einzelteile bedürfen der Prüfung auf Funktionsintegration. Die Fragen entsprechen dabei der Boothroyd & Dewhurst Methode. (Klein et al. 2008, S. 83ff)

Um Abweichungen von der Hauptmontagerichtung zu identifizieren, erfolgt die Festlegung eines Koordinatensystems sowie die Definition der Fügereihenfolge mit anschließender Analyse aller Einzelteile in chronologischer Reihenfolge. Die Analyse berücksichtigt dabei keine arbeitsplatzspezifischen Einflussfaktoren (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 19ff)

Die Berechnung der Bewertungsfaktoren bedarf der Unterstellung einer vollständig manuellen oder vollständig automatisierten Montage des Produkts oder der Baugruppe und der Beurteilung des Montagevorgangs anhand der jeweiligen Einflussfaktoren. (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 23)

Einflussfaktoren auf die manuelle Montage sind:

Teileanzahl; Gewicht; Abmaß des Einzelteils; Anzahl der Fügstellen; Zugänglichkeit der Fügestelle; Sichtbarkeit der Fügestelle; ob eine falsche Einbaulage möglich ist; Notwendigkeit des Festhaltens; Notwendigkeit des Nachrichtens während des Fügevorgangs; Vorhandensein von Positionierhilfen; Anzahl der Abweichungen von der Hauptmontagerichtung; Notwendigkeit des Überprüfens der Montageoperation; Art des Befestigungsprozesses; Art der Befestigungsmethode; Einstecktiefe; Notwendigkeit der Nutzung eines Werkzeugs; Anzahl verwendeter Werkzeuge (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 29ff).

Zur Bewertung der automatisierungsgerechten Produktgestaltung unterteilt ProKon den Montageprozess in die Operationen Greifen und Positionieren. Die Teileanzahl gilt entsprechend für beide Operationen. (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 63)

Einflussfaktoren auf das automatisierte Greifen sind:

Flexibilität; Vorhandensein von Greifflächen; Gefahr des Verklemmens Verhakens; Gefahr des Zerbrechens oder Verkratzens; Vorhandensein von Erkennungsmerkmalen zur Bauteilorientierung; Notwendigkeit zusätzlicher Greifstellen (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 63ff).

Einflussfaktoren auf das automatisierte Positionieren sind:

Anzahl der Füge richtungsänderungen; Zugänglichkeit der Füge stelle; Einzelteilsymmetrie; Notwendigkeit des Überprüfens der Montageoperation; Notwendigkeit des Justierens; Flexibilität; Notwendigkeit des Festhaltens; Vorhandensein von Positionierhilfen (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 66ff).

Einflussfaktoren sowohl auf das automatisierte Greifen als auch das automatisierte Positionieren sind:

Art des Befestigungsprozesses; Notwendigkeit der Nutzung eines Werkzeugs; Anzahl verwendeter Werkzeuge; Notwendigkeit weiterer Prozesse (Reinigungs- oder Klebeprozesse) (MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 70f).

Die Berechnung der Bewertungsfaktoren basiert auf der Summierung von Zahlenwerten (ProKon-Einheit) in Abhängigkeit der jeweiligen Ausprägung des Einflussfaktors. Ein geringerer Wert der summierten ProKon-Einheiten impliziert dabei eine bessere Montagegerechtigkeit. Da der Gesamtwert des Bewertungsfaktors auch von nicht montageerschwerenden Faktoren, wie beispielsweise der Aufspaltung eines Produkts in Baugruppen, abhängig ist, ist eine Vergleichbarkeit zwischen IST-Zustand und einem oder mehreren SOLL-Zuständen nur unter ähnlichen Rahmenbedingungen gegeben. (Klein et al. 2008; MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 24ff)

3.1.6 Weitere Methoden

Beiter et al. (2000), Eskilander (2001) und Ezpeleta et al. (2019) stehen beispielhaft für die Entwicklung von DFX-Methoden unter Verwendung, Kombination und Erweiterung bestehender Methoden. Beiter et al. (2000) fokussieren die Vorhersage des Fehleranteils in der Montage neuer Produkte, Eskilander (2001) widmet sich der Analyse und Optimierung von Montageerschwerenissen im Kontext des DFAA und Ezpeleta et al. (2019) streben die konsequente Berücksichtigung der Montage in allen Phasen des Produktentwicklungsprozesses an.

DFA2 Methode:

Eskilander (2001) sieht die mangelnde Verknüpfung zwischen der Bewertung der montagegerechten Produktgestaltung und Gestaltungsrichtlinien als Missstand bestehender DFA Methoden, insbesondere im Bereich des DFAA.

Die von Eskilander (2001, S. 78f) bereitgestellte DFA2 Methode unterscheidet zwischen Produktlevel und Einzelteillevel und nutzt qualitative Beschreibungen der Einflussfaktoren zur Implikation ggf. notwendiger Optimierungsanweisungen.

Eskilander (2001, S. 77) verwendet hauptsächlich bestehende Einflussfaktoren. Die quantitative Bewertung basiert auf der Zuweisung dreier Zahlenwerte (9; 3; 1) den Ausprägungen der qualitativ beschriebenen Einflussfaktoren, wobei geringe Zahlenwerte Optimierungsbedarfe hervorheben (Eskilander 2001, S. 57ff). Die von Eskilander (2001) verwendeten Einflussfaktoren auf Produktlevel sowie auf Einzelteillevel werden nachfolgend aufgeführt.

Einflussfaktoren zur Bewertung auf Produktlevel sind:

Teileanzahl; Anzahlverhältnis standardisierter Einzelteile; Vorhandensein eines Sockelbauteils; Art der Einzelteilfixierung auf dem Sockelbauteil; Anzahl der Fügerichtungen; Anzahlverhältnis parallel durchführbarer Montageoperationen; Anzahl relevanter Toleranzketten.

Einflussfaktoren zur Bewertung auf Einzelteillevel sind:

Notwendigkeit des Einzelteils; Fehlerrate; Ausrichtung des Einzelteils; Gefahr des Zerbrechens oder Verkratzens; Gefahr des Verklemmens oder Verhakens; Schwerpunktlage; Symmetrie; Gewicht; Länge; Vorhandensein von Greifflächen; Montagebewegung; Zugänglichkeit der Fügestelle; Vorhandensein von Positionierhilfen; Fügetoleranzen; Notwendigkeit des Festhaltens; Art des Befestigungsprozesses; Art der Befestigungsmethode; Notwendigkeit der Nutzung eines Werkzeugs Notwendigkeit des Überprüfens der Montageoperation (Eskilander 2001, S. 164ff).

3.2 Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands

3.2.1 Ermittlung nach Walther

Im Kontext der Montage großvolumiger Produkte mit Industrierobotern motiviert Walther (1985) die automatisierungsgerechte Einzelteilgestaltung und definiert zur quantitativen Bestimmung der Fügekomplexität den sogenannten Fügekomplexitätsfaktor $e_{\text{FügKom}}$. Walther (1985) segmentiert dafür montagerelevante Einflussfaktoren in die Montageaufgabenbereiche Feinpositionieren, Werkstückpaarung, Fügebewegung sowie Fügeprozess und ordnet diesen, basierend auf deren Montageeinfluss, einen Multiplikator M_E zu. Jeder Einflussgröße wird in Abhängigkeit der betrachteten Einzelteilkombination zudem ein Bewertungsfaktor B_F , in Schritten von ganzen normalen Zahlen, in den Klassen „1 – kein Problem“ bis „5 – entscheidendes Problem für die Montageaufgabe“, zugewiesen (siehe Tabelle 3-1). Die Berechnung des Fügekomplexitätsfaktors $e_{\text{FügKom}}$ zeigen die Formeln 3 und 4. (Walther 1985, S. 99ff)

$$S_{MA_j} = \sum_{i=1}^n M_{E_i} \cdot B_{F_i} \quad (3)$$

$$e_{\text{FügKom}} = \left(\frac{S_{MA_1} \cdot S_{MA_2} \cdot S_{MA_3} \cdot S_{MA_4}}{10400} \right)^{0,36} \quad (4)$$

Tabelle 3-1: Auflistung montagerelevanter Einflussfaktoren der automatisierten Montage großvolumiger Produkte (in Anlehnung an Walther 1985, S. 109)

Kategorie	Einflussfaktor	M_E	B_F
Feinpositionieren	Anzahl möglicher Fügepositionen	3	
	Toleranz Fügestelle/Positionierstellen	2	
	Fügetoleranz (Spiel)	1	
	Fügehilfen	1	
	Fügen an bewegter Basisbaugruppe	1	
Werkstückpaarung	Anzahl gleichzeitig zu fügender Teile	3	
	Anpass- und Justieraufwand	3	
	Anzahl Teile/Fügeposition	2	
	Mehrfachfügestellen	1	
	Lagesicherung gefügter Teile	1	
Fügebewegung	Anzahl möglicher Fügebahnen	3	
	Länge des ungeführten Fügeweges	2	
	Fügebahn	2	
	Fügefreiraum	2	
	Fügerichtung	1	
Fügeprozess	Empfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse	3	
	Prüfaufwand	3	
	Physikalische Prozessgrößen	2	
	Wirkorgananforderungen	2	
	Umgebungsbelastung	2	
	Hilfsstoffzufuhr	1	

3.2.2 Ermittlung nach Deutschländer

Deutschländer (1989) zieht zur Beurteilung der Automatisierbarkeit von Montagesystemen die in Tabelle 3-2 aufgelisteten Einflussfaktoren heran. Anhand der Ausprägungen der Einflussfaktoren schätzt Deutschländer (1989) die Automatisierbarkeit des Montagesystems ab und segmentiert dabei die drei Bereiche einfach realisierbar, realisierbar und mit großem Aufwand realisierbar. Die Einflussfaktoren differenzieren sich in die Kategorien objektbezogen und prozessbezogen.

Tabelle 3-2: Einflussfaktoren zur Beurteilung der Automatisierbarkeit (in Anlehnung an Deutschländer 1989, S. 102)

Kategorie	Einflussfaktor	Ausprägung		
		Einfach realisierbar	Realisierbar	Mit großem Aufwand realisierbar
Objektbezogen	Anzahl der Teile	Gering	Mittel	Hoch
	Komplexitätsgrad der Montageobjekte	Gering	Mittel	Hoch
	Werkstück-abmessungen	1 mm bis 300 mm	0,5 mm bis 1 mm oder 300 mm bis 800 mm	<0,5 mm oder >800 mm
	Gewicht	0 kg bis 10 kg	11 kg bis 30 kg	>30 kg
	Formstabilität	Starr	Elastisch	Biegeschlaff/ gelenkig
Prozessbezogen	Variantenspezifische Flexibilitäts-anforderungen	Gering	Mittel	Hoch
	Art der Fügebewegung	Geradlinige Bewegungen in Schwerkrafttrichtung	Geradlinige Bewegungen nicht in Schwerkrafttrichtung	Bahnkurve im Raum
	Genauigkeits-anforderungen an den Fügeprozess	Gering	Mittel	Hoch
	Sensorik	Nicht erforderlich	Mit käuflichen Sensoren realisierbar	Sensomotorische Anforderungen
	Zugänglichkeit Fügeort/Greifstelle	Keine Einschränkungen	Leichte Einschränkungen	Starke Einschränkungen
	Vorübergehende Lagesicherung	Nicht erforderlich/ bestimmt	Teilweise bestimmt	indifferent
	Kontrollfunktion, Justage	Nicht vorhanden	Durch Messeinrichtung realisierbar	Sichtkontrolle
	Nacharbeit, sonstige Aufgaben	Keine	Gering	Hoch
	Teilevereinzelnung, Ordnungsaufwand	Bereitstellung in Magazinen / entfällt	Schüttgut, ausgeprägte und stabile Vorzugslagen	Schüttgut mit unerwünschtem Zusammenhalt
	Betriebsmittel-zugänglichkeit	Ohne Einschränkung	Leicht eingeschränkt	Stark eingeschränkt

3.2.3 Ermittlung nach Spingler

Spingler et al. (2002) präsentieren eine Methode zur Ermittlung des Automatisierungspotenzials einer Montageanlage. Diese basiert, ähnlich wie nach Deutschländer (1989, S. 100ff), auf der Segmentierung und Gewichtung montagebeeinflussender Faktoren. Die Gewichtung definiert die Relevanz der Ausprägung auf die Automatisierbarkeit des Prozesses. Zudem klassifizieren Spingler et al. (2002) die verwendeten Einflussfaktoren in die Klassen Werkstückmerkmale, Prozessmerkmale und Materialbereitstellung. Eine vollständige Auflistung der verwendeten Einflussfaktoren stellen Spingler et al. (2002) nicht zur Verfügung.

Veröffentlichte Einflussfaktoren zur Bewertung des Automatisierungspotenzials:

Gefahr des Verklemmens oder Verhakens; Flexibilität; Notwendigkeit des Festhaltens; die Zugänglichkeit der Fügestelle; Fügetoleranzen (Spingler et al. 2002, S. 62ff)

3.2.4 Ermittlung mithilfe der Automatisierungspotenzialanalyse

Das Fraunhofer IPA ermittelt die technische Automatisierbarkeit von Montageschritten bestehender Prozesse mithilfe der Automatisierungspotenzialanalyse (APA). Die APA segmentiert einen Montageschritt in die Prozessschritte Vereinzeln, Handhaben, Positionieren und Fügen und ordnet jedem Prozessschritt relevante Einflussfaktoren zu. Die Einflussfaktoren differenzieren wiederum unterschiedliche Ausprägungen derselben. Hinsichtlich der Eignung und Relevanz der Ausprägung zur Automatisierung eines Prozessschritts erfolgt die Zuweisung spezifischer Zahlenwerte. Basierend auf der Ausprägung des Einflussfaktors und dessen Relevanz innerhalb des Prozessschritts berechnet sich ein Eignungsfaktor. Die Summe aller Eignungsfaktoren, bei optimaler Ausprägung jedes Einflussfaktors, innerhalb eines Prozessschritts beträgt 100 %. Nicht öffentlich zugänglich sind dabei die zugewiesenen spezifischen Zahlenwerte, die Ausprägungen der Einflussfaktoren sowie deren Relevanz innerhalb des Prozessschritts.

(Wößner et al. 2014; Awad et al. 2017; Weik 2018; Nägele 2019; Awad et al. 2020; Trommnau et al. 2020c, S. 1140; Neb 2020) Tabelle 3-3 listet die verwendeten Einflussfaktoren zur Bewertung des Automatisierungspotenzials auf.

Tabelle 3-3: Einflussfaktoren zur Analyse des Automatisierungspotenzials (in Anlehnung an Neb 2020)

Prozessschritt	Einflussfaktorbezug	Einflussfaktor
Vereinzeln	Einfluss der Teilebereitstellung	Bereitstellungsart der Fügeteile
Handhaben	Einfluss des Fügeteils	Steifigkeit
		Greifflächen
		Orientierungsmerkmale
		Oberflächenempfindlichkeit
Positionieren	Einfluss der Fügestelle	Genauigkeit Zielposition
		Positionierhilfen an den Bauteilen
		Zusätzliche Orientierung durch Rotation
		Zugänglichkeit zur Fügestelle
		Fügebewegung
		Fügetoleranzen
		Haltestabilität im positionierten Zustand
Fügen	Einfluss des Fügeprozesses	Zuführung des Verbindungselements
		Befestigung des Fügeteils

3.3 Ansätze zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile

Aufgrund der ungenügenden Betrachtung forminstabiler Einzelteile in den Methoden zur montagegerechten Produktgestaltung (siehe Kapitel 3.1) sowie in den Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands (siehe Kapitel 3.2) werden nachfolgend Klassifizierungsansätze für forminstabile Einzelteile aufgearbeitet. Ziel ist es relevante montagebeeinflussende Faktoren, insbesondere die Automatisierung von Montageprozessen betreffend, für forminstabile Einzelteile herauszuarbeiten. Die nachfolgend aufgeführten Klassifizierungskriterien umfassen dabei unter anderem die Form des Einzelteils, dessen Querschnitt und Länge sowie dessen Biegesteifigkeit, Volumenänderung und Elastizität.

3.3.1 Klassifizierung nach Milberg

Im Kontext der automatisierten Montage entwickeln Milberg et al. (1986) eine erste Klassifizierung forminstabiler Einzelteile anhand deren geometrischer Form. Die Notwendigkeit der Klassifizierung begründen Milberg et al. (1986) mit der von ihnen festgestellten starken Abhängigkeit zwischen verwendetem Automatisierungskonzept und der äußeren Form des Einzelteils. Laut Milberg et al. (1986) werden beispielsweise Kabel und Schläuche bei der automatisierten Montage meist direkt von der Trommel abgenommen. Dies beeinflusst sowohl Zeitpunkt als auch Position der notwendigen geometrischen Form des forminstabilen Einzelteils zu Realisierung dessen Montage.

Milberg et al. (1986, S. 11) erarbeiten zur Kategorisierung der forminstabilen Einzelteile die Klassen lang, zweidimensional und blockförmig. Das Verhältnis der Hauptabmessungen des Einzelteils zueinander bestimmt dabei dessen jeweilige Klasse. (Milberg et al. 1986, S. 11) Abbildung 21 listet die jeweilige Klasse sowie das Hauptabmessungsverhältnis zwischen Länge L, Breite B und Höhe H des forminstabilen Einzelteils auf.

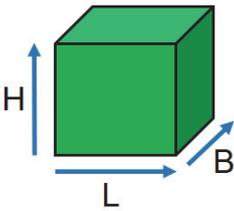
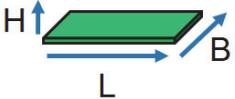
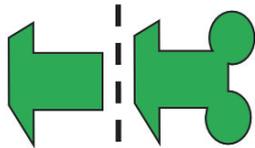
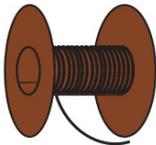
Blockförmig	Flach	Lang
„3-Dimensional“	„2-Dimensional“	„1-Dimensional“
		
$L/B < 10$ & $L/H < 10$	$L/B < 10$ & $L/H > 10$	$L/B > 10$ & $L/H > 10$

Abbildung 21: Klassifizierung forminstabiler Einzelteile anhand deren Form (in Anlehnung an Milberg et al. 1986, S. 11; Trommnau et al. 2020b, S. 51)

3.3.2 Klassifizierung nach Hoßmann

Hoßmann (1992) greift den von Milberg et al. (1986) bereitgestellten Ansatz zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile auf, fokussiert die Klasse der langgestreckten bzw. langen Einzelteile und erweitert deren Klassifizierungskriterien. Hoßmann (1992, S. 9ff) schließt dabei die Leitungssatzfertigung, aufgrund unterstellter eigenständiger Thematik, vom weiteren Untersuchungsverlauf aus. Konkretes Anschauungsbeispiel stellt der Fügeprozess einer forminstabilen Türdichtung auf einen Automobiltürrahmen dar (Hoßmann 1992, S. 9ff). Als weiterführende Klassifizierungskriterien langgestreckter forminstabiler Einzelteile definiert Hoßmann (1992, S. 55) den Querschnitt, die Länge sowie die Änderung der Form über die Länge und bestimmt entsprechende Ausprägungen. Abbildung 22 listet die Klassifizierungskriterien in der ersten Spalte sowie die jeweiligen Ausprägungsarten in der Horizontalen auf.

Querschnitt	einfach 	komplex 	veränderlich 
Länge	Meterware 	abgelängt 	geschlossen 
Änderung der Form über die Länge	keine 	Formecken 	Formelemente 

Zunehmender Automatisierungsaufwand 

Abbildung 22: Klassifizierung forminstabiler Einzelteile anhand deren Formmerkmale (in Anlehnung an Hoßmann 1992, S. 55)

Der Querschnitt des forminstabilen Einzelteils beeinflusst hauptsächlich den Vorgang des Führens. Je komplexer der Querschnitt desto komplexer der Führungsvorgang. Über die Länge des forminstabilen Einzelteils veränderliche Querschnitte bedingen meist zusätzliche Positionier- und Orientierungsvorgänge. (Hoßmann 1992, S. 56ff)

Laut Hoßmann (1992, S. 56ff) wirkt sich die Einzelteillänge auf Anpassungsvorgänge aus. Beeinflusst werden das Ablängen nach der Verlegung von Meterware, das Fügen beider Bauteilenden abgelängter Einzelteile und das Ausrichten der Kontur geschlossener Einzelteilen auf die Fügestelle.

Die Änderung der Form über die Länge bezieht Hoßmann (1992, S. 56ff) in seiner Hauptfunktion auf die Kontinuität des Fügevorgangs. Hierbei ermöglichen forminstabile Einzelteile ohne Formänderungen über deren Länge kontinuierliche Fügeprozesse. Formecken bedingen meist ein Umgreifen während des Fügevorgangs. Formelemente führen zu unterbrochenen Fügeprozessen.

Hoßmann (1992, S. 55) definiert daher einen zunehmenden Automatisierungsaufwand (siehe Abbildung 22) von der ersten Ausprägung (links) bis zur dritten Ausprägung (rechts).

Neben der konstruktiven Bauteilgestaltung des forminstabilen Einzelteils sowie dessen Montagepartner, sieht Hoßmann (1992) auch das Fügeverfahren sowie das Montagewerkzeug als Einflussfaktor. Laut Hoßmann (1992) erfolgen Fügeprozesse mit forminstabilen Einzelteilen meist in Kombination mit formstabilen Montagepartnern, die maßgeblich die Gestalt des forminstabilen Einzelteils beeinflussen (Hoßmann 1992, S. 13ff).

Zur Unterstützung der automatisierungsgerechten Produktentwicklung stellt Hoßmann (1992, S. 67ff), ähnlich der Boothroyd & Dewhurst Methode, Gestaltungsrichtlinien zur Verfügung und unterscheidet dabei Gestaltungsregeln für den Montagepartner sowie Gestaltungsregeln für das nicht formstabile langgestreckte Bauteil.

3.3.3 Klassifizierung nach Schneider

Im Kontext der automatisierungsgerechten Bereitstellung forminstabiler Einzelteile nutzt Schneider (1999, S. 12f) den Klassifizierungsansatz von Milberg et al. (1986) und fordert wie Hoßmann (1992), die weitere Unterteilung der langgestreckten Einzelteile in die Ausprägungen langgestreckt-offen sowie langgestreckt-geschlossen. Schneider (1999, S. 21) verweist dabei auf die meist manuelle Bereitstellung der langgestreckt-geschlossenen forminstabilen Einzelteile.

Die Auswahl und Gewichtung der Klassifizierungskriterien erarbeitet Schneider (1999) mittels empirischer Verifizierung prozessrelevanter Merkmale anhand 157 forminstabiler Beispieleinzelteile. Schneider (1999) unterteilt die Merkmale und deren Ausprägungen in Grundklassifizierung und weiterführende Klassifizierung. Die Grundklassifizierung umfasst die vier wichtigsten prozessrelevanten Merkmale. Dazu zählen die Biegesteifigkeit, die Volumenänderung, die Elastizität sowie die Formmerkmale des Einzelteils (siehe Tabelle 3-4)

Tabelle 3-4: Grundklassifizierung forminstabiler Einzelteile im Kontext der Bereitstellung (in Anlehnung an Schneider 1999, S. 40)



Merkmal	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
Biegesteifigkeit	Biegesteif	Reduziert biegesteif	Kaum biegesteif	Nicht biegesteif
	$K_{Bs} < 0,001$	$0,001 < K_{Bs} < 0,03$	$0,03 < K_{Bs} < 0,05$	$K_{Bs} > 0,05$
Volumen- änderung	Ein- oder mehrachsig sehr stabil	Ein- oder mehrachsig stabil	Einachsig instabil	Mehrachsig instabil
	$F > 2 m_E \cdot g$ & $\Delta h \leq \text{Toleranzbereich}$ Positionierung	$F > m_E \cdot g$ & $\Delta h \leq \text{Toleranzbereich}$ Positionierung	$F = m_E \cdot g$ & $\Delta h \geq \text{Toleranzbereich}$ Positionierung	$F = m_E \cdot g$ & $\Delta h \geq \text{Toleranzbereich}$ Positionierung
Elastizität	Niedrig elastisch	Elastisch	Plastisch	Plastisch fließend
Formmerkmale	Blockförmig	Flächenförmig	Langgestreckt-offen	Langgestreckt- geschlossen
	$L/B < 10$ & $L/H < 10$	$L/B < 10$ & $L/H > 10$	$L/B > 10$ & $L/H > 10$	$L/B > 10$ & $L/H > 10$

Die weiterführende Klassifizierung enthält Merkmale wie die Art der Außenkontur, die Änderung des Einzelteilquerschnitts über dessen Länge sowie die Symmetrieausprägung des Einzelteils. (Schneider 1999, S. 38ff)

Biegesteifigkeit:

Die dimensionslose Biegesteifigkeitskennzahl K_{Bs} stellt das Verhältnis der maximalen Durchbiegung h_{max} zur Einzelteillänge L dar (siehe Formel 5, Abbildung 23) und dient der praxisnahen Bestimmung der Biegesteifigkeit.

Die Herleitung der Biegesteifigkeitskennzahl K_{Bs} basiert auf der allgemein bekannten Biegelinie unter mittigem Kraftangriff sowie der Berücksichtigung aller notwendiger Rahmenbedingungen, des Flächenträgheitsmoments I und des Elastizitätsmoduls E des Einzelteils (siehe Formel 6) (Dankert et al. 2013, S. 260). Schneider (1999, S. 39ff) definiert die mittig angreifende Kraft als Gewichtskraft F_G in Höhe des Eigengewichts des Einzelteils berechnet aus dessen Masse m_E sowie der Schwerebeschleunigung g .

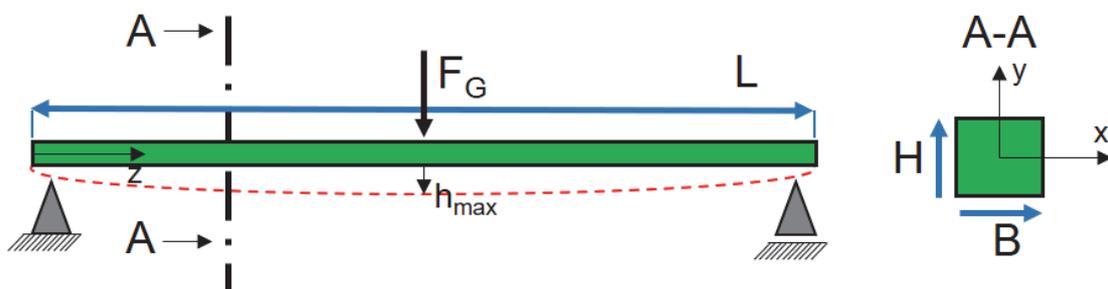


Abbildung 23: Darstellung der Biegelinie anhand eines Biegebalkens (in Anlehnung an Schneider 1999, S. 41; Dankert et al. 2013, S. 260)

$$K_{Bs} = \frac{h_{max}}{L} \quad (5)$$

$$\frac{h_{max}}{L} = \frac{1}{48} \cdot \frac{F_G \cdot L^2}{E \cdot I} \quad (6)$$

Laut Schneider (1999) ist eine Auflagerverschiebung um bis zu $1/10$ der Länge L des Einzelteils, im Vergleich zu ideal an den äußeren Enden des Einzelteils angreifenden Auflagern, zur ausreichend genauen Bestimmung zulässig. Die Abgrenzung der Ausprägungen der Biegesteifigkeit in vier Gruppen (siehe Tabelle 3-4) nimmt Schneider (1999) in Anlehnung an Reinhart (1988, S. 34f) vor.

Volumenänderung:

Die Ausprägung der Volumenänderung des Einzelteils unter Krafteinwirkung unterscheidet die Anzahl der betroffenen Achsen sowie deren Widerstand gegen Verformung. Berücksichtigung findet dabei die Höhe der Krafteinwirkung (F_G oder $2 F_G$) sowie die Änderung eines oder mehrerer Einzelteilabmaße um die Längendifferenz Δh . (Schneider 1999, S. 43f)

Elastizität:

Schneider (1999) differenziert das Verformungsverhalten des Einzelteils in die Ausprägungen niedrig elastisch, elastisch, plastisch und plastisch fließend. Entscheidend ist die Art des Verformungsverhaltens in Abhängigkeit der angreifenden Kraft. Detailliertere Informationen zur Definition des Verformungsverhaltens können aus Schneider (1999, S. 40ff) entnommen werden.

Formmerkmale:

Schneider (1999) segmentiert die Formmerkmale in die Klassen blockförmig, flächenförmig und langgestreckt. Die Ausprägung langgestreckt unterscheidet dabei die Unterklassen langgestreckt-offen und langgestreckt-geschlossen (Schneider 1999, S. 45ff). Schneider (1999) begründet die Relevanz der Formmerkmalsklassifizierung anhand des entscheidenden Einflusses der Einzelteilform auf das Automatisierungskonzept sowie die Handhabungseigenschaften und definiert die langgestreckt-geschlossenen forminstabilen Einzelteile hinsichtlich deren Aufwand zur Bereitstellung als

aufwändigste Klasse. Dies korreliert mit der Anschauung von Hoßmann (1992, S. 54ff) als auch Wöbner (1993) im Bereich der automatisierten Montage.

3.4 Zwischenfazit

Kapitel 2 stellt den Stand der Technik der Leitungssatzfertigung sich verändernden Produkthanforderungen sowie den Forderungen nach Rückverfolgbarkeit und Dokumentation gegenüber. Resultierend ist die Notwendigkeit der Automatisierung derzeit manueller Prozesse, insbesondere im Bereich der Montagelinie, ableitbar. Kapitel 2.2.3 erläutert zwar die Vorgehensweise im Leitungssatzentwicklungsprozess zur Auslegung von Fertigungsmodulen auf am Markt vorhandener Anlagentechnik Kapitel 2.2.4 ordnet diesbezüglich aber alle aufgeführten Kabelverarbeitungsanlagen dem Bereich der Vorfertigung zu. Bekräftigend heben die Situationsanalyse (siehe Tabelle 2-1) sowie die Forschungsanalyse (siehe Kapitel 2.3) den unzureichenden Stand, sowohl vorhandener Automatisierungslösungen als auch den Forschungsbedarf betreffend, unter Berücksichtigung vorherrschender Automatisierungshemmnisse, hervor. Ferner erfolgt keine Forschungsthematisierung des Zusammenbaus des Leitungssatzes mit mechanischen Anbauteilen wie beispielsweise Kabelkanälen (siehe Tabelle 2-2).

Die Zielsetzung einer montagegerechten und speziell einer automatisierungsgerechten Produktgestaltung der erläuterten DFA-Methoden lässt eine Anwendung derselben auf das Produkt Leitungssatz in Anbetracht der vorherrschenden Automatisierungshemmnisse als sinnvoll erscheinen. Die von den DFA-Methoden unterstellte Korrelation zwischen montagegerechter und damit einhergehend einer verbesserten automatisierungsgerechten Einzelteil- und Produktgestaltung sowie die explizite Ausrichtung einzelner DFA-Methoden auf das Fokusgebiet DFAA untermauern diese Vorgehensweise.

Grundlegend scheitert dies jedoch an mindestens einem entscheidenden Kriterium. Alle präsentierten Ansätze empfehlen die Vermeidung oder Substitution forminstabiler Einzelteile oder klassifizieren diese mindestens als montageerschwerenden Einflussfaktor wie folgende Auflistung zeigt:

- *Forminstabile Einzelteile gelten als montageerschwerender Einflussfaktor*
(Boothroyd & Dewhurst Methode; Lucas Methode; Hitachi AEM; Modified Westinghouse Methode; ProKon Methode
(Leaney et al. 1992, S. 10; Sealy et al. 1992; Hinckley 2001, S. 45; Boothroyd 2005, S. 231; MTM-Vereinigung e. V. 2014, S. 63)

- *Eliminierung ausschließlich zur Verbindung dienender Einzelteile*
(Boothroyd & Dewhurst Methode; ProKon Methode)
(Boothroyd 2005, S. 251; Klein et al. 2008, S. 83ff)

- *Explizite Aufforderung zur Vermeidung forminstabiler Einzelteile*
(Boothroyd & Dewhurst Methode)
(Boothroyd 2005, S. 288)

Montageoptimierende Gestaltungsrichtlinien für forminstabile Einzelteile und deren Montagepartner fehlen dabei gänzlich. Außerdem besteht eine der Hauptfunktionen des Automobilleitungssatzes in der Herstellung der Verbindung zwischen den elektrischen und elektronischen Komponenten innerhalb eines Fahrzeugs (siehe Kapitel 2.2).

Bestehende Gestaltungsrichtlinien, wie ausschließlich zur Verbindung dienende Einzelteile zu eliminieren, sind aufgrund der Produkthanforderungen des Leitungssatzes in der Praxis nicht anwendbar und daher auch nicht realisiert worden. Die Forschungsanalyse reflektierend scheitern ebenso gesamtheitliche Substituierungsversuche wie mithilfe von Flachleitern. Dessen ungeachtet ist der üblicherweise forminstabile Charakter von Flachleitern zu betonen. (Abel et al. 2016, S. 948). Dementsprechend würde der Einsatz von Flachleitern nicht zur Substitution forminstabiler Einzelteile führen.

Die Methoden zur Automatisierungsaufwandsermittlung betrachtend ermöglichen diese zwar die Bewertung von Bauteilkombinationen, trotzdem ist eine Anwendung auf Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen, aufgrund deren mangelnden Berücksichtigung, nicht realisierbar.

Die Reflexion des Stands der Technik der Leitungssatzfertigung, vorgestellter Methoden und Ansätze im Bereich DFA sowie der Automatisierungsaufwandsermittlung bekräftigt

die in Kapitel 1.3 aufgearbeitete Zielsetzung des Dissertationsvorhabens (siehe Abbildung 24).

Anforderungen an:

	<u>Produktgestaltung</u>		<u>Automatisierungseignungsbewertung</u>				<u>Teileart</u>	
	DFAA	Gestaltungsrichtlinien	ex ante	quantitativ	Montageprozess	Potenzialidentifikation	Klassifizierung	forminstabil
<u>Ansätze im Bereich:</u>								
<u>Produktgestaltung</u>								
Boothroyd & Dewhurst Methode	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Lucas Methode	✓		✓	✓	✓	✓		
Hitachi-AEM	✓		✓	✓	✓	✓		
Modified Westinghouse Methode		✓						✓
ProKon Methode	✓		✓	✓	✓	✓		✓
<u>Automatisierungsaufwandsermittlung</u>								
Walther				✓	✓	✓		
Deutschländer					✓	✓		
Spingler				✓	✓	✓		
Automatisierungspotenzialanalyse				✓	✓	✓		
<u>Klassifizierung forminstabiler Einzelteile</u>								
Milberg							✓	✓
Hoßmann		✓			✓		✓	✓
Schneider				✓	✓	✓	✓	✓
eigene Arbeit	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Legende:
 Anforderungen erfüllt ✓
 Anforderungen teilweise erfüllt ✓

Abbildung 24: Anforderungsbewertungsmatrix

Weiter motiviert die Anforderungsbewertungsmatrix die Berücksichtigung der Klassifizierungsansätze forminstabiler Einzelteile als ersten Ansatzpunkt zur Entwicklung einer generischen Methodik zur Bewertung und Optimierung der automatisierten Montage von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen.

4 Konzepterstellung

Kapitel 3.4 resümiert den Mangel an Methoden im Bereich der automatisierungsgerechten Produktgestaltung zur Unterstützung des automatisierten Zusammenbaus von Baugruppen mit forminstabilen Einzelteilen. Entsprechend einzuordnen ist das Dissertationsvorhaben im Bereich des DFAA (siehe Abbildung 25).

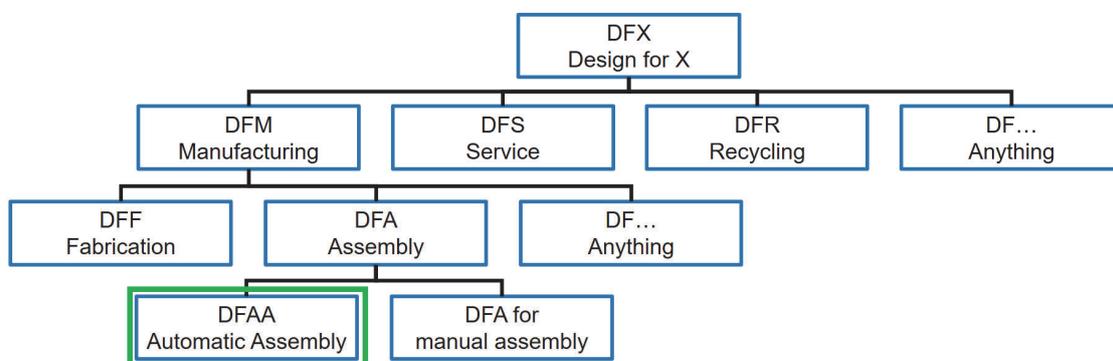


Abbildung 25: Betrachtungsfokus (grün) der Arbeit (in Anlehnung an Eskilander 2001, S. 25)

Basierend auf den erläuterten Grundlagen der Arbeit werden zur Konzeptionierung im Folgenden bestehende DFA-Methoden, Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands wie auch Ansätze zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile (siehe Kapitel 3) analysiert. Aufgrund der mangelnden Berücksichtigung forminstabiler Einzelteile in den DFA-Methoden sowie zur Gewährleistung einer umfassenden Berücksichtigung der verwendeten Einflussfaktoren erfolgt dabei die Betrachtung aller verbreiteter (siehe Kapitel 3.1) DFA-Methoden und nicht nur speziell der DFAA-Methoden.

Grundlage der Konzepterstellung bildet die nachfolgende Festlegung der Vorgehensweise zur Bewertung und Optimierung des Produktdesigns sowie die Aufarbeitung der Anforderungen. Des Weiteren werden die zu betrachtenden Prozessschritte festgelegt sowie der Betrachtungsrahmen der Methodik eingeschränkt.

4.1 Methodenkonzeption

4.1.1 Vorgehen und Art der Bewertung

Verbreitete DFA-Methoden wurden in Kapitel 3.1 ausgeführt. Die nachfolgende Analyse zeigt dabei Übereinstimmungen hinsichtlich benötigter Eingangsinformationen als auch deren Vorgehensweisen auf. Alle DFA-Methoden sind ex ante, also ohne genaue Kenntnis über den tatsächlichen oder späteren Montageprozess der Einzelteile, anwendbar. Ferner kann eine konvergierende Prozessstruktur mittels der Abstrahierung der Vorgehensweisen herausgearbeitet werden (siehe Abbildung 26).

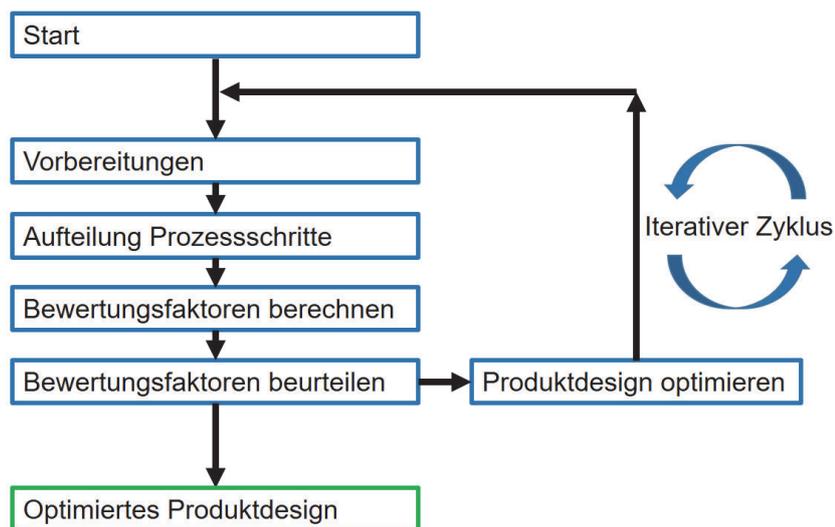


Abbildung 26: Abstrahierte Vorgehensweise verbreiteter DFA-Methoden

Zunächst werden die Prozessschritte der abstrahierten Vorgehensweise erläutert und anschließend zusammenfassend beurteilt.

Vorbereitungen:

Zu Beginn aller DFA-Methoden müssen bestehende Produkte oder Produktkonzepte zur anschließenden Bewertung vorliegen. Das Vorhandensein eines bestehenden Montageprozesses oder genaue Kenntnis darüber ist nicht erforderlich.

Aufteilung Prozessschritte:

Die Aufteilung der Prozessschritte zur Montage erfolgt in zweierlei Hinsicht.

Zum einen wird das zu analysierende Produkt in dessen Einzelteile oder Bauelemente zerlegt. Dies ermöglicht die Bewertung jedes einzelnen durchzuführenden Montageprozesses.

Zum anderen erfolgt eine Aufspaltung der Prozessschritte in Unterprozesse und darauf basierend die Zuweisung montagebeeinflussender Faktoren.

Die Boothroyd & Dewhurst Methode separiert die manuelle Montage in die Unterprozesse Handhabung sowie Einfügen und Befestigen. Die automatisierte Montage unterscheidet Handhabung und Einfügen. Die Lucas Methode unterteilt die Fügeanalyse in die Unterprozesse Greifen, Einfügen und Befestigen. Die Westinghouse Methode differenziert die montagebeeinflussenden Faktoren in Einflussfaktoren für das Erreichen, Greifen und Bringen sowie Einflussfaktoren für die Montageoperation. Abweichend dazu nimmt nur die Hitachi-AEM sowie die ProKon Methode für manuelle Montageprozesse keine Segmentierung vor. Konträr unterscheidet die ProKon Methode für automatisierte Montageprozesse zwischen Montageerschwernissen für das Greifen und das Positionieren.

Bewertungsfaktoren berechnen:

Eine weitere Analogie weisen die DFA-Methoden hinsichtlich der Bewertung der Montagefähigkeit oder automatisierungsgerechten Montagefähigkeit auf. Alle erläuterten Methoden bedienen sich quantitativer Berechnungsschemas unter Verwendung spezifischer numerischer Bewertungsfaktoren.

Grundlage bilden die montagebeeinflussenden Faktoren, da insbesondere das Einzelteil selbst sowie dessen Montagepartner entscheidend den Ablauf des Montageprozesses prägen. Die DFA-Methoden weisen jeder Ausprägungsstufe eines montagebeeinflussenden Faktors einen spezifischen Zahlenwert zu und ermöglichen damit die Berechnung einer produktspezifischen Bewertung.

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Bewertungsfaktoren der DFA-Methoden entspricht ebenso denen zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands (siehe Kapitel 3.2). Abweichend hierzu unterscheidet sich nur die Vorgehensweise von Deutschländer (1989), der zwar gleichwohl die Einflussfaktoren kategorisiert und in Ausprägungsstufen unterteilt, diesen aber keinen Zahlenwert zuweist.

Bewertungsfaktoren beurteilen:

Aufgrund der differierenden Vorgehensweisen zur Berechnung der Bewertungsfaktoren unterscheiden sich auch die Vorgehensweisen zur Beurteilung derselben. Generell sind zwei Vorgehensweisen zu unterscheiden:

1. Vergleichswertmethode:

Die Vergleichswertmethode basiert auf dem Vergleich der berechneten Bewertungsfaktoren unterschiedlicher Produktdesigns. Typischerweise erfolgt der Vergleich der Bewertungsfaktoren zwischen dem IST-Zustand und einem oder mehreren optimierten Zuständen.

Ein typisches Beispiel hierfür ist die ProKon Methode.

2. Referenzwertmethode:

Die Referenzwertmethode konstituiert einen oder mehrere Schwellenwerte (auch Referenzwerte), bei denen das Produktdesign eine spezifische Eignung zur Montagefähigkeit oder automatisierungsgerechten Montagefähigkeit aufweist.

Typische Beispiele hierfür sind die Boothroyd & Dewhurst Methode, die Lucas Methode, die Hitachi-AEM sowie die Westinghouse Methode.

Die hier getroffene Zuordnung der DFA-Methoden in die Kategorie der Referenzwertmethode exkludiert die Verwendung der Vergleichswertmethode nicht. Liegen mehrere vergleichbare Konzepte vor erfolgt die finale Entscheidung mittels der Vergleichswertmethode.

Produktdesign optimieren:

In Abhängigkeit der kalkulierten Bewertungsfaktoren und der zu erreichenden Zielzustände erfolgt typischerweise die iterative Optimierung des Produktdesigns. Dies wiederum führt zu angepassten Eingangsgrößen im Prozessschritt Vorbereitungen.

Optimiertes Produktdesign:

Resultat der DFA-Methoden bildet eine, hinsichtlich deren Montagefähigkeit oder automatisierungsgerechten Montagefähigkeit, optimierte Baugruppe oder optimiertes Produkt.

Die Vorteile der konvergierenden Prozessstruktur der DFA-Methoden sowie deren Praxiserprobung nutzend legt die abstrahierte Vorgehensweise (siehe Abbildung 26) das Grundgerüst zur Konzeptionierung der generischen Methodik zur Bewertung und Optimierung der automatisierten Montage von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen. Die Anwendbarkeit der Methodik ex ante sowie die Realisierung einer quantitativen Bewertung definieren sich dabei als Grundanforderungen.

Die Analyse zeigt ferner die differierende Art der Berechnungsmethode aller DFA-Methoden sowie der Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands zur Bewertung des Produktdesigns. Trotzdem ermöglichen die Berechnungsmethoden die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Konzepte und begünstigen die Entscheidungsfindung mithilfe quantitativer Werte. Ferner nutzen sowohl die DFA-Methoden als auch die Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands dabei eine konvergierende Prozessstruktur. Diese beinhaltet auf abstrahierter Ebene die Schritte Kategorisierung montagebeeinflussender Faktoren sowie Zuweisung quantitativer Werte basierend auf der spezifischen Ausprägung des Einflussfaktors.

Orientierend an den Berechnungsschemas der Bewertungsfaktoren gilt es im Rahmen der Methodikentwicklung, die montagebeeinflussenden Faktoren sowie deren spezifische Ausprägungen zu ermitteln und ein entsprechendes Berechnungsschema zu definieren. Ein Hauptfokus liegt dabei auf der Schaffung einer erweiterbaren Ausgangsbasis hinsichtlich der verwendeten montagebeeinflussenden Faktoren sowie deren Ausprägungen.

Aufgrund der nicht vorhandenen Datenbasis soll zur Beurteilung der Bewertungsfaktoren die Vergleichswertmethode genutzt werden. Vorteilhaft daran ist die Durchführung eines Vergleichs zwischen einem IST-Zustand und einem iterativ optimierten Zustand ohne die Notwendigkeit der Festlegung spezifischer Schwellenwerte.

4.1.2 Produktdesignoptimierung

Sowohl die DFA-Methoden (siehe Kapitel 3.1) als auch die Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands (siehe Kapitel 3.2) verfolgen die Zielsetzung der Schwachstellenidentifikation, im Produkt- oder Einzelteildesign, bezogen auf deren Montageprozesse. Insbesondere die DFA-Methoden beinhalten den Prozessschritt der Produktdesignoptimierung (siehe Abbildung 26). Die Analyse zeigt dabei zwei differierende Ansätze. Entweder erfolgt die Optimierung des Produktdesigns ausschließlich mithilfe des Wissens über die montagebeeinflussenden Faktoren sowie deren jeweilig instanziierte Ausprägung oder es stehen zusätzlich Gestaltungsrichtlinien zur Verfügung.

DFA-Methoden, die Gestaltungsrichtlinien zur Verfügung stellen, sind die Boothroyd & Dewhurst Methode, die Lucas Methode, die Westinghouse Methode sowie auch die DFA 2 Methode. Auch in anderer Literatur, wie beispielweise bei Hesse (2012b), Lotter et al. (2016) und Weik (2018), finden sich Gestaltungsrichtlinien. Die Hitachi AEM, die ProKon Methode sowie die Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands stellen keine Gestaltungsrichtlinien, zur Optimierung des Produktdesigns, zur Verfügung.

Aufgrund der Komplexität in den Prozessen der Generierung und des Einsatzes von Gestaltungsrichtlinien arbeitet Eskilander (2001, S. 74ff) potenzielle Problemfaktoren

heraus und stellt anschließend mögliche Lösungsansätze bereit. Zu den Problemfaktoren zählen unter anderem Schwierigkeiten in der Anwendbarkeit und Nutzbarkeit sowie eine fehlende strukturierte Vorgehensweise zur Verwendung der Gestaltungsrichtlinien im Produktoptimierungsprozess. Die Lösung dieser Problemfaktoren sieht Eskilander (2001, S. 75) hauptsächlich in der Aufarbeitung einer strukturierten Vorgehensweise zur Verwendung der bereitgestellten Gestaltungsrichtlinien und definiert schlussfolgernd die Kombination einer numerischen Bewertung des Produktdesigns mit der Bereitstellung von Gestaltungsrichtlinien als geeignete Vorgehensweise. Zur Strukturierung unterteilt die von Eskilander (2001) entwickelte DFA 2 Methode, ähnlich der Boothroyd & Dewhurst Methode, die Gestaltungsrichtlinien in generelle Gestaltungsrichtlinien auf Produktebene sowie spezifische Gestaltungsrichtlinien auf Einzelteil- oder Bauelementebene.

Resümierend definiert sich als Anforderung der zu entwickelnden generischen Methodik die Verknüpfung der Vorgehensweise zur Generierung einer numerischen Bewertungsmethode (siehe Kapitel 4.1.1) in Kombination einer strukturierten Verwendung bereitgestellter Gestaltungsrichtlinien.

Vorteilhaft daran ist die Unterstützung während der Produktdesignphase zum einen durch die Identifikation von Optimierungspotenzial mittels Bereitstellung berechneter Bewertungsfaktoren und zum anderen der Bereitstellung von Lösungsansätzen mittels Gestaltungsrichtlinien.

4.2 Definition und Abgrenzung der betrachteten Prozessschritte

Zur Festlegung des Betrachtungsrahmens der Methodik werden im Folgenden Montagesysteme analysiert und resultierend daraus die Art des Montagesystems definiert sowie dessen Leistungsbereich abgegrenzt. Ferner erfolgt die Festlegung der zu betrachtenden Prozessschritte unter der ergänzenden Analyse der Grundbewegungen eines Fügeprozesses nach MTM (Methods-Time-Measurement) sowie die Einschränkung der betrachteten Fertigungsverfahren des Fügens.

4.2.1 Art des Montagesystems

Hesse et al. (2016) differenzieren verschiedene Arten von Montagesystemen anhand deren Leistungsbereichen. Die Einordnung erfolgt entweder bezogen auf die Gesamtproduktionsmenge oder die Jahresproduktionsmenge bei Zweischichtbetrieb in Abhängigkeit der Anzahl an Montageteilen je Produkt (siehe Abbildung 27). (Hesse 2012b, S. 16; Hesse et al. 2016, S. 547) Für die nachfolgende Betrachtung ist die Abgrenzung zwischen Gesamtproduktionsmenge und Jahresproduktionsmenge nicht relevant.

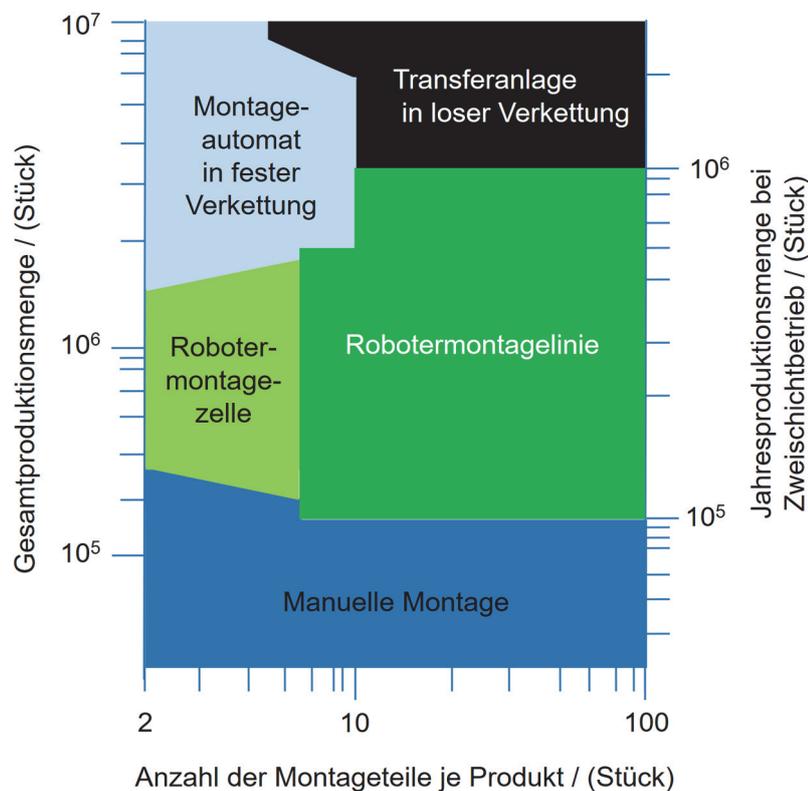


Abbildung 27: Leistungsbereichseinordnung von Montagesystemen (in Anlehnung an Hesse 2012b, S. 16; Hesse et al. 2016, S. 547)

Produkte mit vergleichsweise geringen Produktionsmengen, unabhängig deren Anzahl an Montageteilen, sind dem Bereich der manuellen Montage zugeordnet.

Die angrenzenden Leistungsbereiche bei steigenden Produktionsmengen decken Roboter-montage-zellen oder Roboter-montagelinien ab. Produkte mit einer geringeren

Anzahl an Montageteilen sind den RoboterMontagezellen zugeordnet. Produkte mit höherer Montageteileanzahl der RoboterMontagelinie.

Bereiche mit vergleichsweise hohen Produktionsmengen werden, in Abhängigkeit der Montageteileanzahl, in fest verkettete Montageautomaten sowie lose verkettete Transferanlagen aufgeteilt. Eine Leistungsbereichseinordnung von Montagesystemen stellt aufgrund des sich ständig wandelnden Leistungsvermögen der Systeme hierbei nur eine grobe Einteilung derselben dar (Hesse 2012b, S. 16; Hesse et al. 2016, S. 547).

Bezugnehmend zur Leistungsbereichseinordnung der Montagesysteme erläutert Kapitel 2.2.3 den hohen manuellen Anteil an Montageoperationen der heutigen Leitungssatzproduktion insbesondere im Bereich der Montagelinie. Fertigungsmodule von Leitungssätzen mit vergleichsweise geringen Produktionsmengen, beispielsweise aufgrund einer hohen Variantenvielfalt (siehe Kapitel 2), ordnen sich demnach korrekt in den Bereich der manuellen Montage ein.

Das Beispiel des OM654 Motorleitungssatzes von Mercedes-Benz (siehe Abbildung 6 und Abbildung 7) verdeutlicht dabei eine widersprüchliche Leistungsbereichseinordnung. Die heutige Montage einzelner Fertigungsmodule erfolgt, ausgenommen der entsprechenden Leitungsbearbeitungsschritte im Bereich der Vorfertigung, ausschließlich manuell. Dies gilt ebenfalls für die manuelle Komplettierung der Fertigungsmodule zu den sogenannten Zusammenbauten. Basierend auf den Zahlen des Kraftfahrt-Bundesamts (2021) ergibt sich ein Anteil von Fahrzeugen mit Dieselantrieb sowie Diesel-Hybridantrieb von 48 % der Fahrzeugneuzulassungen der Marke Mercedes im Jahr 2021 in Deutschland. In Kombination mit den weltweiten Absatzzahlen von Mercedes-Benz PKW und Mercedes-Benz Vans von etwa 2,3 Millionen Fahrzeugen im Jahr 2021 ergibt sich als geschätzte Extrapolation ein Absatz von 1,1 Millionen Fahrzeugen mit einem Dieselmotor im Jahr 2021 (Daimler AG 2021a). Der OM654 ist dabei anteilmäßig der am häufigsten eingesetzte Motor. Dementsprechend wäre der OM654 Motorleitungssatz von Mercedes-Benz vollumfänglich dem Leistungsbereich der Montagesysteme mit Robotereinsatz zuzuordnen.

Summierend präsentiert die Leistungsbereichseinordnung der Montagesysteme das Angrenzen der Montagesysteme mit Robotereinsatz an den Leistungsbereich der

manuellen Montage. Für den Schritt der Montageautomatisierung manueller Montageoperationen mit forminstabilen Einzelteilen wird dementsprechend das Anwendungsgebiet der Methodik auf die automatisierte Einzelteilmontage unter Verwendung von Industrierobotern ausgerichtet. Unterstützt wird diese Vorgehensweise von der aufgezeigten Montage von Leitungssätzen im Leistungsbereich der manuellen Montage, obwohl deren Produktionsmengen eine Einordnung in den Bereich der Montagesysteme mit Robotereinsatz ergeben würden.

4.2.2 Eingrenzung des Leistungsbereichs

Ebenso wie manuelle Montageprozesse von Faktoren wie beispielsweise Greifdistanzen oder dem Teilegewicht limitiert werden, sind dergestalt auch Industrieroboter von spezifischen Leistungsmerkmalen geprägt (Robert Bosch GmbH 2010). Um eine sinnvolle Anwendbarkeit der Methodik ex ante, ohne die Notwendigkeit der genauen Kenntnis über das später in der Praxis eingesetzte System, zu gewährleisten, ist die Ausrichtung des Betrachtungsbereichs auf typische Systeme erforderlich.

Uhlmann et al. (2018, S. 1655) benennt die Klasse der 6-Achs-Knickarm-Roboter als die am häufigsten eingesetzten Industrieroboter. Almansa et al. (2016, S. 43ff) bezeichnen 6-Achs-Knickarm-Roboter vorteilhaft als Universalroboter und als die flexibelste Roboterbauart und nennen als relevante Leistungsmerkmale die Wiederholgenauigkeit der Pose sowie die Wiederholgenauigkeit der Bahn. Der typische Bereich der Wiederholgenauigkeit der Pose reicht hierbei von $\pm 0,02$ mm bis $\pm 0,2$ mm. Zur Einhaltung des oberen Wertebereichs entspricht die maximale Nennlast 150 kg. (Almansa et al. 2016, S. 43ff; Scheinman et al. 2016, S. 85ff) Die Verifizierung der Posen-Wiederholgenauigkeitsbereiche erfolgt mittels einer Analyse verbreiteter 6-Achs-Knickarm-Roboter in Tabelle 4-1.

Tabelle 4-1: Pose-Wiederholgenauigkeitsbereiche verbreiteter 6-Achs-Knickarm-Roboter in Abhängigkeit deren Traglastfähigkeit (ABB 2020; DENSO 2020; FANUC 2020; KUKA 2020; Stäubli 2020; YASKAWA 2020)

Pose-Wiederholgenauigkeitsbereich / (mm)			
bei Traglastfähigkeiten von			
Hersteller	<10 kg	10 kg – 80 kg	80 kg – 150 kg
FANUC	$\pm 0,02 - \pm 0,08$	$\pm 0,07 - \pm 0,15$	$\pm 0,2 - \pm 0,3$
DENSO	$\pm 0,02 - \pm 0,03$	$\pm 0,05 - \pm 0,07$	-
KUKA	$\pm 0,01 - \pm 0,03$	$\pm 0,01 - \pm 0,05$	$\pm 0,05 - \pm 0,06$
Stäubli	$\pm 0,02 - \pm 0,04$	$\pm 0,03 - \pm 0,05$	$\pm 0,06 - \pm 0,1$
ABB Robotics	$\pm 0,01 - \pm 0,03$	$\pm 0,02 - \pm 0,06$	$\pm 0,03 - \pm 0,19$
Yaskawa	$\pm 0,01 - \pm 0,15$	$\pm 0,02 - \pm 0,15$	$\pm 0,07 - \pm 0,2$
Bereiche	$\pm 0,01 - \pm 0,15$	$\pm 0,01 - \pm 0,15$	$\pm 0,03 - \pm 0,3$

Bongardt (2004, S. 18) analysiert neben der Wiederholgenauigkeit der Pose von Standardindustrierobotern ebenfalls deren Wiederholgenauigkeit der Bahn. Hierbei liegen die Werte, in Abhängigkeit deren Nennlasten, in Bereichen von $\pm 0,1$ mm bis ± 1 mm. Almansa et al. (2016, S. 43ff) geben Bahnwiederholgenauigkeitsbereiche von $\pm 0,1$ mm bis ± 2 mm unter Nennlasten bis 150 kg an.

Weiterer wichtiger Kennwert bei der Planung von Montageaufgaben ist die maximale Reichweite des Industrieroboters (Almansa et al. 2016, S. 42). Für den Traglastfähigkeitsbereich bis 150 kg werden maximale Reichweiten verbreiteter 6-Achs-Knickarm-Roboter im Bereich von 1298 mm (DENSO 2020), 2594 mm (Stäubli 2020), 3124 mm (YASKAWA 2020), 3500 mm (ABB 2020; FANUC 2020) bis zu 3700 mm (KUKA 2020) angegeben.

Die Eingrenzung der Anwendbarkeit der Methodik erfolgt dementsprechend auf erfolgreich auszuführende Montageprozesse unter Berücksichtigung der analysierten

typischen Wertebereiche der Posen-Wiederholgenauigkeit, der Bahn-Wiederholgenauigkeit sowie den maximal möglichen Reichweiten verbreiteter 6-Achs-Knickarm-Roboter.

4.2.3 Montieren

Die Definition des Begriffs Montieren in Kapitel 2.1 zeigt die Vielseitigkeit der darin eingeschlossenen Verfahren und Vorgänge. Aufgrund des Mangels an Methoden zur automatisierungsgerechten Gestaltung von Baugruppen unter Anwesenheit forminstabiler Einzelteile wird nachfolgend die Begrifflichkeit des Montierens für die Methodikentwicklung eingeschränkt.

Die Zielsetzung des Erreichens einer hohen Produktivität berücksichtigend, besteht eine Vorgehensweise in der Segmentierung des Produktherstellungsprozesses in Primär- und Sekundäraufwände. Primäraufwände sind der Wertschöpfung eines Produkts direkt zuträglich. Sekundäraufwände umfassen notwendige Aufwendungen ohne Beitrag zur Wertschöpfung. Bezogen auf die Montage dienen Primäraufwände der direkten Vervollständigung des Produkts. Konträr führen Sekundäraufwände nicht zur weiteren Vervollständigung des Produkts. (Lotter et al. 2016, S. 33ff)

Eine überspitzte Form dieser Betrachtungsweise würde nur das Fügen als primären Aufwand klassifizieren. Zur Realisierung eines Fügevorgangs müssen aber zwangsläufig auch die nach MTM (Methods-Time-Measurement) definierten fünf Grundbewegungen ausgeführt werden. (Lotter et al. 2016, S. 62f) Die fünf Grundbewegungen nach MTM umfassen Hinlangen, Greifen, Bringen, Fügen und Loslassen. Dabei sind Hinlangen und Greifen als notwendige Grundbewegungen für das Aufnehmen des Einzelteils und Bringen, Fügen sowie Loslassen als notwendige Grundbewegungen für das Platzieren definiert. (Syska 2006, S. 99; Almeida et al. 2009; Robert Bosch GmbH 2010, S. 7; Bokranz et al. 2012, S. 94ff)

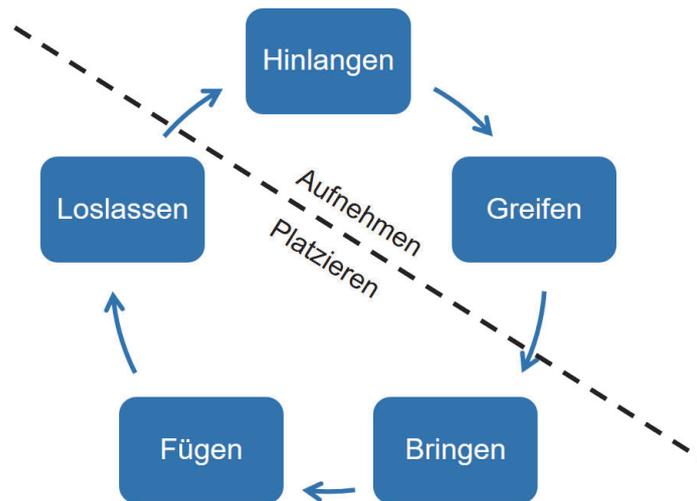


Abbildung 28: Fünf Grundbewegungen nach MTM (in Anlehnung an Robert Bosch GmbH 2010, S. 7)

Ein weiterer Ansatz beschreibt den Transfer der fünf Grundbewegungen auf automatisierte Montagevorgänge mit Montagerobotern (Lotter 1992, S. 255ff, 2012b, S. 73ff; Lotter et al. 2016, S. 159ff; Schröter et al. 2016, S. 218; Trommnau et al. 2020b, S. 50f).

Die Grundbewegungen sind dabei wie folgt zu definieren:

Hinlangen:

Die Hinlangbewegung ist definiert als die Bewegung des Robotergreifers oder Endeffektors von einem Startpunkt hin zur Position des zu greifenden Einzelteils. Aufgrund des typischerweise zyklischen Ablaufs von Montagevorgängen entspricht der Startpunkt der Hinlangbewegung normalerweise demselben Punkt des Loslassens des letzten Einzelteils.

Greifen:

Durch das Greifen erlangt der Roboter die Kontrolle über das Einzelteil. Erst dadurch wird die Manipulation des Einzelteils für den Montagevorgang möglich. Der Primäraufwand beim Greifen beschränkt sich einzig auf das Schließen des Greifers um das Einzelteil.

Bringen:

Die Bringbewegung dient dazu, das Einzelteil zur Fügeposition zu bringen. Sie kann als umgekehrte Hinlangbewegung betrachtet werden. Direkt anschließend an das Bringen erfolgt das Fügen.

Fügen:

Unter dem Fügen wird üblicherweise das Ineinandersetzen oder Aneinandersetzen der Einzelteile verstanden. Das Fügen beinhaltet alle, für den selbigen Prozess notwendigen, Bewegungen. Sind zusätzliche Einzelteile, beispielsweise für die Fixierung Clips oder Schrauben notwendig, sind diese Montageprozesse separat zu betrachten. Ein zur Fixierung zusätzlich notwendiger Prozess ist daher ebenfalls in die fünf Grundbewegungen nach MTM aufzuspalten. Dies gilt auch für Montageroboter mit zwei Armen. Die Aufspaltung des jeweils auszuführenden Montageprozesses erfolgt je Arm.

Loslassen:

Nach der erfolgreichen Ausführung der vorherigen Bewegungen kann das Einzelteil losgelassen werden und ein neuer Montageprozess starten. In der Praxis wird nach dem Loslassen teils eine definierte Position, beispielsweise die „Null-Position“, angefahren bevor der nächste Montageprozess startet. (Lotter 1992, S. 257f; Robert Bosch GmbH 2010, S. 15ff; Lotter 2012b, S. 75ff; Kuffner et al. 2016, S. 904ff; Lotter et al. 2016, S. 160f; Trommnau et al. 2020b, S. 50f)

4.2.4 Fügen

Nach der Primär-Sekundäranalysemethode stellt das Fügen einen primären Montagevorgang dar. Aufgrund der Vielzahl der unter die Begrifflichkeit des Fügens fallenden Fertigungsverfahren wird nachfolgend eine Einschränkung der betrachteten Fertigungsverfahren vorgenommen.

Die Untergliederung der Fügeverfahren sowie die Untergruppen des Zusammensetzens präsentiert Abbildung 29.

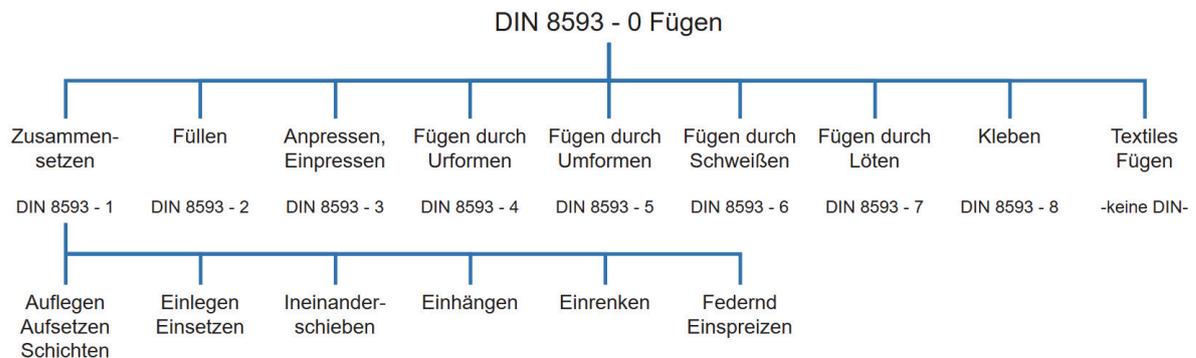


Abbildung 29: Fertigungsverfahren des Fügens mit Untergruppen des Fertigungsverfahrens Zusammensetzen (in Anlehnung an DIN 8593-1, S. 6)

Entsprechend dem in Kapitel 4.2.3 erläuterten Verständnis des Fügens nach MTM wird das angewendete Fertigungsverfahren zum Fügen, innerhalb der Begrifflichkeit des Montierens, auf den Teilaspekt des Fügens durch Zusammensetzen nach DIN 8593-1 reduziert. Dies ist mit den in Kapitel 3.1 vorgestellten DFA-Methoden vereinbar. Alle beschriebenen DFA-Methoden klassifizieren die unter das Zusammensetzen fallenden Verfahren als eher einfach zu realisierende Fügevorgänge. Ferner ordnet Hesse (2012a, S. 195f) die unter das Zusammensetzen fallenden Fügeverfahren von „leicht zu automatisieren“ bis „schwierig zu automatisieren“ anhand des Auskommens mit einer einfachen Hauptbewegung wie folgt:

Ineinanderschieben – Einlegen, Einsetzen - Auflegen, Aufsetzen, Schichten, federnd Einspreizen – Einrenken. Einhängen wird hierbei nicht klassifiziert. Im weiteren Verlauf erfolgt dementsprechend die Ausrichtung der Methodik auf die „leicht zu automatisierenden“ Fertigungsverfahren zum Fügen.

4.2.5 Materialbereitstellung

Hoßmann (1992, S. 13f) definiert weitere, auf den Fügeprozess einwirkende, Einflussfaktoren im Kontext der automatisierten Montage forminstabiler Einzelteile. Neben der Gestalt des forminstabilen Einzelteils und dessen Montagepartner inkludieren diese ferner das Fügeverfahren, das Montagewerkzeug, das Handhabungssystem, die Art der Materialbereitstellung sowie die Peripherie der Montagezelle. Die Anforderungen an Letztere können erst nach Festlegung des Fügeprozesses definiert werden.

Insbesondere die Materialbereitstellung gilt als entscheidendes Automatisierungshemmnis. Laut Wößner et al. (2014, S. 33) liegen 70 % bis 80 % der Automatisierungshemmnisse der Montageautomatisierung im Bereich der Teilebereitstellung. Schneider (1999, S. 32) erläutert den entscheidenden Einfluss der Materialbereitstellung im Kontext der Montageautomatisierung forminstabiler Einzelteile und widmet, aufgrund des Umfangsreichtums des Themengebiets der automatisierungsgerechten Materialbereitstellung forminstabiler Einzelteile, seine gesamte Arbeit dieser Aufgabenstellung.

Die Analyse der in Kapitel 3.1 erläuterten DFA-Methoden weisen, bezüglich der Betrachtung der Materialbereitstellung, keinen einheitlich abgegrenzten Betrachtungsfokus auf.

Die Boothroyd & Dewhurst Methode widmet sich, im Vergleich zu den weiteren aufgeführten Methoden, sehr umfangreich dem Thema der Gestaltung der Einzelteile zur automatisierungsgerechten Materialbereitstellung. Betrachtung findet die Eignung zur Förderung der Einzelteile durch beispielsweise Rotationswendelförderer sowie der Aufwand zur Orientierung der Einzelteile für anschließende Montageprozesse. Die Behandlung der Materialbereitstellung bildet dabei einen abgeschlossenen Betrachtungsbereich. Die Lucas Methode widmet sich der Thematik des Zusammenhangs der Gestalt des Einzelteils sowie der Auswirkung auf die Materialbereitstellung und differenziert hierbei zwischen der Eignung zur Nutzung verschiedener Zuführtechnologien sowie Merkmalen zur Feststellung der Einzelteileausrichtung.

Im Gegensatz dazu stehen die Hitachi-AEM, die Westinghouse Methode sowie die ProKon Methode. Während die Westinghouse Methode noch die Komplexität der

Einzelteilorientierung für die Materialbereitstellung berücksichtigt, exkludieren die Hitachi-AEM sowie die ProKon Methode diese komplett.

Im Folgenden wird die Betrachtung der Materialbereitstellung trotz der hohen Relevanz nicht explizit weiterverfolgt. Entscheidend dafür ist die von Hoßmann (1992, S. 13f) genannte Problematik, der erst im Nachgang möglichen Anforderungsdefinition. Dies steht ebenso konträr zur Anwendbarkeit der Methodik ex ante.

5 Entwicklung einer generischen Methodik

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 4 aufgearbeiteten Anforderungen wird im Folgenden eine generische Methodik zur Bewertung und Optimierung der automatisierten Montage von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen, in Auseinandersetzung mit vorhandenen Ansätzen, entwickelt. Der Fokus liegt auf der Unterstützung des automatisierten Zusammenbaus mittels konstruktiver Gestaltung zweier Einzelteile oder Bauelemente, wovon mindestens ein Einzelteil oder Bauelement forminstabil ist (siehe Kapitel 4.1.1). Insbesondere erfolgt die Entwicklung und Beschreibung eines generischen Einflussfaktorenmodells, das das Basiselement der Methodik bildet.

5.1 Eine Methodik und deren Bausteine

Der Begriff Methodik stammt ursprünglich aus dem Griechischen und ist als

„Kunst des planmäßigen Vorgehens“ (Duden 2020)

definiert. Hierrunter wird die

„Wissenschaft von der Verfahrensweise einer Wissenschaft“ (Duden 2020)

verstanden.

Nach Laufenberg (1996, S. 6ff) ermöglicht eine Methodik die Lösung sowohl praktischer als auch theoretischer Problem- oder Aufgabenstellungen. Zum System der Methodik zählen Laufenberg (1996, S. 6ff) und Heyn (1999, S. 5ff) die Bausteine Modell, Hilfsmittel und Methode.

Hilfsmittel ermöglichen zum einen die Anwendung der Methoden zur Manipulation der Modelle und zum anderen die Entwicklung und Realisierung der Methoden auf Basis der Modelle (siehe Abbildung 30) (Laufenberg 1996, S. 6ff; Heyn 1999, S. 5ff).

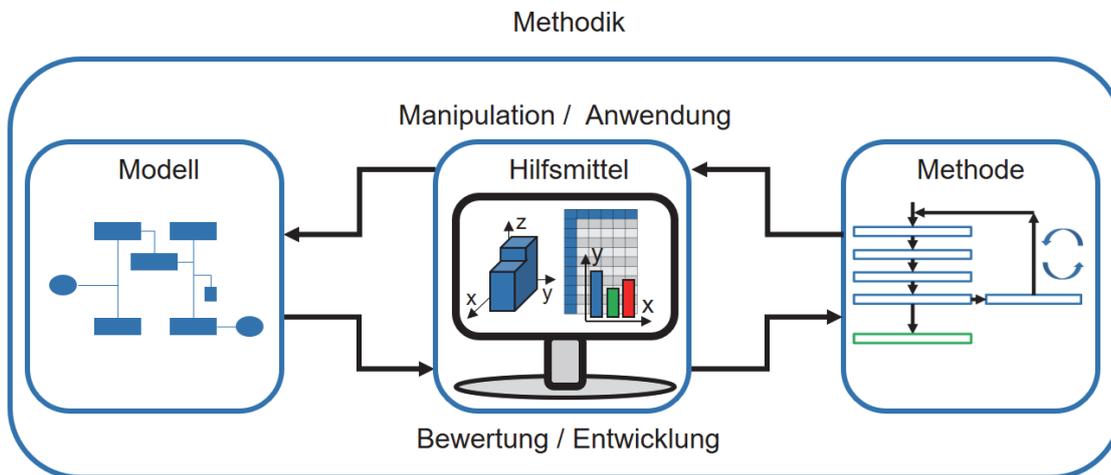


Abbildung 30: Dem System der Methodik zugehörige Bausteine (in Anlehnung an Laufenberg 1996, S. 7; Heyn 1999, S. 6)

Zum eindeutigen Verständnis des Begriffs der Methodik werden die Bausteine Modell und Methode in Anhang 9.2 näher erläutert.

5.2 Vorgehensweise zur Methodikentwicklung

Fundament der Methodikentwicklung bildet der in Kapitel 3 aufgezeigte Zusammenhang zwischen Einzelteildesign, Design des Montagepartners und den daraus resultierenden Auswirkungen auf den automatisierten Zusammenbau derselben. Abbildung 31 zeigt das zugrundeliegende Schema.

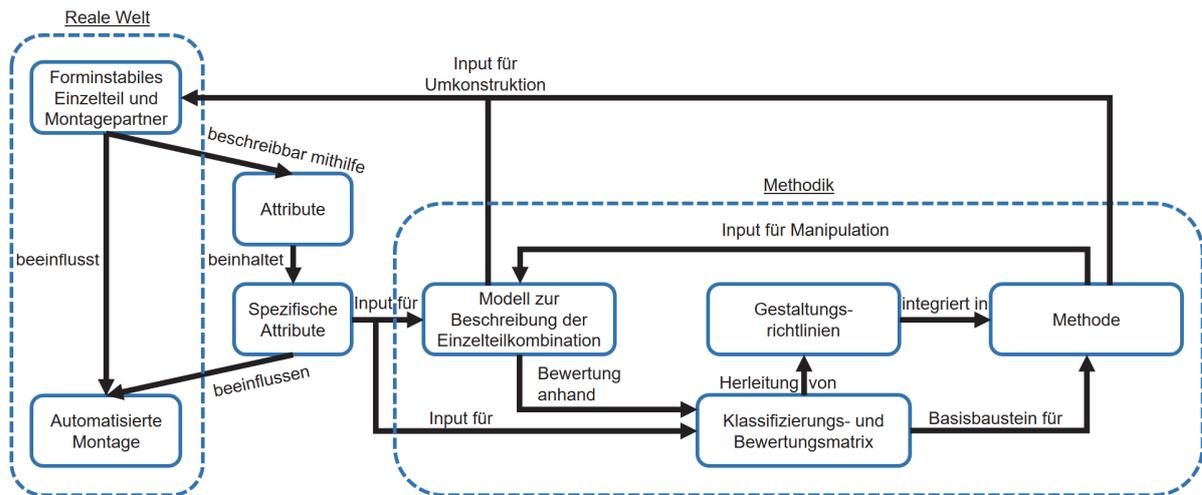


Abbildung 31: Schema der Methodik im Zusammenspiel mit der realen Welt

Im Folgenden werden die Bausteine Modell, Hilfsmittel und Methode der zu entwickelnden Methodik beschrieben.

Modell:

Das in der realen Welt vorliegende forminstabile Einzelteil und dessen Montagepartner können mithilfe von Attributen beschrieben werden. Hierbei beeinflussen nur spezifische Attribute, die montagebeeinflussenden Faktoren, den automatisierten Zusammenbau derselben.

Für die Modellentwicklung gilt es, aus einer Grundgesamtheit spezifischer Attribute, die für die automatisierte Montage forminstabiler Einzelteile relevantesten Attribute zu definieren und mit diesen das Modell zu generieren. Insbesondere gilt es, die spezifischen Attribute mit Wechselwirkung zwischen Komponentendesign und automatisiertem Zusammenbau derselben herauszuarbeiten und im Modell zu berücksichtigen.

Dies korreliert direkt mit den von Patzak (1982, S. 309f) definierten Anforderungen der Handhabbarkeit sowie Einfachheit an ein Modell (siehe Anhang 9.2) und der zu bearbeitenden Aufgabenstellung der Arbeit (siehe Kapitel 1.3 und 3.4).

Ziel des Modells ist die Realisierung einer Zustandsbeschreibung des automatisierten Zusammenbauprozesses eines forminstabilen Einzelteils mit dessen Montagepartner

anhand deren Designs. Ermöglicht wird die Zustandsbeschreibung mittels einer Klassifizierung unter Verwendung der herausgearbeiteten spezifischen Attribute und deren instanzierter Ausprägung.

Hilfsmittel:

Als Eingangsgrößen zur Entwicklung einer Klassifizierungs- und Bewertungsmatrix werden ebenfalls die spezifischen Attribute genutzt. Die Matrix ermöglicht die Zustandsbewertung des Modells und liefert dementsprechend implizit Handlungsempfehlungen basierend auf einer numerischen Kennzeichnung der Ausprägungen. Ferner dient die Matrix als Basis zur Herleitung von expliziten Gestaltungsrichtlinien zur automatisierungsgerechten Produktgestaltung.

Sowohl die Matrix als auch die Gestaltungsrichtlinien sind hierbei als Hilfsmittel im Kontext der Methodik zu kategorisieren (siehe Abbildung 30).

In der praktischen Anwendung sollte zu Beginn der Implementierung der Methodik in den Entwicklungsprozess des jeweiligen Unternehmens eine, spezifisch auf das betrachtete Produkt ausgerichtete, Herleitung von expliziten Gestaltungsrichtlinien erfolgen. Dementsprechend ist die Herleitung von expliziten Gestaltungsrichtlinien in der gewöhnlichen praktischen Anwendung der Methodik zu vernachlässigen und nur bei entsprechendem Bedarf durchzuführen.

Eine exemplarische Demonstration der Herleitung von expliziten Gestaltungsrichtlinien wird im späteren Verlauf veranschaulicht. Darauf basierend verwendet der Produktdesigner entweder die exemplarisch hergeleiteten und damit schon als bestehend anzusehenden Gestaltungsrichtlinien oder entsprechend die vom Unternehmen, in der Implementierungsphase der Methodik, hergeleiteten Gestaltungsrichtlinien.

Methode:

Die Methode legt die Vorgehensweise zur Verwendung der Matrix und der Gestaltungsrichtlinien fest. Aus der Anwendung der Methode resultierende

Ausgangsgrößen dienen anschließend als Input zur Manipulation des Modells sowie zur Umkonstruktion des Einzelteils und dessen Montagepartner.

Der Input zur Umkonstruktion besteht zum einen aus dem manipulierten Modell und zum anderen aus den zugehörigen Gestaltungsrichtlinien. Die angepasste Bauteilkombination realisiert ferner den neuen Zustand in der realen Welt.

Die Methodikentwicklung, mit den Bestandteilen Modell, Hilfsmittel und Methode basiert auf den peer-reviewed Veröffentlichungen

„Design for Automatic Assembly: A new Approach to Classify Limp Components“
(Trommnau et al. 2020b)

sowie

„Limp Component Design for Automatic Assembly – Classification Rating System and Design Rules“ (Trommnau et al. 2020c)

5.3 Generisches Einflussfaktorenmodell

Zunächst erfolgt eine Analyse der verwendeten spezifischen Attribute der in Kapitel 3.1 und Kapitel 3.2 aufgeführten DFA-Methoden sowie der Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands. Die Analyse schafft die Basis zur Aufarbeitung der relevantesten Einflussfaktoren des automatisierten Zusammenbaus unter Verwendung verbreiteter 6-Achs-Knickarm-Roboter (siehe Kapitel 4.2.2) eines forminstabilen Einzelteils mit dessen Montagepartner. Ferner erfolgt die Abstrahierung automatisierter Fügeprozesse unter Berücksichtigung des in Kapitel 4.2.3 aufgearbeiteten Begriffs des Montierens.

Resultierend aus der Einflussfaktorenanalyse sowie der Abstrahierung automatisierter Fügeprozesse erfolgt die Zuordnung der Einflussfaktoren zu deren jeweiligem Prozessschritt.

5.3.1 Einflussfaktorenanalyse

Eine simple Übertragung der, in den vorhandenen DFA-Methoden sowie Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands verwendeten Attribute in den Bereich der automatisierten Montage mit forminstabilen Einzelteilen ist nicht möglich. Dies ist der Ausklammerung forminstabiler Einzelteile bei allen analysierten Methoden (siehe Kapitel 3.4) geschuldet. Vielmehr müssen die sich spezifisch, aufgrund der Charakteristik der Forminstabilität des Einzelteils ergebenden Einflussfaktoren herausgearbeitet werden.

Das Modell resultiert folgend aus der Kombination vorhandener sowie weiterentwickelter und neu definierter Attribute. (Trommnau et al. 2020b, S. 51)

Tabelle 5-1 präsentiert die Einflussfaktorenanalyse. Die Horizontale listet die Methoden (teils in abgekürzter Schreibweise), die Vertikale die jeweils verwendeten spezifischen Attribute auf. Unterscheiden die DFA-Methoden zwischen manueller und automatisierter Montage ist dies mittels der entsprechenden Buchstaben „M“ oder „A“ gekennzeichnet.

Die zweite Spalte von rechts präsentiert die Summe des jeweiligen spezifischen Attributs entlang der aufgeführten Methoden. Die Summe der rechten Spalte berücksichtigt dabei nur die Methoden mit explizitem Bezug zur automatisierten Montage.

Externe Einflussfaktoren, also Umgebungsbedingungen berücksichtigende Einflussfaktoren (vergleiche Walther (1985)) finden, aufgrund der Anforderungsdefinition einer Bewertung ex ante (siehe Kapitel 4.1), keine Erwähnung.

Tabelle 5-1: Einflussfaktorenanalyse anhand verbreiteter DFA-Methoden

Spezifische Attribute	B&D M	B&D A	Lucas M	Lucas A	Hitachi	Westinghouse	ProKon M	ProKon A	Walther	Deutschländer	APA	Σ	ΣA
Festhalten	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	11	6
Fügerichtung		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	10	6
Einfachheit des Ausrichtens	x	x	x	x		x	x	x	x		x	9	5
Befestigungsprozess und -methode	x	x	x	x	x	x	x	x			x	9	4
Einfachheit der Handhabung	x	x	x			x		x		x	x	7	4
Fugstellenanzahl oder Fügetoleranz			x	x		x	x		x	x	x	7	4
Zugänglichkeit oder Sichtbarkeit der Fügestelle	x		x				x	x	x	x	x	7	4
Einzelteilma(e)	x	x	x			x	x			x		6	2
Einzelteilgewicht	x		x			x	x			x		5	1
Prüf-/Justieroperationen							x	x	x	x		4	3
Werkzeugnutzung	x					x	x	x				4	1
Zuführtechnologie				x						x	x	3	3
Fügekräfte	x	x	x									3	1
Greifflächen								x			x	2	2
Einstecktiefe	x						x					2	0
Distanzen						x						1	0

Da sich die Methoden teils voneinander abweichender Bezeichnungen oder Definitionen der Attribute bedienen, werden diese im Folgenden für die Methodikentwicklung einheitlich definiert und falls notwendig, in Clustern zusammengefasst.

Festhalten:

Unter Festhalten wird die Notwendigkeit verstanden das zu montierende Einzelteil bis zum Erreichen dessen finaler Position oder dessen endgültiger Fixierung, die beispielsweise erst durch das Montieren weiterer Fixierungen erreicht wird, nicht loslassen zu können.

Fügerichtung:

Die Fügerichtung beschreibt den Einbezug der Richtung oder der Anzahl der zur Ausführung des Fügeprozesses notwendigen Achsen. Ein jeweils auf den Anwendungsfall festgelegtes Koordinatensystem bildet dabei den Bezugspunkt.

Einfachheit des Ausrichtens:

Der Vorgang des Ausrichtens des Einzelteils kann mithilfe von Erkennungsmerkmalen, vorhandenen Symmetrien oder auch Positionierhilfen, entweder am Einzelteil selbst oder an dessen Montagepartner, zu verschiedenen Zeitpunkten entlang des Montageprozesses beeinflusst werden.

Befestigungsprozess und –methode:

Unter dem Überbegriff des Befestigungsprozesses und der Befestigungsmethode versteht sich die Berücksichtigung der Art der Befestigungsoperation zur Montage des Einzelteils. Berücksichtigung finden sowohl Befestigungsoperationen mit als auch ohne weitere zur Befestigung notwendige Einzelteile, wie beispielsweise Schrauben.

Einfachheit der Handhabung:

Die Handhabung des Einzelteils erschwerende Faktoren, wie beispielsweise die Flexibilität des Einzelteils, die Gefahr des Verklemmens, Verhakens, Zerbrechens oder Verkratzens, fallen unter diesen Überbegriff.

Fügestellenanzahl oder Fügetoleranz:

Dieses Cluster berücksichtigt entweder die Anzahl der teils gleichzeitig zu fügenden Stellen zum Erreichen der endgültigen Position des Einzelteils oder die zur Verfügung stehenden Toleranzbereiche während des Fügens des Einzelteils.

Zugänglichkeit oder Sichtbarkeit der Fügestelle:

Einschränkungen in der Erreichbarkeit oder die Sichtbarkeit der Fügestelle betreffende Behinderungen umfassendes Cluster.

Einzelteilabmaß(e):

Unter dem Überbegriff Einzelteilabmaße wird das Einbeziehen eines oder mehrerer Abmaße des zu fügenden Einzelteils verstanden. Die Einzelteilabmaße werden beispielsweise dazu verwendet, dasselbe in eine definierte Kategorie bezüglich dessen geometrischer Form einzuordnen.

Einzelteilgewicht:

Berücksichtigung des Gewichts des zu fügenden Einzelteils.

Prüf- und Justieroperationen:

Einbezug erforderlicher Aufwände, wie beispielsweise die Kontrolle von Messgrößen oder notwendige Einstellvorgänge, zum vollständigen Abschluss des Fügeprozesses.

Werkzeugnutzung:

Miteinbezug der bestehenden Notwendigkeit der Nutzung zusätzlicher Werkzeuge zur Realisierung des Fügeprozesses.

Zuführtechnologie:

Berücksichtigung mithilfe welcher Anlagentechnik oder Vorgehensweise die Ausgangsorientierung des zu fügenden Einzelteils, aufgrund dessen geometrischer Form, herbeigeführt werden kann.

Fügekräfte:

Berücksichtigung auftretender Widerstände in Form von Gegenkräften, die der eigentlichen Fügerichtung entgegengesetzt wirken.

Greifflächen:

Art und Anzahl vorhandener Greifflächen zur Aufnahme und Manipulation des Einzelteils.

Einstecktiefe:

Berücksichtigung der Fügetiefe beim Fügen des Einzelteils in den Montagepartner.

Distanzen:

Einbezug vorhandener Distanzen zwischen Fügestelle und Ausgangsposition des Einzelteils.

5.3.2 Abstrahierung automatisierter Fügeprozesse

Resultierend der Ausprägung spezifischer Attribute beeinflussen diese gleichwohl manuelle als auch automatisierte Montagevorgänge (Trommnau et al. 2020b, S. 50f).

Das MTM-Verfahren, die Boothroyd & Dewhurst Methode, die Lucas Methode, die Modified Westinghouse Methode sowie die ProKon Methode für die automatisierte Montage spalten dafür Montageprozesse in eigens definierte Montageprozessphasen und

weisen diesen die jeweils relevantesten Attribute zu. Diese Vorgehensweise findet ebenfalls bei der APA und teils bei der Automatisierungsaufwandsermittlung nach Walther (1985) Verwendung. Entsprechend wird dieser Ansatz für die Modellentwicklung verwendet da dies dem Anwender eine strukturierte Übersicht der relevantesten Attribute der jeweiligen Montageprozessphase bereitstellt.

Basierend auf der Übertragbarkeit der fünf Grundbewegungen manueller Montageprozesse nach MTM auf automatisierte Montagevorgänge mit Montagerobotern (siehe Kapitel 4.2.3) erfolgt die Aufspaltung des Montageprozesses mit forminstabilen Einzelteilen in dieser Arbeit, im Gegensatz zu den erwähnten Methoden und deren differierenden Aufspaltungen, anhand der fünf Grundbewegungen nach MTM. Diese eignen sich aufgrund ihrer festgelegten Definition sowie weiten Verbreitung und Erprobung im industriellen Einsatz. In Abbildung 32 werden beispielhaft die Montageprozessphasen nach MTM anhand eines automatisierten Einsteckprozesses einer forminstabilen gecrimpten Einzelleitung in ein Steckergehäuse illustriert.

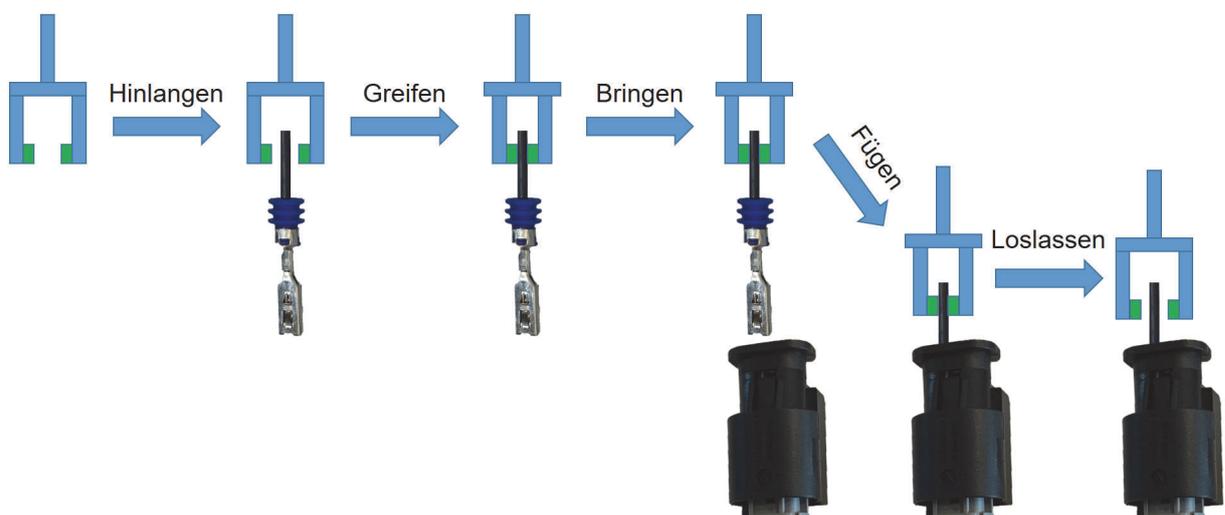


Abbildung 32: Fünf Grundbewegungen automatisierter Montageprozesse (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 51)

5.3.3 Prozessschrittzuordnung spezifischer Einflussfaktoren

Für die Entwicklung des Modells erfolgt nachfolgend die Definition der, den automatisierten Zusammenbau des forminstabilen Einzelteils mit dessen Montagepartner beeinflussenden, spezifischen Attribute sowie deren Ausprägungen und ferner deren Zuordnung zur entsprechenden Montageprozessphase (siehe Abbildung 32) (Trommnau et al. 2020b, S. 51ff).

Orientierung bietet die in Kapitel 5.3.1 aufgearbeitete Einflussfaktorenanalyse. Anhand der Verwendungshäufigkeit eines Attributs ist eine Rückschlüsselung auf dessen Relevanz, bezüglich der Beeinflussung des Montageprozesses, abschätzbar. Die Verwendung eines Attributs in mehreren Methoden bestätigt dementsprechend dessen entscheidenden Einfluss auf den Montageprozess. Die Verwendungshäufigkeit eines Attributs ist anhand der Summenhöhe zu erkennen (siehe Tabelle 5-1). Neben der Orientierung an bestehenden spezifischen Attributen gilt es, ebenso die Klassifizierungsansätze forminstabiler Einzelteile in der Modellentwicklung (siehe Kapitel 3.3) zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Definition weiterer spezifischer Attribute, inklusive deren Ausprägungen, erforderlich. (Trommnau et al. 2020b, S. 51)

Die zusammenfassende Auflistung der Prozessschritte mit deren zugeordneten spezifischen Attributen und Ausprägungen präsentiert Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2: Einflussfaktoren auf automatisierte Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 52)

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α -& β -symmetrisch
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,x$ mm	$\pm x$ mm	-
	Biegesteifigkeit Montagepartner	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
<i>Fügen</i>	Ausrichten	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
<i>Loslassen</i>	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten nicht notwendig	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

Hinlangen:

Attribut: Geometrische Klasse

Während des Hinlangens ist der Endeffektor des Roboters noch nicht in Kontakt mit dem zu manipulierenden Einzelteil. Diese Phase wird daher zur grundlegenden Beschreibung der Art des zu manipulierenden Einzelteils genutzt. (Trommnau et al. 2020b, S. 51)

Die Boothroyd & Dewhurst Methode, die Lucas Methode, die Westinghouse Methode, die Prokon Methode sowie Deutschländer (1989) berücksichtigen die Abmaße des Einzelteils (siehe Tabelle 5-1) und nutzen diese teils zur Kategorisierung desselben anhand dessen geometrischer Form.

Auch innerhalb der Ansätze zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile herrscht Konsens hinsichtlich der wesentlichen Beeinflussung des Automatisierungskonzepts aufgrund der geometrischen Form des Einzelteils. Diese stellen dementsprechend die Klassen blockförmig, flach und lang zur Klassifizierung zur Verfügung und differenzieren weiter die langgestreckten Einzelteile in die Unterklassen langgestreckt-offen und langgestreckt-geschlossen.

Ferner sehen auch Zheng et al. (1991, S. 2598) und Hirai (2000, S. 12) die geometrische Form des Einzelteils als relevanten Einflussfaktor im Kontext der Montageautomatisierung mit Industrierobotern an und klassifizieren, ohne Referenz auf bestehende Klassifizierungsansätze, forminstabile Einzelteile in blockförmig, flach und lang.

Dies motiviert die Verwendung des Attributs geometrische Klasse und dessen Ausprägungsdifferenzierung in: würfelförmig; flach; lang-geschlossen und lang-offen. (Trommnau et al. 2020b, S. 51f)

Attribut: Biegesteifigkeit

Ein weiteres grundlegendes Attribut stellt die Biegesteifigkeit des Einzelteils dar. Während DFA-Methoden wie die Boothroyd & Dewhurst Methode, die Lucas Methode, die Westinghouse Methode sowie die Prokon Methode ausschließlich das Auftreten von Schwierigkeiten in der Handhabung aufgrund des forminstabilen Charakters des

Einzelteils feststellen, ermöglicht die dimensionslose Biegesteifigkeitskennzahl K_{B_S} (siehe Kapitel 3.3.3 und Formel 5) eine definierte Unterscheidung forminstabiler Einzelteile anhand deren Biegesteifigkeit.

Abweichend der Definition einer mittig angreifenden Gewichtskraft F_G in Höhe des Eigengewichts des Einzelteils, berechnet aus dessen Masse m_E sowie der Schwerebeschleunigung g , wird im Folgenden die Berechnung der Durchbiegung unter Annahme einer gleichmäßig über die Länge des Einzelteils verteilten Linienlast q_0 (Abbildung 33) vorgenommen (Trommnau et al. 2020b, S. 51f). Die Linienlast entspricht in ihrer Gesamtsumme der angreifenden Gewichtskraft F_G . Diese Vorgehensweise erfüllt die allgemein gültige Vorgehensweise zur Berechnung der Biegelinie unter Belastung durch Eigengewicht (Dankert et al. 2013, S. 253ff).

Die Berechnung der Biegesteifigkeitskennzahl K_{B_S} erfolgt dementsprechend mit der allgemein bekannten Formel der Biegelinie einer gleichmäßig angreifenden Linienlast unter allen notwendigen Randbedingungen (siehe Formel 5 und 7) wie nach Dankert et al. (2013, S. 260).

Exemplarisch sind dafür Flächenträgheitsmomente eines rechteckigen Querschnitts (siehe Formel 8) sowie eines kreisförmigen Querschnitts (siehe Formel 9), wie bei Einzelleitungen üblich, aufgeführt.

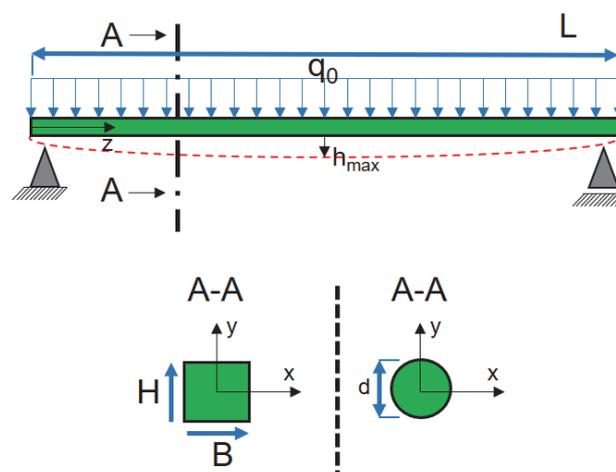


Abbildung 33: Biegebalken unter Einwirkung einer gleichmäßig angreifenden Linienlast (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 52)

$$K_{Bs} = \frac{h_{\max}}{L} \quad (5)$$

$$\frac{h_{\max}}{L} = \frac{5}{384} \cdot \frac{q_0 \cdot L^3}{E \cdot I} \quad (7)$$

$$I_{xx} = \frac{B \cdot H^3}{12} \quad (8)$$

$$I_{xx} = I_{yy} = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (9)$$

Im Falle nicht homogener zusammengesetzter Materialien wie beispielsweise Leitungen, bestehend aus Litzen und Isolationsmaterial, erfolgt eine theoretisch angenommene Substitution mithilfe eines homogenen Alternativmaterials (Trommnau et al. 2020b, S. 51).

Die Differenzierung der Ausprägungen sowie die dazugehörigen Randbedingungen bleiben unverändert und werden für das Modell verwendet. Dementsprechend wird segmentiert in:

forminstabil mit $K_{Bs} > 0,05$;

eher forminstabil mit $0,05 > K_{Bs} > 0,03$;

eher formstabil mit $0,03 > K_{Bs} > 0,001$ und

formstabil mit $K_{Bs} < 0,001$. (Trommnau et al. 2020b, S. 51f)

Attribut: Materialbereitstellung

Kapitel 4.2.5 betont die Relevanz der Materialbereitstellung im Kontext der automatisierten Montage und arbeitet die Vielfältigkeit des Themengebiets heraus.

Beispielsweise erfolgt die Bereitstellung von Leitungen oder Schläuchen meist auf Kabeltrommeln. Hierbei kann durch die Direktverarbeitung von der Kabeltrommel das Erreichen einer definierten geometrischen Gestalt mithilfe von Führungen ermöglicht

werden. (Trommnau et al. 2019, S. 389f; Trommnau et al. 2020b, S. 52) Dies verifizieren ebenfalls die in Tabelle 2-1 aufgeführten Kabelverarbeitungsanlagen.

Zur Realisierung einer grundlegenden Unterscheidung der Arten der Materialbereitstellung erfolgt dementsprechend eine Einteilung in Meterware und Einzelteile, ohne dies im weiteren Verlauf tiefergehender zu betrachten (Trommnau et al. 2020b, S. 52). Dies steht ebenso im Einklang mit der Anforderungsdefinition zur Verwirklichung einer Bewertung ex ante, da das Wissen über die Art der Materialbereitstellung typischerweise in der Produktdesignphase nicht vorhanden ist.

Greifen:

Attribut: Formänderung

Erst das Greifen ermöglicht die Manipulation des Einzelteils durch den Roboter.

Die geometrische Form des Einzelteils ist dabei als entscheidendes Einflusskriterium hervorzuheben. Entsprechend führen die ProKon Methode für automatisierte Montage sowie die APA das Attribut Greifflächen auf (siehe Tabelle 5-1). Bewertungskriterium bilden die Art und Anzahl vorhandener Greifflächen zur automatisierten Aufnahme und Manipulation des Einzelteils. Aufgrund der aufgebrachten Greifkräfte kann das Greifen, insbesondere bei forminstabilen Einzelteilen, Formänderungen bewirken. Diese Aussage wird von Jiménez (2012, S. 154f) unterstützt (siehe Anhang 9.3.1). Wichtig dabei ist die Anzahl der, von der Formänderung betroffenen Achsen. Beim Greifen eines schaumartigen Einzelteils kann der Greifvorgang entlang einer Achse beispielsweise Formänderungen entlang aller Achsen bewirken. Abbildung 34 illustriert schematisch die Formänderung entlang aller Achsen beim Greifen eines schaumartigen Einzelteils. Demgegenüber kann eine Leitung üblicherweise lotrecht zur Längsrichtung gegriffen werden ohne eine, den automatisierten Zusammenbau negativ beeinflussende, Formänderung entlang derselben zu bewirken. Ein Greifen entlang der Längsrichtung der Leitung führt zu einer Formänderung entlang derselben. (Trommnau et al. 2020b, S. 52)

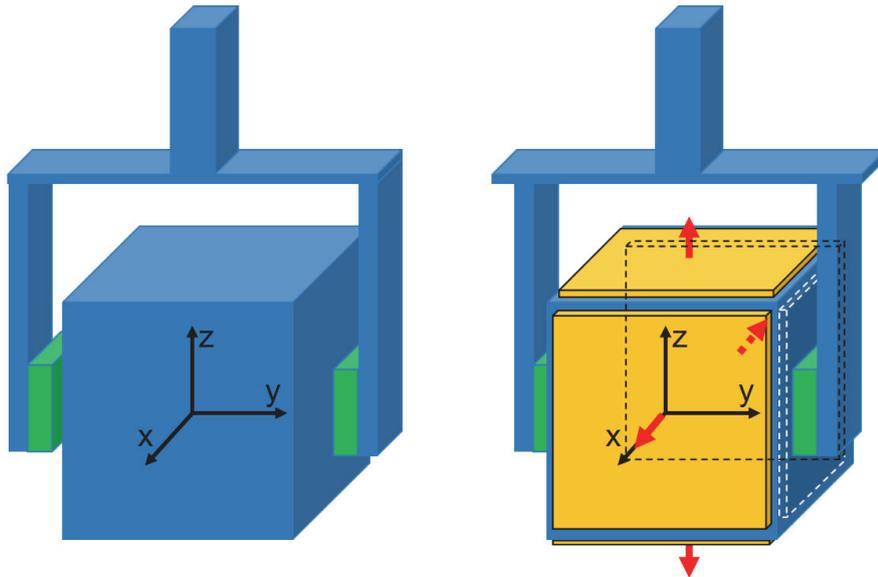


Abbildung 34: Mögliche Formänderung beim Greifen eines schaumartigen Einzelteils

Die Definition der Ausprägungen des Attributs Formänderung erfolgt anhand der Anzahl der von der Formänderung betroffenen Dimensionen. Die Differenzierung der Ausprägungen unterscheidet: jede Dimension; zwei Dimensionen und eine Dimension. (Trommnau et al. 2020b, S. 52)

Attribut: Verformung

Jede Formänderung eines Einzelteils ist mit einer spezifischen Art der Verformung verknüpft. Die in der Werkstoffkunde bekannten Verformungsarten plastisch, elastisch-plastisch und elastisch können Bargel (2018, S. 117ff) entnommen werden. Weiter sind aus dem Bereich der Technischen Mechanik die speziellen Charakteristika von Seilen oder Ketten bekannt, die idealisiert als vollständig biegeschlaff zu bezeichnen sind und beispielsweise Dankert et al. (2013, S. 157ff) entnommen werden können.

Die Relevanz einer Beschreibung des Verformungsverhaltens forminstabiler Einzelteile mittels Verformungsklassen, im Kontext der automatisierten Manipulation sowie Bereitstellung, zeigen ferner die Arbeiten von Jiménez (2012, S. 154f), Sanchez et al. (2018, S. 688ff) und Schneider (1999, S. 40ff). Insbesondere die Klasse der Einzelteile mit seilartigem oder textilartigem Charakter ist, neben den drei klassischen Verformungsarten

der Werkstoffkunde, relevant. Eine geringe Krafteinwirkung kann bei dieser Art von Einzelteil zu großen Formänderungen führen, die sich nicht eigenständig rückstellen und damit nicht elastisch sind. Das erneute Aufbringen geringer Kräfte kann die entstandene Formänderung wieder aufheben. Daher entspricht das Verformungsverhalten auch nicht der plastischen Verformung. Dieses Verformungsverhalten ist, insbesondere bei forminstabilen Einzelteilen und einer geplanten Manipulation derselben mithilfe von Industrierobotern, stark prozessbeeinflussend. Dementsprechend erfolgt eine Separierung der Ausprägungen des Attributs Verformung in: plastisch; elastisch-plastisch; elastisch und seilartig. (Trommnau et al. 2020b, S. 52)

Attribut: Symmetrie

Ein weiterer Einflussfaktor mit Auswirkung auf den Greifprozess ist die Symmetriearprägung des forminstabilen Einzelteils. Beeinflusst werden hierbei Prozesse wie das Ausrichten des Greifers vor oder nach dem Greifen sowie gegebenenfalls weitere Ausrichtprozesse vor und während des Fügens des Einzelteils. Ebenfalls werden auch Anlagenspezifika, wie beispielsweise die Anzahl notwendiger Freiheitsgrade des Roboters zur Durchführung des Montageprozesses, beeinflusst. (Trommnau et al. 2020b, S. 52f) Bekräftigend führen die Boothroyd & Dewhurst Methode, die Lucas Methode, die Westinghouse Methode, die Prokon Methode, die Automatisierungsaufwandsermittlung nach Deutschländer (1989) sowie die APA die Symmetriearprägungen des Einzelteils als Einflussfaktor auf den Zusammenbau auf (siehe Tabelle 5-1). Im Kontext der automatisierungsgerechten Bereitstellung forminstabile Einzelteile erfolgt ebenso die Definition verschiedener Arten von Symmetriearprägungen (siehe Kapitel 3.3.3). Die in den Methoden verwendeten Attributausprägungen unterscheiden sich jedoch, teils grundlegend, voneinander. Die Prokon Methode für automatisierten Zusammenbau berücksichtigt nur die Symmetriearprägung des Einzelteils bezogen auf dessen Fügeachse. Demgegenüber berücksichtigt die Boothroyd & Dewhurst Methode sowohl die Symmetriearprägung um die Fügeachse als auch um eine lotrechte Achse zur Fügeachse.

Da der automatisierte Zusammenbau von forminstabilen Einzelteilen unter Verwendung von Industrierobotern, sowohl aufgrund der Symmetrie des Einzelteils bezogen auf dessen Fügeachse als auch der Achse lotrecht zur Fügeachse auf die oben genannten Punkte Einfluss nimmt, ist eine Berücksichtigung der Symmetrieausprägungen bezogen auf beide Achsen notwendig. Abweichend von der Symmetriedefinition der Boothroyd & Dewhurst Methode für manuelle Montageprozesse und deren Rückschlüsselung auf die benötigte Montagezeit in Abhängigkeit definierter Symmetriewinkel wird im Folgenden nur auf das Vorhandensein von Symmetrien untersucht, da die Auswirkung auf den automatisierten Montageprozess an sich, anstatt der genauen Betrachtung von Montagezeiten, in Reflexion der Anforderungsdefinition (siehe Kapitel 4.1.2) im Vordergrund steht. Abbildung 35 veranschaulicht die α - und β -Symmetrie eines forminstabilen Bauelements am Beispiel einer Leitung mit gecrimpten Leitungsenden und EADs unter Verwendung der in Kapitel 3.1.1 erläuterten Symmetriedefinition. Die Kontakte sowie die verwendeten EADs an beiden Leitungsenden sind hierbei gleich.

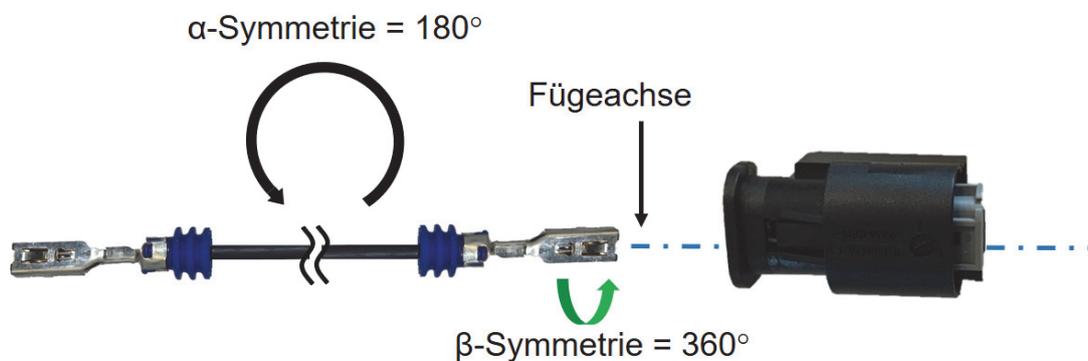


Abbildung 35: α - und β -Symmetrie einer Leitung mit gecrimpten Kontakten (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 52)

Zur Wiedererreichung einer korrekten Fügeposition um die Fügeachse des Bauelements ist ein Rotationwinkel von 360° notwendig. Dementsprechend ist das Bauelement nicht β -symmetrisch. Eine α -Symmetrie ist, aufgrund der beiden gleichen Kontakte und EADs an den Leitungsenden und dem daraus resultierenden Rotationswinkel von 180° , um eine

Achse lotrecht zur Fügeachse, zur Wiedererreichung einer korrekten Fügeposition, vorhanden.

Basierend auf der Prüfung auf Vorhandensein von Symmetrien des forminstabilen Einzelteils wird das Attribut in die Ausprägungen:

α - & β -symmetrisch; α -symmetrisch; β -symmetrisch und asymmetrisch separiert. (Trommnau et al. 2020b, S. 52)

Bringen:

Attribut: Positioniergenauigkeit

Die Bringbewegung dient dazu das Einzelteil nach dem Greifen zur Fügeposition zu bringen. Je höher die Genauigkeitsanforderungen an die Bringbewegung desto höher die Anforderungen an beispielsweise Regler oder kinematische Elemente des Roboters. Dabei bedingen Form- und Lagetoleranzen sowohl des Einzelteils als auch des Montagepartners die Genauigkeitsanforderungen an den Industrieroboter (siehe Kapitel 4.2.2).

Um eine korrekte Endposition der Bringbewegung realisieren zu können oder Kollisionen während der Bringbewegung zu vermeiden, muss bei der Bahnplanung mindestens die Dimension des Robotergreifers und des gegriffenen Einzelteils berücksichtigt werden. In der Regel ist dies bei formstabilen Einzelteilen problemlos, aufgrund deren im Voraus eindeutig bestimmbarer Dimensionen, möglich. Die Bahnplanung bei forminstabilen Einzelteilen, insbesondere den Robotergreifer überragende Einzelteile wie beispielsweise Einzelleitungen oder Leitungssätze, stellt sich als äußerst komplex dar. Dies liegt an den meist fehlenden Parametern zur Bestimmung der, sich teils während der Bringbewegung veränderlichen, geometrischen Form des Einzelteils. (Trommnau et al. 2020b, S. 52)

Die Komplexität des Themengebiets der Bahnplanung und der Vermeidung von Kollisionen mit Hindernissen entlang des Fahrwegs zeigen Latombe (1991) für formstabile und Hermansson et al. (2013) für forminstabile Einzelteile auf. Im weiteren Verlauf sollen daher nur Fahrwege des Roboters ohne zusätzliche Hindernisse betrachtet werden. Dementsprechend stellt die Bahnplanung ein gesondertes

Themengebiet dar und wird in dieser Arbeit nicht näher betrachtet. Unter dieser Prämisse ist die Genauigkeitsanforderung an die Endposition der Bringbewegung das relevante zu berücksichtigende Attribut.

Unter Einbezug der in Kapitel 4.2.1 sowie Tabelle 4-1 erfolgten Analyse typischer Pose- und Bahnwiederholgenauigkeiten verbreiteter Industrieroboter erfolgt dementsprechend die Unterscheidung der Ausprägungen des Attributs Positioniergenauigkeit in: $\pm 0,0x$ mm; $\pm 0,x$ mm sowie $\pm x$ mm (Trommnau et al. 2020b, S. 52).

Fügen:

Attribut: Biegesteifigkeit Montagepartner

Die in Kapitel 4.2.3 definierte Fügebewegung beinhaltet alle, nach der Bringbewegung noch notwendigen Prozessschritte zum vollständigen Montieren des Einzelteils mit dessen Montagepartner. Die Fügebewegung ist daher auch eine der wichtigsten Prozessschritte im Bereich der automatisierten Montage mit Industrierobotern.

Wie das Einzelteil selbst kann auch dessen Montagepartner formstabil oder forminstabil sein. Ein Beispiel für Montageprozesse von forminstabilen Einzelteilen mit formstabilen Montagepartnern sowie von forminstabilen Einzelteilen mit forminstabilen Montagepartnern liefert der in Kapitel 2.2 beschriebene Automobilleitungssatz.

So ist das Einstecken einer gecrimpten Einzelleitung in ein Kontaktgehäuse oder die Montage eines Leitungsbündels in einen Kabelkanal als „forminstabile-formstabile“ Paarung zu definieren. Das Bündeln von Einzelleitungen mit Klebeband ist wiederum zu den Montageprozessen mit ausschließlich forminstabilen Komponenten zu zählen. (Trommnau et al. 2020b, S. 53)

Die Boothroyd & Dewhurst Methode beschreibt als, die automatisierte Montage unterstützende Gestaltungsrichtlinie das Vorhandensein eines Montagepartners mit der Eignung als Grundplatte. Die Grundplatte soll dabei die Funktion einer geeigneten Ausgangsbasis für nachfolgende Zusammenbauprozesse sicherstellen. Zur Montage eines forminstabilen Einzelteils mit einem forminstabilen Montagepartner ist der forminstabile Montagepartner nicht als Grundplatte für die Montage nutzbar.

Dementsprechend muss zur Phase des Prozessschritts des Fügens die Eigenschaft des Montagepartners bezüglich dessen Formstabilität beschrieben werden. Hierzu wird die Biegesteifigkeitskennzahl K_{Bs} , wie beim Prozessschritt des Hinlangens (siehe Kapitel 3.3.3) definiert, herangezogen und gleichermaßen die Separierung der Ausprägungen verwendet. Die Ausprägungen des Attributs der Biegesteifigkeit des Montagepartners werden differenziert in:

forminstabil mit $K_{Bs} > 0,05$;

eher forminstabil mit $0,05 > K_{Bs} > 0,03$;

eher formstabil mit $0,03 > K_{Bs} > 0,001$ und

formstabil mit $K_{Bs} < 0,001$. (Trommnau et al. 2020b, S. 52f)

Attribut: Ausrichten

Vor der Ausführung des eigentlichen Fügeprozesses ist die lagerichtige Ausrichtung des Einzelteils notwendig. Diese steht in direkter Korrelation mit dem zuvor erläuterten Greifprozess. Durch ein „korrektes“ Greifen des Einzelteils oder die Unterstützung durch Einzelteilsymmetrien können nachfolgende Aufwände zur Orientierung reduziert oder gar eliminiert werden. (Trommnau et al. 2020b, S. 53) Nach der Primär-Sekundäranalysemethode definieren sich Ausrichtaufwände grundsätzlich als Sekundärvorgänge und dienen nicht der Wertschöpfung des Produkts. Korrelierend dazu erläutert die Boothroyd & Dewhurst Methode, im Kontext der automatisierten Montage unter Verwendung von Industrierobotern, die Gefahr der Zykluszeiterhöhung durch Ausrichtvorgänge. Im günstigsten Fall erfolgt der notwendige Ausrichtvorgang während der Bringbewegung und erhöht dementsprechend nicht die Montageprozesszeit (Trommnau et al. 2020b, S. 53).

Die Ausprägungen des Attributs Ausrichten werden daher in Abhängigkeit des benötigten Aufwands sowie dessen Komplexität zur Ausrichtung des forminstabilen Einzelteils differenziert.

Der höchste Ausrichtaufwand entsteht beim Ablegen des Einzelteils, Ausrichten des Endeffektors und Neugreifen des Einzelteils. Ist ein Ausrichten notwendig, aber ohne den Vorgang des Ablegens und Neugreifens möglich, kann dies mithilfe von 6-Achs-Industrierobotern realisiert werden (siehe Kapitel 4.2.2).

Eine detailliertere Unterscheidung der notwendigen Freiheitsgrade (Degree of Freedom; DOF) zur Ausrichtung des Einzelteils ist in der Praxis nicht zielführend und aufgrund weiterer Faktoren, wie der in der Regel noch unbekanntem Arbeitsplatzgestaltung während der Designphase des Produkts nicht entscheidbar. Die letzte Ausprägung des Attributs Ausrichten bildet damit die Klasse der forminstabilen Einzelteile, die für den anschließenden Fügeprozess nicht ausgerichtet werden müssen. Zusammengefasst unterscheiden die Ausprägungen des Attributs Ausrichten daher:

Ablegen-Ausrichten-Neugreifen; 6-DOF Roboter sowie Ausrichten nicht nötig. (Trommnau et al. 2020b, S. 52f)

Attribut: Fügebewegung

Zur Ausführung des eigentlichen Fügeprozesses ist eine entsprechende Fügebewegung notwendig. Die Notwendigkeit des Einbezugs des Clusters Fügerichtung stellen alle erläuterten Methoden, (siehe Tabelle 5-1). insbesondere alle spezifisch die automatisierte Montage betreffenden Methoden fest.

Die Analyse der DFA-Methoden sowie der Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands zeigt eine Differenzierung der Fügebewegungen zwischen einer vertikalen sowie einer von der vertikalen Fügebewegung abweichende Fügebewegung. Ferner führen Lotter et al. (2016, S. 18) noch die Gruppe der mehrachsigen Fügebewegungen auf.

Als weitere Art der Fügebewegung kann das Verfahren des Industrieroboters entlang einer festgelegten Bahn differenziert werden. Beispiele dafür zeigen Wößner (1993; 2003), Vögele (1998) und Verl et al. (2008). Nähere Erläuterungen hierzu finden sich in Anhang 9.3.2.

Besteht zur erfolgreichen Ausführung des Fügens die Notwendigkeit der Einholung zusätzlicher Informationen aus der Montageumgebung ist der Einsatz von Sensoren, wie beispielweise Kamerasensoren, notwendig. Der Fügeprozess ist dann sensorgeführt. Beispiele der sensorgeführten Montage mit forminstabilen Komponenten zeigt die angrenzende Forschung im Kontext des Platzierens vormontierter Automobilleitungssätze (siehe Tabelle 2-2).

Das Attribut Fügebewegung unterscheidet daher: sensorgeführt; bahngesteuert; mehrachsig und einachsig (Trommnau et al. 2020b, S. 52f).

Attribut: Positionierhilfen

Das Cluster der Einfachheit des Ausrichtens (siehe Kapitel 5.3.1 und Tabelle 5-1) erläutert die Opportunität sowie die Beeinflussung des Ausführens von Ausrichtvorgängen entlang des Montageprozesses zu verschiedenen Zeitpunkten. Eine Möglichkeit der Beeinflussung, mittels des Designs des Einzelteils oder des Montagepartners, besteht im Vorhandensein von Positionierhilfen. Basierend auf der ProKon Methode fallen unter die Begrifflichkeit der Positionierhilfen beispielsweise Fasen, Dome und Anschläge. Positionierhilfen können während des Fügens die Selbstausrichtung des Einzelteils unterstützen. Insbesondere im Bereich der automatisierten Montage betonen die Boothroyd & Dewhurst Methode, die ProKon Methode sowie teils die Methoden zur Automatisierungsaufwandsermittlung den relevanten Einfluss von Positionierhilfen auf Fügeprozesse. Dem beipflichtend beschreiben Wößner et al. (2014, S. 33) und Awad et al. (2017) den Vorteil der Kompensation von Fügetoleranzen aufgrund des Vorhandenseins von Positionierhilfen im Kontext der automatisierten Montage.

In Reflexion zuvor beschriebener Schwierigkeit der geometrisch eindeutigen Lagebestimmung unterstützen Positionierhilfen mindestens den Fügeprozess, speziell Fügeprozesse mit forminstabilen Einzelteilen, oder ermöglichen überhaupt deren Realisierung. Der Einflussfaktor Positionierhilfen überprüft daher das Bauteildesign hinsichtlich des Vorhandenseins derselben. (Trommnau et al. 2020b, S. 52f)

Loslassen:

Attribut: Fixierungen

Vor dem Loslassen des gefügten Einzelteils muss dessen Verbleib in der finalen Endposition sichergestellt sein. Um dies zu gewährleisten oder auch teils später notwendige Produktanforderungen zu erfüllen, werden in der Praxis meist zusätzliche Fixierungen oder Befestigungselemente, wie beispielsweise Kabelbinder, Clips oder Schrauben, verwendet.

Zusätzliche Fixierungen bedingen aber auch zusätzliche Montageprozesse. Das Einflussfaktorencluster Befestigungsprozess und -methode (siehe Tabelle 5-1) motiviert, anhand der Verwendungshäufigkeit, dessen Relevanz.

Die Analyse der DFA-Methoden (siehe Anhang 9.3.3) zeigt die Unterscheidung zwischen sich direkt an die Fügeoperation anschließenden und separat im Nachgang auszuführenden Befestigungsoperationen wie sie die Boothroyd & Dewhurst Methode sowie die Lucas Methode treffen.

In Reflexion des Kapitels 4.2.3 sind separat im Nachgang auszuführende Befestigungsoperationen isoliert zu analysieren. Ferner klassifizieren alle DFA-Methoden selbstsichernde Befestigungsoperationen, wie Schnapp- und Steckverbindungen, als einfach auszuführende Befestigungsoperationen.

In Kombination mit der in Kapitel 4.2.4 definierten Betrachtung eher einfach zu realisierender und nach DIN 8593-1 unter das Zusammensetzen fallender Fügevorgänge sowie vorangestellter Analyse, erfolgt die Unterscheidung der Ausprägungen des Einflussfaktors Fixierungen in: mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig; eine Fixierung notwendig und keine zusätzliche Fixierung notwendig. (Trommnau et al. 2020b, S. 52f)

Attribut: Festhalten

Der Einflussfaktor Festhalten beschreibt die Notwendigkeit, das Einzelteil bis zu dessen Fixierung nicht loslassen zu können. Tabelle 5-1 präsentiert die Berücksichtigung des Einflussfaktors entlang aller Methoden. Das Festhalten sowie die Montage weiterer

Fixierungen stehen in enger Wechselwirkung zueinander. Ein Festhalten des zu fügenden Einzelteils bis zu dessen finaler Fixierung bedingt, im Bereich der automatisierten Montage mit Industrierobotern, typischerweise den Bedarf eines zweiten Roboters oder zumindest eines zweiten Roboterarms. (Trommnau et al. 2020b, S. 53) Bekräftigend ist dies der Boothroyd & Dewhurst Methode zu entnehmen.

Veranschaulichend an einem Montagevorgang zur Komplettierung eines Automobileitungssatzes, wie dem Einfügen eines Leitungsbündels in einen Kabelkanal, erfolgt typischerweise die Fixierung des Leitungsbündels mit mindestens einem Kabelbinder am Kabelkanal (siehe Abbildung 6 und Kapitel 2.2.3). Der manuelle Montageprozess bedingt das Festhalten des Leitungsbündels während der Montage des Kabelbinders und damit die Verwendung zweier Hände. Ein simpler Transfer der manuellen Montageschritte auf einen automatisierten Montageprozess mit Industrierobotern, ohne die ausführliche Betrachtung weiterer Einflussfaktoren, verdeutlicht die beschriebene Notwendigkeit mindestens zweier Roboterarme. Aufgrund des entscheidenden Einflusses des Einflussfaktors Festhalten auf die automatisierte Montage differenziert dieser die Ausprägungen: muss festgehalten werden und festhalten nicht notwendig. (Trommnau et al. 2020b, S. 52f)

Attribut: Nachfolgende Fügeprozesse

Die Montage formstabiler Einzelteile ermöglicht die Identifizierung von Behinderungen nachfolgender Montageprozesse, aufgrund zuvor montierter Einzelteile, im Vorfeld. Dies korreliert mit der Betrachtung des Attributclusters der Zugänglichkeit oder Sichtbarkeit der Fügestelle.

Bei Montageprozessen mit forminstabilen Einzelteilen, wie beispielsweise Leitungen, kann die geometrische Position entlang deren gesamter Ausdehnung nach dem Fügevorgang nicht zwangsläufig eindeutig zuvor bestimmt werden. Zudem können nachträgliche Ausrichtprozesse des Produkts zu geometrischen Lageveränderungen des forminstabilen Einzelteils führen. Eine Überdeckung von Fügstellen, insbesondere bei einer automatisierten Montage, kann mindestens das manuelle Eingreifen erforderlich machen oder den gesamten automatisierten Montageprozess be- oder verhindern. Daher ist bei

der Montage forminstabiler Einzelteile die Auswirkung des zu montierenden Einzelteils auf nachfolgende Fügeprozesse als relevantes Einflusskriterium zu definieren. Die Unterscheidung der Ausprägungen des Attributs nachfolgende Fügeprozesse erfolgt dabei in werden behindert und keine Behinderung. (Trommnau et al. 2020b, S. 52f)

Weitere Attribute analysierter Methoden:

Die Attribute bzw. Cluster Einfachheit der Handhabung, Werkzeugnutzung, Einzelteilgewicht, Fügekräfte, Prüf- und Justieroperationen, Einstecktiefe, Zuführtechnologie und Distanzen (siehe Tabelle 5-1) werden in den hergeleiteten spezifischen Attributen für automatisierte Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen (siehe Tabelle 5-2) nicht explizit genannt oder berücksichtigt.

Das Attributcluster der Einfachheit der Handhabung berücksichtigt handhabungserschwerende Faktoren, wie die Flexibilität des Einzelteils. Aufgrund der expliziten Ausrichtung der Methodik auf Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen wird auf eine Aufführung dieses Attributs verzichtet. Des Weiteren berücksichtigt das Modell insbesondere die Forminstabilität des Einzelteils selbst als auch dessen Montagepartners.

Die Attribute Werkzeugnutzung, Fügekräfte, Prüf- und Justieroperationen sowie Zuführtechnologie finden aufgrund der, in Kapitel 4.2.3, Kapitel 4.2.4 und Kapitel 4.2.5, getroffenen Eingrenzungen der Vorgänge des Montierens, des Fügens und der Materialbereitstellung im Modell keine Verwendung. Insbesondere das Attribut Fügekräfte berücksichtigt, im Kontext der automatisierten Montage, nur die Boothroyd & Dewhurst Methode (siehe Tabelle 5-1). Beispielsweise werden Pressverbindungen als Fügevorgänge mit großen Kräften genannt, die nicht unter das Fügen durch Zusammensetzen nach DIN 8593-1 fallen.

Eine Berücksichtigung der Attribute Einzelteilgewicht und Distanzen erfolgt insbesondere mittels der in Kapitel 4.2.2 definierten Eingrenzung des Leistungsbereich verbreiteter 6-Achs-Knickarm-Roboter und der daraus abgeleiteten Anwendbarkeit der Methodik. Hierbei werden maximal mögliche Reichweiten aufgeführt sowie die Abhängigkeit der Pose- und Bahnwiederholgenauigkeit in Kombination mit deren maximalen Traglasten.

Das Attribut Einstecktiefe wird aufgrund des erhöhten Zeitbedarfs des Fügevorgangs (siehe Tabelle 5-1) nur von DFA-Methoden zur Bewertung manueller Montagevorgänge verwendet. Die zu entwickelnde Methodik fokussiert nicht die Optimierung des Zeitbedarfs, sondern vielmehr die Bewertung und Optimierung der Realisierbarkeit von Fügevorgängen unter Vorhandensein forminstabiler Einzelteile.

5.4 Generische Bewertungsmatrix

Die Aufarbeitung der Zielsetzung der Methodik zur Realisierung einer numerischen Ermittlung des Automatisierungsaufwands erfolgt in Reflexion der in Kapitel 4.1.1 erläuterten abstrahierten Vorgehensweise verbreiteter DFA-Methoden (siehe Abbildung 26) und deren Similarität hinsichtlich der Berechnungsart zur Bestimmung der Montagegerechtigkeit.

Angestrebtes Ziel ist die Entwicklung einer Klassifizierungs- und Bewertungsmatrix, die Kapitel 5.2 dem Bereich der Hilfsmittelentwicklung zuordnet. Mithilfe dieser Matrix wird eine Zustandsbewertung des Modells ermöglicht. Unterstützend dazu stellt Kapitel 4.1.1 ebenfalls die Übereinstimmung der Vorgehensweisen zur Berechnung der Bewertungsfaktoren zwischen den DFA-Methoden und den Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands (siehe Kapitel 3.2) fest.

Resümierend hebt Kapitel 4.1.1, trotz der grundsätzlich konvergierenden Vorgehensweise zur Bewertung, die Divergenz der Vorgehensweisen hinsichtlich der Berechnung der Bewertungsfaktoren und den zugrundeliegenden Zahlenwerten hervor. Insbesondere die in Kapitel 3.2 erläuterten Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands legen die verwendeten Zahlenwerte teils gar nicht oder nicht vollständig offen.

Ferner ist zur Entwicklung der Bewertungsmatrix dieser Methodik die Erarbeitung einer geeigneten Art der Bewertung notwendig. Als Ansatzpunkt dient die Automatisierungspotenzialanalyse (siehe Kapitel 3.2.4), aufgrund deren weiten Verbreitung und mehrjährigen Erfahrung, wie von Neb (2020) dargestellt (Trommnau et al. 2020c, S. 1140).

Gewichtungsfaktoren:

Zur Automatisierung eines Montageprozesses muss jeder Prozessschritt (siehe Kapitel 4.2.3) automatisiert werden. Scheitert die Automatisierung eines Prozessschritts, ist dementsprechend die Automatisierung des Gesamtprozesses nicht realisierbar. Diese Prämisse bildet die Basis zur Entwicklung der Bewertungsmatrix. Schlussfolgernd daraus wird die Berechnung der Eignung jedes einzelnen Prozessschritts bezüglich dessen Automatisierbarkeit ermöglicht. Die APA (siehe Kapitel 3.2.4) weist dafür jedem Einflussfaktor eine spezifische Wichtigkeit innerhalb eines Prozessschritts zu.

In Anlehnung daran erfolgt zunächst die Skalierung der spezifischen Attribute mittels einer Ordinalskala. Jedes spezifische Attribut wird, bezüglich dessen Einflussnahme auf die Komplexitätserhöhung oder gar Verhinderung der Montageprozessautomatisierung, unter Berücksichtigung der Ausprägung des Attributs einer Klasse zugeordnet. Hierfür werden drei Klassen eingeführt:

- Attribute der *ersten Klasse* weisen, unabhängig von deren Ausprägung, eine eher geringe Gefahr auf, die Automatisierung des Montagprozesses zu verhindern.
- Attribute der *zweiten Klasse* weisen, in Abhängigkeit von deren Ausprägung, die Gefahr auf, die Komplexität zur Automatisierung des Montageprozesses deutlich zu beeinflussen.
- Attribute der *dritten Klasse* weisen, in Abhängigkeit von deren Ausprägung, die Gefahr auf, die Automatisierung des Montageprozesses zu verhindern.
(Trommnau et al. 2020c, S. 1141)

Die Zuordnung der Attribute (siehe Kapitel 5.3.3) zu deren jeweiliger Klasse wird im Folgenden näher beschrieben.

Das Themengebiet der Materialbereitstellung wird aufgrund dessen intensiver Aufarbeitung im Kontext der automatisierten Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile (siehe Kapitel 3.3.3) sowie der Divergenz hinsichtlich der Anforderungsdefinition zur Verwirklichung einer Bewertung ex ante in dieser Methodik nicht explizit weiterverfolgt und es erfolgt dementsprechend keine Zuordnung des Attributs Materialbereitstellung zu einer bestimmten Klasse.

Attribute der ersten Klasse:

Attribut: Geometrische Klasse

Die geometrische Klasse eines forminstabilen Einzelteils führt grundsätzlich nicht zu einer Verhinderung der Automatisierung des Montageprozesses. Einzig die geometrische Klasse der lang-geschlossenen Einzelteile wird gleichermaßen als die am aufwändigsten zu automatisierende Klasse der forminstabilen Einzelteile sowohl im Kontext der automatisierten Bereitstellung als auch der automatisierten Montage beschrieben (siehe Kapitel 3.3).

Attribut: Fügebewegung

Die angrenzende Forschung im Bereich des Platzierens und Einsteckens (siehe Tabelle 2-2) bestätigt die Realisierbarkeit von Montageprozessen forminstabiler Bauelemente mittels sensorgeführter Fügebewegungen, welche die komplexeste Art der Ausprägung des Attributs Fügebewegung darstellt. Darüber hinaus bedienen sich auch Anlagen, wie eine Komax „Omega“ (siehe Tabelle 2-1), sensorgeführter Fügebewegungen beim automatisierten Bestücken der Kontaktkammern von Steckverbindern mit Einzelleitungen. Hierbei werden sowohl bildverarbeitende Verfahren zur lagerichtigen Ausrichtung des gecrimpten Kontakts als auch mittels Kraftsensor überwachte Verfahren zur Realisierung eines korrekten Fügevorgangs eingesetzt.

Attribut: Fixierungen

Alle erläuterten DFA-Methoden sowie die APA (siehe Kapitel 3.1 und Tabelle 5-1) bewerten die zur Fixierung des Einzelteils notwendige Befestigungsoperation. Teilweise ermöglichen die DFA-Methoden auch die Bewertung einer separat im Nachgang auszuführenden Befestigungsoperation zur vollständigen Fixierung des Einzelteils. Separat im Nachgang auszuführende Befestigungsoperationen werden hinsichtlich deren Montagegerechtigkeit bzw. automatisierungsgerechten Montage ausnahmslos schlechter bewertet als sich direkt an die Fügeoperation anschließende Befestigungsoperationen wie beispielsweise selbstsichernde Befestigungsoperationen mittels Schnapp- oder

Steckverbindung. Grundsätzlich gelten aber selbst separat im Nachgang auszuführende Befestigungsoperationen in keiner der DFA-Methoden als montageverhindernder Faktor. Auch in bestehende Anlagen integrierte Verfahren, wie teils die angrenzende Forschung im Bereich des Verlegens zeigt (siehe Tabelle 2-2), bestätigen die Realisierbarkeit von Montagevorgängen forminstabiler Einzelteilen mit anschließenden zusätzlichen Befestigungsoperationen.

Attribute der zweiten Klasse:

Attribut: Biegesteifigkeit

Die Biegesteifigkeit des zu montierenden Einzelteils wirkt sich auf mehrere Attribute verschiedener Prozessschritte aus. Betroffen davon sind die Art der Materialbereitstellung (siehe Kapitel 3.3.3), die Positioniergenauigkeit, die Fügebewegung, das Festhalten sowie nachfolgende Fügeprozesse.

Die mögliche Abweichung der Bahn des Endeffektors zu der des gegriffenen forminstabilen Einzelteils beeinflusst die erreichbare Positioniergenauigkeit.

Etwaige Durchbiegungen des forminstabilen Einzelteils, durch aufgebrachte oder auftretende Kräfte, beeinflussen ferner die Art der Fügebewegung sowie das Festhalten des Einzelteils bis zur vollständigen Fixierung.

Ein, nach der Definition (siehe Kapitel 5.3) zu kategorisierendes, forminstabiles Einzelteil verbleibt typischerweise auf einer ebenen Fläche nach dem vollständigen Ablegen. Dies kann beispielsweise für ein eher formstabiles Einzelteil nicht garantiert werden und beeinflusst dementsprechend nachfolgende Fügeprozesse. Resultierend ist die Biegesteifigkeit des Einzelteils als komplexitätsbeeinflussendes Attribut einzuordnen.

Attribute: Formänderung und Verformung

Die Attribute Formänderung und Verformung beeinflussen hauptsächlich die Art möglicher Robotergreifer sowie deren Greifprinzip. Beispielsweise besteht die Gefahr, je nach Ausprägung der Attribute, das Einzelteil zu beschädigen. Insbesondere plastische

Deformationen des Einzelteils durch den Greifprozess bedürfen der Vermeidung. Dies untermauern Berichte wie von Fahantidis et al. (2000), Seliger et al. (2003), Reiff-Stephan (2005) und Fantoni et al. (2014).

Basierend auf den resultierenden Anforderungen an das Robotergreifsystem muss dieses die anschließende Fügeaufgabe, unter Verwendung des ausgewählten Greifers, realisieren können. Dies erläutert ebenso die Boothroyd & Dewhurst Methode.

Attribut: Symmetrie

Die Symmetrie des Einzelteils nimmt beim Greifen Einfluss auf gegebenenfalls notwendige Erkennungssysteme und deren Komplexität. Quispe et al. (2015) zeigen beispielsweise im Falle spiegelgleicher (β -Symmetrie von 180°) oder rotationssymmetrischer (vollständige β -Symmetrie) Einzelteile die Erzeugung der gesamten Hüllkurve des Einzelteils ausschließlich resultierend aus einem Einzeltiefenbild. Die angrenzende Forschung im Bereich des Platzierens und Einsteckens (siehe Tabelle 2-2) illustriert dabei den Einsatz divergenter Erkennungssysteme.

Die Symmetrie beeinflusst ferner den Aufwand zur Ausrichtung des Einzelteils vor dem Fügeprozess sowie die Art der Materialbereitstellung.

Attribut: Positioniergenauigkeit

Im Kontext der Positioniergenauigkeit mangelt es meist an Parametern zur Bestimmung der, sich teils während der Bringbewegung, veränderlichen geometrischen Form des Einzelteils (siehe Kapitel 5.3.3). Damit beeinflusst die erforderliche Positioniergenauigkeit nicht nur die Anforderungen an die Leistungsmerkmale des Industrieroboters (siehe Kapitel 4.2.2), sondern auch die Anforderungen über das Wissen über Ort und Orientierung des Einzelteils vor der Ausführung des Fügeprozesses. Dies bekräftigt ferner die angrenzende Forschung im Kontext des Platzierens (siehe Tabelle 2-2).

Attribute der dritten Klasse:

Attribut: Biegesteifigkeit Montagepartner

Im Kontext der automatisierungsgerechten Produktgestaltung erläutert die Boothroyd & Dewhurst Methode die Notwendigkeit eines geeigneten Montagepartners, der als Basis für die Montageoperation dient und einen schichtweisen Zusammenbau ermöglicht. Die Kombination aus forminstabilem Einzelteil und forminstabilem Montagepartner erfüllt diese Empfehlung nicht. Zuvor erläuterte Anforderungen über das Wissen von Ort und Orientierung des Einzelteils erfahren hierbei noch eine Erweiterung um die des forminstabilen Montagepartners. In Konsequenz kann dies zum Scheitern der automatisierten Montage führen.

Attribut: Ausrichten

Das Ablegen und Neugreifen eines forminstabilen Einzelteils inkludiert das Risiko jegliche Information über dessen Position und Orientierung zu verlieren. Eine Wiederherstellung dieser Informationen ist, wenn überhaupt, nur mittels systemkomplexitätserhöhender Aufwände möglich. Dies verifizieren die Arbeiten im Bereich des Platzierens angrenzender Forschungsgebiete (siehe Tabelle 2-2). Dementsprechend besteht die Gefahr der nicht erfolgreichen Ausführung des automatisierten Montagevorgangs, insbesondere bei repetitiven Montageoperationen.

Attribut: Positionierhilfen

Die angrenzende Forschung im Kontext des Einsteckens (siehe Tabelle 2-2) illustriert die Auswirkungen auf die Komplexität des Montagesystems resultierend aus den Genauigkeitsanforderungen von Montageprozessen mit forminstabilen Einzelteilen. Realisierbar wird die Fügeaufgabe meist nur durch den Einsatz visueller Systeme sowie teils weiterer Sensoren. Die Sensordaten dienen als Inputgrößen der jeweiligen Anpassungsfunktion, um die, aufgrund der Forminstabilität des Einzelteils entstehenden, Abweichung zwischen Fügestelle und Einzelteil zu korrigieren. Tabelle 5-1 verdeutlicht zur Realisierung einer automatisierten Montage, im Kontext formstabiler Einzelteile, die

Relevanz des Vorhandenseins von Positionierhilfen. Beispielsweise tragen Einführschrägen zur Aufweitung des benötigten Positioniergenauigkeitsfeldes im Montageprozess bei. Zudem verringern diese die Gefahr des Verklemmens oder Verhakens des zu fügenden Einzelteils. Schlussfolgernd kann das Fehlen von Positionierhilfen die Montageautomatisierung mit forminstabilen Einzelteilen verhindern.

Attribut: Festhalten

Die Boothroyd & Dewhurst Methode erläutert die Notwendigkeit zusätzlicher Fixierungshilfen mittels Vorrichtungen oder Roboterarmen im Falle der Notwendigkeit des Festhaltens des zu montierenden Einzelteil bis zur endgültigen Fixierung. Unabhängig der Systemkomplexitätserhöhung, aufgrund genannten Bedarfs, inkludiert der Einsatz weiterer Vorrichtungen oder Roboterarmen zusätzliche Schwierigkeiten. Dies umfasst zusätzlichen Platzbedarf, die Beeinflussung der Zugänglichkeit, die Systemkomplexitätserhöhung zur Bestimmung der Position des Einzelteils und dessen Montagepartners an weiteren Stellen sowie die Vermeidung von Beschädigung aufgrund des Festhalteprozesses. Insbesondere der zusätzliche Platzbedarf sowie die Gefahr von Beschädigungen können ein Scheitern des automatisierten Montageprozesses bewirken.

Attribut: Nachfolgende Fügeprozesse

Be- oder verhindern zuvor montierte Einzelteile nachfolgende automatisierte Montageprozesse, scheitert die gesamte Automatisierung des Montageprozesses.

(Trommnau et al. 2020c, S. 1141f)

Berechnung der Gewichtungsfaktoren:

Zur Bestimmung der Automatisierungseignung jedes Prozessschritts wird für jedes Attribut, innerhalb eines Prozessschritts, ein Gewichtungsfaktor p_a errechnet. Diesbezüglich erfolgt die Zuordnung kardinaler Skalenwerte zu den ordinal skalierten

Attributen. Dieser Vorgehensweise bedient sich beispielsweise Beumelburg (2005, S. 57f), um das Gewicht der Kriterien berücksichtigen zu können.

Die Berechnung des Gewichtungsfaktors p_a basiert auf der Zuordnung der Attribute zu deren jeweiliger Klasse sowie der Nutzung des Zahlenwerts der Attributklasse als Rangwert rv_i . Entsprechend der Zuweisung erhalten Attribute der ersten Klasse den Rangwert $rv_i = 1$, Attribute der zweiten Klasse den Rangwert $rv_i = 2$ und Attribute der dritten Klasse den Rangwert $rv_i = 3$.

Die Berechnung des Gewichtungsfaktors p_a jedes Attributs erfolgt mittels der Division des jeweiligen Rangwerts des Attributs rv_a durch die Gesamtsumme der Rangwerte aller Attribute innerhalb des jeweiligen Prozessschritts (siehe Formel 10). Der Gewichtungsfaktor p_a besitzt die Einheit Prozent und wird auf einen ganzzahligen Wert gerundet.

$$p_a = \frac{rv_a}{\sum_{i=1}^n rv_i} \quad (10)$$

Die Erweiterung der Einflussfaktorenmatrix (siehe Tabelle 5-2) um die Rangwerte der Attribute sowie deren spezifisch berechneten Gewichtungsfaktoren präsentiert Tabelle 5-3. Die Darstellungsweise ist motiviert von der Realisierung einer schnellen Übersicht zuvor erläuteter Gewichtung der jeweiligen Attribute innerhalb eines Prozessschritts. (Trommnau et al. 2020c, S. 1142)

Tabelle 5-3: Rangwerte und Gewichtungsfaktoren der Einflussfaktoren auf automatisierte Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1141)

Grundbewegung	Attribut	Rangwert	Gewichtungsfaktor
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	1	33 %
	Biegesteifigkeit	2	67 %
	Materialbereitstellung	-	-
<i>Greifen</i>	Formänderung	2	33 %
	Verformung	2	33 %
	Symmetrie	2	33 %
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	2	100 %
<i>Fügen</i>	Biegesteifigkeit Montagepartner	3	30 %
	Ausrichten	3	30 %
	Fügebewegung	1	10 %
	Positionierhilfen	3	30 %
<i>Loslassen</i>	Fixierungen	1	14 %
	Festhalten	3	43 %
	Nachfolgende Fügeprozesse	3	43 %

Berechnung der Automatisierungseignung:

Basierend auf der automatisiert zu montierenden Kombination aus Einzelteil und Montagepartner und der daraus resultierenden Ausprägungen der Attribute wird die Berechnung der Automatisierungseignung jedes Prozessschritts realisiert.

Die als Ansatzpunkt dienende Automatisierungspotenzialanalyse (siehe Kapitel 3.2.4) errechnet bei optimaler Ausprägung jedes Einflussfaktors, innerhalb dessen spezifisch definierten Prozessschritts, ein Automatisierungspotenzial des Prozessschritts von 100 %. Bei ungünstigerer Ausprägung der Attribute sinkt der Wert des Automatisierungspotenzials entsprechend ab.

Die hier zu entwickelnde Automatisierungseignungsberechnung gibt ebenfalls bei optimaler Ausprägung der Einflussfaktoren eine Automatisierungseignung pcv_m des Prozessschritts von 100 % aus. Die am niedrigsten mögliche Automatisierungseignung eines Prozessschritts beziffert sich mit dem Wert 10 %. Ein Wert von 10 % verdeutlicht die geringe Automatisierungseignung des Montageprozesses, resultierend aus der Kombinatorik von betrachtetem Einzelteil und Montagepartner. Ein Wert von 0 % bzw. der Wertebereich zwischen 0 % und 10 % impliziert demgegenüber ein grundsätzliches Scheitern bzw. eine äußerst geringe Automatisierungseignung der Montageautomatisierung und findet daher keine Verwendung.

Innerhalb eines Attributs lassen sich objektive Aussagen bezüglich des Verhältnisses der Ausprägungen zueinander nur in den Bereichen „besser, schlechter oder gleichwertig“ hinsichtlich deren Eignung zur Automatisierung des Montageprozesses treffen. Eine Einteilung der Attributausprägungen mittels solch einer ordinalen Skalierung ermöglicht aber keine numerische Berechnung. Daher erfolgt die Transformation von der ordinalen Skalierung in eine kardinale Skalierung. Die zugrundeliegende Vorgehensweise verdeutlicht Abbildung 36.

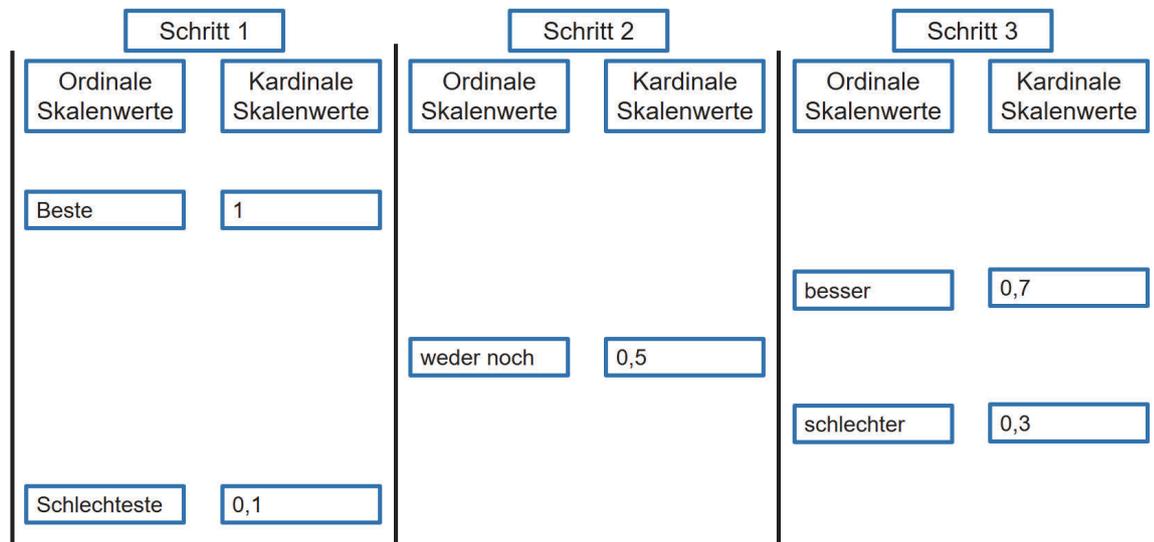


Abbildung 36: Vorgehen zur Klassifikationswertzuweisung anhand getroffener Bewertungsurteile

Die Einteilung der Ausprägungen erfolgt für jedes Attribut.

Schritt 1 weist der jeweils besten sowie schlechtesten Ausprägung eines Attributs hinsichtlich dessen Eignung zur Automatisierung des Montageprozesses den entsprechenden kardinalen Skalenwert 0,1 oder 1 (siehe Abbildung 36), im Weiteren spezifischer Klassifikationswert cv_j genannt, zu. Dies basiert auf zuvor erläuterten Wertebereich der Automatisierungseignung pcv_m des Prozessschritts im Bereich von 10 % bis 100 %. Für alle Schritte gilt gleichermaßen die Zuweisung gleicher Klassifikationswerte bei gleichwertigen Ausprägungen.

Schritt 2 greift bei Attributen mit einer weiteren Ausprägung, die weder der besten noch der schlechtesten Ausprägung gleichwertig ist. Dieser Ausprägung wird ein Klassifikationswert cv_j von 0,5 zugewiesen. Dies gilt ebenfalls bei mehreren verbleibenden gleichwertigen Ausprägungen.

Schritt 3 findet Anwendung bei mehreren verbleibenden, nicht gleichwertigen Ausprägungen. Die Ausprägungen werden, in Referenz der zuvor zugeordneten Ausprägungen, in schlechter oder besser differenziert und diesen die aufgeführten Klassifikationswerte cv_j von 0,3 oder 0,7 zugewiesen. (Trommnau et al. 2020c, S. 1141ff)

Tabelle 5-4 präsentiert die Erweiterung von Tabelle 5-2 mit Rangwerten, Gewichtungsfaktoren sowie Klassifikationswerten.

Unter stringenter Berücksichtigung der erläuterten Vorgehensweise der Zuweisung der Klassifikationswerte wird der Ausprägung lang-geschlossen des Attributs geometrische Klasse, abweichend dem von Trommnau et al. (2020c, S. 1141) zugewiesenen Klassifikationswert cv_j von 0,3, ein Klassifikationswert cv_j von 0,1 zugewiesen. Diese Neubewertung stimmt ferner mit der in Kapitel 3.3 erläuterten Beschreibung der Gruppe der lang-geschlossen forminstabilen Einzelteile als die, für die Montageautomatisierung, aufwändigste Gruppe überein.

Aufgrund der Gefahr des Auftretens einer irreversiblen plastischen Verformung erfolgt die Zuweisung eines Klassifikationswerts cv_j von 0,3 der Ausprägung elastisch-plastisch des Attributs Verformung.

Tabelle 5-1: Gewichtete Einflussfaktoren auf automatisierte Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020b, S. 1141)

Grundbewegung	Attribut	Rangwert	Gewichtungsfaktor	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4	
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	1	33 %	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$ cv = 1	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$ cv = 1	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$ cv = 0,1	Ausprägung 4 lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$ cv = 1	
				forminstabil $K_{Bs} > 0,05$ cv = 0,1	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$ cv = 0,3	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$ cv = 0,7	formstabil $K_{Bs} < 0,001$ cv = 1	
	Biegesteifigkeit	2	67 %	Meterware	Einzelteil	-	-	-
				jede Dimension cv = 0,1	zwei Dimensionen cv = 0,5	eine Dimension cv = 1	-	
<i>Greifen</i>	Verformung	2	33 %	plastisch cv = 0,1	elastisch-plastisch cv = 0,3	elastisch cv = 1	seilartig cv = 1	
	Symmetrie	2	33 %	asymmetrisch cv = 0,1	β -symmetrisch cv = 0,5	α -symmetrisch cv = 0,5	α - & β -symmetrisch cv = 1	
	Positioniergenauigkeit	2	100 %	$\pm 0,0x$ mm cv = 0,1	$\pm 0,0x$ mm cv = 0,5	$\pm x$ mm cv = 1	-	
	Biegesteifigkeit Montagepartner	3	30 %	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$ cv = 0,1	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$ cv = 0,3	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$ cv = 0,7	formstabil $K_{Bs} < 0,001$ cv = 1	
<i>Bringen</i>	Ausrichten	3	30 %	Ablegen-Ausrichten- Neugreifen cv = 0,1	6-DOF Roboter cv = 0,5	Ausrichten nicht nötig cv = 1	-	
	Fügebewegung	1	10 %	sensorgeführt cv = 0,1	bahngesteuert cv = 0,3	mehrachsig cv = 0,7	einachsig cv = 1	
	Positionierhilfen	3	30 %	nicht vorhanden cv = 0,1	vorhanden	-	-	
	Fixierungen	1	14 %	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig cv = 0,1	eine Fixierung notwendig cv = 0,5	keine zusätzliche Fixierung notwendig cv = 1	-	
<i>Loslassen</i>	Festhalten	3	43 %	muss festgehalten werden cv = 0,1	festhalten nicht notwendig cv = 1	-	-	
	Nachfolgende Fügeprozesse	3	43 %	werden behindert cv = 0,1	keine Behinderung cv = 1	-	-	

Die Zuweisung der Klassifikationswerte cv_j ermöglicht folgend die Berechnung eines Attributklassifikationswerts acv_j (siehe Formel 11). Der Attributklassifikationswerts acv_j errechnet sich basierend auf der Multiplikation des Gewichtungsfaktors p_a eines Attributs mit dem Klassifikationswert cv_j , korrespondierend der Instanziierung des Attributs anhand des betrachteten Anwendungsfalls.

Die Summe aller Attributklassifikationswerte acv_j , innerhalb eines Prozessschritts, errechnet den hier entwickelten Automatisierungseignungswert pcv_m desselben (siehe Formel 12). Dieser bewegt sich, wie zuvor erläutert, in einer maximalen Spanne zwischen 10 % und 100 %. (Trommnau et al. 2020c, S. 1142)

$$acv_j = p_a \cdot cv_j \quad (11)$$

$$pcv_m = \sum_{j=1}^n acv_j \quad (12)$$

In Reflexion der an das Berechnungsschema, hier der Baustein des Hilfsmittels im Kontext der Methodik, gestellten (siehe Kapitel 4.1.1) Anforderung einer erweiterbaren Ausgangsbasis ist dies sowohl für die Integration weiterer Attribute als auch deren Ausprägungen gegeben. Zuvor erläuterte Vorgehensweise der Transformation von der ordinalen Skalierung in eine kardinale Skalierung ermöglicht, im Falle einer Erweiterung, die Neuberechnung der Gewichtungsfaktoren p_a innerhalb des betroffenen Prozessschritts. (Trommnau et al. 2020c, S. 1142)

Ferner realisiert die Berechnung der Automatisierungseignungswerte pcv_m der Prozessschritte die Vergleichbarkeit eines IST-Zustands und einem iterativ optimierten Zustand des Designs des Einzelteils und dessen Montagepartners. Hierbei ist die Vergleichbarkeit von Ausprägungen nur innerhalb desselben Attributs möglich. Dies ist insofern ausreichend, da bei der Anwendung der entwickelten Methodik stets alle verwendeten Attribute berücksichtigt werden. Dies korreliert ebenfalls mit den in

Kapitel 4.1.1 definierten Anforderungen an die Methodik und der Beurteilung der Bewertungsfaktoren unter Verwendung der Vergleichswertmethode.

5.5 Exemplarischer Transfer und Herleitung von Gestaltungsrichtlinien

5.5.1 Exemplarischer Transfer von Gestaltungsrichtlinien

Die in Kapitel 3 erläuterten DFA-Methoden, Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands sowie der Ansätze zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile stellen teils Gestaltungsrichtlinien zur montagegerechten oder automatisierungsgerechten Produktgestaltung bereit (siehe Kapitel 4.1.2). In einigen Fällen lassen sich bestehende Gestaltungsrichtlinien für formstabile Einzelteile auf forminstabile Einzelteile übertragen. Außerdem bestehen explizit Gestaltungsrichtlinien für forminstabile Einzelteile, wenngleich diese teils andere Bereiche, wie die Materialbereitstellung (siehe Kapitel 3.3.3), fokussieren.

Im Folgenden wird der Transfer bestehender Gestaltungsrichtlinien exemplarisch demonstriert. Entsprechend der Boothroyd & Dewhurst Methode sowie der DFA 2 Methode erfolgt eine Differenzierung in generelle Gestaltungsrichtlinien auf Produktebene sowie spezifische Gestaltungsrichtlinien auf Einzelteil- oder Bauelementebene (Trommnau et al. 2020c, S. 1140). Bogue (2012, S. 113) beschreibt generelle Gestaltungsrichtlinien als Regelkatalog für die Produktgestaltung. Generelle Gestaltungsrichtlinien gelten dabei als interpretationsbedürftig, unspezifisch und qualitativ.

Transfer genereller Gestaltungsrichtlinien:

Tabelle 5-5 präsentiert, zur Unterstützung eines automatisierten Zusammenbaus von Produkten mit forminstabilen Einzelteilen, übertragbare generelle Gestaltungsrichtlinien

exemplarisch. Die Codierung dient der eindeutigen Zuordnung der Gestaltungsrichtlinien im weiteren Verlauf.

Tabelle 5-5: Übertragbare generelle Gestaltungsrichtlinien (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1140)

Code	Gestaltungsrichtlinie	Quelle
G1	Minimiere die Einzelteilanzahl des Produkts oder der Baugruppe.	B&D Lucas Westinghouse Weik 2018
G2	Ein Einzelteil sollte die Funktion einer Grundplatte für die Montage weiterer Einzelteile übernehmen.	B&D Westinghouse
G3	Benutze möglichst viele Gleichteile.	Lucas Westinghouse Weik 2018
G4	Verwende einfach zu handhabende Einzelteile (siehe Kapitel 5.3.1).	B&D Westinghouse
G5	Bilde Baugruppen.	B&D
G6	Bilde modulare Baugruppen.	Westinghouse Weik 2018
G7	Vermeide nachträgliche Ausrichtvorgänge von Baugruppen.	B&D Lucas Westinghouse
G8	Vermeide insbesondere zeitaufwändige Befestigungsoperationen wie beispielsweise Schrauben.	B&D Westinghouse Weik 2018

Transfer spezifischer Gestaltungsrichtlinien:

Tabelle 5-6 trägt transferierbare spezifische Gestaltungsrichtlinien, also auf Einzelteil- oder Bauelementebene, exemplarisch zusammen. Von der Gestaltungsrichtlinie betroffene Attribute werden entsprechend aufgeführt (siehe Kapitel 5.3.3 und Tabelle 5-4).

Tabelle 5-6: Übertragbare spezifische Gestaltungsrichtlinien (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1140)

Code	Attribut	Gestaltungsrichtlinie	Quelle
SG1	Geometrische Klasse	Vermeide lang-geschlossene Einzelteile.	Schneider 1999
SB1	Biegesteifigkeit	Strebe die maximal mögliche Formstabilität an.	Hoßmann 1992; Schneider 1999
SF1	Formänderung	Das Einzelteil sollte entlang mindestens einer Achse keine Formänderung zulassen.	Schneider 1999
SF2	Formänderung	Strebe mindestens partiell formstabile Bereiche an.	Hoßmann 1992; Schneider 1999
SV1	Verformung	Gestalte das Einzelteil möglichst formstabil, um Formänderungen entlang des Montageprozesses zu vermeiden.	Westinghouse
SV2	Verformung	Sehe große Greifflächen vor, um den, zur Manipulation notwendigen, Anpressdruck zu reduzieren.	Hesse 2012b
SS1	Symmetrie	Strebe die größtmögliche Symmetrie des Einzelteils an.	B&D Schneider 1999
SP1	Positioniergenauigkeit	Strebe die größtmögliche Toleranz an.	Westinghouse
SBM1	Biegesteifigkeit Montagepartner	Forminstabile Einzelteile sollten immer einen formstabilen Montagepartner haben.	Schneider 1999
SA1	Ausrichten	Fügeverfahren mit Nachfassen sind zu vermeiden.	Hoßmann 1992
SA2	Ausrichten	Ausrichtvorgänge sind zu vermeiden.	B&D
SF1B	Fügebewegung	Sehe eindeutige Anschlagkanten oder Orientierungspunkte vor.	Hoßmann 1992
SFB2	Fügebewegung	Strebe nach einfachen Fügebewegungen ohne komplizierte Montagebewegungen.	Hoßmann 1992; Weik 2018
SFB3	Fügebewegung	Strebe einachsige Fügebewegungen an.	B&D Lotter et al. 2016; Weik 2018
SPH1	Positionierhilfen	Sorge für Positionierhilfen.	B&D Hoßmann 1992

SFX1	Fixierungen	Minimiere die Anzahl zusätzlicher Verbindungselemente.	Hoßmann 1992
SFH1	Festhalten	Vermeide das Festhalten von Einzelteilen zur Gewährleistung deren Ausrichtung.	B&D
SNF1	Nachfolgende Fügeprozesse	Gewährleiste die Zugänglichkeit der Fügestelle.	B&D Hoßmann 1992

5.5.2 Exemplarische Herleitung von Gestaltungsrichtlinien

Kapitel 5.2 betont die Notwendigkeit produktspezifischer Gestaltungsrichtlinien zur automatisierungsgerechten Montage forminstabiler Einzelteile. Diese bedürfen der Herleitung während der Implementierungsphase der Methodik. Im Folgenden wird die Herleitung neuer Gestaltungsrichtlinien exemplarisch demonstriert. Dabei erfolgt eine Differenzierung sowohl in generelle als auch spezifische Gestaltungsrichtlinien. Generelle Gestaltungsrichtlinien sind dabei nicht mit der generischen Bewertungsmatrix (siehe Kapitel 5.4) beurteilbar, da diese für das Produkt als Gesamtes gelten und die spezifischen Attribute nur indirekt beeinflussen. Trotzdem unterstützen generelle Gestaltungsrichtlinien die automatisierte Montage des Produkts (siehe Kapitel 3).

Die folgende Herleitung von Gestaltungsrichtlinien fokussiert das Produkt Automobil-
leitungssatz als Anschauungsobjekt.

Herleitung genereller Gestaltungsrichtlinien:

Tabelle 2-1 präsentiert am Markt verfügbare Kabelverarbeitungsanlagen und deren Prozessschritte. Die automatisierte Montage des Produkts auf am Markt verfügbaren Anlagen, ist mittels adäquatem Produktdesign anzustreben. Zu berücksichtigende Faktoren umfassen Restriktionen in der Art und Varianz eingesetzter Komponenten sowie der Teileanzahl des Produkts. Die Nutzung etablierter Prozesse und Technologien sowie die Vermeidung spezifischer Neuentwicklungen beschreiben etwaige Vorteile. (Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

Bei Nichterreichung einer vollautomatisierten Montage ist eine Modularisierung des Produkts, in automatisiert montierbare und nicht automatisiert montierbare Submodule, zu verfolgen. Dies ermöglicht der Produktionsplanung den größtmöglichen Anteil an Montageprozessen in enger Abstimmung mit der Produktentwicklung zu automatisieren. (Trommnau et al. 2020c, S. 1143; Trommnau et al. 2020b, S. 53)

Abweichend von der Empfehlung der Boothroyd & Dewhurst Methode das Produkt von oben zu montieren, ist die Montage forminstabiler Einzelteile in horizontaler Richtung oder von unten alternativ anzustreben. Die Forminstabilität des Einzelteils, beispielsweise bei Leitungen, führt unter Einwirkung von Schwerkraft zur Positionierung desselben innerhalb eines grob prognostizierbaren Toleranzfeldes. Das Herausfallen des Einzelteils, nach dem Prozess des Loslassens, ist dabei mittels geeignetem Produktdesign zu verhindern. Als praktisches Anschauungsbeispiel soll ferner die Bestückung von Kontaktgehäusen mit Einzelleitungen dienen. Eine Montage von oben führt, aufgrund der unvorhersehbaren Position des nicht gehaltenen Leitungsteils, zur Behinderung des Montageprozesses selbst sowie nachfolgender Montageprozesse. Eine Bestückung in horizontaler Richtung oder von unten ermöglicht demgegenüber das freie Hängen des nicht gehaltenen Leitungsteils. (Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

Tabelle 5-7 fasst zuvor hergeleitete generelle Gestaltungsrichtlinien zusammen.

Tabelle 5-7: Generelle Gestaltungsrichtlinien (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143; Trommnau et al. 2020b, S. 53)

Code	Gestaltungsrichtlinie
GH1	Eine automatisierte Montage auf am Markt verfügbaren Anlagen ist anzustreben.
GH2	Modularisiere das Produkt in automatisiert montierbare und nicht automatisiert montierbare Submodule.
GH3	Ermögliche alternativ die Montage forminstabiler Einzelteile in horizontaler Richtung oder von unten.
GH4	Verhindere das Herausfallen des forminstabilen Einzelteils insbesondere bei einer Montage in horizontaler Richtung oder von unten.

Herleitung spezifischer Gestaltungsrichtlinien:

Besteht die Notwendigkeit zusätzlicher Fixierungen ist, aufbauend auf der Gestaltungsrichtlinie SPH1 (Verwendung von Positionierhilfen), die finale Positionierung des forminstabilen Einzelteils während des Montageprozesses der Fixierung zu unterstützen.

Die Möglichkeit Fixierungen schon vorab an das forminstabile Einzelteil zu montieren, begünstigt einen automatisierten Montageprozess, da dadurch partiell Formstabilität realisiert werden kann.

Beide Gestaltungsrichtlinien eröffnen Vorteile hinsichtlich größerer Toleranzen zur Montage des forminstabilen Einzelteils, der Reduzierung der Anzahl weiterer Fixierungen sowie des Entfalls der Notwendigkeit des Festhaltens des Einzelteils. (Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

Die Integration von Montagehaltern am formstabilen Montagepartner begünstigt die Aufspaltung des Montageprozesses in mehrere Schritte. Vorteile bestehen in der Verschiebung hin zu einfacheren Fügebewegungen als auch der Vermeidung zusätzlicher Fixierungen sowie der Notwendigkeit des Festhaltens. (Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

Auszüge angrenzender Forschung im Kontext des Platzierens (siehe Tabelle 2-2) illustrieren die Herausforderung der geometrischen Formveränderung forminstabiler Einzelteile unter Krafteinwirkung. Diese Formveränderungen können auch beim Ablegen des Einzelteils unter Schwerkrafteinfluss auftreten. Um nachfolgende Fügestellen nicht zu überdecken, besteht die Notwendigkeit geometrische Formänderungen mittels Bereichsabgrenzungen oder definierter Verlegewege einzuschränken bzw. entsprechende Abstände vorzusehen.

Tabelle 5-8 trägt die hergeleiteten spezifischen Gestaltungsrichtlinien, also hinsichtlich Einzelteil- oder Bauelementebene, zusammen und listet zusätzlich die betroffenen Attribute auf (siehe Kapitel 5.3.3 und Tabelle 5-4).

Tabelle 5-8: Spezifische Gestaltungsrichtlinien (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

Code	Attribut	Gestaltungsrichtlinie
SH1	Positioniergenauigkeit / Fixierungen / Festhalten	Gestalte Positionierhilfen an etwaigen Fixierungen, sodass diese sowohl ihren eigenen Fügeprozesses als auch die finale Positionierung des forminstabilen Einzelteils unterstützen.
SH2	Positioniergenauigkeit / Fixierungen / Festhalten	Ermögliche die Montage von Fixierungen vorab an das forminstabile Einzelteil.
SH3	Fügebewegung / Fixierungen / Festhalten	Integriere Montagehalter am formstabilen Montagepartner.
SH4	Nachfolgende Fügeprozesse	Verhindere die Überdeckung von Fügstellen durch forminstabile Einzelteile mittels Bereichsabgrenzungen, definierter Verlegewege oder entsprechender Abstände.

5.6 Methodenentwicklung

Die Vorgehensweise zur Verwendung der Matrix und der Gestaltungsrichtlinien wird durch die Methode festgelegt. Kapitel 4.1.1 definiert die abstrahierte Vorgehensweise der DFA-Methoden (siehe Abbildung 26) als Fundament der zu entwickelnden Methode. Basierend auf dieser Prozessstruktur sowie unter Berücksichtigung des zuvor entwickelten Modells und der Hilfsmittel erfolgt ferner die Erläuterung der einzelnen Schritte der Methode.

Vorbereitungen:

Zur Durchführung der Methodik müssen Produktkonzepte oder bestehende Produkte vorliegen. Ein existierender Montageprozess oder die genaue Kenntnis über den zukünftigen Montageprozess ist nicht notwendig.

Aufteilung Prozessschritte:

Die Anwendbarkeit der Methodik ist ausnahmslos auf Montageprozesse mit forminstabilen Einzelteilen bzw. Bauelementen bezogen. Dementsprechend ist eine Zerlegung des Produkts oder Produktkonzepts in dessen Einzelteile oder Bauelemente notwendig. Ferner werden die zu analysierenden Montageprozesse definiert. Die Instanziierung des Modells des jeweiligen Montageprozesses resultiert aus der Kombination aus forminstabilem Einzelteil sowie dessen Montagepartner (siehe Tabelle 5-2) und erfolgt separat für jeden zu analysierenden Montageprozess.

Bewertungsfaktoren berechnen:

Basierend auf der Instanziierung des Modells erfolgt, unter Verwendung der Klassifizierungs- und Bewertungsmatrix (siehe Tabelle 5-4) sowie der Formeln 11 und 12, die Kalkulation der Automatisierungseignungswerte pcv_m für jede Grundbewegung.

Bewertungsfaktoren beurteilen:

Die errechneten Automatisierungseignungswerte pcv_m dienen als Ausgangsgrößen zur Beurteilung der Kombination aus forminstabilem Einzelteil und dessen Montagepartner.

Grundbewegungen mit vergleichsweise niedrigen Automatisierungseignungswerten bedürfen einer priorisierten Betrachtung. Aufgrund der Kritikalität von Attributen mit höheren Rangwerten und ungünstigen Ausprägungen erfolgt ferner deren Identifikation zur vorrangigen Optimierung in der anschließenden Produktdesignoptimierungsphase.

Vergleichbare Produktdesigns und entsprechend vergleichbare Montageprozesse sind, anhand der Bewertungsfaktoren und unter Verwendung der Vergleichswertmethode, gegeneinander beurteilbar. Entscheidungen für oder gegen Einzelteilkombinationen sowie entsprechende Produktdesigns trifft dabei der Produktdesigner. Liegt nur ein Produktdesign vor, gilt es, dieses mindestens an den kritischen Schwachstellen zu optimieren.

Produktdesign optimieren:

Die Produktdesignoptimierung erfolgt unter Berücksichtigung der Ausprägungen der zu optimierenden Attribute und verläuft typischerweise iterativ. Mithilfe gestalterischer Veränderungen am forminstabilen Einzelteil und dessen Montagepartner werden die entsprechenden Attribute idealerweise in deren beste Ausprägungsart (siehe Kapitel 5.4) überführt. Die Definitionen der Attributausprägungen implizieren dabei notwendige Designoptimierungen. Ferner unterstützt die Berücksichtigung von Gestaltungsrichtlinien (siehe Kapitel 5.5.1 und 5.5.2) den Designoptimierungsprozess.

Insbesondere der Bezug zwischen spezifischen Gestaltungsrichtlinien und beeinflussten Attributen realisiert eine strukturierte Anwendung derselben.

Für alle optimierten Zustände erfolgt eine Instanziierung im Modell sowie die Kalkulation und Beurteilung mittels deren Automatisierungseignungswerten.

Optimiertes Produktdesign:

Aus der Methodik resultiert ein optimiertes Design der Kombination aus forminstabilem Einzelteil sowie dessen Montagepartner im Kontext der Montageautomatisierung. Die Festlegung der Erreichung des Zielzustands des Produktdesigns obliegt dem Produktdesigner. Mittels der iterativen Vorgehensweise und unter Verwendung der Vergleichswertmethode wird die Beurteilung verschiedenartiger Produktdesigns anhand numerischer Werte realisiert.

6 Validierung der Methodik

6.1 Sensitivitätsanalyse der Einflussfaktoren

Zur Validierung der Genauigkeit der entwickelten Automatisierungseignungswertberechnung einer Bauteilkombination mit mindestens einem forminstabilen Einzelteil soll zunächst eine Sensitivitätsanalyse, der in der Klassifizierungs- und Bewertungsmatrix vorgenommenen Verknüpfung von Einfluss- und Gewichtungsfaktoren (siehe Kapitel 5.4), erfolgen.

Die Sensitivitätsanalyse soll dabei zur Ermittlung etwaiger Abweichungen zwischen einem von Experten geschätztem Automatisierungseignungswert und dem errechenbaren Automatisierungseignungswert pcv_m unter Verwendung der Methodik dienen.

Aufgrund des hohen manuellen Anteils an Montageprozessen sowie der Forminstabilität einiger Komponenten bietet der Automobilleitungssatz die geeignete Ausgangsbasis zur Validierung der Methodik.

Zur Sensitivitätsanalyse sollen sieben typische manuelle Montageprozesse am Montagebrett mit mindestens einem forminstabilen Einzelteil (siehe Tabelle 2-2) als Fallbeispiele herangezogen und deren jeweilige Automatisierungseignungswerte sowohl von Experten geschätzt als auch errechnet werden.

Die sieben ausgewählten manuellen Montageprozesse umfassen dabei die Montage zweier Leitungsbündel in zwei verschiedene Serienkabelkanäle (OM654 und OM654 Modellpflege „MOPF“ Motorleitungssatz von Mercedes-Benz), das Einstecken einer Einzelleitung in ein Kontaktgehäuse, das Aufschieben eines Wellrohrs auf eine Einzelleitung, das Aufschieben eines Geflechschlauchs auf eine Einzelleitung, das Aufschieben eines Schrumpfschlauchs auf eine Einzelleitung (siehe Abbildung 6) sowie die Montage einer Tülle auf ein vollbandagiertes Leitungsbündel.

Zur Ermittlung der geschätzten Automatisierungseignungswerte werden neun Experten aus den Bereichen Leitungssatzentwicklung, Prozessentwicklung Leitungssatzfertigung sowie Automatisierungsanlagenbau sowohl im Bereich Leitungssatzfertigung als auch Leitungssatzmontage im Fahrzeug befragt. Die Experten sind dabei entweder bei einem OEM, bei einem Leitungssatzzulieferer oder bei einem Anlagenhersteller für automatisierte Prozesstechnik tätig. Abgefragt wird dabei jeweils die geschätzte Automatisierungseignung jedes Prozessschritts der zuvor genannten Fallbeispiele mit folgenden Hinweisen zur Einschätzung:

Hinlangen:

- Schätzen Sie die grundlegende Eignung des zu manipulierenden Einzelteils / Bauelements, aufgrund dessen Art, ein robotergestützt automatisiert montiert zu werden.

Greifen:

- Schätzen Sie die Eignung des zu manipulierenden Einzelteils / Bauelements ein robotergestützt automatisiert gegriffen zu werden.

Bringen:

- Schätzen Sie die Eignung des zu manipulierenden Einzelteils / Bauelements, unter Berücksichtigung der resultierenden Genauigkeitsanforderungen aus der Kombination aus Einzelteil / Bauelement und Montagepartner, ein robotergestützt automatisiert zur Fügestelle gebracht zu werden.

Fügen:

- Schätzen Sie die Eignung des zu manipulierenden Einzelteils / Bauelements ein robotergestützt automatisiert mit dessen Montagepartner gefügt zu werden.

Loslassen:

- Schätzen Sie die Eignung der zusammengebauten Kombination aus Einzelteil / Bauelement mit dessen Montagepartner ein nach dem Fügevorgang losgelassen zu werden und für nachfolgende Prozessschritte uneingeschränkt zur Verfügung zu stehen.

Die Auswahlmöglichkeiten zur Experteneinschätzungen der Automatisierungseignung eines Prozessschritts umfassen dabei die Kategorien „sehr schlecht, schlecht, mittel, gut und sehr gut“. Die Kategorie „sehr schlecht“ wird mit einem Automatisierungseignungswert von 10 %, entsprechend der in Kapitel 5.4 erläuterten Vorgehensweise zur Berechnung der Automatisierungseignung, verknüpft. Dies soll ferner die Vergleichbarkeit der geschätzten und errechneten Automatisierungseignungswerte unterstützen. Zusammenfassend werden die Kategorien zur Einschätzung mit Automatisierungseignungswerten wie folgt verknüpft:

Sehr schlecht	– Automatisierungseignungswert:	10 %
Schlecht	– Automatisierungseignungswert:	25 %
Mittel	– Automatisierungseignungswert:	50 %
Gut	– Automatisierungseignungswert:	75 %
Sehr gut	– Automatisierungseignungswert:	100 %

Die geschätzten Automatisierungseignungswerte der Experten sind im Anhang 9.4.1 in Tabelle 9-1 aufgelistet.

Die Automatisierungseignungswerte pcv_m werden mittels der Formeln 11 und 12 für jeden Prozessschritt errechnet. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgehensweise zur Instanziierung des Modells sowie zur Errechnung der Automatisierungseignungswerte anhand eines Fallbeispiels liefern die nachfolgenden Kapitel 6.3 und 6.4. Der Übersichtlichkeit wegen wird in diesem Kapitel hierauf verzichtet. Das instanziierte Modell des Fallbeispiels 1 findet sich im nachfolgenden Kapitel 6.3 in Tabelle 6-2. Die weiteren instanziierten Modelle der verbleibenden Fallbeispiele sind im Anhang 9.4.2 in Tabelle 9-2 bis Tabelle 9-7 aufgelistet. Die Sensitivitätsanalyseergebnisse präsentieren Abbildung 37 bis Abbildung 43 mit teils exemplarischen Abbildungen der Fallbeispiele.

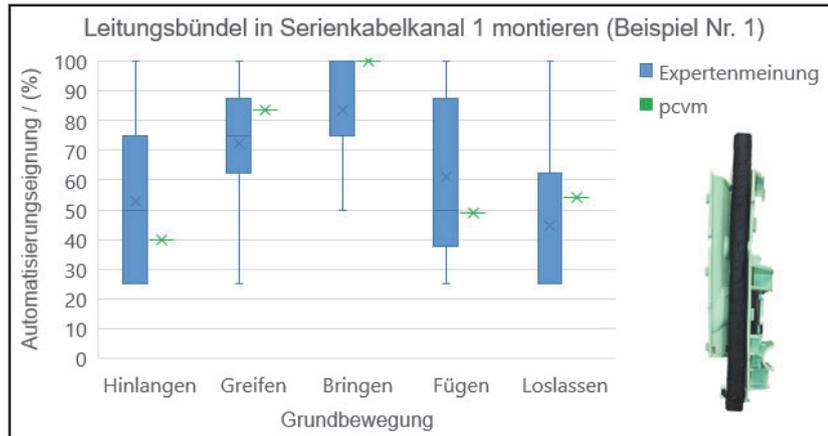


Abbildung 37: Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 1

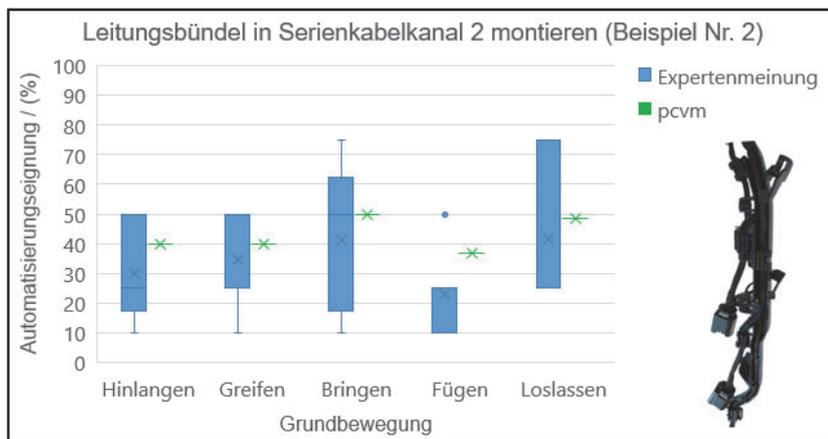


Abbildung 38: Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 2

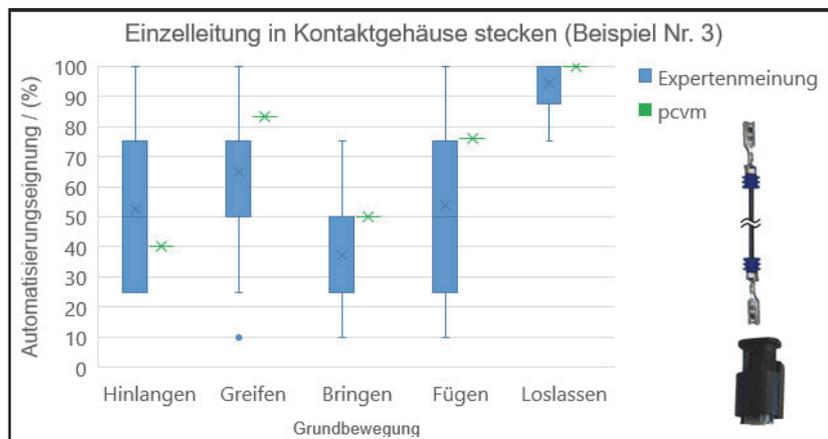


Abbildung 39: Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 3

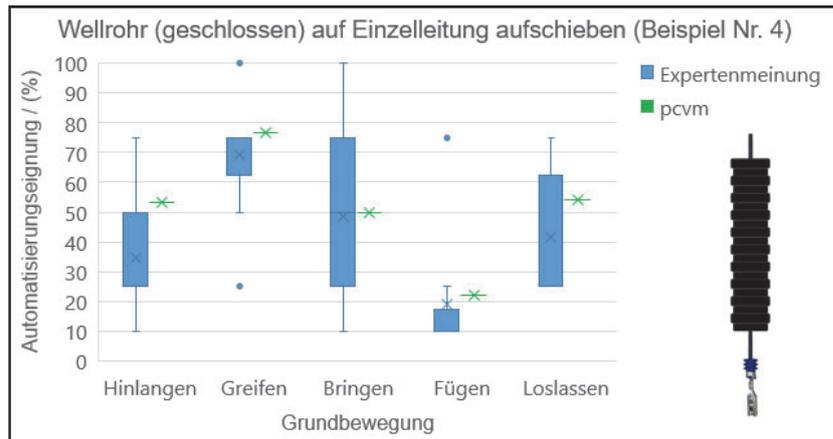


Abbildung 40: Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 4

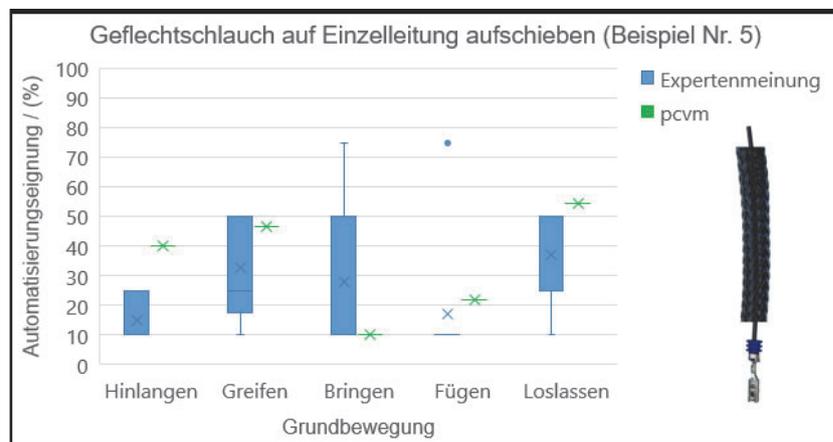


Abbildung 41: Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 5

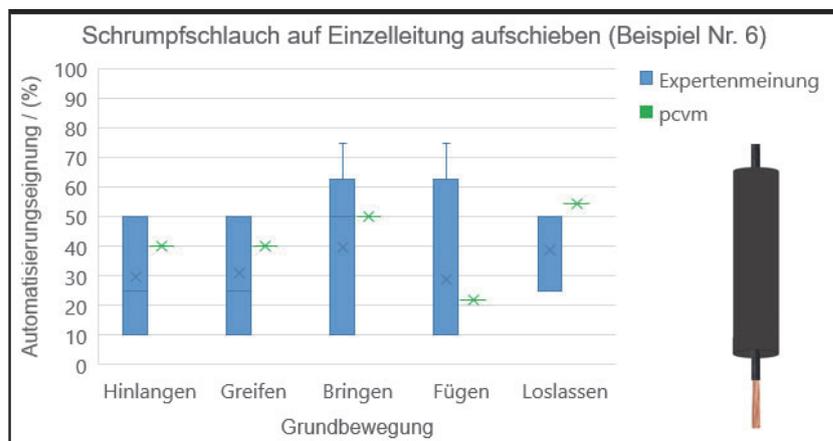


Abbildung 42: Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 6

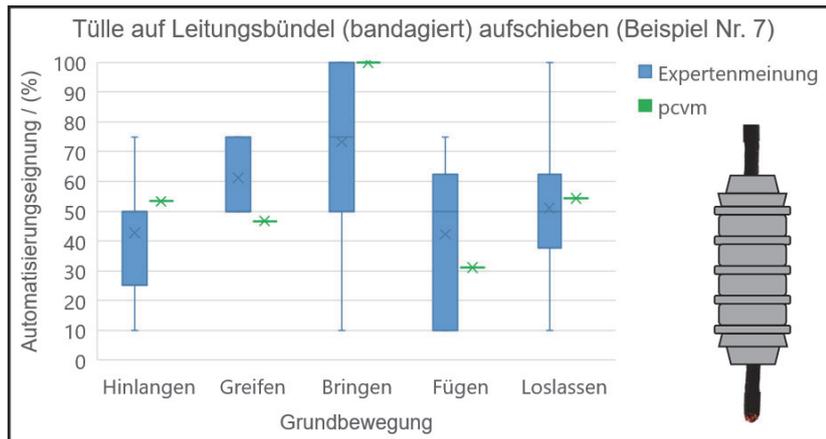


Abbildung 43: Sensitivitätsanalyseergebnisse des Fallbeispiels 7

Die Sensitivitätsanalyse der Fallbeispiele zeigt, dass sich 31 von 35 errechneten Automatisierungseignungswerten pcv_m , also 89 % aller errechneten Werte, innerhalb der jeweiligen Spannweite der Expertenmeinungen befinden. Die nicht innerhalb der Spannweite befindlichen Werte umfassen dabei die Grundbewegungen Hinlangen und Loslassen des Fallbeispiels 5, die Grundbewegung Loslassen des Fallbeispiels 6 sowie die Grundbewegung Greifen des Fallbeispiels 7. Tabelle 6-1 führt die entsprechenden Automatisierungseignungswerte pcv_m der Fallbeispiele sowie die Randwerte des jeweils nächstgelegenen Quartils der Expertenmeinungen auf. Basierend auf diesen Werten erfolgt eine Abstandsberechnung zwischen pcv_m und dem jeweiligen Randwert sowie eine Berechnung des durchschnittlichen Abstands aller aufgeführten Werte.

Tabelle 6-1: Automatisierungseignungswerte außerhalb der Spannweite der Expertenmeinungen und deren Abstand zum jeweiligen Randwert des nächstgelegenen Quartils

Fallbeispiel	Grundbewegung	Automatisierungseignungswert / (%)		
		pcv_m	Randwert des nächstgelegenen Quartils	$ pcv_m - \text{Randwert} $
Nr. 5	Hinlangen	40	25	15
Nr. 5	Loslassen	54	50	4
Nr. 6	Loslassen	54	50	4
Nr. 7	Greifen	47	50	3
$\emptyset pcv_m - \text{Randwert} / (\%)$				7

Die weitere Analyse der Fallbeispiele zeigt, dass 24 von 35 errechneten Automatisierungseignungswerten pcv_m , also 69 % aller errechneten Werte, innerhalb des jeweiligen Interquartilsabstands der Expertenmeinungen liegen.

6.2 Versuchsauswahl und Fallbeispiel

Wie in Kapitel 6.1 erläutert bietet der Automobilleitungssatz aufgrund des hohen manuellen Anteils an Montageprozessen sowie der Forminstabilität einiger Komponenten die geeignete Ausgangsbasis zur Validierung der Methodik.

Hierfür wird ein typischer sowie vollständig manueller Montageprozess isoliert betrachtet und die Methodik darauf angewendet. Unter Reflexion von Tabelle 2-2 entspricht die Montage eines Leitungsbündels in einen Kabelkanal (siehe Fallbeispiel 1 in Kapitel 6.1) solch einem typischen Montagevorgang. In der Literatur finden sich zur Automatisierung dieses Prozessschritts weder vorangegangene Forschungen noch Pilotaufbauten.

Der Nachfolger (OM654 Modellpflege „MOPF“) des, in Abbildung 6 dargestellten, OM654 Motorleitungssatzes von Mercedes-Benz dient im Folgenden als konkretes Anschauungsobjekt. Die Montage des unteren Leitungsbündels in den Kabelkanal wird als Montageoperation herausgegriffen. Hierbei fixiert im derzeitigen Montageprozess der

Kabelbinder 1 das untere Leitungsbündel im Kabelkanal. Das Leitungsbündel repräsentiert das forminstabile Einzelteil und der Kabelkanal dessen Montagepartner.

Zur abstrahierten Darstellung des Versuchs wird das Leitungsbündel nur in dem, für die Montageoperation relevanten Bereich betrachtet und dementsprechend abgelängt.

Die Montage des oberen Leitungsbündels sowie die Montage des Kabelbinders 2 (fixiert das obere Leitungsbündel) und des Kabelbinders 3 (fixiert sowohl oberes als auch unteres Leitungsbündel) sind nicht Gegenstand der Betrachtung (siehe Abbildung 44). (Trommnau et al. 2020c, S. 1143)



Abbildung 44: OM654 MOPF Kabelkanal mit befestigten Leitungsbündeln (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

6.3 Instanziierung des Modells – IST-Zustand

Basierend auf den Eigenschaften des forminstabilen Einzelteils und dessen Montagepartner erfolgt die Instanziierung des Modells (siehe Kapitel 5.3).

Das Leitungsbündel stellt ein lang-offenes forminstabiles Bauelement dar, das als Einzelteil bereitgestellt wird. Mittels des im Anhang 9.4.3 in Abbildung 56 dargestellten Messaufbaus nach Abbildung 33 wird bei der Einzelteillänge L des Kabelbündels von 50 cm eine maximale Durchbiegung h_{\max} von 9 cm ermittelt. Unter Verwendung von Formel 5 errechnet sich eine Biegesteifigkeitskennzahl K_{Bs} von 0,18 für das Kabelbündel. Die Formänderung kann entlang einer Dimension auftreten und ist, im Kontext der Verformung, als elastisch einzustufen. Zur Montage des Leitungsbündels in den

formstabilen Kabelkanal ist die Fügeachse senkrecht zur Längsrichtung des Bündels definiert. Eine senkrecht zur Fügeachse stehende Rotationsachse definiert sich hier als Achse in Längsrichtung des Bündels. Dementsprechend liegt ein vollständig α -symmetrisches Bauelement vor. Die Positioniergenauigkeit befindet sich im Millimeterbereich. Bei einer angenommenen automatisierten Montage wird ein 6-Achs-Roboter sowie eine sensorgeführte Fügebewegung benötigt. Dabei ist mindestens der Einsatz eines Kraftsensors zur Sicherstellung der korrekten Endposition des Leitungsbündels im Kabelkanal sowie zur Vermeidung von Beschädigungen, wie z.B. Abscherung, notwendig. Die Abweichung der IST- zur SOLL-Lage des Leitungsbündels im Kabelkanal bei einfachem Einlegen des Leitungsbündels, wird mittels Abbildung 45 illustriert. Die jeweils untere weiß-gestrichelte Linie repräsentiert die SOLL-Lage des Leitungsbündels im Kabelkanal und die jeweils obere rot-gestrichelte Kurve die IST-Lage.

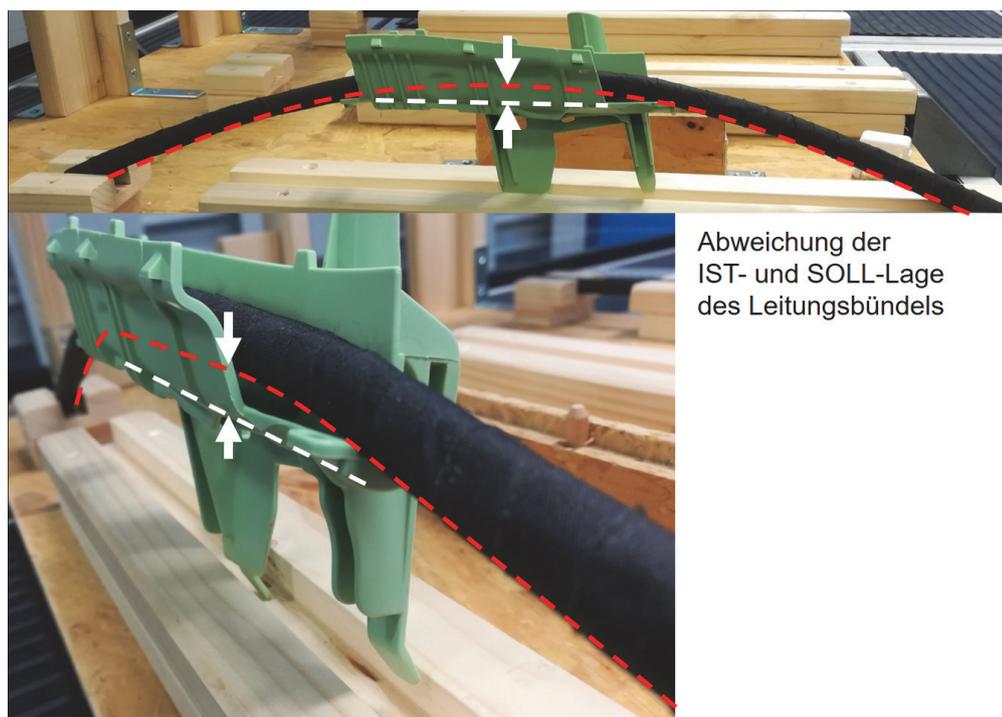


Abbildung 45: Darstellung der Abweichung zwischen IST- und SOLL-Lage des Leitungsbündels im Kabelkanal.

Ferner sind derzeit keine Positionierhilfen zur Unterstützung des Montageprozesses vorhanden. Da bei einfachem Einlegen des Kabelbündels dieses nur lose im Kabelkanal liegt besteht die Gefahr des Herausfallens (siehe Abbildung 45). Dementsprechend muss das Leitungsbündel bis zur vollständigen Fixierung durch Kabelbinder 1 festgehalten werden. Weitere Montageprozesse werden nicht durch das Leitungsbündel behindert. (Trommnau et al. 2020c, S. 1143) Das instanziierte Modell stellt Tabelle 6-2 anhand der orange markierten Attributausprägungen dar.

Tabelle 6-2: Instanziiertes Modell des Serienzustands entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
<i>Greifen</i>	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α - & β -symmetrisch
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,0x$ mm	$\pm x$ mm	-
<i>Fügen</i>	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Montagepartner	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
<i>Loslassen</i>	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	nicht notwendig	-	-
			keine Behinderung	-	-

6.4 Berechnung der Automatisierungseignungswerte – IST-Zustand

Das instanziierte Modell bildet die Ausgangsbasis zur Berechnung der Automatisierungseignungswerte pcv_m . Die Berechnung wird exemplarisch an der Grundbewegung Fügen veranschaulicht (siehe Tabelle 6-3). Die Gewichtungsfaktoren p_a der Attribute sowie die Klassifikationswerte cv_j der Attributausprägungen sind Tabelle 5-4 entnommen. Unter Verwendung der Formeln 11 und 12 erfolgt die Berechnung der Attributklassifikationswerte acv_j sowie des daraus resultierenden Automatisierungseignungswerts pcv_m der Grundbewegung Fügen.

Tabelle 6-3: Exemplarische Automatisierungseignungswertberechnung für die Grundbewegung Fügen (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

Attribut	$p_a / (\%)$	cv_j	$acv_j / (\%)$
Biegesteifigkeit Montagepartner	30	1	30
Ausrichten	30	0,5	15
Fügebewegung	10	0,1	1
Positionierhilfen	30	0,1	3
$pcv_m / (\%)$			49

Tabelle 6-4 listet alle Automatisierungseignungswerte des Serienzustands unter Anwendung zuvor erläuteter Vorgehensweise auf.

Tabelle 6-4: Automatisierungseignungswertberechnung des Serienzustands (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

Grundbewegung	pcv _m / (%)
Hinlangen	40
Greifen	83
Bringen	100
Fügen	49
Loslassen	54

Die vergleichsweise niedrigsten Automatisierungseignungswerte weisen die Grundbewegungen Hinlangen, Fügen und Loslassen auf.

Die geringe Automatisierungseignung der Grundbewegung Hinlangen, die durch die grundlegenden Eigenschaften des zu manipulierenden Einzelteils beschrieben wird (siehe Kapitel 5.3.3), ist auf die Forminstabilität des Leitungsbündels zurückzuführen. Aufgrund produktspezifischer Anforderungen des Leitungssatzes sind diesbezüglich keine Änderungen umsetzbar und werden daher folglich nicht umgesetzt. Dementsprechend widmet sich der weitere Verlauf den Grundbewegungen Fügen und Loslassen.

Aufgrund der ungünstigen Ausprägungen der Attribute Fügebewegung und Positionierhilfen der Grundbewegung Fügen sowie des Attributs Festhalten der Grundbewegung Loslassen stehen diese, unter Berücksichtigung der Methode (siehe Kapitel 5.6), im Fokus der Produktdesignoptimierung.

6.5 Designvariante 1

6.5.1 Produktdesignoptimierung

Zur Produktdesignoptimierung erfolgt der Einsatz geeigneter transferierter sowie neu hergeleiteter Gestaltungsrichtlinien (siehe Kapitel 5.5).

Den Mittelpunkt der Designoptimierung von Designvariante 1 bildet die Integration von Montagehaltern am formstabilen Montagepartner nach Gestaltungsrichtlinie SH3. Die Montagehalter sollen überdies als geeignete Positionierhilfen (SPH1) gestaltet werden und ferner die Aufspaltung des Montagevorgangs, in mehrere einfache Schritte, ermöglichen. Aufgrund der Klemmwirkung der Montagehalter soll das Loslassen des Leitungsbündels, auch vor Erreichen dessen finaler Position, realisierbar werden. Ferner soll dadurch sowohl eine einfache (SFB2) als auch einachsige Fügebewegung (SFB3) zur Montage des Leitungsbündels resultieren und die Notwendigkeit des Festhaltens entfallen (SFH1). Mittels der Klemmwirkung der Montagehalter soll weiterhin eine Montage des Leitungsbündels in horizontaler Richtung (GH3), ohne die Gefahr des Herausfallens desselben (GH4), unterstützt werden.

Da die Montage des Kabelbinders 1 heutzutage aufgrund mangelnder technischer Lösungen vollständig manuell erfolgt, wird dieser durch einen Schnappclip substituiert. Zwar handelt es sich dabei um einen Montageprozess mit ausschließlich formstabilen Einzelteilen, der über den Anwendungsbereich der Methodik hinausgeht, aber die vollständige Montage des Leitungsbündels in den Kabelkanal, inklusive dessen Fixierung, könnte hierdurch automatisiert realisierbar werden. Auf den Schnappclip erfolgt zudem die Anwendung der Gestaltungsrichtlinie SH1. Dadurch soll das Leitungsbündel, während der Montage des Schnappclips, final an dieser Stelle positioniert werden. (Trommnau et al. 2020c, S. 1143)

Abbildung 46 präsentiert den Serienzustand des Kabelkanals sowie die Designvariante 1 als, mittels Gestaltungsrichtlinien umkonstruierter, optimierter Zustand sowie inklusive des Schnappclips.

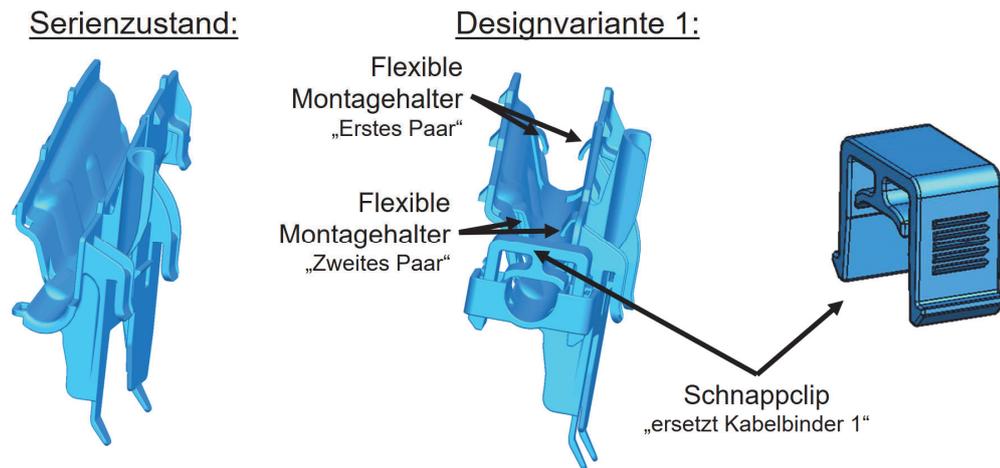


Abbildung 46: Serienzustand und Designvariante 1 inklusive Schnappclip (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1144)

6.5.2 Vergleich IST-Zustand mit SOLL-Zustand Designvariante 1

Für den Vergleich des Serienzustands mit dem neuen Design (Designvariante 1) erfolgt die Instanziierung des Modells des neuen Designs (siehe Tabelle 9-8 in Anhang 9.4.4 und Abbildung 46). Aufgrund der Umkonstruktion wird, statt einer sensorgeführten Fügebewegung, eine einachsige Fügebewegung prognostiziert. Ferner sollen die Montagehalter als Positionierhilfen dienen. Die erwartete Klemmwirkung der Montagehalter soll den Entfall der Notwendigkeit des Festhaltens des Leitungsbündels, bis zur vollständigen Fixierung desselben, unterstützen.

Das neu instanziierte Modell dient als Basis zur Berechnung der Automatisierungseignungswerte. Hierbei ergeben sich Veränderungen der betrachteten Grundbewegungen Fügen und Loslassen.

Der Automatisierungseignungswert der Grundbewegung Fügen steigt von 49 % auf 85 % und der Automatisierungseignungswert der Grundbewegung Loslassen von 54 % auf 93 % (siehe Tabelle 6-5). (Trommnau et al. 2020c, S. 1143f)

Tabelle 6-5: Automatisierungseignungswertvergleich des Serienzustands und der Designvariante 1 (in Anlehnung an Trommnau et al. 2020c, S. 1143f)

Grundbewegung	pcv _m / (%) Serienzustand	pcv _m / (%) Designvariante 1
Hinlangen	40	40
Greifen	83	83
Bringen	100	100
Fügen	49	85
Loslassen	54	93

6.5.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Validierung der prognostizierten Veränderungen zuvor erwähnter Attributausprägungen soll mittels Versuchen erfolgen. Dargestellt werden soll die automatisierte Montage des Leitungsbündels in den umkonstruierten Kabelkanal der Designvariante 1. Ferner soll die automatisierte Montage des formstabilen Schnappclips demonstriert werden.

Eingesetzt wird ein UR10e 6-Achs-Knickarm-Roboter von Universal Robots. Als Greifer findet ein Fingerkit von Weiss Robotics, in der in Abbildung 47 dargestellten Konfiguration, Verwendung (Universal Robots GmbH 2021, S. 22).

Für den Versuch werden dem Roboter das zu montierende Leitungsbündel sowie ein umkonstruierter Kabelkanal, mittels des in Abbildung 47 dargestellten Versuchsaufbaus, präsentiert. Zur Validierung des Loslassens des Leitungsbündels und damit der Klemmwirkung der Montagehalter erfolgt eine, von der Horizontalen abweichende, Befestigung der Kabelkanäle am Versuchsstand.

Der Versuch wird 7mal wiederholt wovon 6 Montageversuche erfolgreich sind. Bei einem Versuch ist das Leitungsbündel zwar montiert, befindet sich aber, an der Stelle des ersten Paares der flexiblen Montagehalter, nicht vollständig in der geforderten Endlage. Zur Korrektur erfolgt eine Anpassung des Roboterverfahrwegs.

Für die nachfolgende Versuchsdurchführung werden dem Roboter drei Leitungsbündel, drei umkonstruierte Kabelkanäle sowie ein Schnappclip mittels des Versuchsstands

bereitgestellt (siehe Abbildung 47). Alle drei identischen Leitungsbündel sowie der Schnappclip sollen in einem durchgängigen Versuchsablauf nacheinander montiert werden, um die Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse sicherzustellen. Die Montage des Schnappclips wird nur einmal durchgeführt da es sich, wie zuvor erläutert, um einen Montageprozess mit ausschließlich formstabilen Einzelteilen handelt, der über den Anwendungsbereich der Methodik hinausgeht.

Weiss Robotics Fingerkit Konfiguration



Versuchsaufbau

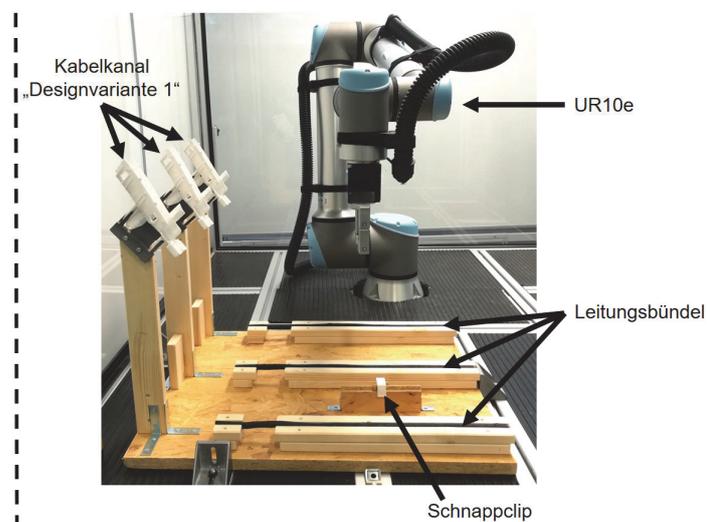


Abbildung 47: Verwendete Fingerkit Konfiguration und Versuchsaufbau für Designvariante 1

Die Beschreibung des Versuchsablaufs erfolgt mittels der Aufteilung in sieben Teilschritte:

1. Greifen des ersten Leitungsbündels.
2. Eindrücken des ersten Leitungsbündels in das erste Montagehalterpaar des ersten Kabelkanals.
3. Loslassen des ersten Leitungsbündels und Verfahren zum zweiten Montagehalterpaar des ersten Kabelkanals.
4. Eindrücken des ersten Leitungsbündels in das zweite Montagehalterpaar des ersten Kabelkanals.
5. Durchführung der Schritte 1-4 zur Montage des zweiten und dritten Leitungsbündels in die verbleibenden Kabelkanäle.

6. Greifen des Schnappclips.
7. Einfügen des Schnappclips in den ersten Kabelkanal.

Eine ausführliche Darstellung des Versuchsablaufs präsentiert Abbildung 48.



Abbildung 48: Versuchsablauf der automatischen Leitungsbündelmontage in Designvariante 1. Abfolge von links nach rechts je Zeile.

Die Versuchsdurchführung zeigt die erfolgreiche Montage aller drei Leitungsbündel sowie des Schnappclips innerhalb eines durchgängigen Versuchsablauf.

6.6 Designvariante 2

6.6.1 Produktdesignoptimierung

Abbildung 12 visualisiert die Prozesszeitanteile der Leitungssatzfertigung und motiviert das Bündeln von Einzelleitungen mit Klebeband als Handlungsfeld. Diese Motivation bildet die Ausgangsbasis zur Produktdesignoptimierung von Designvariante 2, ebenfalls aufbauend auf zuvor erläuterten Fallbeispiel (siehe Kapitel 6.2).

Die Designvariante 2 fokussiert die gänzliche Vermeidung von Klebeband im relevanten Betrachtungsbereich der Montageoperation. Die Bündelung der Einzelleitungen erfolgt stattdessen vorab mittels eines Kabelbinders mit Tannenbaumclip an einer Stelle (siehe Abbildung 49) aufgrund der Möglichkeit des vollautomatisierten Setzens desselben (siehe Tabelle 2-2). Dies reduziert den Aufwand zur Bündelung, im Gegensatz zur Umwicklung mit Klebeband (siehe Kapitel 2.3), deutlich.



Abbildung 49: Gebündelte Einzelleitungen mithilfe eines Kabelbinders mit Tannenbaumclip

Der vormontierte Kabelbinder soll das Anstreben einer partiellen Formstabilität, gemäß Gestaltungsrichtlinie SF2, erfüllen. Der Tannenbaumclip soll die Funktion einer Positionierhilfe (SPH1) realisieren und ist vorab an das Leitungsbandel montierbar (SH2).

Zur Montage des Tannenbaumclips erhält der Kabelkanal eine Tannenbaumclipaufnahme. Dadurch wird der Entfall der Notwendigkeit des Festhaltens des Leitungsbandels (SFH1) angestrebt. Ferner soll damit die Montage in horizontaler Richtung unterstützt (GH3) und ein Herausfallen vermieden (GH4) werden.

Aufgrund der Bündelung der Einzelleitungen an nur einer Stelle, muss das Einfügen aller Einzelleitungen in den Kabelkanal sichergestellt werden. Dementsprechend erfolgt die

Integration einer Vorpositionierhilfe (SPH1) in den Kabelkanal. Die Vorpositionierhilfe in Kombination mit der finalen Positionierung des Tannenbaumclips in dessen vorgesehener Aufnahme, soll eine einfache Fügebewegung (SFB2) ermöglichen.

Ebenfalls motiviert von einer vollständig automatisierten Montage wird zur Substitution des Kabelbinders 1 ein formstabiler Clip konstruiert. Dieser soll, ähnlich wie der Schnappclip aus Designvariante 1, eine automatisierte Montage desselben und die finale Positionierung (SH1) des Leitungsbündels an der Montageposition realisieren. Aufgrund der Formstabilität des Clips sowie des Kabelkanals ist der Anwendungsbereich der Methodik überschritten und der Montagevorgang des Clips wird nicht in der Bewertung abgebildet.

Abbildung 50 präsentiert den Serienzustand des Kabelkanals, die Designvariante 2 des Kabelkanals, den Clip sowie den Kabelbinder mit Tannenbaumclip.

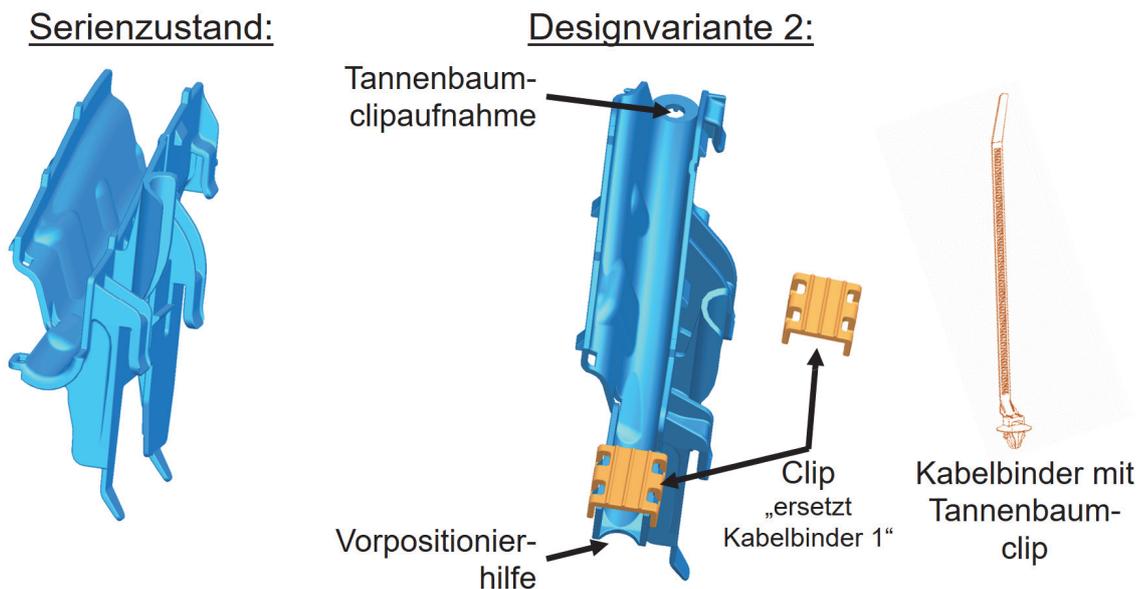


Abbildung 50: Serienzustand und Designvariante 2 inklusive Clip und Kabelbinder mit Tannenbaumclip.

6.6.2 Vergleich IST-Zustand mit SOLL-Zustand Designvariante 2

Basierend auf der Designvariante 2 erfolgt die Instanziierung des Modells (siehe Tabelle 9-9 in Anhang 9.4.4) zur anschließenden Berechnung der Automatisierungseignungswerte.

Aufgrund des Tannenbaumclips zur Bündelung der Einzelleitungen entfällt zwar die α -Symmetrie des Bauelements und ein asymmetrisches Bauelement liegt vor, begünstigend soll aber die Kombination aus Tannenbaumclip, Tannenbaumclipaufnahme sowie Vorpositionierhilfe eine mehrachsige, anstatt einer sensorgeführten, Fügebewegung realisieren. Der Tannenbaumclip soll hierbei als Positionierhilfe dienen und ferner die Fixierung des Leitungsbündels im Kabelkanal realisieren, wodurch prognostizierend die Notwendigkeit des Festhaltens entfällt.

Die Veränderungen der Automatisierungseignungswerte im Vergleich zum IST-Zustand ergeben sich in den Grundbewegungen Greifen, Fügen und Loslassen.

Dabei sinkt der Automatisierungseignungswert der Grundbewegung Greifen auf 70 %, Fügen steigt von 49 % auf 82 % und Loslassen steigt von 54 % auf 93 % (siehe Tabelle 6-6).

Tabelle 6-6: Automatisierungseignungswertvergleich des Serienzustands und der Designvariante 2

Grundbewegung	pcv _m / (%) Serienzustand	pcv _m / (%) Designvariante 2
Hinlangen	40	40
Greifen	83	70
Bringen	100	100
Fügen	49	82
Loslassen	54	93

6.6.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Für den Versuch erfolgt der Einsatz desselben Versuchsstands wie in Kapitel 6.5.3. Zur Durchführung wird ein UR10 6-Achs-Knickarm-Roboter von Universal Robots eingesetzt und das Fingerkit von Weiss Robotics, in derselben Konfiguration wie in Abbildung 47 dargestellt, verwendet (Universal Robots GmbH 2013).

Dementsprechend ähneln sich die Versuche hinsichtlich der Bereitstellung der Leitungsbündel, der umkonstruierten Kabelkanäle sowie eines Clips mittels des Versuchsstands (siehe Abbildung 51).

Zur Validierung der Montage wird der Versuch 17mal wiederholt. Die Validierung des Loslassens des Leitungsbündels wird gleichermaßen durch eine, von der Horizontalen abweichende, Befestigung der Kabelkanäle am Versuchsstand vorgenommen. Alle 17 Versuche bestätigen ein vollständiges Einrasten des Tannenbaumclips in die Tannenbaumclipaufnahme. Bei 5 der 17 Versuche befindet sich eine Leitung, an der Position des Clips, nicht innerhalb des Kabelkanals. Dies würde die Montage des Clips behindern. Vor dem nachfolgenden Versuch wird der Roboterfahrweg diesbezüglich angepasst.

Zur Validierung der Wiederholbarkeit sollen im nachfolgenden Versuch alle drei Leitungsbündel sowie der Clip in einem durchgängigen Versuchsablauf nacheinander montiert werden. Die Montage des Clips wird wie bei Designvariante 1 nur einmal durchgeführt da es sich um einen Montageprozess mit ausschließlich formstabilen Einzelteilen handelt, der über den Anwendungsbereich der Methodik hinausgeht.

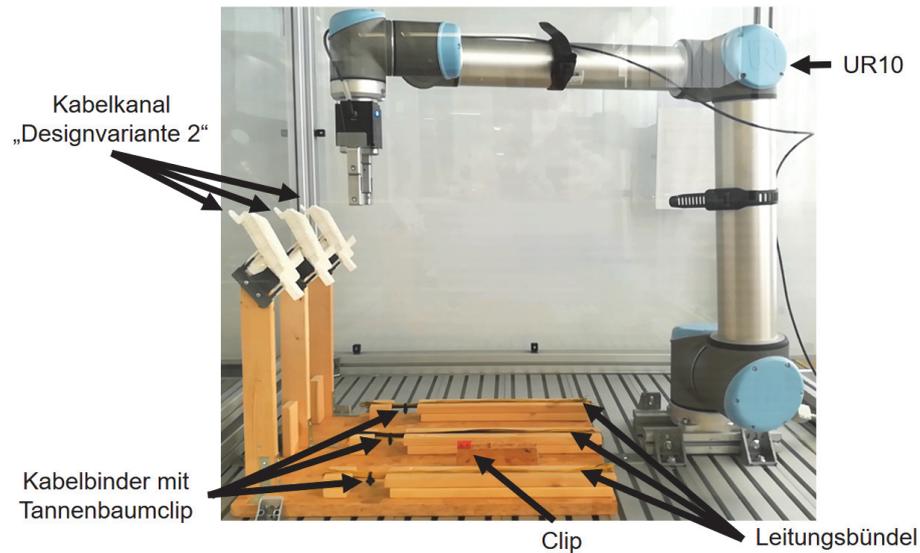


Abbildung 51: Versuchsaufbau für Designvariante 2

Die Beschreibung des Versuchsablaufs erfolgt mittels der Aufteilung in acht Teilschritte:

1. Greifen des ersten Leitungsbündels an der Position des Kabelbinders mit Tannenbaumclip.
2. Anfahren der Vorpositionierhilfe am ersten Kabelkanal.
3. Verfahren zur Tannenbaumclipaufnahme des ersten Kabelkanals.
4. Einfügen des Tannenbaumclips in die Tannenbaumclipaufnahme des ersten Kabelkanals.
5. Loslassen des ersten Leitungsbündels.
6. Durchführung der Schritte 1-4 zur Montage des zweiten und dritten Leitungsbündels in die verbleibenden Kabelkanäle.
7. Greifen des Clips.
8. Einfügen des Clips in den ersten Kabelkanal.

Abbildung 52 präsentiert den Versuchsablauf.

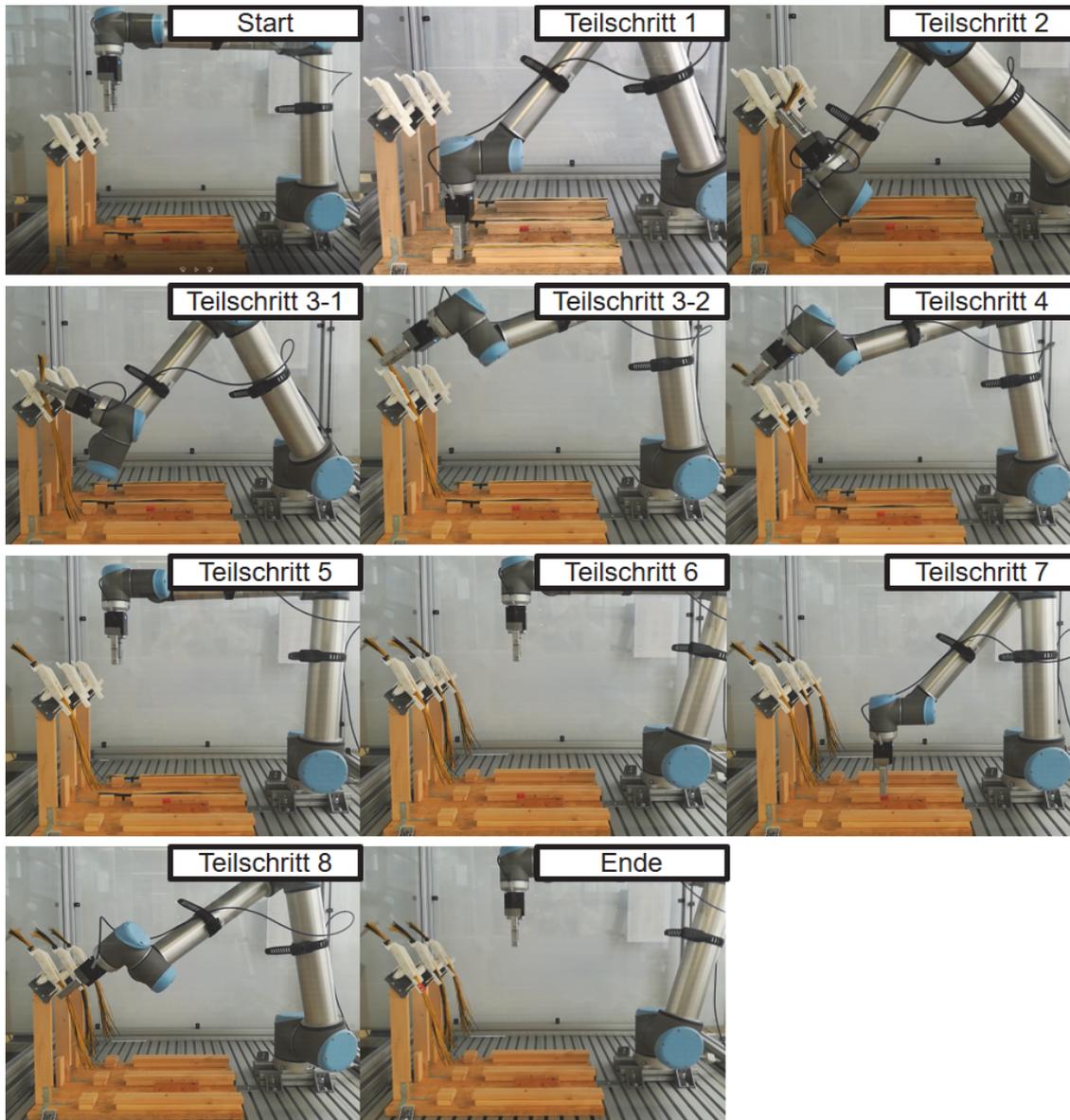


Abbildung 52: Versuchsablauf der automatischen Leitungsbündelmontage in Designvariante 2. Abfolge von links nach rechts je Zeile.

Die Versuchsdurchführung zeigt die erfolgreiche Montage aller drei Leitungsbündel sowie des Clips innerhalb eines durchgängigen Versuchsablauf.

6.7 Expertendesignvariante

Zur weiteren Validierung der Methodik soll ein Automatisierungsexperte aus dem Bereich Leitungssatzentwicklung exemplarisch eine Designvariante auf Basis des Serienzustands des Kabelkanals entwickeln. Dem Experten werden dabei weder die entwickelte Methodik noch transferierte oder neu hergeleitete Gestaltungsrichtlinien zur Verfügung gestellt. Die an den Experten adressierte Anforderung umfasst dabei die Realisierung einer automatisierten Montage des vollbandagierten Leitungsbündels (siehe Kapitel 6.2 und 6.3) in den Kabelkanal. Abbildung 53 präsentiert den Serienzustand des Kabelkanals sowie die entwickelte Expertendesignvariante.

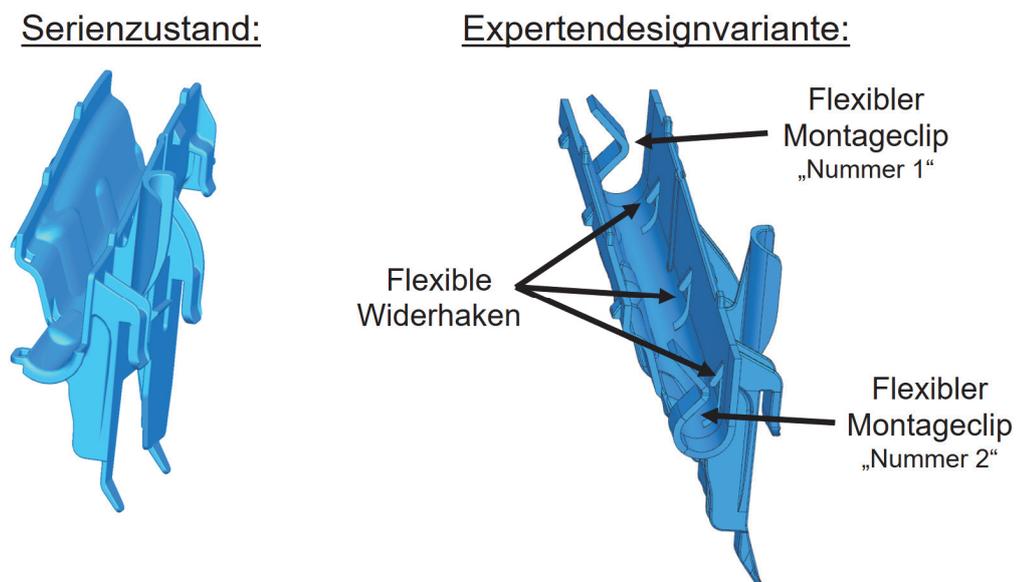


Abbildung 53: Serienzustand des Kabelkanals und Expertendesignvariante ohne Anwendung der Methodik

Analyse der Expertendesignvariante:

Die Analyse erfolgt sowohl unter Reflexion der in Kapitel 5.5 transferierten sowie neu hergeleiteten Gestaltungsrichtlinien als auch dem vom Experten erläuterten Montageablauf. Hierbei soll herausgearbeitet werden, ob vom Experten, aufgrund dessen

Erfahrungsschatzes, schon unterbewusst geeignete Gestaltungsrichtlinien berücksichtigt wurden.

Der Fokus der Expertendesignvariante liegt auf der Integration von zwei flexiblen Montageclips (vgl. SH3). Die Montageclips sollen dabei als geeignete Positionierhilfen gestaltet sein (vgl. SPH1). Ferner soll durch die Montageclips, wie bei Designvariante 1, die Aufspaltung des Montagevorgangs in mehrere einfache Schritte ermöglicht werden. Die Montageclips sollen ferner das Loslassen des Leitungsbündels, auch vor Erreichen dessen finaler Position, realisieren. Dies sollen die Montageclips aufgrund deren Klemmwirkung ermöglichen. Die Montageclips sollen ferner das Fügen des Leitungsbündels in den Kabelkanal mittels einer einfachen (vgl. SFB2) als auch einachsigen Fügebewegung (vgl. SFB3) realisieren. Zusätzlich soll die Notwendigkeit des Festhaltens (vgl. SFH1) entfallen. Mittels der Klemmwirkung der Montageclips soll weiterhin eine Montage des Leitungsbündels in horizontaler Richtung (GH3), ohne die Gefahr des Herausfallens desselben (GH4), unterstützt werden. Ergänzend dazu sollen die flexiblen Widerhaken ein Herausfallen oder Verschieben des Leitungsbündels, nach Erreichen dessen finaler Position, verhindern.

Zur weiteren Analyse erfolgt, basierend auf der Expertendesignvariante, die Instanziierung des Modells (siehe Tabelle 9-10 in Anhang 9.4.5) zur anschließenden Berechnung der Automatisierungseignungswerte. Diese sind folgend in Tabelle 6-7 aufgelistet.

Tabelle 6-7: Automatisierungseignungswertvergleich des Serienzustands und der Expertendesignvariante

Grundbewegung	pcv _m / (%) Serienzustand	pcv _m / (%) Expertendesignvariante
Hinlangen	40	40
Greifen	83	83
Bringen	100	100
Fügen	49	85
Loslassen	54	100

Hierbei ergeben sich Veränderungen der betrachteten Grundbewegungen Fügen und Loslassen. Der Automatisierungseignungswert der Grundbewegung Fügen steigt von 49 % auf 85 % und der Automatisierungseignungswert der Grundbewegung Loslassen von 54 % auf 100 %.

6.8 Ergebnisbeschreibung und Interpretation

Die Sensitivitätsanalyse der Fallbeispiele zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen den errechneten Automatisierungseignungswerten pcv_m und den Expertenmeinungen. Insgesamt liegen dabei 31 von 35 Werten (89 %) innerhalb der jeweiligen Spannweite der Expertenmeinungen und 24 von 35 Werten (69 %) innerhalb des jeweiligen Interquartilsabstands. Der durchschnittliche Abstand zwischen den errechneten Automatisierungseignungswerten pcv_m , die außerhalb der Spannweite liegen, und dem jeweiligen Randwert des nächstgelegenen Quartils der Expertenmeinungen beträgt, dargestellt als absoluter Automatisierungseignungswert (siehe Tabelle 6-1), 7 %. Die Sensitivitätsanalyse bestätigt damit die praktische Anwendbarkeit der Methodik basierend auf der erfolgreichen Verknüpfung zwischen den hergeleiteten Einflussfaktoren in Kombination mit den entsprechend festgelegten Gewichtungsfaktoren der jeweiligen Ausprägungen. Resümierend weißt die Sensitivitätsanalyse damit die Eignung der Methodik zur Bestimmung eines realistischen Automatisierungseignungswerts pcv_m nach.

Die Versuche beweisen die erfolgreiche automatisierte Montage der Leitungsbündel in die umkonstruierten Kabelkanäle unter Verwendung eines typischen und am Markt verfügbaren Endeffektors im Gegensatz zur vollständig manuellen und nicht automatisiert darstellbaren Montage des Serienzustands.

Das ausgewählte Beispiel ermöglicht dabei die vollumfängliche Anwendung der Methodik. Dazu zählen insbesondere die Berechnung und Beurteilung der Bewertungsfaktoren, die dadurch mögliche Priorisierung der zu betrachtenden Grundbewegungen sowie die Auswahl und vorrangige Optimierung der kritischen Attribute (siehe Kapitel 5.6). Ferner zeigen die Designvariante 1 und die Designvariante 2 verschiedene Arten optimierter Produktdesigns basierend auf unterschiedlichen Anforderungen an den

Zielzustand. Die Designvariante 1 ermöglicht die erfolgreiche Automatisierung des manuellen Montageprozesses unter Verwendung des Kabelbündels des Serienzustands. Die Designvariante 2 fokussiert zusätzlich die gänzliche Vermeidung von Klebeband im relevanten Betrachtungsbereich der Montageoperation. Damit adressieren die Versuche ebenfalls gezielt die relevanten Handlungsfelder des manuellen Zusammenbaus sowie des Bündelns (siehe Tabelle 2-2) im Bereich der Leitungssatzfertigung.

Weiter bestätigen die Versuche den erfolgreichen Einsatz der in Kapitel 5.5 aufgearbeiteten Gestaltungsrichtlinien zu Umkonstruktion der Kabelkanäle. Die aufeinanderfolgende automatisierte Montage von drei Leitungsbündeln in einem durchgängigen Versuchsablauf belegt dabei die Wiederholbarkeit der Versuchsergebnisse. Dies korreliert mit den in Tabelle 6-5 sowie Tabelle 6-6 errechneten Automatisierungseignungswerten der neuen Designs, insbesondere der Grundbewegungen Fügen und Loslassen.

Im Detail fokussieren die Produktdesignoptimierungen des Fallbeispiels (siehe Kapitel 6.4) die Optimierung der Attribute Fügebewegung und Positionierhilfen der Grundbewegung Fügen sowie des Attributs Festhalten der Grundbewegung Loslassen.

6.8.1 Designvariante 1

Die Designvariante 1 demonstriert erfolgreich die Montage der Leitungsbündel mittels einachsiger, anstatt der im Serienzustand benötigten sensorgeführten, Fügebewegung. Ebenfalls erfolgreich abgebildet wird die dafür notwendige Aufteilung des Montageprozesses in mehrere Schritte sowie die Funktion der Montagehalter als Positionierhilfen.

Das optimierte Kabelkanaldesign ermöglicht ferner das Loslassen des Leitungsbündels bis zur vollständigen Fixierung desselben, wodurch sich die Ausprägung des Attributs Festhalten zu „Festhalten nicht notwendig“ verschiebt. Dies veranschaulichen die schräg angebrachten Kabelkanäle im Versuchsaufbau und das Loslassen der Leitungsbündel nach Eindrücken derselben in das jeweils erste Montagehalterpaar.

Die Versuchsergebnisse beweisen zudem die erfolgreiche Substitution des Kabelbinders 1 mittels Schnappclip sowie dessen automatisierte Montage. Eine zusammenfassende Darstellung des Versuchs präsentiert Abbildung 54.

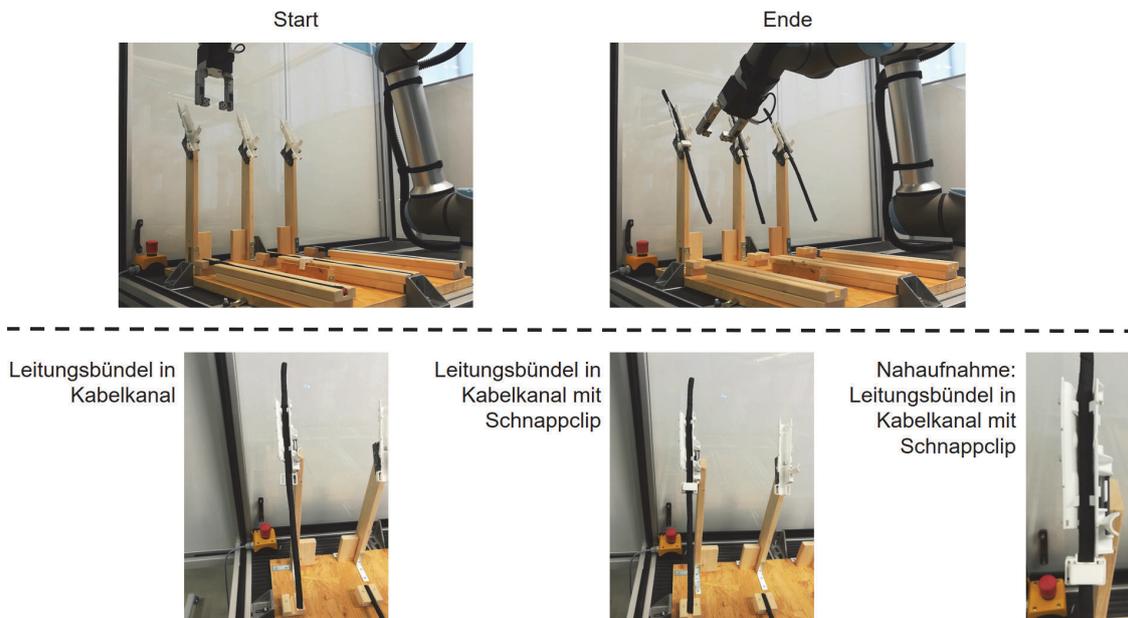


Abbildung 54: Start- und Endaufnahme des Versuchs sowie montiertes Leitungsbündel mit und ohne Schnappclip.

Expertenbewertung der Designvariante 1:

Folgend wird die Designvariante 1 von fünf Experten sowohl aus dem Bereich Leitungssatz- als auch Prozessentwicklung bei Mercedes-Benz Cars, insbesondere von einem für das Seriendesign des Kabelkanals verantwortlichen Entwickler, bewertet. Die Bewertungen der Experten werden nachfolgend zusammengefasst dargestellt und umfassen eine Bewertung hinsichtlich der Einsetzbarkeit in der Serie sowie eine technisch-wirtschaftliche Betrachtung der Designvariante 1.

Serieneinsatz:

Ein Serieneinsatz wird von den Experten als sehr realistisch eingestuft. Zur Montage des unteren Leitungsbündels (siehe Abbildung 44) ist die Designvariante 1, laut Experten-einschätzung, uneingeschränkt einsetzbar. Sowohl die flexiblen Montagehalter als auch der Schnappclip entsprechen allen derzeitigen Konstruktionsvorgaben.

Ferner prognostizieren die Experten auch eine optimierte manuelle Montage des Leitungsbündels in die Designvariante 1. Zum einen verhindern die flexiblen Montagehalter ein Verrutschen des Leitungsbündels wodurch derzeitige Justageaufwände entfallen würden und zum anderen bewerten die Experten die Montage des Schnappclips als einfacher und weniger zeitaufwändig im Vergleich zur manuellen Montage eines Kabelbinders.

Wird weiter die Montage des oberen Leitungsbündels betrachtet müssten, im Falle einer derzeit manuellen Montage, die entsprechenden Kabelbinderbefestigungspunkte zur Fixierung des oberen Leitungsbündels in der Designvariante 1 integriert werden. Dies wird von den Experten als unkritisch bewertet, da es sich hierbei nur um einfache Aussparungen handelt (siehe Abbildung 44).

Technisch-wirtschaftliche Bewertung:

Laut Expertenmeinung ist die Designvariante 1 uneingeschränkt auf derzeit typischen Spritzgussmaschinen mit den entsprechenden Werkzeugen fertigbar. Dies gilt ebenfalls für den Schnappclip. Hinsichtlich der Menge oder der Art des dazu benötigten Materials sehen die Experten keine nennenswerten Veränderungen.

Summierend bewerten die Experten die Designvariante 1 aus technisch-wirtschaftlicher Sicht positiv. Dies ist der Fertigbarkeit auf typischen Spritzgussmaschinen sowie der Möglichkeit der automatisierten Montage und der damit verbundenen Vorteile (siehe Kapitel 1.2) geschuldet. Überdies ermöglicht die Designvariante 1 sowohl eine automatisierte als auch eine optimierte manuelle Montage im Vergleich zum Serienzustand.

6.8.2 Designvariante 2

Anhand der Designvariante 2 wird die erfolgreiche Verschiebung der Fügebewegung von einer sensorgeführten hin zu einer mehrachsigen Fügebewegung, mithilfe der Kombination aus Vorpositionierhilfe, Kabelbinder mit Tannenbaumclip und Tannenbaumclipaufnahme, nachgewiesen.

Durch den Tannenbaumclip entfällt zwar die α -Symmetrie des Bauelements und ein asymmetrisches Bauelement liegt vor doch dient dieser als Positionierhilfe und ermöglicht den Entfall der Notwendigkeit des Festhaltens. Bestätigend illustriert dies der Versuchsablauf anhand des Loslassens des Leitungsbündels nach Einfügen des Tannenbaumclips.

Die automatisierte Clipmontage beweist zusätzlich die Funktion des Clips als finales Positionierelement, nach Gestaltungsrichtlinie SH1, sowie den vorteilhaften Entfall des Kabelbinders 1.

Eine verdichtete Versuchsdarstellung illustriert Abbildung 55.

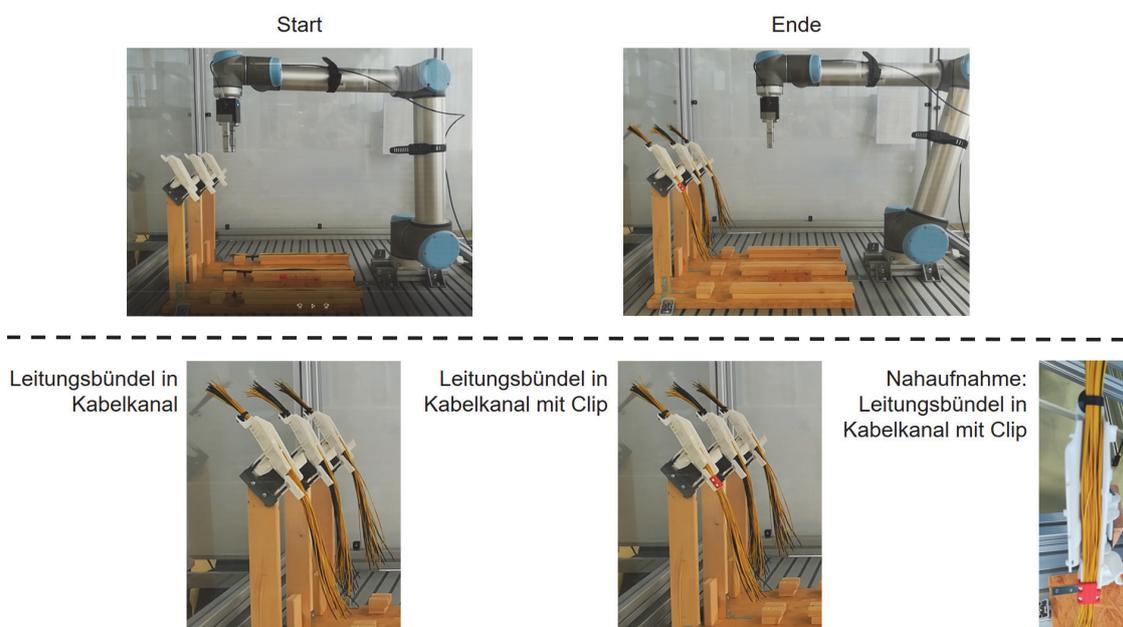


Abbildung 55: Start- und Endaufnahme des Versuchs sowie montiertes Leitungsbündel mit und ohne Clip.

Expertenbewertung der Designvariante 2:

Folgend wird auch die Designvariante 2 von fünf Experten sowohl aus dem Bereich Leitungssatz- als auch Prozessentwicklung bei Mercedes-Benz Cars, insbesondere von einem für das Seriendesign des Kabelkanals verantwortlichen Entwickler, bewertet. Die Bewertungen der Experten ebenfalls in zusammengefasster Form dargestellt und umfassen eine Bewertung hinsichtlich der Einsetzbarkeit in der Serie sowie eine technisch-wirtschaftliche Betrachtung der Designvariante 2.

Serieneinsatz:

Ein Serieneinsatz der Designvariante 2 wird von den Experten ebenfalls als sehr realistisch eingestuft. Die Vermeidung von Klebeband innerhalb des Kabelkanals, der Einsatz des Kabelbinders mit Tannenbaumclip sowie der Clip sind, unter Berücksichtigung der derzeitigen Konstruktionsvorgaben, umsetzbar. Ferner ermöglicht der Einsatz des Kabelbinders mit Tannenbaumclip eine große Flexibilität bezüglich variierender Kabelbündeldurchmesser bei unterschiedlichen Varianten.

Laut den Experten unterstützt die Designvariante 2 eine optimierte manuelle Montage des Leitungsbündels. Der vorab montierte Kabelbinder mit Tannenbaumclip ermöglicht sowohl eine einfachere als auch schnellere manuelle Montage des Leitungsbündels in den Kabelkanal im Vergleich zur Befestigung des Leitungsbündels mittels Kabelbinder im Serienzustand (siehe Abbildung 44). Ferner verhindert der Kabelbinder mit Tannenbaumclip das Verrutschen des Leitungsbündels im Kabelkanal und reduziert damit etwaige Justageaufwände. Überdies lässt sich der Kabelbinder mit Tannenbaumclip sowohl automatisiert als auch manuell vorab an das Leitungsbündel montieren. Die Designvariante 2 reduziert durch die Vermeidung von Klebeband weiterhin den Aufwand zu Bündelung der Einzelleitungen.

Wird weiter die Montage des oberen Leitungsbündels betrachtet müssten, wie auch bei Designvariante 1, im Falle einer derzeit manuellen Montage, die entsprechenden Kabelbinderbefestigungspunkte zur Fixierung des oberen Leitungsbündels, in der Designvariante 2 integriert werden.

Technisch-wirtschaftliche Bewertung:

Laut Expertenmeinung ist die Designvariante 2 sowie der Clip ebenfalls uneingeschränkt auf derzeit typischen Spritzgussmaschinen mit den entsprechenden Werkzeugen fertigbar. Wie bei Designvariante 1 sehen die Experten hierbei keine nennenswerten Veränderungen hinsichtlich der Menge oder der Art des dazu benötigten Materials.

Summierend bewerten die Experten die Designvariante 2 aus technisch-wirtschaftlicher Sicht positiv. Dies ist der Fertigbarkeit auf typischen Spritzgussmaschinen, der Möglichkeit der automatisierten Montage und der damit verbundenen Vorteile (siehe Kapitel 1.2) sowie der Vermeidung von Klebeband im Betrachtungsbereich geschuldet. Überdies ermöglicht die Designvariante 2, wie Designvariante 1, eine automatisierte als auch eine optimierte manuelle Montage im Vergleich zum Serienzustand.

6.8.3 Expertendesignvariante

Die Analyse der Expertendesignvariante (siehe Kapitel 6.7) bestätigt die unterbewusste Berücksichtigung geeigneter Gestaltungsrichtlinien basierend auf dem Erfahrungsschatz des Experten. Demnach unterstützten die transferierten sowie neu hergeleiteten Gestaltungsrichtlinien einen Produktentwickler bei der automatisierungsgerechten Produktgestaltung erfolgreich.

Die weitere Analyse zeigt eine enge Übereinstimmung der Expertendesignvariante und der Designvariante 1 bezüglich des angestrebten Montageprozesses zur Montage des Leitungsbündels im Kabelkanal. Die zwei flexiblen Montageclips sowie die flexiblen Widerhaken der Expertendesignvariante ermöglichen dabei dieselben Optimierungen zur Realisierung einer automatisierten Montage wie die flexiblen Montagehalter der Designvariante 1. Dies belegt die Fähigkeit der Methodik schnell und eindeutig die korrekten Schwachstellen im Produktdesign, hinsichtlich des automatisierten Zusammenbaus mit Industrierobotern, zu identifizieren.

Zur Substitution des Kabelbinders 1, der das Leitungsbündel fixiert und gegen verrutschen sichert, bedient sich die Designvariante 1 eines Schnappclips. Dies löst die

Expertendesignvariante mittels der Kombination aus zwei flexiblen Montageclips und der flexiblen Widerhaken und vermeidet dabei die Montage eines zusätzlichen Einzelteils. Diese Optimierung wird auch anhand der Berechnung des Automatisierungseignungswerts pcv_m der Grundbewegung Loslassen sichtbar. Hierbei verschiebt sich die Ausprägung des Attributs Fixierungen zu „keine zusätzliche Fixierung notwendig“ und steigert den Automatisierungseignungswert von 54 % im Serienzustand und 93 % bei der Designvariante 1 auf 100 %. Dies beweist ebenfalls wieder die Fähigkeit der Methodik zur Schwachstellenidentifikation im Produktdesign.

6.9 Reflexion der Methodik

Die Sensitivitätsanalyse, der Einsatz der Methodik in den Fallbeispielen sowie die Validierung belegen die praktische Anwendbarkeit. Die Versuche bestätigen dabei eindeutig die prognostizierten Optimierungen des automatisierten Zusammenbaus durch die Umkonstruktionen.

Die quantitative Bewertung der Automatisierungseignung des Serienzustands hat die schnelle und eindeutige Identifikationsmöglichkeit von Schwachstellen, hinsichtlich des automatisierten Zusammenbaus mit Industrierobotern, gezeigt.

Die Optimierung der identifizierten Schwachstellen, mithilfe transferierter als auch neu hergeleiteter Gestaltungsrichtlinien, konnte an den Fallbeispielen der Designvariante 1 und Designvariante 2 erfolgreich demonstriert werden. Insbesondere die vorgenommenen Optimierungen der Attribute Fügebewegung, Positionierhilfen und Festhalten wurden anhand der Automatisierungseignungsberechnung quantifizierbar und konnten mittels der Versuche eindeutig nachgewiesen werden. Unterstützend beweist die Expertendesignvariante die Fähigkeit der Methodik die korrekten Schwachstellen im Produktdesign zu identifizieren und belegt zudem die Unterstützung bei der automatisierungsgerechten Produktgestaltung mittels transferierter sowie neu hergeleiteter Gestaltungsrichtlinien. Ferner bewerten die Experten die Umkonstruktionen technisch-wirtschaftlich positiv und bestätigen deren Tauglichkeit für einen Serieneinsatz.

Das in Kapitel 4 aufgearbeitete Anforderungsprofil reflektierend, zeigt die Methodik den erfolgreichen Schluss der Forschungslücke zur Bewertung und Optimierung der automatisierten Montage von Bauteilkombinationen mit forminstabilen Einzelteilen.

Die relevanten montagebeeinflussenden Attribute im Kontext des automatisierten Zusammenbaus wurden in der Modellentwicklung, unter Beachtung verbreiteter DFA-Methoden, Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands sowie Ansätzen zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile, explizit berücksichtigt.

Die Methode stellt einen klaren Leitfaden zur praktischen Anwendung der Methodik bereit. Die Berechnung der Automatisierungseignung ermöglicht eine quantitative Bewertung von Bauteilkombinationen ex ante und das zugrundeliegende Schema erfüllt die Anforderung hinsichtlich einer etwaigen Erweiterung des Modells um zusätzliche Attribute. Die Bestimmung der Automatisierungseignung stellt ferner einen geeigneten Ansatz zur quantitativen Betrachtung der Optimierungspotenziale dar. Der Bezug zwischen spezifischen Gestaltungsrichtlinien und den beeinflussten Attributen erlaubt die strukturierte Verwendung derselben. Die Methodik erfüllt dementsprechend alle gestellten Anforderungen umfangreich und vollständig.

Die Anwendung der Methodik im Bereich Automobilleitungssatz stellt eine geeignete Ausgangsbasis zur Validierung dar. Hier setzt jedoch auch der weitere Forschungsbedarf an. Ein Einsatz der Methodik in anderen Produktbereichen mit forminstabilen Einzelteilen sollte durch weiterführende Analysen geprüft werden. Es ist zu analysieren, ob die Methodik uneingeschränkt einsetzbar ist oder ob ggf. weitere montagebeeinflussende Attribute in die Methodik integriert werden müssen. Ein beispielhafter Montageprozess wäre das Verlegen und Einstecken von Kabelbündeln in Clips. Dieser Montageprozess ist beispielsweise bekannt aus dem Bereich der weißen Ware. Der modulare Aufbau der Methodik, in Kombination der vorhandenen Berechnungsschemata, ermöglicht dabei Erweiterungen um zusätzliche montagebeeinflussende Faktoren mit geringem Aufwand.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die automatisierte Montage von Produkten scheitert meist aufgrund des nicht automatisierungsgerecht ausgelegten Produktdesigns. Insbesondere das Vorhandensein forminstabiler Komponenten wird dabei als Hemmnis aufgeführt. Die Verwendung forminstabiler Komponenten bedingende Produkthanforderungen gepaart mit automatisierungsbedingenden Fertigungsprozessanforderungen bilden den Hintergrund der Formulierung zugrundeliegender Forschungsfragen dieser Arbeit. Es sollte untersucht werden, wie ein forminstabiles Bauteil sowie dessen Montagepartner gestaltet sein muss, um eine automatisierte Montage zu begünstigen und wie diese Eignung ex ante messbar gemacht werden kann. Das Fundament zur Untersuchung bildet die Anlehnung an das Forschungsprozessmodell angewandter Wissenschaft nach Ulrich (2001, S. 194f).

Zur Anforderungsdefinition erfolgte die Aufarbeitung verbreiteter DFA-Methoden, von Methoden zur Ermittlung des Automatisierungsaufwands sowie von Ansätzen zur Klassifizierung forminstabiler Einzelteile. Die Reflexion der definierten Anforderungen mit bestehenden Methoden und Ansätzen im Kontext der automatisierungsgerechten Produktgestaltung offenbart die mangelnde Berücksichtigung forminstabiler Einzelteile sowie das Defizit eines ganzheitlichen Ansatzes.

Grundbaustein der Entwicklung dieses neuen ganzheitlichen Ansatzes stellt eine allgemeingültige Klassifizierungs- und Bewertungsmatrix dar. Die generische Matrix ermöglicht die Zustandsbewertung der Eignung einer Bauteilkombination, aus forminstabilem Einzelteil und dessen Montagepartner, automatisiert zusammengebaut werden zu können. Die Entwicklung eines Modells, bestehend aus der Zuordnung relevanter montagebeeinflussender Faktoren sowie deren Ausprägungen zu den davon beeinflussten Prozessschritten, schafft dafür die Basis.

Die Instanziierung des Modells, anhand der betrachteten Bauteilkombination, ermöglicht die Kalkulation spezifischer Bewertungsfaktoren zur Zustandsbewertung unter Einsatz der generischen Matrix. Die Bewertungsfaktoren unterstützen sowohl die einfache Identifikation von Optimierungsbedarfen als auch die Realisierung der Vergleichbarkeit verschiedener Designvarianten.

Die generische Matrix unterstützt ferner die Optimierung der Bauteilkombination mittels impliziter Handlungsempfehlungen basierend auf einer numerischen Kennzeichnung der Ausprägungen. Ferner erfolgt die Bereitstellung expliziter Gestaltungsrichtlinien mittels des Transfers bestehender als auch neu entwickelter Gestaltungsrichtlinien. Der Bezug zwischen den Gestaltungsrichtlinien auf die davon beeinflussten Faktoren ermöglicht deren strukturierten Einsatz.

Die Methodikentwicklung fokussiert als finalen Schritt die Bereitstellung einer Vorgehensweise zur Anwendung des Modells sowie der Hilfsmittel. Nach der Bewertung des IST-Zustands einer bestehenden Bauteilkombination können optimierte Designvarianten entwickelt, bewertet und die beste Designvariante ausgewählt werden.

Die Sensitivitätsanalyse, die Anwendung innerhalb eines Fallbeispiels, die Generierung zweier Designvarianten sowie die Expertendesignvariante validiert an praxisnahen Beispielen eine realitätsnahe Bewertung sowie die erfolgreiche und aufwandsarme Anwendbarkeit der Methodik. Die Montage eines Leitungsbündels in einen Kabelkanal, die in der Automobilleitungssatzfertigung einen typischen sowie manuellen Montagevorgang darstellt, konnte vollständig automatisiert werden. Die einfache Identifikation von Optimierungsbedarfen sowie die automatisierungsgerechte Umkonstruktion unter Einsatz der Gestaltungsrichtlinien wurde dabei erfolgreich aufgezeigt.

Der praxisnahe Methodikeinsatz belegt die erfolgreiche Beantwortung eingangs gestellter Forschungsfragen. Die Methodik ermöglicht es, ex ante zu bestimmen, ob eine Bauteilkombination, aus forminstabilem Einzelteil und dessen Montagepartner geeignet ist, automatisiert zusammengebaut werden zu können.

7.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Rückblickend auf die in Kapitel 1.2 aufgeführte Transformation des Automobils und den damit verbundenen Veränderungen der Anforderungen an den Leitungssatz begünstigt die Anwendung der Methodik die Anforderungserfüllung mittels der Automatisierung von heutzutage manuellen Fertigungsschritten. Ferner lanciert die Anwendung der entwickelten Methodik die von Trommnau et al. (2020a) erläuterten Benefits im Kontext der Automatisierung der Leitungssatzfertigung und –montage, die unter anderem die Gewährleistung der Versorgungssicherheit, die Reaktion auf Personal- und Fachkräftemangel sowie die Stabilität bei monetären Aufwendungen umfassen. Dementsprechend trägt die Anwendung der Methodik zur Auflösung des in Abbildung 2 visualisierten Spannungsfelds, insbesondere zur Auflösung der Kausalität zwischen nicht automatisierungsgerechtem Produktdesign und manueller Fertigung, bei. Überdies können durch die Substitution manueller Prozessschritte durch Automatisierung allgemeine Ziele einer effizienten Produktion wie die Steigerung der Produktivität und die Reduzierung der Fertigungszeit erreicht werden (siehe Kapitel 3).

Da die Montage von Produkten typischerweise nicht ausschließlich Montageprozesse mit jeweils mindestens einem forminstabilen Einzelteil inkludiert, bedingt dies den Einsatz anderer Methoden zur Bewertung und Optimierung verbleibender Montageprozesse mit ausschließlich formstabilen Komponenten. Ein weiterführender Ansatz besteht in der Kombination der vorliegenden Methodik mit bestehenden Methoden im Bereich formstabiler Einzelteile zu einem gesamtheitlichen Analysetool.

Die Bewertung differierender Designansätze mittels der Vergleichswertmethode stellt zwar einen geeigneten und praktikablen Ansatz dar, jedoch kann eine weitere Optimierung zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in der Bereitstellung von Schwellenwerten gesehen werden. Es ist zu analysieren, ob generelle Schwellenwerte korrekte Anhaltspunkte liefern, wie die Schwellenwerte zu ermitteln sind und ob diese je Grundbewegung differieren.

Durch den modularen Aufbau der Methodik, in Kombination der vorhandenen Berechnungsschemata, sind Erweiterungen um zusätzliche montagebeeinflussende

Faktoren mit geringem Aufwand möglich. So ist die Erweiterung um Erkennungsmerkmale für Sensoren, in der Grundbewegung des Hinlangens, als Ansatzpunkt für weiterführenden Forschungsbedarf zu sehen.

Ferner ist weiterer Forschungsbedarf in der Überführung der Methodik in ein Softwaretool zu sehen. Hierbei ist zu untersuchen welche Attributausprägungen in CAD-Modellen bereits vorhanden sind und genutzt werden können und ob eine Erweiterung der Modelle um fehlende Attributausprägungen notwendig ist. Aufbauend darauf wird eine automatisierte Instanziierung des Modells sowie die automatisierte Berechnung der Automatisierungseignungswerte pcv_m für jede Grundbewegung denkbar. Daran anknüpfend ist die Weiterentwicklung des Softwaretools um die Funktion einer automatisierten Auswahl der besten Designvariante einer Bauteilkombination zu untersuchen. Forschungsbedarf besteht dabei in der Entwicklung der Vorgehensweise zur automatisierten Entscheidungsfindung insbesondere bei Designvarianten mit sowohl höheren als auch niedrigeren Automatisierungseignungswerten pcv_m im Vergleich zum IST-Zustand der Bauteilkombination.

8 Literaturverzeichnis

- A2MAC1 EURL 2020** A2MAC1 EURL, 2020.
A2MAC1 Automotive Benchmarking.
Hary.
Verfügbar unter: <https://portal.a2mac1.com/>
Zugriff am: 07.12.2020
- ABB 2020** ABB, 2020.
ABB Robotics: Produktkatalog 2020.
Verfügbar unter:
https://library.e.abb.com/public/76510f5372b84219b36c9df5345fed04/Produktkatalog2020_D_web.pdf
Zugriff am: 06.11.2020
- Abel et al. 2016** Abel, Heinz-Bernhard; Blume, Heinrich-Jochen; Brabetz, Ludwig; Broy, Manfred; Fürst, Simon; Ganzelmaier, Lothar; Helbig, Jörg; Heyen, Gerhard; Jipp, Meike; Kasties, Günther; Knoll, Peter; Krieger, Olaf; Lachmayer, Roland; Lemmer, Karsten; Pfaff, Wolfgang; Scharnhorst, Thomas; Schneider, Guido, 2016.
Elektrik/Elektronik/Software.
In: Pischinger, Stefan; Seiffert, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*.
8., aktualisierte und erweiterte Auflage.
Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 925–1104
ISBN 978-3-658-09528-4
- acatech 2011** acatech, 2011.
Cyber-Physical Systems.
Berlin, Heidelberg: Springer 11.
ISBN 978-3-642-27566-1
DOI: 10.1007/978-3-642-27567-8
- Acker et al. 2005** Acker, Jürgen; Henrich, Dominik, 2005.
Manipulation of Deformable Linear Objects: From Geometric Model Towards Program Generation.
In: *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 18-22 April 2005, S. 1541–1547
DOI: 10.1109/ROBOT.2005.1570333

- Albers et al. 2001** Albers, Albert; Schweinberger, Dirk, 2001. Methodik in der praktischen Produktentwicklung - Herausforderung und Grenzen. In: Spath, Dieter (Hrsg.): *Vom Markt zum Produkt: Impulse für die Innovationen von morgen*. Stuttgart: LOG-X, S. 25–34 ISBN 3-932298-18-7
- Almansa et al. 2016** Almansa, Ana; Hesse, Stefan; Hieger, Christof; Komenda, Titanilla; Malisa, Viktorio; Wagner, Erwin, 2016. Robotik - Technik für den Menschen. In: Hesse, Stefan; Malisa, Viktorio (Hrsg.): *Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, S. 23–308 ISBN 978-3-446-44365-5
- Almeida et al. 2009** Almeida, Denis L. M. de; Ferreira, João C. E., 2009. Analysis of the Methods Time Measurement (MTM) Methodology through its Application in Manufacturing Companies. In: Nabhani, Farhad (Hrsg.): *Proceedings of the 19th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM 2009: July 6th - July 8th, 2009, Teesside University, Middlesbrough, UK*. Middlesbrough ISBN 9780956230324 DOI: 10.13140/RG.2.1.2826.1927
- ARENA2036 e.V. 2020** ARENA2036 e.V., 2020. *ILLS - Innovationsinitiative Leitungssatz: Ergebnisse der Phase 1*. Verfügbar unter: https://www.arena2036.de/de/innovationsinitiative-leitungssatz?file=files/FinaleBilder/04_Forschung/Publikationen/Innovationsinitiative_Leitungssatz_Ergebnisse_Phase_1_ARENA2036_Stand_2020_09_17.pdf&cid=632 Zugriff am: 07.12.2020
- Awad et al. 2017** Awad, Ramez; Wößner, Johannes, 2017. Montage systematisch und wirtschaftlich automatisieren. *ETZ. Elektrotechnik + Automation* **138** (10), S. 4–7
- Awad et al. 2020** Awad, Ramez; Foith-Förser, Petra, 2020. *Automatisierungs-Potenzialanalyse für die Montage*. Verfügbar unter: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Roboter--und-Assistenzsysteme/300_400_dt_Automatisierungspotenzialanalyse_2020_web_offen.pdf Zugriff am: 22.06.2020

- Axmann Technology AG 2021** Axmann Technology AG, 2021.
Axmann Montageanlagen.
Zuzenhausen.
Verfügbar unter: <https://www.axmann-ag.de/montageanlagen.html>
Zugriff am: 28.05.2021
- Babiel 2019** Babiel, Gerhard, 2019.
Bordnetze und Powermanagement.
2. Auflage.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN 978-3-658-21142-4
DOI: 10.1007/978-3-658-21143-1
- Bargel 2018** Bargel, Hans-Jürgen, 2018.
Werkstoffprüfung.
In: Bargel, Hans-Jürgen; Schulze, Günter (Hrsg.):
Werkstoffkunde.
12., bearbeitete Auflage, korrigierter Nachdruck.
Berlin: Springer Vieweg, S. 117–174
ISBN 978-3-662-48629-0
- Bäbler 1988** Bäbler, Rudolf, 1988.
Integration der montagegerechten Produktgestaltung in den Konstruktionsprozeß.
Berlin, Heidelberg: Springer.
IPA-IAO - Forschung und Praxis 116.
Stuttgart, Univ., Diss, 1988.
ISBN 978-3-540-19058-5
DOI: 10.1007/978-3-662-07930-0
- Bauernhansl 2014** Bauernhansl, Thomas, 2014.
Die Vierte Industrielle Revolution – Der Weg in ein wertschaffendes Produktionsparadigma.
In: Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration.*
Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 5–37
ISBN 978-3-658-04681-1
- Becker et al. 2012** Becker, Jörg; Probandt, Wolfgang; Vering, Oliver, 2012.
Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung: Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement.
Berlin: Springer Gabler.
BPM kompetent.
ISBN 978-3-642-30411-8

- Beiter et al. 2000** Beiter, Kurt A; Cheldelin, Brent; Ishii, Koshuke, 2000. Assembly Quality Method: A Tool In Aid Of Product Strategy, Design, and Process Improvements. *Proceedings of DETC 2000, ASME Design Engineering Technical Conferences*, S. 1–9
- Beumelburg 2005** Beumelburg, Katharina, 2005. *Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation*, Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss, 2005. Heimsheim: Jost-Jetter. IPA-IAO-Forschung und -Praxis 413. ISBN 3-936947-52-X
- Bi et al. 2018** Bi, Zhuming; Pomalaza-Raez, Carlos; Lehman, Andrew; Dawson, Jeremy; Hershberger, Dustin; Yurek, John; Ball, Jared, 2018. Automated testing of electrical cable harnesses. In: *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, S. 2704–2709 DOI: 10.1109/ICIEA.2018.8398168
- BJB GmbH & Co. KG 2021** BJB GmbH & Co. KG, 2021. *Verdrahten*. Arnsberg. Verfügbar unter: <https://youtu.be/pXBEm9v-P54> Zugriff am: 28.05.2021
- Bogue 2012** Bogue, Robert, 2012. Design for manufacture and assembly: background, capabilities and applications. *Assembly Automation* **32** (2), S. 112–118 DOI: 10.1108/01445151211212262
- Bokranz et al. 2012** Bokranz, Rainer; Landau, Kurt, 2012. *Handbuch Industrial Engineering: Produktivitätsmanagement mit MTM*. 2., überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel. ISBN 9783791028637
- Bongardt 2004** Bongardt, Thomas, 2004. *Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern*, Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2003. München: Utz. Forschungsberichte / IWB 184. ISBN 3-8316-0332-4

- Boothroyd 1994** Boothroyd, Geoffrey, 1994. Product Design for Manufacture and Assembly. *Computer-Aided Design* **26** (7), S. 505–520
DOI: 10.1016/0010-4485(94)90082-5
- Boothroyd 1996** Boothroyd, Geoffrey, 1996. Design for Manufacture and Assembly: The Boothroyd-Dewhurst Experience. In: Huang, George Q. (Hrsg.): *Design for X*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 19–40
ISBN 978-94-010-5762-2
DOI: 10.1007/978-94-011-3985-4_2
- Boothroyd 2005** Boothroyd, Geoffrey, 2005. *Assembly Automation and Product Design*. 2. Auflage. Hoboken: CRC Press. Manufacturing Engineering and Materials Processing. ISBN 978-1-57444-643-2
- Boothroyd Dewhurst, Inc. 2020** Boothroyd Dewhurst, Inc., 2020. *DFMA*. Verfügbar unter: <https://www.dfma.com/>
Zugriff am: 30.03.2020
- Boothroyd et al. 2011** Boothroyd, Geoffrey; Dewhurst, Peter; Knight, Winston A., 2011. *Product Design for Manufacture and Assembly*. Third edition. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Manufacturing Engineering and Materials Processing 74. ISBN 978-1-4200-8927-1
- Brockhaus 2020** Brockhaus, 2020. *Brockhaus*. Verfügbar unter: <https://www.brockhaus.de>
Zugriff am: 17.08.2020
- Busi et al. 2017** Busi, M; Cirillo, A; Gregorio, D. de; Indovini, M; Maria, G. de; Melchiorri, C; Natale, C; Palli, G; Pirozzi, S., 2017. The WIRES Experiment: Tools and Strategies for Robotized Switchgear Cabling. *Procedia Manufacturing* **11**, S. 355–363
DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.118
- Cankut 2011** Cankut, Yavuz, 2011. Kabelbäume automatisiert fertigen. *ATZproduktion* **4** (1), S. 28–31
DOI: 10.1365/s35726-011-0008-1

- Chan et al. 2005** Chan, Vincent; Salustri, Filippo. A., 2005.
DFA: The Lucas Method.
Verfügbar unter: <http://deed.ryerson.ca/~fil/t/dfmlucas.html>
Zugriff am: 27.03.2020
- Chen et al. 2016** Chen, Fei; Cannella, Ferdinando; Huang, Jian; Sasaki, Hironobu; Fukuda, Toshio, 2016. A Study on Error Recovery Search Strategies of Electronic Connector Mating for Robotic Fault-Tolerant Assembly.
Journal of Intelligent & Robotic Systems **81** (2), S. 257–271
DOI: 10.1007/s10846-015-0248-5
- Chiu et al. 2010** Chiu, Ming-Chuan; Okudan, Gül E., 2010.
Evolution of Design for X Tools Applicable to Design Stages: A Literature Review.
In: *Volume 6: 15th Design for Manufacturing and the Lifecycle Conference; 7th Symposium on International Design and Design Education*, Montreal, Quebec, Canada, 15.08.2010 - 18.08.2010, S. 171–182
DOI: 10.1115/DETC2010-29091
- Daimler AG 2021a** Daimler AG, 2021.
Kennzahlen.
Verfügbar unter:
<https://www.daimler.com/investoren/kennzahlen/geschaefts-felder/pkw-absatz/>
Zugriff am: 12.01.2022
- Daimler AG 2021b** Daimler AG, 2021.
CASE - Intuitive Mobilität.
Verfügbar unter: <https://www.daimler.com/case/>
Zugriff am: 19.03.2021
- Dankert et al. 2013** Dankert, Jürgen; Dankert, Helga, 2013.
Technische Mechanik: Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik.
Wiesbaden: Springer Fachmedien.
ISBN 978-3-8348-1809-6
DOI: 10.1007/978-3-8348-2235-2
- DE 10 2019 005 933 A1 2020** Daimler AG, 2020.
Verfahren und Vorrichtung zum Umwickeln eines Leitungssatzes für einen Kraftwagen mit einem Klebeband.
DE 10 2019 005 933 A1 2020.02.27,
27.02.2020
- DE 102015108365 A1 2015** Lisa Dräxlmaier GmbH, 2016.
Bandagierter Leitungssatz und Verfahren für dessen Herstellung.
DE 102015108365 A1,
01.12.2016

- DE 102016117711 A1 2016** Lisa Dräxlmaier GmbH, 2018.
Verfahren zum Herstellen von Kabelanordnungen mittels eines Roboters, Wickelvorrichtung und Verlegeroboter.
DE 102016117711 A1,
22.03.2018
- DE102013205509A1 2013** S-Y Systems Technologies Europe GmbH, 2014.
Vorrichtung zum Umwickeln eines Kabelbaums.
DE102013205509A1,
02.10.2014
- DE102016123976B3 2016** Kromberg & Schubert GmbH, 2018.
Kabelbaumfertigung und Einrichtung zur Kabelbaumfertigung.
DE102016123976B3,
14.06.2018
- Denecke et al. 2021** Denecke, Julia; Jauch, Christian, 2021.
Bewegungsanalyse zur Qualitätssicherung.
Stuttgart.
Verfügbar unter:
<https://www.ipa.fraunhofer.de/de/Kompetenzen/bild--und-signalverarbeitung/szenenanalyse/bewegungsanalyse-zur-qualitaetssicherung.html>
Zugriff am: 28.05.2021
- DENSO 2020** DENSO, 2020.
DENSO Robotics: General Product Catalog.
Verfügbar unter: https://www.denso-wave.com/dl/en/robot/download/brochure/index_1/Robotics+Brochure_E.html
Zugriff am: 06.11.2020
- Desai et al. 2010** Desai, Anoop; Mital, Anil, 2010. Facilitating Design for Assembly Through the Adoption of a Comprehensive Design Methodology.
International Journal of Industrial Engineering **17** (2), S. 92–102
- Deutschländer 1989** Deutschländer, Arthur, 1989.
Integrierte rechnerunterstützte Montageplanung.
München: Hanser.
Produktionstechnik - Berlin 72.
Berlin, Techn. Univ., Diss., 1989.
ISBN 3446157794
- DIN 8580 2003** DIN 8580:2003-09-00.
Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.

- DIN 8593-0 2003** DIN 8593-0:2003-09-00.
Fertigungsverfahren Fügen: Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- DIN 8593-1 2003** DIN 8593-1:2003-09-00.
Fertigungsverfahren Fügen: Teil 1: Zusammensetzen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- DIN EN ISO 10209 2012** DIN EN ISO 10209:2012-09.
Technische Produktdokumentation - Vokabular: Begriffe für technische Zeichnungen, Produktdefinition und verwandte Dokumentation
- DIN EN ISO 10218-1 2012** DIN EN ISO 10218-1:2012-01.
Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen: Teil 1: Roboter
- DIN IEC 60060-351 2014** DIN IEC 60060-351:2014-09.
Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013).
- Drossel et al. 2017** Drossel, Welf-Guntram; Ihlenfeldt, Steffen; Langer, Tino; Dumitrescu, Roman, 2017.
Cyber-Physische Systeme: Forschen für die digitale Fabrik. In: Neugebauer, Reimund (Hrsg.): *Digitalisierung*. Berlin, Heidelberg: Vieweg, S. 197–222
ISBN 978-3-662-55889-8
- Druhm et al. 2018** Druhm, Oliver; Gall, Martin; Scheidhammer, Georg, 2018.
Umdenken: Funktionale Sicherheit benötigt eine neue Prozessorganisation.
ATZ elektronik **13**, S. 56–61
Verfügbar unter:
https://www.draexlmaier.com/fileadmin/Group/Press/Publications/Fachartikel_ATZelektronik_Funktionale_Sicherheit.pdf
- Duden 2020** Duden, 2020.
Duden.
Verfügbar unter: <https://www.duden.de>
Zugriff am: 07.06.2020
- Duenser et al. 2018** Duenser, Simon; Bern, James M; Poranne, Roi; Coros, Stelian, 2018.
Interactive Robotic Manipulation of Elastic Objects.
In: *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Madrid, Spain,
01.10.2018-05.10.2018, S. 3476–3481
DOI: 10.1109/IROS.2018.8594291

- Elemér et al. 2002** Elemér, Fejes; Höhne, Günther; Tibor, Bercsey, 2002. Anwendung des AEM Verfahrens in der Produktentwicklung.
In: Meerkamm, Harald (Hrsg.): *Design for X: Beiträge zum 13. Symposium, Neukirchen, 10. und 11. Oktober 2002*. Erlangen: Lehrstuhl für Konstruktionstechnik Univ. Erlangen-Nürnberg, S. 155–162
ISBN 398085390X
- Emmerich 1992** Emmerich, Herbert H., 1992. *Flexible Montage von Leitungssätzen mit Industrierobotern*. Berlin, Heidelberg: Springer.
IPA-IAO Forschung und Praxis 160.
ISBN 978-3-642-47947-2
DOI: 10.1007/978-3-642-47947-2
- Erlach 2001** Erlach, Klaus, 2001. Eine Kritik der poiëtischen Vernunft: Anmerkungen zur Wissenschaftstheorie vom technischen Gestalten.
Journal for General Philosophy of Science / Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie **1** (32), S. 1–25
- Ernst et al. 2014** Ernst, Markus; Heuermann, Markus, 2014. Die wichtigsten Bordnetz-Trends.
Elektronik automotive **14** (Sonderheft Bordnetz), S. 20–23
- Eskilander 2001** Eskilander, Stephan, 2001. *Design for Automatic Assembly: A Method for product design: DFA2*. Schweden, Stockholm, KTH Royal Institute of Technology, Department of Production Engineering, Dissertation
- Esterman et al. 2010** Esterman, Marcos jr; Gujja, Raghava; Proano, Ruben; Kamath, Krishna; Carrano, Andres, 2010. Design for assembly line performance: The link between DFA metrics and assembly line performance metrics.
Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference **6**, S. 73–84
- Ezpeleta et al. 2019** Ezpeleta, Iñigo; Justel, Daniel; Bereau, Unai; Zubelzu, Julen, 2019. DFA-SPDP, a new DFA method to improve the assembly during all the product development phases.
Procedia CIRP **84**, S. 673–679
DOI: 10.1016/j.procir.2019.04.273

- Fahantidis et al. 2000** Fahantidis, N; Doulgeri, Z., 2000.
A gripper for grasping non-rigid material pieces out of a bundle.
In: *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Takamatsu, Japan,
31.10.2000.-5.11. 2000, S. 2145–2150
DOI: 10.1109/IROS.2000.895288
- Fantoni et al. 2014** Fantoni, Gualtiero; Santochi, Marco; Dini, Gino; Tracht, Kirsten; Scholz-Reiter, Bernd; Fleischer, Juergen; Kristoffer Lien, Terje; Seliger, Guenther; Reinhart, Gunther; Franke, Joerg; Nørgaard Hansen, Hans; Verl, Alexander, 2014.
Grasping devices and methods in automated production processes.
In: *CIRP Annals 2014*, S. 679–701
DOI: 10.1016/j.cirp.2014.05.006
- FANUC 2020** FANUC, 2020.
FANUC: Roboter Produktübersicht.
Verfügbar unter:
<https://de.industryarena.com/fanuc/dokumente/fanuc-roboter-produktuebersicht--1487.html#>
Zugriff am: 06.11.2020
- Fechter et al. 2019** Fechter, Manuel; Neb, Alexander, 2019. From 3D product data to hybrid assembly workplace generation using the AutomationML exchange file format.
Procedia CIRP **81**, S. 57–62
DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.011
- Fleischmann et al. 2018** Fleischmann, Albert; Oppl, Stefan; Schmidt, Werner; Stary, Christian, 2018.
Ganzheitliche Digitalisierung von Prozessen.
Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
ISBN 978-3-658-22647-3
DOI: 10.1007/978-3-658-22648-0
- Frankenhauser 1985** Frankenhauser, Bruno, 1985. Montage biegeschlaffer Teile mit sensorgeführtem Industrieroboter.
HGF-Kurzberichte (85/66), S. 23–24
- Friedrichs 1990** Friedrichs, Jürgen, 1990.
Methoden empirischer Sozialforschung.
14. Auflage.
Wiesbaden, s.l.: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
WV studium.
ISBN 978-3-531-90173-2
DOI: 10.1007/978-3-531-90173-2

- Fritz Dräxlmaier 2020** Fritz Dräxlmaier, 2020.
Unsere Standorte.
Vilsbiburg.
Verfügbar unter:
<https://www.draexlmaier.com/unternehmen/produktionsnetzwerk/>
Zugriff am: 30.01.2020
- Gairola 1981** Gairola, Arun, 1981.
Einführung in das montagegerechte Konstruieren,
Technische Hochschule Darmstadt, Institut für
Elektromechanische Konstruktionen.
Darmstadt, TH. Diss., 1981
- Gatenby et al. 1990** Gatenby, David A; Foo, George, 1990. Design for X (DFX):
Key to competitive, profitable products.
AT & T Technical Journal **May/June**, S. 2–13
- Götz 1991** Götz, Robert, 1991.
*Strukturierte Planung flexibel automatisierter
Montagesysteme für flächige Bauteile.*
Berlin, Heidelberg: Springer.
iwb Forschungsberichte, Berichte aus dem Institut für
Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der
Technischen Universität München 39.
ISBN 978-3-540-54401-2
DOI: 10.1007/978-3-662-10128-5
- Gregorio et al. 2018** Gregorio, Daniele de; Zanella, Riccardo; Palli, Gianluca;
Pirozzi, Salvatore; Melchiorri, Claudio, 2018. Integration of
Robotic Vision and Tactile Sensing for Wire-Terminal
Insertion Tasks.
IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,
S. 1–14
DOI: 10.1109/TASE.2018.2847222
- Hammer 2018** Hammer, Hartmut, 2018. Architekten des autonomen
Fahrens.
automobil industrie **30** (8), S. 50–51
- Heinrich et al. 2015** Heinrich, Berthold; Linke, Petra; Glöckler, Michael, 2015.
*Grundlagen Automatisierung: Sensorik, Regelung,
Steuerung.*
Wiesbaden: Springer Vieweg.
ISBN 978-3-658-05960-6
Verfügbar unter: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-05961-3>
DOI: 10.1007/978-3-658-05961-3

- Heisler et al. 2017a** Heisler, Paul; Höble, Stefan; Franke, Jörg, 2017.
Increasing the Automation Degree in Wiring Harness Assembly by Extending the Standard Crimping Machines by Developed Assembly Concept.
In: *Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production III*, S. 262–266
- Heisler et al. 2017b** Heisler, Paul; Steinmetz, Patrick; Yoo, In Seong; Franke, Jörg, 2017.
Automatization of the Cable-Routing-Process within the Automated Production of Wiring Systems.
In: *Energy Efficiency in Strategy of Sustainable Production III*, S. 186–192
- Heisler et al. 2020** Heisler, Paul; Kuhn, Marlene; Süß-Wolf, Robert; Franke, Jörg, 2020.
Innovative Solutions for the Covering Process in the Manufacturing of Wire Harnesses to Increase the Automation Degree.
In: *2020 IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)*, Cape town, South Africa, 20.01.2020 - 22.01.2020, S. 193–201
DOI: 10.1109/ICMIMT49010.2020.9041165
- HellermannTyton GmbH 2020** HellermannTyton GmbH, 2020.
Cable tie guns for optimal tensioning and smooth cutting of cable ties.
Tornesch.
Verfügbar unter:
<https://www.hellermanntyton.com/competences/cable-tie-guns>
Zugriff am: 22.02.2020
- Hermansson et al. 2013** Hermansson, Tomas; Bohlin, Robert; Carlson, Johan S; Söderberg, Rikard, 2013. Automatic assembly path planning for wiring harness installations.
Journal of Manufacturing Systems **32** (3), S. 417–422
DOI: 10.1016/j.jmsy.2013.04.006
- Hesse 2012a** Hesse, Stefan, 2012.
Automatische Montagemaschinen.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. 2. Aufl. 2013.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 195–272
ISBN 978-3-642-29060-2

- Hesse 2012b** Hesse, Stefan, 2012.
Montagegerechte Produktgestaltung.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis*. 2. Aufl. 2013.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 9–48
ISBN 978-3-642-29060-2
- Hesse et al. 2016** Hesse, Stefan; Almansa, Ana, 2016.
Montageautomatisierung.
In: Hesse, Stefan; Malisa, Viktorio (Hrsg.): *Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung*.
München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, S. 529–606
ISBN 978-3-446-44365-5
- Heurung 2016** Heurung, Thomas, 2016. Kostenfaktor Kabelbaum: Entwicklung von Bordnetzen im autonomen Fahrzeug. *automobil elektronik* **14** (9-10), S. 32–35
Verfügbar unter: https://www.automobil-elektronik.de/wp-content/uploads/sites/7/2016/11/AEL_9_10_16_Internet.pdf
- Heyn 1999** Heyn, Markus, 1999.
Methodik zur schnittstellenorientierten Gestaltung von Entwicklungskooperationen.
Als Ms. gedr.
Aachen: Shaker.
Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 99,6.
Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1998.
ISBN 3826547071
- Hinckley 2001** Hinckley, C. Martin, 2001.
Make no mistake: An outcome-based approach to mistake-proofing.
Boca Raton, FL: CRC Press.
ISBN 156327227x
Verfügbar unter:
<http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0801/2001031736-d.html>
- Hinze et al. 2020** Hinze, Christoph; Zürn, Manuel; Wnuk, Markus; Lechler, Armin; Verl, Alexander, 2020.
Nonlinear Trajectory Control for Deformable Linear Objects based on Physics Simulation.
In: *Proceedings of the IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Singapore, 19.10.2020 - 21.10.2020, S. 310–316

- Hirai 2000** Hirai, Shinichi, 2000.
Energy -Based Modeling of Deformable Linear Objects.
In: Henrich, Dominik; Wörn, Heinz (Hrsg.): *Robot Manipulation of Deformable Objects*.
London: Springer, S. 11–27
ISBN 978-1-4471-1193-1
- Hold 2018** Hold, Klaus, 2018. Tradition und Moderne:
Innovationstreiber für eine zunehmend automatisierte
Fertigung von automobilen Bordnetz-Systemen.
industrielle automation (2), S. 38–39
Verfügbar unter: <https://digital.industrielle-automation.net/industrielle-automation-2-2018/59981092>
- Hölzl 1985** Hölzl, Peter, 1985.
Montage · Handhabung · Industrieroboter: Automatisierung
der Kabelbaumfertigung mit Industrierobotern.
In: Warnecke, H. J; Bullinger, H.-J (Hrsg.): *IPA-IAO
Forschung und Praxis: Berichte aus dem Fraunhofer-Institut
für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
Stuttgart, Fraunhofer Institut für Arbeitswissenschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart und Institut für Industrielle
Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart*:
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, S. 189–193
DOI: 10.1007/978-3-662-30428-0
- Hoßmann 1992** Hoßmann, Jürgen, 1992.
*Methodik zur Planung der automatischen Montage von
nicht formstabilen Bauteilen*.
Berlin, Heidelberg: Springer.
Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und
Betriebswissenschaften der Technischen Universität
München 43.
München, Tech. Univ., Diss., 1992.
ISBN 978-3-540-55220-8
DOI: 10.1007/978-3-662-08720-6
- Huang 1996** Huang, George Q., 1996.
Introduction.
In: Huang, George Q. (Hrsg.): *Design for X*.
Dordrecht: Springer Netherlands, S. 1–17
ISBN 978-94-010-5762-2
- Ibáñez et al. 2021** Ibáñez, Román V; Pujol, F. A; Ortega, García S; Perpiñán,
Sanz J. M., 2021. Collaborative robotics in wire harnesses
spot taping process.
Computers in Industry **125**, S. 103370
DOI: 10.1016/j.compind.2020.103370

- Janouch 2011** Janouch, Stephan, 2011.
Nichts geht ohne Kabel: Interview mit dem Leoni-Vorstandsvorsitzenden Dr. Klaus Probst.
Verfügbar unter:
<http://www.elektroniknet.de/automotive/sonstiges/artikel/82538/1/>
Zugriff am: 29.11.2018
- Jiang et al. 2010** Jiang, Xin; Koo, Kyong-mo; Kikuchi, Kohei; Konno, A; Uchiyama, M., 2010.
Robotized assembly of a wire harness in car production line.
In: *2010 IEEE/RSJ International Conference 2010*, S. 490–495
DOI: 10.1109/IROS.2010.5653133
- Jiang et al. 2015** Jiang, Xin; Nagaoka, Yuki; Ishii, Kazushi; Abiko, Satoko; Tsujita, Teppei; Uchiyama, Masaru, 2015. Robotized recognition of a wire harness utilizing tracing operation.
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **34**, S. 52–61
DOI: 10.1016/j.rcim.2014.12.002
- Jiménez 2012** Jiménez, P., 2012. Survey on model-based manipulation planning of deformable objects.
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **28** (2), S. 154–163
DOI: 10.1016/j.rcim.2011.08.002
- Kabatec GmbH & Co. KG 2020** Kabatec GmbH & Co. KG, 2020.
Bandagieren.
Burghaun.
Verfügbar unter: <https://www.kabatec.com/index.php/en/>
Zugriff am: 22.02.2020
- Kim 2005** Kim, J. Y., 2005. Vision-Based Measurement of Part Deformation and Misalignment for Deformable Cylindrical Peg-in-Hole Tasks.
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science **219** (6), S. 589–606
DOI: 10.1243/095440605X17054
- Klein 2019** Klein, Christian, 2019. O Kabelbaum ...: Ein Mehr an Elektronik in neuen Autos führt zu komplexeren Bordnetzen, „gestrickt“ aus immer mehr Kabeln. Lösungen, die Kabelbaumfertigung zu automatisieren, sind noch immer rar.
AUTOMOBIL-Produktion (5), S. 60–61

- Klein et al. 2008** Klein, B; Sanzenbacher, G., 2008. Kostenreserven ausschöpfen durch produktionsgerechte Konstruktion (ProKon). *Konstruktion* **60** (4), S. 83–93
- Kobayashi et al. 2014** Kobayashi, Masakazu; Hirano, Yoshiya; Higashi, Masatake, 2014. Optimization of Assembly Processes of an Automobile Wire Harness. *Computer-Aided Design and Applications* **11** (3), S. 305–311
DOI: 10.1080/16864360.2014.863500
- Komax Holding AG 2020** Komax Holding AG, 2020. *Sigma 688 ST*. Dierikon. Verfügbar unter: <https://www.komaxgroup.com/de-DE/Products-and-Solutions/Products/Twister/Sigma-688-ST/> Zugriff am: 22.02.2020
- Koo et al. 2008** Koo, Kyongmo; Jiang, Xin; Kikuchi, Kohei; Konno, Atsushi; Uchiyama, Masaru, 2008. Development of a robot car wiring system. In: *Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Xi'an, China*, 02.07.2008-05.07.2008, S. 862–867
DOI: 10.1109/AIM.2008.4601774
- Koo et al. 2010** Koo, Kyongmo; Jiang, Xin; Konno, Atsushi; Uchiyama, Masaru, 2010. Clamp grasping and insertion task automation for automobile industry. In: *Proceedings of the 2010 IEEE/SICE International Symposium 2010*. Piscataway: IEEE, S. 293–298
DOI: 10.1109/SII.2010.5708341
- Kraftfahrt-Bundesamt 2021** Kraftfahrt-Bundesamt, 2021. *Neuzulassungen von Personenkraftwagen nach Marken und Modellreihen 2021*. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz10/fz10_gentab.html Zugriff am: 12.01.2022
- Kuffner et al. 2016** Kuffner, James; Xiao, Jing, 2016. Motion for Manipulation Tasks. In: Siciliano, Bruno; Khatib, Oussama (Hrsg.): *Springer Handbook of Robotics*. Cham: Springer International Publishing, S. 897–930
ISBN 978-3-319-32550-7

- Kuhn et al. 2019** Kuhn, Marlene; Nguyen Huong, 2019.
The Future of Harness Development and Manufacturing: Results from an Expert Case Study
- KUKA 2020** KUKA, 2020.
Industrieroboter von KUKA.
Verfügbar unter: <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter>
Zugriff am: 06.11.2020
- Latombe 1991** Latombe, Jean-Claude, 1991.
Robot Motion Planning.
Boston, MA: Springer US.
ISBN 978-0-7923-9206-4
DOI: 10.1007/978-1-4615-4022-9
- Laufenberg 1996** Laufenberg, Ludger, 1996.
Methodik zur integrierten Projektgestaltung für die situative Umsetzung des simultaneous engineering.
Als Ms. gedr.
Aachen: Shaker.
Berichte aus der Produktionstechnik 96,9.
Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1995.
ISBN 3826514858
- Leaney 1996** Leaney, Paul. G., 1996.
Case Experience with Design for Assembly Methods.
In: Huang, George Q. (Hrsg.): *Design for X.*
Dordrecht: Springer Netherlands, S. 41–71
ISBN 978-94-010-5762-2
- Leaney et al. 1992** Leaney, Paul. G; Wittenberg, Gunther, 1992. Design for Assembling: The Evaluation Methods of Hitachi, Boothroyd and Lucas.
Assembly Automation **12** (2), S. 8–17
- LEONI AG 2020** LEONI AG, 2020.
Standorte der LEONI-Gruppe.
Nürnberg.
Verfügbar unter:
<https://www.leoni.com/de/unternehmen/standorte/>
Zugriff am: 30.01.2020
- Liebsch et al. 2017** Liebsch, Alexander; Kupfer, Robert; Defranceski, Aline; Rösler, B; Janik, J; Gude, Maik, 2017. Automated Preforming of Braided Hoses Made of Thermoplast-glass Fiber Hybrid Yarns.
Procedia CIRP **66**, S. 57–61
DOI: 10.1016/j.procir.2017.03.299

- Lotter 1992** Lotter, Bruno, 1992.
Wirtschaftliche Montage: Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik.
2., erw. Aufl.
Düsseldorf: VDI-Verl.
ISBN 3184011682
- Lotter 2012a** Lotter, Bruno, 2012.
Einführung.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis.*
2. Aufl. 2013.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1–8
ISBN 978-3-642-29060-2
- Lotter 2012b** Lotter, Bruno, 2012.
Die Primär-Sekundär-Analyse.
In: Lotter, Bruno; Wiendahl, Hans-Peter (Hrsg.): *Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis.*
2. Aufl. 2013.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 49–78
ISBN 978-3-642-29060-2
- Lotter et al. 2016** Lotter, Bruno; Deuse, Jochen; Lotter, Edwin, 2016.
Die Primäre Produktion.
Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 978-3-662-53211-9
DOI: 10.1007/978-3-662-53212-6
- Lv et al. 2017** Lv, Naijing; Liu, Jianhua; Ding, Xiaoyu; Lin, Haili, 2017.
Assembly simulation of multi-branch cables.
Journal of Manufacturing Systems **45**, S. 201–211
DOI: 10.1016/j.jmsy.2017.09.007
- Milberg et al. 1986** Milberg, Joachim; Diess, Herbert; Warnecke, Hans-Jürgen, 1986.
The Automated Assembly of Dimensionally Instable Parts.
In: *CIRP Annals*, S. 11–15
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)61828-9
- Miles 1989** Miles, Brian L., 1989. Design for Assembly—A Key Element within Design for Manufacture.
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering **203** (1), S. 29–38
DOI: 10.1243/PIME_PROC_1989_203_145_02
- Miles 1990** Miles, Brian, 1990. Design for Manufacture Techniques Help the Team Make Early Decisions.
Journal of Engineering Design **1** (4), S. 365–371
DOI: 10.1080/09544829008901664

- Miyakawa et al. 1990** Miyakawa, Seii; Ohashi, Toshijiro; Iwata, Minoru, 1990. The Hitachi New Assemblability Evaluation Method (AEM). In: *Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME 1990*, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania, May 23 - 25, S. 352–359
- MTM-Vereinigung e. V. 2014** MTM-Vereinigung e. V., 2014. *ProKon: Lehrgangsunterlage B/AD*. Hamburg: Deutsche MTM-Vereinigung e. V.
- Nägele 2019** Nägele, Frank, 2019. *Motek 2019 – Lösungen für die Montageautomatisierung mit Robotern*. Verfügbar unter: <https://www.innovations-report.de/html/berichte/messenachrichten/motek-2019-loesungen-fuer-die-montageautomatisierung-mit-robotern.html>
Zugriff am: 22.06.2020
- Nakagaki et al. 1996** Nakagaki, Hirofumi; Kitagi, Kkosei; Ogasawara, Tsukasa; Tsukune, Hideo, 1996. Study of insertion task of a flexible wire into a hole by using visual tracking observed by stereo vision. In: *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, USA, 22-28 April 1996, S. 3209–3214
DOI: 10.1109/ROBOT.1996.509201
- Neb 2020** Neb, Alexander (Hrsg.), 2020. *Automatisierungspotenziale: Mit der APA-App zum Expertenwissen*. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=vaMVduTB7b4>
Zugriff am: 22.06.2020
- Neb et al. 2020** Neb, Alexander; Hitzer, Julian, 2020. Automatic generation of assembly graphs based on 3D models and assembly features. *Procedia CIRP* **88**, S. 70–75
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.013
- Neb et al. 2021** Neb, Alexander; Göke, Joshua, 2021. Generation of assembly restrictions and evaluation of assembly criteria from 3D assembly models by collision analysis. *Procedia CIRP* **97**, S. 33–38
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.201

- Nguyen et al. 2021** Nguyen, Huong Giang; Kuhn, Marlene; Franke, Jörg, 2021. Manufacturing automation for automotive wiring harnesses.
Procedia CIRP **97**, S. 379–384
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.254
- Ohashi et al. 2002** Ohashi, Toshijiro; Iwata, Minoru; Arimoto, Shoji; Miyakawa, Seii, 2002. Extended Assemblability Evaluation Method (AEM): Extended Quantitative Assembly Producibility Evaluation for Assembled Parts and Products.
JSME Int. J. Ser. C **45** (2), S. 567–574
- OICA 2020** OICA, 2020.
2018 Production statistics.
Paris.
Verfügbar unter: <http://www.oica.net/category/production-statistics/2017-statistics/>
Zugriff am: 23.02.2020
- Palomba et al. 2021** Palomba, Ilaria; Gualtieri, Luca; Rojas, Rafael; Rauch, Erwin; Vidoni, Renato; Ghedin, Andrea, 2021. Mechatronic Re-Design of a Manual Assembly Workstation into a Collaborative One for Wire Harness Assemblies.
Robotics **10** (43), S. 1–20
DOI: 10.3390/robotics10010043
- Patzak 1982** Patzak, Gerold, 1982.
Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme: Grundlagen, Methoden, Techniken.
Berlin: Springer.
ISBN 3540117830
- Popper 1999** Popper, Karl R., 1999.
Logik der Forschung (1935).
In: Gadenne, Volker (Hrsg.): *Wissenschaftsphilosophie*.
1. Aufl.
Freiburg: Alber, S. 87–102
ISBN 978-3-495-48005-2
- Quispe et al. 2015** Quispe, Ana Huaman; Milville, Benoit; Gutierrez, Marco A; Erdogan, Can; Stilman, Mike; Christensen, Henrik; Amor, Heni Ben, 2015.
Exploiting symmetries and extrusions for grasping household objects.
In: *Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Seattle, WA, USA, 26.05.2015 - 30.05.2015, S. 3702–3708
DOI: 10.1109/ICRA.2015.7139713

- Raithel 2008** Raithel, Jürgen, 2008.
Quantitative Forschung: Ein Praxiskurs.
2., durchgesehene Auflage.
Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
Lehrbuch.
ISBN 9783531161815
- Reif 2011** Reif, Konrad, 2011.
Bosch Autoelektrik und Autoelektronik: Bordnetze, Sensoren und elektronische Systeme; mit 43 Tab.
6., überarbeitete und erweiterte Auflage.
Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
Bosch Fachinformation Automobil.
ISBN 978-3-8348-1274-2
- Reif 2014** Reif, Konrad, 2014.
Automobilelektronik: Eine Einführung für Ingenieure.
5., überarb. Aufl.
Wiesbaden: Springer Vieweg.
ATZ-MTZ-Fachbuch.
ISBN 978-3-658-05047-4
- Reiff-Stephan 2005** Reiff-Stephan, Jörg, 2005. Greifer für biegeschlaffe Materialien.
A&D Kompendium, S. 282–284
- Reinhart 1988** Reinhart, Gunther, 1988.
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze.
Berlin, Heidelberg: Springer.
Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München 12.
ISBN 978-3-540-19003-5
DOI: 10.1007/978-3-662-07252-3
- Reinhart 2014** Reinhart, Gunther, 2014.
Assembly Automation.
In: Laperrière, Luc; Reinhart, Gunther (Hrsg.): *CIRP Encyclopedia of Production Engineering.*
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 52–54
ISBN 978-3-642-20616-0
DOI: 10.1007/978-3-642-20617-7_6617
- RITTAL GmbH & Co. KG 2017** RITTAL GmbH & Co. KG, 2017.
Averex Verdrahtungszentren.
Herborn.
Verfügbar unter: https://www.rittal.com/imf/none/5_1643/
Zugriff am: 28.05.2021

- RNA Automation Ltd 2017** RNA Automation Ltd, 2017.
Six Axis Robot Clipping & Welding System.
Birmingham.
Verfügbar unter: <https://www.rnaautomation.com/blog/six-axis-robot-clipping-welding-system/>
Zugriff am: 28.05.2021
- Robert Bosch GmbH 2010** Robert Bosch GmbH, 2010.
MTM-1 Das MTM-Grundverfahren: IE/IMZ001
Lehrgangsunterlage.
Stuttgart: Robert Bosch GmbH
- Ropohl 2009** Ropohl, Günter, 2009.
Signaturen der technischen Welt: Neue Beiträge zur
Technikphilosophie.
Berlin: Lit.
Technikphilosophie 20.
ISBN 9783643104656
- Ross 2002** Ross, Paul, 2002.
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades
von Montageprozessen in der frühen Phase der
Montageplanung, Zugl.: München, Techn. Univ., Diss.,
2002.
München: Utz.
Forschungsbericht / IWB 170.
ISBN 3-8316-0191-7
- Sanchez et al. 2018** Sanchez, Jose; Corrales, Juan-Antonio; Bouzgarrou,
Belhassen-Chedli; Mezouar, Youcef, 2018. Robotic
manipulation and sensing of deformable objects in domestic
and industrial applications: a survey.
The International Journal of Robotics Research **37** (7), S.
688–716
DOI: 10.1177/0278364918779698
- Scheinman et al. 2016** Scheinman, Victor; McCarthy, J. Michael; Song, Jae-Bok,
2016.
Mechanism and Actuation.
In: Siciliano, Bruno; Khatib, Oussama (Hrsg.): *Springer*
Handbook of Robotics.
Cham: Springer International Publishing, S. 67–90
ISBN 978-3-319-32550-7
- Schlaich 1988** Schlaich, Gerd, 1988.
Kabelbaumontage mit Industrierobotern.
Berlin, Heidelberg: Springer.
IPA-IAO - Forschung und Praxis 118.
Stuttgart, Univ., Diss., 1988.
ISBN 978-3-642-83490-5
DOI: 10.1007/978-3-642-83490-5

- Schmitt 1999** Schmitt, Peter, 1999.
Flexibel automatisiertes Bandagieren von Leitungssätzen.
Heimsheim: Jost-Jetter.
IPA-IAO-Forschung und -Praxis Nr. 295.
ISBN 3931388093
- Schneider 1999** Schneider, Burghard, 1999.
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile.
München: Utz.
Forschungsberichte / IWB 122.
München, Techn. Univ., Diss., 1999.
ISBN 3896755595
- Schröter et al. 2016** Schröter, D; Kuhlang, P; Finsterbusch, T; Kuhrke, B; Verl, A., 2016.
Introducing Process Building Blocks for Designing Human Robot Interaction Work Systems and Calculating Accurate Cycle Times.
In: *6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS)*, Gothenburg, Sweden.,
16.05.2019-18-05-2018, S. 216–221
DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.038
- Sealy et al. 1992** Sealy, M; Corns, S., 1992.
Lucas Design for Assembly method applied at Hawker Siddeley Switchgear.
In: *IEE Seminar on Team Based Techniques Design to Manufacture*, 5/1-5/7
- Seliger et al. 2003** Seliger, G; Szimmat, F; Niemeier, J; Stephan, J., 2003.
Automated Handling of Non-Rigid Parts.
In: *CIRP Annals*, S. 21–24
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60521-6
- Shah et al. 2016** Shah, Ankit J; Shah, Julie A., 2016.
Towards manipulation planning for multiple interlinked deformable linear objects.
In: *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Stockholm, Sweden, May 16th-21st*, Stockholm, Sweden,
5/16/2016 - 5/21/2016, S. 3908–3915
DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487580
- Shah et al. 2018** Shah, Ankit; Blumberg, Lotta; Shah, Julie, 2018. Planning for manipulation of interlinked deformable linear objects with applications to aircraft assembly.
IEEE Transactions on Automation Science and Engineering **15** (4), S. 1823–1838
DOI: 10.1109/TASE.2018.2811626

- Sharma et al. 2018** Sharma, Prateek; Sharma, Meeta, 2018.
Improving Assembly Line Efficiency and Output Using
Assembly Line Balancing and Reducing Non-Value-Added
Activities.
In: Singh, Sanjay; Raj, Pushkar; Tambe, Samir (Hrsg.):
*Proceedings of the International Conference on Modern
Research in Aerospace Engineering*.
Singapore: Springer Singapore, S. 333–339
ISBN 978-981-10-5848-6
DOI: 10.1007/978-981-10-5849-3_32
- Shenzhen Tech. Co., Ltd. 2018** Shenzhen Tech. Co., Ltd., 2018.
*SWT25100HC Auto cable tie gun with 6 axis robot in
Continental*.
Shenzhen.
Verfügbar unter:
<https://www.youtube.com/watch?v=6hT81Tgrf08&t=28s>
Zugriff am: 28.05.2021
- Shimada et al. 1992** Shimada, J; Miyakawa, Seii; Ohashi, Toshijiro, 1992.
Design for manufacture, tools and methods: - the
Assemblability Evaluation Method (AEM).
In: *XXIV FISITA Congress*, London,
7-11 June, S. 53–59
- Song et al. 2017** Song, Hee-Chan; Kim, Young-Loul; Lee, Dong-Hyeong;
Song, Jae-Bok, 2017. Electric connector assembly based on
vision and impedance control using cable connector-feeding
system.
Journal of Mechanical Science and Technology **31** (12), S.
5997–6003
DOI: 10.1007/s12206-017-1144-7
- Spahr 2017** Spahr, Michael, 2017.
*Automatisierte Kontaktierungsverfahren für
flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme*.
Erlangen-Nürnberg: Meisenbach KG.
Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik 305.
ISBN 978-3-87525-432-7
- Spenrath 2021** Spenrath, Felix, 2021.
*Griff in die Kiste Software BP3™ – Roboterlösungen für die
Bauteilzuführung*.
Stuttgart.
Verfügbar unter: <http://www.ipa.fraunhofer.de/binpicking>
Zugriff am: 28.05.2021
- Spingler et al. 2002** Spingler, Jochen; Beumelburg, Katharina, 2002.
Automatisierungspotential-Analyse.
wt Werkstattstechnik online **92** (3), S. 62–64

- Stachowiak 1973** Stachowiak, Herbert, 1973.
Allgemeine Modelltheorie.
Wien: Springer.
ISBN 3-211-81106-0
- Stäubli 2020** Stäubli, 2020.
Stäubli: Produktübersicht.
Verfügbar unter:
<https://www.staubli.com/de/file/7985.show>
Zugriff am: 06.11.2020
- Steegmüller et al. 2017** Steegmüller, Dieter; Zürn, Michael, 2017.
Wandlungsfähige Produktionssysteme für den
Automobilbau der Zukunft.
In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel,
Michael ten (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd. 1:
Produktion.*
2.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 27–44
ISBN 978-3-662-45278-3
- Stokes 1997** Stokes, Donald E., 1997.
*Pasteur's quadrant: Basic science and technological
innovation.*
Washington, D.C.: Brookings Institution Press.
ISBN 0815781776
- Sturges 1989** Sturges, Robert H., 1989. A quantification of manual
dexterity: the design for an assembly calculator.
Robotics and Computer-Integrated Manufacturing **6** (3), S.
237–252
DOI: 10.1016/0736-5845(89)90044-6
- Sturges et al. 1992** Sturges, Robert H; Kilani, M. I., 1992. Towards an
integrated design for an assembly evaluation and reasoning
system.
Computer-Aided Design **24** (2), S. 67–79
DOI: 10.1016/0010-4485(92)90001-Q
- Süß-Wolf et al. 2014** Süß-Wolf, Robert; Glück, Walter; Müller, Toni, 2014.
Bordnetzmontage.
In: Feldmann, Klaus; Schöppner, Volker; Spur, Günter
(Hrsg.): *Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren.*
2., vollständig neu bearbeitete Auflage.
München: Hanser, S. 514–525
ISBN 9783446436565
- Swift 1989** Swift, Ken, 1989. Expert system aids design for assembly.
Assembly Automation **9** (3), S. 132–136

- Syska 2006** Syska, Andreas, 2006.
Produktionsmanagement.
1. Aufl.
Wiesbaden: Gabler Verlag.
ISBN 978-3-8349-9091-4
- System Automazione Srl 2021** System Automazione Srl, 2021.
SYNDY.
Visano.
Verfügbar unter:
<https://www.systemrobot.it/download?id=21>
Zugriff am: 28.05.2021
- Tamada et al. 2013** Tamada, Tomoki; Yamakawa, Yuji; Senoo, Taku; Ishikawa, Masatoshi, 2013.
High-speed manipulation of cable connector using a high-speed robot hand.
In: *2013 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Shenzhen, China, 12-14.12.2013, S. 1598–1604
DOI: 10.1109/ROBIO.2013.6739695
- Tharma et al. 2018** Tharma, Rajeeth; Winter, Roland; Eigner, Martin, 2018.
An Approach for the Implementation of the digital Twin in the Automotive Wiring Harness Field.
In: *Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*,
May, 21-24, 2018, S. 3023–3032
DOI: 10.21278/idc.2018.0188
- Trommnau et al. 2019** Trommnau, Jerome; Kühnle, Jens; Siegert, Jörg; Inderka, Robert; Bauernhansl, Thomas, 2019.
Overview of the State of the Art in the Production Process of Automotive Wire Harnesses, Current Research and Future Trends.
In: *52th CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Ljubljana, Slovenia, 12.06.2019-14.06.2019, S. 387–392
DOI: 10.1016/j.procir.2019.03.067
- Trommnau et al. 2020a** Trommnau, Jerome; Beck, Till; Müller, Andreas; Pesch, Andreas; Rüter, Karsten; Weiß, Bernd; Gerlach, Annika, 2020.
Gründe für die Automatisierung in der Fahrzeugleitungssatzfertigung und -montage.
Verfügbar unter:
https://www.arena2036.de/files/FinaleBilder/02_Projekte/Fokusprojekte/IILS/IILS_TP_Gr%C3%BCnde_f%C3%BCr_Automatisierung_White_Paper_Stand_2020_12_02.pdf
Zugriff am: 07.12.2020

- Trommnau et al. 2020b** Trommnau, Jerome; Frommknecht, Andreas; Siegert, Jörg; Wöbner, Johannes; Bauernhansl, Thomas, 2020.
Design for Automatic Assembly: A new Approach to Classify Limp Components.
In: *30th CIRP Design Conference*, Kruger National Park, South Africa,
05.05.2020-08.05.2020, S. 49–54
DOI: 10.1016/j.procir.2020.01.136
- Trommnau et al. 2020c** Trommnau, Jerome; Neb, Alexander; Cordes, Cord; Frommknecht, Andreas; Siegert, Jörg; Wöbner, Johannes; Bauernhansl, Thomas, 2020.
Limp Component Design for Automatic Assembly – Classification Rating System and Design Rules.
In: *53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems*, Chicago, USA,
01.07.2020-03.07.2020, S. 1139–1144
DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.157
- True Soltec Co., Ltd 2021** True Soltec Co., Ltd, 2021.
T-CAM1N: USB Camera Image Inspection System.
Verfügbar unter:
http://www.truesoltec.co.jp/product/upfile/pdf/0000000036/20150709104223_1.pdf
Zugriff am: 28.05.2021
- TSK Prüfsysteme GmbH 2020** TSK Prüfsysteme GmbH, 2020.
Adaptionssysteme.
Porta Westfalica.
Verfügbar unter: <https://www.t-s-k.de/de/produktgruppen/adaptionssysteme/>
Zugriff am: 04.02.2020
- Tunstel et al. 2020** Tunstel, Edward; Dani, Ashwin; Martinez, Carlos; Blakeslee, Brigid; Mendoza, Jeffrey; Saltus, Ryan; Trombetta, Daniel; Rotithor, Ghananeel; Fuhlbrigge, Tom; Lasko, Daniel; Wang, Jianjun, 2020.
Robotic Wire Pinning for Wire Harness Assembly Automation.
In: *2020 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, Boston, MA, USA,
06.07.2020 - 09.07.2020, S. 1208–1215
DOI: 10.1109/AIM43001.2020.9158905
- Uhlmann et al. 2018** Uhlmann, Eckart; Krüger, J., 2018.
Industrieroboter.
In: Grote, Karl-Heinrich; Bender, Beate; Göhlich, Dietmar (Hrsg.): *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 1655–1663
ISBN 978-3-662-54804-2
DOI: 10.1007/978-3-662-54805-9_126

- Ulrich 2001** Ulrich, Hans, 2001.
Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft.
In: Ulrich, Hans; Schwaninger, Markus (Hrsg.):
Systemorientiertes Management: Das Werk von Hans Ulrich.
Studienausg.
Bern: Haupt, S. 167–201
ISBN 978-3258063591
- Ulrich et al. 1976** Ulrich, Peter; Hill, Wilhelm, 1976. Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I).
Wissenschaftliches Studium Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt (7), S. 304–309
- Ünitek Elektrik A.Ş. 2018** Ünitek Elektrik A.Ş., 2018.
Spot taping automation.
Istanbul.
Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=-QcQzjJRDw&t=3s>
Zugriff am: 28.05.2021
- Universal Robots GmbH 2013** Universal Robots GmbH, 2013.
Technische Spezifikationen.
Verfügbar unter: https://www.sg-automation.at/doc/1904639/Techn+DatenUR10_DE.pdf
Zugriff am: 31.05.2021
- Universal Robots GmbH 2021** Universal Robots GmbH, 2021.
e-Series von Universal Robots.
Verfügbar unter: https://www.universal-robots.com/media/1802621/de-e_series_brochure_german.pdf
Zugriff am: 03.02.2021
- Vajna et al. 2018** Vajna, Sándor; Weber, Christian; Zeman, Klaus; Hehenberger, Peter; Gerhard, Detlef; Wartzack, Sandro, 2018.
CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung.
3., vollständig neu bearbeitete Auflage.
Berlin: Springer Vieweg.
ISBN 978-3-662-54624-6
DOI: 10.1007/978-3-662-54624-6
- VDI 2235 1987** VDI 2235:1987-10-00.
Wirtschaftliche Entscheidungen beim Konstruieren; Methoden und Hilfen: Economical decisions during design engineering process; methods and equipment

- Verl et al. 2008** Verl, Alexander; Fritsch, Dennis; Naumann, Martin; Ledermann, Thomas, 2008. Roboter verlegen Türdichtungen in der Automobilindustrie: Entwicklung eines Werkzeugs zum automatisierten Verlegen selbstklebender Türdichtungen.
VDI Berichte **2012**, S. 187–190
- Vögele 1998** Vögele, Gerald, 1998.
Mit Industrierobotern flexibel automatisierte Montage von Türabdichtungen für Kraftfahrzeuge.
Berlin, Heidelberg: Springer.
ISBN 978-3-540-64512-2
DOI: 10.1007/978-3-662-08785-5
- Vogel-Heuser 2014** Vogel-Heuser, Birgit, 2014.
Herausforderungen und Anforderungen aus Sicht der IT und der Automatisierungstechnik.
In: Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit (Hrsg.): *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik: Anwendung, Technologien, Migration*.
Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 37–48
ISBN 978-3-658-04681-1
- Walther 1985** Walther, Jörg, 1985.
Montage großvolumiger Produkte mit Industrierobotern.
Berlin, Heidelberg: Springer.
IPA-IAO Forschung und Praxis 88.
ISBN 978-3-662-08853-1
DOI: 10.1007/978-3-662-08853-1
- Warnecke et al. 1993** Warnecke, Hans-Jürgen; Emmerich, Herbert; Koller, Stefan, 1993. Flexible Solution for Wiring Harness Assembly with Industrial Robots.
CIRP Annals - Manufacturing Technology **42** (1), S. 25–27
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)62384-1
- Webb et al. 2010** Webb, D. P; Jaggernauth, W. A; Cottrill, M. C. W; Palmer, P. J; West, A. A; Conway, P. P., 2010. Design and construction of large-area flexible printed-circuit automotive electrical interconnection harnesses.
Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering **224** (6), S. 785–797
DOI: 10.1243/09544070JAUTO1175

- Wegener 2017** Wegener, Dieter, 2017.
Industrie 4.0 – Chancen und Herausforderungen für einen Global Player.
In: Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.2: Automatisierung*.
2.
Berlin, Heidelberg: Springer, S. 391–406
ISBN 978-3-662-53247-8
- Weik 2018** Weik, Hannes, 2018.
Gestaltungsregeln für „Design for Automation“: Einfacher ist besser.
Leinfelden-Echterdingen.
Verfügbar unter:
<https://industrieanzeiger.industrie.de/technik/automatisierung/einfacher-ist-besser/>
Zugriff am: 22.06.2019
- Wnuk et al. 2020** Wnuk, Markus; Hinze, Christoph; Lechler, Armin; Verl, Alexander, 2020.
Kinematic Multibody Model Generation of Deformable Linear Objects from Point Clouds.
In: *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, NV, USA (Virtual),
25.10.2020 - 29.10.2020, S. 9545–9552
- Wößner 1993** Wößner, Johannes F., 1993.
Automatische Montage von O-Ringen.
Berlin, Heidelberg: Springer.
IPA-IAO Forschung und Praxis 174.
ISBN 978-3-540-56657-1
DOI: 10.1007/978-3-642-47863-5
- Wößner 2003** Wößner, Johannes, 2003. Roboter bringt biegeschlaffe Teile in jede gewünschte Form.
Industrieanzeiger **125** (46), S. 46–47
- Wößner et al. 2014** Wößner, Johannes; Schrodi, Thomas, 2014. Erfolgreich produzieren am Standort Deutschland.
Maschinenmarkt. MM, das Industriemagazin **40**, S. 32–33
- YASKAWA 2020** YASKAWA, 2020.
Yaskawa: MOTOMAN Roboter.
Verfügbar unter: <https://www.yaskawa.de/produkte/roboter>
Zugriff am: 06.11.2020

- Yuan et al. 2016** Yuan, Qilong; Chen, I-Ming; Lembono, Teguh Santoso, 2016. An agile robot taping system – modeling, tool design, planning and execution.
Industrial Robot: An International Journal **43** (5), S. 503–512
DOI: 10.1108/IR-01-2016-0018
- Yumbla et al. 2020** Yumbla, Francisco; Abeyabas, Meseret; Luong, Tuan; Yi, June-Sup; Moon, Hyungpil, 2020.
Preliminary Connector Recognition System Based on Image Processing for Wire Harness Assembly Tasks.
In: *2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Busan, Korea (South), 13.10.2020 - 16.10.2020, S. 1146–1150
DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268291
- Zheng et al. 1991** Zheng, Yuan F; Pei, Run; Chen, Chichyang, 1991.
Strategies for automatic assembly of deformable objects.
In: *Proceedings of the 1991 International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, CA, USA, 9.4.1991-11.4.1991, S. 2598–2603
DOI: 10.1109/ROBOT.1991.132019

9 Anhang

9.1 Zusätzliche erläuternde Begriffe und Definitionen

Technische Anlage:

Eine technische Anlage dient zur Bewältigung definierter technischer Aufgaben und bezeichnet die Gesamtheit der dazu notwendigen Einrichtungen und Vorrichtungen. (DIN IEC 60060-351, S. 33) Beispielsweise zählt dazu ein Industrierobotersystem im Bereich der Automatisierungstechnik (DIN EN ISO 10218-1, S. 7f)

Fügen:

Fügen bezeichnet nach DIN 8593-0

[d]as auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt (DIN 8593-0, S. 3).

Fügen ist eine der sechs Hauptgruppen der Fertigungsverfahren (DIN 8580, S. 7)

Konstruieren:

Konstruieren bezeichnet die maßgebliche Gestaltung der Form und des Zusammenbaus technischer Objekte aufgrund von Überlegungen, Entwürfen oder technischer Berechnungen (Duden 2020).

9.2 Weitere Erläuterungen zu den Bausteinen einer Methodik

Wie in Kapitel 5.1 erläutert zählen Laufenberg (1996, S. 6ff) und Heyn (1999, S. 5ff) die Bausteine Modell, Hilfsmittel und Methode zum System einer Methodik.

Zum eindeutigen Verständnis des Begriffs der Methodik werden im Folgenden die Begriffe Modell und Methode näher erläutert.

Modell:

Modelle dienen zur Abbildung eines Ausschnitts der Wirklichkeit in abstrahierter Form. Dies kann beispielsweise mittels Überführung von Systemen oder Prozessen in eine andere begriffliche oder gegenständliche Form realisiert werden. Die Überführung basiert auf der Anwendung bekannter Gesetzmäßigkeiten sowie der Identifikation oder dem Treffen von Annahmen. Ziel des Modells ist es, das System oder den Prozess bezüglich bestehender Problem- oder Aufgabenstellungen hinreichend genau abzubilden. Damit besitzt das Modell immer eine reduzierte Anzahl an Attributen im Vergleich zur betrachteten Wirklichkeit. Stachowiak (1973, S. 131ff) fasst die erläuterten Modellmerkmale in drei Hauptmerkmalen zusammen. Diese umfassen das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal sowie das pragmatische Merkmal. Anhand am Modell durchgeführter Versuche wird versucht, Rückschlüsse auf das reale Verhalten des Systems oder des Prozesses abzuleiten. (Stachowiak 1973, S. 131ff; Patzak 1982, S. 307ff; Heyn 1999, S. 5; Becker et al. 2012, S. 1ff; DIN IEC 60060-351, S. 29; Fleischmann et al. 2018, S. 19ff)

Patzak (1982, S. 309f) definiert darüber hinaus Anforderungen an ein Modell. Diese inkludieren die empirische und formale Richtigkeit des Modells sowie dessen produktiven, handhabbaren und nicht aufwändigen Einsatz.

Bezogen auf ein Produkt werden beispielsweise Konstruktionsmodelle und Attribute genutzt, um dasselbe darzustellen und zu beschreiben. Attribute sind dabei produktbeschreibende Merkmale in Form von Maßen, Symbolen oder Texten zur Vervollständigung der Produktdefinition. (DIN EN ISO 10209, S. 55f)

Method:

Unter einer Methode versteht sich ein Verfahren zur Erlangung von Erkenntnissen oder Ergebnissen. Eine Methode baut auf einem Regelsystem auf und beschreibt ein planmäßiges Vorgehen. (Brockhaus 2020; Duden 2020) Nach der Zusammenfassung von Laufenberg (1996, S. 9) ist eine Methode zielgerichtet, zweckgerichtet, regelbasiert, planmäßig und situationsabhängig. Diese Merkmale decken sich mit den von Albers et al. (2001) genannten drei wesentlichen Aspekten des methodischen Vorgehens im Kontext der Produktentwicklung. Diese sind ein geplantes Vorgehen, ein geordneter Ablauf der Prozessschritte sowie die Zielgerichtetheit des methodischen Vorgehens.

9.3 Ergänzende Attributerläuterungen

Im Kontext der Prozessschrittzuordnung spezifischer Einflussfaktoren (siehe Kapitel 5.3.3) werden im Folgenden für die Attribute Formänderung, Fügebewegung sowie Fixierungen zusätzliche Informationen bereitgestellt.

9.3.1 Formänderung

Neben den von Jiménez (2012, S. 154f) aufgezeigten möglichen Formänderungen forminstabiler Einzelteile im Kontext der automatisierten Montage zeigen Seliger et al. (2003), Reiff-Stephan (2005) und Fantoni et al. (2014) unterschiedliche Arten physikalischer Greifprinzipien, Einflusskriterien zur Greiferauswahl sowie Herausforderungen und Probleme beim Greifen forminstabiler Einzelteile auf und heben die geometrische Form des Einzelteils als relevanten Einflussfaktor heraus.

9.3.2 Fügebewegung

Die Boothroyd & Dewhurst Methode unterscheidet drei Arten von Fügebewegungen. Diese differenzieren zwischen vertikalen Fügebewegungen von oben nach unten oder umgekehrt sowie von einer vertikalen Fügebewegung abweichende Fügebewegungen. Ähnliche Unterscheidungen treffen die Lucas Methode, die Hitachi AEM die Westinghouse Methode sowie die Automatisierungsaufwandsermittlung nach Deutschländer (1989). Die ProKon Methode berücksichtigt ausschließlich das Abweichen von der definierten Hauptfügerichtung zum Einfügen des Einzelteils.

Als weitere Unterscheidung von Fügebewegungen führen Lotter et al. (2016, S. 18) im Kontext der produktionsgerechten Produktgestaltung noch die Gruppe der mehrachsigen Fügebewegungen auf. Das Einzelteil kann hierbei nur mittels des Verfahrens des Industrieroboters entlang mehrerer aufeinanderfolgender Achsen eines festgelegten Koordinatensystems gefügt werden.

Insbesondere Fügeprozesse mit forminstabilen Einzelteilen bedingen das Verfahren des Industrieroboters entlang einer festgelegten Bahn. Beispiele hierfür zeigt Wößner (1993; 2003) für die automatisierte Montage von O-Ringen und die automatisierte Montage von Dichtschnüren. Weiterhin zeigen Vögele (1998) und Verl et al. (2008) dies im Bereich des automatisierten Montierens von Türdichtungen.

9.3.3 Fixierungen

Die Boothroyd & Dewhurst Methode unterscheidet bei manuellen und robotergestützten Montageprozessen zwischen direkt im Anschluss an die Fügeoperation auszuführenden und separat im Nachgang auszuführenden Befestigungsoperationen.

Die Klasse der direkt auszuführenden manuellen Befestigungsoperationen differenziert zwischen nicht-Schraubprozessen wie Schnappverbindungen und Steckverbindungen, Schaffung der Verbindung durch plastische Deformation mittels Biegung oder Torsion sowie Niet- oder Schraubprozessen.

Die separat im Nachgang auszuführenden manuellen Befestigungsoperationen unterscheiden zwischen einer Befestigung durch Biegung, Nieten, Schrauben, großflächiger plastischer Deformation, Reibschweißen, Lötten, Schweißen und Kleben.

Die direkt im Anschluss auszuführenden automatischen Befestigungsoperationen grenzen unter anderem die Gruppen Schnapp- oder Steckverbindung, einfache Drück- oder Drehprozesse sowie Schraubprozesse voneinander ab.

Zu den separat im Nachgang auszuführenden Befestigungsoperationen zählen unter anderem Schnapp- oder Steckverbindungen, einfache Drück- oder Drehprozesse, Schraubprozesse, Lötprozesse sowie das Aufbringen von Flüssigkeiten oder Klebstoffen.

Die Lucas Methode unterscheidet, wie die Boothroyd & Dewhurst Methode, zwischen sich direkt an die Fügeoperation anschließende Befestigungsoperationen und separat im Nachgang auszuführenden Befestigungsoperationen. Die Lucas Methode führt sowohl für die manuelle als auch automatische Montage dieselben Operationen auf.

Zu den sich direkt anschließenden Befestigungsoperationen zählen selbstsichernde Befestigungsoperationen wie Schnapp- und Steckverbindungen, Schraub- und Nietprozesse sowie die Schaffung der Verbindung durch plastische Deformation.

Die Lucas Methode bezeichnet die separat im Nachgang auszuführenden Befestigungsoperationen als „Nicht-Montageprozesse“. Diese inkludieren weitere Schraubprozesse, spätere mechanische Deformation, Lötten und Schweißen sowie Kleben und Punktschweißen.

Die Hitachi AEM vergibt für alle zusätzlichen Fixierungsprozesse, abweichend von einer vertikalen Abwärtsbewegung, Strafpunkte. Beispielsweise umfasst dies Schraub- oder Schweißprozesse.

Die Westinghouse Methode differenziert innerhalb der Befestigungsmethoden zwischen Schnappverbindungen, Aufbringen von Halteringen, Biegelaschen, Schrauben, Schraubenmutter, Nieten, Lötten, Schweißen, Punktschweißen, Schmierungen und Kleben.

Die ProKon Methode unterscheidet manuelle Befestigungsoperationen wie Einrastvorgänge, Schraubprozesse, Löt- oder Schweißprozesse oder das Aufbringen von Medien wie beispielsweise Kleber.

Für die automatisierte Montage wird bei den Prozessen zur Befestigung unter anderem zwischen Verbindungsprozessen wie dem Verrasten, Klemmen, Verschränken oder Einpressen und Prozessen zum Aufbringen von Medien wie beispielsweise Kleber und Schraubprozessen unterschieden.

9.4 Validierungsdaten

9.4.1 Experteninterviewergebnisse zur Sensitivitätsanalyse

Tabelle 9-1: Automatisierungseignungseinschätzungen ausgewählter Fallbeispiele

		Automatisierungseignungseinschätzung / (%)						
		Fallbeispiel Nr.						
Grundbewegung	Experte	1	2	3	4	5	6	7
<i>Hinlangen</i>	1	25	50	75	50	25	50	50
	2	25	10	50	25	10	10	50
	3	75	10	25	10	10	10	10
	4	100	25	100	75	25	25	75
	5	50	25	75	25	10	50	50
	6	50	25	25	25	10	50	50
	7	25	50	50	50	25	50	25
	8	75	50	25	25	10	10	50
	9	50	25	50	25	10	10	25
<i>Greifen</i>	1	50	25	75	75	50	50	75
	2	25	10	10	75	10	10	50
	3	75	25	25	25	25	25	50
	4	100	50	100	100	10	10	75
	5	75	50	75	75	50	50	75
	6	75	50	75	75	25	50	75
	7	75	25	75	50	50	25	50
	8	100	25	75	75	25	10	50
	9	75	50	75	75	50	50	50
<i>Bringen</i>	1	100	50	50	50	10	50	100
	2	50	10	25	25	10	10	50
	3	75	25	25	10	10	10	10
	4	100	75	75	75	50	75	100

	5	75	50	10	100	75	75	100
	6	75	10	25	25	25	50	75
	7	100	25	50	50	10	25	100
	8	100	75	50	75	50	50	75
	9	75	50	25	25	10	10	50
<i>Fügen</i>	1	25	25	75	10	10	10	10
	2	50	10	75	10	10	10	10
	3	75	10	75	10	10	10	10
	4	100	25	100	75	75	75	75
	5	75	50	10	25	10	75	50
	6	100	10	50	10	10	50	75
	7	25	25	50	10	10	10	50
	8	50	25	25	10	10	10	50
	9	50	25	25	10	10	10	50
<i>Loslassen</i>	1	25	25	100	75	50	50	50
	2	25	75	75	25	25	25	75
	3	75	75	100	25	25	25	50
	4	100	75	100	50	50	50	100
	5	50	25	100	25	10	25	25
	6	25	25	100	25	25	50	10
	7	50	25	100	25	50	50	50
	8	25	25	100	75	50	50	50
	9	25	25	75	50	50	25	50

9.4.2 Instanzierte Modelle ausgewählter Fallbeispiele

Tabelle 9-2: Instanziiertes Modell des Fallbeispiels 2 entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α -& β -symmetrisch
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,x$ mm	$\pm x$ mm	-
<i>Fügen</i>	Biegesteifigkeit	forminstabil	eher forminstabil	eher formstabil	formstabil
	Montagepartner	$K_{Bs} > 0,05$	$0,05 > K_{Bs} > 0,03$	$0,03 > K_{Bs} > 0,001$	$K_{Bs} < 0,001$
<i>Loslassen</i>	Ausrichten	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
Festhalten	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

Tabelle 9-3: Instanziiertes Modell des Fallbeispiels 3 entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
<i>Greifen</i>	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α - & β -symmetrisch
	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,x$ mm	$\pm x$ mm	-
<i>Bringen</i>	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Montagepartner				
	Ausrichten	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
<i>Fügen</i>	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten nicht notwendig	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-
<i>Loslassen</i>					

Tabelle 9-4: Instanziiertes Modell des Fallbeispiels 4 entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α - & β -symmetrisch
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0, x$ mm	$\pm x$ mm	-
	Biegesteifigkeit Montagepartner	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
<i>Fügen</i>	Ausrichten Neugreifen	Ablegen-Ausrichten- Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
<i>Loslassen</i>	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten nicht notwendig	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

Tabelle 9-5: Instanziiertes Modell des Fallbeispiels 5 entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α - & β -symmetrisch
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,x$ mm	$\pm x$ mm	-
	Biegesteifigkeit Montagepartner	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
<i>Fügen</i>	Ausrichten	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
<i>Loslassen</i>	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten nicht notwendig	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

Tabelle 9-6: Instanziiertes Modell des Fallbeispiels 6 entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α - & β -symmetrisch
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0, x$ mm	$\pm x$ mm	-
<i>Fügen</i>	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Montagepartner	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
<i>Loslassen</i>	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

Tabelle 9-7: Instanziiertes Modell des Fallbeispiels 7 entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α - & β -symmetrisch
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,x$ mm	$\pm x$ mm	-
	Biegesteifigkeit Montagepartner	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
<i>Fügen</i>	Ausrichten	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
<i>Loslassen</i>	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten nicht notwendig	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

9.4.3 Biegesteifigkeitskennzahlbestimmung des Kabelbündels

Zur Bestimmung der Biegesteifigkeitskennzahl K_{Bs} des 50 cm langen Kabelbündels wird die maximale Durchbiegung mit dem in Abbildung 56 dargestellten Messaufbau nach Abbildung 33 ermittelt. Unter Verwendung von Formel 5 errechnet sich demnach eine Biegesteifigkeitskennzahl K_{Bs} von 0,18 für das Kabelbündel.

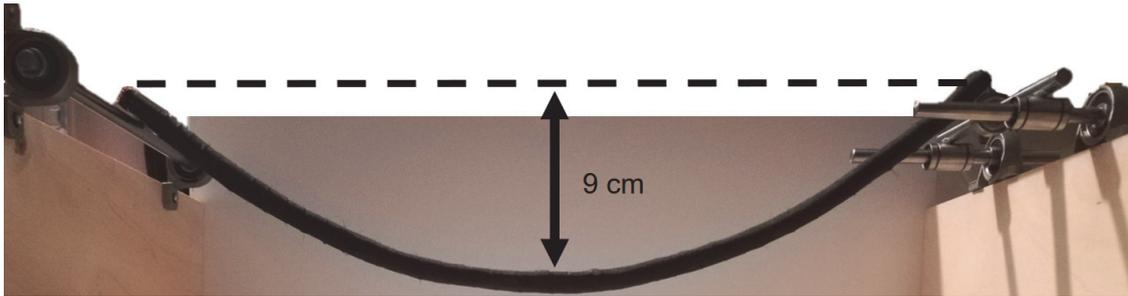


Abbildung 56: Biegesteifigkeitskennzahlbestimmung K_{Bs} des Kabelbündels

9.4.4 Instanzierte Modelle der Designvarianten

Tabelle 9-8: Instanziiertes Modell der Designvariante 1 entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α -& β -symmetrisch
	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,x$ mm	$\pm x$ mm	-
<i>Fügen</i>	Biegesteifigkeit Montagepartner	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Ausrichten	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
<i>Loslassen</i>	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten nicht notwendig	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

Tabelle 9-9: Instanziiertes Modell der Designvariante 2 entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlängen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α - & β -symmetrisch
<i>Bringen</i>	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,x$ mm	$\pm x$ mm	-
<i>Fügen</i>	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Montagepartner	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
<i>Loslassen</i>	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten nicht notwendig	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

9.4.5 Instanziiertes Modell der Expertendesignvariante

Tabelle 9-10: Instanziiertes Modell der Expertendesignvariante entsprechend entwickelter Methodik

Grundbewegung	Attribut	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Ausprägung 4
<i>Hinlangen</i>	Geometrische Klasse	würfelförmig $L/B < 10$ & $L/H < 10$	flach $L/B < 10$ & $L/H > 10$	lang-geschlossen $L/B > 10$ & $L/H > 10$	lang-offen $L/B > 10$ & $L/H > 10$
	Biegesteifigkeit	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Materialbereitstellung	Meterware	Einzelteil	-	-
	Formänderung	jede Dimension	zwei Dimensionen	eine Dimension	-
<i>Greifen</i>	Verformung	plastisch	elastisch-plastisch	elastisch	seilartig
	Symmetrie	asymmetrisch	β -symmetrisch	α -symmetrisch	α -& β -symmetrisch
	Positioniergenauigkeit	$\pm 0,0x$ mm	$\pm 0,x$ mm	$\pm x$ mm	-
<i>Fügen</i>	Biegesteifigkeit Montagepartner	forminstabil $K_{Bs} > 0,05$	eher forminstabil $0,05 > K_{Bs} > 0,03$	eher formstabil $0,03 > K_{Bs} > 0,001$	formstabil $K_{Bs} < 0,001$
	Ausrichten	Ablegen-Ausrichten-Neugreifen	6-DOF Roboter	Ausrichten nicht nötig	-
	Fügebewegung	sensorgeführt	bahngesteuert	mehrachsig	einachsig
	Positionierhilfen	nicht vorhanden	vorhanden	-	-
<i>Loslassen</i>	Fixierungen	mehrere zusätzliche Fixierungen notwendig	eine Fixierung notwendig	keine zusätzliche Fixierung notwendig	-
	Festhalten	muss festgehalten werden	festhalten nicht notwendig	-	-
	Nachfolgende Fügeprozesse	werden behindert	keine Behinderung	-	-

